

Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta



Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta

Ari Lampinen

Julkaisusarja	B: 17
Vastaava toimittaja	YTT Anna Liisa Westman
Kirjoittaja	Ari Lampinen
Sivuntaitto	Tampereen Yliopistopaino – Juvenes Print Oy
Kansi	Olga Pletcheva Nina Määttä Tampereen Yliopistopaino – Juvenes Print Oy
Kannen kuva	Ari Lampinen

ISBN 978-951-604-100-4
ISBN 978-951-604-101-1 (pdf)
ISSN 1797-3821
ISSN 1797-383X (pdf)

Copyright Ari Lampinen

Paino Tampereen Yliopistopaino – Juvenes Print Oy,
Tampere 2009



Valokuvat: Ari Lampinen (ellei muuta ole kuvatekstissä mainittu).
Kuvanottovuosi on merkittynä kuvatekstin lopussa.

Kansikuvat:

1. Lihasvoiman käyttöä energiapuun kuljetuksessa Nepalissa. Kävelijän molemmilla puolilla makaa puhveleita, jotka toimivat eläinvoiman lähteenä ja tuottavat lantaa biokaasureaktoreiden raaka-aineeksi. [1995]
2. Turun Rautateollisuus ja Vaunutehdas Oy:n valmistama puukäyttöinen Kullervo-lokomobiili vuosimallia 1911 sekä IVO:n 1980-luvun prototyypisähköauto tekniikan museossa Helsingissä. [2006]
3. Nantes'n kaupungissa 1800-luvun lopulla käytössä ollut paineilmaraitiovaunu Pariisin liikennetekniikan museossa. [2007]
4. Transrapidin magneettinen MAGLEV-leijujuna Speyerin teknologiamuseossa Saksassa. [2007]
5. Brasilialaisen Embraer-yhtiön sarjavalmistuksessa oleva etanolikäyttöinen (E100) Ipanema-merkinen lentokone. [© Embraer 2004].
6. Biodieselin kuljetukseen tarkoitettu kalifornialaisen biodieselosuuskunnan biodieselkäyttöinen (B100) tankkiauto uusiutuvan energian messutapahtumassa Hoplandissa Kaliforniassa. [2004]
7. Tukholman liikenteen (SL) biokaasukäyttöinen (CBG100) Volvo-bussi (vasemmalla) ja polttokennolla varustettu vetykäyttöinen (CH100) MB-bussi (oikealla) bussivarikolla. [2005]
8. Ruotsissa liikennöivä biokaasukäyttöinen (CBG100) juna Linköpingin asemalla. [2006]

**”Bensan puute!
Se saa miehen kyyneliin!”**

*- Kenraali (myöh. marsalkka) Erwin Rommel kirjeessä vaimolleen
Pohjois-Afrikan sodan aikana vuonna 1942 (Yergin 1991)*

ESIPUHE

Tämä julkaisu on ensimmäinen suomenkielinen yleisesitys uusiutuvien energiamuotojen käyttömahdollisuuksista liikenteessä. Tarkoituksena on palvella sekä yleistä tiedon tarvetta tällä alalla kansallisesti että erityisesti valmisteilla olevaa uusiutuvien liikenteen energiamuotojen koulutus- ja tutkimushanketta Pohjois-Karjalassa.

Julkaistu on tehty osana Pohjois-Karjalan maakuntaliiton tulevaisuusrahaston rahoittamaa hanketta ”Liikennebiokaasun ja muiden liikenteen uusiutuvien energialähteiden ja investointien kehittämishanke – osa 1: valmisteluvaihe”. Tulevaisuusrahaston lisäksi hanketta rahoittivat Joensuun Seudun Jätehuolto Oy, Kontiolahden kunta sekä Joensuun Seudun Kehittämisyhtiö Josek Oy. Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu toimi hankkepartnerina ja Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulun koordinoima Pohjoisen periferiaohjelman MicrE-hanke osallistui tämän julkaisun rahoittamiseen. Hankkeen ohjausryhmässä olivat Erkki Kettunen (pj.) Joensuun Seudun Jätehuolto Oy:stä, Pasi Pitkänen Pohjois-Karjalan maakuntaliitosta, Kimmo Kurkko Josek Oy:stä, Antti Suontama Kontiolahden kunnasta ja Ville Kuittinen Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulusta. Hankkeen hallinnoija ja toteuttaja oli Joensuun Seudun Jätehuolto Oy. Projektipäällikkönä toimi Ari Lampinen ja projektisihteerinä Anu Laakkonen.

Elokuussa 2009
Ari Lampinen

SISÄLTÖ

ESIPUHE.....	7
1. JOHDANTO	17
2. LIIKENTEEN ENERGIANLÄHTEIDEN HISTORIALLINEN TIEKARTTA	21
2.1. I SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: RUOKA (2.000.000 eaa)	23
2.1.1 Lihaset.....	25
2.2. GRAVITAATIO (2.000.000 eaa)	27
2.3. VESIVOIMA (60.000 eaa).....	28
2.4. VUOROVESIVOIMA (60.000 eaa).....	30
2.5. MERIVIRTAVOIMA (60.000 eaa).....	31
2.6. II SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: REHU (6000 eaa).....	32
2.7. TUULIVOIMA (3500 eaa).....	34
2.7.1. Vesiliikenne	34
2.7.2. Ilmaliikenne	36
2.7.3. Maaliikenne	42
2.7.4. Avaruus-, planeetta- ja kuuliikenne	43
2.8. MAAPALLON LIIKE-ENERGIA (3000 eaa).....	44
2.9. III SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: RUUDIT (900-LUKU)	45
2.9.1. Rakettimoottori	45
2.9.1.1 Kiinteät rakettipolttoaineet (ruudit)	49
2.9.1.2. Nestemäiset rakettipolttoaineet	49
2.9.1.3. Kaasumaiset rakettipolttoaineet	51
2.9.1.4. Plasma	52
2.9.1.5. Aurinkovoima ja ydinvoima	52
2.9.1.6. Antimateria	53
2.9.2. Ruudit muissa moottorityypeissä	53
2.10. MEKAANINEN VOIMA (1600-luku)	54
2.11. IV SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: PUU JA PUUHIILI (1700-LUKU).....	56
2.11.1. Höyrykone	59
2.11.2. Kuumailmakoneet ja kuumakaasukoneet	65
2.11.3. Höyryturbiini	67
2.11.4. Muihin kiertoaineisiin perustuvat koneet ja turbiinit.....	69
2.12. V SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: ELÄIN- JA IHMISPERÄISET KIINTEÄT BIOPOLTTOAINEET (1800-LUKU).....	70
2.13. KIVIHIIILI, KOKSI JA TURVE (1700-LUKU)	70
2.14. VI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: VETY (1700-LUKU)	75
2.14.1. Polttomoottori	77
2.14.1.1. Atmosfääriset	77
2.14.1.2. Paineistetut 4-tahtiset kipinäsytytteiset	79
2.14.1.3. Paineistetut 2-tahtiset kipinäsytytteiset	82
2.14.1.4. Puristusytytteiset	84
2.14.1.5. Kiertomäntämoottorit.....	87
2.14.2. Polttokenno	88

2.15.	VII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: PUUKAASU JA MUUT TERMISELLÄ KAASUTUKSELLA VALMISTETTAVAT BIOMASSAKAASUT (1800-LUKU)	91
2.15.1.	Kaasuturbiini	102
2.15.2.	Suihkumoottorit	104
2.16.	VIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: TÄRPÄTTI, TERVA, HARTSI JA PYROLYYSIÖLJY (1800-LUKU)	108
2.17.	IX SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: ETANOLI TÄRKKELYS- JA SOKERIKASVEISTA (1800-LUKU)	110
2.18.	X SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: METANOLI (1800-LUKU)	119
2.19.	XI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: ELÄINRASVAT JA KASVIÖLJYT (1800-LUKU).....	121
2.20.	SÄHKÖ (1800-LUKU).....	123
2.20.1.	Sähkömoottori, -akku ja kondensaattori.....	131
2.20.2.	Hydraulimoottori ja -akku	134
2.20.3.	Sähköhybridit	134
2.20.4.	Sähköinen viestintä	137
2.21.	PNEUMAATTINEN VOIMA (1800-LUKU).....	138
2.21.1.	Paineilma-ajoneuvot.....	138
2.21.2.	Alipaineajoneuvot.....	141
2.21.3.	Painehöyryajoneuvot.....	141
2.21.4.	Painekaasuajoneuvot.....	142
2.22.	XII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: NESTEMÄISET EETTERIT (1800-LUKU).....	143
2.23.	LÄMPÖAKUT (1800-LUKU)	144
2.24.	RAAKAÖLJY, ÖLJYLIUSKE JA ÖLJYHIEKKA (1800-LUKU).....	146
2.25.	XIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: ETANOLI LIGNOSELLULOOSAKASVEISTA (1800-LUKU).....	148
2.25.1.	Vahvahappohydrolyysi	148
2.25.2.	Sulfiittisellulipeä.....	149
2.25.3.	Heikkohappohydrolyysi	156
2.25.4.	Entsyymihydrolyysi.....	157
2.26.	EPÄORGAANISET POLTTOAINEET (1800-LUKU).....	158
2.27.	XIV SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: TERMINEN BIOMETAANI (1800-LUKU).....	160
2.28.	XV SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIOBENSIINI (1900-LUKU).....	162
2.28.1.	Synteettiset heterogeeniset polttoaineet	162
2.28.2.	Suora nesteytys	164
2.28.3.	Kaasutus pohjaiset prosessit	165
2.29.	XVI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIODIESEL (1900-LUKU)	166
2.30.	XVII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIOPETROLI (1900-LUKU).....	167
2.31.	XVIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIOKEROSEINI (1900-LUKU).....	168
2.32.	XIX SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIONESTEKAASU (1900-LUKU).....	168

2.33.	XX SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: PROPANOLI, BUTANOLI JA MUUT KORKEAMMAT ALKOHOLIT (1900-LUKU).....	169
2.34.	XXI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: BODIESEL (1900-LUKU).....	170
2.35.	MAAKAASU JA MUUT FOSSIILISET METAANIRESURSSIT (1900-LUKU)	173
2.36.	XXII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: BIOKAASU (1900-LUKU)	175
2.37.	YDINVOIMA (1900-LUKU).....	178
2.38.	AURINKOENERGIA (1900-LUKU)	180
2.39.	FOTONIVOIMA JA AURINKOTUULIVOIMA (1900-LUKU).....	181
2.40.	MAGNETISMI (1900-LUKU).....	183
2.40.1.	MAGLEV-tekniikka	183
2.40.2.	MHD-moottori.....	185
2.40.3.	Maan magneetikentän voima	185
2.41.	XXIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: BIO-DME (2000-LUKU)...	185
2.42.	AALTOVOIMA (2000-LUKU).....	186
3.	LIIKENTEEN BIOPOLTTOAINEET JA MUUT UUSIUTUVAT LIIKENTEEN VOIMANLÄHTEET SEKÄ HIILIVAPAAT UUSIUTUMATTOMAT POLTTOAINEET	188
3.1.	KIINTEÄT LIIKENNEPOLTTOAINEET	188
3.1.1.	Sokerit, tärkkelys, proteiinit ja glyseridit (ruoka).....	189
3.1.2.	Selluloosa ja hemiselluloosat (rehu)	191
3.1.3.	Muut hiilihydraatit	192
3.1.4.	Lignoselluloosa ja ligniini (puu, olki, ruohokasvit)	192
3.1.5.	Puuhiili ja puuhiilipöly	193
3.1.6.	Muut orgaaniset yhdisteet	194
3.1.7.	Kiinteiden polttoaineiden liuokset ja emulsiot ja pölyt	194
3.1.8.	Boorihydritit ja muut vetysuolat	194
3.1.9.	Ruudit.....	195
3.1.10.	Metallit ja metalliyhdisteet	197
3.1.11.	Muut epäorgaaniset yhdisteet	198
3.1.12.	Rikki	198
3.1.13.	Mikrobit.....	198
3.2.	NESTEMÄISET LIIKENNEPOLTTOAINEET	199
3.2.1.	Alkoholit.....	199
3.2.1.1.	Metanoli.....	199
3.2.1.2.	Etanoli	202
3.2.1.3.	Propanoli.....	209
3.2.1.4.	Butanoli	209
3.2.1.5.	2,3-Butandioli	210
3.2.1.6.	Muut alkoholit ja sikunaöljy	210
3.2.2.	Eetterit.....	210
3.2.2.1.	Dietyylieetteri.....	211
3.2.2.2.	MTBE	211
3.2.2.3.	ETBE.....	212
3.2.2.4.	TAME	212
3.2.2.5.	TAAE	212
3.2.2.6.	Muut eetterit	212

3.2.3.	Kasviöljyt ja eläinrasvat (triglyseridit)	212
3.2.4.	Biodieselit	214
3.2.5.	Muut kemiallisilla konversioilla valmistettavat biodieselpolttoaineet	217
3.2.6.	Emulsiopolttoaineet	217
3.2.7.	Tärpähti ja puubentsoli	217
3.2.8.	Pihka ja terva	218
3.2.9.	Mustalipeä ja sulfiittilipeä	219
3.2.10.	Synteettiset biobensiinit	219
3.2.11.	Synteettinen bionafta	220
3.2.12.	Synteettiset biokerosiinit ja biopetrolit	221
3.2.13.	Synteettiset biodieselit	222
3.2.14.	Orgaaniset ja epäorgaaniset metalliyhdisteet	222
3.2.15.	Muut orgaaniset yhdisteet	223
3.2.15.1.	Nitrometaani ja muut nitroalkaanit	223
3.2.15.2.	Alkaanihydratsiinit	224
3.2.15.3.	Tolueeni, symeeni ja muut aromaattiset hiilivedyt	224
3.2.15.4.	Iso-oktaani ja muut haaroittuneet alkaanit	225
3.2.15.5.	MeTHF ja P-series-polttoaineet	225
3.2.15.6.	Muita orgaanisia yhdisteitä	225
3.2.16.	Epäorgaaniset yhdisteet	226
3.2.16.1.	Hydratsiini	226
3.2.16.2.	Vetyperoksidi	227
3.2.16.3.	Muut epäorgaaniset nesteet	228
3.2.17.	Nanotipat	228
3.3.	KAASUMAISET LIIKENNEPOLTTOAINEET	228
3.3.1.	Vety	228
3.3.2.	Metaani, biokaasu ja SBG	231
3.3.3.	Hytaani	238
3.3.4.	Hiilimonoksidi	239
3.3.5.	Tuotekaasu, kaupunkikaasu, valokaasu, generaattorikaasu, puukaasu ja olkikaasu	239
3.3.6.	Vesikaasu, ilmakaasu, voimakaasu ja masuunikaasu	240
3.3.7.	Synteetikaasu	241
3.3.8.	Hiilidioksidi ja savukaasu	242
3.3.9.	Synteettinen bionestekaasu (bio-LPG), bio-propaani ja bio-butaani	242
3.3.10.	Dimetyylieetteri (DME)	244
3.3.11.	Etyyni (asetyleeni)	245
3.3.12.	Muut orgaaniset kaasut	245
3.3.13.	Ammoniakki	245
3.3.14.	Muut epäorgaaniset kaasut	246
3.3.15.	Paineilma ja painekaasut	247
3.3.16.	Nostekaasut	248
3.3.17.	Plasman tuotekaasut	248
3.4.	LIIKENNEPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIEN VERTAILUA	249
4.	LIIKENTEEN UE-POLTTOAINEIDEN RESURSSIT	250
4.1.	PRIMÄÄRIBIOENERGIAN LÄHTEET JA NIIDEN RESURSSIT	251
4.1.1.	Globaali katsaus	251
4.1.2.	Puu Suomessa	255

4.1.3.	Peltokasvit Suomessa.....	256
4.1.4.	Biojätteet Suomessa.....	256
4.1.5.	Mikrolevät ja muut mikrobit.....	257
4.1.6.	Primääribioenergiaresurssien käytön priorisointi.....	257
4.2.	MUIDEN UUSIUTUVIEN POLTTOAINEIDEN RESURSSIT.....	259
4.3.	FOSSIILISTEN POLTTOAINEIDEN RESURSSIT.....	261
5.	LIIKENTEEN UE-POLTTOAINEIDEN VALMISTUSMENETELMÄT.....	263
5.1.	MEKAANISET JA MUUT FYSIKAALISET KONVERSIOMENETELMÄT.....	263
5.2.	MIKROBIOLOGISET KONVERSIOMENETELMÄT.....	264
5.2.1.	Ruoansulatus.....	264
5.2.2.	Käyminen (alkoholifermentaatio).....	267
5.2.3.	Mädätys (happofermentaatio).....	270
5.2.4.	Mikrobiologinen vedyntuotanto.....	274
5.2.5.	Mikrobiologiset polttokennot ja mikrobiologinen elektrolyysi.....	275
5.2.6.	Muut mikrobien metaboliaan perustuvat biosynteesimenetelmät.....	275
5.3.	KEMIAALLISET KONVERSIOMENETELMÄT.....	276
5.3.1.	Vaihtoesteröinti.....	276
5.3.2.	Esteröinti.....	278
5.3.3.	Muita kemiallisia konversioita.....	278
5.4.	TERMOKEMIAALLISET KONVERSIOMENETELMÄT.....	279
5.4.1.	Hidas pyrolyysi.....	280
5.4.2.	Nopea pyrolyysi (P-polttoaineet).....	283
5.4.3.	Suora nesteytys (DL-polttoaineet).....	285
5.4.3.1.	Hydraus ja Bergius-synteesi (B-polttoaineet).....	285
5.4.4.	Kaasutus, höyryreformointi ja vesikaasuprosessi (G-polttoaineet).....	286
5.4.4.1.	Kaasutus.....	286
5.4.4.2.	Osittaishapetus.....	293
5.4.4.3.	Vesikaasuprosessi.....	293
5.4.4.4.	Höyryreformointi.....	293
5.4.4.5.	Vesi-kaasu-vaihtoreaktio.....	294
5.4.5.	Synteesikaasupohjaiset synteesit.....	294
5.4.5.1.	Metaanisynteesi (SBG).....	295
5.4.5.2.	Metanolisynteesi.....	296
5.4.5.3.	DME-synteesi.....	298
5.4.5.4.	MTG-synteesi ja muut katalyyttiset bensiinisynteesit.....	299
5.4.5.5.	FT-synteesi (Fischer-Tropch-synteesi).....	299
5.4.6.	Muita termokemiallisia konversioita.....	301
5.5.	SÄHKÖKEMIAALLISET KONVERSIOMENETELMÄT UE-POLTTOAINEIKSI.....	301
5.5.1.	Elektrolyysi.....	302
5.5.2.	Muut sähkökemialliset konversiot.....	303
5.6.	MONITUOTANTO JA BIOJALOSTAMOT.....	304
5.6.1.	Sulfaattiselutehtaat.....	307
5.6.2.	Sulfiittiselutehtaat.....	312
6.	AJONEUVOJEN POLTTOAINEJOUSTAVUUS.....	316
6.1.	MONOFUEL-AJONEUVOT.....	316
6.2.	FFV-AJONEUVOT.....	318
6.3.	BIFUEL-AJONEUVOT.....	322

6.4.	MULTIFUEL-AJONEUVOT	324
6.5.	DUALFUEL-AJONEUVOT	325
6.6.	HYBRIDIAJONEUVOT	326
6.7.	SÄHKÖÄ SUORAAN TAI EPÄSUORAAN KÄYTTÄVÄT AJONEUVOT	330
6.8.	KOMBIMOOTTORIAJONEUVOT	332
6.9.	MONIMOOTTORIAJONEUVOT	333
7.	LIIKKENEPOLTTOAINEIDEN JA NIIDEN KÄYTÖN YMPÄRISTÖ- JA TERVEYSVAIKUTUKSET	334
7.1.	PÄÄSTÖTÖN LIIKENNE JA ZEV-TEKNOLOGIAT	334
7.2.	KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT	336
7.3.	MUUT PÄÄSTÖT	341
7.3.1.	Typen oksidit (NO _x)	345
7.3.2.	Orgaaniset yhdisteet (HC:t ja muut VOCit)	345
7.3.3.	Hiilimonoksidi (CO)	347
7.3.4.	Hiukkaset (PM)	347
7.3.5.	Musta, valkoinen ja sininen savu	347
7.3.6.	Rikin oksidit (SO _x)	348
7.3.7.	Metallit	348
7.3.8.	Melu	348
7.4.	PÄÄSTÖJEN TEKNISET VÄHENTÄMISMAHDOLLISUUDET	349
7.4.1.	ZEV-ajoneuvot	349
7.4.2.	Biopolttoaineet	350
7.4.3.	Ajoneuvojen energiatehokkuuden parantaminen	350
7.4.4.	Katalysaattorit	353
7.4.5.	Muut tekniset toimenpiteet polttomootoriajoneuvoissa	354
7.5.	TERVEYSVAIKUTUKSET	356
8.	RAAKAÖLJYN PUMPPAUSHUIPPU	357
9.	LIIKENTEEN ENERGIANLÄHTEIDEN TULEVAISUUDEN TIEKARTTA	360
	LÄHTEET	368
	LIITTEET	391
Liite 1.	Sanasto, lyhenteet, määritelmät ja yksiköt	392
	a) Yleiset määritelmät	
	b) Kemikaaleja	
	c) Teho- ja energiayksiköitä ja muuntokertoimia	
	d) Muita yksiköitä	
	e) Säädökset	
Liite 2.	Liikenteen voimanlähteiden käyttöönoton kronologia	406
	Taulukko L2.1. Liikenteen voimanlähteiden ja energianlähteiden käyttöönoton kronologia	
Liite 3.	Liikenteen ympäristövaikutusten havaitsemisen ja rajoittamisen kronologia	421
Liite 4.	Energiaresursseja koskevat liitetaulukot	424
	Taulukko L4.1. Suomen puuvarat	
	Taulukko L4.2. Puun runkojen vuosikasvu ja teollisuuden käyttämän runkopuun energiasisältö vuonna 2003	
	Taulukko L4.3. Teollisen puunkäytön jätteiden energieresurssi vuonna 2003	

Liite 5.	Energiasisältöjä koskevat liitetaulukot.....	426
	Taulukko L5.1. Fossiilisten polttoaineiden LHV-lämpöarvoja	
	Taulukko L5.2. Biopolttoaineiden LHV-lämpöarvoja	
	Taulukko L5.3. Liikennepolttoaineiden energiasisältövertailuja	
Liite 6.	Polttoaineiden ominaisuuksia koskevat liitetaulukot	428
	Taulukko L6.1. Kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksia	
	Taulukko L6.2. Nestemäisten polttoaineiden ominaisuuksia	
	Taulukko L6.3. Kaasumaisten polttoaineiden ominaisuuksia	
	Taulukko L6.4. Energian varastointivälineiden ominaisuuksia	
	Taulukko L6.5. Eräiden ottomoottoreihin soveltuvien polttoaineiden fysikaalisia, kemiallisia ja moottoritekniisiä ominaisuuksia	
	Taulukko L6.6. Eräiden dieselmoottoreihin soveltuvien polttoaineiden fysikaalisia, kemiallisia ja moottoritekniisiä ominaisuuksia	
	Taulukko L6.7. Metanolin ominaisuuksia	
	Taulukko L6.8. Etanolin ominaisuuksia	
	Taulukko L6.9. Metaanin ominaisuuksia	
Liite 7.	Liikenteen energiankulutusta koskevat liitetaulukot	437
	Taulukko L7.1 Tieliikenteen energian kulutus ja päästöt Suomessa vuonna 2004	
	Taulukko L7.2 Liikenteen energian kulutus maailmassa, OECD-maissa, EU-25:ssa, Ruotsissa ja Suomessa vuonna 2004	

1 JOHDANTO

”The Stone Age did not end for lack of stone, and the Oil Age will end long before the world runs out of oil.”

- Sheikki Ahmed Zaki Yamani, Saudi-Arabian öljyministeri 1970-luvulla (The Economist-lehden pääkirjoitus 25.10.2003)

Uusiutuvan energian käyttö liikenteessä herättää nykyään runsaasti kiinnostusta toisaalta ilmastonmuutoksen ja muiden liikenteen ympäristövaikutusten vuoksi, ja toisaalta raakaöljyn ja maakaasun tuotantohuipun läheisyyden vuoksi.

Liikenne on erityisen haavoittuva raakaöljyn tuotantohuipun aiheuttaville markkinamuutoksille, sillä OECD-maissa raakaöljyn osuus kaiken liikenteen energiankulutuksesta on 97 % (IEA 2002). Maakaasun osuus liikenteen energiankulutuksesta on 2 % (IEA 2002), mikä myös aiheuttaa haavoittuvuuden: maakaasun tunnetut resurssit ovat raakaöljyn kanssa samaa luokkaa, josta syystä maakaasun tuotantohuippu tapahtuu vain muutama vuosi raakaöljyn jälkeen. Raakaöljyn korvaaminen maakaasulla on siten vain lyhytaikainen ratkaisu. Sekä raakaöljyn että maakaasun pumppaushuippu on lähiaikoina ollut lukuisien tutkimusten ja kirjojen aiheena. Luvussa 8 on niiden tuloksista koottu yhteenveto. Liitteessä 7 on liikenteen energiankulutusta koskevia taulukoita.

Raakaöljy ja maakaasu voidaan resurssien ja teknologian puolesta korvata joko uusiutuvilla energiamuodoilla tai kivihieillä ja ei-tavanomaisilla fossiililla energiamuodoilla, kuten luvun 4 resurssikatsauksessa ja luvun 5 teknologiakatsauksessa selviää. Näiden välinen valinta on ilmastonmuutoksen hallinnan kannalta ratkaisevaa. Kivihieleen ja ei-tavanomaisiin fossiilisiin siirryttäessä liikennepolttoaineiden elinkaaren ominaiskasvihuonekaasupäästöt kaksinkertaistuvat raakaöljypohjaisiin verrattuna. YK on ennakoinnut maailman autojen määrän kaksinkertaistuvan nykyisestä noin 800 miljoonasta 1600 miljoonaan autoon vuoteen 2030 mennessä (UNECE 2008), joten yhteisvaikutus olisi kasvihuonekaasupäästöjen nelinkertaistuminen, jos ajoneuvojen energiatehokkuus ja liikennemäärät ajoneuvoa kohti pysyvät nykyisellä tasolla. Liikenteen kasvihuonekaasupäästöt ovat jo tähän mennessä olleet vaikeimpia hallita ja ne ovat nousseet kaikista sektoreista eniten (Tapio 2002, IEA 2003, Lampinen & Jokinen 2006). Luvussa 7 annetaan katsaus liikenteen päästöongelmaan.

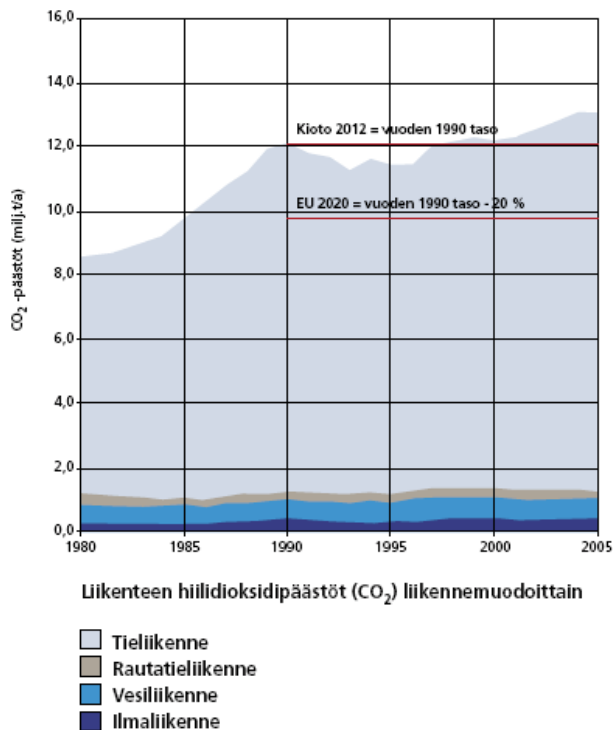
Tämän julkaisun sanomana on hyvä uutinen siitä, että uusiutuvilla energiamuodoilla voidaan erittäin monella tavalla ratkaista sekä liikenteen päästöongelma että liikenteen raakaöljyriippuvuuden ongelma. Luku 2 antaa katsauksen uusiutuvan liikenne-energian historialliseen tiekarttaan. Siitä selviää, että liikenteen biopolttoaineita on onnistuttu kehittämään jo 23 sukupolven verran (Kuva 1.1) ja niiden lisäksi on kehitetty lukuisia tapoja hyödyntää liikenteessä bioenergian lisäksi kaikkia muitakin uusiutuvia energialähteitä. Bioenergian avulla päästöjä voidaan polttoaineen elinkaarella pudottaa 50–90 % raakaöljypohjaisiin verrattuna. Bioenergiateknologioiden käyttöpotentiaali on suuri, vaikka otetaan huomioon sekä kokonaisresurssin rajallisuus että ekologisen ja sosiaalisen kestävyiden vaatimukset. Monilla muilla uusiutuvilla kuten aurinko- ja tuulienergialla voidaan päästä 100 % päästövähennyksiin polttoaineen elinkaarella käytännössä rajoittomien resurssien ekologisesti ja sosiaalisesti kestävästi. Näiden teknologioiden katsaus löytyy polttoaineiden ja voimanlähteiden osalta luvuista 3 sekä 5. Niiden käyttö edellyttää ajoneuvojen polttoainejoustavuuden kasvattamista. Lukuisista tähän käytettävissä olevista teknisistä ratkaisuista annetaan katsaus luvussa 6.



Kuva 1.1. Liikenteen biopolttoaineiden suuri diversiteetti.

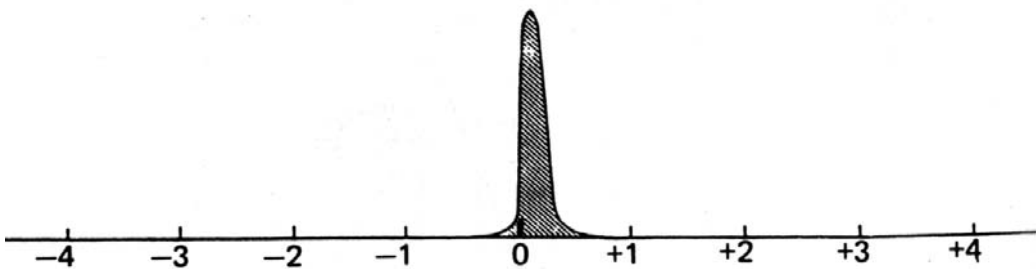
Uusiutuviin siirtyminen tarjoaa erittäin suuret liiketoimintamahdollisuudet. Liikenteen biopolttoaineiden markkinat EU:ssa on arvioitu olevan välillä 14–21 miljardia euroa vuonna 2010 (Ecofys 2005) ja ne kasvavat EU:n tavoitteiden mukaisesti vähintään kaksinkertaisiksi vuoteen 2020 mennessä. Se tarkoittaa koko Suomen metsäteollisuusklusterin suuruista uutta liiketoimintamahdollisuutta. Liikennebiopolttoaineiden käyttö kasvoi EU:ssa vuonna 2008 yli 28 % vuoden 2007 tasoon verrattuna ja ne kattoivat 3,3 % EU:n tieliikennepolttoaineiden kulutuksesta vastaten 10 miljoonan öljytonnin energiasisältöä (EurObserv'ER 2009).

Suomessa (Kuva 1.2) kuten muuallakin tieliikenne dominoi päästöjä ja on erityisen raakaöljyriippuva. Siitä syystä tässä julkaisussa on annettu selvästi suurin painoarvo tieliikenteen käsittelyyn ja sen sisällä erityisesti autoihin, kuitenkin lihasvoimaa ja moottoripyöriä unohtamatta. Tieliikenteen lisäksi julkaisu käsittelee kaikkia muitakin liikennemuotoja, siis raideliikennettä, vesiliikennettä, ilmaliikennettä, avaruusliikennettä ja viestiliikennettä. Kaikissa liikennemuodoissa on jo tähän mennessä käytetty hyvin monia uusiutuvia energianlähteitä ja kaikki liikenteen kulutus on katettavissa kaikki uusiutuvilla energiamuodoilla lukuisilla vaihtoehtoisilla teknologioilla ja resursseilla.



Kuva 1.2. Suomen liikenteen hiilidioksidipäästöt (LVM 2007). Tieliikenne dominoi päästöjä.

Öljyn (Heinberg 2003, Roberts 2006) ja maakaasun (Darley 2004) tuotantohuipun saavuttamisella tulee olemaan laajalle ulottuvia seurauksia yhteiskunnissa ja niiden välisissä suhteissa, mukaan lukien konfliktien yleistyminen (Klare 2001). Ihmiskunnan elinkaarissa fossiilisten polttoaineiden aika on mitättömän lyhyt aika (Kuva 1.3). Fossiilisten käyttö lopetetaan joka tapauksessa ja kyse on vain siitä, tapahtuuko se hallitusti vai hallitsematta kriisien kautta – eli johtaako se ekologisesti kehittyneeseen teknologiseen yhteiskuntaan vai palaamiseen kivikauteen. Eteneminen kriisien kautta on ihmiskunnan historian opetusten mukaan todennäköisempää. Silti ei voida lukea pois mahdollisuutta, että muutos tehtäisiin tietoisien poliittisten valintojen kautta niin yksilöiden kuin valtioidenkin tasolla, mihin sheikki Yamani tämän luvun alussa olevassa sitaatissa viittaa.¹ Liikennettä subventoidaan EU:ssa vuosittain 270–290 miljardilla eurolla, josta tieliikenne saa 125 miljardia euroa (EEA 2007). Tämän olemassa olevan rahoituksen ohjaaminen pois fossiilisen talouden tukemisesta ja siirtymiseen uusiutuvien energiamuotojen käyttöön olisi todella pitkälle riittävä merkki muutoksen poliittisesta hallinnasta. Käsillä olevan julkaisun tarkoituksena on tukea hallitun muutoksen polkua. Luvussa 9 on esitelty tiekartta, jota seuraten se olisi mahdollista.



Kuva 1.3. Fossiilisten polttoaineiden aikakausi ihmiskunnan elinkaarissa mittana vuosituhannet ennen ja jälkeen nykyajan. Muokattu: Hubbert (1976).

¹ OECD:n International Energy Agency:n pääekonomisti Fatih Birol muotoili asian The Independent -lehden 3.8.2009 numerossa olevan Steve Connorin artikkelin “Warning: Oil supplies are running out fast” 3.8.2009 haastattelussa seuraavasti: “One day we will run out of oil, it is not today or tomorrow, but one day we will run out of oil and we have to leave oil before oil leaves us, and we have to prepare ourselves for that day. The earlier we start, the better, because all of our economic and social system is based on oil, so to change from that will take a lot of time and a lot of money and we should take this issue very seriously.”

2 LIIKENTEEN ENERGIANLÄHTEIDEN HISTORIALLINEN TIEKARTTA

”There is nothing of importance that we are waiting for to add to the automobile. No startling inventions are called for and none probably are coming to solve the motor problem. All the mechanical essentials have been devised seemingly complete and ready at hand.”

- Gardner Hiscox vuonna 1900 (Hiscox 1900)

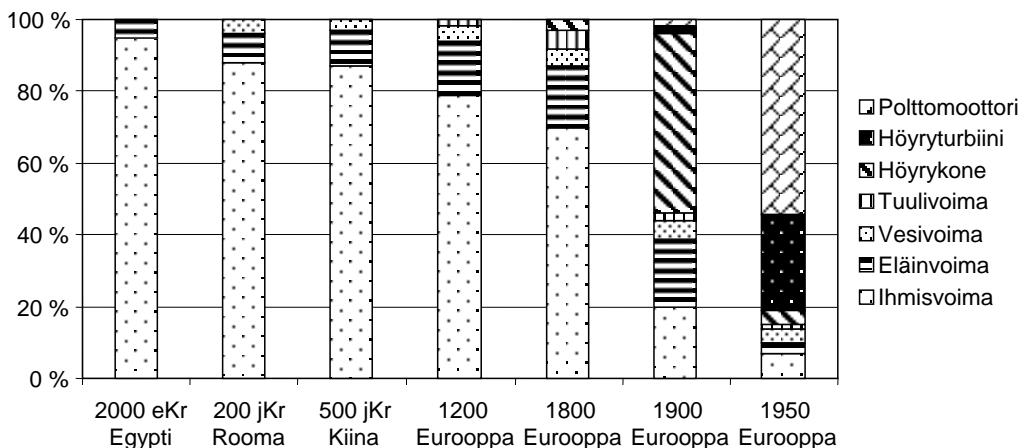
Yli vuosisata myöhemmin Gardner Hiscoxin voi arvioida olleen enemmän oikeassa kuin väärässä. Vuoden 1900 autoinsinööri pystyi ymmärtämään nykyautoja melko lyhyen tutustumisen jälkeen. Auton tärkeimmät komponentit ovat hänelle hyvin ymmärrettävissä ja vain 1970-luvun perua oleva mikroprosessoritekniikka olisi mahdotonta ymmärtää. Hänen olisi toisaalta vaikea käsittää, mihin suurin osa teknologioista on kadonnut ja toisaalta miksi niin vähän uutta on keksitty. Hän myös hämmästeli teknologian valmistajien ja merkkien vähyyttä vertaamalla 1890-luvun loppuun, jolloin yksistään alan johtavassa maassa Ranskassa oli 619 autonvalmistajaa (Hiscox 1900). Vuonna 1900 sekä moottorivaihtoehdoja että polttoainevaihtoehdoja oli paljon enemmän kuin nykyään ja toisaalta kaikki nykyisin merkittävästi käytettävät vaihtoehdot olivat tunnettuja jo vuonna 1900. Lähes kaikki nykyisessä keskustelussa ja tutkimuksessa olevat 21. vuosisadan uudet ja paremmat tulevaisuuden liikenneteknologiat olivat jo silloin tunnettuja. Ja ne, jotka eivät vielä vuonna 1900 olleet, ovat joka tapauksessa olleet tunnettuja jo vähintään 50 vuotta.

Tilanne on samantapainen kotien muussa tekniikassa. Taloustieteilijä Paul Krugman (1998) käsittelee kasvun harhoja kirjassaan ”Satunnainen teoreetikko” ja vertailee nykyisten kotien tekniikkaa 50 vuotta ja 100 vuotta taaksepäin. Puoli vuosisataa sitten kaikki nykykodeissa oleva teknologia, jälleen mikroprosessoreja lukuun ottamatta, oli tunnettua ja ainakin joissakin kodeissa käytössä. On ymmärrettävää, että monet nykyisin pitävät 1950-luvun kodinkoneita kehittymättöminä, mutta suurin muutos on tapahtunut niiden ulkonäössä ja automatiikassa, ei toimintaperiaatteissa, ja 50 vuoden takaa nykyhetken siirretyltä perheeltä ei kestäisi kauan ymmärtää nykykotien tekniikkaa. Mutta siirtämällä perhe 100 vuoden takaa 50 vuoden taakse olisi heille ällistytävä muutos ja lähes kaikki olisi uutta. Kehitys 1900-luvun alkupuoliskolla oli valtavan nopeaa verrattuna jälkipuoliskoon.

Vastaava ällistys autotekniikan puolella saataisiin siirtämällä insinööri 1800-luvun alusta 1900-luvun alkuun. Suurimmat kehitysaskleet tehtiin 1800-luvun aikana ja loput 1900-luvun ensimmäisellä puoliskolla kuten liitteenä 2 olevasta kronologiasta selviää, joskin kronologiasta nähdään myös huomattavan monen keksinnön periytyvän paljon kauempaakin historiasta ja esihistoriasta. Viimeiset 50 vuotta ovat olleet erittäin hitaan teknologisen kehityksen aikaa mikroprosessorien mahdollistamaa elektroniikan kehitystä lukuun ottamatta, vaikka mainonta on varsin onnistuneesti aikaansaanut vastakkaisen käsityksen. Mutta sekään ei ole uutta, vaan idea ”luovasta tuhoamisesta” eli tavaroiden korvaamisesta paljon ennen niiden teknisen käyttöiän loppumista uusilla hieman erinäköisillä, muttei välttämättä kehittyneemmällä tavaroilla, on lähtöisin 1940-luvulta taloustieteilijä Joseph Schumpeteriltä (1942).

Liikenteen moottori- ja polttoainetekniikan kehityksen hidastumisen luonteesta ja syistä ovat kirjoja kirjoittaneet esimerkiksi Kirsch (2000) sekä Black (2006). Tässä julkaisussa ei kovin paljon kyseistä asiaa käsitellä, mutta varsin laaja historiallinen katsaus on sisällytetty lukuun 2, jotta lukija saisi kuvan siitä valtavasta teknologisesta monimuotoisuudesta, joka on keksitty ja kehitetty, ja toisaalta ymmärtäisi, että nykyään käytetään vain hyvin pientä osaa tunnetuista teknologisista mahdollisuuksista. Se antanee uskoa siihen, että nykyisin akuutit teknologian käytön ympäristöongelmat todellakin voidaan ratkaista ja ratkaisuvaihtoehdoista ei ole puutetta siitä huolimatta, että aivan kaikki aiemmin käytetty teknologia ei siihen tarkoitukseen sovellu. Insinöörit ovat työnsä tehneet ja antaneet ratkaisujen avaimet. Niiden käyttöönotto ei ole teknologinen eikä luonnontieteellinen vaan yhteiskuntatieteellinen ja kasvatustieteellinen haaste, sillä hyvin monet autoteollisuuden piiristä ja tekniikan ammattilaisista ovat nykyään valmiit sanomaan kuten Gardner Hiscox vuonna 1900, erottamatta laajassa käytössä olevaa teknologiaa tunnetuista teknologisista mahdollisuuksista. Tässä kirjassa tuo erottelu tehdään. Luvussa 2 käydään läpi keskeiset kehitysaskleet, joiden kautta nykyiseen liikenteen energianlähteiden ja niitä hyödyntävien koneiden käyttöön on päädytty. Luku on jäsennetty energiaresurssien mukaan ja liikenteen mekaaniset voimanlähteet on esitetty sen energiaresurssin yhteydessä, jolla ensiksi kyseistä laitetta liikenteessä käytettiin. Esitys on tehty globaalilla perspektiivillä. Suomen tilanteesta puhuttaessa se mainitaan aina erikseen.

Kuva 2.1. esittää yhteiskunnan kaiken mekaanisen energian käyttövoiman osuuksien kehitystä viimeisen 4000 vuoden aikana lukuun ottamatta purjelaivoja, jotka olivat merkittävä tuulivoiman käyttäjä 1800-luvulle asti, ja geotermistä sekä muita suhteellisen niukasti käytettyjä primäärienergian lähteitä. Höyrykoneiden, höyryturbiinien ja polttomoottorien käyttämä primäärienergia on ollut valtaosin fossiilista, mutta osa siitä on ollut bioenergiaa. Höyryturbiini on ollut ja on nykyään merkittävin sähkön tuottaja noin 50 % osuudella globaalisti. Kaasuturbiini on nykyään toiseksi tärkein sähkön tuottaja, mutta sen käyttö oli vielä vuonna 1950 vähäistä. Liikenteen voimanlähteiden käytön kehitys on seurannut samoja linjoja vuoteen 1900 asti. Siitä eteenpäin polttomoottoreilla on ollut liikenteessä suurempi ja höyryturbiineilla pienempi osuus. Suomen maatalojen liikenne-energian ja muun energian käytön historiallisesta kehityksestä kerrotaan Lampisen ja Jokisen (2006) julkaisussa.



Kuva 2.1. Liikenteen ja muun mekaanisen energian käyttövoiman kapasiteetin osuudet 2000 eaa–1950 purjelaivoja lukuun ottamatta (Smil 1994).

Liitteessä 2 on kronologia tärkeimmistä kehitysaskelista. Sitä käytetään tässä luvussa runsaasti, mutta siihen ei erikseen viitata. Kronologiasta ilmenevät huomionarvoisimmat kehityspiirteet ovat:

1. Vanhan ajan suuri kontribuutio
2. Tieteen ja teknologisen innovatiivisuuden huippukausi oli 1800-luku ja 1900-luvun ensimmäinen puolisko
3. Viimeisten 50 vuoden aikana uusia perustavaa laatua olevia innovaatioita on tuotettu erittäin vähän
4. Hyvin pieni osa tunnetuista teknisistä innovaatioista on laajamittaisessa käytössä

Nykyiseen liikennebiopolttoainekeskusteluun liittyen huomattava asia on myös, että poliittisissa argumentaatioissa esitetyt pyrkimykset 2. tai 3. sukupolven liikennebiopolttoainekäyttöön ovat historiallisessa perspektiivissä huvittavia. Siitä syystä biopolttoainekäytön 23 sukupolvea on ilmoitettu käyttöönoton järjestyksessä alalukujen otsikoissa. Liite 3 sisältää kronologian liikenteen ympäristöongelmien havaitsemisesta ja poliittisista toimenpiteistä sen johdosta.

2.1. I SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: RUOKA (2.000.000 eaa)

Ihmislihasvoima (Kuva 2.2 ja Kansikuva 1) on ihmisen alkuperäinen liikenteen voimanlähde ja se on luonnollisesti edelleenkin kaikille ainut välttämätön voimanlähde, vaikkakin sen osuus kaikesta ihmiskunnan liikenteestä on nykyään pieni (Kuva 2.1). On makuasia, milloin ihmislajin katsotaan syntyneen ja siis 1. sukupolven liikenteen biopolttoaineet käyttöön otetuiksi. Liitteen 2 kronologiassa ajankohdaksi määritellään noin 2 miljoonaa vuotta eaa, jolloin nykyihmisen suvun ensimmäinen laji Homo Habilis katsotaan ilmaantuneeksi maailmaan.



Kuva 2.2. Nepalissa energiabiomassan kuljetus ihmislihasvoimalla aloitetaan varhaisessa iässä ja aluksi puiden lehdillä, jotka sopivat eläinvoiman polttoaineeksi rehuksi. Terveen aikuisen ihmisen energiantuotantoteho pitkäaikaisessa kävelyssä on 50–100 W ja lapsen 10 watin luokkaa. [1994]

Ihmislihaksen käyttämä primäärienergianlähteenä on alusta asti ollut sekä kiinteä että nestemäinen bioenergia (ruoka), joka on rajoittunut ihmisen aineenvaihdunnan johdosta seuraaviin kolmeen orgaaniseen yhdisteryhmään (Smil 1991):

- Osa hiilihydraateista: mono-, di- ja polysakkarideja (HHV \approx 17 MJ/kg)
- Osa proteiineista: aminohappoja (HHV \approx 23 MJ/kg)
- Osa lipideistä: eläinrasvoja ja kasviöljyjä (HHV \approx 39 MJ/kg)

Näistä hiilihydraatit eli sakkariidit ovat olleet ihmisen esihistorian ja historian aikana tärkein energianlähde ja useimmille ihmisille niin on edelleen, mutta rasvojen osuus on noussut jopa 40 %:iin ruoan energiasisällöstä teollisuusmaissa (Smil 1991). Joillakin henkilöillä rasvojen ja proteiinien osuus voi olla huomattavasti korkeampi. Ihminen käyttää ja tarvitsee elintoiminnoissaan myös monia muita orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä, mutta niiden merkitys lihaksen energianlähteenä on mitätön poikkeuksena etanoli, joka on hyvin harvoilla ihmisillä merkittävä energianlähde. Etanolia (HHV = 29,3 MJ/kg) ryhdyttiin valmistamaan elintarvikekäyttöön yli 5000 vuotta sitten.

Kaikki yllämainitut ovat kiinteitä yhdisteitä paitsi nestemäiset kasviöljyt ja etanoli. Suurin osa niistä on veteen liukenevia, joten niitä voidaan hyödyntää myös nestemäisessä muodossa vesiliuoksina. Joitakin ravintoaineiden vesiliuoksia on valmiiksi saatavissa luonnosta, erityisesti hedelmistä ja marjoista sekä maitoina. Kaikki yllämainitut yhdisteet soveltuvat myös lämpövoimakoneiden energianlähteiksi ja sitä kautta mekaanisten liikenteen voimanlähteiden käytettäviksi. Ja niitä voidaan hyödyntää myös mikrobiologisten ja termokemiallisten konversioiden avulla.

Tulen käytön keksiminen noin 500.000 eaa lisäsi ruoka-aineiden käyttömahdollisuuksia ja vähensi tautien leviämistä, kääntöpuolena huomattava energiataseen heikentyminen ja ravinteiden menettäminen. Tulella on myös aiheutettu suuri määrä metsätuhoja ja eläin-

ten sukupuu-puttoja jo esihistoriallisella ajalla (Liite 3). Ennen tulen hallinnan keksimistä ihmiskunnan energiankäytöstä 100 % oli ruokaenergiaa. Nykyään ihmiskunnan kaikesta energian käytöstä kulutetaan ruokana enää noin 2 % (Sørensen 2000). Se vastaa noin $250 \text{ GW}_{\text{pa}}$:n polttoainetehoa eli 60 GW_{m} :n mekaanista tehoa.

Suurin osa biosfäärin orgaanisista yhdisteistä on ligniiniä, selluloosaa ja hemiselluloosaa, joita ihmisen ruoansulatusjärjestelmä ei pysty hajottamaan. Niitä on kuitenkin mukana ihmisravinnossa, jolloin niitä kutsutaan ravintokuiduiksi. Ne ovat tarpeen ruoansulatuk- sen toiminnalle, vaikkei niiden energiasisältöä hyödynnetäkään.

2.1.1 Lihäs

Lihäs ei ole lämpövoimakone, vaan se konvertoi kemiallisen energian suoraan mekaa- niseksi energiaksi ja siksi on kaikkia lämpövoimakoneita paljon tehokkaampi energian hyödyntäjä omalla toiminta-alueellaan. Lihaksen hyötysuhde on noin 23 % (Smil 1991). Samalla lämpötilävlillä toimivan lämpövoimakoneen teoreettinen hyötysuhde on läm- pöopin 2. pääsäännön seurauksena rajoittunut Carnot'n hyötysuhteeseen

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad , \quad (2.1)$$

missä $T_1 = (37 + 273) \text{ K}$ ja $T_2 = (15 + 273) \text{ K}$ eli $\eta_c \approx 7 \%$ (Kuva 2.3). Koska käytännössä lämpövoimakoneilla saavutettavissa oleva hyötysuhde on korkeintaan 70 % Carnot'n hyötysuhteesta, todellinen hyötysuhde on korkeintaan 5 %. Lihaksen hyötysuhde on siis yli nelinkertainen lämpövoimakoneisiin verrattuna ihmisruumiin lämpötilassa $37 \text{ }^\circ\text{C}$ toimiessaan, kun lauhdutuslämpötila on maapallon keskilämpötila eli $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Normaa- listi lämpövoimakoneet toimivat huomattavasti korkeammassa lämpötilassa, joten ne voivat silloin ylittää lihaksen hyötysuhteen. Mutta polttoprosessiin perustuvissa lämpö- voimakoneissa vesihöyryn latentti lämpö yleensä menetetään kokonaan, joten polttoai- neista saadaan hyödynnettyä vain niiden alempi lämpöarvo LHV, kun taas lihas pystyy hyödyntämään polttoaineiden ylempään lämpöarvon HHV:n.



Kuva 2.3. Sadi Carnot:n kunniaksi nimetty bule- vardi Lillessä Ranskassa. Carnot'n vuonna 1824 julkaisema yhtälö antaa ylärajan kaikkien lämpövoi- makoneiden hyötysuhteelle, mutta ei lihaksen eikä polttokennon hyötysuhteelle. [2007]

Ruoan elinkaaressa mitattuna hyötysuhde on liharuokaa käytettäessä heikko, sillä li- haruoka aiheuttaa 82–98 % energiahäviön kasvuruokaan verrattuna (Taulukko 5.1). Ihmisten dieettien jatkuva siirtyminen eläinperäisen ruoan suuntaan on siis johtanut merkittävään energiatehokkuuden heikkenemiseen. Elinkaaren energiatehokkuutta on edelleen heikentänyt siirtyminen intensiiviseen maatalouteen. Perinteisessä maataloudes- sa tuotetun ruoan energiasisältö on 10–30 kertaa suurempi kuin viljelyyn käytetty ener- gia. Modernissa maataloudessa tuottavuuskerroin on alle 10 ja karjataloudessa se on alle

1 (0,05–0,4), joka tarkoittaa, että lihan tuotantoon käytetään 2,5–20 kertaa enemmän energiaa kuin saadaan lihan energiasisältönä ulos (Smil 1991). Kaikissa näissä vertailussa on jätetty huomiotta primäärinen energianlähde eli aurinkoenergia fotosynteesin kautta. Lampinen ja Jokinen (2006) ovat käsitelleet tätä teemaa osana maatalouden energiapotentiaalin tarkastelua.

Aikuinen ihminen pystyy tuottamaan mekaanista energiaa esimerkiksi kävelyyn, uintiin ja soutamiseen pitkäkestoisesti 50–100 watin teholla ja hyvin harjoitelleet voivat saavuttaa juoksemalla tai uimalla lyhytkestoisesti 2000 watin tehon (Sørensen 2000). Lapsityövoiman teho on luonnollisesti alempi ja se on alle kouluikäisillä 10 watin luokkaa (Kuva 2.2). Yhden ihmisen lihasvoiman tehontuotantoalue on siis 10–2000 W_m.

Ihmislihasvoiman käyttöä liikenteessä pystytään olennaisesti tehostamaan monilla apuvälineillä, joista tärkeimmät ovat jo esihistoriallisella ajalla käyttöön otetut lautta sekä pyörä ja niistä kehitetyt vaunut ja muut laitteet, vene, luistimet ja kelkka (Smil 1991, 1994). Polkupyörällä, jonka Leonardo da Vinci ensimmäisenä suunnitteli, on saavutettu jopa 130 km/h nopeus (Kuva 2.4).



Kuva 2.4. a) Historiallisia 2-pyöräisiä Tukholman tekniikan museossa. Ensimmäisissä de Sivracin juoksupyörissä 1700-luvulta ei ollut polkimia eikä etupyörän ohjausta (edessä). Ensimmäiset etupyörän ohjauksella varustetut juoksupyörät tehtiin 1810-luvulla (toinen edestä) ja ensimmäiset polkimilla varustetut 2-pyöräiset polkupyörät valmistettiin 1850-luvulla (takana). [2006] b) Nelipyöräinen polkuvaunu 1840-luvulta Tampereen Vapriikki-museon Velomania-näyttelyssä. [2007]

Varsin suuriin ihmisvoimatehoihin päästiin antiikin ajan kaleerilaivoissa, lihasvoima-tuulivoima-hybrideissä, joissa oli enimmillään jopa yli 4000 soutajaa ja siten hetkellinen biovoimateho oli luokkaa 4 MW (Landels 1978, Smil 1994). Antiikin kaleerilaivojen suurin nopeus pelkästään lihasvoimalla tyynellä säällä oli noin 13 solmua eli 24 km/h ja purjein 15 solmua eli 28 km/h (Landels 1978). Kaleerilaivoilla oli tärkeä asema Välimeren liikenteessä keskiajan loppuun asti eli noin 5000 vuoden ajan. Ennen tuulivoiman käyttöönottoa lihasvoima hallitsi vesiliikennettä noin 60.000 vuotta.

Hyvin suuria ihmistehoja on ollut käytettävissä myös kelkkojen avulla esimerkiksi kivien kuljetuksessa Egyptin pyramideja rakennettaessa. Raideliikenne toteutettiin ensimmäisen kerran noin vuonna 600 eaa orjavoimalla veneiden siirtämiseen Korintin kannaksen yli Kreikassa. Tämä rata oli käytössä aina 900-luvulle asti.

Monet liikennevälineet edellä mainittujen lisäksi toteutettiin ensimmäisenä ihmislihasvoimalla. Sukellusvene (Hutchinson 2001) sekä 3-pyörä (Dale 1994) keksittiin 1600-luvulla. Vesiliikenteessä airojen ja melojen lisäksi myös siipirattaat otettiin aluksi käyttöön lihasvoimaisina. Mekaanisen auton esikuvia rakennettiin 1600-luvulla lihasvoimaisen (kuten Nürnbergin vaunu) käyttäen erilaisia kellokoneistoja ja hammasrattaita, polkimia sekä muita mekaanisen voiman välitysjärjestelmiä pyöriin (Dale 1994). On olemassa viitteitä mekaanisten autojen käytöstä juhlakulkueissa jo antiikin Ateenassa. Juoksupyörä (Kuva 2.4a) on 1700-luvun keksintö edeltäen 1800-luvulla keksittyä polkupyörää. Saksalaista Karl von Draisia, josta resiina-nimi on peräisin ja jonka juoksupyörä on toinen edestä lukien kuvassa 2.4a, pidetään yleisimmän polkupyöräilyn isänä 1810-luvulta alkaneen PR-työnsä ansiosta (Kylliäinen 2007), vaikka hänen käyttämänsä teknologiset innovaatiot oli tehty jo aiemmin. Esimerkiksi kevyt 4-pyöräinen polkuvaunu (Kuva 2.4b) kuuluu sekin jo 1700-luvun keksintöihin (Bird 1967).



Kuva 2.5. Günther Rochertin polkupyöräkoneistoa hyödyntävä 230 watin lihasvoimakäyttöinen propellilentokone "Musculair 1" vuodelta 1984 Deutsches Museumissa Münchenissä. Siiven kärkiväli on 22 m ja paino tyhjänä 28 kg. [2007]

Lihaskäyttöisistä liikennevälineistä myös kantosiipialus, pyörätuoli ja ilmalaiva (White 1978) rakennettiin ensi kerran 1700-luvulla. Lihaskäyttöä käytettiin lentoliikenteessä jo ennen ilmalaivoja alkaen ensimmäisistä riippuliitimistä 500-luvulla. Ihmisten ikiaikainen unelma lihasvoimakäyttöisestä ilmaa raskaammasta motorisoidusta kontrolloitavasta lentokoneesta toteutui kuitenkin vasta vuonna 1977 polkupyöräkoneiston avulla (Mondey 1979). Kuva 2.5 esittää lihasvoimakäyttöistä lentokonetta, joka edellyttää vähintään 230 watin lihastehoa ja kulkee tyynessä huippunopeudella 38 km/h.

2.2 GRAVITAATIO (2.000.000 eaa)

Maapallon painovoiman hyödyntäminen mäkiä alas liikuttaessa ja ylimääräisen energian tarve mäkiä ylös kiivettäessä on osa kaikkea maaliikennettä epätasaisessa maastossa ja se on myös vesivoiman teknisen hyödyntämisen taustavoima. Kuun ja vähäisemmässä määrin auringon gravitaatio vaikuttavat vuorovesi-ilmiön kautta. Hisseissä ja mäkitjunissa käytetään hyväksi matkustajien sekä erillisen vastapainon tuottamaa painovoimaa. Kelkka- ja vuoristoratoja on rakennettu 1600-luvun alusta lähtien varta vasten gravitaation elämäkselliseksi hyödyntämiseksi. Lentoliikenteessä, mukaan lukien laskuvarjohypytyt, maapallon gravitaation merkitys on suurimmillaan.

Maapallon gravitaatiota on osattu hyödyntää satelliittien kiertorataliikkeessä vuoden 1957 Sputnikista lähtien (Kuva 2.6) ja sen jälkeen monien muidenkin taivaankappaleiden gravitaatiota näiden radalla liikuttaessa perustuen Keplerin ja Newtonin jo 1600-luvulla esittämiin liikelakeihin (Kolin 1972). Maapallon ja muiden planeettojen sekä auringon ja kuiden gravitaatiota on lisäksi osattu hyödyntää avaruusluotainten energianlähteenä gravitaatiolinkoperaatteella 1950-luvulta alkaen. Ensimmäisenä tätä alun perin Phillip Cleatorin vuonna 1936 esittämää voimanlähdettä hyödynsi vuonna

1959 Neuvostoliiton Luna 3 -kuuluotain (Westman & Oja 1975). Gravitaatiolin-kotekniikkaa käytettäessä avaruusluotaimien radat suunnitellaan siten, että ne käyvät taivaankappaleiden läheisyydessä saamassa niiden gravitaation avulla lisäenergiaa. Se säästää polttoainetta ja alentaa avaruusluotaimen painoa matkan pitenemisen kustannuksella. Se on myös mahdollistanut suurimman avaruusaluksen nopeuden, 252.000 km/h, joka saavutettiin saksalaisella vuonna 1976 lähetetyllä Helios 2 -luotaimella. Sitä on jopa käytetty hengenpelastukseen, sillä Apollo 13 pystyi palaamaan Maahan Kuun gravitaatiolingon avulla. Kolmas gravitaation käyttömahdollisuus avaruusliikenteessä on hyödyntää Kuun gravitaatiota eli vuorovesivoimaa satelliittien ja avaruusasemien ohjaamiseen Maan kiertoradalla (Westman & Oja 1975) ja on jopa esitetty mahdollisuutta sen käyttämiseen Maan kiertoradalta irtautumiseen. Maapallon varsin suuren gravitaation takia avaruuteen lähettäminen vie runsaasti energiaa ja rajoittaa nykytekniikalla avaruusaluksen hyötymassan korkeintaan muutamaan tonniin. On mahdollista, että tulevaisuudessa suuret avaruusaluksat lähtisivät joko kiertoradalta tai Maata alhaisemman painovoiman taivaankappaleilta kuten Kuusta.



Kuva 2.6. Kopio neuvostoliittolaisesta tutkimussatelliitista vuodelta 1969 Tukholman teknikan museossa. Se käytti Maan gravitaatiota rataliikkeessä, Kuun gravitaatiota ohjauksessa ja aurinkopaneelien tuottamaa sähköä elektronikassaan. Satelliitteja on lähetetty yli 2000, joista 860 oli toiminnassa vuonna 2007. [2006]

On myös esitetty gravitaatiojunan mahdollisuutta: tyhjiöputken kautta maapallon läpi kulkeva juna saavuttaisi maapallon gravitaation avulla jopa 29.000 km tuntinopeuden ja matka minkä tahansa maapallon paikkojen välillä olisi mahdollinen 42 minuutissa (Kaku 2008). Tekniset vaikeudet tällaisen toteuttamiselle ovat äärimmäisen suuret.

2.3 VESIVOIMA (60.000 eaa)

Ei ole tiedossa, milloin vesiliikennettä on ensimmäisen kerran harjoitettu, mutta vanhin varma tapaus on Kaakkois-Aasian saarten ja Australian asuttaminen, joka alkoi noin 60.000 eaa (Lavery 2004). Ensimmäiset vesikulkuneuvot ovat olleet lauttoja (Kuvat 2.7 ja 2.11), mukaan lukien ne kulkuneuvot, joilla Australian ensimmäiset asukkaat saapuivat Kaakkois-Aasiasta. Yli 10.000 vuoden ikäisiä lauttoja ei kuitenkaan ole löydetty. On selvä asia, että lauttoja on käytetty joki- ja järveliikenteessä jo ennen uskaltautumista merille. Jokiliikenteessä vesivoiman hyväksikäyttö on välttämätön hyöty tai haitta riippuen liikutaanko myötä- vai vastavirtaan.

Lauttojen aika kesti kauan. Varsinaisten veneiden varhaisimmat muodot lienevät jokiveineitä (Kuvat 2.7 ja 2.8), joita on käytetty Egyptissä ainakin 3100 eaa (Lavery 2004). Lait seurasivat niiden jälkeen noin 2500 eaa. Keinotekoisissa kanavissa voidaan joissakin tapauksissa hyödyntää vesivoimaa sekä henkilö- että tavaraliikenteessä monipuolisem-

min kuin luonnollisissa vesistöissä. Esimerkkinä on Ranskan vuonna 1681 valmistunut ja edelleen käytössä oleva Atlantin ja Välimeren yhdistävä Canal du Midi, joka kulkee ylimmillään lähes 200 metriä merenpinnan yläpuolella hyödyntäen sekä suoraa että tarkoitusta varten rakennetuista tekoaltaista saatavaa vesivoimaa. Vesivoimaa ei normaalisti voida käyttää vesiliikenteessä ainoana energian lähteenä, vaan vähintään biovoimaa (lihasvoima) tarvitaan myös.



Kuva 2.7. Mesopotamialainen Kelek-lautta (seinällä), jota on käytetty tuhansia vuosia Eufraatin ja Tigrisin liikenteessä sekä etiopialainen papyrysvene esillä Deutches Museumissa Münchenissä. [2007]



Kuva 2.8. Vesivoimaa käyttävä vene Amazon-joella Manauksen kaupungin lähellä Brasiliassa. Biovoimaa tarvitaan vain ohjaamiseen peräsimen avulla. Taustalla Petrobras-yhtiön kelluva E23-gasoholia moottoriveneisiin myyvä huoltoasema. [2006]

Vesivoimaa on hyödynnetty myös veden kuljetuksessa kauan: kuuluisimpia historiallisia esimerkkejä ovat antiikin Rooman akveduktit. Suomessa vesivoimaa on perinteisesti käytetty tukkien uitossa. Nykyään vesivoiman merkitys liikenteessä on vähäinen, mutta joka tapauksessa sitä hyödynnetään aina, kun liikutaan joilla ja kanavilla myötävirtaan. On mahdollista, että vesivoiman merkitys kasvaa Suomessa uudelleen, mikäli biomassan energiakäyttöä keskitetyissä voimalaitoksissa lisätään ja logistiikkaa siirretään maanteiltä vesistöihin. Se mahdollistaa edulliset kuljetukset paljon kauempaa kuin rekoilla.

Vesivoimaa on hyödynnetty jokiliikenteen lisäksi myös maaliikenteessä. Varhaisimmat esimerkit ovat vesivoimakäyttöiset hissit 200-luvulla eaa. Suoraa vesivoimaa hyödyntäviä rinnevaunuja on käytetty vuonna 1882 valmistuneesta portugalilaisesta Bom Jesus-radasta alkaen. Teknologia perustuu hissiperiaatteeseen: ylöspäin menevää vaunua vetää vedellä rinteeseen yläosassa täytetty alaspäin menevä toinen vaunu sekä vaunun ja sen matkustajien paino. Vesi päästetään ulos rinteeseen alaosassa. Kyseinen teknologia on edelleen käytössä mm. alkupe räisessä paikassa Portugalissa, vuonna 1890 valmistuneella Lyndonin radalla Englannissa ja myös yhdessä maailman tunnetuimmista uusiutuvan energian demonstraatio- ja koulutuskeskuksessa Centre for Alternative Technology:ssä Walesissa (Kuva 2.9).



Kuva 2.9. Suoraa vesivoimaa hyödyntävä rinneraitiovaunu Centre for Alternative Technology:ssä Walesissa (CAT 2007).

Vesivoiman tärkein energiakäyttösovellus on kuitenkin sähköntuotanto. Noin 16 % maailman sähköstä tehdään vesivoimalla, jonka asennettu kapasiteetti on noin 800 GW_e. Se antaa suuren potentiaalilin sähköajoneuvoille. Maailman ensimmäinen sähkövoimalaitos oli vesivoimaan perustuva ja avattiin vuonna 1870 Rothburyssa Englannissa alun perin sähkövalaistusta varten. Vesivoimaa sähköä ryhdyttiin käyttämään liikenteessä vuonna 1883 silloisen Irlannin ja nykyisen Pohjois-Irlannin Portrushissa ja Bushmillsissa, jossa raitiovaunut ja junat kulkivat 78 kW_e vesiturbiinin tuottamalla sähköllä (Klapper 1961).

2.4 VUOROVESIVOIMA (60.000 eaa)

Joki- ja avomeriliikenteen alkujen välissä on ollut kausi, jolloin liikuttiin merten rannikoiden tuntumassa. Kalastus on uskottavin syy merelle lähtöön. Jo alusta lähtien on opittu hyödyntämään vuorovesivoimaa sekä satamista lähtöön että satamiin palaamiseen. Vuorovesivirta on monissa paikoissa niin voimakas, että soutaminen ja purjehtiminen sitä vastaan eivät edes ole mahdollista. Kaikkein voimakkaimmat vuorovesivirrat ylittävät modernien moottorikalastuslaivojenkin nopeuden kuten esimerkiksi kuvan 2.10 esittämä 20 solmun virta Norjassa.



Kuva 2.10. Voimakas vuorovesivirta Bodøn kaupungin lähellä Norjassa. Kahdesti vuorokaudessa suuntaansa vaihtavan virran nopeus on enimmillään 20 solmua eli kalastusveneidien on pakko ajoittaa kulkunsa myötävirran suuntaisesti. [2005]

Vaikka vuorovesivoimaa on jonkin verran hyödynnetty kaupallisesti myös sähkön tuotannossa, esimerkiksi Ranskassa ja Norjassa, meriliikenne on ollut sen tärkein sovellusalue. Tulevaisuudessa ympäristöpolitiikan seurauksena vuorovesivoiman käyttö sähkön tuotannossa todennäköisesti lisääntyy ja se voi nousta muutamissa maissa, kuten Englannissa, hyvin merkittävään asemaan kansallisessa sähköntuotannossa.

2.5 MERIVIRTAVOIMA (60.000 eaa)

Avomeripurjehdus alkoi viimeistään noin 60.000 eaa ja alusta asti tuulten ja vuorovesivirtojen lisäksi hyödynnettiin myös merivirtoja (Kuva 2.11).



Kuva 2.11. Atlantin vuonna 2001 ylittänyt Rüdiger Nehbergin puulautta Speyerin tekniikkamuseossa Saksassa. [2007]

Esimerkiksi 1500-luvulla löydetty Golf-virta oli pitkään kaupallinen salaisuus, sillä sen tunteneet pystyivät kuljettamaan rahtia Amerikasta Eurooppaan kilpailijoita nopeammin. Golf-virran teho on 1400 TW eli yli 100-kertainen ihmiskunnan koko energiankulutukseen verrattuna, ja se on erittäin tärkeä lämmönsiirtomekanismi. Se on myös 100-kertainen Amazon-joen virtaamaan verrattuna. Golf-virran nopeus on suurimmillaan noin 4 solmua ja sen suuntainen liikenne hyötyy esimerkiksi Pohjanmerellä (Kuva 2.12), vaikkakin sen merkitys kemiallisiin polttoaineisiin verrattuna on vähäinen. Maailmasta löytyy myös monia muita laivaliikenteessä hyödynnettyjä merivirtoja. Sukellusveneet voivat käyttää hyväkseen myös pinnan alla kulkevia merivirtoja.



Kuva 2.12. Norjan rannikkoa pitkin kulkeva Hurtigruten-risteilijä Hammerfestin edustalla. Taustalla on Statoilin rakenteilla oleva Norjan ensimmäinen maakaasun nesteytyslaitos ja LNG-satama, johon maakaasu kuljetetaan merenpohjaa pitkin kulkevilla putkilla 160 km päästä Snøhvit-kentältä Jäämereltä. Suurin osa hiilidioksidista erotetaan tässä laitoksessa maakaasusta ja kuljetetaan takaisin toisilla putkilla syötettäväksi Snøhvit-kentän maakaasulähteisiin. [2005]

Merivirtavoima on primäärienergian lähde, jota ihmiskunta on toistaiseksi pystynyt hyödyntämään suoraan vain liikenteessä. Tulevaisuudessa myös sähkön tuotanto on mahdollinen sovellus.

2.6 II SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: REHU (6000 eaa)

Karjatalouteen siirtyminen alkaen noin 8000 vuotta sitten laajensi liikenteen käytettävissä olevan bioenergiaresurssin moninkertaiseksi. Tämä johtuu karjatalouden eläinten kyvystä hyödyntää mekaanisin ja mikrobiologisin prosessein myös hemiselluloosaa ja selluloosaa, jota eläinten rehu pääasiassa on. Biosfäärin orgaanisista aineista noin puolet on selluloosaa. Karjatalouden eläimet (Kuva 2.13) pystyvät hyödyntämään sekä ihmisruoaksi kelpaavia kasviksia että myös heinäkasveja ja lehtiä (Kuva 2.2). Vain runsaasti ligniiniä sisältävä kasviaines, erityisesti puu, on niille käyttökelpoista.

Eläinten lihasvoimaa (Starkey & Ndiame 1988) on käytetty liikenteessä alkaen kirjekyyhkyjen alle 1 watin tehosta norsujen 10.000 watin tehoon. Yleisimmin on käytetty aasivoimaa (pitkäaikaisesti $150\text{--}200\text{ W}_m$), härkä- ja puhvelivoimaa ($250\text{--}550\text{ W}_m$) sekä hevosvoimaa ($450\text{--}850\text{ W}_m$) (Smil 1991). Perinteinen James Wattin käyttöön ottama yksikkö hevosvoima [hv] on $745,7\text{ W}$ eli se kuvaa hyvin hevosen mekaanista tehoa pitkäaikaisessa rasituksessa. Kaikilla eläimillä on, kuten ihmisilläkin, kyky tuottaa huomattavasti suurempia tehoja lyhytaikaisesti. Eläinten lihasten hyötysuhde on yhtä korkea kuin ihmislihasten. Ne ovat olleet merkittävä voimanlähde yhteiskunnissa koko historiallisen ajan (Kuva 2.1).



Kuva 2.13. a) Hevosvetoinen noin 750 watin tehoinen raitiovaunu vuodelta 1877 Tukholman liikennelaitoksen museossa. [2007] b) Jyväskylän yliopiston Hupi-hevonen hoitajansa Alpi Putosen kanssa vuonna 1957 rakennusten lämmityspuuta hakemassa. Hupi palveli kaikissa kuljetustehtävissä 19 vuoden ajan vuosina 1949-1968, jolloin se kokonaistaloudellisin perustein 25-vuotiaana lahdatiin. Hupin tilalla kuljetustehtävissä on nyt raakaöljypohjaisia polttoaineita käyttäviä autoja ja lämmitys hoidetaan kaukolämpönä 80 % turpeella ja 20 % puulla. [© Jyväskylän yliopiston museon kuva-arkisto]



Kuva 2.14. Suomen armeijan käyttämä viestikyyhkyjen kantolaukku Hallin ilmailumuseossa. Kyyhkyt ovat nopeinta eläinlihasvoiman liikennekäyttöä. [2008]

Vaikka eläinlihasvoiman selvästi merkittävin liikennekäyttö on ollut maanteillä ja kaduilla, myös raide-, ilma- ja vesiliikennettä on harjoitettu eläinvoimalla hyvin kauan. Eläinten lihasvoiman käyttö ilmaliikenteessä on muinaisten persialaisten keksimä kyyhkysposti, mahdollisesti noin 500-luvulta eaa (Kuva 2.14). Myöhemmin lintuja ja myös lepakoita on käytetty pommien kuljettamiseen.

Raideliikenteessä eläinvoimaa on käytetty ainakin 1. vuosisadalta eaa alkaen kiviraiteilla ja 1830-luvulta alkaen raitiovaunuissa, jossa työssä hevoset ja muulit palvelivat esimerkiksi Englannissa vuoteen 1926 asti (Klapper 1961, Kuva 2.13a).

Eläinten lihasvoimaa on saatettu käyttää myös laivojen voimanlähteenä antiikin aikana, sillä ainakin härkäkierron käyttöä siipiraslaivassa suunniteltiin (Landels 1978). Varmuudella eläinlihasvoimaa on hyödynnetty vesiliikenteessä Kiinan suuren kanaalin proomujen vetoon rannalta käsin, mahdollisesti jo sen ensimmäisen osan valmistuttua 600-luvulla (Smil 1994). Proomuja vedettiin eläinlihasvoimalla Keski-Euroopan ja Englannin joki- ja kanaaliverkostossa 1800-luvun puoliväliin asti, jolloin tilalle tulivat höyrykonekäyttöiset hinaajat. Proomuja vetäessään yksi hevonen pystyi kuljettamaan 100 tonnin lasteja eli 100-kertaisesti suurempia kuin vankkureilla maanteitse. Eläinvoimaa on käytetty vedenalaisessa liikenteessä ainakin delfinien avulla sotilaallisissa tehtävissä pommien ja vakoilukameroiden kuljettamisessa.

Rehuja, kuten ruokiakin, voidaan käyttää liikenteen voimanlähteenä myös mekaanisesti esimerkiksi lämpövoimakoneiden avulla ja niitä voidaan konvertoida termokemiallisilla, kemiallisilla ja mikrobiologisilla prosesseilla.

2.7 TUULIVOIMA (3500 eaa)

2.7.1 Vesiliikenne

Tuulivoimaa on hyödynnetty vesiliikenteessä vähintään 5500 vuotta ensin purjelauttojen (Kuvat 2.7 ja 2.11) ja myöhemmin purjeveneiden ja -laivojen avulla, aluksi joki- sekä järviliikenteessä ja 5000 vuoden ajan myös meriliikenteessä (Lavery 2004, Kuva 2.15). Sitäkin ennen tuulivoimaa hyödynnettiin lauttojen ja muiden vesiliikennevälineiden rungon avulla. Tuulivoimaa voidaan hyödyntää myös vastatuuleen liikkumiseen päinvas- toin kuin vesi-, vuorovesi- ja merivirtavoimaa, jotka auttavat vain myötävirtaan kuljet- taessa ja vastavirtaan liikuttaessa vaativat ylimääräistä energian käyttöä. Nopeimmillaan purjealukset liikkuvat kantosiipiteknikalla lähes 50 solmun nopeudella eli ylittävät lähes kaikkien sotilaskäytössäkin olevien motorisoitujen alusten nopeuden.



Kuva 2.15. Reilun kaupan tuotteita kuljettava Eestaas-yhtiön 247 brt:n purjelaiva S/V Estelle peruskorjattavana Turussa. Estelle on hybridiajoneuvo, jonka nimellinen tuulivoimateho on 645 kW_m ja varavoimanlähteenä olevan 2-tahtisen dieselmoottorin nimellisteho on 180 kW_m. [1995]

Vesiliikenne on historiallisesti ollut tuulivoiman tärkein liikennesovellus ja meriliikenne oli tuulivoiman dominoima 3500-luvulta eaa aina 1800-luvulle asti. Kaleerilaivoja ja muita tuuli-biovoimahybridejä käytettiin 5000 vuotta uuden ajan loppuun asti (Kuva 6.15a). Puhtaita purjelaivoja käytettiin jo antiikin ajoista lähtien ympäri maailman. Suurten purjelaivojen 400-vuotinen kulta-aika kesti suurista löytöretkistä 1400-luvun lopulta 1800-luvun lopulle asti, jolloin alkoi lämpövoimakoneiden aika (Lavery 2004).

Purjelaivojen, -veneiden ja muiden purjeella varustettujen ajoneuvojen nimellinen tuuli- voimateho on noin 1 kW purjeiden pinta-alan neliometriä kohti, kun tuulen nopeus on 11,8 m/s. Esimerkiksi kuvan 2.8 Estelle-laivan purjepinta-ala on 645 m² eli nimellisteho

on 645 kW. Muilla tuulen nopeuksilla teho neliometriä kohti [W/m^2] saadaan likimääräisesti kaavasta

$$\frac{P}{A} \approx 0,6125 \cdot v^3, \quad (2.2)$$

missä v on tuulen nopeus [m/s] (Gipe 1995, 144). Mikäli tuulen nopeus on 20 m/s , tuulen teho on nimellistehoon verrattuna lähes viisinkertainen eli 4,9 kW/m^2 . Tuulen nopeudella 5 m/s tuulen teho on puolestaan viidesosa nimellistehosta eli 0,2 kW/m^2 . Kaavassa 2.2 on oletuksena keskimääräinen ilman tiheys lämpötilassa 15 °C. Sitä kylmemmissä olosuhteissa teho kasvaa ja sitä lämpimämissä olosuhteissa teho alenee. Lämpötilan aiheuttama tehon vaihteluväli on meriliikenteessä 10 %:n luokkaa ja ilmaliikenteessä useiden kymmenien prosenttien luokkaa. Suurimpien purjelaivojen purjepinta-ala on ollut yli 6000 m^2 eli niiden nimellinen tuulivoimateho on yli 6000 kW. Suomen kauppalaivastossa purjelaivojen määrä oli suurimmillaan 4003 kpl vuonna 1917, yhteistonnistoltaan 287.000 nrt (Eriksson ym. 1991) eli yli 400.000 brt. Se tarkoittaa moninkertaista tuulivoimatehoa verrattuna Suomen tuulisähköturbiinien nykyiseen nimellistehoon.

Purjelaivoihin on usein asennettu myös toinen voimanlähde, jolloin ne ovat hybridiajoneuvoja. Ensimmäiset hybridilaivat olivat tuulivoima/biovoima-hybridejä, joissa biovoima oli ihmislihasvoimaa airojen tai melojen avulla käytettynä. Kaleerilaivat ovat niistä kuuluisimpia. Tuulivoima otettiin käyttöön vuonna 1799 myös sukellusveneessä sen liikkua pinnalla, jolloin pinnan alla käytettiin lihasvoimaa (Hutchinson 2001). Alkaen 1800-luvulta myös muuntotyypisiä hybridejä on rakennettu, aluksi höyrykonetta ja myöhemmin varsinkin dieselmoottoria hyödyntäviä (Kuvat 6.15b ja 2.15). Lähes kaikki 1800-luvun höyrylaivat oli varustettu myös purjeilla. Purjeet eivät nykyäänkään ole täysin kadonneet kaupallisilta aluksilta, vaan joillakin suurilla moderneilla rahtilaivoilla tietokoneohjattuja purjeita käytetään polttoaineen säästämiseksi, esimerkiksi Japanissa (Lavery 2004). Moderneissa purjelaivoissa löytyy myös kolmen eri voimalähteen hybridejä: purjeiden lisäksi polttomootoreita ja sähkömootoreita.

Purjelaivojen kuljettaminen on historiallisesti vaatinut runsaasti miehistöä ohjaukseen, mutta aivan moderneimmissa purjelaivoissa ja -veneissä on automatiikalla saavutettu taso, jossa miehistöä ei tarvita enempää kuin lämpövoimakoneita käytävissä laivoissa.

Tuulivoimaa on hyödynnetty ja hyödynnetään liikenteessä purjeiden lisäksi harvinaisemmin myös roottorien, siipien, turbiinien ja leijojen avulla. Anton Flettnerin roottorilai-va Buckau vuodelta 1923 sai Magnus-ilmion avulla tuulesta työntövoimaa konevoiman avulla pyöritettäviin pystyroottoreihin. Jacques Cousteau kehitti pystyyn asennettuja siipiä hyödyntävän Turbosail-tekniikan, joka otettiin ensimmäisenä kaupalliseen käyttöön Cousteaun meridokumenteista tutulla Alcyone-tutkimusaluksella vuonna 1985. Myös vaakasuoria siipiä on hyödynnetty: ne mahdollistavat aluksen noston vedessä korkeammalle ja siten veden vastuksen pienentämisen tai jopa poistamisen kokonaan, kuten pintaliitäjissä tehdään. Tuuliturbiinit ovat hyvin harvinaisia liikevoiman lähteenä, mutta laivojen ja veneiden sähkön tuotannossa yhdessä aurinkopaneelien kanssa ne ovat erittäin yleisiä. Leijojen vesiliikennekäyttö on vanhaa kiinalaista perua, mutta kyseistä tekniikkaa sovelletaan edelleen esimerkiksi saksalaisen Skysails-yhtiön toteuttamana rahtilaivoissa.

2.7.2 Ilmaliikenne

Vaikka historiallisesti meriliikenne on ollut tuulivoiman tärkein sovellus, ilmaliikenne on 1900-luvun puolivälistä lähtien ollut merkittävin tuulivoiman liikennesovellus.



Kuva 2.16. Hargraven laatikkokoleija vuodelta 1893 Tukholman tekniikan museossa. [2006]

Leijat, ensimmäiset lentävät koneet, ovat olleet käytössä Kiinassa jo ainakin 3000 vuotta ja niitä käytettiin siellä myös pommien kuljetuksessa. Laatikkokoleija (Kuva 2.16) oli esikuvana monille ensimmäisille moottorilentokoneille, muiden muassa Wrightin veljesten koneelle vuonna 1903; he olivat keränneet kokemusta lentämisestä laatikkokoleijoilla ennen motorisoituja lentoja.

Riippuliitimiä on joidenkin lähteiden mukaan käytetty Kiinassa jo 500-luvulla. Leonardo da Vinci suunnitteli riippuliitimiä 1400-luvulla ja varmuudella toimivia riippuliitimiä saatiin rakennettua 1800-luvulla (Kuva 2.17), joten ne olivat ensimmäisiä ilmaa raskaampia henkilökuljetukseen käytettyjä koneita. Ne toimivat myös esimerkkeinä monille ensimmäisistä moottorilentokoneista, muiden muassa Gustaf Weisskopftin koneelle vuonna 1901.



Kuva 2.17. a) Lilienthalin riippuliidin vuodelta 1894 Tukholman tekniikan museossa. [2006] b) Moderni riippuliidin Deutches Museumissa Münchenissä. [2007]

Kuumailmapallo, vetypallo ja ilmalaiva demonstroitiiin henkilökuljetuksessa ensimmäisen kerran 1700-luvulla (White 1978). Kaikissa näissä ilmaa kevyemmissä lentolaitteissa pallo tai muun muotoinen kaasusäiliö toimii sekä nosteen synnyttäjänä että purjeena.

Kuumailmapallo on kiinalainen keksintö tiettävästi 2.–3. vuosisadalta eaa. Kongmingin lyhdyn nimellä kulkevaa pientä kuumailmapalloa käytettiin sotilasviestintään ja karnevaaleissa. Ihmistä kuljettavia kuumailmapalloja (tai muita lentolaitteita) on saattanut



Kuva 2.18. Lontoon tiedemu-
seossa oleva malli Montgol-
fierin veljesten puulämmittei-
sestä kuumailmapallosta, joka
kuljetti ihmisiä ensi kertaa
vuonna 1783. [2007]

olla käytössä vanhoissa kulttuureissa päätellen toisaalta periaatteellisesta teknillisestä valmiudesta ja etenkin jois-
takin eräiden kulttuurien tekemistä muistomerkeistä,
jotka eivät näy kuin ilmasta. Todisteita ei kuitenkaan
ainakaan toistaiseksi ole löydetty. Ranskalaiset Mont-
golfierin veljekset pystyivät rakentamaan ensimmäisen
varmennetusti toimivan henkilökuljetukseen pystyvän
lentolaitteen vuonna 1782 ja se kuljetti ihmisiä ensim-
mäisen kerran vuonna 1783 (White 1978, Kuva 2.18).

Tavallisissa kuumailmapalloissa noste synnytetään kuu-
mentamalla ilmaa eli alentamalla sen tiheyttä alun perin
biomassaa ja myöhemmin myös fossiilisia polttoaineita,
nykyään useimmiten nestekaasua, polttamalla (Kuva
2.19). Normaalisti käytetään varsin alhaista noin 90 °C
lämpötilaa, jonka avulla voidaan nousta muutaman sad-
dan metrin korkeuteen. Parhaimmillaan on kuitenkin
saavutettu miehitetyillä kuumailmapalloilla yli 20 km
korkeus.

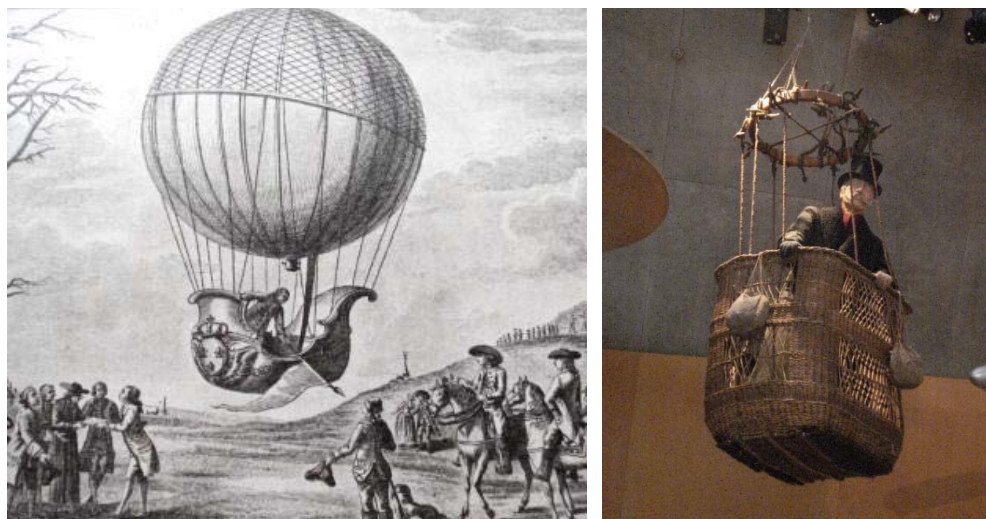


Kuva 2.19. Kuumailmapalloja biokaasumaatilan pellolla ja ylittäen liikennebiokaasua tuottavan
reaktorin Laukaassa. Lämmitys tehdään nestekaasulla, mutta se olisi mahdollista tehdä myös nes-
teytetyllä biokaasulla. [2009]

Ohuella ja isolla suljetulla mustalla pallolla noste saadaan synnytettyä pelkällä aurinko-
lämmöllä ilman kemiallista lämpöenergian lähdettä, eli kyseessä on passiivisen aurinko-
energian lentosovellutus. Sillä tekniikalla on ollut käyttöä lähinnä opetuksessa.

Vetypalloissa ja muissa *kaasupalloissa* noste synnytetään ilmaa kevyemmän kaasun avulla
eikä mitään energianlähdettä tarvita. Vetypallon idea on peräisin vetyä 1700-luvun puo-
livälissä tutkineilta Henry Cavendishiltä, Joseph Priestlyltä ja Antoine Lavoisier'ltä (Whi-
te 1978). Ranskalaiset Jacques Charles ja Nicholas Robert rakensivat ja demonstroivat
ihmistä kuljettavan vetypallon ensimmäisenä vuonna 1783 (Mondey 1979, Kuva 2.20).

Heliumpalloa kokeiltiin ensi kerran vuonna 1785 ja kaupunkikaasua vuonna 1812. Vedyn noste on kaasuista paras, noin 1 kg/Nm^3 , mutta lähes yhtä hyvä myös heliumilla. Vielä suurempaan nosteseen päästäisiin kuumentamalla näitä kaasuja.



Kuva 2.20. a) Charlesin ensimmäinen vetypallolento vuonna 1783 (piirros Lontoon tiedemuseossa). [2007] b) Vetypallon kori vuodelta 1900 Tukholman tiedemuseossa. [2006]

Kaasupalloja voidaan käyttää yhtä korkealla tai korkeammallakin kuin modernit lentokoneet pääsevät. Japanilaiset lähettivät yli 10 km korkeudessa esiintyviä jopa satoja metrejä sekunnissa puhaltavia suihkuvirtaustuulia hyödyntäviä vetypallopommeja noin 10.000 kpl Yhdysvaltoihin 2. maailmansodan aikana. Miehitetyllä heliumpallolla saavutettiin yli 30 km korkeus 1950-luvun lopulla eli korkeampi kuin millään muulla tavalla kuin rakettimoottorein on nykyäänkään saavutettavissa. Sitä on tulkittu myös ensimmäiseksi avaruuslennoksi, sillä niissä korkeuksissa stratosfäärissä ilmakehä ei enää ole sininen vaan musta, kuten syvä avaruus. Miehitämättömillä kaasupalloilla on päästy yli 50 km korkeuteen. Kaasupallot ovat eräs mahdollisuus avaruusalusten lähettämiseen siten, että vältetään alailmakehän vaatima erittäin suuri polttoaineen kulutus. Kaasupallo voisi siis korvata avaruusrakettien ensimmäisen ja tarvittaessa myös toisen vaiheen rakettit.

Nykyään miehitetyissä kaasupalloissa käytetään inerttiä heliumia. Vety puolestaan on normaali nostekaasuvalinta miehitämättömissä palloissa edelleen johtuen sen halvasta hinnasta ja 10 % heliumia paremmasta nostekyvystä, siis keveydestä. Joitakin muitakin nostekaasuja, kuten ammoniakkaa ja kaupunkikaasua, on harvinaisina käytetty. Myös maakaasutäytteiset pallot olisivat mahdollisia ja niiden avulla voitaisiin kuljettaa maakaasua korvaten osan laivakuljetuksista. Maakaasupallot olisivat lentokonevetoisia lentoperävaunuja, samaan tapaan kuin saksalaisten 2. maailmansodan aikana kokeilemat ilmaa raskaammat lentoperävaunut ja liitokoneet (Griehl 2006). Sama tekniikka soveltuisi myös vedynkuljetuksiin.

Ilmalaivat ovat ilmaa kevyempiä hybridiajoneuvoja, joissa on nosteen tuova ja purjeena toimiva, yleensä ellipsoidin muotoinen, kaasuväkä ja jollakin voimanlähteellä

toimiva ohjausjärjestelmä. Ohjattavuus erottaa ilmalaivan kuumailmapalloista ja kaasupalloista. Laitetta nimitetään ilmalaivaksi liikennemuodon mukaan eikä kaasulaivaksi nosteaineen mukaan: nosteaineena lähes aina on kaasu eikä kuumennettu ilma. Varhaisin ehdotus ilmalaivasta on italialaisen Francesco de Lana-Terzin vuonna 1670 esittämä tyhjiöpalloihin ja erillisiin ohjauspurjeisiin perustuva laite (White 1978). Muitakin ehdotuksia purjeohjauksesta ja myös lintuvetoisista ilmalaivoista tehtiin, mutta sellaisia ei tiettävästi ole toteutettu. Jean-Pierre Blanchart rakensi vuonna 1784 ensimmäisen ilmalaivan, ja sen ohjaus tapahtui käsikäyttöisellä propellilla. Vuonna 1785 hän toteutti ilmalaivan, jota ohjattiin lintujen tapaan liikkuvilla siivillä ja pyrstöllä.

Ensimmäisen moottorikäyttöisen (3 hv:n höyrykone) ilmalaivan rakensi Henri Giffard vuonna 1852 (White 1978). Sitä seurasivat 1800-luvulla lenoirmoottori-, sähkömoottori- sekä ottomoottorikäyttöiset ja 1900-luvulla potkuriturbiinikäyttöiset ilmalaivat. Paul Haenleinin vuoden 1872 lenoirmoottorikäyttöinen ilmalaiva oli paitsi ensimmäinen polttomoottorikäyttö myös ensimmäinen kerta, kun nostekaasuvarasto (kaupunkikaasu) toimi myös polttoaineena. Zeppelin-yhtiö aloitti Saksassa ensimmäisenä säännöllisen henkilöliikenteen vuonna 1909. Ensimmäisen Atlantin ylityksen ilman välitankkauksia teki englantilainen ilmalaiva vuonna 1919.

Alun perin ilmalaivoissa käytettiin nosteaineena vetyä, mutta nykyiset ilmalaivat ovat useimmiten heliumtäytteisiä: ensimmäinen sellainen otettiin käyttöön vuonna 1919 USA:ssa, joka silloin oli maailman ainut heliumin kaupallinen tuottaja teknologiana maakaasusta erottaminen. Raakamaakaasu on edelleen kaupallisen heliumtuotannon ylivoimaisesti tärkein lähde (vaikka sitä on saatavissa myös mm. geotermisten voimalaitosten porakaivoista). Parhaimmillaan raakamaakaasusta on peräti 8 % heliumia (White 1998). Harvinaisempia nosteaineita ovat olleet kaupunkikaasu ja kuuma ilma. Kuuma ilma edellyttää lämmityslaitteiston käyttöä kuten kuumailmapalloissa, mutta se pystyy hyödyntämään myös moottorin hukkalämpöä eli kyseessä on mekaanisen energian ja lämmön yhteistuotannon (CHP, vastaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa lämpövoimaloissa) liikennesovellus. On myös esitetty maakaasun, siis lähinnä metaania, käyttöä nostekaasuna sitä kuljettavissa ilmalaivoissa (White 1978).

Heliumin suosion syynä on sen turvallisuusetu vetyyn verrattuna, joskin kyseistä etua yleensä liioitellaan. Matkustajailmalaivaliikenne loppui Hinderburg-zeppelinin (Kuva 2.21) palamiseen vuonna 1937. Palosta syytettiin alun perin vetyä, mutta todelliseksi syytymissyiksi osoittautui kaasupallon kosteussuojaus, joka sisälsi herkästi syttyviä ja räjähdysmäisesti palavia termiitti-rakettipolttoaineen komponentteja alumiinia ja rautaoksidia, joita mm. avaruussukkulun kiinteissä apuraketeissa käytetään (Bain 2004). Kankaassa tapahtunut kipinä aiheutti sekä palon syttymisen että pallon rikkoutumisen. Osa vedystä paloi ja osa karkasi palamattomana ilmaan pallon rikkouduttua. Kyseistä kosteussuojausta ei ollut käytetty muissa zeppeliineissä, eikä kipinäointi niissä ollut aiheuttanut paloa. Kosteussuojaus oli jo saksalaisten onnettomuustutkijoiden löytämä syy, mutta se ei päässyt julkisuuteen, jossa vety leimattiin syylliseksi.

Ilmalaivaonnettomuuksia oli tapahtunut useita ennen Hinderburgia – englantilaisissa, italialaisissa ja amerikkalaisissa aluksissa – mutta Zeppelin-yhtiön rakentamissa yli 100 ilmalaivoissa ei 1. maailmansotaa lukuun ottamatta ollut tapahtunut yhtään kuolemaan johtanutta onnettomuutta. Tämä tapaus, jossa kuoli 36 (varsin vähän hyvin moniin lentokoneonnettomuuksiin verrattuna) aluksen yhteensä 98 matkustajasta ja miehistön jäsenestä, lopetti siitä huolimatta matkustajailmalaivaliikenteen. Tekniikan sijaan pääsyyinä



Kuva 2.21. Hindenburgin kahvion ja hytin jäljennös Zeppelin-museossa Friedrichshafenissa. [2007]

oli onnistunut psykologinen propaganda, jonka edunsaajat olivat kilpailevien kuljetusmuotojen tarjoajat. Ilmalaivojen käyttöä jatkettiin kuitenkin muissa tarkoituksissa, mm. 2. maailmansodan aikana USA:n laivastolla oli käytössään yli 140 alusta.

Lentomatkustuksen mukavuus saavutti huippunsa 1930-luvun ilmalaivoissa, joissa oli samanlaiset palvelut kuin laivoissa, siis hytit, baarit, ravintolat, tanssipaidat, esiintyvät taiteilijat, kaupat ja oleskelutilat (Kuva 2.21). Lisäksi lento oli tasaisempaa kuin lentokoneilla, sillä ilmakeuopit eivät häirinneet ja sisällä oli hiljaisempaa kuin lentokoneissa, sillä moottorit sijaitsivat kaukana ja olivat runkoäänieristettyjä matkustajatiloiista. Myös lentokoneissa oli aiemmin suppeampia tällaisia palveluita, joista viimeisenä hävisivät baarit 1970-luvulla (Airbus A380:n myötä ne ovat uudelleen tulossa). Matkustusmukavuuden heikentämisen suosiminen on eriskummallista kehitystä, joka näkyy selvästi myös maaliikenteessä henkilöautojen dominoivassa asemassa junaliikenteeseen verrattuna. Koska sekä ilma- että maaliikenteen tapauksissa paras pitkien matkojen matkustusmukavuus saavutetaan teknologioilla, joilla on alhaisimmat ympäristövaikutukset, ei ympäristöpolitiikan kasvavan merkityksen takia ole syytä lukea pois tulevaisuuden kehitysvaihtoehtoa, jossa ilmalaivojen ja junien merkitys kasvaa lentokoneisiin ja autoihin verrattuna. Ilmalaivojen polttoainetalouden etu lentokoneisiin verrattuna selittyy siitä, että niissä polttoainetta ei tarvita ilmassa pysymiseen, nosteaineen kulutus on vähäinen polttoaineen käyttöön verrattuna ja tuulivoiman merkitys on suurempi. Ne mahdollistavat jopa maailman ympäri purjehtimisen ilman välitankkauksia ja huomattavasti lentokoneita suuremman lentokorkeuden. Suuren pinta-alan vuoksi ne tarjoavat erinomaisen aurinkosähköön liikennesovelluksen.

Nykyään ilmalaivoja on lukumääräisesti enemmän kuin 1930-luvulla, mutta lähes kaikki ovat mainoskäytössä. Muita sovelluksia ovat erilaiset kuvaustehtävät sekä siviili-, sotilas- ja tieteelliset valvonta- ja nostotehtävät. Henkilöliikenteen ja etenkin tavaraliikenteen uudelleenkäynnistämistä yritetään zeppeliinien vanhalla kotiseudulla Etelä-Saksassa (Kuva 2.22). Uutena sovelluksena on kaukokartoitus- ja tietoliikennesatelliittien osit-

tainen korvaaminen, sillä ilmalaivat toimivat stratosfäärissä ja voivat pysyä siellä kauan. Aurinkoenergian hyödyntäminen mahdollistaa toiminta-ajan pidentämisen jopa kuu-kausiin.



Kuva 2.22. Moderni Zeppelin NT ottamassa kyytiin matkustajia Friedrichshafenissa. [2007]

Purjelentokoneet eli liitokoneet kehittyivät riippuliitimistä 1920-luvulla ja ne ovat olleet lähinnä harrastus- tai sotilaskäytössä (Kuva 2.23). Osa moderneista purjelentokoneista on hybridejä, joissa on apumoottori. Käytössä on ottomoottorit ja sähkömoottorit. Kuvan 2.135c kone on aurinkosähkö-tuulivoimahybridi, joka on varustettu sähkömoottorilla ja aurinkosähköä tuottavilla paneeleilla. Purjekoneet, joissa ei ole apumoottoria saadaan ilmaan vintturin, lentokoneen tai auton avulla. Tavallisten 1–2-paikkaisten koneiden lisäksi käytössä on ainakin sodan aikana ollut myös suuria kuljetuspurjekoneita, joista osaa kehitettiin myös rakettiapumoottoreilla (Griehl 2006). Kuljetuspurjekoneita on käytetty ainakin sodan aikana myös lentoperävaunuina.



Kuva 2.23. Purjelentokoneita Keski-Suomen ilmailumuseossa Tikkakoskella. Etualalla on saksalainen vuonna 1938 esitelty Weihe ja takana vuonna 1958 esitelty puolalainen Mucha Standard. Ne ovat ulkoisesti samanlaisia kuin modernit purjelentokoneet. [2006]

Helikopterin toimintaperiaatteen esitti ensimmäisenä Leonardo da Vinci jo 1400-luvulla. Ensimmäinen helikopterilento tapahtui vuonna 1907 ja niiden voimanlähteet ovat rajoittuneet polttomoottoriin sekä kaasuturbiiniin ja harvinaisena myös sähkömoottoriin (Heatley 1985).

Tuulivoima on oleellinen osa myös kaikkien tavallisten *moottorilentokoneiden* toimintaa, vaikka käytetystä energiasta suurin osa tulee kemiallisista polttoaineista polttomoottorien tai suihkumoottorien avulla, jossain varhaisissa koneissa myös höyrykoneen avulla. Paitsi että tuulivoimaa tarvitaan koneiden pitämiseksi ilmassa, tuulen huomioon ottaminen on olennaisen tärkeää myös polttoainetalouden kannalta, varsinkin moderneilla suihkukoneilla. Polttoaineen säästämiseksi ja matka-ajan lyhentämiseksi matkareittejä pidennetään joskus jopa kymmeniä prosentteja, jotta myötätuulia voitaisiin hyödyntää. Tuulivoimaa on käytetty lentokoneissa 1900-luvun alusta asti myös varavoiman lähteenä sähkölaitteille (Kuva 2.24).



Kuva 2.24. Varavoimanlähteenä Suomen ilmavoimien käytössä olleessa ruotsalaisessa Draken-suihkuhävittäjässä toimiva rungosta ulos laskettava tuuliturbiini Keski-Suomen ilmailumuseossa Tikkakoskella. [2006]

Tuulivoimaa voidaan hyödyntää myös muilla taivaankappaleilla, joissa on ilmakehä, sekä ilma- että maanpäällisessä liikenteessä. Mars-lentojen suunnitelmiin kuuluu erilaisia tuulivoimaa esimerkiksi pallon muotoisessa liikkumavälineessä hyödyntäviä laitteita. Ne mahdollistavat huomattavasti nopeamman liikkumisen, mutta heikomman ohjattavuuden, kuin perinteiset aurinkoenergiakäyttöiset mönkijät.

2.7.3 Maaliikenne

Vesi- ja ilmaliikenteen lisäksi tuulivoimaa hyödynnetään harvinaisena myös maaliikenteessä. Esimerkkeinä ovat jäällä ja lumella käytettävät purjekelkat ja aavikoilla käytettävät purjevaunut. Aavikkopurjehdusta on hieroglyfien mukaan harrastettu jo ainakin 3800

vuotta sitten Egyptissä Amenemhat III:n valtakaudella ja hyvin kauan myös Kiinassa. Niitä voitaisiin kutsua myös ensimmäisiksi autoiksi. Euroopassa purjevaunuja on käytetty ainakin 1500-luvulta alkaen ja raideliikenteessä 1600-luvun lopulta alkaen (Dale 1994). Hollanti oli johtava maa 1500- ja 1600-luvulla tuulivoiman käytössä sekä vesietä maaliikenteessä ja mekaanisen voiman lähteenä, mm. puisten liikennevälineiden valmistuksessa. Purjeen lisäksi myös leijaa on käytetty voimanlähteenä maapurjehduksessa ainakin 1800-luvulla Euroopassa ja luultavasti Kiinassa paljon aikaisemmin, kuten myös vesipurjehduksessa.

Jääpurjehdusta harrastettiin mahdollisesti ensimmäisen kerran 1600-luvun lopulla Hollannin kanavilla. Suomessakin niitä on käytetty meri- ja järvikalastuksessa. Jääpurjehdus oli 1900-luvun alkuun asti nopein ihmisen kuljetukseen käytettävissä oleva liikennemuoto yli 100 km/h maksiminopeudellaan. Kaikista ihmisen käyttämistä liikennemuodoista se jäi tällöin nopeudessa toiseksi vain kyyhkyspostille. Auto pystyi haastamaan jääpurjehduksen nopeuden ensimmäisen kerran vuonna 1899, jolloin sähköautolla saavutettiin yli 100 km/h nopeus. Jäätuulivaunuilla saavutettiin jo 1930-luvulla 200 km/h nopeus, johon pyörällisillä maatuulivaunuilla ei vielä ole päästy. Jää- ja maatuulivaunujen nopeus on jopa 7-kertainen vallitsevaan tuulen nopeuteen verrattuna. Nykyään on valmistuksessa tavallisten tuulivaunujen lisäksi myös tuuli-sähköhybridivaunuja (Hackleman 1996, Kuva 2.25).



Kuva 2.25. Tuulivoima-sähkö-biovoima-hybridipotkulauta Frankfurtin autonäyttelyssä. [2007]

Nekin ajoneuvot, joihin ei ole asennettu varsinaista tuulivoimateknologiaa, hyödyntävät aina niin maalla, vesistöissä kuin ilmassa liikkeessään tuulivoimaa myötätuuleen liikkeessään ja vastaavasti vaativat lisäenergiaa vastatuuleen liikkeessään.

2.7.4 Avaruus-, planeetta- ja kuuliikenne

Heliumilla ja vedyllä täytetyt ilmalaivat kuten myös kuumailmalaiset soveltuvat myös ilmakehän yläosan liikenteeseen, koska myös siellä nämä kaasut ovat ilmaa kevyempiä. Tavanomaisilla maasta lähtevillä ilmalaivoilla ylin mahdollinen korkeus on noin 40 km, mutta on mahdollista valmistaa kevyempiä ja suurempia erikoisilmalaivoja yläilmakehän olosuhteisiin. Tällöin kuorma vaihdettaisiin niihin 30-40 km korkeudessa stratosfäärisä. Ilmalaivojen työntövoiman lähde olisi esimerkiksi polttokenno ja ilmalaivan pinnan täyttävä suihkuttamalla valmistettu erittäin ohut aurinkopaneeli. Tämä tarjoaisi erään vaihtoehdon rakettimootoreille kuorman kuljettamiseksi ilmakehän ja avaruuden raja-alueelle, mutta sitä ei toistaiseksi ole demonstroitu.

Ilmalaivoja voitaisiin käyttää myös ensi vaiheena avaruusraketeille itävaltalaisen Franz von Hoefflin jo vuonna 1928 tekemän ehdotuksen mukaisesti. Kantoilmalaivoja ei ole toistaiseksi tehty, mutta Eugene Sängerin 1930-luvun idea rakettien lähettämisestä avaruuteen

ruuteen kantoraketin sijaan kantolentokoneista toteutui vuonna 1959, kun ammoniakikäyttöisellä X-15-rakettilentokoneella ensimmäisen kerran saavutettiin 80 km korkeus. Tämä oli myös Wernher von Braunin (1967) esittämä avaruussukkuloiden lähetysmetodi, joka ei toteutunut, mutta tällä tavalla vuonna 2004 päästiin avaruuteen 100 km korkeuteen ensimmäisellä yksityisellä miehitetyllä avaruusaluksella SpaceShipOnella. Ilmalaivojen ja -pallojen etuna lentokoneisiin verrattuna on 3-kertainen korkeus jo ensimmäisenä vaiheena ja mahdollisuus käyttää toista vaihetta yläilmakehässä. Perusteknologiana ovat stratosfäärin ilmalaivat ja -pallot, joiden käytöllä Japanilla on pisimmät perinteet, jo 2. maailmansodasta lähtien.

Kaasulaivoja ja -palloja voidaan käyttää myös muilla planeetoilla ja kuilla, joilla on ilmakehä. Tämä tehtiin ensi kerran vuonna 1984 Venuksessa Neuvostoliiton Vega 1- ja Vega 2-luotaimella kuljetetuilla ranskalaisilla heliumpalloilla, joiden halkaisija oli 3,6 metriä (Gatland 1989). Venäjän oli tarkoitus tehdä ranskalaisten kanssa vastaava tutkimus Marsissa vuonna 1994 (Gatland 1989), mutta projekti peruuntui. Vastaavaa kuitenkin suunnitellaan ainakin NASAssa. Myös Saturnuksen kuun Titanin kaasupallotutkimus on suunnitteilla (Suominen 2007b, Musser 2007). Nämä kaasupallot hyödyntävät sekä aurinkoenergiaa että taivaankappaleen kaasukehän tuulivoimaa ja Titanilla myös ydinparistoa.

Erikoisuutena mainittakoon USA:n vuosina 1960 ja 1964 lähettämät kaasupallosatelliitit Echo 1 ja 2, jotka toimivat passiivisina radioliikenteen heijastajina. Ne lähetettiin raketeilla ja toimivat ilmakehän yläpuolella, eivätkä siten voineet hyödyntää nostekaasuja. Vaikka lopulta päädyttiin aktiivisiin geostationäärisiin tietoliikennesatelliitteihin, niin myös heijastavien pallojen käyttö osoittautui teknisesti mahdolliseksi. Siten tietoliikenne- ja paikannussovellutukset jäivät erääksi mahdollisuudeksi myös ilmakehässä nostekaasujen avulla toimiville ilmalaivoille.

2.8 MAAPALLON LIIKE-ENERGIA (3000 eaa)

Maapallon pyörimisliike aikaansaa coriolis-voiman, joka vaikuttaa tuuliin. Sitä on hyödynnetty purjehduksessa meriliikenteen synnystä alkaen eli 5000 vuoden ajan ja myöhemmin myös ilmaliikenteessä. Pasaatituulien, joita englannin kielessä kutsutaan kaupatuuliksi, käyttö on tunnetuin esimerkki maapallon pyörimisliikkeen hyödyntämisestä, alun perin kaupallisessa meriliikenteessä.

Maapallon pyörimisliikettä hyödynnetään myös avaruusrakettien laukaisussa. Liikkuvan merilaukaisuaseman teknologia, joka on ollut käytössä vuodesta 1999, maksimoi ilmaisenergian lähettämällä raketit avaruuteen päiväntasaajalta, jossa pyörimisliike-energia on suurin. Maapallon pyörimisliikkeen nopeus päiväntasaajalla on 1700 km/h ja navoilla 0. Lisäksi, koska laukaistavat satelliitit on pääasiallisesti tarkoitettu päiväntasaajan yläpuolelle geostationäärisille radoille, päiväntasaajalaukaisu säästää polttoaineen, jota muuten tarvittaisiin siirtymiseen oikealle radalle.

Maapallon rataliikettä, nopeudeltaan 100.000 km/h, on pystytty hyödyntämään liikenteessä 1960-luvulta alkaen lähetettäessä avaruusluotaimia toisille taivaankappaleille siten, että kemiallisten polttoaineiden tarve ja matka-aika minimoituvat. Tätä kutsutaan laukaisuikkunaksi. Ensimmäinen onnistunut planeettaluotaimen laukaisu oli Neuvostoliiton Venera 1-luotain Venukseen vuonna 1961 (Gatland 1989).

Vastaavasti voidaan ehkä tulevaisuudessa hyödyntää muiden taivaankappaleiden rata- ja pyörimisliikettä, mikäli laukaistaan niiltä. Gravitaatiolinkotekniikalla sekä maapallon että joidenkin muidenkin planeettojen rataliikettä on jo hyödynnetty (Luku 2.2).

2.9 III SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: RUUDIT (900-LUKU)

Ihmiskunnan historialliselle ajalle tullessa 3000 eaa käytössä oli 8 liikenteen voimälähdettä. Seuraavaa saatiin odottaa 900-luvulle asti, jolloin kiinalaiset ottivat 100-luvulla keksimänsä mustan ruudin pommiliikennekäyttöön rakettimoottorien avulla.

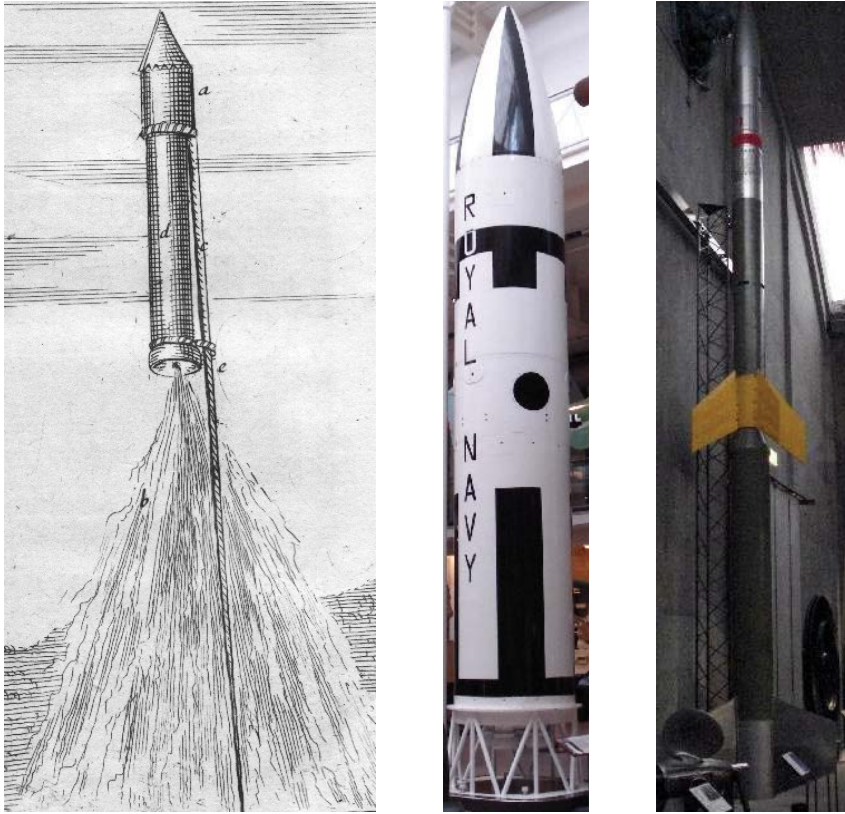
Musta ruuti koostuu hapettimena toimivasta kaliumnitraatista (salpietarista), pääpolttoaineesta puuhiilipölystä ja sytyttimenä toimivasta rikistä. Salpietaria on saatavissa sekä valmiina mineraalina että valmistamalla sitä typpihapon suoloista. Suomessa salpietaria valmistettiin laajamittaisesti 1500-luvulta lähtien navettojen alta kerätystä virtsojen kylästä mullasta, poltetusta kalkista ja tuhkasta (Uola 1998). Rikkiäkään ei välttämättä tarvitse valmistaa mineraaleista, sillä sitä esiintyy osana biomassaa ja biopolttoaineita. Musta ruuti siis ei alun perin sisältänyt fossiilisia polttoaineita, vaan se oli biopolttoaineen ja kiviperäisen polttoaineen sekoitus, jossa pääasiallinen energianlähde oli biopolttoaine, ja se oli myös mahdollista valmistaa kokonaan kasvi- ja eläinperäisistä resursseista. Myöhemmin puuhiilipölyn rinnalla ryhdyttiin käyttämään kivihuilipölyä. Sitoja-aineena on perinteisesti käytetty tervaa.

Vasta 1800-luvulla käyttöön otettiin muita, niin sanottuja savuttomia, ruuteja (Uola 1998). Ensimmäisten joukkoon kuuluivat nitroselluloosa ja Alfred Nobelin keksimä koridiitti, joka on nitroselluloosaan imeytettyä nitroglyseriiniä. Ruuteja eli kiinteitä rakettpolttoaineita on kehitetty lukuisia tyyppejä, joista osa sisältää biopolttoaineita, mutta eivät kaikki. Esimerkkinä rakettimoottorin suuresta polttoainejoustavuudesta on Myyrinturjat-televisiosarjassa tehdyt onnistuneet kokeilut makkaralla. Ruudit toimivat edelleen polttoaineina useimmissa rakettimoottoreissa, mutta nestemäiset ovat tärkeimpiä polttoaineita avaruusraketeissa ja lisäksi myös kaasuja ja plasmaa käytetään.

2.9.1 Rakettimoottori

Kiinalaiset alkoivat käyttää mustaa ruutiä tuliuolissa 900-luvulla (Uola 1998). Niitä pidetään yleisesti ensimmäisinä alkeellisina rakettimoottoreina (Kuva 2.26a).

Rakettimoottorin historia on kuitenkin paljon pitempi. Sen voi jäljittää antiikin Kreikkaan kolmeen merkittävään keksijään. Archytas rakensi nykyisessä Etelä-Italiassa pienen höyrysuihkulaitteen noin 400 eaa puisen kyyhkysen lennättämisdemonstraatioksi. Kyseessä oli puukäyttöinen kuumavesiraketti. Ctesibius puolestaan rakensi 200-luvulla eaa Alexandriassa paineilmatykin demonstraation. Se on kaasukäyttöinen rakettimoottori. Höyry- ja paineilmatykit olivat esikuvia paitsi myöhemmille tykeille myös suihkumoottoreille, erityisesti rakettimoottoreille. Heron kehitti 1. vuosisadalla Aleksandriassa Archytasin ideaa eteenpäin rakentamalla puukäyttöisen reaktiohöyryturbiinin, joka oli paitsi ensimmäinen höyryturbiini myös kuumavesirakettimoottorin toimintaperiaatteen demonstraatio. Reaktiohöyryturbiini otettiin liikennekäyttöön Gustaf de Lavalin



Kuva 2.26. Ruutikäyttöisiä raketteja: a) Tulinuolityyppinen ranskalainen raketti 1700-luvulta (Regnault 1732) b) Englantilaisissa sukellusveneissä 1960-70-luvulla käytetty amerikkalainen Polaris-ydinohjus Lontoon sotamuseossa. [2007] c) Yläilmakehän tutkimuksessa 134 km korkeuteen asti yltävä amerikkalainen Nike-Orion -raketti vuodelta 1998 Tukholman tekniikan museossa. [2006]

veneessä Ruotsissa 1880-luvun alussa. Näissä sovelluksissa suihkua käytettiin kuitenkin turbiinin pyörittämiseen ja ajoneuvon liike tuotettiin mekaanisesti, ei suoraan suihkun työntövoimalla. Yhteisiä piirteitä korostaa se, että Lavalin näitä sovelluksia varten kehittämä suutin on edelleen hänen nimeään kantaen käytössä rakettimoottoreiden ja kaasuturbiinisuihkumoottoreiden suuttimina.

Rakettimoottorin maaliikennesovelluksista ensimmäinen oli Joanes de Fontanan ruutikäyttöinen maatorpedo 1400-luvulla. Isaac Newton suunnitteli rakettimoottorisovelluksia 1600-luvulla, mm. suora puukäyttöinen rakettimoottoriauto (Kuva 2.34) osana hänen nimeään kantavien dynamiikan lakien kehittelyn kokeellista todentamista. Verbiest oli jo sitä ennen demonstroinut puukäyttöisen impulssiturbiiniauton (Kuva 2.45). Mallilaitteina käytettiin tuolloin myös vastaavia paineilmarakettimoottoreita.

Rakettimoottorin ensimmäinen ja edelleen nykyaikana yleisin liikennesovellutus on pommien rahtaaminen (Kuva 2.26b). Ilotulitukset edustavat toista perinteistä kiinalaista sovellusta, jossa tavanomaisen mustan ruudin lisäksi sallitaan Suomessa myös muita kuin kaliumin nitraatteja ja metalliperkloraatteja. Tässä sovelluksessa halutaan saada aikaan

myös savuilmio, joten savuttomuus ei ole toivottava ominaisuus. Lisäksi niitä on käytetty kauan merkinantoraketeissa ja 1800-luvulta alkaen pelastusraketeissa, esimerkiksi laiva-onnettomuuksissa. Ensimmäisen ja toisen maailmansodan välillä sovellutukset laajenivat Robert Goddardin aloittamana ilmakehän tutkimukseen (Kuva 2.26c) kuten myös maaliikenteen (autot, junat ja kelkat) ja ilmaliikenteen kokeiluihin.

Raketteja on kokeiltu henkilökuljetuksessa ilmeisesti ainakin Kiinassa 1500-luvulla ja Turkissa 1600-luvulla. Kysymyksessä on ollut ihmistykinkuula-tyyppinen sovellus ihmisen lennättämiseen ilman lentämisen kontrollia. Ensimmäiset kontrolloitavat henkilökuljetukseen sopivat rakettiajoneuvot eivät olleet ilma- vaan maa-ajoneuvoja. Fritz von Opel valmisti vuonna 1928 kaksi rakettiautoa RAK 1 ja RAK 2 (Kuva 2.27) käyttäen Friedrich Wilhelm Sanderin mustaruutikäyttöisiä rakettimoottoreita. Myöhemmin samana vuonna tapahtui myös ensimmäinen rakettilentokoneen lento. Kyseessä oli Alexander Lippichin Sanderin mustaruutiraketeilla varustama purjelentokone Ente. Ensimmäinen rakettimoottoriveturin kokeilu tapahtui myös vuonna 1928, asialla Fritz von Opel.



Kuva 2.27. Kopio Opelin mustaruutikäyttöisestä rakettiautosta Opel RAK 2 vuodelta 1928 Speyerin teknologiamuseossa Saksassa. Se saavutti 230 km/h nopeuden. Se on varustettu siivillä (spoilereilla), mutta päinvastaisesta syystä kuin lentokoneilla: niiden tarkoitus on estää lentoon lähteminen. [2007]

Toisen maailmansodan aikana rakettimoottoreita käytettiin ohjuksissa, torpedoissa ja lentokoneissa sekä pää- että apumoottoreina (Griehl 2006). Sodan jälkeen avaruusliikenne on ollut tärkein uusi sovellus. Rakettimoottoreita on sodan jälkeen käytetty myös maa- ja vesiliikenteessä, mutta vain kilpa-autoissa ja kilpaveneissä. Rakettimoottorit toimivat myös veden alla, ja sitä ominaisuutta on sukellusveneohjuksin ja torpedoin hyödynnetty saksalaisten 1940-luvun kokeista alkaen. Rakettimoottoreita on käytetty harvinaisena myös henkilökohtaisen reppulentolaitteen voimanlähteenä, vuodesta 1961 alkaen.

Kaikista termodynaamisista moottorityypeistä raketimoottori tarjoaa suurimman tehon, teho/paino-suhteen ja nopeuden. Nestemäisiä polttoaineita vetyä ja kerosiinia käyttänyt Apollo-lentojen Saturn V -kantoraketti oli 130.000 MW:n tehollaan voimakkain koskaan rakennettu kone (Kuva 2.50a). Raketimoottori on ainut nykyisin käytettävissä oleva moottorityyppi, joka mahdollistaa tavaroiden ja ihmisten kuljettamisen avaruuteen (mutta se ei jääne ainoaksi, sillä monia muitakin vaihtoehtoja tutkitaan, kts. Bolonkin 2006). Siten se on nykyään avaruusliikenteen selvästi tärkein moottorityyppi. Avaruuteen pääsyn jälkeen myös esimerkiksi aurinkopurje ja gravitaatiolinko ovat käyttökelpoisia. Avaruuteen pääsy on varsin haastava tehtävä, sillä sen rajalle 100 km korkeuteen tarvitaan noin 4000 km/h nopeus, kiertoradalle 28.000 km/h ja maan vetovoimakentästä irtautumiseen esimerkiksi kuumatkalle 40.000 km/h. Raketimoottorin keskeisiä eroja turbojet- ja ramjet-suihkumoottoreihin on esitetty taulukossa 2.4.

Ruutikäyttöisellä, siis kiinteitä polttoaineita käyttävällä, raketimoottorilla on saavutettu nykyinen maaliikenteen nopeusennätys 8,5 Machia eli yli 10.000 km/h kiskokelkalla vuonna 2003 USA:ssa. Raketimoottorit tarjoavat myös suurimman vedenalaisen nopeuden, mutta lentoliikenteessä nopeusennätys on scramjetillä, vesiliikenteessä kaasuturbiinisuihkumoottorilla ja avaruusliikenteessä gravitaatiolingolla.

Raketimoottorien historian käsittelyä jatketaan alla jakamalla ne kiinteitä ja nestemäisiä polttoaineita sekä kaasuja, plasmaa, aurinkovoimaa, ydinvoimaa ja antimateriaa käytäviin moottoreihin. Tärkeimpien polttoaineiden käyttöönoton ajankohdat on lueteltu taulukossa 2.1. Sotilassovelluksissa käyttöön otetut polymeeripohjaiset kiinteät polttoaineet eivät sisälly taulukkoon. Kaikille raketimoottoreille on yhteistä se, että ne eivät tarvitse ulkoista ilmaa toimiakseen, kuten esimerkiksi kaasuturbiinipohjaiset suihkumoottorit.

Taulukko 2.1. Eräiden raketimoottorien ajoaineiden käyttöönotto liikennesovelluksissa 1. maailmansodan jälkeen. Laitte tarkoittaa avaruusrakettia tai avaruusalusta, ellei muuta mainita. Tiedot monista lähteistä, joihin lukeutuvat Gatland (1967, 1989) ja Wikipedia 2009.

Vuosi	Ajoaine	Olomuoto	Hapetin	Laitte	Maa
1926	Bensiini	Neste	LO2	Tutkimusraketti	USA
1928	Musta ruuti	Kiinteä	(salpietari)	Opel RAK1-auto	Saksa
1929	Etanoli	Neste	LO2	Valier RAK2- kelkka	Itävalta, Saksa
1929	Hiiidioksidi (C-CO2)	Kaasu	-	Valier RAK6-auto	Itävalta, Saksa
1931	Metaani (LCH4)	Nest. kaasu	LO2	Tutkimusraketti	Saksa
1933	Havupuuhartsi + bensiini	Kiinteä	LO2	Tutkimusraketti	N-liitto
1937	Vetyperoksidi	Neste	-	He72-lentokone	Saksa
1941	Metanoli + hydratsiini	Neste	Vetyperoksidi	Me163-lentokone	Saksa
1957	Kerosiini	Neste	LO2	R7/Sputnik	N-liitto
1958	Dimetyylihydratsiini (UDMH)	Neste	Typpihappo	Vanguard	USA
1958	DETA + UDMH	Neste	LO2	Juno I	USA
1959	Ammoniikki	Nest. kaasu	LO2	X-15-lentokone	USA
1961	Vety (LH2)	Nest. kaasu	LO2	Saturn I	USA
1964	Ionit (elohopea)	Plasma	-	SERT I	USA
1965	Metyylihydratsiini (MMH)	Neste	Typpitetroksidi	Gemini 3	USA
1965	Tärpähti	Neste	Typpihappo	Diamant A	Ranska
2015	Metaani (C-CH4)	Kaasu	LO2	Orion	USA

2.9.1.1 Kiinteät rakettipolttoaineet (ruudit)

Vaikka muuntyyppisiä rakettimoottoreita oli kauan ollut olemassa demonstraatiolaitteina, musta ruuti pysyi käytännön sovelluksissa rakettimoottoreiden ainoana polttoaineena aina 1. maailmansotaan asti, jolloin Robert Goddard yritti ensimmäisen kerran korvata sen savuttomilla ruudeilla (Braun 1967).

Toisen maailmansodan jälkeen käyttöön on tullut suuri joukko muita ruuteja eli kiinteitä rakettimoottoripolttoaineita, joista suurin osa sotilassovelluksia varten. Niiden kehitys kytkeytyy muoviteknologian kehitykseen, sillä 1950-luvulta lähtien synteettiset polymeerit ovat muodostaneet kaupallisten polttoaineiden ytimen. Käyttöön on otettu esim. polysulfideja, polyuretaaneja, vinyylipolyestereitä, polyvinyylidiklorideita ja polybutadienejä. Nykyään suosituimpiin yhdisteisiin lukeutuvat 1960-luvulla kehitetyt PBAN (polybutadiene acrylonitrile), CTPB (carboxy terminated polybutadiene) ja HTPB (hydroxy terminated polybutadiene). Nämä ovat muovailtavia kumimaisia aineita, jotka paitsi antavat osan polttoainetehosta liimaavat yhteen muut komponentit ja siten pääpolttoaine, hapetin, katalyytit, sytytin ja muut tarvittavat aineet saadaan yhtenäiseksi massaksi. Metallipolttoaineista alumiini otettiin ensimmäisenä käyttöön 1950-luvulla ja sen jälkeen useita muita metalleja on sovellettu samaan tarkoitukseen. Esimerkiksi avaruussukkulaukaisun apuraketien polttoaineen massaosuudet ovat: polttoaine alumiinijauhe (16 %), hapetin ammoniumperkloraatti (70 %), sideaine PBAN tai HTPB (12 %) ja katalyytti rautaoksidi (0,4 %).

Kiinteän polttoaineen etuna on järjestelmän yksinkertaisuus, mutta tärkeimpänä haittana säätömahdollisuuden puute ja myös sammuttamisen vaikeus. Jälkimmäinen on mahdollista vain osittain alentamalla palotilan painetta räjäyttämällä purkaussuuttimet tai muu osa raketista pois. Nestemäisillä ja kaasumaisilla polttoaineilla sitä vastoin saavutetaan täydellinen säädettävyys ja sammuttaminen on yksinkertaista. (Braun 1967)

Välimuotoa edustaa hybridiraketti. Siinä joko polttoaine tai hapetin on nestettä, jolloin säätäminen ja sammuttaminen on rajoitetusti mahdollista nestemäisen komponentin virtausta säätämällä (Braun 1967). Ensimmäinen hybridiraketti oli Neuvostoliiton GIRD-9-tutkimusraketti vuonna 1933 (Gatland 1989). Se koostui kolofoniin eli havupuuhartsiin imeytetystä bensiinistä hapettajana nestehappi. Ensimmäinen yksityinen avaruusraketti SpaceShipOne kulki hybridiraketilla, jonka HTPB-pohjainen polttoaine hapetettiin typpioksiduulilla.

2.9.1.2 Nestemäiset rakettipolttoaineet

Nestemäisellä polttoaineella toimivan raketin toimintaperiaatteen julkaisi Konstantin Tsiolkovski vuonna 1903 (Crouch 1999), mutta kesti kauan saada sellainen teknisesti toteutettua. Nestemäisen rakettipolttoaineen (benssiini + LO₂) otti ensimmäisen kerran käyttöön Robert Goddard vuonna 1926 ilmakehän tutkimuksessa (Sutton 2005). Nestemäisen polttoaineen etuna kiinteään verrattuna on mahdollisuus moottorin tehon säätelyyn polttoaineen virtausta säätämällä. Kiinteä polttoaine puolestaan palaa nopeasti ilman mahdollisuutta säätöön ja sammutukseen.

Etanolista, jota jo Goddard käytti vuoden 1926 raketissaan LO₂:n esilämmittimenä, tuli ensimmäinen suurten raketien polttoaine ja ensimmäinen henkilökuljetukseen so-

veltuvien rakettiajoneuvojen nestemäinen polttoaine. Ensimmäiset etanolilla kulkevat rakettimoottoriajoneuvot olivat Max Valierin rakettikelkka vuonna 1929 ja rakettiauto vuonna 1930 (Kuva 2.28). Etanoliraketin ensimmäinen ilmailukäyttö oli saksalainen A2, joka ensilaukaisu tapahtui vuonna 1934 (Klee ym. 1965). Siitä kehitettiin A4 eli V2, josta tuli ensimmäinen avaruusraketti vuonna 1942 (Kuva 2.78).



Kuva 2.28. Valierin etanolikäyttöinen rakettimoottorikelkka RAK 2 vuodelta 1929 ja auto RAK 7 vuodelta 1930 Deutsches Museumissa Münchenissä [2007].

Hypergoliset nestemäiset polttoaineet – 2 polttoainekomponenttia, jotka syttyvät itsestään joutuessaan kosketuksiin toistensa kanssa – otettiin käyttöön Saksassa sodan aikana rakettikoneiden polttoaineina. Tässä tarkoituksessa käytettiin mm. hydratsiinia ja vetyperoksidia. Myöhemmin on käyttöön otettu monia muita, esimerkiksi metyylihydratsiini (MMH) ja demetyylihydratsiini (UDMH) yhdessä dityppitetraoksidin kanssa.

Nesteytetyt kaasumaiset polttoaineet, kryogeeniset polttoaineet, on myös tunnettu kauan. Nesteytetty happi oli käytössä hapettimena jo Goddardilla vuonna 1926. Ensimmäiseksi varsinaisista kryopolttoaineista käyttöön otettiin nesteytetty metaani (LBG, LNG, LCH₄) vuonna 1931 (Crouch 1999). Se on myös tulevan EADS Astriumin turistilentoihin tarkoitetun Spaceplane-raketti/suihkumoottorikoneen polttoaine (Belfiore 2007). Nesteytetty vety (LH₂), jota jo Tsiolkovski vuonna 1903 ilmestyneessä kirjassaan piti parhaimpana polttoaineena, on nykyään tärkein suurten rakettien polttoaine. Sitä käytettiin kuudessa Apollo-lentojen Saturn V -kantoraketin J2-moottorissa (Kuva 2.50a). Vetyä käytetään nykyään mm. NASA:n avaruussukkulun kolmessa 6400 MW:n päämoottorissa sekä ESA:n Ariane-rakettien päämoottoreissa (Kuva 2.50b). Sitä tullaan käyttämään myös NASA:n avaruussukkuloiden tilalle vuonna 2015 tulevan Constellation-järjestelmän ARES-raketeissa (Dingell ym. 2007). Johtuen vedyn ja sen palamistuotteen veden pienestä molekyylimassasta vetyrakettien pakokaasujen poistumisnopeus vapautettua energiayksikköä kohti on suurempi kuin millään muulla kemiallisella polttoaineella (Braun 1967). Se tarkoittaa noin 50 % korkeampaa impulssia kuin etanoli- ja kerosiini-moottoreilla. Tämä yhdistettynä kemiallisten polttoaineiden joukosta korkeimpaan lämpöarvoon ja helppoon käynnistävyyteen on tehnyt vedystä suosituimman pääpolttoaineen avaruusraketeissa. Nestevetyä käyttävien moottoreiden teho/painosuhte on luokkaa 1 MW/kg eli miljoona kertaa suurempi kuin 1800-luvun höyrykoneilla (Smil 1991).

Kaikissa yllämainituissa tapauksissa polttoaine tai paremminkin ajoaine koostuu kahdesta osasta, jolloin voidaan puhua kaksiosaisesta ajoaineesta tai biaoaineesta (bipropellant). Yksiosainen ajoaine, joka ei tarvitse erillistä hapetinta otettiin käyttöön Saksassa vuonna 1937. Silloin käytettiin vetyperoksidia. Muita yksiosaiseksi ajoaineeksi tai monoajoaineeksi (monopropellant) mahdollisia kemikaaleja ovat esimerkiksi hydratsiini ja isoprolyylinitraatti. Nämä ovat kaikkein suurinta käsittelyn huolellisuutta vaativia polttoaineita.

Nestemäisiä polttoaineita käytäviä rakettimoottorityyppejä on noin 1300 erilaista (Sutton 2005). Suuren nestemäistä polttoainetta käyttävän rakettimoottorin termodynaaminen hyötysuhde on välillä 20-50 %, mutta kokonaishyötysuhde hyötykuorman viemisessä kiertoradalla on vain noin 12 % (Kolin 1972). Osa nestemäisistä rakettipolttoaineista on käytössä myös muunlaisissa moottoreissa.

2.9.1.3 Kaasumaiset rakettipolttoaineet

Nämä ovat varhaisimpia rakettimoottoreita ja eri moottorityypeistä helpoimmin demonstroitavissa (Kuva 2.29). Sekä painehöyry- että paineilmarakettimoottorien periaatteellinen toimintamekanismi on tunnettu jo antiikin aikana. Ne olivat aina 1900-luvun jälkipuoliskolla asti kuitenkin vain demonstraatiolaitteiden tasolla. Mutta nykyään painekaasusuihkumoottorit ovat oleellisen tärkeää teknologiaa avaruusalusten ohjauksessa. Max Valierin hiilidioksidikäyttöinen auto RAK6 oli ensimmäinen painekaasurakettimoottorin liikennekokeilu vuonna 1929.



Kuva 2.29. Paineilmarakettiajoneuvon demonstraatio ilmapallokäyttöisellä leluautolla. [2007]

Sekä kiinteitä että nestemäisiä rakettipolttoaineita käytettäessä työntövoima syntyy kaasusta. Kaasumaisilla rakettipolttoaineilla tarkoitetaan tekniikkaa, jossa myös varastoitava aine on kaasumaista. Työntövoima voi syntyä fyysisestä energiasta paineistetun kaasun laajetessa (jolloin kyse ei ole poltosta) tai kemiallisesta energiasta antamalla kaasun reagoida hapettimen kanssa. Fysikaalisen energian esimerkkinä on paineistetun tyypin käyttö astronauttien rakettirepussa (MMU=Manned Maneuvering Unit)). Muihin käytettyihin kaasuihin lukeutuvat helium, argon ja hiilidioksidi. Kemiallisen energian esimerkki on paineistetun metaanin käyttö hapella hapetettuna tulevassa Orion-avaruusaluksessa.

2.9.1.4 Plasma

Ionimoottori hyödyntää varautuneita hiukkasia eli plasmaa. Se on avaruusliikennettä varten Hermann Oberthin jo 1920-luvulla ehdottama moottorityyppi, jossa ionien pakonopeus on kymmeniä kertoja kemiallisten rakettimoottorien savukaasujen pakonopeutta suurempi. Siitä on olemassa lukuisia toimintamekanismeja, joista osaa on kokeiltu laboratorioissa 1960-luvulta alkaen (Kuva 2.30a). Niitä on käytetty vuodesta 1964 alkaen satelliiteissa ja vuodesta 1998 alkaen avaruusluotaimissa. Esimerkiksi ruotsalaisen vuonna 2003 kuuuhun lähetetyn Smart-1-luotaimen voimanlähteenä oli Hallin ilmiöön perustuva ionimoottori, jonka tarvitsema sähkö saatiin aurinkopaneeleilla ja ionit xenonkaasusta (Kuva 2.30b).



Kuva 2.30. a) Ionimoottori vuodelta 1970 Lontoon tiedemuseossa. [2007] b) Aurinkopaneelikäyttöinen Hall-ionimoottori ruotsalaisen vuonna 2003 lähetetyn Smart 1 -kuuluotaimen voimanlähteenä, piirros. [© ESA]

2.9.1.5 Aurinkovoima ja ydinvoima

Aurinko- ja ydinvoimaa voidaan käyttää rakettimoottorien voimanlähteenä useilla tavoilla sekä suoraan että sähköntuotannon kautta. Kaikissa tapauksissa tarvitaan jotain ainetta, jonka ulossuihkutus antaa työntövoiman. Avaruusaluksissa voidaan kuljettaa mukana vain varsin pieni määrä ajoainetta, mutta sitä on saatavissa runsaasti muilta planeetoilta ja kuista: esimerkiksi Jupiterin kaasukehässä on runsaasti vetyä ja monia hiilivetyjä. Metaani on yleinen aine sekä kaasuplaneetoille että monilla kuilla. Vetyä on tarjolla jopa planeettojen ja tähtien välisessä avaruudesta: Bussard on ehdottanut ramjet-

suihkumoottoria, joka perustuu sen käyttöön. Vety on paras mahdollinen ajoaine johon sen pienimmästä atomimassasta ja sitä seuraavasta suurimmasta kaasun poistumisnopeudesta energiayksikköä kohti (Braun 1967). Energian saanto maksimoituisi, mikäli kerätyt vetyatomit saataisiin fuusioitua eli fuusiosuihkumoottorilla.

Idean sähköraketista esitti Robert Goddard jo vuonna 1906. Laboratorioissa on tähän mennessä tutkittu lukuisia erilaisia sähköraketin toteuttamismenetelmiä, joista muutama on otettu luotaimissa ja satelliiteissa käyttöön aurinkopaneelien voimalla. Ajoaineina on käytetty ammoniakkaa, elohopeaa ja ksenonia. Esimerkkinä on kuvan 2.30b ESan Smart 1 -luotaimen Hall-ionimoottori, jossa ajoaineena on ksenon. Ydinsähkörakettimoottoria ei toistaiseksi ole avaruudessa kokeiltu.

Sähköntuotannon sijaan aurinko- ja ydinfissiolämpöä voidaan käyttää myös suoraan lämmittämään ajoainetta ja aiheuttamaan sen paisunnan ja työntövoiman. Kumpaakaan ei ole käytännössä vielä kokeiltu. Neuvostoliitossa tehtiin laboratoriokokeita ydinraketista ajoaineina ammoniakki, etanoli ja vety, mutta avaruuteen niitä ei lähetetty. Ydinfissiolämpösuihkumoottoria sen sijaan on kokeiltu 1960-luvulla lentokoneessa Neuvostoliitossa. Rocketdyne-yhtiö on valmistanut USA:ssa vuonna 1999 laboratoriomoottorin aurinkolämpöraketista RS-77, mutta sitä ei ole vielä kokeiltu avaruudessa. Ajoaineena on vety.

On esitetty ajatuksia myös ydinräjäytyksiä työntövoimana käyttävistä avaruusraketeista ja tavanomaisilla räjähteillä kyseistä teknologiaa on (epäonnistuneesti) 1950-luvulla kehiteltykin. Polttoaineena tällaisissa moottoreissa olisi esimerkiksi vety. Nykyään ei tiedetä, miten tällainen moottori voitaisiin käytännössä toteuttaa.

2.9.1.6 Antimateria

Antimateriamoottorit ovat tuttuja tieteiskirjallisuudesta. Niiden avulla olisi teoriassa mahdollista saavuttaa suurempi teho/painosuhte kuin millään muulla suihkumoottorilla (Kaku 2008). Nykyinen tietämys ja saatavissa oleva rahoitus eivät riitä sellaisten toteuttamiseen, eikä antimaterian laajamittaiseen tuotantoon ja varastointiin. Sitä kuitenkin pystytään nykyään hyvin pieniä määriä hiukkaskiihdyttimillä valmistamaan. Antimateria on myös Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian kautta teoreettinen toivo toteuttaa tieteiskirjallisuudessa yleisesti esiintyviä warp- ja takionimoottoreita efektiivisesti valoa nopeampaa ”hyperavaruus”-liikennettä varten, mutta nykyisellä tietämyksellä se ei ole mahdollisia.

2.9.2 Ruudit muissa moottorityypeissä

Epäorgaanisia kiinteitä polttoaineita on käytetty myös muissa moottorityypeissä. Kolinin (1972) mukaan termodynaamisia tykkejä voidaan pitää yksinkertaisimpina lämpövoimakoneina. Ne otettiin käyttöön Kiinassa 1100-luvulla (huom. paineilmatykeillä on 1400 vuotta pitempi historia). Niillä on kohtuullisen hyvä termodynaaminen hyötysuhde: se oli 1700-luvulla noin 15 % ja nykyaikaisilla tykeillä noin 32 % (Kolin 1972).

Puuhiilipohjainen musta ruuti oli Leonardo da Vincin vuonna 1509 suunnitteleman, mutta ei rakennetun, polttomoottorin voimanlähde. Se oli myös ensimmäisen toimi-

van polttomoottorin, Christian Huygensin Versailles:n vesipumppua varten rakentaman moottorin, käyttövoimana vuonna 1673 (Suzuki 1997). Mustaa ruutia ei tiettävästi ole käytetty liikennekäytössä olevissa polttomoottoreissa. Ensimmäisen höyrykonekäyttöisen sukellusveneen polttoaineena 1860-luvulla oli sinkistä, mangaaniperoksididista ja kaliumkloraatista valmistettu ruuti.

Ramjet- ja scramjet-suihkumoottorit voivat käyttää samoja kiinteitä polttoaineita kuin rakettimoottoritkin. On mahdollista, että tulevaisuudessa ruutien joukosta löytyy yhdisteitä, jotka sopivat muidenkin liikennemoottorien polttoaineeksi.

2.10 MEKAANINEN VOIMA (1600-LUKU)

Jousen käyttö mekaanisena energian varastona on tunnettu jo antiikin ajoista ja sen merkittävimmät sovellutukset ovat olleet ammuksen lennätys (jouset ja lingot sekä vääntäjousia hyödyntävät katapultit) ja kellokoneistot (vieterijousi). Pienoismalleja kellokoneistoajoneuvoista rakennettiin 1400-luvun puolivälistä alkaen ja Leonardo da Vinci suunnitteli jousikäyttöisen auton (Kuva 2.31), jota ei kuitenkaan tiedetä silloin rakennettuna täysmittaisena (Juhala 1999).



Kuva 2.31. Leonardo da Vincin 1400-luvulla suunnittelema ja 1900-luvulla rakennettu jousikäyttöinen auto Firenzessä. [2004]

nissa 1870-luvulla ja USA:ssa 1880-luvulla: parhaimmillaan noin 5 tonnin painoisella raitiovaunulla pääsi 13 km höyrykoneen tekemien latausten välillä (Klapper 1961).

Jousivoimalla oli merkitystä myös motorisoidun ilmailun alkuaikoina. Kellokoneisto oli maailman ensimmäisen ilmaa painavamman motorisoidun ulkona lentävän koneen, Félix du Templen mallikoneen, voimanlähteenä vuonna 1857 (Mondey 1979). Ensimmäisessä todella lentäneessä mallihelikopterissa vuonna 1870 oli puolestaan Alphonse Penaudin kuminauhakäyttöinen vääntäjousimoottori.

Myös vauhtipyörä on ollut käytössä jo antiikin ajoista. Se on mahdollinen voimanlähde sekä kevyimmässä ajoneuvoissa kuten kolmipyörissä että myös kaikkein raskaimmissa ajoneuvoissa kuten laivoissa ja junissa. Jo James Watts käytti sitä höyrykoneissaan 1700-luvulla. Se oli käytössä liikkuvissa höyrykoneissa alkaen Trevithickin ensimmäi-

sestä veturista vuonna 1803 ja Benz otti sen polttomoottoriautokäyttöön vuonna 1885. Moderni esimerkki on Saksassa Fraunhofer-instituutissa rakennettu hybridiraitiovaunu, jossa on 325 kW_m vauhtipyörä ja 80 kW_e polttokenno. Vauhtipyöriä on käytetty bussien päävoimanlähteenä 1950-luvulta (Christeller 2007, Kuva 2.32) ja myös junissa ja raitiovaunuissa. Jälkimmäisistä on esimerkkinä kaupallisessa käytössä oleva englantilainen Parry People Mover -tekniikka (PPM 2007). Siinä vauhtipyörä ladataan verkkosähköllä pysäkeillä, jarrutusenergialla, ajoneuvossa lämpövoimakoneella tai ajoneuvon akusta, joka puolestaan voidaan ladata ulkoa, LPG-moottorilla, polttokennolla tai dieselmoottorilla. Saksalainen MAN-yhtiö ja japanilainen Hino Motors ovat puolestaan toteuttaneet vauhtipyörää hyödyntäviä hybridibusseja (Suzuki 1997).



Kuva 2.32. Münchenin kaupunkiliikenteen vauhtipyöräbussi vuodelta 1988. Vauhtipyörä näkyy bussin perällä. Kuva Deutsches Museumissa Münchenissä. [2007]

Vauhtipyörän hyötysuhde on luokkaa 90 % eli lyijyakkuja parempi, mutta ei parhaiden Li-ioniakkujen tasolla. Sen energiantalennuskapasiteetti massayksikköä kohti on Li-ioniakkujen tasolla eikä se laske ajan myötä kuten sähkökemiallisten akkujen kapasiteetti (Taulukko L6.4). Sen elinikä on vuosikymmeniä eli kymmeniä kertoja akkuja pitempi ja sen maksimiteho on hyvin suuri eli tarvittaessa sen energia voidaan purkaa hyvin nopeasti akkuihin verrattuna. Siitä syystä se soveltuu erittäin hyvin ylämäissä ja muissa erityisen suurissa ajoneuvon rasituksissa eli huippukuormassa käytettäviksi. Se mahdollistaa moottorin mitoituksen tavanomaisen kuorman tasolle päinvastoin kuin normaaleissa ajoneuvoissa, joiden moottorit mitoitetaan harvinaisten huippukuormien mukaan. Moottorin pienentäminen vähentää sen päästöjä ja investointi- sekä polttoainekuluja. Kuvassa 2.33 olevaan 400 kg painoiseen vauhtipyörään voidaan varastoida 2 kWh energiaa ja se pystyy luovuttamaan energiaa 300 kW teholla.

Vauhtipyörä, jousi ja muut mekaaniset energiavarastot voidaan ladata esimerkiksi lihasvoimalla, lämpövoimakoneilla tai sähköllä. Mekaaniset energiavarastot kuuluvat teknologioihin, jotka mahdollistavat ajonaikaiset nollapäästöt (ZEV), mutta kokonaispäästöt riippuvat siitä, millä energialähteellä ne on ladattu.

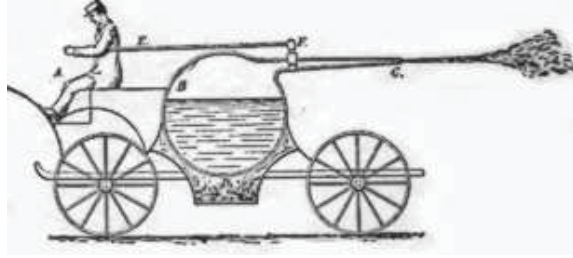
Kuva 2.33. Saksalaisen Magnet Motor -yhtiön valmistama MDS K bussikäyttöön tarkoitettu vauhtipyörä esitteillä Deutsches Museumissa Münchenissä. [2007]



2.11 IV SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: PUU JA PUUHIILI (1700-LUKU)

Puun energiakäyttö alkoi noin 500.000 eaa ensin keitto-, lämpö- ja valaistusenergian lähteenä. Puuhiiltä on periaatteessa käytetty yhtä kauan, sillä sitä syntyy ja palaa aina avonuotiolla puuta poltettaessa. Puuhiiltä opittiin erikseen valmistamaan pyrolyysillä noin 3000 eaa (Rosillo-Calle & Bezzon 2000). Puuhiiltä todella vaadittiin vasta noin 1500 eaa, jolloin rautaa opittiin valmistamaan, sillä tarpeeksi korkeaa lämpötilaa ei saada syntymään puuta polttamalla. Tyypillisesti pyrolyysilaitoksissa saatiin puun kuivamassasta 40 % puuhiilinä ja lisäksi saatiin tervaa, tärpättiä, metanolia ja etikkahappoa (Talvitie 1924b). Modernilla teknologialla paineistetulla pyrolyysillä puuhiilisaanto on parantunut noin 50 % tasolle (Bezzon & Rocha 2000).

Puuhiiltä voidaan käyttää kaikkiin tarkoituksiin, joihin kivihiiltä ja koksiakin, mukaan lukien metalliteollisuuden sovellukset, joihin puu ei sovi. Liikenteessä puuta ja puuhiiltä pystyttiin käyttämään vasta 1700-luvulla höyrykoneen avulla, vaikkakin liikennevälineiden malleja ja suunnitelmia tehtiin jo 1600-luvulla. Isaac Newtonin vuonna 1680 luonnostelema puukäyttöinen suihkumootoriauto (Hiscox 1900, Angelucci & Bellucci 1974) on esitetty kuvassa 2.34. Puuhiili on myös mustan ruudin pääosa ja on siten tullut rakettimootorikäyttöön 900-luvulla ja polttomootorikäyttöön 1600-luvulla.



Kuva 2.34. Isaac Newtonin luonnosteleva puukäyttöinen vesihöyrystinmoottoriauto vuodelta 1680. Sitä ei tiettävästi rakennettu. (Sapiensman 2007)

Teknologiaa vaihtoehtoja puun liikennekäyttöön tuli runsaasti lisää 1800-luvulla, jolloin keksittiin kuumailma- ja kuumakaasukoneet, erityisesti stirling- ja ericssonmoottori, ja käytännöllinen höyryturbiini. Ottomoottori ja sen käyttö yhdessä häikäpöntön avulla kaasutetun puun ja puuhiilen kanssa olivat myöskin 1800-luvun keksintöjä. Bénier osoitti vuonna 1887, että teknisesti kiinteää polttoainetta, koksi- tai puuhiilipaloja, voidaan jopa käyttää suoraan polttomoottorissa, siis sylinterin sisällä polttaen (Kolin 1972). Kaupallista moottoria sillä tekniikalla ei kuitenkaan ole odotettavissa. Helpompaa on käyttää pölytettyä kiinteää polttoainetta, ja hiilipölyä kokeili jo Rudolf Diesel 1890-luvulla ja sitä on harvinaisena käytetty dieselmootoreissa myöhemminkin.

Kaikissa näissä lämpövoimakoneissa voidaan käyttää puun ja puuhiilen lisäksi myös muita kiinteitä polttoaineita kuten peltobiomassa, kivihiili, koksi ja turve. Myös nestemäisiä polttoaineita, kuten raskas polttoöljy, ja kaasumaisia polttoaineita, kuten masuunikaasu, on käytetty. Käytännössä kivihiili oli globaalisti yleisin polttoaine noin 1930-luvulle asti ja raakaöljypohjaiset nestemäiset polttoaineet sen jälkeen. Suomessa puu oli kivihiiltä tärkeämpi lämpövoimakoneiden polttoaine aina 1940-luvulle asti (Kurki-Suonio 1991). Puun käyttö Suomen liikenteessä 1940-luvulla on esitetty taulukossa 2.2. Vuosikulutus oli suurimmillaan noin 20 PJ, joka vastaa noin 12 %:a Suomen nykyisestä tieliikenteen energiankulutuksesta (Taulukko L7.1). Puuta käytettiin myös ilmaliikenteessä 1700-luvulta lähtien nostekaasun lämmityksessä.

Taulukko 2.2. Puun käyttö Suomen liikenteessä 1940-1948. Halot käytettiin junien ja laivojen höyrykoneissa ja muutaman laivan höyryturbiinissa. Pilkkeet ja puuhiili käytettiin puukaasuna häikäpöntöllä varustettujen autojen ottomoottoreissa. Muokattu Valannon (1991b) pohjalta.

Vuosi	Halot junissa		Halot laivoissa		Pilkkeet autoissa		Puuhiili autoissa	
	[p-m ³]	[PJ]	[p-m ³]	[PJ]	[i-m ³]	[PJ]	[i-m ³]	[PJ]
1940					50 000	0,18	180 000	0,90
1941	1 979 772	10,7			100 000	0,36	490 000	2,45
1942	1 541 360	8,3			350 000	1,26	420 000	2,10
1943	1 661 084	9,0			600 000	2,16	460 000	2,30
1944	2 128 604	11,5			600 000	2,16	450 000	2,25
1945	2 987 901	16,1			460 000	1,66		
1946	2 866 534	15,5			340 000	1,22		
1947	2 774 039	15,0	127 493	0,69	63 000	0,23		
1948	1 825 421	9,9	105 758	0,57				

Puuta ja fossiilisia energialähteitä käyttäviä liikenne- ja muita koneita olisi ollut mahdollista rakentaa jo antiikin aikana, sillä kaikki komponentit olivat käytettävissä. Kreikkalainen Archytas lennätti puusta leikkilintua höyrysuihkulla n. 450 eaa. Alexandriassa asunut kreikkalainen Heron puolestaan pystyi rakentamaan reaktiohöyryturbiinin 1. vuosisadalla (Landels 1978). Avointa kaasuturbiinia eli nuotion päälle asetettua turbiinia, joka on nykyisen suosittu joulukoristeen enkelikellon (Kuva 2.35) toimintaperiaatteena, saatettiin käyttää Heronin viittausten perusteella jo muinaisissa Babylonian ja Egyptin tempeleissä ainakin ovien avaamiseen (Sciubba 2004). Höyrykoneen ja polttomoottorien tärkeimpien komponenttien mäntien käyttö opittiin Kreikassa jo 200-luvulla eaa pumpuissa ja Kaakkois-Aasian puristussytytteissä tulensytyttimissä mahdollisesti vielä aiemmin. Metalliset (pronssiset) hammasrattaat osattiin rakentaa viimeistään n. vuonna 100 eaa ja niitä käytettiin ainakin planetaariokoneistoissa, jotka olivat yhtä monimutkaisia kuin modernit mekaaniset kellot (Nummila 2007a) ja lämpövoimakoneiden ja liikennevälineiden voimansiirtoa monimutkaisempia.



Kuva 2.35. Enkelikello on kiinteällä bioenergialla toimiva kaasuturbiini. [2006]

Monien koneiden käytöstä on viitteitä antiikin tempeleissä, missä niitä käytettiin taikatemppuina papiston jumalallisen vallan tukemiseksi, esimerkiksi itsestään papiston komennosta avautuvat ovet. Tästä syystä kyseiset teknologiat olivat salaisuuksia, ja vain vähän tietoa on säilynyt. Aleksandrian kirjaston tuhoutuminen oli epäilemättä suuri takaisku myös tekniikan historian näkökulmasta. Suuri osa säilyneistä antiikin teknologian tiedoista on peräisin Heronin lisäksi roomalaisen Vitruviuksen kirjoituksista noin 30 eaa (Landels 1978).

Papiston vallan lisäksi toinen ja vielä merkittävämpi syy mekaanisen teknologian laajemman käytön tiellä oli orjayhteiskunta, jossa sellaisille teknologioille ei ollut tarvetta eivätkä ne pystyneet taloudellisesti kilpailemaan halpojen orjien kanssa. Teollinen vallankumous olisi voinut alkaa 2000 vuotta aiemmin, ja nykyinen yhteiskunta ja ympäristö olisivat sen seurauksena hyvin toisenlaisia. Voisi kuvitella esimerkiksi, että orjien silloiset suuret kärsimykset vähensivät tai ainakin viivästyttivät ympäristön tuhoutumista suuresti.

Nykyään bioenergian osuus on noin 14 % maailman energiankulutuksesta ja puu muodostaa siitä valtaosan. Ylivoimaisesti tärkein käyttösovellus on edelleen sama kuin kivi-kaudella eli suora terminen käyttö lämmitykseen, ruoan valmistukseen ja valaistukseen. On olemassa valtava teknologinen potentiaali puun ja muun biomassan tehokkaampaan hyödyntämiseen sekä liikennepolttoaineina että sähkön tuotannossa (Luku 5).

2.11.1 Höyrykone

Denis Papin rakensi ensimmäisen höyrymäntäkoneen vuonna 1690 (Thurston 1878) ja otti höyrykoneen liikennekäyttöön höyryveneessä vuonna 1707. Sen jälkeen kehiteltiin lukuisia höyrykonetyyppejä, joista Newcomenin atmosfäärisestä koneesta vuonna 1712 tuli ensimmäinen kaupallisesti menestynyt laite paikalliskäytössä kaivospumppuna. Newcomenin kone oli atmosfäärinen eli mäntä liikkui ilmakehän paineella, kun sen toiselle puolelle aiheutettiin tyhjiö höyryä kondensoimalla.

Ensimmäisen höyryauton rakensi Joseph Cugnot Ranskassa vuonna 1769 Newcomenin höyrykoneen pohjalta (Kuva 2.36). Se oli ensimmäinen lämpövoimakonekäyttöinen auto. Eräs autotekniikan myyteistä on, että ensimmäinen auto rakennettiin vasta vuonna 1886. Se on hämmästyttävä myytti ottaen huomioon, että yli vuosisata aiemmin rakennettu auto on säilynyt ja yleisesti nähtävillä pariisilaisessa museossa. Cugnot'n auto ei toki ollut kovinkaan toimivaa tekniikkaa eikä sitä kaupallistettu, mutta eivät Benzin ja Daimlerin ensimmäiset autot olleet myöskään käytännöllisiä eivätkä kaupallisia menestyksiä. Ja kaiken lisäksi Benzin auto valmistui jo 1885, eikä 1886 kuten myytti kertoo, vaan vasta julkistus tehtiin vuonna 1886. Cugnot'n auton lisäksi lukuisia muitakin sekä höyrykonetta että polttomoottoria käyttäviä autoja rakennettiin ennen Benzin ensimmäistä autoa, kuten jäljempänä tässä luvussa sekä polttomoottoreita käsittelevässä luvussa lähemmin kerrotaan.



Kuva 2.36. Ranskalainen Joseph Cugnot rakensi vuonna 1769 maailman ensimmäisen lämpövoimakonekäyttöisen auton. Se toimi sekä kivihieillä että puulla ja oli tarkoitettu tykin vetäjäksi. Ensimmäinen auto ei ole säilynyt, mutta hänen vuonna 1770 rakentamansa toinen auto on esillä Musée des Arts et Métiers:ssä Pariisissa. [2007]

James Wattin vuoden 1769 koneesta, jossa korkeintaan 2 barin paineinen höyry liikutti mäntää ulkoilman paineen sijaan ja jossa oli erillinen lauhdutin, muodostui tärkein konetyyppi ja myöhemmät koneet ovat sen pohjalta kehiteltyjä. Watt itse ei rakentanut höyrykonekäyttöisiä liikennevälineitä, vaikka hän höyryauton patentoikin (Bird 1967). Ensimmäisen höyrylaivan rakensi ja otti käyttöön vuonna 1783 markiisi d'Abbans Lyonissa. Ensimmäinen kaupallisesti menestynyt höyrylaivaliikennöinti alkoi USA:ssa vuonna 1807 puukäyttöisillä Robert Fultonin höyrylaivoilla.

Englantilainen Richard Trevithick, joka rakensi ensimmäisen linja-auton vuonna 1801 ja ensimmäisen höyryveturin vuonna 1803, rakensi myös ensimmäisen korkeapainehöyrykoneen vuonna 1804 ja paransi sillä Wattin koneen 2–3 % hyötysuhdetta yli 3-kertaiseksi, 10 %:iin (Suzuki 1997).

Höyrykoneen liikennesovellukset laajenivat suuresti 1800-luvulla, jolloin käyttöön otettiin linja-auto vuonna 1801, veturi vuonna 1803, raitiovaunu vuonna 1833, traktori vuonna 1849, ilmalaiva vuonna 1852, metro vuonna 1863, sukellusvene vuonna 1864, moottoripyörä vuonna 1867 ja lentokone vuonna 1874. Esimerkkejä puukäyttöisistä höyryajoneuvoista on kuvassa 2.37.



Kuva 2.37. Puukäyttöisiä höyryajoneuvoja: a) Amerikkalainen Peerless-höyrytraktori vuosimallia 1915 Minkkiön höyryfestivaaleilla. b) Englantilainen Marshall-höyryjyvä vuosimallia 1926 Minkkiön höyryfestivaaleilla. c) Ranskalainen Bollée-höyrybussi vuosimallia 1873 Pariisin Arts et Métiers -museossa. [2007]



Kuva 2.38. Ruotsalainen Munktellin 6 kW:n puukäyttöinen höyrylokomobiili vuodelta 1861 tekniikan museossa Tukholmassa. [2006]

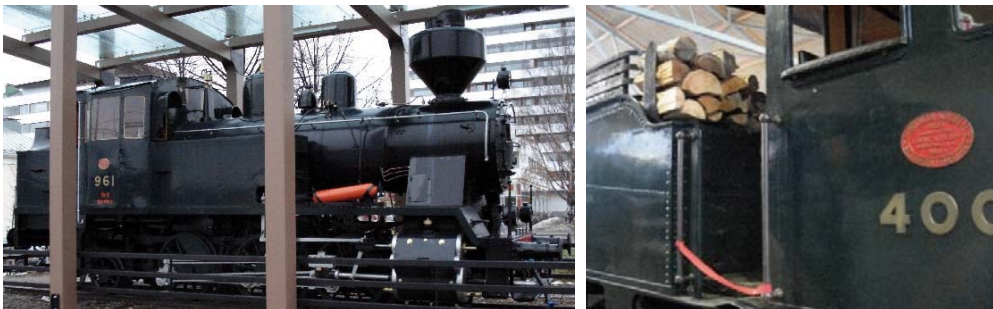
Ensimmäisen traktorin valmisti englantilainen Wilson & Co. vuonna 1849 (Leffingwell 1995). Sitä seurasi laaja lokomobiiliteollisuus, jonka tuotteista kuitenkin suurin osa ei pystynyt liikkumaan omavaraisesti (Kuva 2.38, Kansikuva 2).

Höyrykoneiden hyötysuhteet olivat parantuneet 1600-luvun 0,7 %:sta Newcomenin (1 %) ja Wattin (2–3 %) jälkeen 1800-luvun loppuun mennessä 12 %:iin, joka oli samaa tasoa silloisten kuumail-

makoneiden ja polttomoottoreiden kanssa (Kolin 1972). Hyötysuhteen nousun selitti höyrynpaineen kohottamisen lisäksi kaksoispaisuntamoottorin eli ensimmäisen kombimoottorin (jossa toinen moottori käyttää edellisen tuottamaa matalapaineista höyryä) keksiminen 1700-luvun lopulla ja sen käyttöönotto vuonna 1845 (Suzuki 1997). Vuonna 1883 kehitetyllä kolmipaisuntamoottorilla päästiin 1900-luvun alussa laivakäytössä lähes 20 % hyötysuhteeseen. Ne ovat olennaisesti 3-osaisia kombimoottoreita, joissa ensimmäinen moottori käyttää korkeapaineista höyryä, seuraava sen keskipaineista poistohöyryä ja viimeinen edellisen matalapaineista poistohöyryä. Korkealaatuisimmissa monipaisuntamoottoreissa voi olla 5 osaa, joiden avulla hyötysuhde voi saavuttaa 20 % rajan eli modernien bensiinikäyttöisten autojen tason. Ensimmäinen kombimoottorin liikennekäyttö tapahtui vuonna 1850 du Tremblayn höyrykoneella ja eetterimoottorilla varustetussa ranskalaisessa laivassa, jossa eetterimoottori käytti höyrykoneen hukkalämpöä (Self 2007). Tässä siis ei ollut kyse kaksoispaisuntamoottorista, vaan kahdesta erityyppisestä lämpövoimakoneesta.

Höyrykoneteollisuus laajeni 1900-luvun alkuun mennessä erittäin monimuotoisia teknologioita ja tuotteita tarjoavaksi (Forsman & Saraoja 1917). Höyrykoneen tärkeimmiksi liikennesovelluksiksi muodostuivat vesi- ja raideliikenne, jota ne dominoivat pitkälle 1900-luvun puolelle. Puuta oli saatavissa jokaisessa maassa, joten sitä käytettiin yleisesti, kun taas kivihiili oli useimmissa maissa tuontipolttoaine ja 1800-luvulla sen käyttö oli useimmissa maissa rajoittunutta. Globaalisti kivihiili oli kuitenkin selkeästi tärkein höyrykonepolttoaine.

Suomen höyryvetureista lähes kaikkia on ainakin joskus käytetty haloilla (Kuva 2.39a), ja osaa pelkästään haloilla (Kuva 2.39b), mutta myös kivihiiltä, turvetta ja öljyä niissä käytettiin (Eonsuu ym. 1975). Halkoja käytettiin höyryvetureissa vuosina 1873-1975 ja ne olivat tärkein rautatieliikenteen polttoaine 1960-luvulle asti (Eriksson ym. 1991, Taulukko 2.2). Esimerkiksi vuonna 1927 halot muodostivat 80 % Suomen rautateiden energiankulutuksesta (Hildén 1933). Viimeiset höyryveturit valmistuivat Suomessa vuonna 1957. Höyryjunien suorituskyky kehittyi vastaamaan nykyisiä vaatimuksia sekä nopeuden että kuorman suhteen, mutta niiden palvelutaso oli paljon nykyisiä junia parempi. Jo 1930-luvulla Saksassa ja Englannissa saavutettiin liikennekäytössä olevilla höyryjunilla 200 km/h nopeus eli korkein Suomen nykyisessä rataverkossa Pendolinojunilla käytettävä nopeus.



Kuva 2.39. a) Halkokäyttöinen Tampereen konepajassa vuonna 1931 rakennettu Vr2-höyryveturi näytteillä Jyväskylän rautatieasemalla. b) Tampereen konepajalla vuonna 1903 rakennetun halkokäyttöisen Sk3-veturin polttoainevarasto Suomen rautatiemuseossa Hyvinkäällä. [2006]

Höyryraitiovaunuja käytettiin vuodesta 1833 alkaen noin sadan vuoden ajan: Euroopassa ja USA:ssa oli käytössä yhteensä noin 2700 höyryraitiovaunua (Klapper 1961). Höyrymetro liikennöi Lontoossa vuodesta 1863 sähkömetron käyttöönottoon (1890) asti ja osin vielä vuoteen 1961 asti. Se edellytti savukaasujen varastoinnin veturissa oleviin säiliöihin ja säiliöiden tyhjennyksen radan varrelle sijoitettujen aukkojen kautta.

Höyrykonetta kokeiltiin vesiliikenteessä jo 1700-luvun alussa. Ensimmäinen höyrylaivan reittiliikenne aloitettiin vuonna 1807 Hudson-joella USA:ssa (Lavery 2004) polttoaineena puu (Kolin 1972). Ensimmäiset höyryveneet ja -laivat käyttivät siipirattaita (Kuva 2.40). John Ericssonin 1830-luvun alussa Arkhimedeen ruuvin pohjalta kehittämä ja hinaajassa vuonna 1836 käyttöön ottama potkuri oli tärkeä tekninen askel, joka mahdollisti 1800-luvun lopulla purjelaivojen ohittamisen ja se on käytössä lähes kaikissa vesikulkuneuvoissa edelleenkin. Toiseksi yleisin nykyisten vesikulkuneuvojen käyttämä työntövoiman lähde on vuonna 1866 Englannin laivaston HMS Waterwitch-laivassa käyttöön otettu vesisuihkumoottori, joka alun perin oli höyrykonekäyttöinen. Koko 1800-luvun ajan useimmat höyrylaivat olivat kuitenkin hybridejä, joissa oli myös purjeet, mukaan luettuna ensimmäiset potkuri- ja vesisuihkulaivat (Kuva 6.15b). Suomen kauppalaivastossa halkoja käytettiin vuosina 1833-1972 painottuen sisävesiliikenteeseen (Eriksson ym. 1991, Valanto 1991a, Taulukko 2.2). Suomen höyrykonelaivasto oli suurimmillaan vuonna 1939 ja viimeinen höyrylaiva rakennettiin vuonna 1960.



Kuva 2.40. Halkokäyttöinen 80 hv höyrykoneella varustettu siipirataslaiva Elias Lönnroth valmistui vuonna 1865 Pyhäjärven liikenteeseen. Vuosina 1890-1923 se liikennöi Keuruselällä ja romutettiin vuonna 1926. Kuva Museoviraston kokoelmista postin ehiökortista vuodelta 2006.

Vanhoja höyrykäyttöisiä laivoja ja junia on edelleen kaupallisessa käytössä. Höyrykonetta käytettiin myös sukellusveneissä 1860-luvulta alkaen. Siinä sovelluksessa tarvitaan aneroibinen eli ilmaton moottori (AIP), koska sukelluksissa ilmaa ei ole saatavilla. Montu-riolin ensimmäisessä sukellusvenehöyrykoneessa veden höyryttämiseen tarvittava lämpö saatiin epäorgaanisten polttoaineiden (Zn, KClO₃, Mn-O-R) kemiallisesta reaktiosta.

Ilmaliikenteessä höyrykone otettiin ensin käyttöön Giffardin ilmaivassa vuonna 1852. Jo sitä ennen höyrykonetta oli käytetty Stringfellow'n etanolikäyttöisessä mallilentoko-nessa vuonna 1848 (Kuva 2.76) ja vuonna 1877 myös mallihelikopterissa. Ensimmäi-nen ihmistä kuljettava lentokone oli Aderin etanolikäyttöisellä höyrykoneella varustettu Avion III vuonna 1890 (Kuva 2.77). Gustav Weißkopf, amerikkalaiselta nimeltään White-head, lensi vuonna 1901 etyynikäyttöisellä höyrykonelentokoneella. Höyrykonetta käytettiin lentokoneissa 1930-luvulle asti (Suzuki 1997).

Höyryautolla oli merkittävä osuus autoliikenteestä 1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa. Pelkästään USA:ssa oli 1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa myynnissä 84 erimerkkistä höyryautoa ja niitä myytiin useita tuhansia vuosittain ylittäen polttomoot-toriautojen myynnin (Georgano 1985). Vuonna 1900 höyryautojen myynti oli kaksin-kertainen polttomoottoriautoihin verrattuna ja ylitti hieman myös sähköautojen myyn-nin. Johtavalla merkillä Mobilella oli tarjolla peräti 20 eri mallia, joita se myi 1900-luvun alkuvuosina 6000 kpl (Kuva 2.41). Höyryautojen tärkeimmät edut polttomoottoriautoi-hin olivat polttoaineen ja veden helppo saatavuus sekä tärinättömyys (Hiscox 1900). Al-hainen melutaso, polttoainejoustavuus ja mahdollisuus myös kiinteiden polttoaineiden käyttöön on edelleen merkittävä etu polttomoottoriautoihin verrattuna. Tärkeimmät haitat silloin olivat kylmäkäynnistyksen hitaus, käytön monimutkaisuus ja höyrykatti-lan turvallisuusongelmat (Hiscox 1900). Kaksi jälkimmäistä voitaisiin nykytekniikalla poistaa, mutta kylmäkäynnistyksen hitaus olisi edelleen ongelmana, yhdessä vesisäiliön vaatiman tilan ja painon kanssa, mikäli moderneja höyryautoja valmistettaisiin. Jos nii-tä valmistettaisiin, ne mahdollistaisivat päästöjen alentamisen: erityisesti typen oksidien päästöt ovat höyryautoilla polttomoottoriautoja alemmat (Suzuki 1997) ja juuri niihin on EU:n ajoneuvopäästöjen kiristyminen viime vuosina eniten kohdistunut.



Kuva 2.41. Amerikkalainen Mobile-höyryauto ja sen vesisäiliö vuodelta 1900 Münchenin liikenne-tekniikan museossa. Mobilet valmistettiin Stanley-patenteilla. [2007]

Höyryautot ehtivät kehittyä suorituskyvyltään erittäin hyväksi ottomoottoriautoihin verrattuna käyttämällä vuonna 1885 keksittyä nopeaa ja kevyttä Serpillet-höyrystintä (Dale 1994, Kuva 2.42). Ranskalaisella Gardner-Serpillet -höyryautolla saavutettiin vuonna 1902 nopeus 120 km/h, jolla se vei haltuunsa sitä ennen sähköautojen hallitseman nopeusennätyksen. Amerikkalainen Stanley-kilpa-auto saavutti vuonna 1906 jo yli 200 km/h nopeuden (Bird 1967) ja Stanleyyn silloinen sarjatuotantoautokin kulki 120 km/h nopeudella.



Kuva 2.42. Ranskalaisia Serpillet-höyryautoja: a) Léon Serpillet'n ensimmäinen höyryauto vuodelta 1888 Musée des Arts et Métiers:issä Pariisissa. b) Serpillet Double Phaeton Type A vuosimallia 1902 Mulhaisen kansallisessa automuseossa Cité de l'Automobile:ssa Ranskassa. [2007]

Henry Fordin vuonna 1908 aloittaman ottomoottoriautojen sarjavalmistuksen myötä dramaattisesti alentunut hinta mahdollisti tieliikennemarkkinoiden valtaamisen eläinvoimalta sekä höyry- ja sähköautoilta. Kaupallinen höyryautojen valmistus loppui 1940-luvulla (Thomas 1980). Pisimpään kilpailukykyisinä pysyivät kuorma-autot ottomoottorilla varustettuihin verrattuna. Raskaiden dieselautojen kaupallisen valmistuksen alkaminen 1930-luvulla lopetti ensin höyrykoneen ja 1950-luvulla myös ottomoottorin käytön raskaassa tieliikenteessä.

Höyrykoneiden eräs suuri haitta on pitkä käynnistysaika. Stanleyyn höyryautoilla se oli puoli tuntia. Suuremmilla koneilla se vaihteli välillä 3–15 tuntia (Forsman & Saraoja 1917). Toinen merkittävä ongelma oli suuri huollon tarve: suurten koneiden lämmönvaihdin oli puhdistettava ennen jokaista käyttöönottoa ja kattila piti puhdistaa 1–2 kertaa kuukaudessa (Forsman & Saraoja 1917). Muita ongelmia olivat suuri massa eli alhainen teho/paino-suhde sekä normaaliteknikalla alhainen hyötysuhde etenkin pienessä kokoluokassa. Kaikki ongelmat vähenivät oleellisesti polttomoottoria ja sähkömoottoria käytettäessä. Polttomoottoreilla saavutettiin pienissä koneissa noin kaksinkertainen hyötysuhde ja suurissa ero oli vielä suurempi tavanomaiseen höyrykoneeseen verrattuna. Sähkömoottoreiden hyötysuhde on puolestaan 2–3-kertainen polttomoottoreihin verrattuna. Tavanomaisella höyrykoneella varustettujen laivojen kokonaishyötysuhde, ottaen huomioon koneen lisäksi muutkin häviöt, oli noin 10 %, kun taas modernit

diesel-laivat saavuttavat jopa 40 % hyötysuhteen (Valanto 1991a). Tavanomaisten höyryvetureiden kokonaishyötysuhde oli noin 12 %, kun dieselveturi pääsi 32 %:iin (Valanto 1991a). Näissä kokonaishyötysuhteissa ei ole mukana polttoaineen tuotannon häviöitä, jotka nestemäisille polttoaineille ovat suuremmat kuin kiinteille, eikä myöskään polttoaineen kuljetushäviöitä, jotka paikallisesti hankitulla haloilla olivat alhaiset.

Stationaaristakin höyrykonetta on käytetty liikenteen voimanlähteenä monilla teknologioilla. Niistä ensimmäinen oli kaapeliraitiovaunu yläpuolisilla vetokaapeleilla New Orleansissa vuonna 1870 (ASME 1984). Sitä seurasi kaapeliraitiotie alapuolisilla kaapeleilla San Franciscossa vuonna 1873, paineilmajärjestelmä Nantesissa vuonna 1876 ja sähköraitiovaunut Berliinissä vuonna 1881 (Klapper 1961). San Franciscon kaapeliraitiovaununjärjestelmä on edelleen käytössä, mutta ei enää höyrykonevetoisena vaan sähkömoottoreilla (Kuva 2.43).



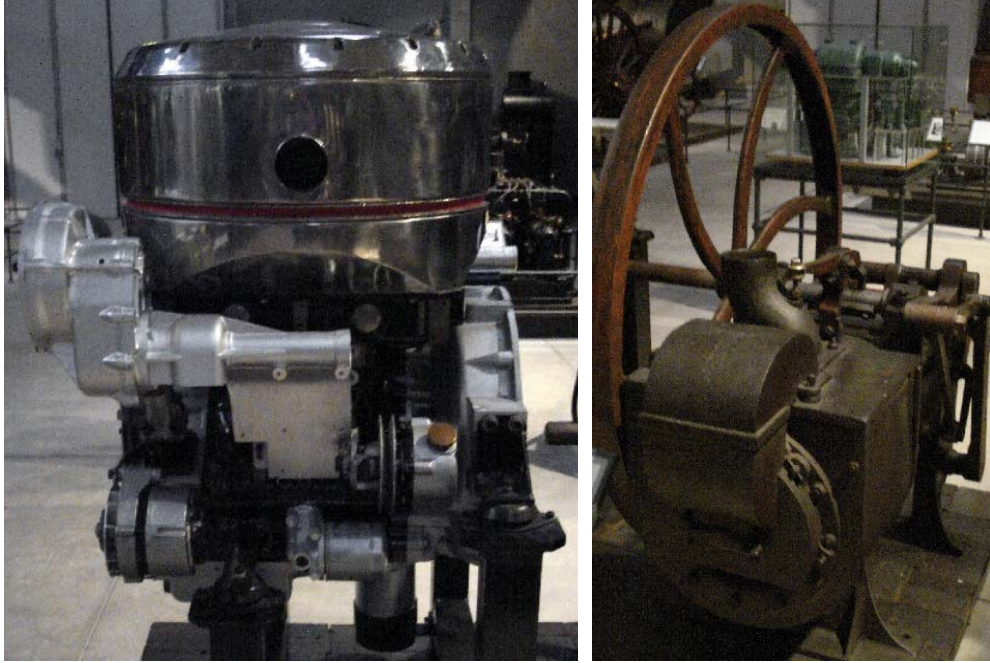
Kuva 2.43. San Franciscon kaapeliraitiovaunu (a), sen vetopyörästä (b) ja vetokaapeli raiteiden välissä (c). [© San Francisco Cable Car Museum]

Höyrykonekäyttöisiä liikennevälineitä ei tiettävästi enää valmisteta sarjatuotantona, mutta moderneja höyrykoneita valmistetaan pienimuotoista sähkön tuotantoa varten. Siinä käyttötarkoituksessa pitkä käynnistysaika ei ole ongelma ja höyrykoneen (EC-moottori) yksinkertaisuus ja sen mahdollisuus käyttää puuta ja muuta kiinteää polttoainetta suoraan, ilman termokemiallisia tai muita konversioita, on tekninen ja polttoainetaloutta parantava etu polttomoottoreihin verrattuna. Siksi höyrykoneella on annettavaa tulevaisuudessakin sähkön ja lämmön hajautetussa yhteistuotannossa, vaikka sen sähköntuotannon hyötysuhde jää alemmaksi kuin muilla lämpövoimakoneilla. Raakaöljyn hinnan nousun takia myös höyrykoneen liikennesovellukset varsinkin laiva- ja veturikäytössä voivat tulla uudelleen harkinnan arvoiseksi. Monipaisuntakoneet mahdollistavat tavanomaisten höyrykoneiden hyötysuhteen kaksinkertaistamisen eli yli 20 % hyötysuhteen, jolla tasolla ne ovat lähes kilpailukykyisiä ottomoottorin kanssa. EC-koneina niiden etuna polttomoottoreihin verrattuna on kuitenkin suuri polttoainejoustavuus, mukaan lukien kiinteiden polttoaineiden ja lämpöakkujen käyttö, jossa akun lämpö voi olla peräisin vaikkapa CHP-laitoksen lämmöstä tai aurinkoteremisestä tai geotermisestä lämpöläitoksestä.

2.11.2 Kuumailmakoneet ja kuumakaasukoneet

Sekä stirlingkone (Kuva 2.44a) että ericssonkone (Kuva 2.44b) ovat kuumailmakoneita tai kuumakaasukoneita, jotka keksittiin 1800-luvun alussa (Finkelstein & Organ 2001).

Ne ovat ulkoisesti lämmitettäviä mäntäkoneita eli EC-koneita kuten höyrykonekin, mutta mahdollistavat höyrykonetta suuremman hyötysuhteen. Molempien teoreettinen hyötysuhde on sama kuin Carnot'n puhtaasti teoreettisen koneen (Kaava 2.1) ja ne ovat siten teoriassa parhaita kaikista rakennettavissa olevista lämpövoimakoneista (Lampinen 2002a).



Kuva 2.44. Kuumakaasu- ja kuumailmakoneita Tukholman tekniikan museossa: a) Ruotsalainen United Stirlingin 75 kW:n helium-täytteinen auton moottori vuosimallia 1979. Näitä sekä 150 kW:n rekkamoottoreita demonstroitiin, mutta ne eivät päässeet sarjavalmistukseen. b) Ruotsalainen vuonna 1855 valmistettu John Ericssonin itsensä suunnittelema kaupallinen 3 kW:n ilma-täytteinen ericssonmoottori, jota käytettiin stationäärisissä sovelluksissa, esimerkiksi lehtipainoissa. [2006]

Molempia on pääasiassa käytetty stationäärisissä sovelluksissa, mutta harvinaisina myös liikennemootoreina. John Ericssonin vuonna 1833 keksimä ja useaan otteeseen kehittämä moottori oli käytössä laivamoottorina 220 kW:n tehoisena Ericsson-laivassa vuonna 1853 (Kolin 1972). Ericssonmoottorin hyötysuhde 13 % oli 1800-luvun puolivälissä vähintään kaksinkertainen silloisiin höyrykoneisiin ja polttomootoreihin verrattuna (Kolin 1972).

Robert ja James Stirlingin vuonna 1815 keksimää moottoria on sovellettu liikennevälineisiin 1900-luvun lopulta alkaen. Stirlingmoottorin suurin panos liikennekäytössä on toistaiseksi ollut sukellusvenemoottorina, jossa se on kaupallista teknologiaa. Se tarjoaa merkittäviä etuja muihin ei-ydinkäyttöisiin moottoreihin: se on kaikkein vähämeluisin lämpövoimakone ja sekä teoriassa että käytännössä se antaa korkeimman hyötysuhteen. Ruotsalaisen Kockums-yhtiön 280 kW:n AIP-stirlingmoottoreissa on 48 %:n hyötysuh-

de, joka ei ole muille lämpövoimakoneille mahdollinen tässä kokoluokassa, paitsi silloin kun useampia käytetään sarjassa kombimoottoreina. Tämän kokoluokan dieselmoottoreissa päästään vain 40 %:iin. Polttoaineena se käyttää tavanomaista laivadieseliä nestehapen (LO2) kanssa. Stirlingmoottoreita on käytetty demonstraatiomielessä myös rekka- ja henkilöautoissa ainakin Ruotsissa (Kuva 2.44a), Hollannissa ja USA:ssa. USA:ssa demonstraatiokäyttö jatkuu edelleen moottoripyörissä ja autoissa (Woody 2007). Stirlingin haittapuolena tavanomaisiin moottoreihin verrattuna on tehon säädön hitaus. Se rajoittaa erityisesti henkilöautokäyttöä (Suzuki 1997).

Useita muitakin kuumailma- tai kuumakaasukonetyyppejä, kuten ridermoottori, oli 1800-luvulla voimakoneikäytössä, mutta liikennekäyttöä ei niillä ilmeisesti ollut. Kaikki soveltuvat sekä kuumalle ilmalle että muille kaasuille kuten typpi, helium ja vety. Kuumailmakoneet olivat polttomoottoreita tehokkaampia ja yleisempiä paikallismoottoreissa aina 1870-luvun lopulle saakka. Nykyään kuumakaasukoneista valmistetaan vain stirlingmoottoreita. Niitä käytetään kaupallisena teknologiana erityisesti erittäin pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa eli μ CHP-koneina sekä aurinkosähkövoimaloissa, joissa niiden avulla on saavutettavissa korkeampi konversiohyötysuhde aurinkonsäteilystä sähköksi (30 %) kuin aurinkokennoilla tai millään muulla teknologialla. Ericsson käytti moottoriaan aurinkoterminen sähkön tuotannossa jo vuonna 1883 (Kolin 1972). Helium on pienen virtausvastuksensa vuoksi työkaasuna kaikkein suurimman hyötysuhteen moottoreissa.

Liikennesovelluksista vain sukellusvenemoottorit ovat tällä hetkellä kaupallista teknologiaa. Stirlingmoottori on kehitetty myös satelliittien ja ulkoavaruuteen lähetettävien luotaimien sähköntuotantoon. Stirlingmoottori soveltuu myös matalan lämpötilan energiaraston konvertoimiseen sähköksi. Tällaisia resursseja ovat mm. prosessien hukkalämpö, geoterminen lämpö, aurinkolammet ja valtamerten pinta- ja pohjalämpötilojen hyödyntäminen (OTEC). Mahdollinen liikennesovellus saataisiin lämpöakutekniikalla. Stirlingmoottorin suuren hyötysuhteen, alhaisten päästöjen ja parhaan mahdollisen polttoainejoustavuuden takia se tarjoaa suuremmat tekniset kehitysmahdollisuudet kuin otto- ja dieselmoottorit ja voi olla merkittävä tulevaisuuden moottorivaihtoehto liikenteessä.

Edellä käsiteltyjen EC-moottorien lisäksi on rakennettu myös IC-kuumailmakoneita, ns. tuli-ilmakoneita, jotka kuuluvat atmosfäärin polttomoottorien joukkoon. Koneen kuvasi ensimmäisenä George Cayley vuonna 1807 ja sen periaatteen pohjalta rakennettiin 1800-luvulla useita erilaisia koneita (Kolin 1972). Toiminnan periaatteena on lämmitää ilmaa kiinteällä polttoaineella kuten puuhiilellä ja antaa kuumenneen ilman tuottaa työtä mäntää liikuttaessaan. Tällaisilla koneilla päästiin 1800-luvun lopulla noin 7 %:n hyötysuhteeseen (Kolin 1972). Tämä teknologia mahdollistaa siis kiinteän polttoaineen käytön polttomoottoreissa. Näitä ei ilmeisesti ole käytetty liikenteen voimanlähteenä.

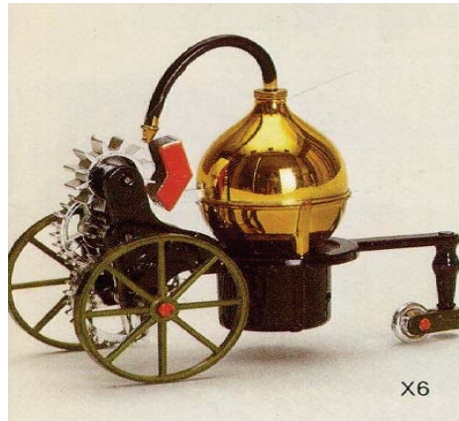
2.11.3 Höyryturbiini

Kaikkein ensimmäinen puun liikennekäytön demonstraatio höyryn energialla toteutettiin jo 1600-luvulla. Belgialainen Ferdinand Verbiest rakensi vuonna 1672 Kiinassa leluksi mallilaitteen turbiiniautosta (Angelucci & Bellucci 1974). Siinä puulämmitteisestä höyrykattilasta tuleva höyrysuihku ohjattiin yläkautta putkella taka-akselia vaihteiston

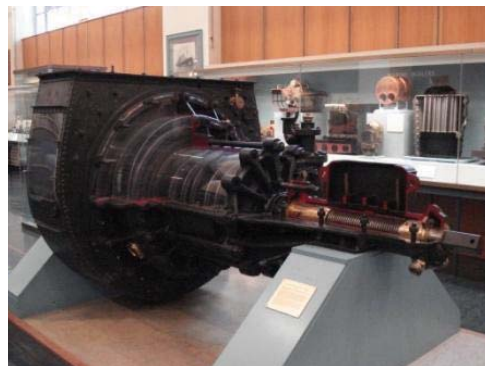
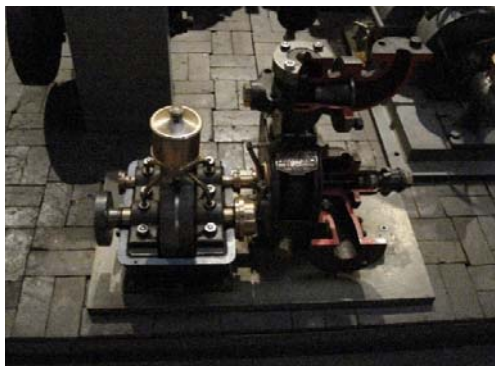
kautta pyörittäväälle avoimelle turbiinille eli samaan tapaan kuin vesimyllyissä vesisuihkuille tehtiin (Kuva 2.45). Modernit höyryturbiinit toimivat samalla periaatteella, mutta suljetusti.

Ensimmäisen höyryturbiinin, reaktioturbiinin, rakensi Heron jo 1. vuosisadalla, mutta teknologia unohdettiin pitkäksi ajaksi (Boyle 2003). Vasta 1870-luvulla ruotsalainen Gustaf de Laval keksi ja rakensi teolliseen käyttöön sopivan turbiinin, impulssiturbiinin, jonka ensimmäisenä sovelluksena oli meijereiden separaattori. Se oli hyötysuhteeltaan kaksinkertainen höyrykoneisiin verrattuna (Boyle 2003). Laval otti turbiinin liikennekäyttöön 1880-luvulla venemoottorina, joka oli höyryturbiinin ensimmäinen käytännöllinen liikennesovellus (Kuva 2.46a). Laivakäyttöön höyryturbiinit kuten muutkin turbiinit ovat periaatteessa erityisen sopivia, koska ne tuottavat jo valmiiksi potkurin vaatimaa pyörivää liikettä, eli se voidaan välittää propellille helpommin ja vähemmän häviöin kuin mäntämoottorien edestakainen liike.

Ensimmäisen modernin reaktiohöyryturbiinin rakensi Charles Parsons 1880-luvulla sähköntuotanto ensimmäisenä sovelluksena (Boyle 2003). Sähköntuotanto on edelleen höyryturbiinin tärkein sovellus ja tärkein sähköntuotantoteknologia globaalilla noin 50 %:n osuudella eli asennettuna noin 2000 GW_e kapasiteetilla. Modernin höyryturbiinin ensimmäinen liikennesovellus oli vuonna 1894 rakennettu laiva Turbinia (Kuva 2.46b). Sen vuonna 1897 uudistettu 1,7 MW_m turbiini antoi peräti 34 solmun nopeuden, joka on täysin kilpailukykyinen nykyisiin sotalaivoihin verrattuna (Lavery 2004). Suomessa ensimmäinen höyryturbiinilaiva otettiin käyttöön vuonna 1924 (Valanto 1991a).



Kuva 2.45. Ferdinand Verbiestien höyryturbiinikäyttöinen ajoneuvo vuodelta 1672, kuva italialaisen Brumm-yhtiön Verbiestien piirustusten pohjalta tekemästä mallista (Brumm 2007).



Kuva 2.46. Ensimmäiset liikennehöyryturbiinit: a) Ruotsalainen Lavalin 1,5 kW:n impulssihöyryturbiinivenemoottori vuodelta 1892 Tukholman tekniikan museossa. [2006] b) Englantilainen Parsonsin Turbinia-laivan reaktiohöyryturbiini vuodelta 1894 Lontoon tiedemuseossa. [2007]

Höyryturbiinista tuli 1900-luvun alussa tärkein suurten sotalaivojen voimanlähde johtuen sen suuresta teho/painosuhteesta ja korkeasta hyötysuhteesta. Höyryturbiini tuli sukellusvenekäyttöön ensimmäisen kerran Englannissa vuonna 1917 (Hutchinson 2001) ja se on ainut moottorityyppi 1950-luvulta alkaen käyttöön otetuissa ydinkäyttöisissä sukellusveneissä ja laivoissa. Kaupallisessa liikenteessä sitä käytettiin vain suurimmissa valtamerilaitoissa, vaikkakin sen hyötysuhde (jopa 45 %) riittäisi kilpailussa modernin dieselmoottorin kanssa ja mahdollinen teho (aina 2000 MW:iin asti) ylittää 10-kertaisesti suurimpienkin laivojen vaatimukset. Suuritehoisimmat laivat ovat ydinkäyttöisiä höyryturbiinilentotukialuksia, joiden teho on noin 200 MW_m.² Höyryturbiinia käytettiin myös harvinaisena junien voimanlähteenä vuodesta 1907 lähtien 1960-luvulle asti (Self 2007).

Parsonsin höyryturbiini ei sovellu pieneen kokoluokkaan, josta syystä sen liikennekäyttökin on rajoittunut meriliikenteeseen ja juniin. Lavalin turbiini on huomattavasti yksinkertaisempi ja se soveltuu erittäin pieneen eli mikroluokkaan. Sitä eikä muitakaan impulssiturbiineita ei tiettävästi kuitenkaan nykyään käytetä. Lavalkin suunnitteli jo 1880-luvulla Parsons-tyyppisen reaktioturbiinin ja siitä tuli hänen yhtiönsä päätuote.

2.11.4 Muihin kiertoaineisiin perustuvat koneet ja turbiinit

Sekä höyrykone että höyryturbiini ovat sovellettavissa muille kiertoaineille kuin vedelle. Tällöin niitä kutsutaan englanniksi yleisnimillä vapour engine ja vapour turbine erotuksena steam engine (höyrykone) ja steam turbine (höyryturbiini) -termeistä ja toisaalta gas engine (kaasumoottori) ja gas turbine (kaasuturbiini) -termeistä. Valitettavasti suomen kielestä ei löydy sopivaa vastinetta vapour-sanalle tässä yhteydessä, joten tätä varsin tuntemattomaksi Suomessa jäänyttä teknologiaa on vaikea suomeksi määritellä.

Ensimmäinen tämän teknologian liikennesovellus oli vuonna 1850 laivakäyttöön otettu eetterimoottori. Ensimmäinen maaliikennesovellus oli puolestaan Emile Lammin vuonna 1869 patentoima ammoniakki-moottori, joka otettiin liikennekäyttöön vuonna 1870 New Orleansin raitiovaunuissa (ASME 1984). Muita 1800-luvulla kokeiltuja kiertoaineita olivat ainakin kloroformi, etanoli, bensiini ja hiilidisulfidi (Self 2007), mutta niillä ei ilmeisesti ollut liikennesovelluksia.

Nykyään tärkeimmät sovellukset ovat orgaanisten kiertoaineiden käyttö turbiinissa (Organic Rankine Cycle eli ORC) ja 70 % ammoniakkin käyttö turbiinissa sekoituksena vesihöyryn kanssa (Kalina Cycle). Molemmissa on suurimpana etuna höyryn käyttöön verrattuna (Rankine Cycle) alempien lämpötilojen, kuten lämpövoimakoneiden ja muiden hukkalämpöjen, hyödyntämisen mahdollisuus sähkön ja mekaanisen energian tuottamiseen.

² Maailman kaikkien aikojen suurin laiva, vuonna 1981 Japanissa valmistunut 458 metrin pituinen 565.000 brt:n ”Jahre Viking” oli varustettu 38 MW_m öljykäyttöisellä höyryturbiinilla. Se ei liikennöi enää, vaan toimii pysyvänä raakaöljyvarastona. Se oli tonnistoaltaan yli 2,5-kertainen verrattuna Turussa rakennettaviin maailman kaikkien aikojen suurimpiin matkustaja-aluksiin, dieselkäyttöisiin 100 MW_m:n ”Genesis”-luokan aluksiin.

2.12 V SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: ELÄIN- JA IHMISPERÄISET KIIINTEÄT BIOPOLTTOAINEET (1800-LUKU)

Höyrykoneiden käyttöönoton seurauksena edellä käsitellyn puun ja puuhiilen lisäksi kaikki muutkin kiinteät biopolttoaineet tulivat käyttökelpoiseksi mekaanisen liikenteen voimanlähteinä. Niihin lukeutuvat kaikki ruoaksi ja rehuksi kelpaavat ja muutkin kasvit sekä maa- että vesiekosysteemeistä ja myös eläinmaailmassa jalostetut tuotteet kuten hyönteisvaha. Sen lisäksi sekä maa-, vesi- että ilmaekosysteemien eläimet ja niiden jätteet tulivat mahdolliseksi, esimerkiksi kalaöljyt, eläinten ruhot ja eläinten lanta sekä myös ihmisten ulosteet ja ruumiit. Lämmöntuotanto ruumiista on ollut ja on edelleen yleistä, mutta liikennekäyttö hyvin harvinaista: siitä on esimerkkinä Egyptin höyryvetureissa 1800-luvulla käytetyt muumiot, jotka kuitenkin fossiloituneina ruumiina eivät ole uusiutuvaa biomassaa. Myös lannan lämmityskäyttö on ollut ja on edelleen yleistä, mutta liikennekäyttö harvinaista.

Höyrykoneiden väistyttyä liikennemoottoreiden joukosta primäärisiä eläin- ja ihmisperäisiä polttoaineita ei enää ole voitu käyttää, mutta niitä muunnetaan nykyään liikennekäyttöä varten kaupallisesti nestemäiseksi suoralle nesteytyksellä ja biodieselteknikalla ja kaasumaiseksi biokaasutusteknologialla. Muihin teknisiin mahdollisuuksiin, jotka eivät ole kaupallisesti käytössä, lukeutuvat pyrolyysi, termiseen kaasutukseen pohjautuvat prosessit sekä alkoholifermentaatio lannan kuiduista. Jälkimmäiseen sopivat runsaasti kuituja, siis selluloosaa ja hemiselluloosaa, sisältävät lannat kuten hevosen lanta ja runsaskuituista ruokavaliota nauttivien ihmisten ulosteet. Näitä teknologioita käsitellään luvussa 5.

2.13 KIVIHIIILI, KOKSI JA TURVE (1700-LUKU)

Kivihiiilen (Kuva 2.47) energiakäyttö alkoi noin 4000 eaa Kiinassa tilalämmityksessä ja ruoanlaitossa (Freese 2003). Koksen valmistus kivihiiilen pyrolyysillä ja käyttö metalliteollisuudessa puuhiilen, joka myös on lähes puhdasta hiiltä, sijaan ovat kiinalaisia keksintöjä 1000-luvulta. Turpeen käyttöönotto energian lähteenä tapahtui antiikin Roomassa 1. vuosisadalla (Schilstra & Gerding 2004).

Kivihiiili oli teollisen vallankumouksen pääpolttoaine 1700- ja 1800-luvuilla ja yleisin polttoaine höyrykoneiden liikennekäytössä 1700-luvulta lähtien. Suomessa kuitenkin puu oli höyryvetureissa ja -laivoissa 1800-luvulla ja 1900-luvun ensimmäisellä puoliskolla yleisempi polttoaine kuin kivihiiili, mutta sodan jälkeen kivihiiili ja muut fossiiliset polttoaineet syrjäyttivät puun. Kivihiiilen kilpailukyky Suomen markkinoilla puuta vastaan ei johtunut niinkään polttoaineiden hinnasta tai ominaisuuksista vaan siitä, että suurten kivihiiiliresurssien maissa saatiin kehitettyä kivihiiilen polttotekniikkaa paljon paremmaksi kuin puun polttotekniikka oli (Hildén 1933). Kyse oli siis suuresta epätasapainosta eri polttoaineiden käyttökäytön kehityssuunniteluissa fossiilisten polttoaineiden eduksi ja biopolttoaineiden tappioksi.

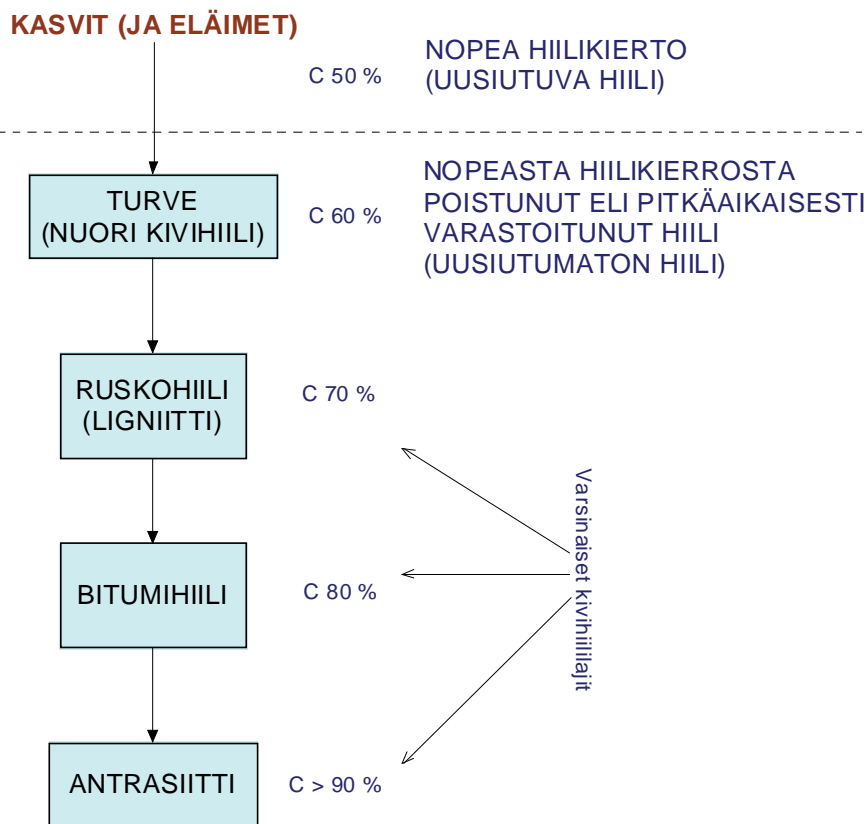
Kivihiiili on tavanomaisista fossiilisista polttoaineista riittoisin. Sen nykyinen osuus ihmiskunnan energiankulutuksesta on yli 20 % ja resurssit riittävät nykykulutuksella yli 200 vuodeksi (UN 2000, Luku 4.3).



Kuva 2.47. Terror Creek –yhtiön kivihiilikaivos Coloradossa USA:ssa. [2004]

Turpeen suurin historiallinen merkitys oli Hollannin suurvalta-ajan pääpolttoaineena toimiminen 1500- ja 1600-luvulla (Schilstra & Gerding 2004). Turve soveltuu myös höyrykoneiden ja -turbiinien polttoaineeksi, ja sitä käytettiin Suomessa höyryvetureissa halkojen ja kivihiilen ohella vuosina 1902–1963 kattaen korkeintaan muutaman prosentin kokonaiskulutuksesta (Valanto 1991a, Eriksson ym. 1991). Sitä käytettiin sodan aikana hieman myös turvekaasun tuotantoon häikäpönttöajoneuvoissa ja -työkoneissa, mutta suuresta tuhkapitoisuudesta johtuen se on huomattavasti puuta ja puuhiiltä vaikeampi polttoaine siinä tarkoituksessa (Parmala 1980b). Turpeen käyttö on globaalisti vähäistä, mutta Suomessa sen osuus on merkittävä noin 5 % primäärienergian kulutuksesta. Suuria turveresursseja löytyy kuitenkin ympäri maailman, joten Vapon selvitysten mukaan turve voitaisiin ottaa energiakäyttöön monessa maassa esimerkiksi suomalaisella teknologialla (Selin 1999). USA:ssa turvetta ei käytetä energianlähteenä, vaikka sen resurssit ovat fossiilisista energiavaroista toiseksi suurimmat kivihiilen jälkeen ja suuremmat kuin öljyliuskeen, maakaasun ja raakaöljyn yhteenlasketut resurssit (Cohen & Stack 1997).

Kivihiili on peräisin kasveista, ja vähäisessä määrin myös eläimistä, joiden hiili on varastoitunut soistumisen ja sitä seuraavan mikrobiologisen, biokemiallisen, geologisen (sedimentaatio ja sitä seuraava paine ja lämpö) ja geokemiallisen prosessin kautta (Malvadkar ym. 2004). Ruskohiili, bitumihiili ja antrasiitti ovat kivihiilen päätyypit, jotka jakautuvat useisiin alatyyppeihin (Miller 2005). Turve on maaperälaji, jonka muodostus on kivihiilen syntyprosessin ensimmäinen askel (Kuva 2.48). Siitä syystä turvetta kutsutaan myös nuoreksi kivihiileksi, vaikkakaan sitä ei yleensä sisällytetä varsinaisten kivihiililajien joukkoon. Kivihiili syntyy joko soiden tai kosteikkojen sijaintipaikoille, joissa kasvit alun perin ovat kasvaneet, tai veden virtausten kuljettamana muualle vesistöjen pohjaan.



Kuva 2.48. Turpeen ja kivihiililajien muodostuminen kasveista ja vähäisessä määrin myös eläimistä (Parker 1981, Cleveland 2004, Miller 2005). Kuvassa on ilmoitettu myös hiilen massaosuus orgaanisessa kuiva-aineessa. Kasveissa oleva hiili on luonnon nopean hiilikierron hiiltä eli uusiutuvaa hiiltä. Turpeessa ja kivihiililajeissa oleva hiili on luonnon nopeasta hiilikierrosta poistunutta, varastoitunutta hiiltä eli uusiutumaton hiiltä.

Suurin osa kivihiilestä on syntynyt hiilikaudella 350-270 miljoonaa vuotta sitten, mutta sitä on muodostunut myös kaikkina myöhemmin geologisina ajanjaksoina ja prosessi jatkuu edelleen. Turpeen muodostus on luonnon tärkein mekanismi hiilen poistamiseksi nopeasta kierrosta, joten se on maapallon ilmastonmuutoksien kannalta hyvin oleellinen prosessi.

Turve kuten kivihiili, raakaöljy, maakaasu ja muut fossiiliset energialähteet ovat siis syntyneet fossiloituneista kasveista ja eläimistä. Raakaöljystä, kivihiilestä ja turpeesta myös löytyy fossiileja, mutta maakaasusta ei löydy. Turpeesta löytyvät fossiilit, mukaan lukien ihmisfossiilit, ovat tieteellisesti tärkeä historiallisen ja ilmastonmuutostutkimuksen resurssi. Turpeen, kivihiilen ja muiden fossiilisten polttoaineiden energiakäyttö vapauttaa ilmakehään luonnon nopeasta hiilikierrosta poistunutta, siis pitkäaikaisvarastoitunutta hiiltä, joka ilman ihmistoimintaa ei vapautuisi. Tilanne on toinen puiden ja peltokasvien poltossa eli bioenergian käytössä, koska niiden hiili kuuluu luonnon nopeaan hiilikiertoon ja se vapautuisi ilman polttoakin lahoamisen tai mätänemisen kautta.

Turpeen päästöt lasketaan vuonna 1992 Riossa solmitun YK:n ilmastopimuksen edellyttämissä kansallisissa kasvihuonekaasujen inventaarioissa samoin kuin kivihiilen, koksien ja muiden fossiilisten polttoaineiden päästöt (IPCC 2006, 1.15):

“Although peat is not strictly speaking a fossil fuel, its greenhouse gas emission characteristics have been shown in life cycle studies to be comparable to that of fossil fuels (Nilsson and Nilsson 2004; Uppenberg et al. 2001; Savolainen et al. 1994). Therefore, the CO₂ emissions from combustion of peat are included in the national emissions as for fossil fuels.”

Kaikkein uusimmat tutkimukset (Holmgren ym. 2006, Kirkinen ym. 2007) vahvistavat yllä mainittujen tutkimusten tulokset kaikkein uusimmilla turvetuotantomenetelmillä silloinkin, kun pitkäaikaista hiilivaraston menetystä – joka on syynä uusiutumattomaksi luokitukseen – ei oteta huomioon. Ja ne myös vahvistavat suopeltojen suomensistä ja luonnonsoista eriävän ilmastovaikutuksen, joka johtuu suopeltojen kyvyttömyydestä ylläpitää hiilivarastoa. Siitä syystä suopeltojen turpeen käyttäminen energiantuotantoon voisi tulevaisuudessa tulla ilmastopoliittisesti hyväksyttäväksi. Yllä mainituissa tutkimuksissa on otettu huomioon turpeen alta paljastuvan maa-alueen käyttö hiilinieluna. Se, miten kyseistä maa-aluetta käytetään, ei millään tavalla liity turpeen uusiutumattomaksi luokitteluun, vaan sen syynä on luonnon pitkäaikaisvarastoiman hiilen käyttö. Mikäli kyseistä maa-aluetta käytetään bioenergian tuotantoon, siis peltokasvien tai puiden, se on uusiutuvaa energiaa, jossa kasvien kasvamisessa ilmakehästä absorboima hiili palautuu ilmakehään ilman nettovaikutusta hiilidioksidin määrässä. Mutta kyseistä hiiltä ei voi laskea kahdesti vähentämällä se sekä turpeen että kasvatettujen kasvien polttamisesta aiheutuneista päästöistä.

Bioenergia tarkoittaa uusiutuvasta hiilestä koostuvaa biomassaa eli kasvi- ja eläinbiomassaa ja se kuuluu siis uusiutuvien energiamuotojen joukkoon. Turve, kivihiili ja muut fossiiliset energianlähteet eivät ole bioenergiamuotoja, vaikka ne ovat biomassasta syntyneitä, koska niiden hiili on luonnon nopeasta hiilikierrosta poistamaa, varastoitunutta hiiltä. Ne eivät siis kuulu uusiutuviin energiamuotoihin. Tämän luokituksen kannalta on epäolennaista käytetäänkö turvetta, kivihiiltä, raakaöljyä tai muita fossiilisia resursseja jollain alueella enemmän vai vähemmän kuin sitä muodostuu.

Kivihiililajien, turpeen ja muiden fossiilisten polttoaineiden LHV-lämpöarvoja epävarmuuksineen on esitetty liitteen 5 taulukossa L5.1, joka on peräisin YK/IPCC:n kasvihuonekaasupäästöjen kansallisesta inventaario-ohjeesta (IPCC 2006). Bioenergiolajien lämpöarvoja on taulukossa L5.2 vastaavasti. Kivihiilen HHV-arvot vaihtelevat paljon tyyppin ja laadun mukaan välillä 23–35 MJ/kg ja keskiarvo on noin 28,8 MJ/kg. Myös turvelajeilla on suuri vaihteluväli, mutta Suomessa energiakäytössä olevalle jyrshinturpeelle se on noin 22,1 MJ/kg ja palaturpeelle noin 22,5 MJ/kg (Alakangas 2000).

Kivihiilestä ja turpeesta voidaan valmistaa synteettisiä nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita, jotka soveltuvat myös polttomootorikäyttöön ja sitä kautta liikenteeseen (Probstein & Hicks 1990). Näistä kivihiilikaasu otettiin ensimmäisenä teolliseen käyttöön kaupunkikaasuna 1800-luvun alussa. Myöhemmin 1800-luvulla saatiin teolliseen tuotantoon pyrolyysin tuloksena, koksien valmistuksen yhteydessä, saatavat kivihiili- ja ruskohiiliterva, jotka ovat pyrolyysiöljyjä, sekä bentsoli. Bentsoli, jota myös kivihiilen pyrolyysibensiiniksi voidaan kutsua, on kivihiilen pyrolyysin yhteydessä – kuten tärpätti

puun pyrolyysissä – saatava neste, joka on pääasiassa bentseeniä, mutta sisältää myös muita aromaattisia yhdisteitä (usein bentsoli-sanaa käytetään myös bentseenin synonyyminä, mutta niin ei tässä kirjassa tehdä). Sillä on korkea oktaaniluku, joten se soveltuu ottomoottoripolttoaineeksi myös korkean puristussuhteen moottoreissa. Sitä on käytetty autoissa ainakin vuodesta 1912 alkaen (Talvitie 1930). Bentsoli on moottoriteknisesti korkealaatuinen, mutta terveysvaikutuksiltaan erittäin heikkolaatuinen polttoaine johon sen korkeasta karsinogeenisuudesta ja toksisuudesta. Kivihiiliterva (tai kivihiilitervaöljy) puolestaan on puhdistettuna käyttökelpoista, mutta ei hyvälaatuista, dieselmoottoripolttoainetta. Turpeen pyrolyysillä saadaan vastaavasti turvetervaa.

Puolet Saksan toisen maailmansodan aikana käyttämistä nestemäisistä polttoaineista ilma-, maa- ja vesiliikenteessä tehtiin kivihiilestä pääasiassa Bergius-synteesillä (B-synteesi) ja Fischer-Tropsch-synteesillä (FT-synteesi), mutta myös pyrolyysillä ja lisäksi käytettiin biomassaperäistä etanolia (Yergin 1991). Synteettisistä prosesseista kaasutusperäiset (FT-synteesi ym.) ja suora nesteytys (B-synteesi ym.) kehitettiin ensimmäisenä nimenomaan kivihiilelle ja biomassalle myöhemmin (Perry & Green 1984, Probst & Hicks 1990). Pyrolyysi puolestaan kehitettiin alun perin biomassalle ja kivihiilelle myöhemmin (Bridgwater & Grassi 1991).

Sekä B- että FT-synteesi keksittiin Saksassa. Bergius-synteesin eli hiilen suoran nesteytyksen hydrauksen avulla (vedyn avulla tapahtuva hajottaminen korkeassa paineessa ja lämpötilassa) kehitti Friedrich Bergius vuonna 1913. Se soveltuu paitsi kivihiilen, turpeen ja biomassan myös raakaöljyn käsittelyyn ja merkittävin käyttösovellus onkin ollut raakaöljyn vetykrakkaus. Bergius-synteesi sovellettiin 1920-luvulla biomassalle Ruotsissa ja turpeelle Suomessa. Franz Fischer ja Hans Tropsch kehittivät Fischer-Tropsch-synteesin eli kaasutusperäisen nestemäisten ja kaasumaisten heterogeenisten polttoaineiden valmistusmenetelmän vuonna 1923. Kuten B-synteesi, FT-synteesikin soveltuu myös biomassaperäisten polttoaineiden tuotantoon esimerkiksi puusta tai oljesta ja se demonstroitiin jo 1920-luvulla Ruotsissa.

Synteettisiä polttoaineita tuotettiin 2. maailmansodan aikana teollisesti useassa maassa, mutta ei Suomessa, ja pienimuotoisesti demonstraatiolaitteistoilla hyvin monissa maissa, mukaan lukien Suomessa. Saksassa oli sodan aikana yhteensä noin 100 synteettisiä polttoaineita kuudella eri menetelmällä valmistavaa tuotantolaitosta (Valtonen 1999). Kivihiilen FT-synteesi säilyi sodan jälkeen laajamittaisesti teollisesti sovellettuna teknologiana Etelä-Afrikassa.

Suomessa demonstraatiotoiminta pohjautui turpeen ja puun käyttöön ja sitä veti TKK:n kemian professori Gustaf Komppa (Kuisma 1997). Saksassa koulutettu Komppa kehitti Bergiuksen menetelmästä turpeen nesteyttämiseen sopivan prosessin vuonna 1928 (Nykänen 1994). Turve- ja puupohjaisia B-polttoaineita valmistettiin Kompan menetelmällä sodan aikana muutamia tuhansia litroja. Kaupallista 50.000 tonnin vuosituotannon laitosta suunniteltiin, mutta sitä ei toteutettu johtuen ainakin työvoimapulasta (Kuisma 1997). Myöskään kaupallista FT-laitosta ei rakennettu, vaikka sitäkin teknologiaa oli onnistuneesti demonstroitu (Nykänen 1999). Viimeisin demonstraatiolaitos otettiin käyttöön Stora Enson tehtailla Varkaudessa vuonna 2009 puupohjaisena.

2.14 VI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: VETY (1700-LUKU)

Vety on merkittävä osa kaikkia orgaanisia polttoaineita, mukaan lukien ruoka, joten se on näihin sitoutuneena ollut liikennekäytössä siitä lähtien kuin ihmisiä on ollut olemassa eli tämän julkaisun määritelmässä 2.000.000 eaa alkaen. Kaasuna vety tuli ensimmäisenä energiakäyttöön puu- ja hiilikaasun osana 1600-luvulla. Vetyä esiintyy myös monissa epäorgaanisissa yhdisteissä, joista vesi on resurssiltaan ylivoimainen, sekä luonnollisena vapaana vetykaasuna.

Puhdasta vetyä tuotti ja tutki ensimmäisenä Paracelsus 1500-luvun alussa. Hän tuotti sitä liuottamalla rautajauhetta rikkihappoon vapauttaen rikkihappoon sitoutunutta vetyä. Liikennekäyttöön puhdas vety otettiin 1700-luvulla nostekaasuna sekä vetypalloissa että ilmalaivoissa. Sitä tuotettiin johtamalla höyryä kuumiin rautatankoihin vapauttaen vesimolekyylisiin sitoutunutta vetyä.

Polttoaineena puhdas vety otettiin liikennekäyttöön 1800-luvulla. Vety oli ensimmäisen liikennekäyttöön tarkoitetun polttomoottorin polttoaine vuonna 1813, jolloin sitä käytettiin Francois Isaac de Rivazin autossa. Vety oli myös ensimmäinen vesiliikenteessä käytetty polttomoottorin polttoaine Samuel Brownin veneessä vuonna 1823. Ja Hans von Ohainin maailman ensimmäisen kaasuturbiinipohjaisen suihkumoottorin polttoaineena oli vety vuonna 1937. Vetyä käytetään ajoneuvoissa sekä kompressoituna (CH) että nesteytettynä (LH) (Kuva 2.49).



Kuva 2.49. Linden konttiin mahtuva vetytankkausasema Frankfurtin autonäyttelyssä. Kontti sisältää sekä paineistetun että nesteytetyn vedyn tankkausmahdollisuuden. [2007]

Nykyään BMW ja Mazda ovat ainoat autonvalmistajat, jotka tuottavat vetykäyttöisiä polttomoottoriautoja, BMW ottomoottorilla ja Mazda wankelmoottorilla, mutta monet autonvalmistajat ovat toteuttaneet vetykäyttöisiä polttokennoajoneuvoja. Lisäksi on saatavissa konversiosarjoja, joiden avulla ottomoottoriautot pystyvät hyödyntämään myös vetyä. Kaikki metaaniajoneuvot pystyvät joka tapauksessa hyödyntämään vetyä hytaanina eli seoksena metaanin kanssa. Lisäksi vety soveltuu myös dieselmoottorien polttoaineeksi. Ensimmäisen vetykäyttöisellä (LH100) dieselmoottorilla varustetun rekan rakensi japanilainen Hino Motors vuonna 1986 (Suzuki 1997).

Nesteytetty vety (LH) on paras polttoaine sekä avaruusrakettimoottoreissa (Kuva 2.50) että nopeimmissa lentokoneiden suihkumoottoreissa eli scramjet-moottoreissa. Kemiallisista polttoaineista suurin energiatiheys on molemmissa näissä sovelluksissa tärkeää. Rakettimoottoreissa vety tarjoaa kaikista polttoaineista suurimman savukaasujen poistumisnopeuden energiayksikköä kohti. Suihkukonekäytössä myös polttoaineen kylmyys tuo tärkeän edun moottorin ja koko lentokoneen viilentämisen kautta. Jäähdyttämisen vaatima energia on osittain kompensoitavissa myös LH-käyttöisissä maa-ajoneuvoissa kuten polttomoottoriautoissa moottorin viilentämisen ja siten hyötysuhteen nostamisen kautta.



Kuva 2.50. Noin 10.000 MW tehoisia LH/LO₂-käyttöisiä rakettimoottoreita: a) NASAn Apollo-lentojen Saturn V -kantoraketin J2-moottori vuodelta 1967 Lontoon tiedemuseossa. b) ESan Ariane 5 -kantoraketin Vulcan-moottori vuodelta 1980 Musée des Arts et Métiers:issä Pariisissa. [2007]

Vedyn monipuolisuuden täydentää sen käyttö kuumakaasukoneiden työkaasuna. Philipsin 1950-luvun stirlingmoottoreissa, joissa oli vety työkaasuna, saavutettiin 29 kW:n kokoluokassa 40 % hyötysuhde (Kolin 1972) eli dieselmoottoria korkeampi. Sitä korke-

ampaan on päästy vain heliumilla, esim. Kockumsin 280 kW:n sukellusvenemoottorissa hyötysuhde on 48 %.

Vedyn resursseja ja valmistamismenetelmiä on erittäin runsaasti. Vety on biopolttoaine silloin kun se on valmistettu biomassasta tai biosähköllä vedestä. Vastaavasti fossiiliresurssista tai fossiilisähköllä tuotettuna se on fossiilinen energialähde. Vety voidaan valmistaa vedestä muilla uusiutuvilla energialähteillä kuin bioenergialla, jolloin se on UE-vetyä, mutta ei biovetyä. Tällöin se ei myöskään kuulu biopolttoaineiden joukkoon.

Suomen ensimmäinen, veden elektrolyysiä soveltava, vetytehdas valmistui vuonna 1912 Tirvaan (Talvitie 1945b). Vetyä käytettiin mm. öljyjen vetykäsittelyyn. Samalla tuotettiin myös happea.

2.14.1 Polttomoottori

Polttomoottorissa eli IC-mäntämoottorissa palaminen tapahtuu sylinterin tai muun muotoisen polttokammion sisällä päinvastoin kuin höyrykoneissa ja kuumailmakoneissa eli EC-mäntämoottoreissa, joissa palaminen tapahtuu sylinterin ulkopuolella. Polttomoottorit voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin:

- Normaalipaineiset eli atmosfääriset, esim. Huygens, Street, Lebon, Cayley, Rivaz, Brown, Morey, Lenoir ja Otto-Langen
- Paineistetut 4-tahtiset kipinäsytytteiset, esim. Reithmann, Otto, Hesselman (vanhoissa koneissa myös liekki- ja hehkuputkisytytys)
- Paineistetut 2-tahtiset kipinäsytytteiset, esim. Brayton, Clerk, Benz, Day (vanhoissa koneissa myös liekki- ja hehkuputkisytytys)
- Puristusytytteiset 4-tahtiset, esim. Akroyd-Stuart (hehkukupu), Diesel, Elsbett
- Puristusytytteiset 2-tahtiset, esim. Mietz-Weiss (hehkukupu), Sulzer (diesel)
- Kiertömäntämoottorit, esim. Wankel
- Muut, esim. 6-tahtiset

2.14.1.1 Atmosfääriset

Christian Huygens rakensi ensimmäisen toimivan polttomoottorin vuonna 1673 tarkoituksena kasteluveden nostaminen Seine-joesta kuningas Ludvig XIV:n puutarhoille Versailles'ssa (Airas 1935). Se oli ruutikäyttöinen eli kiinteällä polttoaineella toimiva, pääaineosana puuhiili. Kuninkaan pyynnöstä useat muutkin kokeilivat ruutikäyttöisiä koneita, mm. Huygensin avustajana toiminut Denis Papin, joka käytti Huygensin ensimmäistä polttomoottoria mallina ensimmäiselle höyrykoneelleen vuonna 1690. Leonardo da Vinci oli jo vuonna 1509 piirtänyt mustaruutikäyttöisen polttomoottorin, mutta sitä ei rakennettu (Suzuki 1997).

Seuraava vuosisata kului höyrykoneen kehittelyn parissa kunnes 1700-luvun lopulla polttomoottorit saivat jälleen huomiota. Robert Street suunnitteli ja patentoi vuonna 1794 ensimmäisen nestemäisiä polttoaineita, tärpätti ja terva, käyttävän polttomoottorin (Airas 1935). Philippe Lebon puolestaan patentoi vuonna 1799 ensimmäisen kaasumaisesta polttoainetta, puu- ja hiilikaasua, käyttävän polttomoottorin. Jo 1700-luvulla oli siis tiedossa, että kaikkien olomuotojen polttoaineita voitiin polttomoottoreissa käyttää.

Polttomoottorin otti liikennekäyttöön ensimmäisenä Isaac de Rivaz vuonna 1813 käyttäen polttoaineena vetyä. Tässä hän sovelsi vuonna 1806 rakentamaansa vetykäyttöistä polttomoottoria. Samuel Brown rakensi vuonna 1823 vedyllä käyvän polttomoottorin, jota hän kokeili auton lisäksi veneessä. Kyseessä oli polttomoottorin ensimmäinen vesiliikennesovellus.

Vuonna 1826 Samuel Morey patentoi polttomoottorin, joka sisälsi kaasuttimen nestemäisten polttoaineiden käyttämiseksi. Hän kokeili sitä lukuisilla nestemäisillä, kaasumaisilla ja kiinteillä polttoaineilla, kuten tärpähti, terva, pihka, etanoli, metanoli, kasviöljyt, kasvijauhot, eläinrasvat, tali, puukaasu, puuhiilikaasu ja vesikaasu. Hän myös käytti moottoriaan rakentamassaan autossa ja veneessä ainakin tärpätillä, mahdollisesti myös muilla kokeilemillään polttoaineilla.

Kaikki edellä mainitut ja moni muukin varhainen polttomoottori olivat ainoastaan demonstraatiokäytössä tai ei-kaupallisessa hyötykäytössä. Kaupallisesti menestyneen moottorin rakensi ensimmäisenä Jean Joseph Lenoir vuonna 1859 polttoaineena kaupunkikaasu, jonka pääkomponentit ovat vety, häkä ja metaani (Kuva 2.51). Se oli kipi-näsytytteinen 1-sylinterinen 2-tahtinen moottori, josta tuli ensimmäinen sarjavalmisteen polttomoottori vuonna 1860 (Peltola 1984). Lenoir-moottoreita valmistettiin useita satoja pääasiassa paikalliskäyttöön, mutta Lenoir teki kokeiluja myös liikennekäytössä ja yritti ensimmäisenä myös kaupallistaa auton, jollaisen hän rakensi vuonna 1862 (Peltola 1984). Lenoirmoottori oli ns. suoraan vaikuttava eli poltossa syntyneen savukaasun paine liikutti mäntää suoraan. Useimmat sen edeltäjät olivat epäsuoraan vaikuttavia eli kaasujen räjäyttämällä aiheutettiin tyhjiö, johon ulkoilman paine teki työn (Airas 1935). Hyötösuhde oli noin 3 %.



Kuva 2.51. Lenoirin vuonna 1861 valmistama kaupunkikaasukäyttöinen moottori Musée des Arts et Métiers:issä Pariisissa. Se oli ensimmäinen sarjavalmisteen ja kaupallisesti menestynyt polttomoottori. Lenoir valmisti myös mm. etanolilla ja tärpätillä käytettäviä moottoreita. [2007]

Lenoir valmisti ja patentoi vuonna 1860 nestemäisillä polttoaineilla käyvän kaasuttimella varustetun moottoriversion, jota hän demonstroi myös autokäytössä tärpätillä, etanolilla ja muilla käytössä olleilla orgaanisilla polttonesteillä, oletettavasti myös metanolilla ja kerosiinilla, mutta todennäköisesti ei silloin jätteeksi luokitellulla bensiinillä, jota ei ollut markkinoilla (Kuva 2.73). Lenoirin automoottorin iskutilavuus oli 2,5 litraa ja teho 1,5 hv (Georgano 1985). Hän sai 3-pyöräisestä autostaan vain yhden tilauksen, vuonna 1864 tsaari Aleksanteri II:lta, jolle hän myös sellaisen toimitti (Peltola 1984). Hän otti saman moottorin vuonna 1864 myös venekäyttöön ja Paul Haenlein otti sen ilmaliikennekäyttöön ilmalaivassa vuonna 1872.

Kaikki yllämainitut olivat atmosfäärisiä moottoreita, joissa sytytys tapahtui normaali-ilmanpaineessa. Hyötysuhde niistä parhaimmallaakaan eli lenoirmoottorilla ei yltänyt kuin 4 %:iin (Kolin 1972). Otto ja Langen pystyivät nostamaan huomattavan hyvin kaupallisesti menestyneen vuoden 1867 atmosfäärikoneensa hyötysuhteen alkuperäisestä 6 %:sta kehittyneimmällä versiolla 14 %:iin eli kolminkertaiseen lenoirmoottoriin verrattuna. Se oli kaksinkertainen silloisiin höyrykoneisiin verrattuna ja samaa tasoa silloisten kuumailmakoneiden kanssa ja edusti tasoa, jolle höyrykoneet pääsivät vasta 1900-luvulla (Kolin 1972). Niitä valmistettiin noin 5000 kappaletta.

2.14.1.2 Paineistetut 4-tahtiset kipinäsytytteiset

Hyötysuhteen nostaminen edelleen edellytti polttoaineen ja ilman paineistamista ennen sytytystä, kuten jo Carnot oli esittänyt lämpövoimakoneiden teoriassaan vuonna 1824. Christian Reithmann valmisti ensimmäisenä paineistetun polttomoottorin vuonna 1852 ja käytti polttoaineena alun perin vetyä ja vuodesta 1858 alkaen myös kaupunkikaasua (Airas 1935). Tässä koneessa paine aikaansaatiin erillisellä pumpulla eli tekniikalla, joka oli tuttua jo William Barnetin moottorikokeista vuonna 1838.

Alphonse Beau de Rochas julkaisi vuonna 1862 4-tahtimoottorin periaatteen, jossa puristus tapahtuu itse sylinterissä eikä erillisellä pumpulla (Airas 1935). Tämä toimintaperiaate on edelleen käytössä moderneissa autoissa. Hän ei kuitenkaan koskaan rakentanut moottoria. Mutta Nicolaus Otto, joka oli Rochasin työstä tietämättä keksinyt 4-tahtiperiaatteen, rakensi vuonna 1862 ensimmäisenä sitä noudattavan moottorin, jota hän käytti etanolilla. Hän ei kuitenkaan silloin pystynyt ratkaisemaan sen teknisiä ongelmia ja siirtyi kehittämään atmosfäärikonetta Eugen Langenin kanssa tuloksena vuonna 1867 myyntimenestyksen saavuttanut kaupunkikaasukäyttöinen kone sekä sen seurauksena vielä nykyään toiminnassa olevan yhtiön Gasmotoren-Fabrik Deutz perustaminen ja Gottlieb Daimlerin ja Wilhelm Maybachin rekrytointi insinööreiksi (Peltola 1984).

Deutzin puitteissa Otto sai ratkaistua 4-tahtimoottorin ongelmat tuloksena vuonna 1876 ensimmäinen suurina sarjoina valmistettu kipinäsytytteinen kaupunkikaasukäyttöinen 4-tahtimoottori, jota nykyään ottomoottoriksi kutsutaan ja joka on maailman yleisin moottoroidun liikenteen voimanlähde. Alkuperäisessä 4 hv:n ottomoottorissa puristussuhde oli 2,5 (Suzuki 1997) ja hyötysuhde jäi alle atmosfäärikoneen, mutta se oli huomattavasti hiljaisempi ja mahdollisti suuremman koon eli tehon kuin atmosfäärikone (Airas 1935). Nykyisissä autojen bensiinikäyttöisissä ottomoottoreissa puristussuhde on 8–10 ja kaasukäyttöisissä 12–15, biokaasulla jopa 18.

Otto sovelsi höyrykoneiden kaksoispaisuntaperiaatteen vuonna 1879 ottomoottoriin (Suzuki 1997). Tässä koneessa oli 2 normaalia ottomoottorin sylinteriä, joiden pakokaasut johdettiin kolmanteen, höyrykoneen periaatteella toimivaan sylinteriin. Kyseessä oli siis ottomoottorin ja savukaasumoottorin avulla toteutettu kombimoottori. Amerikkalainen EHV-yhtiö valmisti tällä periaatteella toimivan höyryauton vuonna 1906 (Suzuki 1997). Ottomoottorin ja kaasuturbiinin muodostama kombimoottori kaupallistettiin vuonna 1952, jolloin Wright Turbocompound R3350 -moottoria ryhdyttiin valmistamaan matkustajalentokoneisiin Lockheed Constellation ja DC-7 (Suzuki 1997).

Ottomoottorin menestys ajoneuvokäytössä kilpailussa sähkö- ja höyryautojen kanssa edellytti kipinäsytytyksen kehittämistä ja nestemäisten polttoaineiden käyttöä. Maybach ja Daimler rakensivat vuonna 1883 hehkuputkisytytteisen nopeakäyntisen (600–750 rpm verrattuna Otton 100–200 rpm) ottomoottorin, joka pystyi käyttämään bensiiniä kaupunkikaasun lisäksi. Otto rakensi vuonna 1887 korkean puristusasteen kipinäsytytteisen sprimoottorin, joka oli mahdollinen etanolin suuren oktaaniluvun takia.

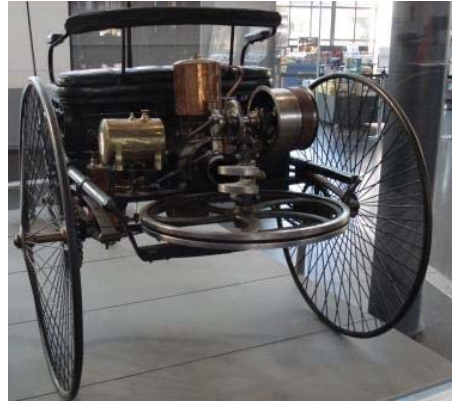
Kipinäsytytyksen idea oli tuttu jo Voltan 1700-luvun sähköpistoolista, ja sitä oli lennimoottorissa ja joissakin muissakin polttomootoreissa käytetty, mutta liekkisytytys oli yleisempi ratkaisu. Ottokin oli yhdessä Siemensin kanssa yrittänyt ratkaista asiaa 1870-luvulla. Hän kehitti moottoriinsa toimivan magnetosytytyksen sähköiseen räjähteensytyttimeen perustuen vuonna 1885. Benz käytti Otton magnetosytytysjärjestelmää ensimmäisessä autossaan vuonna 1885 ja kehitti myöhemmin akkuun perustuvan sytytyksen. Robert Bosch paransi Otton sähkösytytystä vuonna 1887 ja hänen yhtiönsä valmisti ensimmäisen modernin sytytysputkan vuonna 1902.

Deutzista vuonna 1881 lähteneet Maybach ja Daimler ottivat ensimmäisinä ottomoottorin liikennekäyttöön moottoripyörässä ja moottorikelkassa vuonna 1885. Vuonna 1886 he esittelivät sen 4-pyöräisessä autossa, vuonna 1887 veneessä, vuonna 1888 ilmalaiivassa ja myöhemmin myös kuorma-autoissa, raitiovaunuissa ja lentokoneissa.

Ensimmäisenä ottomoottorikäyttöisen auton rakensi heistä riippumattomasti kuitenkin Carl Benz vuonna 1885. Se oli 3-pyöräinen kaupunkikaasulla ja bensiinillä (patentissa polttoaineet oli ilmoitettu tässä järjestyksessä) kulkeva ja Benz sai siitä patentin vuonna 1886 (Kuva 2.52). Se oli ensimmäinen varta vasten autoksi rakennettu päinvastoin kuin aiemmat autodemonstraatiot, jotka olivat erilaisiin, yleensä alun perin hevosvetoisiin, vaunuihin istutettuja moottoreita, kuten myös Maybachin ja Daimlerin ensimmäinen. Benz oli ennen ottomoottoria kokeillut omaa 2-tahtimoottoriaan autokäytössä, mutta todennut sen soveltumattomaksi (Bird 1967).

Benzin ja Maybach/Daimlerin autoista tuli ensimmäiset kaupallisesti menestyneet autot, josta syystä heitä firmoineen pidetään autoteollisuuden synnyttäjinä. Ensimmäisestä moottorikäyttöisestä kemiallisia polttoaineita käyttävästä autosta ei kuitenkaan ollut kysymys, sillä sellainen valmistettiin yli 100 vuotta aiemmin (Kuva 2.36).

Ottomoottori on nykyään ylivoimaisesti eniten käytetty autojen voimanlähde ja nousut markkinajohtajaksi myös moottoripyörien voimanlähteenä. Alkuperäisestä vuoden 1876 moottorista hyötysuhde on saatu moderneissa autoissa kaksinkertaistettua välille 20-30 % eli on päästy samalle tasolle hevosien kanssa (Kolin 1972). Tämä taso saavutettiin 1930-luvun lopulla, jolloin Eugene Houdryn vuonna 1927 keksimän raakaöljyn



Kuva 2.52. Benzin ja maailman ensimmäinen ottomoottoriauto (1885) Münchenin liikenteenteeniikan museossa. Voimanlähteenä on Benzin suunnittelema bensiinillä ja kaupunkikaasulla toimiva 0,8 hv:n 1-sylinterinen 0,96-litrainen puristusasteen 2,68:1 ottomoottori, joka kuljetti autoa 16 km/h nopeudella. [2007]

katalyyttisen krakkauksen ansiosta pystyttiin bensiinin oktaaniluku nostamaan 100:aan ja sen takia moottorin puristussuhde pystyttiin nostamaan 8–10:een eli nykyautoissa tavalliselle tasolle, mutta silloin vain koe- ja sotilasmootoreissa, erityisesti taistelulentokoneissa (Palucka 2005). Nykyään 99-oktaaninen on parasta saatavissa olevaa bensiiniä, lukuun ottamatta pieninä määrinä kilpikäyttöön valmistettua moninkertaisesti kalliimpaa bensiiniä. Esimerkiksi 100-oktaanisen (jota myytiin aiemmin vapaasti esimerkiksi Jyväskylän suurajojen aikaan mahdollistaen yksityiskeskeille saman polttoaineen kuin tehdaskeskeille) hinta on noin 3-kertainen 99-oktaaniseen verrattuna.

Juhala (1999) mainitsee mikroprosessorin ainoana 1900-luvun alun jälkeen autotekniikkaan tulleen aitoa uutena innovaationa. Ainut merkittävä 1900-luvulla tapahtunut



Kuva 2.53. Hesselman-moottorilla varustettu vuosimallin 1944 Volvo T43-traktori, joka pystyy mm. etanolin käyttöön, Valtran traktoritehtaan näyttelyssä Suolahdella. [2008]

moottoritekniinen parannus, joka ei ollut vain polttoaineen parantuneen laadun mahdollistama, oli Jonas Hesselmanin vuonna 1926 rakentama ja Volvon sekä autoissaan että traktoreissa (Niskanen 1999) kaupallistama suorasuihkutusmoottori, joka nykyään on vallitseva bensiinikäyttöisissä moottoreissa (Kuva 2.53). Hesselmanmoottori, päinvastoin kuin myöhemmät suorasuihkutusmoottorit, oli polttoainejoustava moottori, joka mahdollisti bensiinin lisäksi myös mm. etanolin, kerosiinin ja raakaöljyn käytön (Olsson 1987). Se pystyi vähentämään polttoaineen kulutusta 20–25 % 1920-luvun alhaisen puristus-

suhteen ottomoottoreihin verrattuna (Airas 1935). Useita polttoainejoustavia moottoreita on kehitetty myöhemmin. Sellaisilla on tulevaisuudessa hyvin suuri merkitys, mikäli halutaan ottaa monia uusia biopolttoaineita liikennekäyttöön.

Ottomoottorin hyötysuhteen kehitys pysähtyi siis 70 vuotta sitten, mutta pääosin ei itse moottorista vaan käytetystä polttoaineesta johtuen. Bensiini on alhaisen oktaaniluvun 95-100 takia liian huonolaatuista polttoainetta, jotta puristussuhdetta voitaisiin nostaa paljon yli 10. Monilla biopolttoaineilla on huomattavasti korkeampi oktaaniluku, esimerkiksi etanolilla (107), etanolilla (108) ja biokaasulla (140). Bensiinin halpuus on estänyt näiden teknisesti paljon laadukkaampien ottomoottoripolttoaineiden käytön ja siten pysäyttänyt ottomoottorien hyötysuhteen kehityksen 30 % tasolle. Moottoritekniisesti puristussuhde ottomoottorissa olisi helppo kaksinkertaistaa.

Väinö Airas kirjoitti tästä asiasta vuonna 1935 seuraavasti:

”Viimein täytyi kuitenkin Otton uuden, puristuksella toimivan koneen päästä vallitsevaksi, sillä taloudellisuus ratkaisee lopulta tällaiset kysymykset.”

Hän moottori-insinöörinä tarkoitti taloudellisuudella hyötysuhdetta. Mutta taloudellisuus on käytännössä merkinnyt myös sitä, että halpa benssiini, jonka hinnassa sen aiheuttamat terveys- ja ympäristökustannukset eivät ole mukana, on ottomoottoreissa estänyt parempien, hyötysuhdetta nostamaan pystyvien polttoaineiden käytön. Ja toisaalta miljardien ottomoottorien valmistus on merkinnyt suursarjavalmistuksen mukanaan tuomaa taloudellisuutta, joka on estänyt tai hidastanut hyötysuhteeltaan parhaiden (dieselmoottoriinkin verrattuna) voimanlähteiden kuten stirlingmoottori, polttokenno ja sähkömoottori käyttöönottoa. Hyötysuhde ei siis maksimoidu vääristyneillä markkinoilla, joissa merkittävä osa kustannuksista ei ole hinnoissa mukana eikä myöskään markkinoilla, joissa hyötysuhteeltaan parempien teknologioiden pääsy sarjavalmistukseen ja siten kilpailukykyiseksi vanhan sarjavalmistuksessa olevan teknologian kanssa ei tietoisesti tueta. Usko markkinoiden olevan täydelliset eli energiatehokkuuden automaattisesti maksimoituvan ilman poliittisia toimenpiteitä on kuitenkin yleistä. Wuppertal-instituutin ja Rocky Mountain Instituutin perustajat ja johtajat kuvaavat sitä Rooman klubille tehdyssä raportissaan seuraavasti (Weizsäcker ym. 1997):

”In an astonishing irony, one of the greatest obstacles to realising this potential – of creating huge new industries in resource efficiency – has been the mind-set of some of the free market’s staunchest proponents. This is the naïve belief, particularly common among many free-market economists (and ideologies they instruct), that existing markets are so close to perfection that any shortfall from the ideal is hardly worth examining...”

Tämä ongelma on estänyt myös Suomessa energiatehokkaimpien ja kokonaistaloudellisesti kannattavampien teknologioiden käyttöönottoa (Lampinen 2000, 2002b, 2008b).

2.14.1.3 Paineistetut 2-tahtiset kipinäsytytteiset

Paineistettuja 2-tahtimoottoreita kehitettiin rinnan ottomoottorin kanssa ja oli pakko-kin, sillä Otton patenti vuodelta 1877 esti paineistettujen 4-tahtimoottorien myynnin

kunnes se oikeusistuimessa kumottiin vuonna 1886 (Peltola 1984). Benzinin ja Maybachin/Daimlerin ajoneuvojakaan ei voitu myydä ennen sitä. Patentin kumoaminen oli siis edellytyksenä autoteollisuuden synnylle. Samaan tapaan monet synteettisiä liikenteen biopolttoaineita koskevat patentit ovat 1920-luvulta lähtien estäneet ja estävät edelleen niiden tuotteistamisen.

Paineistetut 2-tahtimoottorit antavat teoriassa 4-tahtisiin verrattuna kaksinkertaisen ja käytännössäkin 1,5-kertaisen tehon sylinterin tilavuutta kohti koska polttoaine tekee työtä moottorin jokaisella kierroksella, kun 4-tahtisilla vain joka toisella kierroksella. Oli siis ilmeistä, että kiinnostusta niiden kehittämiseen riitti.

Ensimmäisen valmisti George Brayton vuonna 1872, mutta vasta Dugald Clerkien vuoden 1877 koneesta tuli ensimmäinen kaupallisesti menestynyt 2-tahtikone tultuaan myyntiin vuonna 1879 (Airas 1935). Myös Benz kaupallisti 2-tahtimoottorin vuonna 1883 ja myös otti sellaisen ensimmäisenä liikennekäyttöön autonsa prototyypissä vuonna 1885, mutta hänen autonsa ensimmäisen autonsa lopullisessa versiossa oli 4-tahtimoottori, jonka käyttö tuli mahdolliseksi Otton patentin voimassaolon loputtua enenaikaisesti oikeuden päätöksellä vuonna 1886. George Selden patentoi ensimmäisenä braytonmoottoriin perustuvan 2-tahtisen polttomoottoriauton vuonna 1879, joskin patentti myönnettiin vasta 1895 ja kattaen kaikki polttomoottorit (Bird 1967). Kaikkia polttomoottoriautoja koskeva Seldenin patentti viivästytti USA:n automarkkinoiden kehitystä kunnes vuonna 1911 oikeus rajoitti patentin koskemaan vain braytonmoottoriautoja. Niitä oli alhaisesta teho/painosuhteesta johtuen valmistettu vain 2 kpl, joten patentin muutos teki sen käytännössä merkityksettömäksi.

Todellisen läpimurron 2-tahtimoottori sai Joseph Dayn vuonna 1889 rakentamasta 1-sylinterisestä koneesta, josta hän myöhemmin toteutti venttiilittömän version. Se on nykyaikaisten 2-tahtimoottorien toimintaperiaate ja siten Day teki 2-tahtimoottorille saman kuin Otto 4-tahtiselle. Dayn moottoria ei kuitenkaan nykyään kutsuta daymoottoriksi, vaan pelkäksi 2-tahtimoottoriksi tai 2-tahtiseksi ottomoottoriksi (vaikka Ottokin teki 2-tahtimoottorikokeita, hän hylkäsi sen eikä hänellä ollut mitään tekemistä Dayn innovaatioiden kanssa). Tämä moottori levisi hyvin laajaan käyttöön mopoissa, moottoripyörissä ja muissa kevyissä koneissa ja on nykyään johtava pienmoottorityyppi, jota käytettiin harvinaisempana myös autoissa 1980-luvulle asti. Katupyörissä daymoottori on nykyään harvinaistumassa ottomoottorien vallatessa markkinoita. Kilpapyörissä daymoottori on kuitenkin paremman hyötysuhteensa ansiosta ollut vallitseva moottorityyppi. Daymoottorin ensimmäinen polttoaine oli raakaöljypohjainen bensiini, mutta myös biopolttoaineita voidaan siinä käyttää. Ehkä tunnetuin esimerkki on perinteinen risiiniöljyn käyttö lisäaineena.

Näiden moottorien etuna on pienempi koko tiettyä tehoa kohti verrattuna 4-tahtimoottoreihin ja yksinkertaisempi rakenne ja sitä kautta halpuus. Mutta hyötysuhde niissä jää kuitenkin yleensä 4-tahtimoottoriaa alemmaksi johtuen seuraavista syistä (Parker 1977):

- Efektiivinen sylinteritilavuus pienenee johtuen männän toimimisesta myös venttiilinä
- Osa savukaasuista sekoittuu polttoaineen kanssa
- Osa polttoaineesta karkaa palamattomana savukaasujen mukana

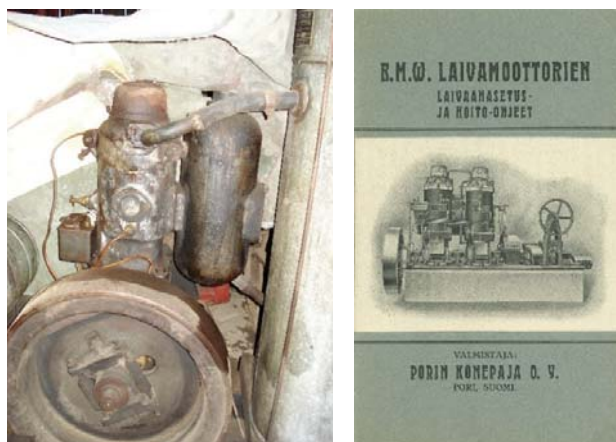
Samoin syistä johtuvat 2-tahtisten suuremmat päästöt ja siten niiden suuremmat terveys- ja ympäristöhaitat. Kilpamoottoripyörien kokemukset kuitenkin osoittavat, että daymoottorilla voidaan saavuttaa korkeampi hyötysuhde ja sen seurauksena alemmat hiilidioksidipäästöt kuin ottomoottorilla, josta syystä daymoottorilla on mahdollisuuksia uuteen tulemiseen katuliikenteessä ilmastonmuutoksen torjunnan merkityksen kasvaessa verrattuna tavanomaisiin ilmapäästöihin. Tavanomaisiin ilmapäästöihin voidaan katalyysaattoreilla vaikuttaa merkittävästi, mutta hiilidioksidipäästöjä ei ajoneuvojen päästöistä voida käytännössä poistaa – tarkemmin sanottuna ne voidaan kyllä poistaa savukaasuista, mutta niitä ei ajoneuvoissa pystytä varastoimaan eikä edes välivarastoimaan, lukuun ottamatta eräitä laivojen ja junien periaatteessa tarjoamia mahdollisuuksia.

2.14.1.4 Puristusytytteiset

Ilman kompressioon perustuvaa käsikäyttöistä tulensytytintä on käytetty Indonesiassa ja muualla Kaakkois-Aasiassa muinaisista ajoista lähtien ja käytetään edelleen (Kolin 1972). Sylinterinä on bambu, koverrettu puu tai sarvi ja mäntänä puu tai sarvi (Balfour 1907). Euroopassa vastaava teknologia keksittiin vasta 1800-luvulla käyttäen metalleja ja lasia, mutta se jäi lähinnä opetusvälineeksi tulitikkujen valloittaessa sytytinmarkkinat (Balfour 1907). Ilman kompressiota sylinterissä hyödynnettiin myös ilmatykeissä 1700-luvulta alkaen (Kolin 1972).

Puristusytytteisen moottorin rakensi, patentoi ja kaupallisti ensimmäisenä Herbert Akroyd-Stuart vuonna 1890. Kyseessä oli 4-tahtinen hehkukupumoottori, jota on myös hehkukuulamoottoriksi ja raakaöljymoottoriksi kutsuttu. Siinä sytytysenergia tulee osittain ilman puristuksesta ja osittain kuumasta hehkukuvusta, josta syystä sitä kutsutaan myös puolidieseliksi – joskin myös muun tyyppisiä puolidieselmoottoreita on valmistettu (Airas 1935). Sen puristussuhde ja siten myös hyötysuhde on alhaisempi kuin dieselmoottorissa. Ensimmäinen 2-tahtinen puristussytytteinen moottori oli myöskin hehkukupumoottori, joka patentoitiin vuonna 1897 (Airas 1935). Hehkukupumoottorissa 2-tahtisuus ei aiheuta polttoainetappioita palamiskaasujen poiston yhteydessä kuten 2-tahtisessa kipinäsytytteisessä moottorissa (daymoottorissa), koska polttoaine suihkutaan puristustilaan vasta palamiskaasujen poiston jälkeen: se mahdollistaa jopa yhtä suuren energiatehokkuuden kuin dieselmoottoreissa, kuten Lanz on osoittanut (Reinikainen 1954, Reinikainen & Reinikainen 1953).

Hehkukupumoottorin ensimmäinen liikennekäyttö lienee Gustaf Weisskopfin toinen lentokone vuonna 1902. Hehkukupumoottorit, joita on myöskin hehkukuulamoottoriksi nimitetty, olivat vuosikymmeniä laajassa käytössä esim. maamoottoreissa, traktoreissa ja veneissä, mutta dieselmoottorit ovat nykyään syrjäyttäneet ne. Suomessa 2-tahtisia hehkukupumoottoreita (Kuva 2.54) rakensi mm. BMW (Björneborgs Mekaniska Verkstad) eli Porin konepaja (Pero 1945). BMW-moottoreita käytettiin myös liikenteessä ainakin laivoissa (BMW 1920). Hehkukupumoottori on polttoainejoustava: polttoaineeksi käy mm. etanoli, metanoli, puukaasu, kasviöljyt, jäterasvat, petroli, bensiini, raakaöljy (nafta) ja dieselöljy. Ruotsissa valmistettiin Bolinderin hehkukupumoottoreita 1800-luvun lopulta alkaen ja niitä käytettiin veneissä varsin laimeallakin etanolilla (Niskanen 1999).



Kuva 2.54. Porin konepajan eli BMW:n hehkukupumoottori: a) 2-tahtinen 10 hv:n hehkukupupaikallismoottori Markku Lyhdyn kokoelmasta. [2007] b) Ohjekirja moottorin laivakäytöstä (BMW 1920).

Hehkukuputraktoreita ryhdyttiin ensimmäiseksi valmistamaan Ruotsissa vuonna 1913, jolloin sekä Avance että Munktell esittelivät ensimmäiset mallit: Avance oli ensimmäinen todella toimiva Suomeen tuotu traktori, joka oli käytössä vuosina 1913–1952 (Ojanen 1997c). Munktell jatkoi Bolinder-Munktell-nimellä BM-hehkukuputraktorien valmistusta 1950-luvun alkuun asti, jolloin Volvo osti sen. Kuvassa 2.55 on saksalaisia Lanzin hehkukupuajoneuvoja, jotka käyttivät polttoaineena mm. gasoholia (etanolibensiiniä), kasviöljyjä (esim. pellavaöljyä) ja puukaasua. Lanz valmisti hehkukuputraktoreita ja muita työkoneita vuosina 1921–1955 sekä hehkukupuautoja vuosina 1936–1954 (Schneider 2002) yhteensä yli 200.000 kappaletta (Williams 2008). Vuosina 1941–1945 Lanz valmisti myös häkäpöntöllä varustettuja traktoreita. Traktoreissa käytettiin yleensä 2-tahtisia hehkukupumootteita, joiden puristussuhde oli 6-10 (Reinikainen 1954). Vuonna 1953 Suomen markkinoilla oli myynnissä ainakin 123 traktorimallia, joista 8 oli hehkukupumoottorilla varustettuja: ruotsalaiset Bolinder-Munktell BM 10 ja 20, puolalainen Ursus C45 (Ojanen 1997c) sekä saksalaiset Lanz 17, 22, 28, 35 ja 45, jotka kaikki olivat 2-tahtisia ja yhtäkään niistä ei testattu Vakolassa (Reinikainen & Reinikainen 1953). Hehkukuputraktoreita valmistettiin lisäksi ainakin Englannissa (Marshall), Ranskassa (SFV ja Le Percheron), Italiassa (Landini) ja viimeisimpänä vielä 1960-luvun alussa Unkarissa (HSCS) (Mortland ym. 2006).

Rudolf Diesel rakensi ensimmäisen prototyyppinsä vuonna 1892 ja onnistui valmistamaan todella toimivan moottorin vuonna 1897 (Kolin 1972, Kuva 2.56a). Hän käytti moottoriaan monilla eri polttoaineilla, mukaan lukien kiinteä hiilipöly, nestemäiset bensiini, kerosiini ja kasviöljyt sekä kaasumainen kaupunkikaasu (Kolin 1972, Pahl 2005). Ilmeisesti ensimmäinen epäonnistuneista kokeiluista tehtiin hiilipölyllä. Hän saavutti nestemäisillä polttoaineilla vuonna 1897 38,5 % hyötysuhteen (Schröter 1897) eli korkeamman kuin nykyisissä autojen dieselmootteoreissa. Se oli mahdollista korkean setaaniluvun kasviöljyillä, mutta ei bensiinillä eikä kerosiinilla. Esitellessään konettaan suurelle yleisölle Pariisin maailmannäyttelyssä vuonna 1900 hän käytti pähkinäöljyä (Pahl 2005). Vuodesta 1964 lähtien saksalainen Elsbett-yhtiö on valmistanut kasviöljyjen PPO100 käyttöön tarkoitettuja dieselmootteoreita, ns. elsbettmootteoreita. autoihin, työkoneisiin, veneisiin ja lentokoneisiin (Kuva 2.56b).



Kuva 2.55. Lanzin polttoainejoustavia hehkukupaajoneuvoja Sinsheimin autotekniikan museossa Saksassa: a) traktori vuodelta 1922, b) auto vuodelta 1944. [2007]



Kuva 2.56. a) Rudolf Dieselin ensimmäinen toimiva moottori vuodelta 1897 kävi kasviöljyllä ja on nyt esillä Deutsches Museumissa Münchenissä. b) Elsbettin ELKO-kasviöljydieselmoottori vuodelta 1987 Münchenin liikennetekniikan museossa. [2007]

Diesel-moottorin kaupallisesti ensimmäisenä saksalainen MAN-yhtiö, joka oli valmistanut jo vuoden 1897 moottorin. Diesel-moottoria käytettiin alun perin stationäärisissä sovelluksissa. Liikennekäyttöön se otettiin ensin veneessä vuonna 1903, laivassa vuonna 1911, kuorma-autossa ja traktorissa vuonna 1923 ja ilmalaivoissa sekä henkilöautoissa 1930-luvulla (White 1978, Piltz & Levä 1996, Suzuki 1997, Pahl 2005, Carter ym. 2005, Williams 2008). Se on nykyään johtava moottorityyppi laivoissa, traktoreissa sekä rekoissa ja hyvin merkittävä, ottomoottorin jälkeen, myös henkilöautoissa.

Vaikka valtaosaa dieselmoottoreista käytetään nykyisin ja käytettiin jo 1900-luvun alussa fossiililla polttoaineilla, Rudolf Diesel itse pyrki edistämään kasviöljyjen käyttöä, koska hän halusi koneensa olevan käyttökelpoinen kaikkialla ja toimivan myös sen jälkeen kun fossiiliset polttoaineet ovat loppuneet.³

³ Rudolf Diesel katosi vuonna 1913 Belgian ja Englannin välisellä laivamatkalla hämäräksi jääneissä olosuhteissa (Pahl 2005).

Dieselmoottorin 2-tahtiversion kehittivät ja kaupallistivat ensimmäisenä sveitsiläiset Sulzerin veljekset Sulzer-yhtiössään 1900-luvun alussa (Kolin 1972). Ensimmäinen suuri 2-tahtinen liikennemoottori oli saksalaisen MAN-yhtiön vuonna 1913 sukellusveneeseen asentama. Ne ovat nykyään käytössä erityisesti suurissa moottoreissa laivoissa, sukellusveneissä, vetureissa ja sähkön tuotannossa. Maailman suurin polttomoottori on 2-tahtinen Wärtsilä-Sulzer-laivadieselmoottori, jonka teho on 80 MWm, iskutilavuus 22.000 litraa ja hyötysuhde 51 % (vrt. henkilöautodieseleiden 30 %). Suurempaan hyötysuhteeseen on lämpövoimakoneilla mahdollista päästä vain kombilaitoksilla, kuten höyryturbiini-kaasuturbiini tai diesel-kaasuturbiini, joilla on päästy 60 %:n tasolle. Se puolestaan on ylitettävissä vain polttokennotekniikalla.

Nykyisten dieselmoottoreiden puristussuhde on noin 18:1, mutta aiemmin suurempiakin puristussuhteita käytettiin. Suomen markkinoilla vuonna 1959 olleissa dieseltraktoreissa puristussuhteet vaihtelivat välillä 14,5–22:1 (KV 2007). Vastaavasti ottomoottoritraktoreissa puristussuhde oli bensiinikäyttöisissä välillä 6-7,4:1 ja petrolikäyttöisissä 5:1 (KV 2007), kun nykyään korkeaoktaanista bensiiniä käytettäessä puristussuhde on noin 10:1. Diesel- ja ottomoottorien puristussuhteet ovat siis huomattavasti lähentyneet vähentäen niiden välistä hyötysuhde-eroa. Biokaasu mahdollistaa korkean oktaanilukunsa (jopa yli 150) ansiosta dieselin normaalin puristussuhteen 18:1 käytön ottomoottorissa.

2.14.1.5 Kiertomäntämoottorit

Kiertomäntämoottorin idea on mäntämoottoria 100 vuotta vanhempi ja peräisin jo 1500-luvulta. James Watt suunnitteli kiertomäntähöyrykoneen 1700-luvulla (Kolin 1972). Kiertomäntäpolttomoottoreita on kehitelty monia lajeja, ja monet yritykset, kuten Daimler-Benz valmisti ja käytti niitä autoissaan. Mutta niistä vain yksi, Felix Wankelin vuonna 1929 patentoima wankelmoottori, on päässyt laajempaan sarjavalmistukseen ja menestynyt (Kolin 1972). Se otettiin liikennekäyttöön nykyään Volkswagen-konserniin kuuluvan saksalaisen NSU-yhtiön valmistamissa autoissa vuonna 1965.

Wankelmoottorin hyötysuhde autokokoluokassa on noin 28 % (Kolin 1972) eli samaa tasoa parhaiden ottomoottorin kanssa, mutta se tuottaa kaksinkertaisen tehon ottomoottoriin verrattuna polttokammion tilavuusyksikköä kohti. Se tarkoittaa, että wankelmoottorit sopisivat erityisesti tarkoituksiin, joissa pieni koko on olennainen, siis esimerkiksi moottoripyörät ja lentokoneet. Moottoripyörissä ja ultrakevyissä lentokoneissa sitä on todella käytettykin, mutta suurempia lentokoneita varten vasta 1960-luvulla todella toimivaksi saatu moottori syntyi liian myöhään, koska suihkumoottorit olivat jo käytössä suurinta tehoa vaativissa koneissa.

Wankelmoottori on nykyään sarjavalmistuksessa ja sitä käytetään Mazdan urheiluautoissa. Polttoaineena on normaalisti bensiini, mutta koska sillä ei ole yhtä korkeita oktaanilukuvaatimuksia kuin ottomoottorilla monet muutkin polttoaineet ovat mahdollisia eli se selvästi ottomoottoria polttoainejoustavampi. Mazdan wankelmoottorilla varustetusta RX-8-urheiluautosta on saatavissa myös bifuel-malli, joka voi käyttää sekä bensiiniä että vetyä. Vastaava bifuel-ominaisuus on yhdistetty wankel-sähköhybriditekniikkaan Mazdan 5-sarjan konseptiautossa, joka esiteltiin Tokion autonäyttelyssä vuonna 2005.

2.14.2 Polttokenno

William Robert Grove valmisti ensimmäisen polttokennon vuonna 1839. Polttokenno ei nimestään huolimatta polta mitään. Se on lämpövoimakone, joten sen hyötysuhde ei ole Carnot'n hyötysuhteen rajoittama. Lisäksi siinä ei tapahdu mekaanisia häviöitä kuten lämpövoimakoneissa. Siksi sekä teoriassa että käytännössä polttokennojen hyötysuhteet ylittävät samassa lämpötilassa käytettävän lämpövoimakoneen hyötysuhteen. Jo 1960-luvulla avaruusaluskäytössä olevien polttokennojen hyötysuhde oli saavuttanut 60 % (Braun 1967).

Polttokenno ei tuota mekaanista energiaa kuten lämpövoimakoneet, vaan se konvertoi kemiallisen energian suoraan sähköksi, joten liikennekäyttö edellyttää sähkömoottoreita tai magneettisia moottoreita. Kaikki polttokennoajoneuvot ovat siten myös sähkö- tai magneettiajoneuvoja. Sähkömoottorin hyötysuhde on noin 3-kertainen otto- ja dieselmoottoreihin verrattuna.

Polttokenno otettiin liikennekäyttöön ensimmäisen kerran 20 hv:n Allis-Chalmers-traktorissa vuonna 1959 (Leffingwell 1995, Kuva 2.57). Nykyään polttokennoja kokeillaan erityisesti henkilöautoissa pieninä sarjoina, mutta varsinaiseen laajaan sarjavalmistukseen ne eivät vielä ole päässeet.



Kuva 2.57. Allis-Chalmersin polttokennotractori vuodelta 1959 (Williams 2008).

Sekä alkuperäinen että kaikki nykyiset kaupalliset polttokennot ovat vetypolttokennoja, joten muita polttoaineita, erityisesti hiilivetyä, käytettäessä vety on ensin irrotettava polttoaineesta. Kuvassa 2.58 on esitetty aukileikattu metanolikäyttöinen Mercedes Amallin Nocar 5 -polttokennoauto. Metanolitankki on lattian alla vasemmalla, vesitankki etualalla, polttoaineprosessori keskellä ja polttokenno oikealla. Polttoaineprosessori eli reformaattori irrottaa vedyn veden avulla höyryreformointiprosessilla, jolloin osa tuotetusta vedystä on peräisin metanolista ja osa vedestä.



Kuva 2.58. Daimler-Benzin Mercedes A-mallin pohjalta tekemä metanolikäyttöinen 75 kW:n Necar-5 -polttokennokoeauto vuodelta 2000 Münchenin liikennetekniikan museossa. Polttoaine- ja polttokennolaitteisto mahtuu kokonaan lattian alle säästäten tilaa polttomoottoriversioon verrattuna. [2007]

Muita polttoaineita kuten metaani, metanoli, DME, boorihydridien liuokset ja etanoli suoraan hyödyntäviä kennoja on laboratorio- tai demonstraatioasteella. Kiinteät boorihydritit, joiden energiatiheys tilavuusyksikköä on erityisen suuri, sopivat paitsi tavanomaisiin polttokennosovelluksiin, niin myös erityisen vaativiin sovelluksiin kuten AIP-sukellusveneisiin. Niitä suoraan hyödyntävät polttokennot ovat potentiaalisesti vetypolttokennoja halvempia, sillä ne eivät tarvitse jalometallikatalyyttejä. Tavanomaisen sähkökemiallisten polttokennojen lisäksi on olemassa biologisia polttokennoja, jotka pystyvät hyödyntämään monia yhdisteitä, esimerkiksi etanolia (Topcagic & Minteer 2006).

Polttokennot otettiin käyttöön saksalaisissa sukellusveneissä v. 1998 ja ne tarjoavat yhden harvoista olemassa olevista ei-ydinkäyttöisistä AIP-teknologiavaihtoehdoista (air independent propulsion) eli liike-energian tuotannosta ilman ilmakehän happea. Se mahdollistaa useiden viikkojen sukellukset, kun tavallisissa diesel/sähkömoottorisukellusveneissä sukellusaika on korkeintaan muutama päivä. Vetyä tuotetaan joka tapauksessa sukellusveneissä, sillä sitä syntyy elektrolyytisesti vedestä hapen ohella miehistön hengitysilmaa valmistettaessa.

Kaikki polttokennoajoneuvot saavat myös elektroniikan tarvitseman sähkön polttokennoista. Eräissä tapauksissa polttokennoa on käytetty pelkästään liikennevälineen elektroniikan tarvitseman sähkön tuotantoon. Näin tehtiin ensi kerran Gemini 3-avaruusaluksessa vuonna 1965 ja Apollo-alusten sähkö tuotettiin samalla tavalla (Braun 1967, Kuva 2.59). Juomavesi on olennaisen tärkeä sivutuote miehitetyillä avaruuslennoilla. Polttokennot kuuluvat myös avaruussukkulan varustukseen.



Kuva 2.59. Apollo-avaruusaluksissa 1960-1970-luvuilla käytetty polttokenno Lontoon tiedemuseossa [2007].

Suuri polttokennoteknologian antama tulevaisuuden mahdollisuus on täydellinen talokohtainen energiaomavaraisuus. Teknologia sopii hyvin pieniin kokoluokkiin ja sen avulla voidaan tuottaa talon tarvitsema sähkö, lämpö ja liikennepolttoaine taloon integroiduilla aurinkopaneeleilla (Kuva 2.60) ja muilla uusiutuvilla energiamuodoilla kuten tuulivoimalla. Ensimmäinen tällainen talo valmistui Freiburgiin Saksaan vuonna 1992.



Kuva 2.60. Honda markkinoi Frankfurtin autonäyttelyssä FCX-polttockennoautonsa yhteydessä energiaomavaraista talokonseptia, jossa vety valmistetaan taloon integroiduilla aurinkopaneeleilla. [2007]

2.15 VII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: PUUKAASU JA MUUT TERMISELLÄ KAASUTUKSELLA VALMISTETTAVAT BIOMASSAKAASUT (1800-LUKU)

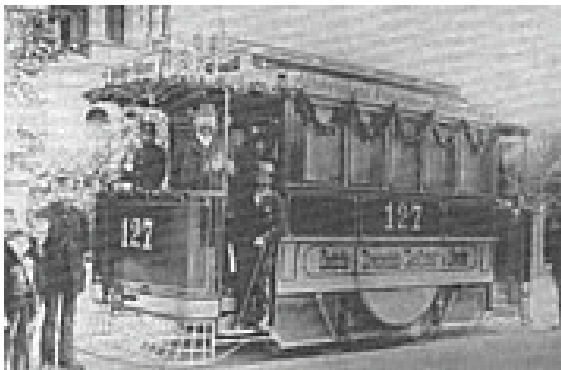
Biomassaa on osattu muuttaa kaasuksi niin kauan kuin tulta on hyödynnetty eli noin puoli miljoonaa vuotta. Polton savukaasut on yleensä joko hukattu tai käytetty lämmitykseen. Antiikin aikaiset mahdolliset kaasuturbiinit hyödynsivät puun polton savukaasuja mekaaniseen työhön. Näiden käytöstä ei ole varmuutta, mutta teknisesti se oli silloin mahdollista. Liikennesovelluksissa savukaasuja käytetään polttomoottoreiden turboahtimissa, kaasuturbiinimoottorien ja suihkumoottoreiden kompressoreita käyttävissä turbiineissa sekä suihkumoottorien jälkipolttimissa.

Pyrolyysi, jota on hyödynnetty puuhiilen ja pyrolyysiöljyjen tuottamiseen 5000 vuoden ajan, tuottaa myös pyrolyysikaasua. Pyrolyysikaasu on perinteisesti joko hukattu tai käytetty prosessin lämmitykseen tai muuhun lämmitykseen. Sitä ei ole tietävästi käytetty liikennesovelluksissa, vaikkakin se on teknisesti mahdollista puhdistettuna ja pullotettuna kuten kaupunkikaasua on käytetty. Varsinaisen termisen kaasutuksen käytöstä voidaan puhua vasta 1600-luvulta alkaen, vaikkakin varhaiset kaasutuslaitokset voitaisiin määrittellä myös pyrolyysilaitoksiksi, joiden pyrolyysikaasu hyötykäytettiin.

Puukaasua ja kivihiilikaasua tuotettiin ensimmäisen kerran 1600-luvun alussa ja ensimmäinen käyttösovellus oli valaistus vuonna 1680. Koska valaistus oli puu- ja kivihiilikaasun tärkein ja useimmissa paikoissa ainut sovellus seuraavat 100 vuotta niitä kutsuttiin myös valokaasuksi. Kun näitä kaasuja tuotetaan keskitetysti ja jaetaan kuluttajille verkon kautta, niitä kutsutaan kaupunkikaasuksi (town gas). Hajautetusti, suoraan kulutuspaikalla tuotettaessa niitä kutsutaan tuotekaasuksi (producer gas). Tuote- ja kaupunkikaasun pääkomponentit kaikilla polttoaineilla ovat hiilimonoksidi eli häkä sekä vety ja metaani. Alhaisessa kaasutuslämpötilassa, joka oli yleistä 1800-luvulla, metaania muodostuu vetyä enemmän. Korkeassa lämpötilassa, joka on nykyään yleisempää kaasutuslaitoksissa, vetyä muodostuu metaania enemmän. Kaupunkikaasusta eli keskitetysti tuotetusta ja putkia pitkin ympäri kaupunkia katuvalaistukseen siirretystä kaasusta muodostui puu- ja kivihiilikaasun pääkäyttömuoto. Kaupunkikaasuverkko oli toinen käyttöön otettu kunnallinen energianjakeluinfrastruktuuri 1800-luvun alussa. Sitä edelsi ainoastaan kaukolämpöverkko, jonka ensimmäinen käyttöönotto tapahtui jo 1300-luvulla Ranskassa. Kaupunkikaasuverkkoa seurasivat sähkö-, paineilma- sekä maakaasuverkko 1800-luvulla ja kaukokylmä-, höyry- sekä biokaasuverkko 1900-luvulla. Tällä vuosisadalla otettaneen käyttöön vetyverkkoja. Maakaasuverkkoissa kuljetetaan ulkomailla jo nykyään harvinaisena biokaasua ja vetyä, mutta myös bioenergiapohjainen kaupunkikaasu saattaa palata käyttöön niiden kautta kuljetettuna. Siihen on valmistauduttu EU:n kaasumarkkinalainsäädännössä, joka pyrkii monipuolistamaan maakaasuverkon käyttöä ja hyödyntämään sitä uusiutuvan energian siirrossa. Myös synteettisiä biopohjaisia kaasuja, erityisesti synteettistä biokaasua SBG voidaan tulevaisuudessa kuljettaa maakaasuverkossa. Öljyverkoja ei ole rakennettu kunnallisena infrastruktuurina, vaikka öljyputket ovat tunnettua tekniikkaa pitkän matkan siirrossa. Hiilidioksidin talteenotto saattaa johtaa tällä vuosisadalla hiilidioksidiverkkojen rakentamiseen, mutta silloin ei ole kyse energian jakelusta, vaan viemäriverkkoon verrattavasta jätteensiirtoverkosta.

Ensimmäiset kaupunkikaasuverkot rakennettiin Baltimoreen vuonna 1802 ja Lontoon vuonna 1812 ja sen jälkeen 1800-luvun aikana hyvin moniin kaupunkiin ympäri maailman, myös kolmeen Suomen kaupunkiin. Kaupunkikaasuverkko käynnistettiin Helsingissä vuonna 1860, Viipurissa vuonna 1861 ja Turussa vuonna 1862 (Simola 1991). Puukaasun vuosituotanto 1880-luvulla oli Helsingissä 675.000 Nm³, Viipurissa noin 350.000 Nm³ ja Turussa noin 200.000 Nm³ (Talvitie 1945b). Ne vastaavat yhdessä 22 TJ:n vuotuista energiasisältöä. Kaupunkikaasuverkon kautta siirrettävää kaasua kutsutaan kaupunkikaasuksi riippumatta siitä, mistä se on valmistettu. Lontoossa käytettiin hiilikaasua, ja se oli yleisin polttoaine, mutta myös puukaasua tuotettiin eri puolilla maailmaa, mm. Suomessa, mahdollisesti myös olkikaasua ja muita biomassapohjaisia kaasuja. Lisäksi myös biopolttonesteitä, erityisesti valaan rasva, käytettiin kaupunkikaasun tuotantoon ainakin 1800-luvun alussa, raakaöljypohjaisia tuotteita ja 1800-luvun lopusta alkaen ja 1900-luvulla myös maakaasua. Kaupunkikaasun sovellukset laajenivat 1800-luvulla valaistuksesta ruoanlaittoon, lämmitykseen ja mekaanisen energian tuottamiseen polttomoottorien avulla. Nicolaus Otton ensimmäinen kaupallinen moottori vuonna 1867 oli kaupunkikaasukäyttöinen (vaikkakin hänen ensimmäinen moottorinsa vuonna 1862 toimi etanolilla). Kaupunkikaasun käyttö oli suurimmillaan 1900-luvun alkupuoliskolla, kunnes valaistus pääsovelluksena loppui sähkövalon yleistymisen takia. Nykyisin kaupunkikaasuverkkojen käyttö kaupunkikaasun kuljetuksessa on harvinaista, mutta monissa paikoissa sen tilalla on maakaasuverkosto. Valokaasua tuotettiin myös paikallisiin tarpeisiin ilman kuljetusta kaupunkikaasuverkossa. Tästä ovat esimerkkinä Valtion rautateiden Pasilan ja Seinäjoen varikot (Talvitie 1945b).

Kaupunkikaasu otettiin liikennekäyttöön vuonna 1812 nostekaasuna kaasupallossa ja polttoaineena 1860-luvun alussa. Étienne Lenoir kokeili kaupunkikaasua autossaan vuonna 1862 (Kuva 2.73) ja vakuutti Jules Vernen (1863) kirjoittamaan 1960-luvun Pariisin kuvauksessaan autojen voimanlähteiksi juuri kaupunkikaasukäyttöisen lenoirmoottorin. Paul Haenlein käytti vuonna 1872 rakentamassaan ilmalaivassa kaupunkikaasua sekä nostekaasuna että lenoirmoottorin polttoaineena. Edouard Delamare-Deboutteville ja Leon Malandin tekivät Ranskassa vuonna 1883 autollaan vastaavia kokeiluja kuin aikanaan Lenoir. Kaupunkikaasun kaupallinen liikennekäyttö alkoi raitiovaunuissa saksalaisen Lührig-yhtiön tekniikalla vuonna 1893 käyttäen 8-10 barin varastointipainetta, 7-15 hv ottomoottoria ja suurta vauhtipyörää, joilla päästiin yhdellä 70 s kestäväällä tankkauksella noin 20 km (Klapper 1961, Dresden 2007). Niitä käytettiin usean valmistajan kaasumoottorien avulla ainakin Saksassa, Sveitsissä, Australiassa ja Englannissa ja viimeinen linja lopetettiin vuonna 1920 Neathissä Englannissa (Kuva 2.61).



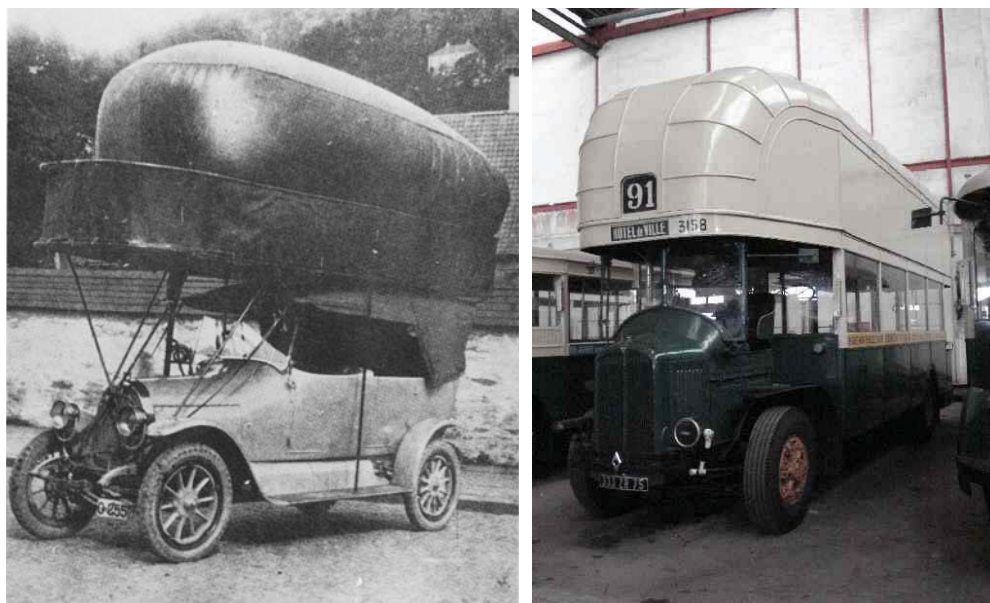
Kuva 2.61. Paineistettua kaupunkikaasua käyttävä raitiovaunu varustettuna Deutzin ottomoottorilla a) vuonna 1894 Dresdenissä Saksassa (Dresden 2007) ja b) vuonna 1901 Lythamissa Englannissa (Prentice 2007).

Kompressiotekniikan kehittymättömyyden eli alhaisen paineistuksen takia tämä ratkaisu ei silloin ollut useimmissa liikennesovelluksissa käytännöllinen nestemäisiin polttoaineisiin verrattuna johtuen suuresta polttoainevaraston tilavaatimuksesta. Raitiovaunut olivat poikkeus, sillä niillä tankkaus oli mahdollista ilman käytännön haittoja päätepuskeilla eli muutaman kilometrin välein, jolloin kaasuvälikon ei tarvinnut olla suuri. Toisen maailmansodan aikana kompressoitua kaupunkikaasua kuitenkin käytettiin myös autoissa ainakin Ranskassa (Kuva 2.62).



Kuva 2.62. Kompressoitua kaupunkikaasua käyttävän vuosimallin 1941 Citroen-henkilöauton pienoismalli. Katolle asennettava kolmen painepullon muodostama kaasuvälikon ei vie tilaa auton sisältä. [2008]

Kaupunkikaasua käytettiin jopa ilman kompressiota (eli alhaisella ylipaineella) autoissa 1. maailmansodan aikana, jolloin kaasuvälikamari oli katolla tai perävaunussa kuljetettava joustava pussi (Wise & Cole 2000). Varastot olivat ilmalaivojen näköisiä ja saattoivat olla varsinaista ajoneuvoa suurempia, joten ne olivat hyvin kömpelöitä ja käyttökelpoisia vain kriisiolosuhteissa (Kuva 2.63a). Niitä käytettiin uudelleen 2. maailmansodan aikana ainakin Pariisin busseissa, jolloin suuri kiinteä kaasutila rakennettiin bussin katolle (Kuva 2.63b).

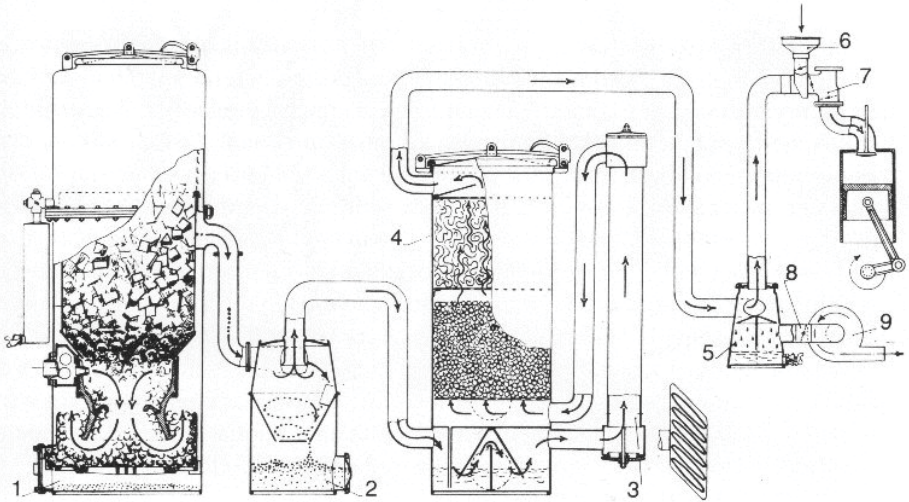


Kuva 2.63. Kompressoimatonta kaupunkikaasua käyttäviä autoja: a) Scania-Vabis-henkilöauto Norjassa 1. maailmansodan aikana (Svallner 1981). b) Pariisilainen 2. maailmansodan aikainen Renault-bussi Pariisin liikennetekniikan museossa. [2007]

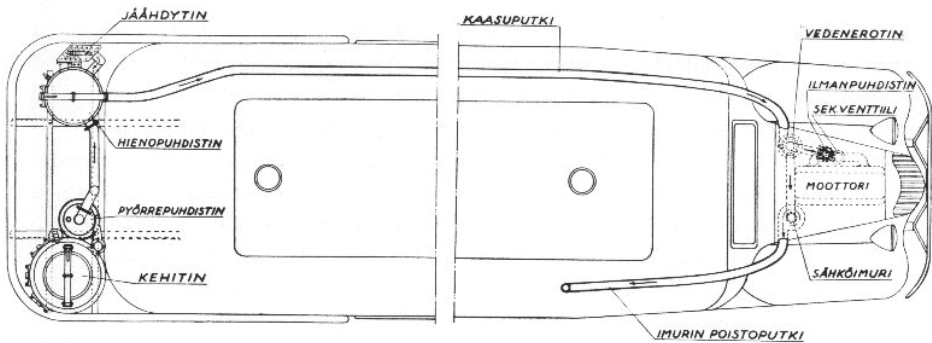
Nykyään kompressioteknologia mahdollistaa satojen baarien paineen ja siten tilantarpeen pudottamisen jopa sadasosaan 1800-luvun kompressiotekniikkaan verrattuna, mutta tietävästi kompressoitua kaupunkikaasua ei käytetä kaasuvälikamariin varustetuissa kaasujoneuvoissa. Kaasujoneuvojen polttoaineena ovat nykyään yleisimmin metaani ja nestekaasu, mutta harvinaisempina myös eräät muut kaasut, kuten vety ja DME, jotka kaikki voidaan varastoida energiatiheämmin kuin kaupunkikaasu.

Puu- ja puuhiilikaasu voidaan myös valmistaa itse ajoneuvossa häikäpöntön avulla. Varhaisiin häikäpönttöautokokeiluihin kuuluivat englantilaiset Parkerin 2,5 hv:n ja 25 hv:n autot vuosina 1901–1903 (Cash & Cash 1942), mutta on luultavaa, että ensimmäiset kokeilut tehtiin jo 1800-luvulla, koska sekä kaasutus- että autotekniikalla oli 1800-luvun lopussa jo pitkät perinteet. Sainio (2007) sijoittaa ensimmäiset kokeilut 1800-luvun lopun Englantiin. Suomessa puukaasu otettiin käyttöön vuonna 1924 Puolustusvoimien koeohjelmassa, joka jatkui vuoteen 1937 erimerkkisillä kuorma-autoilla (Mäkipirtti 2006). Linja-autoliikenteeseen puukaasu otettiin Suomessa vuonna 1929 Vaasan ja Porin välisellä linjalla (Viitaniemi 1978, Kuva 2.64). Esimerkiksi Itävallassa ja Suomessa

puuta ja puuhiiltä käytettiin häkäpönttöjen avulla 1930-luvun alussa hyvin monenlaisissa liikennevälineissä – autoissa, kuorma-autoissa, traktoreissa, vetureissa, veneissä sekä monenlaisissa liikkuvissa työkonneissa ja myös stationäärisissä sovelluksissa maataloilla ja sahoilla (Schuster 1934, Kyrklund 1934). Takaisinmaksuaika säästetyn bensiinin takia oli tieajoneuvoilla 1930-luvun alussa Itävallassa 25.000 km eli noin 1 vuosi (Schuster 1934). Häkäpöntön yhteydessä on yleensä käytetty ottomoottoria, mutta myös muut kipinäsytytteiset sekä myös hehkukupu- ja dieselmoottori ovat mahdollisia. Tässä käytössä olevaa polttomoottoria kutsuttiin aiemmin imukaasumoottoriksi (Airas 1919).

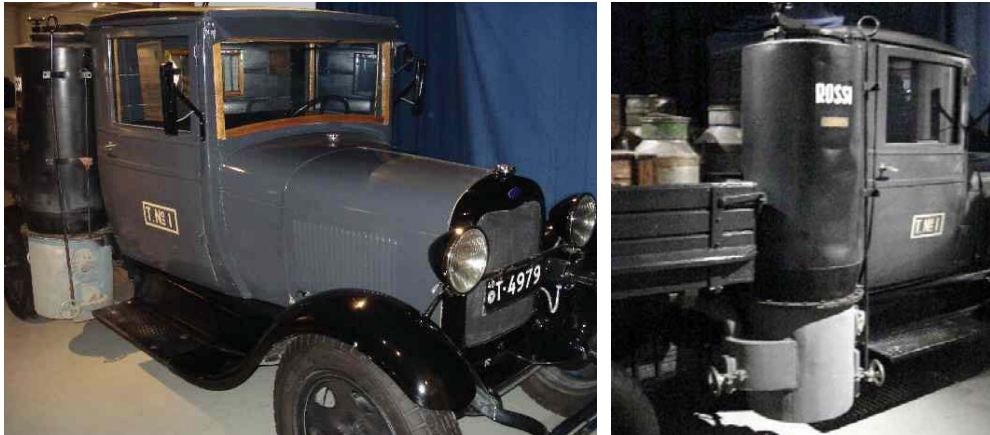


Kaasun kulku sylinteriin. Kehittimessä (1) syntynyt kaasu johdettiin pyörrepuhdistimeen (2), jonka jälkeen kaasu jäähdytettiin jäähdyttimessä (3). Jäähdytetty kaasu kulki hienopuhdistimen (4) ja vedenerottimen (5) läpi sylinteriin, jonka palamisilma otettiin ilmanpuhdistimien (6) kautta. Sekoitusventtiiliin (7) jälkeen polttoaineseos oli käyttövalmis. Käynnistyksessä käytettiin apuna sähkömuria (9), jonka imutehoa säädettiin sulkuläpällä (8).



Kuva 2.64. Puukaasuttimen toimintaperiaate ja laitteiston eräs sijoitusvaihtoehto linja-autoon. (Viitaniemi 1978)

Vuosina 1940–1946 pilke- ja puuhiilikaasuttimia oli yhteensä 33.000 linja- ja kuorma-autossa (Kuva 2.65), lähes 9000 henkilöautossa ja noin 4000 traktorissa (Haapaniemi 1983). Koko autokanta ennen sotaa oli 52.000 (Viitaniemi 1978) eli lähes koko autokanta oli puu- tai puuhiilikäyttöinen. Vuosina 1939–1945 Suomessa valmistettiin 29.000 pilkekaasutinta ja 17.000 puuhiilikaasutinta (Viitaniemi 1978), jotka edustivat yli 80 eri merkkiä (Köhler 2007). Tärkeimmät olivat ranskalais-saksalaisen Georges Imbertin alun perin vuonna 1924 kehittämä Imbert-pilkekaasutin ja ruotsalaisen Axel Svedlundin vuonna 1920 kehittämä Svedlund-puhiilikaasutin ja niiden kopiot.



Kuva 2.65. Puuhiilikaasukäyttöinen vuosimallin 1929 Ford AA -kuorma-auto Mobilian näyttelyssä. [2007]

Vuosina 1940–1944 Suomen puukaasuautoissa käytettiin pilkkeitä 1,7 miljoonaa i-m^3 eli energiasisällöltään noin 6 PJ ja puuhiiltä 2 miljoonaa i-m^3 eli noin 10 PJ (Taulukko 2.2). Puuhiiliä valmistettiin noin 600 hiiltämössä (Haapaniemi 1983). Puukaasuttimien polttoaineiden tarvitsemat hakkuut vuosina 1939–1946 olivat yhteensä 8–10 k-m^3 , ja tarve oli korkeintaan 5 %:a hakkuiden vuotuisesta kokonaismäärästä (Köhler 2007). Puukaasuajan 8 vuoden yhteenlaskettu puun tarve vastaa 10–15 %:a Suomen nykyisistä vuotuisista hakkuista, joten Suomen metsäresurssiin nähden kyse ei ollut merkittävästä käytöstä, vaikka se tyydytti lähes koko siviiliautoliikenteen tarpeen ja noin 40 % armeijan autoliikennetarpeesta. Vuotuinen puukaasuttimien tuottama liikenne-energia vastasi enimmillään noin 3 %:a Suomen nykyisestä tieliikenteen energiantarpeesta, joten laskennallisesti Suomen nykyisen tieliikenteen energiantarve voitaisiin tyydyttää puukaasutekniikalla, mikäli noin 2/3 nykyisen suuruisista hakkuista käytettäisiin siihen tarkoitukseen.

Armeijan sodan aikana käyttämien poltto- ja voiteluaineiden määrät ovat taulukossa 2.3. Sodanaikaisista 77 autokomppaniasta 44 käytti pelkästään puukaasuautoja (Mäkipirtti 2006). Linja-autoissa pilkkeen kulutus oli 2,5–3,5 hl/100 km (Köhler 2007), joka vastaa 19–29 bensiinilitran energiasisältöä/100 km eli primääristä puuenergiaa kului kilometriä kohti saman verran kuin bensiiniä käytettäessä bensiinin sekundäärienergiaa. Henkilöauton kulutus kilometriä kohti oli silloin kuten nytkin noin kolmasosa linja-auton kulutuksesta. Puukaasuttimien konversiöhöyötysuhde oli siis korkea ja moottorin höyötysuhde puukaasulla oli korkeampi kuin bensiinillä.

Taulukko 2.3. Armeijan ajoneuvojen poltto- ja voiteluaineiden kulutus jatkosodan aikana 1941–1944 Länsmanin (1969) pohjalta.

	Määrä	Energiasisältö	Osuus
Puuhiili	4 400 000 hl	2,2 PJ	22 %
Piike	4 400 000 hl	1,6 PJ	16 %
Etanolibensiini	119 000 t		
Bensiini (79 p-%)	94 000 t	4,0 PJ	40 %
Etanoli (21 p-%)	25 000 t	0,7 PJ	7 %
Petroli	7 000 t	0,3 PJ	3 %
Kaasuöljy (diesel)	18 000 t	0,7 PJ	7 %
Voiteluaineet	11 000 t	0,4 PJ	4 %
YHTEENSÄ		9,9 PJ	

Koko Euroopassa puukaasukäyttöisiä ajoneuvoja oli 1940-luvulla noin miljoona. Johdavia maita olivat Saksa, jossa autoja oli puoli miljoonaa, Ruotsi ja Ranska. Ruotsissa käytettiin ajoneuvoon rakennettujen kaasuttimien lisäksi perävaunukaasuttimia sekä autoissa että busseissa (Haventon 2005, Kuva 2.66). Vuonna 1942 Tukholmassa 23 bussia käytti biokaasua, 179 puukaasua ja 3 puuhiilikaasua ja lisäksi 17 huoltoajoneuvoa oli biokaasukäyttöisiä (ASS 1942).



Kuva 2.66. Tukholmassa kaasukäyttöiset bussit vetivät 1940-luvulla perävaunua, joka sisälsi (vasemmalta oikealle) puuhiilikaasuttimen, pilkekaasuttimen tai jätevedenpuhdistamossa valmistettua paineistettua biokaasua (a). Kaasun loputtua vaihdettiin perävaunua varikolla (b). Perävaunut ovat näytteillä Tukholman raitiovaunumuseossa. [2007]

Puukaasuttimia käytettiin myös traktoreissa (Kuva 2.67). Suomen ensimmäiset puukaasutraktorikokeet tehtiin vuonna 1940, mutta Ruotsissa kyseisestä teknologiasta oli silloin jo varhaisempaa kokemusta (Puolakka 1940). Puukaasu soveltuu traktoreihin autoja paremmin, koska traktorin kuormitus ei vaihtelee niin paljon kuin autojen (Reinikainen 1954). Suomessa oli talvisodan syttyessä noin 6000 traktoria ja niistä 2/3 varustettiin puukaasuttimella, joita oli käytössä kymmenkunta eri merkkiä (Kotta 2007b). Traktoreista 3921 käytti puukaasua ja 241 puuhiilikaasua (Ojanen 1997b). Ruotsissa 42 % traktoreista konvertoitiin sodan aikana puukaasulle (Niskanen 1999).



Kuva 2.67. AKMO-puukaasuttimella varustettu käyttökuntoinen Fordson-F-traktori Eurajoen maatalousmuseossa. [2007]

Suurin osa moottoripyöristä oli bensiinin puutteen vuoksi sodan aikana käyttämättä, mutta armeijan moottoripyörissä käytettiin bentyyliä (etanolibensiiniä). Siviilipyörissä puukaasua käytettiin harvinaisena (Kuva 2.68a), sillä kaasuttimen paino oli suhteessa hyvin suuri ja siten suorituskyky jäi alhaiseksi. Puhdasta etanolia ilmeisesti ei käytetty, vaikka valmistuksen ja moottorikäytön teknologia oli jo pitkään tunnettua ja resurssit olivat yleisesti saatavilla. Moottoripyörien lisäksi puukaasun harvinaisempia sovelluksia olivat veturit (Kuva 2.68b) ja veneet. Puukaasukäyttöisiä moottoriveneitä oli runsaat 600 kpl ja muihin ajoneuvoihin kuin autoihin, traktoreihin ja veneisiin asennettuja puukaasuttimia oli yhteensä runsaat 500 kpl (Köhler 2007). Lisäksi puukaasuttimia oli käytössä maamoottoreissa ja sähköagregateissa.



Kuva 2.68. Harvinaisempia puukaasujoneuvoja: a) Puukaasuttimella varustettu vuosimallin 1936 AJS-moottoripyörä Mobilian näyttelyssä. [2006] b) Carl Johan Bäckbacka ja hänen kunnostamansa vuonna 1942 valmistunut Volvon ottomoottorilla ja AKMO-puukaasuttimella varustettu teollisuusveturi. [Bengt Juselius 2007]

Puukaasulle konvertoitaessa moottorin tehosta menetettiin noin 25 %, mutta osa oli saatavissa puukaasun korkean puristuskestävyyden mahdollistamana takaisin puristussuhdetta nostamalla (Aarnio 1987). Saksassa tehdasvalmistetuissa puukaasuautoissa saavutettiin 1930-luvulla puukaasua varten valmistetun moottorin avulla sama suorituskyky kuin vastaavalla bensiinikäyttöisellä autolla (Boijer 1935), koska puristussuhde voidaan puukaasulla nostaa tasolle 12–13 (Mäkipirtti 2006). Myöskin kompressorilla, jota Sysi-kaasuttimen yhteydessä käytettiin, voitiin puukaasun korkeaa puristuskestävyyttä hyödyntää siten, että tehohäviöt ovat pienet kierrosluvun noustessa puoleen maksimikierrosluvusta (Mäkipirtti 2006). Nykyään se on toteutettavissa turboahtimilla.

Puukaasua ja biokaasua käytettäessä moottorien sylinterien kuluminen on yleensä huomattavasti vähäisempää kuin nestemäistä polttoainetta käytettäessä, koska polttokaasu ei ohenna voiteluöljyä, kuten polttoneste pyrkii tekemään (Reinikainen 1954). Konvertoitujen puukaasuajoneuvojen olivat yleensä ottomoottorilla varustettuja bifuel-autoja, jotka pystyivät käyttämään vaihtoehtoisesti tai samanaikaisesti myös etanolibensiiniä. Tehosta menetettiin muutamasta prosentista (kompressoriteknikalla) aina 50 %:iin riippuen laitteistosta, mutta useimmilla laitteistoilla noin 25–30 %. Silloin harvinaisten dieselajoneuvojen moottoreita vaihdettiin tai konvertoitiin ottomoottoreiksi puukaasukäytön helpottamiseksi, esimerkiksi Ruotsista lahjoituksena saaduille Scania-Vabis-kuorma-autoille tehtiin niin (Mäkipirtti 2006).

Vaikka puukaasun käyttö oli yleisintä konvertoituissa ajoneuvoissa, myös monia tehdasvalmisteisia puukaasuajoneuvoja on markkinoilla ollut vuoden 1920 Panhard-Levassorin autosta lähtien (Mäkipirtti 2006). Esimerkkejä ovat 1940-luvulla Volvo- (Ojanen 1997c) ja Vaasa-traktorit (Aarnio 1987), hehkukupumoottorilla varustetut Lanzin traktorit 1940-luvulla (Schneider 2002), venäläinen GAZ-42-kuorma-auto (Mäkipirtti 2006) sekä saksalainen Volkswagen-henkilöauto (Köhler 2007, Kuva 2.69) ja 1980-luvulla Valmetin Brasilian tehtaiden tuottama 70 hv:n dualfuel-dieseltraktori (Niskanen 2000, Kuva 6.14b). Kun ajoneuvo suunnitellaan alun perin puukaasukäyttöiseksi, häikäpönttölaitteistot saadaan sijoitettua huomattavasti siistimmän näköisesti kuin konvertoituissa. Ruotsissa oli kuitenkin 1940-luvulla myös tyylikkäitä erikoiskonversioita tekeviä yhtiöitä, joiden valmistamissa autoissa tyyppillisiä pönttörakenteita ei ollut esillä, vaan ne rakennettiin tehdasvalmisteisten kaltaisiksi (Haventon 2005).



Kuva 2.69. Tehdasvalmisteinen Volkswagenin puukaasuauto 1940-luvulta. [Vehoniemen automuseo]

Dieselmootorit ovat 1950-luvulta lähtien vallanneet erityisesti traktori- ja kuorma-auto-markkinat. Puukaasun käyttö dieselmootoreissa edellyttää dualfuel-tekniikan käyttöä eli sytytys on tehtävä nestemäisellä polttoaineella. Dieselajoneuvojen konversio on hieman vaikeampi kuin ottoajoneuvojen, mutta kyseinen teknologia oli käytössä jo 1940-luvulla varsinkin Saksassa, mutta Saksasta saaduilla MAN-kuorma-autoilla myös Suomessa (Mäkipirtti 2006). Suomessa dieselmootorien konversiota puukaasulle tutkittiin vuosina 1960-1963 Teknillisessä korkeakoulussa (Mäkipirtti 2006) ja Vakola teki 1970-luvun lopussa ja 1980-luvun alussa onnistuneita kokeita dieseltraktorien puukaasukonversioista (Parmala 1980a-b, Reinikainen ym. 1987, Kuva 2.70). Näiden kokeiden ja Brasilian maanviljelijöiden kysynnän seurauksena syntyi Valmetin Brasilian tehtaiden dualfuel-puukaasutraktori (Kuva 6.14b).



Kuva 2.70 Valmetin dualfuel-puukaasukonvertoitu dieseltraktori Vakolan testeissä vuonna 1979. [© Vakolan arkisto]

Vuonna 1959 Puolustusvoimien autopataljoonaan tullut Volvo L-38505 oli viimeinen auto, joka uutena varustettiin puukaasuttimella varusmieskoulutusta varten. Se muunnettiin vuonna 1963 spriikäyttöiseksi. (Mäkipirtti 2006)

Suomessa puukaasuttimien kehitystoiminta oli ennen sotaa vähäistä johtuen luottamuksesta raakaöljypohjaisten polttoaineiden jatkuvaan saatavuuteen, joten teknologia siirrettiin Suomeen pääasiassa Ruotsista ja Saksasta vasta sodan alettua. Sodanaikaisen kiireisen kehitys- ja valmistustyön aikana Suomessa tuotettu teknologia sisälsi runsaasti vikoja, jotka johtivat lyhyisiin huoltoväleihin, lyhyeen käyttöaikaan, mekaanisiin häiriöihin sekä teknisiin ja terveydellisiin onnettomuuksiin (Köhler 2007). Suuresta osasta sodan aikana syntyneistä ongelmista olisi välttytty, mikäli valtio olisi ennen sotaa suhtautunut myönteisesti puukaasuteknologian kehittämiseen ja käyttöönottoon, kuten puolustusministeriö oli ehdottanut. Puukaasun sodanaikaisesta käytöstä muodostui Köhlerille (2007) ja monille muille negatiivinen kuva, koska teknologian kehitysaste jäi alhaiseksi ja korkeatasoista teknologiaa ei saatu laajaan käyttöön. Valtio suhtautui puolustusministeriön vaatimuksista huolimatta puukaasun lisäksi niivasti maailmansotien välisenä aikana muidenkin kotimaisten liikennebiopolttoaineiden kehitykseen ja käyttöönottoon. Vuonna

1938 jopa säädettiin bensiiniä suosiva moottoriajoneuvoverolaki (410/1938), joka asetti biopolttoaineita käyttäville autoille korkean lisäveron (Lampinen 2008b). Vasta sodan syttyminen ja bensiinin tuonnin suuri vaikeutuminen pakotti valtiovallan toimenpiteisiin kotimaisten polttoaineiden käytön edistämiseksi. Nimimerkki Pentti toteaa asiasta MTK:n Maa-lehdessä elokuussa 1940 nykyiseenkin tilanteeseen soveltuvalla viisaudella (Pentti 1940):

” ... Shellin ja Esson punaisista metallitötteröistä oli niin mukava matkan varrella ottaa auton bensiinitankki täyteen. ... Kaikei juuri tuo mukava polttoaineen saanti vaikutti sen, ettei vaivattu aivoja sillä, millä tulemme toimeen polttoaineen puolesta, jos ja kun kulkutiet tukkeutuvat. ... Ja kuitenkin meidän olisi pitänyt hyvänä aikana kiinnittää täysi huomio puuspruihin, puu- ja hiilikaasuttimiin, ehkäpä turvebensiiiniinkin, joka tapauksessa sellaisiin aineisiin, joiden avulla moottorit käyvät, ovat ne sitten autoissa tai traktoreissa. Jos esim. kaasutinkysymys olisi muutamia vuosia takaperin pantu perusteellisen kokeilun ja tutkimuksen alaiseksi ja jos tulosta olisi ryhdytty määrätietoisesti sarjavalmisteenä tekemään, olisi maantiekuljetuksessa ja traktorikynnössä tilanne kokonaan toisenlainen kuin nykyään. ... Kaikkea sellaista, jota voimme täällä valmistaa, täytyy meidän kotona tuottaa, voidaksemme saada ulkoa tavaraa, jota emme itse kykene valmistamaan. Kun meillä on polttoaineen raaka-ainetta, olisi varmasti kansantaloudellisesti edullista saada ainakin traktorit ja kuorma-autot kulkemaan tämän raaka-aineen voimalla, vaikka se ei ehkä käyttäjälle olekaan niin mukavaa kuin bensiinin ja petrolin käyttäminen. ... ”

Valtion elimien vastustusta esiintyi silti vielä sodan ajanakin. Valtion maataloudellinen konekoetuslaitos (vuodesta 1952 Vakola eli valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos) suhtautui vielä vuonna 1940 kielteisesti puukaasutinkokeilujen aloittamiseen traktoreilla (Puolakka 1940). Kun vuoden 1946 alussa saatiin ensimmäiset bensiinitoimitukset ulkomailta Valtion polttoainetoimisto (Vapo) muutti ensimmäisenä autonsa puukäyttöisistä bensiinille heti tammikuussa (Köhler 2007).

Monissa maissa – ei kuitenkaan Suomessa, jonka energiaomavaraisuus on vain 30 % – kriisiaikojen energiaturvallisuuteen kiinnitetään huomiota ja ylläpidetään tietotaitoa puukaasun ja muiden kotimaisten energiamuotojen moottorikäyttökäytännöistä. Kuten Simo-Pekka Parmala kertoo Vakolan tutkimusraportissaan (Parmala 1980b), Statens Maskinprovningar (SMP) oli Ruotsin hallituksen organisaatio, joka yhteistyössä puolustusministeriön ja autoteollisuuden kanssa ylläpiti 1950-luvulta lähtien puukaasuteknologian tietotaitoa kriisitilanteiden varalta ja mm. tuotti ilmaiseksi jaettavia rakennusohjeita neljästä erikokoisesta standardikaasuttimesta, joita kuka tahansa saa ilman lisenssimaksuja rakentaa ja käyttää. SMP lakkautettiin vuonna 1996 ja sen toiminnat ovat nykyään Sveriges Tekniska Forskningsinstitutin tytäryhtiössä SMP Svensk Maskinprovningar Ab:ssa. Vakola oli aloittanut puukaasututkimuksen vasta 1970-luvun lopulla, joten keskusteluja käytiin yhteistyön luomisesta SMP:n kanssa (Parmala 1980b). Se ei kuitenkaan toteutunut ja Vakola lopetti sekä puukaasun (Parmala 1980a, Keränen ym. 1984) että muiden kotimaisten moottoripolttoaineiden (Parmala 1980b, Schäfer ym. 1986) tutkimuksen 1980-luvulla.

USA:ssa energiaturvallisuus otetaan äärimmäisen vakavasti siitä huolimatta, että maalla on omia raakaöljyvaroja. Puolustusministeriön ja armeijan toiminnasta merkittävä osa on varattu tuontiöljyn saatavuuden varmistamiseen ja sen lisäksi USA:ssa on kriisivalmiuden ylläpitoon ja kriisien hoitoon omistettu turvallisuusministeriön alainen laitos FEMA

(Federal Emergency Management Agency), joka ylläpitää kotimaisten energiamuotojen käyttötekniikan tietotaitoa erityisesti siviilikäyttöä varten sen varalta, että ulkomaisten polttoaineiden maahantuonti vaikeutuu tai estyy. FEMA on yhdessä energiaministeriön hallinnoiman Oak Ridgen kansallisen laboratorion kanssa kehittänyt traktoreihin ja autoihin sopivan kriisiajan materiaaleista rakennettavissa olevan puukaasuttimen ja tuottanut vuonna 1989 sen rakennusohjeen (LaFontaine & Zimmerman 1989) ilmaiseen yleiseen jakeluun. Myös USA:n puolustusministeriö kehittää ja armeija käyttää aktiivisesti liikenteen biopolttoaineita, jopa siinä määrin, että puolustusministeriön edustajat käyvät kertomassa toiminnastaan esimerkkinä muille maille YK:n ilmastoneuvotteluissa, esimerkiksi Haagin ilmastokonferenssissa vuonna 2000 (DOD 2000). Puolustusministeriössä on osasto ympäristönsuojelullisia turvallisuussuhkia kuten ilmastonmuutos varten. Puolustusministeriö käyttää 10.000 ajoneuvossa vaihtoehtoisia polttoaineita biodieseliä, etanolia, metanolia, vetyä ja maakaasua sekä sähkö-, polttokenno- ja vauhtipyörä- ja hybriditeknologioita – ja lisäksi tuottaa armeijan tukikohdissa sähköä ja lämpöä aurinko- ja tuulienergialla (DOD 2000). USA:n nykyinen siviilikäytössä oleva biodieselstandardi on alun perin armeijan kehittämä omia ajoneuvojaan varten. Kaikki nämä toimintamuodot puuttuvat Suomen Puolustusministeriöstä ja Puolustusvoimista. Energiaturvallisuus ei ole mukana Maanpuolustuskorkeakoulun analyysissä Suomen turvallisuusympäristön kannalta oleellisista tekijöistä (Maanpuolustuskorkeakoulu 2001), vaan 6 kuukauden fossiilisten polttoaineiden varmuusvarastointia pidetään riittävänä toimenpiteenä takamaan energiaturvallisuuden mahdollisten tulevaisuuden kriisien olosuhteissa.

Nykyään puukaasuajoneuvotekniikan tietotaitoa ylläpidetään Suomessa noin 20:ssa alan harrastajien ajoneuvoissa, jotka vaihtelevat kooltaan skootterista kuorma-autoihin. Sotaaikaisten puukaasuautojen ylläpidon työmääriä on suuresti saatu uudemmalla teknologialla vähennettyä.

2.15.1 Kaasuturbiini

Ensimmäinen mahdollinen kaasuturbiinin käyttö oli antiikin aikana temppeleissä puiden savukaasuilla nykyisten joulukoristeena käytettyjen enkelikellojen tapaan, ehkä jo 4000 vuotta sitten. Tieto kyseisestä teknologiasta hävisi ja kesti aina vuoteen 1791 ennen kuin kaasuturbiini seuraavan kerran rakennettiin. John Barber valmisti tällöin kaasuturbiinin ja käytti sitä puu- ja hiilikaasulla (Airas 1935). Kaasuturbiinin hyötysuhde on tavallisista materiaaleista rakennettuna ottomoottorien tasolla, 25–35 % (Kolin 1972, Smil 1991), mutta niiden teho-painosuhte on moninkertainen. Liikennekäyttöön tarkoitetuissa prototyyppikaasuturbiineissa on keraamisten materiaalien avulla voitu nostaa polttolämpötila tavanomaisten turbiinien korkeintaan 1000 °C:sta yli 1350 °C:een, jolloin hyötysuhde on voitu nostaa 45 %:iin korkeilla käyttöasteilla (Suzuki 1997).

Kaasuturbiinin ensimmäinen liikennesovellus oli vuonna 1905 keksitty turboahdin, jota on sovellettu paljon sekä vesi-, lento- että maaliikenteeseen, mutta luonnollisestikin se on aina vain apuvoimanlähde. Se on joka tapauksessa nykyään kaasuturbiinin ylivoimaisesti merkittävin tieliikennesovellus. Volvo otti sen ensimmäisenä kuorma-autokäyttöön vuonna 1953 (Piltz & Levä 1996).

Potkuriturbiinimoottori (turboprop), joka keksittiin 1920-luvulla, on kaasuturbiinin ensimmäinen lentoliikennesovellus pääenergianlähteenä. Se otettiin käyttöön lentokoneissa 1940-luvulla ja myöhemmin helikoptereissa, ilmalaivoissa, ilmatyyny-laivoissa ja

kilpa-autoissa. Se on nykyään merkittävä kaupallisessa käytössä oleva lentokonemoottoriteknologia. Normaalisti potkuri tuottaa liike-energiasta 75–95 % ja loppu tulee suihkun työntövoimasta (Koivisto 2003). Kaasuturbiineita on käytetty helikoptereissa 1960-luvulta lähtien.

Suihkumoottoreista suurin osa on kaasuturbiinipohjaisia ja ne hallitsevat lentoliikennettä nykyään. Suihkumoottorikäytössä olevien kaasuturbiinien teho-painosuhteesta saa käsityksen vertaamalla raskaita rekkoja ja hävittäjälentokoneita, jotka ovat saman painoisia, mutta hävittäjien moottoriteho on 100-kertainen eli suuruusluokkaa kymmeniä megawatteja. Vastaavasti niiden polttoainekulutus huipputehoilla on enemmän kuin 100-kertainen johtuen kaasuturbiinien heikommasta hyötysuhteesta dieselmoottoreihin verrattuna.

Kaasuturbiini soveltuu myös maaliikenteeseen. Se otettiin käyttöön veturissa vuonna 1939 Sveitsissä ja oli sen jälkeen kaupallisessa liikenteessä ainakin neljässä muussa maassa, joista USA:ssa sen merkitys oli suurin. Ranskan TGV-suurnopeusjunat käyttivät kaasuturbiineja 1970-luvun alussa, mutta öljykriisin seurauksena siirryttiin sähkөөn. Kaasuturbiinin ensimmäinen autokäyttö oli Roverin JET1:ssä ja Kenworthin kuorma-autossa (Piltz & Levä 1996) vuonna 1950. Eniten valmistettu kaasuturbiiniauto oli Chrysler Turbine 1950–60-luvuilla. Ensimmäinen traktorikäyttö puolestaan oli vuonna 1959 (Leffingwell 1995). Kaasuturbiinin polttoainejoustavuus merkitsi, että niillä varustetuissa autoissa voitiin ilman muutoksia käyttää lukuisia polttoaineita, mm. kasviöljyjä. Ne eivät kuitenkaan koskaan ole päässeet sarjatuotantoon.

Sekä juna- että rekkaliikenteessä kaasuturbiinin huono hyötysuhde ilman hybriditeknikkaa estää kilpailukyvyn dieselmoottorien kanssa. Kaasuturbiini otettiin hybridikäyttöön sähkömoottorin kanssa vuonna 1998 (Kuva 2.71), mutta siitäkään sovelluksesta ei tullut sarjatuotantomallia.



Kuva 2.71. Biokaasukäyttöisen kaasuturbiini/sähköhybridin GM:n ”EV1 Series Hybrid” prototyyppi Pekingin EVS-16-sähköajoneuvokongressissa vuonna 1999. Kyseinen auto soveltuu monien polttoaineiden käyttöön, mukaan lukien biokaasu ja bensiini. [Peter Van den Bossche, Wikimedia Commons, Creative Commons Attribution ShareAlike 2.5 License]

Erityissovelluksissa kuten panssarivaunuissa kaasuturbiinin erittäin suuri teho/painosuhte mahdollistaa paremman liikkuvuuden kuin perinteinen diesel. Sitä käytetään myös erittäin suuritehoisissa MTT:n 380 hv:n moottoripyörissä, jossa pienen tilan takia suuri teho/painosuhte on merkittävä seikka. Kaasuturbiinia käytetään kaupallisesti kaasuturbiini/sähkö-hybridibusseissa, joita löytyy muutamissa maissa valmistajana ainakin uusiseelantilainen Designline. Tässä sovelluksessa pieni koko on tärkeä, koska se antaa tilaa akuille. Ja toisaalta 95 % hyötysuhteen sähkömoottoreilla ja mahdollisuudella ladata akut verkkosähköllä ja kondensaattorit jarrutusenergialla voidaan kompensoida kaasuturbiinin vaatimaton hyötysuhde dieselmoottoreihin verrattuna.

Kaasuturbiinin vesiliikennesovelluksia löytyy esimerkiksi ilmatyynyaluksissa, kantosiipi-aluksissa ja tavanomaisissakin laivoissa, joissa suuri teho/painosuhte on tärkeämpi asia kuin moottorin hyötysuhde. Suomalaisina esimerkkeinä ovat lähes 30 vuotta Itämerellä risteillyt GTS (gas turbine ship) Finnjet, Suomen laivaston 2 kaasuturbiinilla ja vesisuihkumoottoreilla varustettua korvetta ja Tuuli-ilmatyynyalus. Ilmatyynyaluksat saavuttavat parhaimmillaan 100 km/h nopeuden, kun taas muut kaasuturbiinin vesiliikennesovellukset, joissa ei käytetä suihkumoottoria, saavuttavat parhaimmillaan puolet siitä.

Kaasuturbiinit ovat polttoainejoustavia ja niitä voidaan periaatteessa käyttää kaikilla nestemäisillä ja kaasumaisilla polttoaineilla, siis myös biopolttoaineilla kuten biokaasulla (Kuva 2.71) sekä hukkakaasuilla kuten turboahtimet tekevät. Kukin kaupallinen turbiini on optimoitu jollekin tietylle polttoaineelle tai korkeintaan muutamalle polttoaineelle, mutta valmistusteknisesti polttoainevalikoimaa on helppo laajentaa. Liikennekäytössä suosikkipolttoaineita ovat nykyään kerosiini ja dieselöljy, mutta ilmastonsuojelunäkökohdat tulevat vaikuttamaan tälläkin teknologiasektorilla. Mahdollista on joko sellaisten biopolttoaineiden käyttö, jotka sopivat hyvin fossiilisia polttoaineita varten valmistettuihin turbiineihin tai turbiinien optimoiminen uudenlaisia biopolttoaineita varten.

Eräs erikoinen tyyppi kaasuturbiinista on Hellmuth Walterin vuonna 1925 patentoima waltermoottoriksi tai walterturbiiniksi kutsuttu AIP-moottori (Air Independent Propulsion). Kyse on kaasuturbiinijärjestelmästä, jossa ei tarvita palamista eikä siten myöskään ilmaa. Se on hyödyllinen ominaisuus sukellusveneissä. Tämä on mahdollista erällä happirikkailla yhdisteillä kuten Walterin käyttämä vetyperoksidi, joka voidaan hajottaa katalyyttisesti tuottaen korkeapaineista vesihöyryä ja happea. Niillä pyritetään turbiinia ja sivutuotteena voidaan lauhdutuksen jälkeen saada hengityshappea ja juomavettä. Ensimmäinen AIP-sukellusvene saksalainen V80 valmistui vuonna 1940 ja se pystyi saavuttamaan veden alla 23 solmun nopeuden eli kaksinkertaisen silloisiin tavanomaisiin dieselsähkösukellusveneisiin verrattuna. Tekniset ongelmat estivät tämän sukellusvenetyypin ottamisen palvelukseen 2. maailmansodan aikana, mutta se otettiin palveluskäyttöön Englannissa sodan jälkeen.

2.15.2 Suihkumoottorit

Nykyään suihkumoottorista puhuttaessa tarkoitetaan yleisimmin kaasuturbiinipohjaista puhallinsuihkumoottoria (turbofan) tai sitä yhdessä perinteisen turbojetin kanssa. Laajasti määritellen suihkumoottoreita ovat kuitenkin kaikki moottorit, joiden liikevoima saadaan vastavoimasta työntäessä jotain materiaalia aukosta ulos.

Rakettimoottori, jota on käytetty liikenteessä 900-luvulta alkaen, on ensimmäinen suihkumoottorilaji. Rakettimoottori on riippumaton ilmakehän hapesta, päinvastoin kuin lentokoneiden kaasuturbiinipohjaiset suihkumoottorit, joten se voi toimia myös vedessä ja avaruudessa. Rakettimoottorin haittapuolena on tarve kantaa hapetin mukana, josta syystä polttoainevaraston paino ja sen johdosta polttoaineen kulutus on hyvin suuri. Taulukko 2.4 esittää keskeisiä eroja kemiallisen rakettimoottorin, tavanomaisen turbojet-kaasuturbiinisuihkumoottorin ja ramjet-suihkumoottorin välillä.

Taulukko 2.4. Keskeisiä ominaisuuseroja suihkumoottorien välillä (Sutton & Biblarz 2000).

Ominaisuus	Rakettimoottori	Turbojet	Ramjet
Työntövoiman ja painon suhde, tyypillisesti	75:1	5:1	7:1
Polttoaineen kulutus [kg polttoainetta per kp työntövoimaa tunnissa]	8–14	0,5–1,5	2,3–3,5
Työntövoima [kp/m ²]	24.000–120.000	12.000	13.000
Ylin korkeus	Ei rajoitusta	14–17 km	45 km

Martin Wiberg patentoi rakettimoottorin jälkeen ensimmäisen todella käyttökelpoisen suihkumoottorityypin sysäysputkimoottorin (pulsejet) vuonna 1903. Sen merkittävin käyttö oli saksalaisissa 2. maailmansodan aikaisissa V1-risteilyohjuksissa, joita rakennettiin yli 30.000 kpl. Lisäksi sitä on käytetty koelentokoneissa ja koehelikoptereissa.



Kuva 2.72. Saksalainen synteettistä matalaoktaanista FT-bensiiniä käyttänyt pulsejet-risteilyohjus V1 Lontoon sotamuseossa. Se otettiin palveluskäyttöön vuonna 1944. [2007]

Toinen yksinkertainen suihkumoottorityyppi, jossa ei ole liikkuvia osia, on patoputkimoottori (ramjet), jonka toimintaperiaatteen Bergerac selitti jo vuonna 1655, mutta jonka teknologinen toteutus patentoitiin vasta vuonna 1908. Sitä käytettiin lisävoimanlähteenä useissa 2. maailmansodan saksalaisissa konetyypeissä (Griehl 2006) ja ainoana lentokoneen voimanlähteenä ensimmäisen kerran vuonna 1949. Se on käyttökelpoinen vasta noin 500 km/h nopeudesta ylöspäin ja parhaimmillaan yli 3 Machin nopeudessa. Sitä käytetään lähinnä ohjuksissa ja koelentokoneissa.

Patoputkimoottorin yläääniversio (scramjet), jossa kaasujen nopeus moottorin sisällä on ramjetistä poiketen yli äänen nopeuden, on eräs tulevaisuuden ylääänikoneiden moottorivaihtoehto. Ensimmäinen scramjet-lento tehtiin vuonna 1991 Venäjällä. Scramjet-käyttöisellä miehittämättömällä X-43-koneella on saavutettu lentokoneiden nykyinen nopeusennätys 9,8 Machia vuonna 2004 USA:ssa. Vertailuna kaasuturbiinisuihkukoneella suurin saavutettu nopeus on 3,3 Machia ja rakettimoottorilentokoneella 6,7 Machia. Nesteytetty vety on scramjet-moottoreihin paras polttoaine paitsi suuren energiatihetyensä, niin myös moottorin viilennysvaikutuksensa takia. Nopeuden yläraja hiilivetypolttoaineilla on 5 Machia, mutta vedyn avulla on mahdollista päästä 16 Machiin (Sutton & Biblarz 2000). Jo 3 Machista alkaen kryogeeniset polttoaineet, erityisesti nesteytetty metaani ja vety, ovat nestemäisiä hiilivetypolttoaineita parempia ja 8 Machista ylöspäin nesteytetty vety on ainut vaihtoehto (Taylor 1988). Bussard (1960) on esittänyt idean ulkoavaruudessa käytettäväksi ramjet-moottoriksi, jolloin hyväksikäytettäisiin avaruuden vetyä.

Ensimmäinen suihkumoottorin henkilöliikennekäyttö oli Henri Coandan suihkukone vuonna 1910. Siinä käytettiin motorjet-moottoria eli mäntämoottoria, joka potkurin sijaan pyörittää kompressoria. Polttoaine sytytetään korkeapaineisessa ilmassa ja se tuottaa työntövoiman samaan tapaan kuin kaasuturbiinipohjaiset suihkumoottorit. Tällaisia moottoreita oli hävittäjäkonekäytössä toisessa maailmansodassa italialaisilla.

Potkuriturbiinimoottorit, joiden käyttö alkoi 1940-luvun lopulla, ovat osaksi suihkumoottoreita, vaikkakin suurin osa niiden tuottamasta energiasta saadaan potkurien avulla. Ne ovat nykyään yleisessä käytössä kaupallisessa henkilöliikenteessä, myös Suomessa.

Suora kaasuturbiinipohjainen suihkumoottori (turbojet), jossa kaasuturbiini pyörittää samalla akselilla olevaa kompressoria., on Frank Whittlen keksintö vuodelta 1929. Se otettiin lentokonekäyttöön vuonna 1939 Saksassa. Se on edelleen yksinkertaisuutensa ja suuren teho/painosuhteensa takia käytössä joissakin sotakoneissa, mutta harvinainen siviili-ilmailussa (Smil 1991, IPCC1999). Aiemmin sitä käytettiin myös siviili-ilmailussa, kilpa-autoissa ja -veneissä.

Suora suihkumoottori kehittyi 1950-luvun aikana puhallinmoottoriksi (turbofan), jossa vain osa moottoriin tulevasta ilmasta ohjautuu kaasuturbiiniin ja loppu menee sen ohitse tuottaen osan työntövoimasta, esimerkiksi Airbus 380 -koneessa ohi virtaa 9-kertainen ilmamäärä verrattuna kaasuturbiinin sisään menevään. Ensimmäiset turbofan-moottorit (Rolls-Royce) otettiin käyttöön 1950-luvulla Victor-pommikoneissa ja ensimmäiset turbofan-siviililentokoneet tekivät ensi lentonsa vuonna 1960. Tämä on nykyään vallitseva suihkumoottorityyppi niin siviili- kuin sotilasilmailussa ja sen hyötysuhde on huomattavasti suoraa suihkumoottoria parempi (Smil 1991, IPCC1999). Nykyään suihkumoottorista puhuttaessa tarkoitetaan pääsääntöisesti juuri turbofan-teknologiaa. Nykyisten turbofan-suihkumoottorien hyötysuhde on ottomoottorien tasolla, 20–40 % (Whittlen turbojet-moottorissa se oli alle 10 %), mutta ne mahdollistavat lentämisen nopeammin ja korkeammalla, missä ilman vastus on pienempi (IPCC 1999). Niiden teho-painosuhte on luokkaa 10-kertainen ottomoottoriin verrattuna ja satoja kertoja suurempi kuin Wright-veljesten ensimmäisen moottorin (Smil 1991).

Kaasuturbiinipohjaista suihkumoottoria on sovellettu lähinnä kilpailu- ja kokeilutarkoituksessa vesi- ja maaliikenteeseen. Maaliikenteessä kaasuturbiinipohjaista suihkumootto-

ria on kokeiltu junissa (esim. Ranskan Aérotrain), autoissa ja moottoripyörissä. Kaikkien pyörillä kulkevien maakulkuneuvojen nopeusennätys on suihkumoottoriauton vuonna 1997 saavuttama 1228 km/h (Mach 1) ja vesikulkuneuvojen nopeusennätys on suihkumoottoriveneen vuonna 1978 saavuttama 511 km/h. Varsinaisessa palveluskäytössä oli Neuvostoliiton ja Venäjän armeijassa 1960-luvulta alkaen suuria suihkumoottoripintaliitäjiä (WIG-aluksia) huippunopeudeltaan 440 km/h. Pienempiä propellikäyttöisiä WIG-aluksia on nykyään kaupallisessa käytössä ja niillä on useita valmistajia. Ensimmäisenä sellaisen rakensi, miehittämättömänä lennätti ja patentoi Toivo Kaario vuonna 1935 (Korhonen 2007). Hän ei kuitenkaan saanut rahoitusta kaupalliselle demonstraatiolle siitä eikä myöskään ilmatyynyaluksesta, josta hän oli toimivia mallilaitteita rakentanut 1930-luvulta alkaen. Hän oli aika paljon ajastaan edellä, sillä ensimmäinen kaupallinen ilmatyynyalus valmistui vuonna 1959 Englannissa ja ensimmäinen pintaliitäjän sotilas-koe-kone vuonna 1961 Neuvostoliitossa.

Kaasuturbiinisuihkumoottoreiden polttoaineena käytetään nykyään fossiilista kerosiinia, mutta myös biokerosiini (BTL-kerosiini) soveltuu niihin. Lisäksi monia muitakin biopolttoaineita voidaan käyttää, joko sekoituksena kerosiinin kanssa, jolloin muutoksia ei tarvita tai puhtaina, jolloin ne edellyttävät muutoksia polttoainejärjestelmässä ja jakelu-järjestelmässä, mahdollisesti myös moottorissa. Mahdollisia ovat esimerkiksi biodiesel, alkoholit, nesteytetty UE-vety (LH) ja nesteytetty biokaasu (LBG) (IPCC1999, Ebbinghaus & Wiesen 2001) ja periaatteessa muutkin kaasuturbiineissa käytetyt biopolttoaineet kuten pyrolyysiöljy (Boucher ym. 2000). Näistä UE-vety tarjoaa suurimmat päästöjen vähennykset ja johtuen korkeimmasta lämpöarvosta massayksikköä kohti se alentaa eniten lentokoneen nousuun kuluva energiaa, joka on merkittävä osa polttoaineen kulutusta ja päästöjä varsinkin lyhyillä matkoilla. Myös LBG vaikuttaa samaan suuntaan kuin LH, mutta vähemmän. Sen sijaan alkoholeilla ja biodieseleillä on pienempi energiatiheys ja ne siten lisäävät tilavuudella mitattua polttoainekulutusta.

Vesisuihkumoottori on vesiliikenteessä jo vuodesta 1866 käytetty työntövoiman lähde, jossa liike saadaan aikaan vesisuihkuilla. Se on nykyään yleinen teknologia nopeissa laivoissa ja veneissä: kantosiipialuksissa, katamaraaneissa, yksirunkoisissa ja sukellusveneissä. Suomessa sitä käytetään laivaston aluksissa ja joissakin Helsingin ja Tallinnan välillä liikennöivissä laivoissa. Se on ainut vesiskoottereiden työntövoimatekniikka. Alun perin sitä käytettiin höyrykoneilla, mutta nykyään siviili liikenteessä dieselmootoreilla ja sotilasliikenteessä myös kaasuturbiineilla. Kaupallisista vesiajoneuvoista vain ilmatyynyalukset ja pintaliitäjät saavuttavat suurempia nopeuksia. Propellin ja vesisuihkumoottorin lisäksi vesialuksissa käytettyjä työntövoimalaitteita ovat esimerkiksi aivot ja melat lihasvoima-aluksissa, purjeet ja leijat tuulivoima-aluksissa, vesirattaat höyryaluksissa, veden yläpuoliset propellit ilmatyynyaluksissa ja suoveineissä, kaasuturbiinisuihkumoottorit pintaliitäjissä ja rakettimootorit nopeuskilpaveineissä.

Muitakin suihkuperiaatetta soveltavia moottorityyppejä on olemassa. Ydinmoottorissa työntövoima syntyy ydinreaktorin lämmittämästä ilmasta. Sitä on todellisuudessa käytetty pommikoneessa 1960-luvulla. Lämpö ilman tai muun kaasun lämmittämiseen voidaan tuottaa lukuisilla muillakin tavoilla, yksinkertaisimmin sähkövastuksilla. Se on esimerkki sähkösuihkumoottorista, josta on olemassa paljon muitakin teknisiä toteutuksia ja useita niistä on käytössä avaruusaluksilla. On myös mahdollista siirtää energia liikennevälineeseen ulkoa. Fotonikäyttöisessä suihkumoottorissa lämpö siirretään ajoneuvoon sähkömagneettisesti esimerkiksi laserilla tai maserilla ja saatua energiaa käytetään

lämmittämään ilmaa, jonka laajeneminen tuottaa työntövoiman. Tämä on demonstroitu mallikoneelle ilmakehässä vuonna 2000. Vastaava teknologia on mahdollinen avaruusaluksissa, mutta tällöin lämmitettävä materiaali on oltava varastoituna avaruusaluksessa.

2.16 VIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET:

TÄRPÄTTI, TERVA, HARTSI JA PYROLYYSIÖLJY (1800-LUKU)

Puiden pihkaa on käytetty hyvin moniin tarkoituksiin muinaisen Egyptin ajoista alkaen (Metsälä 2001). Eristetyn pihkan sovelluksista energiakäyttö ei ole aiemmin eikä nykyäänkään ole tärkein, joskin suurin osa maailman pihkan käytöstä menee energiantuotantoon puuta poltettaessa. Pihka on nesteiden seos, josta tärpätti on eristettynä ollut merkityksellinen nestemäisenä polttoaineena. Pihkasta saadaan myös hartsihappoja, vahoja, alkaaneja, alkoholeja ja karboksyylihappoja. Pihka muodostaa pääosan uuteaineista eli aineista, jotka saadaan uutettua puusta orgaanisilla liuottimilla, esimerkiksi bentseenillä, dietyylieetterillä, dikloorimetaanilla, asetonilla ja etanolilla. Uuteaineet voivat joissakin trooppisissa puulajeissa muodostaa jopa 20–30 % puun kuiva-aineen massasta, mutta lauhkean vyöhykkeen puulajeissa yläraja on välillä 5–10 % (Hakkila 1998). Se tarkoittaa hyvin suurta potentiaalista liikenteen biopolttoaineresurssia. Pihkaresurssia voi huomattavasti kasvattaa aiheuttamalla pihkantuotantoa puuta viiltojen avulla vahingoittamalla, koloamalla, ja joko keräämällä pihka rungosta tai käyttämällä pihkoittunut puu tervanpoltossa. Sitä on perinteisesti tehty lukuisilla eri tavoilla eri puolilla maailmaa (Metsälä 2001).

Tervan valmistus osattiin jo antiikin Roomassa ja sen teknologiaa kuvaa Vesuviuksen purkauksessa vuonna 79 kuollut Plinius vanhempi (Lassila 1945). Tärpättiä puolestaan on osattu valmistaa pihkasta 1700-luvulta lähtien (Talvitie 1924b). Suomeen tervan valmistustaito saapui 1500-luvulla. Sen valmistus myyntiin aloitettiin Pohjanmaalla 1570-luvulla ja 1600-luvun puolivälissä tervan osuus Suomen ulkomaankaupasta oli suurimmillaan, 50 %. Tervan valmistus aloitti Suomen kemian teollisuuden 1500-luvulla yhdessä salpietarin (KNO_3) ja viinan valmistuksen kanssa. Tervan ja myös tärpätin tuotanto muuttui tehdasteollisuudeksi 1890-luvulla puun pyrolyysilaitoksissa, joita enimmillään vuonna 1893 oli 39. Vuonna 1943 oli toiminnassa 12 suurta ja 27 pientä pyrolyysilaitosta, joiden pääasiallinen tuote oli kuitenkin puuhiili hiilikaasuautoihin. (Talvitie 1945b, Haapaniemi 1983)

Tärpättiä voidaan valmistaa uuttamalla, vesihöyrytislauksella pihkasta, pyrolyysillä tai vesihöyryllä kokopuusta ja sulfaattiselluprosessin jätelemestä (Talvitie 1924b). Tärpätin talteenotto jätelemestä on nykyään tärkein menetelmä. Se aloitettiin Suomen ensimmäisessä vuonna 1886 Nokialle perustetussa sulfaattisellutehtaassa 170 tonnin vuosituotannolla (Haapaniemi 1983). Vuonna 1945 raakatärpätin tislauk kapasiteetti oli 3000 t/v ja 1970-luvun lopulla 15.000 t/v keskittyen Ouluun (Haapaniemi 1983). Hartsia voidaan valmistaa pihkasta vesihöyrytislauksella, jossa tärpätti tislautuu pois, tai uuttamalla kannoista (Talvitie 1924b). Suomen ensimmäinen hartsia puusta uuttamalla valmistava laitos perustettiin Muurolaan vuonna 1913 (Talvitie 1945b).

Robert Street sai vuonna 1794 patentin ensimmäiseen nestemäisillä polttoaineilla, tärpätti ja terva, käytettävään polttomoottoriin, mutta sitä ei tiettävästi rakennettu. Tärpätistä tuli joka tapauksessa ensimmäinen nestemäinen polttomoottoripolttoaine Moreyn



Kuva 2.73. Hippomobile oli Étienne Lenoirin vuonna 1860 valmistama ensimmäinen kaupallinen polttomoottorikäyttöinen auto, jota myytiin yksi kappale Venäjän tsaari Aleksanteri II:lle. Lenoir käytti sitä vedyllä, kaupunkikaasulla, tärpätillä, etanolilla ja metanolilla.

koneessa vuonna 1826 ja myös Perry vuonna 1844 sekä Lenoir vuonna 1860 käyttivät sitä. Tärpätti oli myös ensimmäinen nestemäinen liikenteessä käytetyn polttomoottorin polttoaine Moreyn vuonna 1826-1829 toteuttamissa autossa ja veneessä (Kovarik 1998). Lenoir otti tärpätin autokäyttöön vuonna 1862 (Kuva 2.73). Morey kokeili myös laimennettua pihkaa ja tervaa ja niitä on myöhemmin käytetty kriisiaikojen polttoaineina. Ensimmäisissä Pohjoismaissa valmistetuissa ruotsalaisissa Munktellin traktoreissa käytettiin polttoaineena mm. tervan ja alkoholin seosta (Niskanen 1999).

Tärpättiä käytettiin 1800-luvulla myös valaistuskäytössä kuten myös monia kasviöljyjä, eläinrasvoja sekä alkoholeja. USA:ssa suosituin valaistuspolttoaine oli kemfeeni eli alkoholin ja tärpätin seos, jossa oli mukana myös kamferia (Kovarik 1998). Kamferia pystyttiin valmistamaan synteettisesti 1900-luvun alusta alkaen Gustaf Kompan menetelmällä tervasta (Nykänen 1999). Tärpätin ja etanolin käyttö lamppuöljynä oli tunnettua Suomessakin 1830-luvulta 1860-luvulle, jolloin petroli valtasi lamppuöljymarkkinat (Talvitie 1924b).

Tärpättiä ja tervaa on käytetty Suomessakin moottoripolttoaineena (Lassila 1945) ja tärpättiä moottorietanolin denaturoimisaineena (Kauppila 1988). Petroliä varten valmistetuissa traktoreissa käytettiin ja käytetään edelleen myös tärpättiä (Kotta 2007a). Petroliautoissa, kuten Saab 99 Petro, käytetään nykyään tärpätin ja bensiinin seosta (Hermalhti 2007).

Tervan käyttö suurissa dieselmootoreissa oli eräs kiinnostuksen kohteista ennen 2. maailmansotaa ja sen aikana, joskin voitelukäyttöä pidettiin tärkeämpänä sovelluksena (Nykänen 1999). Voiteluöljyjen hinta on korkeampi kuin polttoaineiden, joten kilpailukyky fossiilisiin verrattuna on parempi. Niitä valmistettiin tervan lisäksi tärpätistä ja mäntyöljystä sodan aikana 5 tehtaassa noin 1300 tonnia vuodessa (Talvitie 1945b). Sodan päätyttyä biovoiteluöljyjen käyttö kasvoi edelleen ennen raakaöljyn tuonnin vapautumista. Vuonna 1945 tervaa tuotettiin 70 tehtaassa ja siitä valmistettiin 4096 tonnia voiteluöljyä (Mäkipirtti 2006).

Tärpätti soveltuu myös nestemäiseksi rakettipolttoaineeksi. Ranskan ensimmäinen avaruusraketti Diamant A, joka ensi laukaisussaan vuonna 1965 vei kiertoradalle Ranskan ensimmäisen satelliitin Asterixin, käytti tärpättiä (Gatland 1989). Diamant A oli käytössä vuoteen 1969 asti (Kuva 2.74).



Kuva 2.74. Malli tärpättikäyttöisestä ranskalaisesta avaruusraketistä Diamant A Deutches Museumissa Münchenissä. [2007]

Sekä terva että pihka ovat mahdollisia sidosaineita kiinteissä rakettipolttoaineissa. Tervaa on käytetty perinteisesti sidosaineena mustaruutiraketeissa, mukaan lukien legendaarisessa kiinalaisen Wan Hu:n rakettituolikokeessa 1500-luvulla. Havupuiden pihkasta valmistettua hartsia käytettiin maailman ensimmäisessä hybridiraketissa Neuvostoliiton Gird09:ssä vuonna 1933 (Gatland 1989). Hartsi soveltuu ja sitä on käytetty myös voiteluaineiden valmistuksen raaka-aineena (Mäkipirtti 2006).

2.17 IX SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: ETANOLI TÄRKKELYS- JA SOKERIKASVEISTA (1800-LUKU)

Etanolin käytön historiallista painotusta kuvaa Wihtori Peltonen vuonna 1907 seuraavasti (Peltonen 1907):

”Ihminen on valmistanut ja nauttinut väkijuomia sangen vanhoista ajoista saakka – voimme sanoa hänellä olleen ryyppyharrastuksia jo aikaisemmin kuin sivistysharrastuksia.”

Hän on siinä täysin oikeassa, sillä alkoholifermentaation ja tislauksen taito opittiin jo esihistoriallisella ajalla, ennen korkeakulttuurien syntyä. Etanoli on lihasvoiman lähteenä toiminut liikennepolttoaineena jo 9000 vuoden ajan ja liikennemoottorien polttoaineena 1800-luvulta lähtien. Etanolin valmistustaidon synnystä alkaen myös tekniset käyttömuodot olivat mukana, aluksi hajuvesien valmistus. Suomeen etanoli tuli vasta 1400-luvulla Keski-Euroopasta lääkkeenä mainostetun elintarvikekäytön lisäksi ruudin valmistuskäyttöön (Pöysä ym. 1982). Alun perin viinaa tehtiin Suomessa tuontiviinejä tislaamalla ja ensimmäinen oma viinanvalmistuksen lähtöaine oli vilja 1500-luvulla (Pöysä ym. 1982). Viinan valmistuksen taito tuli Suomeen ulkomailla sotineiden sotilaiden mukana ja 1600-luvun loppuun mennessä viina tuli yleiseen käyttöön sekä maaseudulla että kaupungeissa syrjäyttäen oluen (Haapaniemi 1983). Viinan valmistuksen perinteinen raaka-aine on ollut ruis, jonka rinnalla alettiin käyttää myös muita viljoja ja 1800-luvulta alkaen myös perunaa (Kauppila 1988). Alkoholiteollisuus oli 1880-luvulla Suomen suurin kemianteollisuuden ala: toiminnassa oli 85 olutpanimoa, 67 viinapolttimoa ja 90 spriitehdasta (Talvitie 1945b). Viinan valmistuslaitteistoja oli runsaasti erilaisia ja tiedot niistä kulkivat sekä suusta suuhun että valmistusoppaiden avulla. Goldsmithin (1922) kirja on esimerkki USA:n kieltolain aikaan myynnissä olleista viinantekolaitteiden ja viinan teon valmistusoppaista. Se sisältää vaihtoehtoja yksinkertaisista metsälaitteista aina suuriin, nytkin mm. Suomen maataloilla hyödynnettäviksi kelpaaviin teknologioihin. Kyseinen teos on tarkoitettu kieltolain ansiosta vain ja ainoastaan polttoaine-etanolin valmistukseen ja käyttöön. Se kuvaa maatalojen käyttömahdollisuuksia laajasti sekä paikallaan olevissa että liikkuvissa työkoneissa, liikenteessä sekä sähkön ja lämmön tuotannossa. Kuva 2.75 esittää perinteistä pontikanvalmistuslaitosta, jollaisia oli Suomessa käytössä ainakin 1700-luvulta lähtien (Pöysä ym. 1982). Etanolia alemmassa lämpötilassa höyrystyvä myrkyllinen metanoli, jota fermentaation sivutuotteena muodostuu, erotettiin heittämällä ensimmäinen tislautuva astiallinen hukkaan.

Moottorikäyttöön etanoli otettiin vuonna 1793 Edward Cartwrightin suunnittelemassa höyrykoneessa (Thurston 1878). Se oli ensimmäinen nestemäinen höyrykoneen polttoaine. Polttomoottorissa etanolia käytti ensimmäisenä vuonna 1826 Samuel Morey, joka myös otti etanolin ensimmäisenä liikennekäyttöön moottoroidussa vaunussa eli autossa



Kuva 2.75. Perinteinen pontikan tisluslaitteisto Keski-Suomen museossa Jyväskylässä. Oikealta vasemmalle: keittoastia, jäähdytysastia ja pontikan keräysastia. [2007]

ja veneessä 1820-luvulla (Kovarik 1998). Etanoli oli höyrykonepolttoaineena maailman ensimmäisessä ilmaa painavammassa motorisoidussa koneessa, John Stringfellowin ja William Hensonin mallilentokoneessa, joka lensi sisähallissa vuonna 1848 (Vivian 1920, Hargrave 2007). Alkuperäinen kone, jonka siipien kärkiväli on 3 metriä, on säilynyt ja se on näytteillä Lontoon tiedemuseossa (Kuva 2.76). Moottori oli etanolikäyttöinen höyrykone teholtaan 100 watin suuruusluokkaa. Etanoli oli polttoaineena myös Lenoirin autokokeiluissa 1860-luvun alussa. Nikolaus Otto valitsi etanolin ensimmäisen polttomoottorinsa polttoaineeksi vuonna 1862. Se sovelsi 4-tahtiperiaatetta, jonka Otto oli keksinyt tietämättä de Rochasin vastaavasta hieman aiemmasta keksinnöstä.



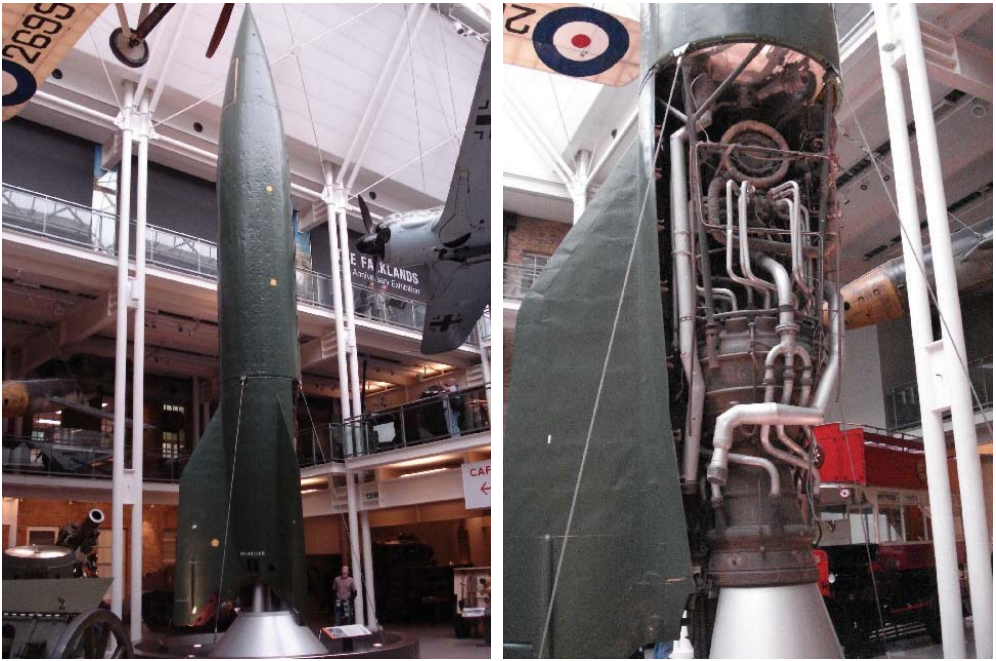
Kuva 2.76 Maailman ensimmäinen lentokone Lontoon tiedemuseossa. John Stringfellow:n mallilentokone lensi ensi kerran vuonna 1848. Sen etanolikäyttöinen moottori on vasemmalla ylähyllyllä. Muut kuvassa näkyvät osat ovat peräisin Stringfellow:n vanhemmista ja myöhemmistä koneista. [2007]

Etanoli oli polttoaineena myös maailman ensimmäisessä ihmistä kuljettavassa vaakatasolta ilmaan nousseessa motorisoidussa ilmaa raskaammassa lentokoneessa, ranskalaisen Clément Aderin rakentamassa Éoleessa, joka lensi ensi kerran vuonna 1890. Sitä ennen, jo vuonna 1874 Felix du Temple oli lennättänyt ihmistä motorisoidulla koneella, mutta se nousi ilmaan vain alarinteeseen, eikä pystynyt nousemaan tasamaalta. Éoleessa oli 15 kW:n etanolikäyttöinen höyrykone. Éole ei ole säilynyt, mutta sen sijaan Aderin kolmas, vuonna 1897 lentänyt lentokone Avion III, jossa on kaksi 15 kW:n etanolikäyttöistä höyrykonetta, on säilynyt ja näytteillä Musée des Arts et Métiers:issä Pariisissa (Kuva 2.77). Missään Aderin koneessa ei ollut lentokontrollia. Ensimmäisen kontrolloitavan – tosin vain vaivoin ja vain optimaalisissa olosuhteissa kontrolloitavan – moottoroidun ilmaa raskaamman lentokoneen rakensivat Wrightin veljekset vuonna 1903.



Kuva 2.77. Clément Aderin lentokone Avion III ja sen 2 x 15 kW:n etanolikäyttöinen moottori vuodelta 1897 Musée des Arts et Métiers:issä Pariisissa. [2007]

Etanoli otettiin rakettimoottorikäyttöön 1920-luvun lopulla toisena nestemäisenä rakettipolttoaineena Goddardin vuoden 1926 bensiinikokeilujen jälkeen. Kuvassa 2.28 esitellään Max Valierin rakettimoottoriajoneuvoja. Toisen maailmansodan aikaiset saksalaiset 6,2 MW:n tehoiset V2-ohjukset (Kuva 2.78) käyttivät pääasiassa perunasta valmistettua 75 % -etanoli-vesiseosta. V2:t muodostivat sodan jälkeen sekä USA:n että Neuvostoliiton avaruustutkimusohjelman perustan ja myös Kiina aloitti etanoliraketeilla. V2-raketteja laukaistiin sodan aikana yli 3000 kappaletta ja sodan jälkeen tutkimustarkoituksessa yli 60 USA:ssa ja yli 1500 Neuvostoliitossa (Zaloga & Calow 2003). Neuvostoliiton V2-raketeissa todennäköisesti käytettiin myös suomalaista etanolia. Neuvostoliitto nimittäin vaati sotakorvauksina huomattavia määriä etanolia nimenomaan spriniä (Vehviläinen 1963), joka sopii edelleen laimennettuna V2:een, eikä absoluuttisena etanolina, jota ai- toissa pääasiassa käytettiin.



Kuva 2.78. Etanolikäyttöinen V2-avaruusraketti Lontoon sotamuseossa. V2 oli ensimmäinen avaruuteen asti lentänyt raketti vuonna 1942. [2007]

Wernher von Braun, joka oli V2:n pääsuunnittelija, suunnitteli myös etanolikäyttöisen Redstonen, joka oli USA:n ensimmäisen satelliitin Explorer 1 kantoraketti vuonna 1958 ja USA:n ensimmäisen miehitetyn avaruusaluksen Mercury 3/Freedom 7 kantoraketti vuonna 1961 (Gatland 1967). Myöhemmin Braun toimi myös Apollo-kuulentojen vetäjä Saturn V:n pääsuunnittelijana. V2 oli ensimmäinen avaruusraketti, sillä se ylitti 100 km korkeuden ja siten aloitti avaruusliikenteen. Suurimmillaan vuonna 1944 V2 ylsi 189 km korkeuteen 30 perunatonnin voimalla (Suominen 2007a). Muita merkittäviä esimerkkejä etanolikäyttöisten rakettikoneiden historiassa ovat olleet maailman ensimmäinen nestemäisellä polttoaineella kulkenut rakettimoottorilentokone saksalainen Heinkel He-112, joka lensi ensi kerran vuonna 1937; USA:n X1-rakettikone, joka vuonna 1947 ensimmäisenä koneena ylitti äänennopeuden; ja avaruussukkulan prototyyppi HL-10, joka lensi vuosina 1968–1970.

Nikolaus Otto oli tehnyt ensimmäisen etanolimoottorin vuonna 1862 ja rakensi ensimmäisen ns. spriimoottorin eli vuoden 1876 ottomoottorin korkeapuristeisen etanoliverision 1880-luvulla. Otton ja Langenin perustaman Deutz-yhtiön kaikista vuonna 1906 valmistamista moottoreista 10 % oli spriimoottoreita ja veturimoottoreista kolmasosa (Kovarik 1998). Saksassa etanolia tuotti vuonna 1906 peräti 72.000 tislamaoa, joista 67.000 oli pieniä maatalaitoksia ja ensimmäisen maailmansodan syttyessä Saksan vuosituotanto oli 250 Ml (Kovarik 1998) energiasisällöltään yli 5 PJ. Vuonna 1921 denaturoidun polttoaine-etanolin tuotanto oli jo 380 Ml eli 8 PJ (Goldsmith 1922). Eniten käytetty raaka-aine Saksassa oli peruna (Airas 1935). Perunatonnista saatiin 1910-luvun tekniikalla 120 kg eli 150 litraa 100 % etanolia (Kaukoranta 1981). Pleethin (1949) mu-

kaan vuonna 1936 tyydyttiin Euroopan moottoripolttoaineen tarpeesta 4,8 % alkoholilla. Suomessa etanoli otettiin liikennekäyttöön vasta 2. maailmansodan pakottamana eikä metanolia koskaan.

Monet varhaisimmat autot pystyivät käyttämään etanolia (Kuva 2.79). Liukuhihnatuotannon aloittanut Fordin T-malli (Kuva 2.79b), jota valmistettiin 15 miljoonaa kappaletta vuosina 1908–1927 rakennettiin alun perin käyttämään sekä etanolia, bensiiniä, kerosiinia että bentsolia, kuten eräät muutkin varhaiset automallit ja myös eräät varhaiset traktorit (Kovarik 1998). Polttoainejoustavuus saavutettiin säädettävällä kaasuttimella ja sytytyksen ajoituksella. Lisäksi valmistettiin pelkästään etanolikäyttöisiä autoja ja traktoreita käyttäen spriiimoottoreita, jolloin pystyttiin hyödyntämään korkeamman puristusasteen tuoma korkeampi hyötysuhde (Kovarik 1998). Ensimmäinen sähkömoottori/spriiimoottorihybridiauto valmistettiin vuonna 1903. Hesselmanmoottori, jonka Volvo kaupallisti kuorma-autoissaan vuonna 1933 ja käytti vuoteen 1947 asti, oli polttoainejoustava moottori ja pystyi myös etanolin käyttöön (Olsson 1987).



Kuva 2.79. Etanolin käyttöön pystyviä varhaisia automalleja Tukholman tekniikan museossa: a) Ensimmäinen ruotsalaisvalmisteinen polttomoottoriauto, Gustaf Eriksonin åkvagn, jota valmistettiin vuosina 1897–1902 ja b) Fordin T-malli, jota valmistettiin 15 miljoonaa kappaletta vuosina 1908–1927. [2006]

Suomen museoajoneuvorekisterissä oli vuoden 2006 lopussa yhteensä 116 T-mallin Fordia. Ne olivat tällöin Suomen ainoat liikenteessä olevat FFV-autot, jotka pystyvät käyttämään myös puhdasta etanolia sekä Ruotsissa ja useissa muissa maissa myynnissä olevaa E85:a. St1:n aloittaessa E85:n myynnin vuonna 2009 (Kuva 6.3), FFV-autoja on jälleen ryhdytty Suomeen tuomaan.

Henry Ford suunnitteli ensimmäisen traktorimallinsa Fordson F:n toimimaan myös etanolilla (Kovarik 2007). Niitä valmistettiin vuosina 1917–1928 noin 750.000 kappaletta eli eniten maailman kaikista traktorimalleista (Kuva 2.67). Suomessa etanolin moottorikäyttöä ei pidetty suotavana sosiaali- ja terveyspoliittisista syistä (Ojanen 1997a). Sodan aikana armeijan käyttöön otettiin 202 traktoria (Ojanen 1997b), joita käytettiin bentyyllillä kuten muitakin armeijan ottomoottoriajoneuvoja. Puhtaan etanolin käyttömahdollisuus Valmet 20 -traktorilla osoitettiin Vakolassa vuonna 1959 (Ahokas 1987, Kuva 2.80).



Kuva 2.80. Valmet 20 -traktori, jota valmistettiin vuosina 1955-1963, Valtran tehtaan näyttelyssä Suolahdessa. Se soveltui bensiinin, petrolin ja etanolin käyttöön. [2008]

Etanoli oli ennen raakaöljyn 1860-luvulla tapahtunutta käyttöönottoa yleinen polttoaine valaistuskäytössä kuten myös monet muut biopolttoaineet: risiiniöljy, rypsiöljy, pähkinäöljy, valaanrasva, naudan ja sian rasva, tärpätti ja metanoli. Kaikkein suosituin polttoaine USA:ssa oli kamfeeni eli alkoholin (50–70 %) ja tärpätin (20–50 %) seos, joka sisälsi myös hieman kamferia tärpätin hajun peittämiseksi ja liekin värittämiseksi. (Kovarik 1998)

Etanolia valmistettiin polttoainekäyttöön USA:ssa vuonna 1860 yli 90 miljoonaa gallonaa (Kovarik 1998). Se tarkoittaa runsaan 7 PJ:n energiasisältöä. Suomessa etanolin tuotanto (pääasiassa juomakäyttöön) vuonna 1875 oli 11,2 miljoonaa litraa 50 %:ksi etanoliksi laskettuna (Haapaniemi 1983). Se tarkoittaa 0,1 PJ:n energiasisältöä. Bensiiniin sekoitettavaksi sopivan absoluuttisen alkoholin tuotanto Suomessa vuosina 1932–1962 on esitetty taulukossa 2.5. Taulukkoon on laskettu tuotannon energiasisältö sekä riittävyys autokäytössä olettaen, että autot käyttävät E25-polttoainetta bentyyliä ja kulkevat keskimäärin 10.000 km vuodessa. Kokonaistuotanto oli 60 miljoonaa kg eli 76 miljoonaa litraa, joka vastaa 1,6 PJ energiasisältöä. Korkein tuotantomäärä saavutettiin vuonna 1955, jolloin 25.000 autoa olisi voinut liikkua pelkästään E25:lla. Myös spritiä, jossa on 4 % vettä, käytettiin hieman moottoripolttoaineena armeijan ja Alkon autoissa, mutta se ei sisälly taulukkoon.

Taulukko 2.5. Absoluuttisen alkoholin tuotanto Suomessa Vehviläisen (1963) mukaan sekä tuotannon energiasäiltö ja riittävyys autokäytössä bentyylinä.

Vuosi	Rajamäellä [kg]	Koko maassa [kg]	Energia	E25-autoja (à 10.000 km)
1932	547	547	15 GJ	2
1933	2.534	2.534	68 GJ	9
1934	5.166	5.166	139 GJ	15
1935	3.957	3.957	107 GJ	12
1936	5.075	5.075	137 GJ	15
1937	3.408	3.408	92 GJ	10
1938	3.504	3.504	95 GJ	11
1939	4.024	4.024	109 GJ	12
1940	1.529	1.529	41 GJ	5
1941	2.505.028	6.136.332	166 TJ	18.000
1942	1.113.100	4.669.540	126 TJ	14.000
1943	2.721.900	5.441.893	147 TJ	16.000
1944	3.952.030	6.703.781	181 TJ	20.000
1945	1.815.880	3.775.228	102 TJ	11.000
1946	3.311.280	5.132.989	139 TJ	15.000
1947	-	148.645	4 TJ	440
1948	-	-	-	-
1949	-	345.855	9 TJ	1000
1950	1.951.190	4.700.162	127 TJ	14.000
1951	114.460	114.460	3 TJ	330
1952	126.900	126.900	3 TJ	330
1953	159.470	159.470	4 TJ	440
1954	2.919.250	3.732.035	101 TJ	11.000
1955	2.415.310	8.367.589	226 TJ	25.000
1956	2.706.610	5.954.600	161 TJ	18.000
1957	1.314.570	2.752.859	74 TJ	8.200
1958	-	288.327	8 TJ	890
1959	289.570	289.570	8 TJ	890
1960	-	502.055	14 TJ	1.600
1961	225.659	225.659	6 TJ	670
1962	-	129.655	4 TJ	440
YHT		59.727.378	1613 TJ	180.000

Tuotannon energialähde Alkon Rajamäen tehtailla oli vuodesta 1935 alkaen puu siitä huolimatta, että kivihiili olisi ollut edullisin polttoaine (Vehviläinen 1963). Valtionyhtiö Alkon johto katsoi tällöin, että kotimaista polttoainetta on käytettävä, vaikka ulkomainen olisi halvempaa. Se on katsottava normaaliksi politiikaksi valtion yhtiöltä, vaikkakin nykyään valtion yhtiöt toimivat toisin.

Raakaöljystä tislatus kerosiinin tullessa markkinoille 1850-luvun lopulla kamfeeni ja etanoli olivat sitä halvempia. Kerosiinin markkinoille pääsy ja nopeasti saavutettu markkinoiden dominointi mahdollistettiin USA:ssa asettamalla korkea liittovaltion vero etanolille asteittain vuosina 1862-1864, jonka jälkeen polttoaine-etanoli

ei enää ollut kilpailukykyinen ja lähes hävisi markkinoilta (Kovarik 1998). Tämä oli merkittävää raakaöljyteollisuuden synnylle sekä USA:ssa että sen seurauksena globaalisti. Maanviljelijöiden vetoamisista huolimatta etanolivero pystyttiin ylläpitämään pitkään paitsi raakaöljyteollisuuden myös metanoliteollisuuden lobbauksen ansiosta (Kovarik 1998). Vero poistettiin denaturoidulta polttoaine-etanolilta vasta 1907, kun ensimmäiset Texasin suurista öljykentistä olivat löytyneet ja kerosiini ja bensiini saavuttivat kilpailukyvyn myös ilman etanolin verotusta. Viljan, erityisesti maissi, lisäksi etanolia oli tuotettu USA:ssa perunoista ja sokerijuurikkaista.. Kuubassa tuotettu sokeriruokoetanoli oli silloin erittäin kilpailukykyinen Texasissa tuotetun raakaöljypohjaisen kerosiinin ja bensiinin kanssa, mutta USA:n öljyteollisuus pystyi estämään sen maahantuonnin rahoitusjärjestelyillä Kuuban teollisuuden kanssa eli samaan tapaan kuin se pystyi myöhemmin estämään saksalaisten synteettisten polttoaineteknologioiden käytön USA:ssa (Kovarik 1998). Saksassa etanolin käyttö kehittyi suotuisammin, sillä päinvastoin kuin USA:ssa etanolin sijaan verotettiin raakaöljytuotteita. Saksassa denaturoitu etanoli vapautettiin elintarvike-etanolin verosta vuonna 1887 (Goldsmith 1922).

Etanolin korkea puristuskestävyys oli erittäin hyvin tunnettu asia ja usein laboratorionkokein ja käytännön kokemuksen varmennettu 1900-luvun alussa (Kovarik 1998). Etanolin tiedettiin kestävän jopa puristussuhdetta 14–15 (Airas 1919), kun taas silloinen alle 70-oktaaninen suoratislattu bensiini rajoitti ottomoottorin puristussuhteen tasolle noin 4,5 (Talvitie 1930). Ruotsin 1930-luvulle mennessä kertyneiden kokemusten mukaan etanolibensiinillä saavutetaan 14–15 % suurempi moottoriteho kuin pelkällä bensiinillä (Kaukoranta 1981). Vuonna 1956 professori Sundgrenin johtamissa VTT:n tutkimuksissa todettiin, että 25 %:n etanoliosuudella lyijyttämättömän perusbensiinin oktaaniluku 78 saatiin nousemaan 95:een (Kaukoranta 1981). Tätä korkeaooktaanista E25-polttoainetta myytiin Suomessa bentyylin nimellä 400 huoltoasemalla vuoteen 1957 asti eli kunnes Nesteen Naantalin jalostamo käynnistyi ja siellä tuotettu TEL-bensiini korvasi bentyylin, vaikka lyijy oli jo Rooman valtakunnan ajoista tunnettu hermomyrkyksi ja se siitä syystä 1980-luvulla kiellettiin. TEL-bensiinin käytön aika oli erittäin surullinen jaksoliikennepolttoaineiden käytön historiassa ja se esti etanolin lisäksi monien muidenkin biopolttoaineiden käytön (Kovarik 1998, Doyle 2000, Davis 2002, Kraus & Harremoës 2001, EEA 2001, Express/DR 2005, Black 2006).

Vaikka lähes kaikissa maissa öljyteollisuus seurasi USA:n öljyteollisuuden esimerkkiä siirtyen yhteiskunnalta saadulla siunauksella TELin käyttöön, useimmissa vasta 2. maailmansodan jälkeen, etanolin ja muidenkin biopolttoaineiden käytön edistämiseksi oli sitä ennen käytössä monenlaisia instrumentteja. Ensimmäisen maailmansodan aikana maat, joilla ei ollut lainkaan tai riittävästi omia raakaöljyresursseja, olivat pakotettuja käyttämään omia bioenergiaresurssejaan. Esimerkiksi Brasiliassa sokeriruokoetanolin käyttö oli pakollista monissa osissa maata (Moreira & Goldemberg 1999). Monissa maissa edistämispolitiikka jatkui myös sotien välisenä aikana. Useimmissa teollisuusmaissa ja joissakin kehitysmaissa etanolia sekoitettiin bensiiniin joko vapaaehtoisilla, lakisääteisillä tai verotuksellisilla keinoilla (Kovarik 1998). Keski-Euroopassa tärkeimmät raaka-aineet olivat peruna, viinirypäleet ja ylijäämäviini sekä vilja, Pohjois-Euroopassa puolestaan sulfiittisellun tuotannon jätelemi. Useissa maissa oli lakisäateinen alkoholin sekoituspakko bensiinin vielä 1950-luvulla ja yleisin etanolin osuus oli 25–30 t-%, joka paransi oleellisesti moottorin suorituskykyä bensiiniin verrattuna ja oli siten käytössä myös

lentokoneissa, kilpamoottoreissa ja vuoristoajoissa (Pellinen & Roschier 1952). Etanolin sekoituspakko bensiiniin oli käytössä Ranskassa vuodesta 1923 vähintään 10 t-% ja enintään 50 t-% osuudella (E10-E50) ja rahoitusmekanismina oli etanolin subventointi bensiiniverolla, siis valtiontalouden kannalta neutraalisti (Kovarik 1998). Samanlainen rahoitusmekanismi oli yksi Brasilian 1970-luvulla alkaneen liikenne-etanoliohjelman kulmakiviä (Moreira & Goldemberg 1999). Saksassa käytettiin sotien välisenä aikana monopolin-nimistä seosta, jossa oli 20 % etanolia (E20) ja monopolin-extra-seosta, jossa oli 40 % etanolia, 17 % bentsolia, 35 % bensiiniä ja 8 % muita aineita (Talvitie 1930). Saksassa käytettiin 1920-luvun alussa myös etanolin, tetraliinin ja bentsolin seoksia, jossa nestemäinen tetraliini valmistettiin kivihiilen kuivatuslaustuotteesta kiinteästä naftaliinista hydraamalla (Talvitie 1930). Ruotsissa bentyyli, jossa on 22–25 % etanolia (E22–E25), tuli 1920-luvulla ”tavattoman laajaan käyttöön” (Talvitie 1930). Pääsyyinä olivat korkea oktaaniluku, pysyvyys, sopivuus kaikkiin bensiinikäyttöiseksi rakennettuihin ajoneuvoihin ilman muutoksia, bensiiniä täydellisempi palaminen ja siitä seuraavat korkeampi hyötysuhde ja alemmat päästöt (Talvitie 1930). Spriiamoottoreilla saavutettiin lisäksi alempi litramääräinen polttoaineenkulutus. Myös Grand Prix -kilpa-autot kulkivat 1920- ja 1930-luvuilla etanolilla johtuen mahdollisuudesta käyttää korkeapuristeista moottoria.

Brasiliassa valmistetun etanolin tuotantokustannukset ovat bensiiniä alemmat, ja se on kilpailukykyinen ilman mitään tukitoimenpiteitä myös EU-maissa (Bomb ym. 2007). Kotimainen etanoli on saatu eräissä EU-maissa, kuten Englanti, Saksa ja Ruotsi, kilpailukykyiseksi Brasilian etanolin kanssa tuontitariffin avulla. Saksassa, jossa biopolttoaineilla ei ole polttoaineveroa sekä kotimainen että tuontietanoli ovat kilpailukykyisiä bensiinin kanssa, mutta Englannissa polttoaineveron alennus ei ole ollut riittävä, joten sekä kotimainen että Brasilian tuontietanoli ovat selvästi bensiiniä kalliimpia (Bomb ym. 2007). Brasiliassa etanolia tuottavien sokeriruokoviljelmien traktorit ovat etanolikäyttöisiä, joten esimerkiksi Valmetin Brasilian traktoritehdas tuotti etanolikäyttöisiä traktoreita 1980-luvun alusta alkaen (Niskanen 1999). Teknologiana oli dual-fuel-diesel, jossa dieseliä käytetään pelkästään sytytykseen ja 90 % energiasta tulee etanolista. Myös muut Brasilian traktoritehtaat eli Massey-Ferguson ja Oliver ryhtyivät tuottamaan etanolitraktoreita 1980-luvun alussa, mutta käyttäen ottomoottoria (Niskanen 2000).

Nykyään etanoli on maailman ylivoimaisesti yleisin tieliikenteen biopolttoaine johtavana maina Brasilia ja USA. Liikenne-etanolin globaali tuotanto vuonna 2008 on esitetty taulukossa 2.6. Se vastaa 1,7 %:a maailman liikenteen energiankulutuksesta (Taulukko L7.2). EU:ssa etanolin osuus liikennebiopolttoaineiden käytöstä vuonna 2008 oli 17,5 % (EurObserv'ER 2009).

Taulukko 2.6. Liikenne-etanolin globaali tuotanto vuonna 2008.
Muokattu: F.O. Licht's world ethanol & biofuels report.

Maa/alue	[PJ]
USA	720
Brasilia	520
EU	59
Kiina	40
Kanada	19
Muut maat yhteensä	10
Thaimaa	7
Kolumbia	6
Intia	5
Australia	2
YHTEENSÄ	1383

2.18 X SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: METANOLI (1800-LUKU)

Biomassan pyrolyysillä valmistettua metanolia on käytetty jo noin 2000 eaa balsamointiin Egyptissä. Sitä on syntynyt myös etanolin tuotannon sivutuotteena jo esihistorialliselta ajalta alkaen, mutta merkityksettömissä määrin. Puhdasta pyrolyysipohjaista metanolia on osattu valmistaa 1600-luvulta alkaen. Puun pyrolyysi oli 1920-luvulle asti tärkein metanolin tuotantotapa, josta syystä metanolia on kutsuttu myös puualkoholiksi. Tyypillisesti puun kuivamassasta saatiin noin 1 % metanolina (Talvitie 1924b). Sen lisäksi saatiin puuhiiltä, tärpättiä, tervaa ja etikkahappoa. Uusia metanolin tuotantotapoja saatiin kehitettyä 1900-luvun alussa. Ligniinin metoksyyliryhmistä peräisin olevaa metanolia saadaan sivutuotteena sekä sulfaatti- että sulfiittisellun tuotannossa noin 7 kg sellutonnin kohti (Pellinen & Roschier 1952). Gutzeit aloitti Suomessa metanolin teollisen talteenoton sellutehtaassa vuonna 1912 (Haapaniemi 1983). Synteetikaasupohjaisen metanolisynteetin teorian esitteli vuonna 1905 ranskalainen Paul Sabatier (Cheng & Kung 1994). BASF rakensi ensimmäisen teollisen tuotantolaitoksen Leunaan Saksaan vuonna 1923 ja se on edelleen toiminnassa. Alkuperäinen synteetikaasun lähde oli kivihiilestä tuotettu vesikaasu, mutta 1940-luvun lopulta alkaen tärkein lähde on ollut maakaasun höyryreformointi, joskin myös monia muita prosesseja, mukaan lukien biomassan ja raakaöljyn kaasutus, on käytetty (Cheng & Kung 1994).

Puupohjainen synteettinen metanoli oli yksi vaihtoehtoinen polttoaine, jota sodan aikana suunniteltiin otettavan liikennekäyttöön, mutta valmistuksen aloittamisesta saatiin tehtyä päätös vasta vuonna 1943, joten tehdasta ei saatu valmiiksi ennen sodan loppumista (Viitaniemi 1978). Puupohjainen metanolisynteesi aloitettiin Suomessa teollisesti vuonna 1949 Enso-Gutzeitin metanolitehtaalla Imatralla (Alanko 1950). Kapasiteetti oli 3500 t/v eli tehdashanke osoitti mahdolliseksi soveltaa kaasutus pohjaisia synteesejä varsin pienessä kokoluokassa, paljon pienemmässä kuin esimerkiksi Saksan 1940-luvun FT-tehtaat olivat. Se merkitsee, että kaasutus pohjaisten synteettisten biopolttoaineiden, eli metanolin lisäksi myös metaani ja FT-polttoaineet, valmistus puusta pienessä kokoluokassa tuli Suomessa teknisesti osoitettua jo 1940-luvulla. Tuontipolttoaineiden halvan hinnan takia tämä teknologia on kuitenkin jätetty käyttämättä. Imatran tehdaskaan

ei kauaa metanolia valmistanut. Se lopetti metanolintuotannon vuonna 1956 johtuen maakaasupohjaisen tuontimetanolin halvasta hinnasta ja jatkoi formaldehydisynteesillä.

Metanoli ja tärpätti olivat ensimmäiset käyttöön otetut puuperäiset nestemäiset polttoaineet. Metanoli oli 1800-luvulla tärkeä polttoaine valaistuksessa, ruoanlaitossa ja lämmityksessä (Kovarik 1998). Liikennekäyttöön metanolin otti amerikkalainen Samuel Morey kehittämänsä polttomootorin maa- ja vesiliikennekokeiluissaan 1820-luvulla.

Metanoli on käytetty varsinkin USA:ssa autoliikenteessä M85-polttoaineena ja se on pitkään ollut yleinen M100-polttoaineena kilpa-autoissa (Kuva 2.81). Metanolia on myös lisätty moottorietanoliin denaturoimisaineena (Kauppila 1988) ja bensiiniin oktaanin-korottajana ja hapettajana.



Kuva 2.81. Metanolikäyttöinen Williams FW07C F1-auto vuosimallia 1981 historiallisten F1-autojen kilpailuissa Laguna Secassa Kaliforniassa vuonna 1992. USA:ssa monet rata-autoluokat käyttävät 100 % metanolia tai 100 % etanolia. [1992]

Metanoli-vesiseosta ja etanoli-vesiseosta ahtimeen suihkutettuna on käytetty lentokone-moottorien tehon lyhytaikaiseen korottamiseen kuljettajan säätämänä. Esimerkiksi Me109-koneilla saavutettiin sodan aikana tällä menetelmällä 4–20 % tehon korotus (Valtonen 1999) käyttäen normaaleja moottoreita. Potkurikoneiden lentonopeusennäytystä 755 km/h vuodesta 1939 vuoteen 1969 asti hallussaan pitänyt Me109 käytti metanoli/vesi-suihkutusta ja saavutti erityisesti tätä tarkoitusta varten rakennetulla 33,9 litran DB601RMW-koemoottorilla 2700 hv tehon eli lähes 2-kertaisen vastaavaan normaali-versioon verrattuna (Suzuki 1997). Erityisesti metanolisuihkutusta varten rakennettuja 44,7 litran 2850 hv:n DB603N-moottoreita alettiin sarjavalmistaa vasta vuonna 1945 (Suzuki 1997).

Metanolia on käytetty rakettimoottorien polttoaineena 2. maailmansodasta lähtien. Saksaisten rakettimoottorilentokoneissaan käyttämiin polttoaineisiin lukeutui puhdas metanoli M-Stoff-nimisenä polttoaineena tai pääkomponenttina (n. 57 %) hydratsiinin ja veden kanssa C-Stoff-nimisenä polttoaineena (Gatland 1989), esimerkiksi Messerschmitt Me163-koneessa (Kuva 2.82).



Kuva 2.82. Metanoli- ja hydratsiinikäyttöinen Me163B Deutches Museumissa Münchenissä. Me163 lensi ensi kerran vuonna 1941. Se oli maailman ensimmäinen sarjavalmistukseen ja palveluskäyttöön otettu rakettimoottorikäyttöinen lentokone vuonna 1944. Se saavutti 1000 km/h nopeuden. [2007]

2.19 XI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET:

ELÄINRASVAT JA KASVIÖLJYT (1800-LUKU)

Eläinrasvoja on käytetty valaistuksessa jo ainakin 70.000 eaa alkaen ja kasviöljyjä on käytetty öljylampuissa ainakin 10.000 eaa alkaen vanhimpana polttoaineena oliiviöljy. Hyönteisvahaa, erityisesti mehiläisvaha, on käytetty valaistuksessa kynttilöissä antiikin Egyptin ajoista lähtien ja samaan tarkoitukseen käytettiin myöhemmin talia ja valaanvaha. Kasviöljyjen, aluksi pellava- ja hampullaöljyn ja pian myös naurisöljyn, teollinen tuotanto aloitettiin Suomessa 1820-luvulla (Haapaniemi 1983). Niiden tuotanto vuonna 1854 oli noin 70 tonnia. Niiden pääkäyttö oli maaliteollisuudessa, mutta siementen puristuksessa sivutuotteena syntyneet rehukakut olivat taloudellisesti arvokkaampia kuin päätuote. Vuonna 1913 öljynpuristamot tuottivat jo 2600 tonnia öljyä (Talvitie 1945b), joka vastaa 0,1 PJ:n energiasisältöä.

Maailman ensimmäinen mäntyöljytislaamo käynnistyi vuonna 1913 Gutzeitin Kotkan tehtaalla. Mäntyöljyjen tuotanto oli alkanut Suomen ensimmäisessä, vuonna 1886 perustetussa sulfaattisellutehtaassa vuonna 1886 165 tonnin vuosituotannolla. Vuonna 1945 mäntyöljyä tislattiin 3 laitoksessa 12.000–13.000 t/v eli lähes koko sulfaattisellutehtaiden tuotanto. Se laajeni 1980-luvun alkuun mennessä 155.000 t/v kapasiteettiin. (Haapaniemi 1983)

Risiiniöljy, rypsiöljy, pähkinäöljy, valaanrasva sekä naudan ja sian rasva olivat ennen raa-kaöljyn 1860-luvulla tapahtunutta käyttöönottoa yleisiä polttoaineita valaistuskäytössä yhdessä tärpätin, etanolin ja metanolin kanssa ja kamferia käytettiin osana kamfeenia (alkoholin ja tärpätin seos) (Kovarik 1998). Männyn neulasista valmistettiin puristamalla polttoöljyä 1800-1900-lukujen vaihteessa Ruotsissa ja USA:ssa (Metsälä 2000). Eläinrasvat ja kasviöljyt soveltuvat myös höyrykonekäyttöön ja olisivat periaatteessa ol-

leet käytettävissä liikennekäytössäkin jo 1700-luvulla, mutta on epävarmaa käytettiinkö niitä kyseisessä tarkoituksessa. Morey kuitenkin teki ensimmäiset polttomootoriliikennekokeilut niillä 1820-luvulla.

Sekä eläinrasvat että kasviöljyt kuuluvat samaan kemialliseen aineryhmään, triglyserideihin eli rasvahappojen triestereihin ja ne soveltuvat myös liikenteen energialähteiksi. Hyönteisvaha on kemialliselta koostumukseltaan näistä poikkeava, pääosin hiilivedyistä, estereistä ja alkoholeista koostuva heterogeeninen kiinteä aine. Vaikka myös hyönteisvahat ovat teknisesti mahdollisia liikenteenkin käytössä, ne tuskin voivat tarjota kuin korkeintaan lisäaineita, koska resurssi ei ole suuri ja niillä on muita arvokkaampia käyttösovelluksia.

Kasviöljyt ja eläinrasvat sopivat varsin korkean setaanilukunsa, noin 30–40, kompresiosytytteisten moottorien polttoaineeksi. Niiden suurin historiallinen panos oli käyttö dieselmoottorin ensimmäisissä polttoainekokeiluissa Rudolf Dieselin prototyypissä ja dieselmoottorin ensimmäisessä suurelle yleisölle tarkoitettussa esittelyssä. Vakolan testien mukaan ”Kasviöljyt ovat mielenkiintoisia siksi, että ne käyvät suoraan dieselmoottorin polttoaineeksi ja moottorin ominaisuudet kylmäkäynnistystä lukuunottamatta ovat samanlaiset kuin dieselöljyllä” (Ahokas 1987). Risiiniöljyä (castor oli) on perinteisesti käytetty voiteluaineena moottoripyörissä ja muissa 2-tahtimoottoreissa.

PPO100-kasviöljyä käytetään dieselmoottoripolttoaineena sekä linja-autoissa että henkilöautoissa erityisesti Etelä-Saksassa (Kuva 2.83). Ranskassa PPO100-kasviöljyä käytetään myös dieselveturien polttoaineena. EU:ssa PPO on kolmanneksi eniten käytetty liikennebiopolttoaine biodieselin ja etanolin jälkeen. Sen osuus liikennebiopolttoaineiden käytöstä vuonna 2008 oli 4 % vastaten 0,7 miljoonan öljylitran energiasisältöä (EurObserv'ER 2009).



Kuva 2.83. Liikennekasviöljyä kuljettava rekka moottoritiellä Frankfurtin lähellä. [2007]

2.20 SÄHKÖ (1800-LUKU)

Sähkö tunnettiin jo antiikin Kreikassa, mutta sitä ei ilmeisesti käytetty kuin demonstraatioihin. Käyttökelpoiseksi sähkö saatiin Galvanin ja Voltan 1700-luvun työn sekä erityisesti Faradayn, Plantén, Teslan ja Siemensin 1800-luvun innovaatioiden ansiosta. Ensimmäiset sähköautot ja sähköveturit rakennettiin jo 1830-luvulla, mutta vasta Edisonin integroitu DC-sähkövoimalaitostekniikka 1880-luvulla ja Westinghousen ja Teslan AC-sähkövoimalaitostekniikka 1890-luvulla mahdollistivat todella toimivat liikennejärjestelmät (Patterson 1999).

Sähkömoottorin ensimmäinen ja nykyäänkin merkittävin liikennesovellus on raideliikenne (Kuva 2.84). Sähkövetureita kokeiltiin 1830-luvulta alkaen ensiksi Skotlannissa ja USA:ssa (Westbrook 2005). Aluksi sähkö saatiin kemiallisista pattereista, ja 1860-luvulta alkaen myös ladattavista akuista. Molemmat teknologiat yhdessä silloisten varsin alkeellisten sähkömoottoreiden kanssa rajoittivat raideliikenteen paikallisiin erikoissovelluksiin 1880-luvulle asti ja merkityksellinen henkilöliikenne alkoi 1890-luvulla sähkön jakelujärjestelmien kehittyessä. Akkukäyttöiset raitiovaunut olivat käytössä esimerkiksi New Yorkissa vielä 1900-luvun alussa (Kirsch 2000) ja akkusähköjunia oli käytössä vielä 1950-luvulla.



Kuva 2.84. Varhaisia ruotsalaisia vesivoimakäyttöisiä raideajoneuvoja Tukholman liikennelaitoksen museossa: a) Sähköjunan vaunu vuodelta 1893. b) Sähköraitiovaunu vuodelta 1901. Molemmat saivat sähkön radan yläpuolisista kaapeleista. [2007]

Varastointiongelmasta ja myös paristojen ja akkujen painosta ja tilantarpeesta päästiin eroon tuomalla sähkö johtimilla ajoneuvon ulkopuolelta. Ensimmäinen matkustajasähköjuna, jonka Siemens otti demonstraatiokäyttöön vuonna 1879 Berliinissä (Kuva 2.85), sai sähkön junan alapuolisesta kaapelista, ns. kolmannesta raiteesta. Samaa tekniikkaa sovellettiin Siemensin ensimmäiseen kaupalliseen höyrykonekäyttöiseen sähköraitiotielinjaan Berliinissä vuonna 1881 sekä ensimmäiseen vesivoimakäyttöiseen raitiovaunu- ja rautatielinjaan Irlannissa vuonna 1883 (Klapper 1961). Sitä käytetään edelleen harvinaisena joissakin paikallisjunissa mm. Berliinissä, mutta metroissa se on yleinen ratkaisu, esimerkiksi Tukholmassa ja Helsingissä.



Kuva 2.85. Siemensin ja Halsken sähköjuna vuodelta 1879 Münchenin liikennetekniikan museossa. [2007]

Ensimmäinen raitiovaunu yläpuolisilla kaapeilla demonstroititiin belgialaisen Charles van Depoelen tekniikalla vuonna 1883 Chicagossa ja se tuli kaupalliseen käyttöön vuonna 1885 South Bendissä Indianassa 15 hv:n sähkömoottoreilla (Prentice 2007). Tämä tekniikka tuli käyttöön myös junissa 1890-luvulla ja on nykyään yleisin raideliikenteen sähkönlähde. Se on paljon alapuolisia kaapeleita kalliimpi ratkaisu, mutta aiheuttaa selvästi pienemmän turvallisuusrisikin. On myös olemassa ylä- tai alapuolisia kaapeleita käyttäviä sähköjuna, joissa on lisäksi pieni lämpövoimakone tai vauhtipyörä, jonka avulla ne voivat käyttää sähköistämättömiäkin rataosuuksia.

Sähköjunat ovat jo yli vuosisadan ajan olleet suorituskykyisimpiä henkilöliikennevälineitä. Saksalainen Siemens & Halsken juna saavutti 210 km/h nopeuden vuonna 1903 (Hughes 2005). Ranskalainen 19,6 MWe:n AGV-sähköjuna, jolla on kaksinkertainen teho normaaleihin reittiliikenteen TGV-juniin verrattuna, saavutti nykyisen sähköjunien nopeusennätyksen 574,8 km/h vuonna 2007 (Barrow 2007). Se on vain niukasti alle japanilaisen maglev-junan vuodelta 2003 peräisin olevan kaikkien junien nopeusennätyksen 581 km/h. Tavanomaisessa henkilöliikenteessä on vuodesta 1988 alkaen käytetty yli 300 km/h nopeuksia useissa maissa (Hughes 2005), mikä tarkoittaa, että junat ovat nopeampia kaupunkien keskustojen välillä mitatussa matka-ajassa kuin lentokoneet vielä useiden satojen kilometrien matkoilla.

Sähkö voidaan kaapelien sijaan siirtää sähkömagneettisesti pitkilläkin etäisyyksillä esimerkiksi mikroaaltojen, maserin tai laserin avulla. Tämä demonstroititiin ensimmäisen kerran vuonna 1964 lähettämällä maasta mikroaaltoja mallihelikopteriin, mutta todellisessa liikennekäytössä se ei ole. Lyhyellä matkalla sähkö voidaan siirtää magneettisesti, kuten maglev-junissa tehdään. Samaa menetelmää sovelletaan myös akkujen lataukseen pysäkeillä tai varikoilla.

Sähkö voidaan myös tuottaa ajoneuvossa lämpövoimakoneilla, jolloin sähkön varastoinnin sijaan ajoneuvon varastoidaan polttoainetta. Ainakin dieselmootoreita, ottomootoreita, höyrykoneita, höyryturbiineita ja kaasuturbiineita on käytetty tässä tarkoituksessa vetureissa, rekoissa, laivoissa ja henkilöautoissa. Tällaisia ajoneuvoja kutsutaan nykyisin sarjahybrideiksi. Ensimmäinen toteutus oli Ranskassa vuonna 1893 valmistunut höyrykone-sähköveturi. Diesel-sähkövetureita alettiin valmistaa vuonna 1917 ja ne ovat nykyään yleisimpiä vetureita. Kuljetuskyvyltään suurimpia junia ovat Länsi-Australian jopa 8 veturista koostuvat yli 30 MW:n diesel-sähkö-rautamalmijunat, joiden ennätyskuorma on ollut 82.000 t (Hughes 2005). Se ylittää lähes kaikkien laivojen kantokyvyn super-tankkereita (100.000 – 490.000 t) lukuun ottamatta.

Sähköautoilla on yhtä pitkä historia kuin sähköjunilla eli ensimmäiset koeautot rakennettiin 1830-luvulla ensin paristokäyttöisinä ja 1860-luvulta alkaen akkukäyttöisinä (Westbrook 2005). Akuista muodostui autoille ylivoimaisesti yleisin sähkön lähde (Kansikuva 2, Kuva 2.86b). Yläpuolisia johtimia on myös käytetty vuodesta 1882 ja edelleen käytetään bussiliikenteessä. Suomen ensimmäinen johdinbussi (Kuva 2.86a) otettiin käyttöön Tampereella vuonna 1948. Johdinbuseja oli enimmillään 1960-luvun alussa Helsingissä käytössä 26, mutta niiden liikennöinnistä luovuttiin vuonna 1985 (Tolmunen 2006).



Kuva 2.86. Sähköbussien sähkö voidaan saada kaapelin kautta tai ajoneuvossa olevista akuista: a) Suomen ensimmäinen, pääasiassa vesivoimakäyttöinen, johdinbussi, joka aloitti liikennöinnin Tampereella vuonna 1948, näytteillä Tampereen Vapriikki-museossa. b) Delhin kaupunkiliikenteen akuilla varustettu sähköbussi. Akut ovat kuvassa näkyvissä matkatavaratilassa. Niitä ladataan sekä sekaenergialla että aurinkosähköllä. [2007, 1997]

Sähköakku mahdollistaa energian kuljettamisen auton mukana ja lataamisen esimerkiksi tavanomaisilla huoltoasemilla kuten Tukholmassa vuonna 2003 otetussa kuvassa 2.87 nähdään. Kuvan huoltoasemaa, joka sijaitsi aivan päärautatieaseman vieressä, ei enää ole, mutta muualla Tukholmassa sähkön pikalatausasemia edelleen on.



Kuva 2.87. Tukholmalainen biokaasua, etanolia ja ekosähköä myyvä huoltoasema. Pikalatausasemasta saatava sähkö on Stockholms Energin Bra miljöverksam -sertifioitua ekosähköä eli tuulivoimaa, biovoimaa tai vanhaa vesivoimaa. [2003]

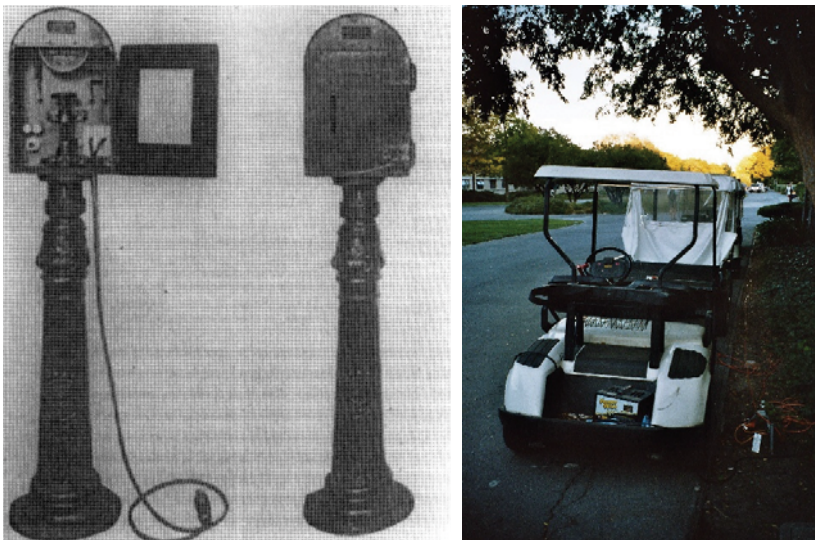
Huoltoasemalataus mahdollistaa sähköautoille juuri samanlaisen energiainfrastruktuurin kuin tavanomaisia polttoaineita käyttäville autoille. Mutta koska sähköverkko on tiheä, sähköautoille voidaan teknisesti helposti toteuttaa kertalukuja laajempi latauspisteinfrastruktuuri. Lataaminen voidaan tehdä huoltoasemien lisäksi kotona, työpaikalla ja julkisilla tankkausasemilla esimerkiksi katujen varsilla ja parkkipaikoilla. Tällöin ei vaadita pikalatausjärjestelmää, vaan huomattavasti halvempi tavanomainen latausnopeus riittää. Halvimmat kotien latausasemat ovat tyypillisesti tarkoitettu yön yli kestäväan lataukseen.

Vesivoimakäyttöisiä sähkövaunuja 80 km latausvälillä oli käytössä 1920-luvulla Helsingin rautatieasemalla (Talvitie 1930) ja ne palasivat vuonna 2007, joskin latausväli on pudonnut 30 km:iin, ne käyttävät fossiilista sähköä uusiutuvan sijaan ja ovat sähköavusteisia eli edellyttävät myös polkemista (Kuva 2.88).

Parkkimittaritolpan ja moottorilämmitystolpan näköiset kadunvarsilatausasemat otettiin käyttöön 1890-luvulla (Kuva 2.89a). Niitä oli vuonna 1899 eniten Ranskassa: 265 kpl (Hiscox 1900). Ne mahdollistivat lataukset pysäköinnin aikana sekä katujen varsilla että pysäköintialueilla. Niiden avulla voitaisiin toteuttaa myös moottorin lämmitys. Vielä parempi ratkaisu Suomen olosuhteissa olisi muuntaa olemassa olevat moottorilämmitystolpat myös akkujen latauspisteiksi, jolloin niitä saataisiin helposti suuri määrä, koska valmis moottorilämmitystolppien infrastruktuuri on hyvin suuri.



Kuva 2.88. Saksalaisvalmisteisia sähköavusteisia 250 watin sähkömoottorilla varustettuja Velotaxi-riksoja Helsingin rautatieasemalla toukokuussa 2007. Matkustajan istuimen alla olevat akut ladataan Helsingissä tuotetulla kivihiili- ja maakaasusähköllä, joten vain polkemalla tuotettu energia on bioenergiaa. Samanlaiset polkutaksit tulivat samaan aikaan käyttöön myös Tallinnassa, öljyliuskesähköllä ladattavina. [2007]



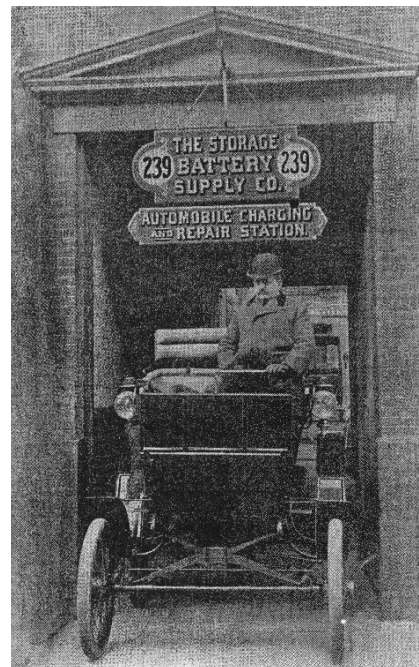
Kuva 2.89. Sähköautojen kadunvarsilatausasemia: a) Vuosimallin 1915 latausasema Electrical World -lehden 16.1.1915 numerossa (Kirch 2000). b) Vuonna 1998 Palo Altossa Kaliforniassa. [1998]

Työpaikoilla ja kotona on mahdollisuus valita sähköntuotannossa käytettävät energialähteet. Uusiutuvia energialähteitä voidaan nykyisillä vapailla sähkömarkkinoilla hyödyntää helposti. Sen lisäksi voidaan myös rakentaa esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmä lataukseen kuten kuvan 2.90 esimerkissä.



Kuva 2.90. a) Sacramento'n kunnallisen sähköyhtiön (SMUD) pääkonttorin pihassa oleva katettu parkkialue, jonka päällä olevia aurinkopaneeleita käytetään sähköautojen pysäköinnin aikaiseen aurinkosähkölataukseen ja samalla aurinko- ja sadesuojana. Sähköautojen omistajilla on tyypillisesti SMUDin toimittama aurinkolatausjärjestelmä myös kotonaan. b) Latauksen kontrollilyksikkö. [2004]

Akkujen lataukselle paikallaan autossa on vaihtoehtoja, joista yksi on tyhjentyneiden akkujen vaihto ladattuihin keskitetyssä latauskeskuksessa (Kuva 2.91). Tämä tekniikka oli käytössä useiden kaupunkien sähkötaksiyhtiöissä USA:ssa ja muissakin maissa 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alussa ja se on otettu uudelleen käyttöön ainakin Australiassa. Esimerkiksi New Yorkissa Electric Vehicle Company harjoitti sähkötaksiliikennettä parhaimmillaan 600 sähköautolla vuosina 1897–1912. Sen lisäksi harjoitettiin sähköautojen vuokrausta, jossa palveluun kuuluivat huolto, mukaan lukien akkujen vaihtopalvelu latauskeskuksissa. Latauskeskuksia perustettiin paitsi kaupunkiin myös joidenkin kaupunkien väleille mahdollistaen niiden välisen sähköautoliikenteen paitsi takseille myös yksityisomistuksissa oleville autoille. Sähkötaksiliikenne loppui aikoinaan lähinnä monien ei-tekniisten, mutta myös joidenkin tekniisten syiden takia. Jälkimmäisistä tärkein oli silloisten sähköakustojen lyhyt 16–32 km latausväli, joskin oli myös autoja, jotka ajoivat Atlantic Cityn ja Philadelphian 100 km väliä yhdellä latauksella. (Kirsch 2000)



Kuva 2.91. Sähköautojen latausasema New Yorkissa 1890-luvulla (Hiscox 1900). Asemalla vaihdettiin koko akusto ja auto oli valmis liikenteeseen 70 sekunnissa.

Toinen vaihtoehto on Jacob Lohnerin ja Ferdinand Porchen vuonna 1899 kehittämä otto-sähköautotekniikka eli akkujen lataus lämpövoimakoneella auton liikkessa ja sähkömoottoreiden käyttö kaikissa pyörissä eli nelipyörävetoisena (Prentice 2007). He kehittivät sen alun perin henkilöautoon ja myöhemmin kuorma-autoon. Tämä menetelmä saavutti suuren kaupallisen menestyksen diesel-sähköveturitekniikassa.

Kolmantena, kaikkein uusimpana, vaihtoehtona on bussien ja raitiovaunujen akkujen lataaminen langattomasti pysäkkien alla olevasta akustosta magneettisesti. Akkujen sijaan kondensaattoreita käytetään sähköbussien ainoana energiavarastona ainakin Shanghaisissa. Ne varataan jokaisella bussiasemalla pohjan kautta.

Kaupallisia sähköautoja (Kuva 2.92) valmistivat ensimmäisenä Magnus Volk Englannissa vuonna 1888 ja William Morrison USA:ssa vuonna 1890. USA:n johtava sähköautojen valmistaja Columbia (Kuva 2.92a) oli vuosina 1899 ja 1900 maan suurin autonvalmistaja, siis edellä kaikkia höyrykone- ja polttomoottoriautoyhtiöitä (Georgano 1985). Sähköautoja valmisti enimmillään USA:ssa yli 100 yritystä ja niiden myyntihuippu ajoittui vuosiin 1910–1915, kymmeniä tuhansia vuodessa. Ruotsissakin sähköautoteollisuus syntyi varhain: Atlas-yhtiö valmisti ensimmäisen sähköauton vuonna 1900 (Svallner 1981). Verrattakoon tätä Suomen tilanteeseen: huolimatta sähkötekniikan nopeasta siirtymisestä Suomeen 1800-luvulla (Myllyntaus 1991) sähköautoja ei aloitettu valmistamaan ennen kuin öljykriisien seurauksena 1970-luvulla (Kansikuva 2). Sähköautoja kuitenkin ryhdyttiin tuomaan Suomeen 1900-luvun alussa, esimerkiksi Helsingin palokunnan ensimmäiseksi autoksi vuonna 1909 (Stolze 1983). Suorituskyvyssä varhaiset sähköautot olivat kilpailukykyisiä. Jamais Contente-sähköauto kuljettajanaan belgialainen Camille Jenatzy saavutti ensimmäisenä auton yli 100 km/h (105,9) nopeuden vuonna 1899 (Bird 1967). Kaikki sitä aiemmatkin autojen viralliset nopeusennätykset olivat sähköautojen nimissä.



Kuva 2.92. Varhaisia sähköautoja: a) Columbia vuosimallia 1900 Speyerin tekniikan museossa Saksassa. b) Mobile vuosimallia 1900 Münchenin liikennetekniikan museossa. c) Mummo-ankan auton suomalaisillekin tunnetuksi tullut Baker vuosimallia 1908 Münchenin liikennetekniikan museossa. [2007]

Sähköautojen etu polttomoottoriautoihin oli käynnistyksen nopeus, käytön yksinkertaisuus, tärinättömyys, savuttomuus ja hiljaisuus (Hiscox 1900). Näistä syistä ne olivat erityisesti naisten suosiossa: esimerkiksi Henry Fordin vaimo Clara Ford hankki vuonna

1914 sähköauton, koska hänen mukaansa ”Henryn autot ovat liian meluisia” (Anderson & Anderson 2005). Polttomoottoriautojen sähkökäynnistyksen myötä käynnistyksen helppouden etu poistui sähköautoilta 1910-luvulla, mutta kaikki muut edut ovat nykyäänkin olemassa. Haittapuolina polttomoottoriautoihin verrattuna olivat lyhyt käyttösaade, akkujen paino ja sähköön kalleus (Hiscox 1900). Näistä kaksi ensimmäistä pätevät edelleen, mutta sähköön hinta on nykyään laskenut selvästi, joten se on nykyään kääntynyt merkittäväksi eduksi. Sähköhenkilöautojen latausväli oli 1800-luvun lopulla silloisella lyijyakkutekniikalla parhaimmillaan 160 km ja sähkökuorma-autoilla se oli 60 km (Hiscox 1900). Se ei ole paljonkaan parantunut nykyisillä lyijyakkuautoilla, joten lyijyakun korvaaminen muilla akkutyypeillä on oleellista. Esimerkiksi Litium-ioniakuilla henkilöauton latausväli saadaan yli kaksinkertaiseksi painon nousematta. Vähittäisjakelu, kuten maitoautot ja posti, ovat olleet tärkein sähköauton sovellus, joka on jatkunut keskeytyksettä näihin päiviin asti.

Sähkömoottorien käyttökokeilut vesiliikenteessä alkoivat 1830-luvulla kuten auto- ja veturikokeilutkin (Westbrook 2005). Sähköistetty ilmaliikenne alkoi vuonna 1883 Albert ja Gaston Tissandierin rakentamassa ilmalaivassa, jossa oli Siemensin 1,5 hv sähkömoottori (White 1978). Maailman ensimmäinen täysin kontrolloitava ilmalaiva, vuonna 1884 ensilentonsa tehnyt La France, oli sähkökäyttöinen, voimanlähteenään 8,5 hv sähkömoottori. Sukellusvenekäyttöön sähkö tuli vuonna 1885 ja siinä sovelluksessa sähkömoottorit ovat oleellisen tärkeitä nykyäänkin (Huchinson 2001).

Sähkömoottorin sovellusalue on laajempi kuin minkään muun moottorityypin. Sitä voi käyttää mikro- tai jopa nanosovelluksissa, joissa teho on watin murto-osa, mutta se on käyttövoimana myös maailman suurimmissa liikkuvissa työkoneissa, avokaivoksilla käytettävissä 13.500 tonnia painavassa Krupp Bagger 293 -kaivurissa, jonka sähkötehon tarve on 20 MW_e ja samanpainoisessa MAN TAKRAF F60 -siltakaivurissa, jonka sähkötehon tarve on 27 MW_e. Molemmat saavat sähköön kaapelin kautta. Tarvittaessa sähkömoottoreiden koko voidaan vielä näistä 100-kertaistaa, sillä maailman suurimmat voimaloiden sähkögeneraattorit ovat 2000 MW_e tehoisia ja ne voivat periaatteessa toimia myös moottoreina. Tämä teho on noin 10-kertainen kaikkein suuritehoisimpiin laivoihin verrattuna, 20-kertainen maailman suurimpiin polttomoottoreihin (2-tahtidiesel) verrattuna ja 6-kertainen verrattuna suunniteltavan 1500 metrin pituisen 50.000 ihmisen kotina toimivan Freedom Ship -asuntolaivan tarpeisiin. Liikennevälineistä suurempia teho vaatimuksia on vain avaruusraketeilla.

Sähkö mahdollistaa myös tavanomaisista ajoneuvosta poikkeavia liikkumisjärjestelmiä kuten esimerkiksi liukuportaat, -käytävät ja hissit (Kuva 2.93), epätavanomaiset autot, pyörätuolit ja sähköinen viestintä. Otis-yhtiö demonstroi ensimmäisenä liukuportaat vuonna 1900 Pariisin maailmannäyttelyssä. Hisseillä on pitkä historia 200-luvulta eaa alkaen käyttövoimana ensin ihmis- ja eläinlihasvoima sekä vesivoima ja 1800-luvun puolivälistä höyryvoima. Sähköhissin valmisti ensimmäisenä Werner von Siemens vuonna 1880.



Kuva 2.93. Tavanomaisista liikennevälineistä poikkeavia sähkömoottorikäyttöisiä liikkumisvälineitä: Liukuportaat (a), hissi (b) ja Segway i2¹ (c) Jyväskylässä [2009] sekä futuristinen suurnopeusrullatuoli Toyota i-unit Lontoon tiedemuseossa (d). [2007]

Tulevaisuudessa myös vaakasuorat hissit saattavat olla mahdollisia. Niillä tarkoitetaan hissikopin tapaisia automaattisia modulaarisia liikkumisyksiköitä, jotka voivat kuljettaa tiettyihin pisteisiin kaupungissa. Liukukäytävät, jotka ovat nykyään yleisiä lentokentillä, voivat tulla tulevaisuudessa laajempaankin käyttöön esimerkiksi kaupunkien jalkakäytävillä. Nämä uudet liikkumismuodot lisäävät sähkön kulutusta korvaamalla kävelyä tai fossiilisilla polttoaineilla ajamista. Modernit hissit eivät enää käytä hyväkseen vastapainon avulla aikaansaattua gravitaatiota, joten sellaiset ratkaisut lisäävät sähkön kulutusta.

Sähkömoottori on ainut mekaanisen liikenteen voimanlähde muilla taivaankappaleilla. Mekaaninen kuuliikenne alkoi vuonna 1970 aurinkokennokäyttöisellä miehittämättömällä sähköajoneuvolla ja ensimmäinen miehitetty kuuauto vuonna 1971 oli patterikäyttöinen (Angelucci & Bellucci 1974). Planeettaliikenne aloitettiin aurinkokennokäyttöisellä sähköajoneuvolla vuonna 1997 Marsissa.

Nykyään lähinnä teoreettisella tasolla olevat avaruushissit (Bolonkin 2006) voisivat korvata rakettimoottorit maan pinnan ja maapallon kiertoradan välisessä liikenteessä. Kyseessä olisi esimerkiksi laserin avulla hissien korin aurinkopaneelille lähetetty aurinkovoima, jota käytettäisiin joko sähköisesti tai magneettisesti. Sähkömagneettisen tykin periaatteella toimiva laukaisin olisi myös periaatteessa mahdollinen hyötykuorman kuljettamiseen maapallon kiertoradalle ja jopa ulkoavaruuteen.

2.20.1 Sähkömoottori, -akku ja kondensaattori

Paristo saatettiin keksiä jo antiikin aikana. Vuonna 136 löytynyt Bagdadin paristo ajoitetaan hyvin epävarmasti vuosien 250 eaa ja 640 väliin. Se on joka tapauksessa hyvin vanhaa perua, mutta tieto siitä katosi eikä muita kappaleita eikä kirjallisia viittauksia ole löytynyt, joten sen käyttötarkoituksia voidaan vain arvailla. Staattinen sähkö meripihkan ja monien muiden aineiden synnyttämänä oli kuitenkin tuttua antiikin Kreikassa jo noin 1500 eaa alkaen ja periytyi myöhemmillekin kulttuureille. Sähköparin keksi uudelleen Luigi Galvani vuonna 1780 ja useasta parista koostuvan pariston Alessandro Volta vuonna 1799 (Kuva 2.94a).



Kuva 2.94. a) Voltan paristo 1800-luvun alusta Arts et Métiers -museossa Pariisissa. b) Japanilaisia litium-ioni-akkuja Frankfurtin autonäyttelyssä. [2007]

Voltan keksintö on akkujen perustana. Sitä ei kuitenkaan voitu uudelleenladata, joten se ei ollut akku eli sähkökemiallinen energiavarasto, vaan sähkökemiallinen energianlähde, kuten modernit kuivaparistot. Se oli märkäparisto johtuen nestemäisestä elektrolyytistä erotuksena Frederik Helleseenin vuonna 1887 keksimästä kuivaparistosta, jollainen on nykyään määrällisesti yleisin sähkökemiallinen laite. Ensimmäinen ladattava patteri eli akku oli Gaston Plantén vuonna 1859 rakentama lyijyakku, joka edelleenkin on tavallisten autojen ainoa ja sähköautojen yleisin akkutyyppejä, vaikka myöhemmin on kehitetty lukuisia muitakin akkutyyppejä. Modernin lyijyakun hyötysuhde on 75–85 % eli varastointi hukkaa 15–25 % alkuperäisestä sähköenergiasta (Taulukko L6.4). Parhaimpien, 1990-luvulla markkinoille tulleiden, litium-ioni-akkujen (Kuva 2.94b) hyötysuhde on peräti 99 %, energiatiheys (energia/akun massa) viisinkertainen lyijyakuun verrattuna ja hyvin alhainen myrkyllisyys päinvastoin kuin lyijyakulla ja useimmilla muilla akkutyypeillä. Niitä käytetään nykyään paljon erityisesti kännyköissä ja kannettavissa tietokoneissa, mutta myös uudessa Tesla Roadster -sähköurheiluautossa, jonka 56 kWh akuston latausväli on jopa 400 km ja latausaika 3,5 h (Lerner 2007, Kuva 2.95). Tesla-yhtiö on yhteistyössä aurinkosähköyhtiön kanssa, joka asentaa auton ostajien koteihin aurinkopaneelilatausjärjestelmiä. Myös tehoalueen vastakkaisesta päästä löytyvä norjalainen Think-sähköauto käyttää samanlaisia akustoja (Woody 2007).

Kondensaattori on väliaikaiseksi sähkövarastoksi sopiva, erittäin nopeasti latautuva ja purkautuva laite, jonka valmisti ensimmäisenä Pieter van Musschenbroek vuonna 1745. Hänen työpaikkansa mukaan sitä nimitetään Leydenin ruukuksi. Sitä ladattiin alun perin Otto von Guerichein vuonna 1663 keksimällä staattisella sähkögeneraattorilla ennen dynaamisten sähkögeneraattoreiden keksimistä 1830-luvulla. Sen toimintaperiaate ei ole sähkökemiallinen, kuten sähköparien, sähköparistojen ja sähköakkujen, sillä kemiallisia reaktioita ei siinä tapahdu. Se on hyötysuhteeltaan erittäin hyvä, 90–95%. Parhaimmillaan sähköajoneuvokäytössä olevista ultrakondensaattoreista saadaan useiden kilowattien



Kuva 2.95. a) Pakoputket puuttuvat 248 hv:n Tesla Roadster -aurinkosähköautosta. [Wikipedia, Creative Commons Attribution ShareAlike 2.0 License] b-d) 56 kWh Li-ioniakuston lataus (Tesla 2007).

teho kg kohti, joka on luokkaa 100-kertainen akkuihin verrattuna. Mutta energiatiheys on puolestaan vain prosentteja akkuihin verrattuna, josta syystä ne eivät yleensä sovelu ainoaksi energianlähteeksi. Mutta ne soveltuvat johdinajoneuvojen ainoaksi energia-varastoksi, johon voidaan ladata myös jarrutusenergiaa ja joka pystyy antamaan suuret tehot kiihdytyksessä ja ylämäissä. Poikkeuksena Shanghaissa on kondensaattoribusseja, joissa ei ole johtimia eikä akkuja, vaan kaikilla bussipysäkeillä automaattisesti ladattavat kondensaattorit. Kondensaattoreiden ominaisuudet soveltuvat myös kipinäsytytteisten moottorien sytytykseen: ne ovat CDI-sytytysjärjestelmien (Capacitative Discharge Ignition) perusta. Sähkön ja muiden energiamuotojen varastoja on vertailtu liitteen 6 taulukossa L6.4.

Sähkön saattaminen ajoneuvokäyttöön edellyttää sähkömoottoria, jonka Ørstedin ja Faradayn työ sähkömagneettisen induktion 1820-luvulla parissa teki mahdolliseksi. William Sturgeon ja Thomas Davenport rakensivat ensimmäiset käytännössä toimivat DC-sähkömoottorit 1830-luvulla ja mahdollistivat ensimmäiset liikennesovellukset. Nykyään liikennesovelluksissa käytetään usein AC-sähkömoottoria, jonka kehitti Nikolai Tesla 1880-luvulla ja joka saatiin markkinoille vuonna 1888. Moderneissa ajoneuvokokoluokassa käytettävissä sähkömoottoreissa on 95 % hyötysuhde (Caselotti ym. 2000) eli kaksinkertainen parhaisiin lämpövoimakoneisiin verrattuna, kolminkertainen dieselautojen moottoreihin ja nelinkertainen bensiiniautojen moottoreihin verrattuna. Esimerkiksi Tesla Roadsterin 248 hv AC-moottori antaa 0–100 km/h kiihtyvyyden 4 sekunnissa (Lerner 2007), johon ottomoottoriurheiluautoit pystyvät vasta yli 500 hv tehoilla. Mutta sen keskikulutus bensiinilitraekvivalentteina on vain 1,4 l/100 km eli se kulkee 100 km yhdellä eurolla, johon verrattuna tavallisten bensiini- ja dieselautojen polttoainekustannukset ovat 5–10-kertaiset ja samaan suorituskyykyyn pystyvillä urheiluautoilla 20-kertaiset.

2.20.2 Hydraulimoottori ja -akku

Luonnollista vesivoimaa on käytetty liikenteessä esihistorialliselta ajalta lähtien ja vettä on osattu ohjata vesihuoltojärjestelmissä ja käyttää hydraulimoottoreissa antiikin ajoista alkaen. Nykyään hydrauliiikkaa käytetään lähes kaikissa liikkuvissa työkonneissa ja rekoissa oheislaitteiden käyttämiseen. Mutta hydraulimoottorien käyttö itse ajoneuvon voimanlähteenä on 1900-luvun saavutuksia. Se on eräs hybridiajoneuvoissa käytössä olevista moottorivaihtoehdoista, joka voi olla rakenteeltaan esimerkiksi mäntämoottori tai kiertomäntämoottori, mutta useita muitakin rakenteita on kaupallisesti saatavilla. Sisu valmisti hydraulimoottoreita kaupallisesti mm. perävaunujen pyöriin asennettaviksi vuosina 1964-1999 Ilmari Louhion 1950-luvun lopulla kehittämän moottorin pohjalta (Blomberg 2006).

Hydraulimoottori käyttää hyväkseen hydraulista akkua, johon energiaa voidaan ladata ulkopuolisesta lähteestä, ajoneuvon poltto- tai sähkömoottorilla tai jarrutusenergialla. Akussa hydraulineeste on varastoituna paineistettuna ja paine voidaan saada aikaan monilla eri keinoilla, kuten mekaanisilla painoilla ja jousilla tai paineistetulla kaasulla. Ensimmäinen suuri hydrauliakku, joka itse asiassa koostui 6 erillisestä akusta, otettiin käyttöön vuonna 1894 Lontoon Tower Bridgen nostosiltamekanismeissa. Hydraulineesteenä oli vesi ja painona kahdella 300 hv:n höyrykoneella nostetut suuret rautalevyt. Laite oli sellaisenaan käytössä vuoteen 1976, jolloin höyrykoneet korvattiin dieselkoneilla ja vesi hydraulijollilla.

Hydraulimoottoreilla on suuri teho/paino-suhde polttomoottoreihin verrattuna. Ne ovat ajonaikaisesti nollapäästöisiä eli mahdollistavat ZEV-luokan ajoneuvon, mutta todelliset päästöt riippuvat siitä, millä energialla akku on ladattu.

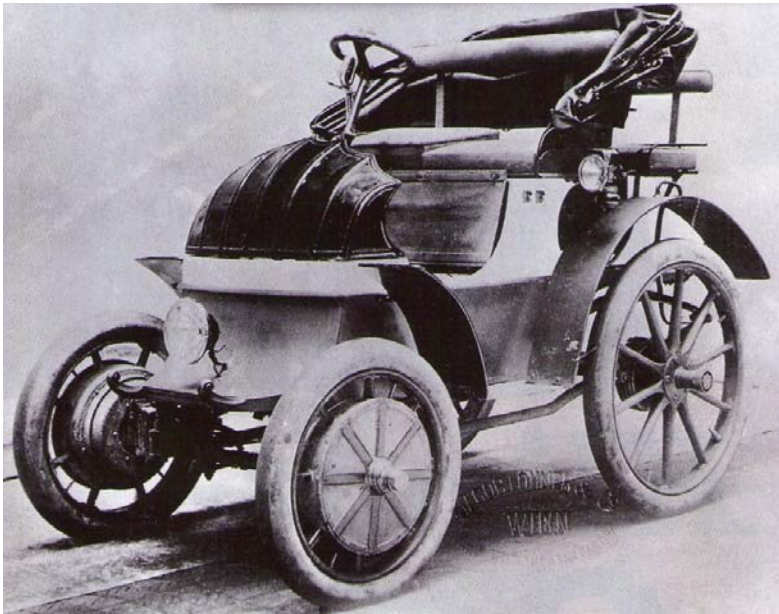
2.20.3 Sähköhybridit

Hybridiautoilla tarkoitetaan yleensä autoa, jossa on polttomoottori ja yksi tai useampi sähkömoottori. Esimerkkeinä ovat hybriditeknikan suuren yleisen tietoisuuden tuoneet 1990-luvulla markkinoille tulleet Honda Insight (Kuva 7.16, ei Suomen markkinoille) ja Toyota Prius (Kuva 6.18, Suomen markkinoille vuosikymmentä myöhemmin). Todellisuudessa hybridi-termi on monimuotoinen ja usein väärin ymmärretty. Asiaa tarkastellaan luvussa 6.6. Malliesimerkkinä hybridiajoneuvosta on biokaasuhybridibussi (Kuva 2.96), joka yhdistää joukkoliikenteessä erityisen korkeatasoisen polttoaineen erityisen korkeatasoiseen energiatehokkuusteknologiaan saavuttaen mopoa alhaisemman elinkaariko2-päästötason (Taulukko 7.3).

Ensimmäisen polttomoottori-sähkömoottori-hybridiauton valmisti Justus Entz vuonna 1897. Useita muitakin koehybridiautoja valmistettiin 1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa, mukaan lukien ranskalaisen Kriéger-yhtiön etanoli-hybridiauto vuonna 1903. Ferdinand Porsche kaupallisti ensimmäisenä otto-sähkö-sarjahybridiauton vuonna 1901 (Kuva 2.97). Pitkäaikaisin kaupallinen hybridiautovalmistaja oli englantilainen Tilling-Stevens, joka valmisti pääasiassa busseja (Georgano 1985). Tuotanto aloitettiin vuonna 1906 ja sitä jatkettiin 1950-luvun alkuun asti.



Kuva 2.96. Uppsalan kaupunkiliikenteen Neoplan-biokaasuhybridibussi. [2005]



Kuva 2.97. Ferdinand Porschen vuonna 1900 suunnittelema Lohner-Porsche-hybridiauto. Sähkömoottorit on sijoitettu etupyörien keskiöihin. Polttomoottori on bensiinikäyttöinen ottomoottori.

Otto-sähköhybrideillä on siis pitkä historia ja ne ovat edelleen yleisimpiä (Kuva 2.98).



Kuva 2.98. Sähkö-otto-sarjahybridibusseja kaupunkiliikenteessä: a) Tukholmassa liikennöinyt Scanian bensiinikäyttöinen hybridibussi vuosimallia 1993 Tukholman liikennemuseossa. [2007] b) Denverin keskustassa vuodesta 2001 alkaen liikennöinyt TransTeq:in maakaasukäyttöinen (CNG) hybridibussi. [2004]

Myös diesel-sähköhybridit ovat kaupallista teknologiaa (Kuva 2.99). Harvinaisempia ovat kaasuturbiinia, stirlingmoottoria, paineilmamootoria ja vauhtipyörää hyödyntävät hybridit (Suzuki 1997). Wankel-sähköhybridi on toistaiseksi vasta prototyyppiasteella Mazdan 5-mallin bensiini/vety-bifuel-versiossa.



Kuva 2.99. Dieselhybridibusseja esittelyssä kansainvälisessä joukkoliikennekonferenssissa Helsingissä: a) MANin kaupallinen dieselsarjahybridit. Biodieseliä tai synteettistä biodieseliä käyttäen tällä päästään erittäin alhaisiin päästötasoihin. b) Scanian etanolidieselhybridin prototyyppi. [2007]

Ladattavat hybridit (plug-in-hybrid) tarkoittavat sähköhybridiajoneuvoa, jonka akut voidaan ladata sähköverkosta (Boschert 2006). Ne ovat aitoja hybridejä, joissa liikevoiman lähteet ovat toisistaan riippumattomia (Luku 6.6). Niitä ei kuitenkaan vielä ole tehdasvalmisteisina markkinoilla. Uudessakaupungissa aletaan vuonna 2009 valmistaa ladattavaa Fisker Karma -urheiluautoa, joka kulkee 80 km latausten välissä. Mukaan on saatavissa omakotitaloihin asennettava aurinkokennolatausjärjestelmä. Tulossa on aurinkokennokatto, jolla akustoa voidaan ladata aina, kun auto on parkissa ulkona (Kuva

2.100). Vaihtoehtoisesti aurinkosähköllä voi käyttää ilmastointijärjestelmää, jolloin auto pysyy viileämpänä auringonpaisteessa. Autossa on myös bensiinimoottori, jota joutuu käyttämään, mikäli ajomatka latausten välillä on yli 80 km.



Kuva 2.100. Uudessakaupungissa vuodesta 2009 alkaen valmistettava Fisker Karma on ladattava ottosarjahybridi, jossa on mukana aurinkopaneelikatto (Fisker 2009). [© Fisker Automotive]

2.20.4 Sähköinen viestintä

Sähköisen viestinnän teknologiaa ehdotettiin ensi kerran 1750-luvulla ja sitä on käytetty kaupallisesti 1830-luvun lennättimistä lähtien (Kukkula 2005), ensin langallisena (Kuva 2.101a) ja 1890-luvulta alkaen myös langattomana radioaaltojen välityksellä (Kuva 2.101b).



Kuva 2.101. Lennätin (a) ja kidekoneita kiteiden kera (b) Petäjäveden radio- ja puhelinmuseossa. [2007]

Sähköinen viestintä on pieneltä osaltaan korvannut kirjeiden ja ihmisten liikkumista, mutta suurimmaksi osaksi luonut uutta viestintää, jota ei muutoin tapahtuisi. Siinä mielessä motorisoitu liikenne on samanlaista, sillä sekin on korvannut hieman muuta liikennettä, mutta pääasiassa luonut liikennettä, jota ilman sitä ei tapahtuisi. Erona on kuitenkin se, että mikäli nykyisin on vaihtoehtona sähköinen viestintä ihmisten ja materiaalin liikkumisen sijaan, sähköisen viestinnän avulla voidaan säästää hyvin suuri osa energiasta. Ja lisäksi se voidaan helposti toteuttaa uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetulla sähköllä.

2.21 PNEUMAATTINEN VOIMA (1800-LUKU)

Paineilmaa osattiin tuottaa käsipumpuilla ja hyödyntää vesisuihkujen tuottamiseen (Heronin lähde) ja muissakin mekaanisissa sovelluksissa jo antiikin aikana (Landels 1978). Se oli myös toisen tykin, Ctebiuksen paineilmatykin, käyttövoimana 200-luvulla eaa. Valitettavasti Ctebiuksen kaikki alkuperäiset kirjoitukset ja niiden kopiot ovat kadonneet, erityisesti Alexandrian kirjaston tuhoutuessa, ja siten tiedot niistä hänen lukuisista keksinnöistään, jotka eivät tulleet yleiseen käyttöön, ovat peräisin vain kadonneisiin teoksiin tehdyistä lainauksista. Myöhemmin, 1800-luvulta lähtien, paineilma on otettu liikennekäyttöön sekä kevyissä että raskaissa ajoneuvoissa.

Paineilman lisäksi ajoneuvoja voidaan liikuttaa alipaineella, painehöyryllä ja painekaasuilla. Nämä kaikki ovat ZEV-ajoneuvotekniikoita eli eivät tuota ajonaikaisia haitallisia päästöjä, paitsi painekaasujoneuvot siinä tapauksessa, että käytetty kaasu on haitallinen. Näiden kaikkien kokonaispäästöt riippuvat siitä, millä energianlähteellä paine tai alipaine on tuotettu.

Paineilmamoottoreissa paineilma on aina tuotettu jollain energialähteellä ja varastoitu eli se on sekundäärienergiaa. Sama pätee yleensä painehöyryyn ja painekaasuun, mutta ne voivat kuitenkin olla peräisin myös luonnollisesta geotermisestä tai maakaasulähteestä, jolloin kyse on primäärienergiasta, tai kemikaaleista, jolloin kyse on sekundäärienergiasta. Primäärinen painekaasu olisi teknisesti mahdollista varastoida ja käyttää liikennevälineissä, mutta niin ei liene ole käytännössä tehty. Normaali hyödyntämistapa geotermisille kaasuille on turbiinin pyöritys ja sähkön tuotanto sen avulla. Niiden mukana olevaa pientä määrää kemiallisiksi energianlähteiksi soveltuvia kaasuja ei yleensä hyödynnetä (poikkeuksena Islannin suunnitelmat geotermisen primäärivedyn hyödyntämiseksi). Maakaasulähteiden painetta puolestaan hyödynnetään raakamaakaasun pumppaukseen sekä siirtoon ja energianlähteeksi soveltumattomat kaasut kuten hiilidioksidi päästetään kaasun puhdistuksen yhteydessä ympäristöön (ainakin aiemmin myös energiakäyttöön soveltuvia raakamaakaasun komponentteja on yleisesti laskettu suoraan ympäristöön).

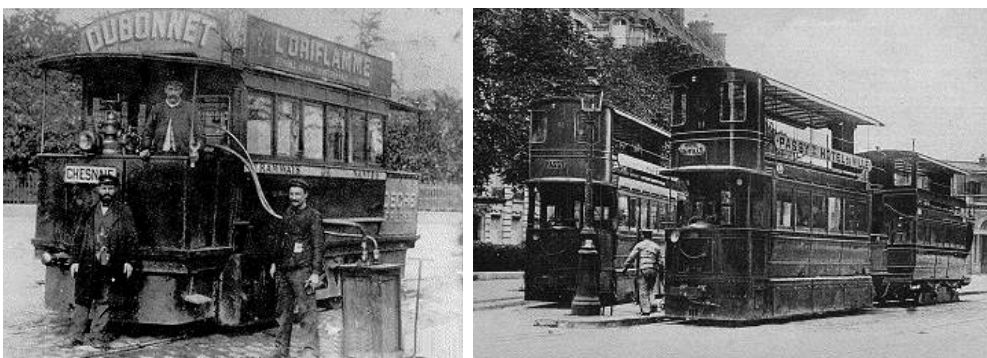
2.21.1 Paineilma-ajoneuvot

Moderni paineilmamoottori kehitettiin 1800-luvun alussa ja sen ensimmäinen liikennesovellus oli koeauto vuonna 1840. Paineilmamoottorilla oli suuri historiallinen merkitys sukellusvenetekniikassa. Se oli kellokoneiston jälkeen toinen käyttöönotettu mekaaninen sukellusvenemoottori vuonna 1863 valmistuneessa ranskalaisessa Le Plongeur

-sukellusveneessä (Hutchinson 2001). Se oli myös ensimmäisen torpedon voimanlähde vuonna 1866 ja on käytössä tässä tarkoituksessa edelleen.

Jules Verne (1863) kuvauksessa 1960-luvun Pariisista raitiovaunut olivat paineilma-käyttöisiä siten, että kompressointi 40-50 barin paineeseen tehtiin tuulivoimalla. Pariisin paineilmaraitiovaunuliikenne toteutui jo hänen elinaikanaan, mutta 1960-luvulla ne olivat jo kauan olleet unohduksissa.

Louis Mékarskin vuonna 1875 esittelemästä paineilmaraitiovaunusta tuli ensimmäinen kaupallinen paineilmamootorin liikennesovellus vuonna 1876 Nantesissa Ranskassa, jossa niitä oli käytössä enimmillään 94 (ja muita paineilmaraitiovauneita 13) vuosina 1876-1917 (Kansikuva 3). Paineilma tuotettiin 50 hv höyrykoneilla, siirrettiin paineilmaputkiston kautta huoltoasemille ja tankattiin raitiovaunujen mukanaan kuljettamiin tankkeihin aluksi 30-80 barin paineessa (Kuva 2.102a). Täysi tankki riitti 40 minuutin ajoon, jonka jälkeen tehtiin uusi 20 minuuttia kestävä tankkaus pääteasemilla. Paineilmamootorin käyttöpaine oli 5-10 bar. Paineilmaraitiovaunuja käytettiin kuudessa Ranskan kaupungissa, joista Pariisissa eniten. Pariisissa useimmat (148 kpl) olivat 40-50 hv:n kaksikerrosraitiovaunuja, jotka pystyivät vetämään myös perävaunua ylämäkeenkin (Kuva 2.102b). (Prentice 2007)



Kuva 2.102. Paineilmaraitiovaunuja tankkaamassa paineilmaa huoltoasemalla 1900-luvun alussa Ranskassa: a) Yksikerroksinen raitiovaunu Nantesissa, jossa niitä käytettiin pisimpään: 1876-1917. b) Kaksikerroksisia perävaunuilla varustettuja raitiovaunuja Pariisissa. (Prentice 2007)

Paineilmaraitiovaunuja käytettiin myös ainakin Englannissa, Sveitsissä ja USA:ssa. New Yorkin vuoden 1879 kokeilut ovat sikäli merkittävät, että jarrutusenergian talteenotto toteutettiin ensimmäisen kerran. Paineilma otettiin veturikäyttöön 1880-luvulla ja erityisesti kaivosveturi oli kaupallisesti suosittu sovellus: satoja vetureita myytiin tähän tarkoitukseen vuosina 1896-1930. Paineilmametroja oli Pariisissa liikenteessä 4 kpl vuosina 1901-1910. Vuonna 1929 Saksassa kehitettiin diesel-pneumaattinen veturi, joka liikkui paineilmalla, mutta se tuotettiin veturissa 1200 hv dieselmootorilla. Koska myös dieselmootorin hukkalämpö pystyttiin hyödyntämään ilman lämmitykseen, kyseessä on CHP-teknologian liikennesovellus. (Self 2007)

Paineilmaraitiovaunujen tankkausväli vaikuttaa nykynäkökulmasta lyhyeltä, mutta se oli kuitenkin huomattavasti pidempi kuin 10 minuuttia, jonka välein höyrykonekäyttöisten junien ja raitiotievaunujen kattiloihin oli lisättävä polttoainetta. Erona oli se, että höyrykattiloihin voitiin lisätä polttoainetta ajoneuvon liikkeessa.

Paineilman ensimmäinen lentosovellus oli Victor Tatinin mallilentokone vuonna 1879. Kiertömäntäpaineilmamoottori oli käytössä Lawrence Hargraven mallilentokoneessa vuonna 1889. August Herring rakensi paineilmamoottorilla varustetun, ihmisen kuljettamiseen tarkoitetun lentokoneen vuonna 1898, mutta teho ei riittänyt ilmassa pysymiseen.

Paineilmaa on sovellettu myös autoihin (Hiscox 1900). Englannissa valmistettiin 1880-luvulla 3-pyöräistä, joka oli varustettu myös käsipumpulla lihasvoimalatausta varten (Clymer 1953). Ranskalainen yhtiö MDI on tuomassa markkinoille sarjaa pieniä paineilma-autoja sekä paineilma-polttomoottorihybridejä (MDI 2007). Sarjan toiseksi pienin malli MiniCAT on kuvassa 2.103. Polttomoottori on mahdollisuus saada myös etanoli-, biodiesel- tai biokaasukäyttöisenä. Yhtiö tutkii ja tarjoaa erilaisia mahdollisuuksia uusiutuvan sähkön käyttöön kompressorissa.



Kuva 2.103. Moderni paineilmakäyttöinen MDI:n MiniCAT-auto, jossa on 25 hv paineilma-moottori ja 150 km tankkausväli. (MDI 2007).

Paineilmamoottorit ovat useimmiten mäntämoottoreita, mutta monia muitakin rakenteita on käytössä, mukaan lukien rakettimoottori, joka on ollut torpedoiden historiallisesti merkittävin voimanlähde. Paineilma on nykyään yleisessä käytössä monenlaisissa pienkoneissa, mutta harvinainen liikenteessä. Sitä käytetään kuitenkin joissakin sisätiloissa liikkuvissa työkaluissa ja mopautoissa eli korkeintaan 50 km/h kulkevilla erittäin kevyissä autoissa. Lisäksi paineilmaa on käytetty voimansiirtotekniikkana ajoneuvojen oheislaitteille. Se otettiin käyttöön junien jarruissa jo 1800-luvulla.

Paineilmamoottorin päästönä on vain ilmaa, joten se on yksi käytönaikaisesti päästöttömistä ajoneuvoteknologioista (ZEV). Nykyään kaikki paineilma-ajoneuvot, kuten koneetkin, kulkevat sähköllä kompressoitulla ilmalla, mutta 1800-luvulla käytettiin höyrykonetta ja edelleenkin kompressio on mahdollinen myös suoraan lämpövoimakoneella. Paineilma-ajoneuvon kokonaispäästöt riippuvat siis siitä, millä lailla kompressorin käyttämä sähkö tai mekaaninen voima on tuotettu. Paineilmavaraston hyötysuhde on luokkaa 60 % eli alempi kuin sähkökemiallisilla akuilla, kondensaattoreilla ja vauhtipyörillä, mutta sen energiatiheys on moninkertainen niihin verrattuna (Taulukko L6.4).

2.21.2 Alipaineajoneuvot

Pneumatiikan ensimmäinen kaupallinen liikennesovellus ei hyödyntänyt paineilmaa, vaan alipaineella aiheutettua imuvoimaa eli samaa liikevoimaa synnyttävää periaatetta, jolla atmosfääristen höyrykoneiden ja atmosfääristen polttomoottorien mäntiä liikutettiin. Kyseessä oli ensin kivilouhimon vaunuissa vuodesta 1842 alkaen ja sitten matkustaja- ja tavarajunissa vuosina 1843–1854 Irlannissa ja vuosina 1845–1848 Englannissa käytetty järjestelmä, jossa alipaine tuotettiin keskitetysti 5 km välein radalle sijoitetuissa höyrykonepumppaamoissa ja veturitonnat junat käyttivät sitä imuvoimana ratakiskojen välissä kulkevaan alipaineputkeen liittymällä (Hadfield 1967). Junat saavuttivat parhaimmillaan 110 km/h nopeuden. Atmosfäärijuna oli esikuvana 3. raiteen sähköajoneuvoille, joita on ollut käytössä vuodesta 1879 nykypäiviin asti. Tätä alunperin postiliikenteeseen vuonna 1810 ehdotettua tekniikkaa sovelletaan edelleenkin putkipostissa (Kuva 2.104).



Kuva 2.104. Putkipostijärjestelmä Münchenin liikennetekniikan museossa. Ensimmäinen putkipostijärjestelmä otettiin käyttöön Lontoossa vuonna 1854. [2007]

2.21.3 Painehöyryajoneuvot

Painehöyryn käytöllä on vielä pitempi historia kuin paineilmallalla: se ulottuu antiikin Kreikkaan 400-luvulle eaa. Paineistettua höyryä voidaan paineilman tapaan valmistaa keskitetysti ja tankata höyrykäyttöisiin ajoneuvoihin siten, että ajoneuvoissa ei tarvita kattilaa.

Tällaisen ratkaisun toteutti liikennekäytössä ensimmäisenä Emile Lamm raitiovaunussa New Orleansissa vuonna 1872 käyttäen tulistettua vettä, josta saadulla höyryllä käytettiin höyrykonetta (ASME 1984). Lamm oli myös mukana ensimmäisessä tämän teknologian eurooppalaisessa toteutuksessa Pariisin raitiovaunuissa vuonna 1878; se oli käytössä vuoteen 1905 (Klapper 1961). Vuonna 1879 tämä ”fireless engine”-teknologia otettiin käyttöön englantilaisessa Resurgam-sukellusveneessä (Hutchinson 2001). Sitä on käytetty vielä 1900-luvulla paikoissa, joissa räjähdysriskin takia ei voi käyttää kemiallisia polttoaineita ja joissa toisaalta on höyryä saatavissa. Normaalisti 85 % tankista täytettiin

vedellä ja loput höyryllä: höyryä käytettäessä tankin paine laskee ja aikaansaaden höyrystymisen (Morris 2007). Tämän teknologian pitkäaikaisin kaupallinen hyödyntäminen tapahtui vetureissa 1870-luvulta alkaen ja uusia tätä teknologiaa hyödyntäviä vetureita rakennettiin ainakin vielä 1960-luvulla. Kuvassa 2.105 on kaksi Suomessa käytössä ollut painehöyryveturia. Niiden säiliö sisältää paineistettua kuumaa vettä ja höyryä, joista saatavalla höyryllä käytetään höyrykonetta. Päästönä on siis vain vesihöyryä. Suomessa on ollut käytössä 15 höyrysäiliöveturia, viimeksi 1970-luvulla.



Kuva 2.105. Suomessa käytössä olleita painehöyryvetureita: a) Hanomag-höyrysäiliöveturi vuosimallia 1928 Toijalan veturimuseossa. [2007] b) Orenstein & Koppelin höyrysäiliöveturi ÅSR 3 vuosimallia 1929 Jokioisten museorautatien kokoelmassa. [2007]

Painehöyryä on hyödynnetty vuodesta 1950 alkaen lentokoneiden laukaisemiseen lentotukialuksilta (Friedman & Friedman 2006). Kuten paineilmmamoottorin tapauksessa käytönaikaisia haitallisia päästöjä ei ole (pelkästään vesihöyryä), joten nämäkin ovat ZEV-ajoneuvoja. Kokonaispäästöt kuitenkin riippuvat siitä, miten höyry on tuotettu.

2.21.4 Painekaasuajoneuvot

Myös muita kaasuja kuin ilmaa ja vesihöyryä, esimerkiksi typpeä, hiilidioksidia ja ammoniakkia voidaan paineistettuna hyödyntää ja on hyödynnetty moottoreissa. Riippuen valitusta kaasusta käytönaikaisiakin haitallisia päästöjä voi olla, mutta kaikissa käytännöllisissä tapauksissa kaasun valmistuksen ja paineistuksen energiankäytön päästöt ratkaisevat kokonaiskuormituksen.

Ammoniakkimoottoreita on rakennettu mahdollisesti jo 1820-luvulta alkaen (Self 2007). Periaatteena on antaa paineistetun nestemäisen ammoniakin höyrystyä ja käyttää sitä moottorissa, joka rakenteeltaan voi vastata höyrykonetta, höyryturbiinia tai paineilmmamoottoreita. Moottorista poistuva kaasu absorboidaan vesiliuokseen, ja liuokenemislämpö hyödynnetään nesteammoniakin lämmitykseen ja sen höyrystymisen aihe-

uttaman viilenemisen kompensointiin. Kyseessä on siis suljettu prosessi, joka ei aiheuta ajonaikaisia päästöjä. Kokonaispäästöt riippuvat siitä, millä energiamuodolla ammoniakki regeneroidaan vedestä. Liikennekäytössä ammoniakkimoottorit olivat ensi kertaa New Orleansin raitiovaunuissa Lammin suunnittelemana moottorilla vuonna 1870 (ASME 1984) ja sitä käytettiin muutamassa muussakin kaupungissa USA:ssa ja Euroopassa (Self 2007). Laivakäytössä ammoniakkimoottori oli ensimmäisen kerran Campbellin moottorilla vuonna 1891 (Self 2007).

Paineistettua hiilidioksidia kokeiltiin 1800-luvun lopulla torpedoissa sekä riippuliitimien siipimoottoreissa (Self 2007) ja painenesteytettyä hiilidioksidia maa-ajoneuvoissa (Hiscox 1900), mutta se ei saavuttanut kaupallista menestystä. Nykyään paineistettu hiilidioksidi on yleisessä kaupallisessa käytössä malliajoneuvojen hiilidioksidimoottoreissa.

Painekaasurakettimeoottorit ovat olleet käytössä avaruusalusten ohjauksessa jo ensimmäisissä miehitetyissä lennoissa vuonna 1961: Neuvostoliiton Vostok-alukset käyttivät painekaasua ja USA:n Mercury-alukset vesihöyryä, jotka valmistettiin aluksessa vetyperoksidista katalysaattorin avulla (Gatland 1967). Typpi on yleisessä käytössä ohjausrakettimeottoreissa sekä maan kiertoradalla että avaruusluotaimissa, esim. Mariner 10:ssä (Murray & Burgess 1977), ja myös astronauttien avaruuskävelyillä käyttämässä MMU-suihkurepussa (MMU=Manned Maneuvering Unit).

Kuten Mercury-alusten esimerkki yllä kertoi, painekaasua ei aina tarvitse varastoida paineistettuna, vaan sitä voidaan tehdä tiettyjä kemikaaleja katalyyttisesti hajottamalla. Vetyperoksidin lisäksi hydratsiini on tällainen kemikaali. Siitä saadaan iridium-katalyytin avulla paineista typpeä, vetyä ja ammoniakkaa, joilla rakettimeottoria voidaan ajaa.

2.22 XII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: NESTEMÄISET EETTERIT (1800-LUKU)

Eettereistä otettiin ensimmäisenä liikennekäyttöön dietyylieetteri (DEE), jota myös eetteri-yleisnimellä tarkoitetaan. Sitä käytettiin kiertoaineena du Trembleyn höyrykone-eetterimoottori-kombivoimalalla varustetussa laivassa vuonna 1850 ja kolmessa muussa vuosina 1852-1855 rakennetussa laivassa ja niitä käytettiin ainakin 1880-luvun alkuun asti (Self 2007). Myöskin kloroformia suunniteltiin vastaavaan tarkoitukseen. Sekä eetteriä että kloroformia voidaan valmistaa etanolista. Eetteriä on osattu valmistaa etanolista rikkihapon katalysoimana vuodesta 1540, jolloin menetelmän keksi Valerius Cordus (Kauppila 1988). Suomessa eetterin valmistus alkoi vuonna 1891 (Kauppila 1988).

Varsinaisena polttoaineena DEE tuli käyttöön 1900-luvun alussa Ruotsissa sekoituksena etanolin kanssa, sillä sen korkean höyrystymislämmön takia etanolin kylmäkäynnistysongelma voidaan poistaa. Samalla se toimi myös denaturoimisaineena (Kauppila 1988). Suomen Puolustusvoimat otti eetterin polttoainekäyttöön autopataljoonan kuorma-autoissa yhdessä sulfittispriin kanssa 1920-luvulla (Mäkipirtti 2006).

MTBE otettiin ensimmäisenä käyttöön Euroopassa vuonna 1973 (Kraus & Harremoës 2001), ensiksi Italiassa. Syynä oli tarve korvata TEL ja muut lyijy-yhdisteet bensiinin

oktaaninkohottajina. MTBE:n etuna öljyteollisuuden kannalta ovat helppo ja halpa valmistusmahdollisuus öljynjalostamoissa niiden sivutuotteita käyttäen, jolloin teollisuuden kontrolli lisäaineeseen säilyy kuten lyijyn kanssa. MTBE:n ympäristöhaittojen vuoksi siitä ollaan luopumassa ja osittain korvaamassa ETBE:llä. MTBE:n ja ETBE:n lisäksi useita muitakin nestemäisiä eettereitä käytetään bensiinin lisäaineina hapettimena ja oktaaniluvun kohottajina.

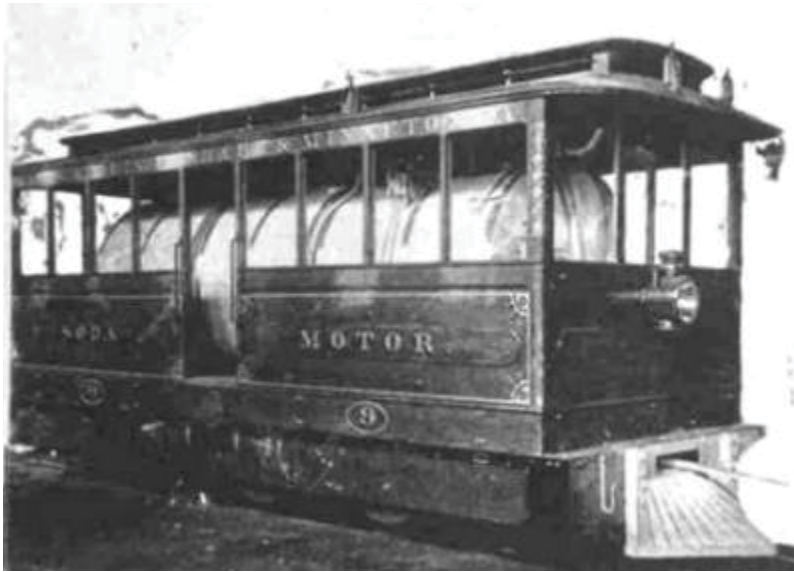
2.23 LÄMPÖAKUT (1800-LUKU)

Kemiallisen polttoaineen, sähkökemiallisen akun, kondensaattorin, mekaanisen akun (vauhtipyörä, kellokoneisto ym.), hydraulisen akun ja paineilman lisäksi myös lämpöakku on mahdollinen ajoneuvon energian lähde, jota tankataan tuotanto- tai jakelupaikoista ja käytetään lämpövoimakoneen tai sen kiertoaineen lämmittämiseen. Tähän tarkoitukseen soveltuvat helpoimmin EC-moottorit, mutta myös EC-turbiinit. Lämpöakku kuten muutkin akut ovat ajonaikaisesti päätöttömiä eli niillä voidaan toteuttaa ZEV-ajoneuvoja. Kokonaispäästöt riippuvat siitä, millä energianlähteellä akku on ladattu.

Talousveden lämmityksessä käytettävät vesivaraajat ovat yleisimpiä matalalämpöisiä lämpöakkuja. Liikennekäytössä mekaanisen energian tuottaminen edellyttää useimmilla lämpövoimakoneilla korkean lämpötilan akkua, joka voi olla tehty kiinteästä aineesta kuten kivet ja zeoliitit, nesteestä kuten tulistettu vesi (100 – 374 °C) ja korkealämpöinen orgaaninen neste tai kaasusta kuten tulistettu vesihöyry. Lämpöakun suorituskykyä voidaan parantaa faasimuutosmateriaalilla, jota muuttaa olomuotoaan lämpöä sitoessaan ja luovuttaessaan tai materiaalilla, joka varastoi lämpöä kiteytyessään ja vapauttaa sitä liuetessaan veteen tai muuhun nesteeseen (absorptioprosessi, jota hyödynnetään absorptiolämpöpumpuissa).

Ensimmäinen lämpöakkuajoneuvo oli kiinteällä akulla varustettu vuonna 1861 valmistunut Fowler's Ghost -veturi. Sen höyry kehitettiin Lontoon tunneleissa tiiliskivistä valmistetulla lämpöakulla, jolloin pakokaasusavua ei muodostunut, ja avoimella rataosuudella veturi käytti kattilassa tuotettua höyryä (Self 2007). Höyrykattila myös latasi lämpöakun.

Nestemäisen lämpöakun ensimmäinen käyttö oli New Orleansin painehöyryraitiovaunuissa vuonna 1872. Niiden tankki sisälsi pääasiassa paineistettua kuumaa vettä, joka painetta alentamalla höyrystyi höyrykonetta varten (ASME 1984). Tavanomaisen lämpöakun lisäksi New Orleansissa kokeiltiin myös absorptiotekniikkaa kalsiumkloridin liukenemislämmön avulla (ASME 1984). Tässä vuonna 1864 kehitetyssä järjestelmässä koneesta poistuva höyry absorboitiin väliaineeseen, jossa absorptiolämmön avulla tuotettiin uutta höyryä. Kyseessä on siis savukaasujen tehokas lämmöntalteenotto. Samaa menetelmää käytettiin muidenkin suolojen kanssa, erityisesti natriumhydroksidin, ja tätä soodamoottoriksi kutsuttua teknologiaa sovellettiin raitiovaunun lisäksi laivoihin ja juniin (Self 2007, Kuva 2.106). Vesi höyrystettiin pois suolasta uutta käyttöä varten varikoilla.



Kuva 2.106. Raitiovaunulinjoilla käytetty lämpöakkuveturi soodamoottorilla 1800-luvun lopulta (Self 2007).

Nykyään lämpöakkuja ei sovelleta liikenteessä, mutta esimerkiksi bariumhydroksidia käyttävät faasimuutosakut sopisivat erityisesti stirlingmoottorin kanssa käytettäväksi, mukaan lukien hybridiajoneuvoissa, joissa stirlingmoottori on mukana. Lämpöakuilla voi olla käyttöä myös ajoneuvon lämmityksessä, kun käytetään niin korkean hyötysuhteen moottoreita, että niiden hukkalämpö ei riitä sisätilojen lämmitykseen. Tämä koskee erityisesti sähköajoneuvoja. (Westbrook 2005)

Voimalaitoksissa lämpöakkuja hyödynnetään nykyään kaupallisesti. Korkealämpöinen faasimuutosmateriaaleihin perustuva lämpöakkutekniikka on käytössä mm. termisissä aurinkosähkövoimaloissa mahdollistaen akkujen lataamisen päivällä noin 400 °C:een ja niiden käytön veden höyryttämiseen höyryturbiineita varten päivisin. Yleisempiä voimaloiden lämpöakkuja ovat matalalämpöiset CHP-kaukolämpöakut, joita löytyy Suomestakin. Matalalämpöakunkin liikennekäyttö on teknisesti mahdollista esimerkiksi stirlingmoottori- ja ORC-turbiinitekniikalla, mutta väistämättä hyötysuhde ja tehopainosuhte ovat alhaiset.

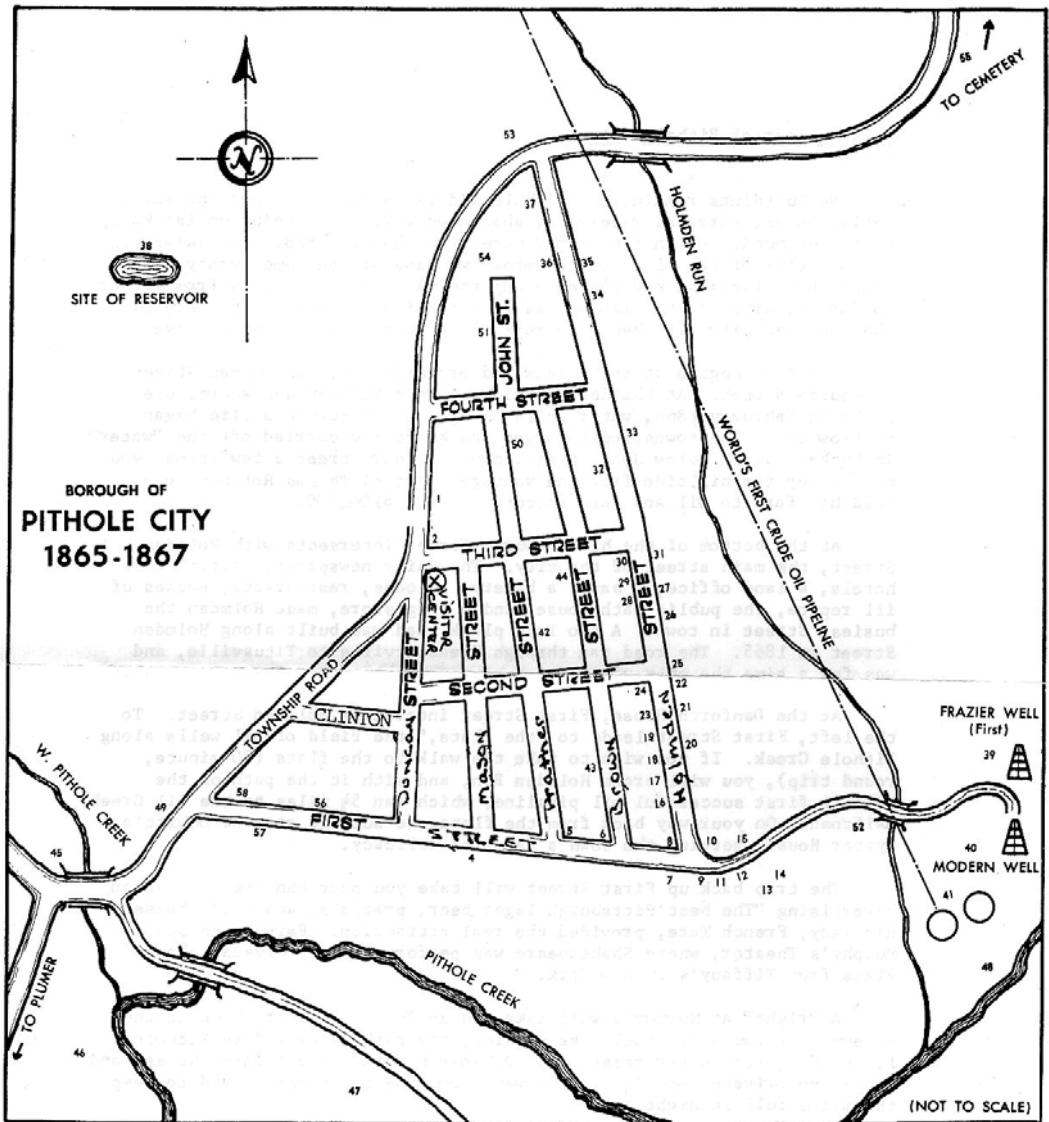
Lämpöakkujen liikennekäyttö mahdollistaa uuden sovelluksen CHP-voimaloiden lämmölle, jota yleensä tuotetaan huomattavasti enemmän kuin sähköä ja jonka arvo on huomattavasti sähköä alhaisempi. Myös geotermisen sekä aurinko- ja biolämmön kuten myös erilaisten hukkalämpölähteiden käyttö soveltuvat tähän tarkoitukseen. Lämpöakkujen käyttö voidaan toteuttaa siten, että akku on ajoneuvossa kiinteästi asennettuna ja siihen ladataan kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista keskitetysti lämmitettyä materiaalia samalla poistaen viilenneen materiaalin, mukaan lukien regeneroitavan absorptiomateriaalin. Toinen vaihtoehto on, että lämpöakku toteutetaan vaihdettavissa säiliöissä samaan tapaan kuin nestekaasukäyttö on toteutettu työkoneissa vaihdettavien painepullojen avulla. Laivoissa ja junissa säiliö voidaan sijoittaa konttiin.

2.24 RAAKAÖLJY, ÖLJYLIUSKE JA ÖLJYHIEKKA (1800-LUKU)

Maanpinnalle luonnollisesti purkautuvaa raakaöljyä käytettiin lämmitykseen, valaistukseen ja voiteluaineena jo noin 3000 eaa Mesopotamiassa eli nykyisessä Irakissa. Raakaöljy on erittäin heterogeeninen, tuhansista yhdisteistä koostuva neste, jota pystytään, kuten myös puu- ja kivihiilitervaa sekä pyrolyysiöljyä, käyttämään hehkukupumootoreissa. Muita moottorityyppejä varten raakaöljy pitää jalostaa. Jalostetutkin raakaöljypolttoaineet, kuten bensiini, ovat erittäin heterogeenisiä koostuen yli 500 yhdisteestä (Palucka 2005). Raakaöljyn jalostus valaistuskäyttöön alkoi 2200 eaa Kiinassa. Nykyisen raakaöljytalouden syntynä pidetään Edwin Draken vuonna 1859 aloittamaa öljynporausta Titusvillessä Pennsylvaniassa. Se aloitti öljykuumeen ensin Pennsylvaniassa ja myöhemmin monilla alueilla USA:ssa ja muualla maailmassa. Pennsylvaniassa koettiin vuosina 1865-1867 myös maailman ensimmäinen vakava öljykriisi, kun 15.000 asukkaan Pithole City autoitui ja hävisi kokonaan öljylähteiden ehdyttyä (Kuva 2.107).

Liikennekäyttöön raakaöljytuotteista otettiin ensimmäisenä silloinen päätuote kerosiini eli petroli Lenoirin autokokeiluissa 1860-luvun alussa. Petroli oli tärkein traktorien polttoaine 1900-luvun alussa ja petrolikäyttöisiä traktoreita valmistettiin 1960-luvulle asti. Bensiinin otti liikennekäyttöön Benz autossaan vuonna 1885. Bensiini oli 1900-luvulla tärkein raakaöljypohjainen liikennepolttoaine, mutta dieselöljy on EU:ssa on viime vuosina noussut liikennekäytössä bensiiniä tärkeämmäksi. Kerosiini on merkittävä polttoaine ilmaliikenteessä suihkumoottorikäytössä.

Alkuperäinen 1860-luvun bensiini oli suoratislausbensiiniä, jonka oktaaniluku oli noin 50. Se vastaa nykyistä teollisuusbensiinin oktaanilukua, eikä se kelpaa nykyisiin ottomoottoreihin, mutta joihinkin vanhoihin autoihin kuten 1960-luvun ja sitä vanhempiin Moskvitsheihin se käy. Aikanaan se kelpasi kaikkiin ottomoottoreihin, sillä niiden puristusuhde oli 2–4. Lämpökrakkaus keksittiin jo 1860-luvulla, mutta ensimmäinen raakaöljyn lämpökrakkauksen perustuva jalostamo käynnistyi vasta 1913 (Talvitie 1945b). Lämpökrakkauksen ansiosta oktaaniluku pystyttiin 1930-luvun alkuun mennessä nostamaan 70:een, mikä mahdollisti puristusuhteen 5,5 (Owen ym. 1995). Eugene Houdryn vuonna 1927 kehittämä ja vuonna 1938 teolliseen käyttöön otettu katalyyttinen krakkaus mahdollisti bensiinin oktaaniluvun nostamisen 100:aan (Palucka 2005) eli nykyiselle tasolle. Se sallii puristusuhteen 12, mikä jo 1930-luvun lopulla kokeellisilla ottomoottoreilla saavutettiin. Huoltoasemilla USA:ssa myytävän tavallisen bensiinin oktaaniluku kasvoi vuoden 1930 60-oktaanisesta vuoteen 1946 mennessä 75-oktaaniseen ja korkeaoktaanisen bensiini oktaaniluku kasvoi samana aikana 70:stä 80:een (Wuorela 1947). Tämän polttoainekehityksen seurauksena tavallisten autojen puristusuhde nousi USA:ssa 4,5:stä vuonna 1930 7,0:aan vuonna 1946 (Wuorela 1947). Nykyisin yleisillä jakeluasemilla saatavan bensiinin oktaaniluku on välillä 95-99 ja parhaan kilpabensiinin, jota F1-autot käyttävät, oktaaniluku on 102. Bensiinin puristuskestävyyden osalta kehitystä ei enää yli 70 vuoteen ole tapahtunut ja puristusuhde ja sitä kautta ottomoottorin hyötysuhde ei nykyisissä autojen ottomoottoreissa ole parempi kuin 1930-luvun lopun parhaissa moottoreissa. Bensiinin heikko laatu on siis ollut esteenä ottomoottorin kehitykselle. Tuo este poistuu siirryttäessä muiden polttoaineiden käyttöön, sillä monilla vaihtoehtoisilla polttoaineilla puristuskestävyys on parhaitakin bensiinilaatua parempi ja siten ne sallivat ottomoottorin hyötysuhteen kasvattamisen paljon yli bensiinimoottorin ylärajan (Taulukko 2.7).



DIRECTORY OF SOME OF PITHOLE'S SITES

- | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--|---|
| 1—Prayer Church | 14—City Jail | 26—Holmden Street Directory | 38—Reservoir | 49—Walter Holmden Homestead |
| 2—Methodist Church | 15—Photo of Fire on Flats | 27—Photo of Chase House | 39—Frazier Well | 50—Thomas Holmden Homestead |
| 3—Johnson Hotel | 16—Isahn's Jewelry Store | 28—Site of Chase House | 40—New (1958) Well | 51—Water Wells That Flowed |
| 4—Murphy's Theatre | 17—Cornell Saloon | 29—Prather & Wadsworth Bank | 41—Oil Dump | Oil |
| 5—Photo of Prather Street | 18—Metropolitan Theatre | 30—Postoffice | 42—St. James Hotel | 52—Pithole Oil Refinery |
| 6—Ben Hogan's Saloon | 19—St. Nicholas Hotel | 31—Pithole Daily Record | 43—Lincoln House | 53—Widow Lyons' Log Cabin |
| 7—Astor House | 20—Hubbs House | 32—Heenan's Cottage | 44—Athenaeum Theatre | 54—Springs That Flowed Oil |
| 8—American House | 21—Photo of Metropolitan Hotel | 33—U. S. Hotel | 45—Last School | 55—Morey House |
| 9—Pictures of Holmden Street | 22—Christy's Drug Store | 34—Syracuse House | 46—End of Reno, Plumer & Pithole R. R. | 56—Globe Hotel |
| 10—Danforth House | 23—Canterbury Music Hall | 35—Tremont Hotel | 47—Lower Depot Pithole Valley R. R. | 57—Oil City Hotel |
| 11—Directions to Oil Wells | 24—Metropolitan Hotel & Kemp's Bank | 36—Buffalo Hotel | 48—Upper Depot Pithole Valley R. R. | 58—Center House |
| 12—James Dewit Oyster House | 25—Bath House | 37—Leard & Wright Machine Shop | | ("House" was used as a synonym for "hotel") |

Kuva 2.107. Pithole Cityn kohtalo Pennsylvaniassa on karvas opetus öljytalouteen luottamisen riskeistä. Kaupunki perustettiin läheltä löytyneiden öljylähteiden takia ja se kasvoi nopeasti 15.000 asukkaan kaupungiksi, jolla oli myös rautatie. Öljylähteiden ehydyttyä kaupunki autioitui ja hävisi niin, että yhdestäkään rakennuksesta ei ole mitään jäljellä. Paikalla on vain opastuskeskus, josta tämä vanhan kartan kopio on peräisin.

Taulukko 2.7. Ottomoottoripolttoaineiden oktaanilukujen vertailu.

Polttoaine	Oktaaniluku
Biokaasu	140
Maakaasu	130
Propaani (nestekaasu)	112
Etanoli	108
Metanoli	107
F1-bensiini	102
Ferraribensiini	99
Tavallinen benssiini	95–98

Tavanomaisia öljyresursseja täydentävät vaikeammin hyödynnettävät öljyliuskeen ja öljyhiekkan resurssit. Öljyliuskeesta on tuotettu öljyä ensi kertaa Kiinassa noin vuonna 1700 (Leherrère 2003). Se tarkoittaa kiveen sitoutunutta raakaöljyä, joka voidaan pyrolyyttisesti erottaa (Talvitie 1945b). Vuonna 1934 perustettu Oy Trustivapaa Bensiini (nykyään TB) tuotti benssiiniä Eestin öljyliuskeesta, palavasta kivistä (Haapaniemi 1983). Öljyhiekka tarkoittaa hiekkaan sekoitettunutta öljyä, jota jalostetaan laajamittaisesti Kanadassa.

2.25 XIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: ETANOLI LIGNOSELLULOOSAKASVEISTA (1800-LUKU)

Puusta, oljista ja muista lignoselluloosapitoisista raaka-aineista valmistettava etanoli käsitellään tässä erillään perinteisestä sokeri- ja tärkkelyskasvipärisestä etanolista johtuen tämän teknologiaryhmän suuresta resurssipohjasta ja siten sen potentiaalisesta tärkeydestä tulevaisuudessa. Tämän teknologian perinteet ovat huomattavasti lyhyemmät kuin tavanomaisen etanolituotannon, mutta sillä on silti pitemmät perinteet kuin yleensä ymmärretään - kuten kaikilla liikenteen biopolttoaineilla. Nämä ovat sokereita tuottavia menetelmiä, joita hyödynnetään alkoholifermentaation esikäsitelyssä. Happohydrolyysiä on kutsuttu puuta raaka-aineina käytettäessä puun sokeroinniksi ja sama nimitys soveltunee myös entsyymihydrolyysiin. Nämä menetelmät eivät aseta laatuvaatimuksia puulle, joten kuoret ja muut jätteet soveltuvat hyvin siihen tarkoitukseen. Sekä selluloosa että hemiselluloosa eli noin 70 % puun massasta on muunnettavissa sokereiksi, joista 80-90 % on käymiskykyisiä (Talvitie 1930) eli teoriassa noin 60 % puun massasta on muunnettavissa käymiskykyisiksi sokereiksi.

Ligniiniä, jota puussa on noin 30 %, ei voida valmistaa sokeria. Se sopii energiantuotantoon polttamalla ja useilla muillakin menetelmillä sekä synteettisten liikennebiopolttoaineiden valmistukseen. Sitä on perinteisesti käytetty ainakin prosessin omaan kuluutukseen ja tehdastilojen lämmitykseen, usein myös myyntiin sähköinä, kaukolämpönä ja höyryinä.

2.25.1 Vahvahappohydrolyysi

Lignoselluloosapohjaista etanolia valmistettiin ensimmäisen kerran vuonna 1817 väkevän rikkihapon avulla (Nykänen 2000). Ranskalainen kemisti Henri Braconnot kehitti

vuosina 1817–1819 vahvahappohydrolyysin puun, oljen ja puuvillan muuttamiseksi sokereiksi ja edelleen tavanomaisella fermentaatiolla etanoliksi. Kaupallistaminen ei silloin onnistunut, koska rikkiä tarvittiin erittäin paljon eikä sitä osattu kierrättää. Jo 1800-luvulla osoitettiin, että selluloosa on väkevän rikkihapon avulla kokonaan sokeroitavissa (Routala 1934). Suolahapon toimivuus vastaavassa prosessissa osoitettiin myös jo 1800-luvulla ja fluorivetyhapon 1900-luvun alussa (Routala 1934).

Teknologia kaupallistui 100 vuotta myöhemmin saksalaisen professori Willstätterin rikkihappomenetelmällä. Saksassa rakennettiin 1. maailmansodan aikana kolme tähän menetelmään perustuvaa etanolitehdasta, jotka eivät kuitenkaan enää sodan jälkeen olleet kaupallisesti kilpailukykyisiä (Kaukoranta 1981). Suolahappoon perustuva Friedrich Bergiuksen vuonna 1916 patentoima menetelmä kaupallistui ensin Sveitsissä vuonna 1927 ja sitten Saksassa 1930-luvulla (Routala 1934). Väkevä, noin 40 % suolahappo antaa paremman saannon ja toimii nopeammin kuin väkevä rikkihappo, mutta pääsyy sen kaupalliseen menestykseen 1920-luvulla rikkihappoon verrattuna oli hapon kierrätyksen osaaminen (Talvitie 1930).

Nykyään vahvahappomenetelmällä on saavutettu erinomaisia saantoja puusta. Uusimmat demonstraatiot vahvahappomenetelmällä saavuttavat tason 1 litra etanolia/2 kg puuta (Farrell ym. 2006).

2.25.2 Sulfiittisellulipeä

Sulfiittisellutehtaan jätelipeä tarjosi toisen 1800-luvulla keksityn menetelmän puuetanolin valmistamiseksi. Paperin valmistuksen puusta sulfiittimenetelmällä olivat kehittäneet amerikkalaiset Tilghmanin veljekset vuonna 1865 ja se oli kolmas puupohjaisen paperin valmistusmenetelmä mekaanisen hiomismenetelmän ja natronmenetelmän jälkeen (Pellinen & Roschier 1952). Ensimmäinen kaupallinen sulfiittisellutehdas käynnistyi vuonna 1874 Bergvikissä Ruotsissa käyttäen Carl Ekmanin kehittämää magnesiumbisulfiittitekniikkaa. Kalsiumbisulfiittitekniikka, josta tuli yleisin sulfiittisellutehtaiden tekniikka, on saksalaista alkuperää. Alexander Mitscherlich kehitti sen vuonna 1872 alkaneissa laboratorioskokeissaan, joissa hän myös huomasi käymiskykyisten sokereiden synnyn ja haki patenttia etanolin tuotantoprosessille (Kaukoranta 1981). Kaupallinen sulfiittietanolin, jota myös sulfiittispriiksi ja tikkuviinaksi on kutsuttu, valmistus aloitettiin ensimmäiseksi Ruotsissa vuonna 1909 Gösta Ekströmin kehittämällä menetelmällä Skutskärin sellutehtaan yhteydessä ja 1. maailmansodan loppuun mennessä se oli aloitettu monissa muissakin maissa, esim. Saksassa 12 tehtaassa ja myös USA:ssa, mutta ei Suomessa (Pellinen & Roschier 1952, Kaukoranta 1981). USA oli myös merkittävä etanolin vientimaa, mm. Eurooppaan.

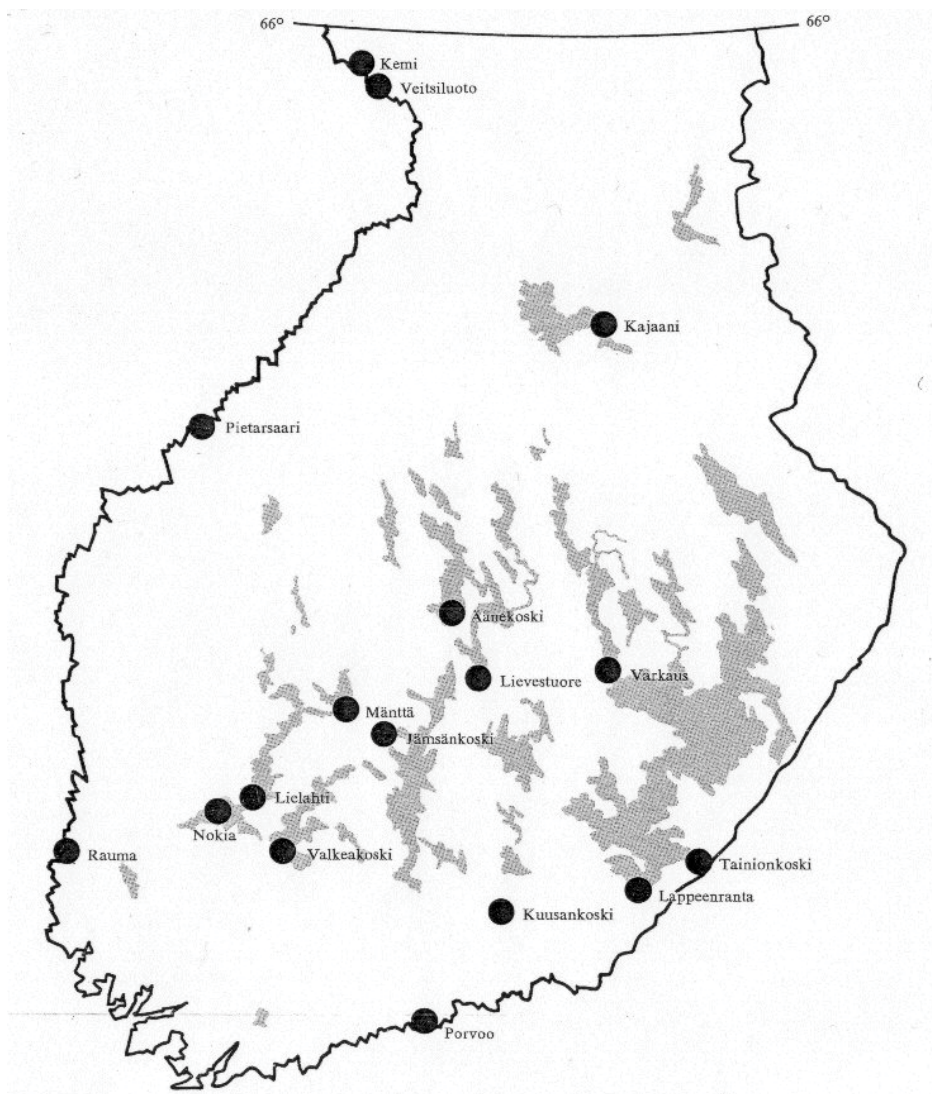
Suomen ensimmäiset sulfiittisellutehtaat valmistuivat vuonna 1885 Kuusankoskella ja Nokiällä. Ensimmäinen sulfiittispriitehdas käynnistyi Tornatorin (myöhemmin Enso) tehtaalla Imatran Tainionkoskella vasta vuonna 1920 poliittisesti hyvin vaikeiden vaiheiden jälkeen ja poliittiset ongelmat vaikeuttivat todella merkittävästi tuotantoa 2. maailmansotaan asti, vaikka puolustusvoimat ja puolustusministeriö olivat vuodesta 1918 alkaen koko maailmansotien välisen ajan pitäneet tällaista tuotantoa turvallisuuspoliittisesti tärkeänä (Kaukoranta 1981). Virallinen aloite sulfiittispriiteollisuuden käynnistämisestä tuli valkoisen armeijan päämajan intendentuurin päälliköltä Gösta Serlachiuksel-

ta vuonna 1918 (Norrmén 1928) ja siihen luonnollisesti sisältyi myös metsäteollisuuden arvovaltaa. Se johti valtion hankkimaan samana vuonna sulfittispruiilisenssin Ekströmin yhtiöltä Aktiebolaget Ethyliltä ja sitä käytettiin Suomen tehtaissa alusta alkaen.

Suomeen rakennettiin yhteensä 25 sulfittisellutehdasta, joiden tuotanto oli yli miljoona sellutonnina vuodessa 1930-luvun lopulla. Näistä 5 menetettiin sodan johdosta Neuvostoliitolle, mutta yhdessäkään niistä ei ollut sulfittispruiituotantoa. Tehtaista 17 tuotti ainakin osan toiminta-ajastaan myös etanolia (Taulukko 2.8, Kuva 2.108). Yhteensä tuotettiin noin 700.000 tonnia eli noin 900 miljoonaa litraa 100 % etanolia. Tuotanto oli suurimmillaan vuonna 1951 noin 27.000 tonnia (Kaukoranta 1981). Sulfittisellun tuotanto oli kyseisenä vuonna 59 % kaikesta sellusta, määrältään 821.000 tonnia (Pellinen & Roschier 1952), joten sellutonnin kohti saatiin 32 kg eli 41 litraa etanolia. Teoriassa yli 3-kertainen ja käytännössäkin lähes 3-kertainen määrä olisi ollut mahdollinen kuusipuuta käytettäessä (Pellinen & Roschier 1952) eli etanolia voitaisiin saada enintään luokkaa 10 % sellun määrästä (Kaukoranta 1981).

Taulukko 2.8. Sulfittispruiin tuotanto Suomessa 1920–1978 miljoonina kiloina 100 % etanolia Kaukorannan (1981) mukaan. Vuoden 1978 jälkeen etanolia valmistettiin vielä Mäntän, Nokian ja Lielahden tehtaissa. Tuotanto loppui vuonna 1991.

Yhtiö/Tehtas	1920–1939	1940–1945	1946–1978	Yhteensä
Ahlström/Varkaus		3,5	24,1	27,6
Eklöf/Porvoo		2,2	14,1	16,3
Enso (Tomator)/Tainionkoski/Imatra	7,4	4,2	27,0	38,6
Haarla/Lievestuore	2,0	1,3	2,9	6,2
Kajaani/Kajaani		10,0	20,1	30,1
Kaukaa/Lappeenranta		6,8	79,3	86,1
Kemi/Kemi		2,4	42,0	44,4
Kymi/Kuusankoski		1,8	101,9	103,7
Metsäliitto (Wärtsilä)/Äänekoski		2,4	13,9	16,3
Nokia/Nokia		3,8	17,9	21,7
Rauma/Rauma		8,3	8,1	16,4
Schauman/Pietarsaari		4,6	69,2	73,8
Serlachius/Lielähti/Tampere		5,2	61,9	67,1
Serlachius/Mänttä	6,5	4,9	9,4	20,8
Veitsiluoto/Kemi		0,1	28,0	28,1
Yhtyneet/Jämsänkoski		0,7	50,8	51,5
Yhtyneet/Valkeakoski		1,2	35,0	36,2
YHTEENSÄ	15,9	63,5	604,8	684,2



Kuva 2.108. Suomen sulfittispriitehtaiden sijainti 1920–1985 (Kaukoranta 1981).

Sulfittispriin liikennekäyttöä ei saatu vuosina 1919–1932 voimassa olleen kieltolain aikana edistettyä, vaikka tarkoitusta varten asetettiin tuona aikana kuusi virallista toimikuntaa. Niistä viimeisin oli valtioneuvoston asettama Yrjö Pulkkinen johtama komitea, joka selvitti etanolin polttoainekäyttökokemuksia ulkomailla (Taulukko 2.9). Sen vuonna 1932 tekemässä mietinnössä kerrotaan etanolin olevan merkittävässä liikennekäytössä monissa maissa yleisimpänä sekoitussuhteena 25 % bensiiniin, jolloin mitään muutoksia bensiiniä varten suunnitelluissa ajoneuvoissa ei tarvita (Kaukoranta 1981). Komitea esitti kaksi tapaa liikenne-etanolin käytön edistämiseksi tilanteessa, jossa fossiiliset polttoaineet olivat halvempia: fossiilisten polttoaineiden verottaminen Ruotsin tapaan siten, että etanoli tulee kilpailukykyiseksi, tai sekoituspakko, joka oli voimassa monissa maissa. Kolmas esitetty mahdollisuus oli elintarvike-etanolin verotus ja verojen käyttö liikenne-

etanolin hinnan alentamiseen. Puolustusvoimat otti sulfittispriin, bentsolin ja eetterin autopataljoonan kuorma-autojen käyttöön 1920-luvulla (Mäkipirtti 2006), mutta yleiseen käyttöön sitä ei saatu, vaikka 1930-luvulla sulfittispriin tuotanto olisi riittänyt korvaamaan neljänneksen Suomen bensiinin kulutuksesta (Boijer 1935).

Taulukko 2.9. Pulkkisen komitean mietinnössä vuonna 1932 annettuja tietoja muiden maiden etanolin liikennekäytöstä (Kaukoranta 1981).

Maa	Liikennekäyttö
Saksa	49 MI vuonna 1931
Italia	32 MI vuonna 1930
Ranska	25 MI vuonna 1930
Unkari	11 MI vuonna 1932
Tšekkoslovakia	6,2 MI vuonna 1932
Filippinit	6 MI
Liettua	4 MI vuonna 1932
Australia	3 MI
Ruotsi	1,75 MI vuonna 1930
Itävalta	Käyttö alkoi vuonna 1931
USA, Englanti	On käytössä, mutta luvut eivät tiedossa
Puola, Bulgaria, Brasilia	Sekoituspakkolaki säädetty
Jugoslavia, Argentiina, Tanska	Käyttö ja lainsäädäntö valmisteilla

Fossiilisten polttoaineiden ja elintarvike-etanolin verotusta ei poliittisesti pystytty hyväksymään. Siten ainoaksi vaihtoehdoksi jäi sekoituspakkolaki, josta valtion Alkoholi-liike (vuodesta 1969 alkaen Alko) teki ehdotuksen ”Hallituksen esitys laiksi moottori-alkoholista ja sen sekoittamisesta moottoribensiiniin” vuonna 1933 (Kaukoranta 1981). Sekoitusprosenttiosuus jäisi valtioneuvoston määräysten kautta toteutettavaksi, mutta ehdotuksen mukaan se olisi välillä 18–25 % eli lähellä ylärajaa, joka sopii kaikille pelkäänsä bensiiniä varten rakennetuille moottoreille ilman mitään muutoksia. Alko perusteli ehdotusta seuraavilla argumenteilla:

1. Voidaan hyödyntää jäteresursia, joka muuten menisi hukkaan.
2. Etanolin valmistuksessa tarvittava energia voidaan tuottaa vähäarvoisilla jäteresursseilla.
3. Etanoli on moottoriteknisesti bensiiniä parempi polttoaine.
4. Tuotannon kasvaessa hintaero fossiilisiin polttoaineisiin tulee kapenemaan.
5. Etanolin tuotanto tukee energiaomavaraisuustavoitteita ja on turvallisuuspoliittisesti tärkeää.

Ympäristönsuojeluetuja, jotka nykyään ovat oleellinen lisäperuste, ei vielä silloin otettu huomioon. Vuonna 1934 Alko julkisti tulokset Matti Inkisen johtamista käytännön kokeista, jotka osoittivat, että etanolibensiini toimii Suomen olosuhteissa moitteettomasti bensiinimoottoreissa ilman mitään muutoksia ja vuonna 1939 Alko julkisti Inkisen tulokset, joiden mukaan varsin yksinkertaisella konversiolla puhdas sprii saatiin toimimaan bensiinimoottoreissa Suomen olosuhteissa ilman teknisiä ongelmia (Kaukoranta 1981, Simpura 1982, Nykänen 2000). Tarvittava konversio oli kaasuttimeen asennettava

sähkövastuksella toimiva esilämmitin sekä kaasuttimen ja sytytyksen säätö. Se todettiin myös lentokoneissa mahdolliseksi ratkaisuksi. Nykyään sähkölämmitintä käytetään edelleen kylmäkäynnistystä varten, mutta pääasiallinen esilämmityksen lähde on moottorin hukkalämpö.

Ölly-yhtiöiden vastineet ehdotukseen olivat jyrkän kielteiset, joten lakia ei saatu toteutettua siitä huolimatta, että taloudellinen puolustusneuvosto ja puolustusministeriö pitivät sitä tärkeänä ja kiireellisenä. Taloudellinen puolustusneuvosto esitti valtion polttoainekonttorin eli VAPOn perustamista tehtävänsä etanolin moottorikäytön edistäminen. Ölly-yhtiöt olisivat velvoitettuja hankkimaan VAPolta etanolin bensiiniin sekoitettavaksi (Kaukoranta 1981).

Sulfittispriiteollisuus käynnistettiin vuonna 1940 kiireellisenä sodan yllätettyä ja tuotanto oli vuosina 1941–1945 noin 62.000 tonnia, josta moottorialkoholiksi valmistettiin 27.000 tonnia eli 44 %. Se oli 13,5 % vastaavan ajan bensiinin kulutuksesta. Noin 90 % käytettiin armeijan ajoneuvoissa. (Kaukoranta 1981)

Moottorialkoholi kulutettiin enimmäkseen etanolibensiininä, jota silloin Ruotsissa ja Suomessa kutsuttiin bentyyliksi ja yleisimmin muissa maissa gasoholiksi. Siviilikäytössä alun perin suunniteltu 25 % etanolin osuus putosi sodan aikana 17–18 %:iin johtuen talvipakkasten käynnistysvaikeuksista ajoneuvoissa, joissa ei käytetty esilämmittimiä eikä polttoaineeseen lisätty eetteriä. Armeijan ajoneuvoissa käytettiin pääasiassa 28 % etanolia kesällä ja 13 % etanolia talvella (Mäkipirtti 2006, Kuva 2.109, Taulukko 2.3). Etanolin energiaosuus polttoaineesta oli keskimäärin noin 15 e-% vastaten 21 p-%-osuutta. Suomessa oli Ruotsin kokemusten seurauksena käytössä myös nataliitti-niminen polttoaine, jossa oli 23 % eetteriä, 68 % etanolia ja 9 % bensiiniä (Nykänen 2000). Eetterillä, jota valmistetaan etanolista, on korkea höyrystymislämpö ja siten sen avulla poistetaan kylmäkäynnistysongelmat kovimmillakin pakkasilla. Käytössä oli myös Ruotsin esimerkin mukainen motyyli-niminen polttoaine, jossa oli 87 % etanolia eli se vastaa nykyisinkin Ruotsissa käytössä olevaa E85:a.



Kuva 2.109. 5000 litran etanolibensiinierä on saapunut kenttävarastoon. [© SA-kuva]

Sekoituspakko armeijan ajoneuvojen sisällä toteutettiin puolustusvoimien sisäisillä määräyksillä. Lisäksi yli 100 armeijan ajoneuvoa, kuten myös monet Alkon ja valtioneuvoston autot, kulki puhtaalla spriiillä (Simpura 1982, Kuva 2.110). Siviili liikenteessä sekoituspakko voitiin toteuttaa vuonna 1941 säädetyn nestemäisten poltto- ja voiteluaineiden varastoinnista nojalla. Sosiaaliministeriön 16.5.1941 antaman asetuksen mukaisesti ryhdyttiin käyttämään bentyyliä, jossa on enintään 30 % etanolia, sekä 94 % denaturoitua etanolia (Huoltoupseeriyhdistys 1988). Johtuen kotimaisten liikennepolttoaineiden käyttöönoton vastustajien poliittisesta menestyksestä ennen sotaa, tilanne jatkosodan sytyttyä oli vaikea. Huoltoupseeriyhdistyksen (1988) mukaisesti:

”Nestemäisten polttoaineiden varastot olivat niin pienet, etteivät ne ja Saksan lupamat toimitukset olisi riittäneet sodan alkaessa edes puolustusvoimien tarpeisiin kuin 4–5 kuukauden ajaksi. ... Näin ollen sotatoimien suoritus ja talouselämän käynnissä pitäminen oli suuresti riippuvainen Saksan lupaamista toimituksista sekä sen asenteesta Suomen sodankäynnin tuloksiin ja päämääriin.”

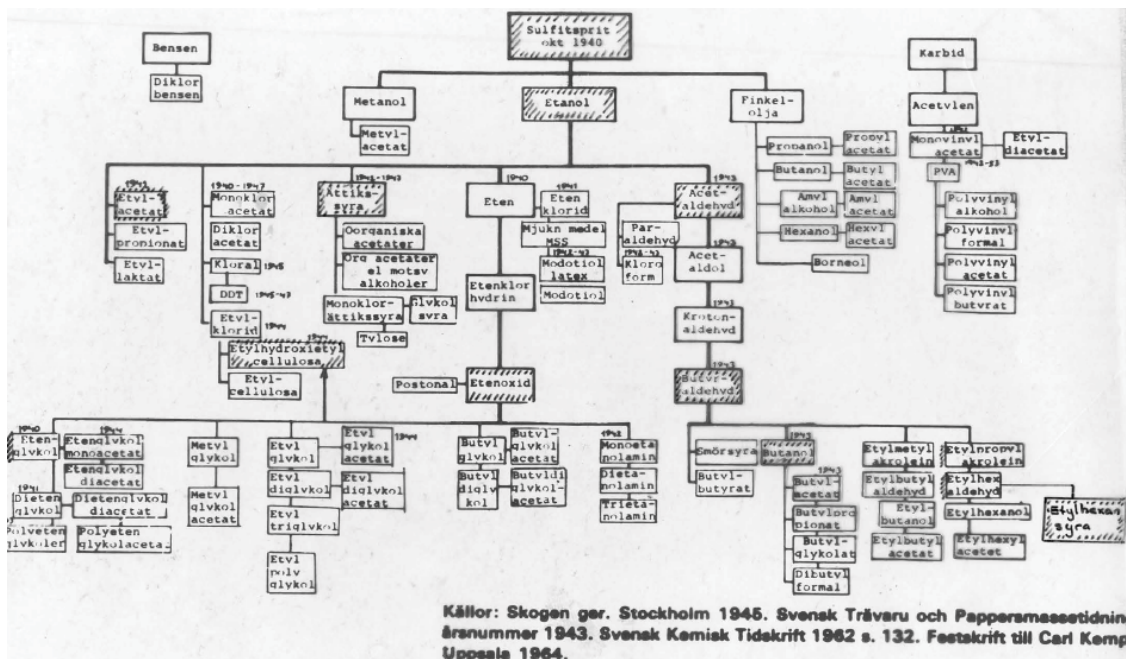


Kuva 2.110. Alkon autot käyttivät sekä spriiä että bentyyliä. Kuva Salmisaaren keskusvarastolta 1950-luvulta Kulan (1957) historiikista.

Vuonna 1949 säädettiin rauhan aikana sovellettavissa oleva sekoituspakkoasetus 564/1949 ”Asetus moottorialkoholin sekoittamisesta bensiiniin” puolustusministerin esityksestä. Siinä ei kuitenkaan säädetty sekoitusosuuksista, vaan ne jätettiin puolustusministeriön määräysten varaan. Käytännössä kaikkeen bensiiniin sekoittamista ei toteutettu, vaan myytiin sekä 25 % bentyyliä että bensiiniä, joiden vähittäismyyntihinta oli sama sekoituspakkoasetuksen nojalla. Vuodesta 1950 alkaen moottorialkoholin kotimaan käyttö romahti, koska ulkomaille, erityisesti USA:an ja Neuvostoliittoon, myynti oli Korean sodan johdosta kannattavampaa. Vuodesta 1955 alkaen vientimarkkinat puolestaan romahtivat ja bentyylin myyntiasemia saatiin rakennettua 250 paikkakunnalle yhteensä 400 kpl (Kaukoranta 1981). Elokuussa vuonna 1957 Nesteen Naantalin jalostamon toiminnan alkaessa bentyylin kotimaan myynti romahti jälleen, eikä enää noussut Nesteen ja muiden öljy-yhtiöiden vastustaessa bentyylin käyttöä (Kaukoranta 1981). Bentyylin jakeluasemat muunnettiin lyijytetyn bensiinin jakeluasemiksi ja bentyylin liikennekäyttö Suomessa loppui. Moottorialkoholia vietiin vielä useita vuosia moniin maihin ja spriiitä käytettiin Suomessa juomateollisuuden ja kemian teollisuuden raaka-aineena, mutta vähitellen tuotanto ajettiin alas ja se loppui kokonaan vuonna 1991. Vuonna 1966 säädetty ja vuoden 2003 loppuun voimassa ollut laki moottoriajoneuvoverosta (722/1966) lopetti myös muiden biopolttoaineiden käytön liikenteessä asettamalla näille hyvin korkean rangaistusluonteisen veron (Lampinen 2008b).

Sulfittisellun tuotannosta oli 1950-luvulta lähtien siirretty painopistettä sulfaattisellun tuotantoon ja viimeinen tehdas lopetti sellun ja spriiin tuotannon Mäntässä vuonna 1991. Ympäristönsuojelusyyt olivat pääsyy tähän muutokseen. Sulfittiselluteollisuutta on kuitenkin edelleen joissakin muissa maissa. Suomessa keittokemikaaleja ei kierrätetty, mutta Ruotsissa niin on tehty. Ruotsin ainoassa sulfittisellutehtaassa Örnköldvikissä käytetään natriumbisulfittia, joka kierrätetään samalla tavalla kuin keittokemikaalit sulfaattiteknikassa (joka myös on natriumsuoloihin perustuva) kierrätetään

Mäntän sulfittisellutehtaan teknillinen johtaja Werner Neovius tutustui Ruotsin sulfittispriteollisuuteen vuonna 1918 ja raportoi Ruotsin silloisesta biojalostamotoiminnasta, jossa tuotteina olivat ”mm. lakka, pulituuri, eetteri, parfyymit, etikka, räjähdyselohopea, alkloidit, extrahoimisaineet, kloroformi, jodoformi, kloraalihydraatti, tanniini, salisyylihappo ja väriaineet” (Kaukoranta 1981). Hän kertoi myös Ruotsin spriiimoottoriteollisuudesta. Kaikki nämä mahdollisuudet olisivat Suomellakin, mikäli sulfittispriteollisuus saataisiin synnytettyä. Ruotsissa toimi tuolloin 7 sulfittispritehdasta ja 5 oli rakenteilla. Sulfittisellutehtaiden ympärille kehittyi Ruotsissa huomattava biojalostamotoiminta, jonka eräänä esimerkkinä on kuvassa 2.111 Örnköldvikin laitos 1940-luvulla. Suomessa sulfittispriiipohjainen kemian teollisuus käytti sotavuosina spriiitä yli 50.000 tonnia vuodessa, kun 1950-luvulla taso oli pudonnut 2000 tonnia vuodessa (Kaukoranta 1981).



Kuva 2.111. Biojalostamon tuotevalikoima vuonna 1945 Örnsköldvikissä Ruotsissa. Alkuperäiset lähteet on mainittu kuvassa, joka on peräisin Beckemanin (2006) esitelmästä EU-komission biojalostamokonferenssissa Helsingissä.

2.25.3 Heikkohappohydrolyysi

Heikkohappomenetelmä oli kolmas 1800-luvulla keksitty lignoselluloosapohjaisen etanolin valmistamismenetelmä. Sitä kehitettiin Saksassa 1850-luvun puolivälistä alkaen (Routala 1934). A. Classen patentoi vuonna 1889 menetelmän, jolla 60 % puusta, siis lähes kaikki hemiselluloosasta ja selluloosasta, saatiin muunnettua sokereiksi heikon rikkihapon avulla ja myöhemmin myös heikon suolahapon avulla (Nykänen 2000). Vuonna 1898 tällä menetelmällä saavutettiin demonstraatiolaitoksessa tuotos 1 litra etanolia/13,2 kg puuta ja 1900-luvun alussa ensimmäisessä kaupallisessa laitoksessa tuotos oli 1 litra etanolia/5,3 kg puuta (DOE 2007, Farrell ym. 2006). Schollerin 1920-luvulla kaupallistamalla menetelmällä päästiin jo tasolle 1 litra etanolia/4,4 kg puuta (Kaukoranta 1981) ja ranskalaisella Deax-Sèvres-menetelmällä demonstroitiin 1930-luvulla jopa saanto 1 litra etanolia/3 kg puuta (Routala 1934). Vertailuna sulfittisprään tuotannossa, jossa etanoli on sellutehtaan sivutuote, saadaan teoriassa 1 litra etanolia/13,6 kg puuta ja parhaimmillaan käytännössä 1 litra etanolia/14,6 kg puuta (Pellinen & Roschier 1952). Sulfittispräänmenetelmässä hyödynnetään vain hemiselluloosasta peräisin olevia käymiskykyisiä sokereita, kun taas happokäsittelyssä voidaan hyödyntää kokonaan sekä hemiselluloosaa että selluloosaa.

Heikkohappomenetelmä oli kaupallisessa käytössä ensimmäisen maailmansodan aikana ainakin Saksassa, USA:ssa ja Sveitsissä (Routala 1934, DOE 2007). Saksassa kaupallisia tehtaita oli neljä käyttäen sekä rikki- että suolahappoa ja tuottaen 10 miljoonaa litraa etanolia vuodessa (Routala 1934).

Jo 1910-luvulla todettiin, että spriitehtaiden yhteyteen voitaisiin myös perustaa happomenetelmään pohjautuvia puun sokerointilaitoksia ja käyttää tuotetut sokerit yhdessä sulfittiprosessin tuottamien sokerien kanssa spriiksi (Kaukoranta 1981). Nämä laitokset käyttäisivät sahoilta saatavaa jätēsahajauhoa ja tuotettavan spriin määrä voitaisiin kymmenkertaista. Suomen hallitus lähetti teknillisen korkeakoulun lehtorin Berndt Ingmanin tutustumaan Saksan sahajauhoetanoliteollisuuteen, kuten teknologiaa Suomessa silloin kutsuttiin. Matkalta palattuaan hän esitti vuonna 1918 kyseisen teollisuuden luomista Suomeenkin ja ilmoitti olevansa valmis itse toteuttamaan ensimmäisen tehtaan, mikäli saisi hallitukselta vastaavanlaisen hankintasopimuksen kuin sulfittispriille suunniteltiin (Kaukoranta 1981). Sitä ei myönnetty. Myös jäkälä oli 1910-luvulla osoitettu mahdolliseksi etanolin raaka-aineeksi, ja pienimuotoinen tuotantolaitos valmistui vuonna 1918 Tampereella, mutta sekään ei saanut tuotantosopimusta, vaikka se olisi pystynyt käyttämään myös puuta, turvetta, selluloosaa ja jätelipeää (Kaukoranta 1981).

Toisen maailmansodan aikana Saksassa oli kolme Scholler-menetelmän mukaista tuotantolaitosta (Nykänen 2000). Suomessa rakennettiin TKK:n lehtori Olli Ant-Wuorisen 1930-luvun lopulla kehittämään rikkihappomenetelmään perustuva demonstraatiolaitos Ouluun ja se toimi vuosina 1941–1949 (Kaukoranta 1981). Alkon tytäryritys Puukemia Oy perustettiin kyseisen teknologian kaupallistamista varten. Teollisen mittakaavan laitosta 10.000 tonnin vuosituotannolla ryhdyttiin 1940-luvulla rakentamaan Heinolaan (Talvitie 1945b), mutta sodan loputtua hanke keskeytettiin (Vehviläinen 1963). Örnköldvikissä Ruotsissa valmistetaan hake-etanolia puun sokeroinnin kautta (Kuva 2.112).



Kuva 2.112. Örnköldvikin kaupunkibussi kulkee paikallisesti valmistetulla puuetanolilla. [2005]

2.25.4 Entsyymihydrolyysi

Entsyymihydrolyysi on ollut tutkimuskohteena 1960-luvulta lähtien (Wyman 1996). Menetelmässä selluloosan hajotus tehdään happojen sijaan entsyymeillä. Jo 1970-luvulla saatiin USA:ssa *Clostridium*-bakteerien avulla maissioljesta etanolia saannolla 45 g etanolia/100 g olkea (Kaukoranta 1981).

Kanadalainen IOGEN-yhtiö on tuottanut vuodesta 2004 alkaen etanolia oljesta entsyymihydrolyysin avulla Ottawassa (Kuva 2.113). Etanolia tuotetaan on 340 litraa olkitonnia kohti ja loppu oljen energiasta käytetään sähkön, höyryn ja lämmön tuotantoon.



Kuva 2.113. Olkietanolia käyttävä Chevrolet Impala Flex Fuel esittelyssä YK:n ilmastokokouksessa Montrealissa. [2005]

2.26 EPÄORGAANISET POLTTOAINEET (1800-LUKU)

Musta ruuti ja monet myöhemmät rakettimoottoripolttoaineet ovat osaksi tai kokonaan epäorgaanisia ja osaa niistä voidaan käyttää muissakin moottorityypeissä. Lisäksi on olemassa epäorgaanisia polttoaineita, jotka on otettu käyttöön muunlaisissa moottoreissa ja jotka eivät sovellu rakettimoottoreihin. Suurin osa epäorgaanisista polttoaineista on mineraaleista peräisin olevia uusiutumattomia resursseja. Mikäli ne sisältävät uusiutumattomista resursseista peräisin olevaa hiiltä, joka vapautuu ilmakehään, sitä käsitellään kuten fossiilisten poltossa vapautuvaa hiiltä, myös YK:n ilmastosopimuksen inventaari-oissa. Uusiutuvista resursseista peräisin oleva epäorgaaninen hiili, esimerkiksi puun termisellä kaasutuksella valmistettava hiilimonoksidi, on uusiutuva polttoaine. Useimmat epäorgaaniset polttoaineet ovat kuitenkin hiilivapaita eikä niiden energiakäyttö aiheuta kasvihuonekaasupäästöjä riippumatta siitä, ovatko ne peräisin uusiutuvista vai uusiutumattomista resursseista. Niiden tuotanto kuitenkin aiheuttaa päästöjä samalla tavalla kuin muidenkin polttoaineiden, jos siinä on käytetty fossiilisia energialähteitä. Monet ovat resursseiltaan hyvin suuria. Tämä koskee erityisesti vesiperäistä vetyä, jota on edellä käsitelty yhdessä orgaanisen vedyn kanssa. Se saatiin polttoainekäyttöön elektrolyysin avulla 1800-luvun alussa. Luonnollinen vapaa vetykaasu, primäärinen vety, kuuluu epäorgaanisiin polttoaineisiin, mutta sen liikennekäyttöä vasta suunnitellaan Islannissa lähteenä geotermisten kaivojen kautta saatava vety.

Epäorgaanisista vety-yhdisteistä liikennekäyttöön otettiin ensimmäisenä ammoniakkaasu, mutta ei kemiallisena polttoaineena, vaan fysikaalisena väliaineena höyryn ja paineilman tapaan. Ammoniakkia on käytetty kiertoaineena ammoniakkimoottoreissa ja Kalina-syklin turbiineissa. Sitä käytetään myös kemiallisena polttoaineena monissa moottorityypeissä ja se soveltuu vedyn varastoksikin. Jälkimmäiseen tarkoitukseen sopi-

via yhdisteitä on paljon ja niistä kiinteät jauhemaiset boorihydraatit ovat energiatiheydeltään parhaita. Niitä ei toistaiseksi käytetä kuin laboratoriomittakaavassa. Nesteytettyä ammoniakkia on käytetty rakettpolttoaineena X-15-rakettimoottorilentokoneessa USA:ssa 1950–60-luvulla (Kuva 2.114). Ammoniakin tärkein valmistusmenetelmä on typen ja vedyn synteesi eli Haber-Bosch-synteesi, jota on käytetty kaupallisesti vuodesta 1913.



Kuva 2.114. Ammoniakkikäyttöisellä rakettimoottorilla varustetulla X-15:llä saavutettiin lentokoneiden korkeusennätys 108 km vuonna 1963 ja lentokoneiden nopeusennätys 6,7 Machia vuonna 1967. Kumpikin ennätys kesti pitkään, mutta ne eivät enää ole voimassa. [NASA]

Vetyperoksidi otettiin liikennekäyttöön vuonna 1939 Saksassa maailman ensimmäisessä rakettimoottorikäyttöiseksi suunnitellussa lentokoneessa Heinkel He-176 ja vuonna 1940 ensimmäisessä walterturbiinikäyttöisessä sukellusveneessä V80. Kuva 2.115 esittää säiliöautoa, jolla vetyperoksidia (T-Stoff) kuljetettiin 1940-luvulla. Vetyperoksidia on myös käytetty hapettimena rakettimoottoreissa. Suomen ensimmäinen vetyperoksidi-tehdas valmistui vuonna 1937 (Talvitie 1945b).



Kuva 2.115. Synteettisillä polttoaineilla kulkeva Opel'n vetyperoksidisäiliöauto 1940-luvulta (Zaloga & Calow 2003). [NARA]

Hydratsiini otettiin liikennekäyttöön 1940-luvulla rakettimoottoreissa ja myöhemmin myös kaasuturbiineissa. Hydratsiini ja vetyperoksidi ovat yksiosaisia ajoaineita (monopropellant) eli polttoaineita, jotka eivät tarvitse ilman happea tai muutakaan erillistä hapetinta energiantuotannossa.

Liikennepolttoaineita voidaan valmistaa joistakin mineraaleista, siis kiviaineksesta. Miineraalipolttoaine ei kuitenkaan sovellu niiden nimeksi, koska raakaöljyn synonyymina käytetään termiä mineraaliöljy. Kyse on siis niiden mineraalien hyödyntämisestä, jotka eivät ole osa fossiilisia polttoaineita ja turvetta. Esimerkkinä on kalsiumkarbidi, jota voi valmistaa kalkkikivestä ja hiilestä. Se reagoi käyttökohteessa veden kanssa tuottaen polttoaineeksi sopivaa etyyni- eli asetyleenikaasua. Tankattavat aineet ovat siis vesi ja kiinteä kalsiumkarbidijauhe. Sitä käytettiin sekä motorisoitujen ajoneuvojen että polkupyörien karbidilampuiksi kutsutuissa valoissa vuodesta 1896 alkaen. Niitä on Suomessa myyty yksityisajoneuvoihin ainakin vuoteen 1938 asti ja VR on käyttänyt niitä vetureissa vielä sen jälkeenkin (Lepo 2002). Kalsiumkarbidi sopii myös ajoneuvon pääpolttoaineeksi asetyleenimoottoreissa eli matalapuristeisissa ottomoottoreissa. Sitä käytettiin autoissa 1900-luvun alussa, esimerkiksi Sveitsissä 1. maailmansodan aikana (Talvitie 1930). Gustav Weißkopf käytti sitä ensimmäisessä lentokoneessaan vuonna 1901. Suomen ensimmäinen karbiditehdas valmistui Hämekoskella vuonna 1899 (Talvitie 1945b). Sodan aikana karbidia käytettiin Suomessa ainakin noin 300 moottoriveneen polttoaineena (Viitaniemi 1978). Etyynistä ja vedestä osattiin jo 1900-luvun alussa Saksassa ja Sveitsissä valmistaa hydraamalla myös etanolia ja tätä tuotetta kutsuttiin karbidispriiksi (Kaukoranta 1981). Kalsiumkarbidin käyttö aiheuttaa nettohiilidioksidipäästöjä kalkkikiven (CaCO_3) hiilen vapautuessa sekä lisäksi valmistuksessa käytetystä hiilestä, mikäli se ei ole puuhiiltä tai muuten bioperäistä.

Metallit ovat toinen kiviperäinen esimerkki. Niitä on käytetty rakettipolttoaineina, mutta periaatteessa ne olisivat käyttökelpoisia autojenkin voimalähteinä. Ne eivät pääsääntöisesti tuota hiilidioksidipäästöjä eikä muitakaan kaasumaisia päästöjä.

Typpioksiduulia eli ilokaasua on käytetty sekä polttomoottoreissa että suihku- ja rakettimoottoreissa. Se soveltuu hapetinvaikutuksensa vuoksi erityisesti korkeatehoisten moottoreiden huipputehojen tuottajaksi, lähinnä kilpa- ja sotilaskäytössä.

Epäorgaanisia yhdisteitä esiintyy myös monissa orgaanisissa liikennepolttoaineissa joko luonnollisina epäpuhtauksina tai tarkoituksella sekoitettuina lisäaineina. Osa niistä, esimerkiksi rikki, on energiaa tuottava polttoaine.

2.27 XIV SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET:

TERMINEN BIOMETAANI (1800-LUKU)

Lenoir käytti ensimmäisenä biometaania liikennepolttoaineena kaupunkikaasuautoissaan vuonna 1862. Tällöin kyse oli keskitetysti valmistetusta puu- ja kivihiihlikaasusta, jossa metaani on yksi pääkomponenteista hiilimonoksidin ja vedyn ohella. Myöhemmin metaania käytettiin osana ajoneuvoissa kuljetettavan häikäpöntön avulla tuotettua puu- tai puuhihlikaasua mm. 1. maailmansodan aikana ja Suomessakin 1920-luvulta alkaen. Kyseisen teknologian käytön huippu ajoittui 2. maailmansodan ajalle.

Biometaani tarkoittaa kaikilla teknologioilla bioresursseista valmistettua metaania. Useimmat näistä prosesseista tapahtuvat korkeissa lämpötiloissa, ja niitä nimitetään termiseksi biometaaniksi erotuksena normaalilämpötiloissa valmistetusta metaanista kuten biokaasusta. Puhdasta metaania tuotti ensimmäisenä Alessandro Volta vuonna 1777 suo-kaasusta, joka on luonnollista biokaasua.

Termisen biometaanin lajeista ensimmäinen oli kaasutusbiometaani eli puukaasusta erotettu metaani. Puun ja muun biomassan kaasutuksessa muodostuu aina metaania, mutta sitä enemmän mitä alhaisempi kaasutuslämpötila on. Esimerkiksi Helsingin kaasulaitoksen verkkoon johdetussa puhdistetussa kaupunkikaasussa (Kuva 2.116) oli 1940-luvulla metaania 30 t-% (Talvitie 1944). Kivihiilikaasusta puhdistettua ja paineistettua metaania käytettiin Saksassa liikennepolttoaineena Ruhrgasol-nimellä 1930-luvulta alkaen (Rosen-dahl ym. 1935, Talvitie 1944).



Kuva 2.116. Helsingin kaupunkikaasulaitos tuotti toimiessaan vuosina 1960-1994 runsaasti metaania alunperin puuta kaasuttamalla, mutta myöhemmin myös kivihiiltä ja muita fossiilisia polttoaineita kaasuttamalla. Etualalla oikealla moderni liikennemaakaasun tankkausasema. [2009]

Toisen termisen biometaanin valmistusmenetelmän kehitti vuonna 1897 ranskalainen Paul Sabatier, joka sai vuoden 1912 kemian Nobel-palkinnon ansioistaan katalyyttisen hydrausteknologian kehittämisessä (Sabatier 1912). Sabatier-reaktion nimeä kantavassa prosessissa metaani valmistetaan hiilidioksidista ja vedystä nikkelin katalysoimana korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Se mahdollistaa mm. savukaasujen hiilidioksidin hyödyntämisen. Hiilidioksidin katalyyttinen hydraus oli ensimmäinen katalyyttinen hydrausteknologia.

Merkittävin termisen biometaanin valmistustapa on synteetikaasupohjainen metaanisynteesi. Sabatier ja Senderens julkaisivat sen teorian ja laboratoriototeutuksen vuonna

1902 (Sabatier & Senderens 1902). Se oli ensimmäinen synteetikaasupohjainen synteestiteknologia. Metaanisynteesi on ollut vuodesta 1984 suurimittaisessa kaupallisessa käytössä kivihiilellä, jolloin puhutaan SNG:stä eli synteettisestä maakaasusta (Miller 2005). Lisäksi metaania on saatu merkittäviä määriä sivutuotteena Haber-Bosch-synteetilaitoksissa 1910-luvulta alkaen ja Fischer-Tropsch-synteetilaitoksessa 1930-luvulta alkaen. Metaanisynteesi mahdollistaa esimerkiksi puujätteiden käytön, jolloin kyseessä on SBG eli synteettinen biokaasu (joskus sitä kutsutaan harhaanjohtavasti bio-SNG:ksi tai jopa SNG:ksi). SBG:tä voidaan tuottaa erittäin korkealla 80 % termisellä hyötysuhteella (Probstein & Hicks 1990).

SBG on yhdessä biokaasun kanssa noussut nykyisin merkittävään rooliin energiatekniikan kehitysnusteissa monissa maissa, kuten Ruotsissa, Saksassa, Sveitsissä, Hollannissa ja Itävallassa. Itävallan Güssingiin valmistui vuonna 2009 puuta käyttävä metaanisynteesilaitos. Saksassa on kansallisena tavoitteena saavuttaa biokaasun ja muun biomeetaanin tuotannossa 6 % osuus koko kaasun kulutuksessa eli 6 miljardin kuution (60 TWh) vuosituotantotasoa vuoteen 2020 mennessä ja 10 % osuus vuoteen 2030 mennessä. Ruotsin öljyriippumattomuusstrategian (Sveriges Regeringskansliet 2006) mukaan maakaasuverkkoa ei Ruotsissa laajenneta, vaan rakennetaan paikallisia biokaasuverkkoja. Esimerkiksi Tukholmassa ollaan parhaillaan muuntamassa kaupunkikaasuverkkoa biokaasuverkoksi.

2.28 XV SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIOBENSIINI (1900-LUKU)

2.28.1 Synteettiset heterogeeniset polttoaineet

Monissa synteettisissä tuotantoprosesseissa on yhteistä se, että saadaan heterogeeninen seos hiilivetyjä ja muita orgaanisia polttoaineita. Seosta voidaan käyttää sellaise-

naan lämmityspolttoaineena, mutta mahdollisuudet paranevat, kun siitä jalostetaan erikseen erilaisiin moottorityyppisiin soveltuvat fraktiot, siis metaani (synteettinen biokaasu SBG), nestekaasu (synteettinen bio-LPG), bensiini (synteettinen biobensiini), kerosiini (synteettinen biokerosiini), petroli (synteettinen biopetroli), dieselöljy (synteettinen biodiesel) ja raskas polttoöljy. Osa menetelmistä pystyy tuottamaan myös muita polttoaineita kuin hiilivetyjä, kuten alkoholeja, esimerkiksi metanolia, etanolia ja butanolia. Polttoaineiden lisäksi voidaan tuottaa kemiallisen teollisuuden raaka-aineita. Bioresurssipohjaisesta kemianteollisuudesta, joka perustuu biojalostamoiden (Kuva 2.117) käyttöön,



Kuva 2.117. EU-komissio järjesti Helsingissä vuonna 2006 biojalostamokonferenssin tarkoituksenaan kannustaa mm. Suomen metsäteollisuutta investoimaan synteettisten biopolttoaineiden valmistukseen. [2006]

käytetään nimitystä valkoinen kemia erotuksena raakaöljypohjaiseen mustaan kemiaan, jonka tuotteet valmistetaan öljynjalostamoissa.

Synteettisistä heterogeenisistä polttoaineista käytetään usein yhteisnimitystä BTL (biomass-to-liquid), kun raaka-aine on biomassaa. Nimityksen taustalla on kaasumaisten lopputuotteiden unohtaminen, vaikka niitä kaikissa prosesseissa syntyy. Kaasumaisia lopputuotteita voidaan kutsua yhteisnimellä BTG (biomass-to-gas). Mikäli käytetään kivihiiiltä, yhteisnimitykset ovat CTL/CTG, maakaasua käytettäessä GTL/GTG ja turvetta käytettäessä PTL/PTG. BTL- ja BTG-tuotteet ovat biopolttoaineita eli uusiutuvia polttoaineita, kun taas CTL-, CTG-, GTL-, GTG-, PTL- ja PTG-tuotteet ovat uusiutumattomia polttoaineita. Tuotantoprosessit ovat kuitenkin lähes samanlaisia ja biopolttoainetuotanto hyöttyy fossiilisten synteettisten polttoaineiden prosessiteknisestä kokemuksesta ja kehityksestä.

BTL-tuotantoprosessit voivat käyttää mitä tahansa bioresurssia, missä tahansa olomuodossa ja mitä tahansa osia niistä, esimerkiksi kasvit kokonaisuudessaan sekä kasvi- ja eläinperäiset jätteet, mukaan lukien teurasjätteet. Prosessi voidaan myös optimoida käyttämään vain tiettyä resurssia, esimerkiksi kasviöljyä.

Saksan sodan ajan talous 1940-luvulla on merkittävin esimerkki suuren mittakaavan teollisesta synteettisten polttoaineiden tuotannosta. Yli puolet kaikesta bensiinistä, kerosiinista, dieselöljystä ja nestekaasusta tuotettiin sodan aikana synteettisesti. Käytössä oli useita kiinteitä resursseja hyödyntäviä prosesseja, joista tärkein oli Bergius-synteesi. Ne käyttivät pääasiassa kivihiiiltä, mutta myös bioresursseja. Suurimmillaan synteettisten liikennepolttoaineiden tuotanto oli vuonna 1943, 7,2 miljardia litraa (Yergin 1991), joka vastaa noin 250 PJ:n energiasisältöä. Se on noin 150 % Suomen nykyisestä liikenteen energiankulutuksesta.

Toinen suuren mittakaavan esimerkki synteettisten polttoaineiden tuotannosta on Etelä-Afrikka, jossa Sasol-yhtiö on vuodesta 1955 alkaen valmistanut FT-synteeseillä kaikkia liikenteen polttoaineita, siis bensiiniä, dieselöljyä, kerosiinia, nestekaasua ja metaania. Apartheid-politiikkansa takia maa oli öljyntuontikiellossa, joten koska maalla ei ole öljyresursseja 100 % polttoaineista tehtiin kotimaisista resursseista, pääasiassa kivihiilestä (CTL ja CTG), mutta vähäisessä määrin bioresursseista (BTL ja BTG). Saarron loputtua Sasolin synteettisten polttoaineiden osuus on pudonnut ja on nyt noin 40 % kaikista maan liikennepolttoaineista. Vuodesta 1997 alkaen on FT-synteeseissä käytetty myös maakaasua (GTL). Synteettisten polttoaineiden tuotanto vuonna 2006 oli 7,54 Mt (Sasol 2007), joka vastaa noin 300 PJ:n energiasisältöä eli se ylittää Saksan 1940-luvun tuotannon, mutta ilman Saksan teknologista monimuotoisuutta. Suomen liikenteen energiankulutukseen verrattuna kyseessä on lähes kaksinkertainen määrä.

Tärkeimmät synteettisten heterogeenisten polttoaineiden tuotantomenetelmät ovat pyrolyysi, suora nesteytys ja kaasutus pohjaiset synteetit. Näillä menetelmillä valmistettua bensiiniä kutsutaan nimillä P-bensiini (pyrolyysillä), DL-bensiini (suoralla nesteytyksellä), B-bensiini (Bergius-synteeseillä eli hydrauksella, joka on suoran nesteytyksen tärkein alalaji), G-bensiini (kaasutuksella), FT-bensiini (Fischer-Tropch-synteeseillä, joka on eräs kaasutus pohjainen synteesi) sekä MTG-bensiini (metanolista tai DME:stä syntetisoitu bensiini; lähtöaineet voivat olla kaasutusperäisiä, mutta ei välttämättä tarvitse olla).

2.28.2 Suora nesteytys

Korkean paineen ja lämpötilan käyttö puun nesteytyksessä alkoi happohydrolyysikoelilla. Sen demonstroi ensimmäisenä belgialainen Louis Melsens 1850-luvulla, mutta ei onnistunut kehittämään menetelmää kaupallista tuotantoa varten.

Friedrich Bergius kehitti vuonna 1913 Nobelin palkintoon vuonna 1931 johtaneen menetelmän kivihiilen nesteyttämiseksi lisäämällä siihen vetyä korkeassa paineessa ja lämpötilassa katalyyttien läsnä ollessa. Ensimmäinen Bergius-synteesiin perustuva tehdas aloitti toimintansa Leunassa Saksassa vuonna 1927 (Talvitie 1945b). Menetelmän vaatima paine oli noin 300 ilmakehää. Bergius-synteesi eli hydraus tuli myöhemmin hyvin merkittäväksi osaksi öljynjalostusta vetykrakkaukseksi nimitettynä, mutta sen toimivuus osoitettiin jo 1920-luvulla myös puulle, turpeelle ja tervalle. Bergius-synteesi puulle toteutettiin ensi kertaa Ruotsissa vuonna 1927 (Lindblad 1931) ja tervalle ensi kertaa Neuvostoliitossa vuonna 1928 (Ipatiew & Petrow 1928). TTK:n professori Gustaf Komppa tuotti omalla Bergius-synteesin muunnoksellaan vuodesta 1928 alkaen bensiiniä sekä turpeesta että sahajauhasta (Talvitie 1930). Hän toteutti demonstraatiolaitoksen Helsinkiin (Nykänen 1994), ja valmisti siellä 1940-luvulla itse autossaan tarvitsemansa bensiinin, mutta hän ei koskaan onnistunut saamaan rahoitusta kaupalliselle laitokselle (Nykänen 2000).

Saksassa sen sijaan Bergius-synteesistä muodostui kaupallinen menestys ja se oli tärkein synteettisten polttoaineiden, erityisesti bensiinin, tuotantomenetelmä toisen maailmansodan aikana. Saksassa oli toiminnassa 12 suurta rusko- ja kivihiilipohjaista Bergius-synteesitehdasta (Stranges 2003). Tätä menetelmää sovellettiin 1930-luvulta alkaen Saksassa ja Englannissa myös kivihiiliperäisten nesteiden krakkaukseen, jolloin käyttöön otettiin käsite vetykrakkaus (Parker 1981). Se tuli 1940-luvulta alkaen käyttöön myös raakaöljyn jalostamoissa, jossa tarkoituksessa sen teollisesti selvästi suurin merkitys on toistaiseksi ollut.

Bergius-synteesi tuottaa korkean oktaaniluvun bensiiniä, mutta alhaisen setaaniluvun dieseliä. Siitä syystä menetelmä soveltuu erityisesti ottomoottoripolttoaineen valmistamiseen. Suomeen tuotiin sodan aikana Saksasta kivihiilipohjaisia bensiinejä varsinkin lentokoneisiin, mutta myös muuta sotilasliikennettä varten. CTL-bensiinejä käytettiin Suomen yhteensä 159:ssä saksalaisessa Me109-hävittäjäkoneessa (Valtonen 1999, Kuva 2.118). Saksan sodanaikaisesta kivihiilipohjaisesta lentobensiinistä 95 % oli B-synteesillä valmistettua (Yergin 1991).

Melvin Calvin, joka sai vuoden 1961 Nobelin kemian palkinnon selvitettyään fotosynteesin toimintaperiaatteen, omisti elämänsä loppupuolen kasviöljyjen energiakäytön tutkimukseen. Hän tutki useita teknologioita, mukaan lukien suoraa nesteytystä, jonka avulla hän tuotti korkealaatuista kasviöljybensiiniä 1970-luvulla. Vuonna 1982 Calvin sanoi Boston Globe -lehden haastattelussa seuraavaa (Cooke 1982):

”There is no question that energy agriculture is critical for the development of alternative energy supplies of liquid fuel. The concept is economically feasible, the plant species are available and the technology has been developed.”



Kuva 2.118. Synteettistä CTL-bensiiniä käyttänyt Messerschmitt BF 109 vuosimallia 1944 Keski-Suomen ilmailumuseossa Tikkakoskella. Polttoaineena oli pääasiassa B-bensiini, mutta vähäisessä määrin myös P- ja FT-bensiini. [2006]

2.28.3 Kaasutus pohjaiset prosessit

Kaasutus pohjaiset biopolttoaineet tarkoittavat puun, oljen ja muun biomassan termisen kaasutuksen tuotekaasusta (esimerkiksi puukaasu) erotettuja polttoaineita (vety, metaani, hiilimonoksidi), synteetikaasun (tuotekaasusta puhdistettu vedyn ja hiilimonoksidin seos) avulla syntetisoituja polttoaineita sekä muiden tuotekaasun komponenttien avulla syntetisoituja polttoaineita. Jälkimmäisestä on esimerkkinä hiilidioksidin ja vedyn avulla Sabatier-reaktion avulla syntetisoitava metaani. Synteetikaasupohjaisista polttoaineista saatiin ensimmäisenä toteutettua metaanisynteesi vuonna 1902 ja metanolisynteesi vuonna 1905, molemmat Paul Sabatierin toimesta.

Franz Fischer ja Hans Tropsch onnistuivat ensimmäisenä valmistamaan kaasutus pohjaisia nestemäisiä polttoaineita kiinteästä resurssista, kivihiilestä, laboratoriossa vuonna 1923. Pääosa tuotteista oli alkoholeja, joten he antoivat lopputuotteelle nimen syntholi. Vuonna 1926 he toteuttivat laboratoriossa valtaosin hiilivetyjä, olomuodoltaan kaasumaisista kiinteisiin, tuottavan prosessin. Heidän nimiään kantavan FT-synteesin ensimmäinen pilottituotantolaitos 1000 t/v kapasiteetilla käynnistyi vuonna 1934 Oberhausen-Holtenissa Essenin lähellä. (Stranges 2003)

Toisen maailmansodan aikana Saksassa oli toiminnassa 9 FT-synteesitehdasta (Stranges 2003), joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti oli 0,6 Mt (Schulz 1999). Myös Ranskaan rakennettiin 1930-luvulla yksi tehdas (Nowacki 1979). Etelä-Afrikassa kivihiilipohjainen vuosituotantokapasiteetti (CTL) on 2 tehtaassa yhteensä 8 Mt ja maa-kaasupohjainen kapasiteetti (GTL) on 2 Mt (Davies 2004). Muita esimerkkejä FT-syn-

teesiteollisuudesta ovat 0,35 Mt vuosikapasiteetilla 1950-luvulla USA:ssa toiminut FT Hydrocol -tehdas, Malesian Bintulussa 0,5 Mt kapasiteetilla 1990-luvulta lähtien toiminut Shellin tehdas (Schulz 1999) ja vuonna 2006 käynnistynyt Sasolin tehdas Qatarissa 1,4 Mt vuosikapasiteetilla (Davies 2004). Qatarissa, Boliviassa, Nigeriassa, Indonesiassa ja Venäjällä meneillään olevien GTL-projektien vuosikapasiteetti on yli 30 Mt (Davies 2004). FT-synteesin teollinen käyttö on siis nykyään suurimuotoista, mutta lähes pelkään fossiiliresursseja hyödyntävää.

Öljykriisin seurauksena 1970-luvulla Mobil kehitti kaupallisesti menestyneen MTG-synteesin, jossa bensiiniä valmistetaan metanolista. Tarvittava metanoli voidaan valmistaa kaasutuksella, mutta myös muilla menetelmillä.

Saksalainen yhtiö Choren on valmistanut puupohjaisia liikennepolttoaineita FT-synteesillä vuodesta 2003 alkaen Freibergissä Saksassa yhteistyössä VW:n ja MB:n kanssa (Kuva 2.119). Nämä yhtiöt ovat rekisteröineet BTL-polttoaineilleen tuotenimen Sunfuel erotuksena fossiilisista polttoaineista valmistettuihin Synfuel:eihin.



Kuva 2.119. Volkswagenin Autostadt-automuseossa Wolfsburgissa esitellään Sunfuelia: a) Kuva Chorenin Freibergin tehtaasta, joka on valmistanut puuperäisiä FT-polttoaineita liikennekäyttöön vuodesta 2003. b) Automuseossa oleva Sunfuel-laboratorio, jossa kävijät voivat esivalmistaa Sunfuelia. c) Kävijän esivalmistamaa ja Chorenin tehtailla tuotettua Sunfuelia tuoteselosteineen. [2007]

2.29 XVI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BODIESEL (1900-LUKU)

Synteettistä biodieseliä voidaan valmistaa samoilla menetelmillä kuin muitakin BTL- ja BTG-polttoaineita (Luku 5). Suomessa Neste on valmistanut hydrauksella NExBTL-nimistä pääasiassa palmuöljypohjaista BTL-dieseliä vuodesta 2007 (Kuva 2.120).



Kuva 2.120. Nesteen B-palmuöljydieseliä NExBTL käyttävä bussi Vantaalla. [2007]

2.30 XVII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIOPETROLI (1900-LUKU)

Petrolia on käytetty polttomootoreissa 1820-luvulta alkaen ja myös otto- ja dieselmootoreissa. Petroli on 1900-luvun alun jälkeen ollut bensiiniä halvempaa. Sitä käytettiin autoissa Suomessa viimeksi 1970- ja 1980-luvuilla öljykriisien seurauksena, jolloin myös Saab-Valmet Suomessa valmisti petroliautoja Saab 99 Petro ja Talbot Horizon Petro (Juurikkala ym. 1986). Ne olivat bifuel-malleja, joissa käytettiin myös bensiiniä ja jotka piti käynnistää bensiinillä (Kuva 2.121). Moottoripetrolia ei enää pitkään aikaan ole Suomessa myyty, josta syystä petroliautojen omistajat ovat käyttäneet autojaan mm. tärpätin ja bensiinin seoksella (Hermalampi 2007). Eräissä muissa maissa moottoripetrolia edelleen myydään autokäyttöön (Kuva 3.18). Petroli saadaan raakaöljyn lisäksi myös synteettisesti biomassasta monilla menetelmillä (Luku 5).



Kuva 2.121. Saab 99 Petro vuosimallia 1978 Uudenkaupungin automuseossa. [2008]

2.31 XVIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BOKEROSIINI (1900-LUKU)

Muiden synteettisten biopolttoaineiden tavoin myös suihkukoneisiin sopivaa kerosiinia on valmistettavissa monin tavoin, joita käydään läpi luvussa 5. Suihkukoneiden päästöjen noutua erääksi keskeiseksi teemaksi YK:n ilmastoneuvotteluissa, bioperäisten suihkukonepolttoaineiden kehitystoiminta on kiivastunut. Saksassa synteettisten polttoaineiden toimivuus suihkukoneissa osoitettiin jo 1940-luvulla (Kuva 2.122).



Kuva 2.122. Bergius- ja FT-synteeseillä valmistettua kerosiinia käyttänyt maailman ensimmäinen sarjavalmistukseen (1943) ja palveluskäyttöön (1944) päässyt suihkumoottorilentokone Me262 Deutsches Museumissa Münchenissä [2007].

2.32 XIX SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: SYNTEETTINEN BIONESTEKAASU (1900-LUKU)

Nestekaasu tarkoittaa nesteytettyä propaania ja butaania (LPG), joita esiintyy sekä raakaöljyn että maakaasun lähteissä. Nestekaasua on tuotettu myös synteettisesti kivihielestä (CTG) ja biomassasta (BTG), mutta niiden merkitys on toistaiseksi pieni verrattuna maakaasu- ja raakaöljypohjaiseen tuotantoon.

Nestekaasun nesteytyksen kehitti saksalainen Hermann Blau vuonna 1901 ja kaasua on aikanaan hänen mukaansa kutsuttu blaukaasuksi. Ensimmäiset käyttösovellukset olivat teollisuudessa ja ruoanlaitossa. Sitä on käytetty ottomaamootoreissa vuodesta 1905 ja liikkuvassa ottomootorissa autossa ensimmäisen kerran vuonna 1912. LPG:stä tuli Pohjois-Amerikassa suosittu traktoripolttoaine ennen dieseltraktoreiden valtakautta. Useita satoja tuhansia LPG-traktoreita oli käytössä 1940-luvulla. (Leffingwell 1995)

Nykyisin LPG on yleisintä autoissa ja pienissä työkonneissa. Perinteisesti LPG-autot ja LPG-traktorit on toteutettu jälkiasennussarjalla ja autonvalmistajien sarjavalmistettut LPG-autot tulivat markkinoille vasta 1990-luvulla kuten metaaniautotkin. Pienissä työkonneissa puolestaan LPG on jo pitkään ollut tarjolla tehdasmalleissa vaihtopullojen avulla, mutta autoissa on lakisääteisesti oltava pysyvä säiliö. Tehdasvalmisteisia LPG-

traktoreita on tuottanut ainakin John Deere (Williams 2008). LPG-ajoneuvoja on maailmassa noin 10 miljoonaa (Gårdmark 2007) eli ne ovat yleisempiä kuin metaanikäyttöiset. Helsingissä oli 1990-luvulla käytössä muutama nestekaasubussi, ja ne ovat monissa maissa yleisiä, mutta nykyään nestekaasua ei Suomessa käytetä autojen polttoaineena tutkimusta lukuun ottamatta. Liikkuviissa työkonneissa nestekaasua Suomessa käytetään.

Nestekaasua käytetään noin 8 miljoonassa autossa. Niistä suurin osa on Euroopassa, jossa myös jakeluverkosto on tiheä (Kuva 2.123). Nestekaasun käytössä johtavat maat ovat Italia ja Hollanti. Nestekaasun käyttö EU15:ssa väheni 28 % vuosina 1990-2006 (EEA 2008).



Kuva 2.123. Nestekaasun tankkausasema Eestissä (a) ja Luxemburgissa (b). Suomessa yleisiä ajoneuvoille tarkoitettuja nestekaasun tankkausasemia ei ole. [2007]

2.33 XX SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: PROPANOLI, BUTANOLI JA MUUT KORKEAMMAT ALKOHOLIT (1900-LUKU)

Louis Pasteur onnistui ensimmäisenä tuottamaan fermentaatiolla butanolia ja asetonia vuonna 1862 (Papoutsakis 1989). Sikunaöljyä on perinteisesti saatu etanolifermentaation sivutuotteena. Se koostuu pääasiassa propanolista, butanolista, pentanolista ja heksanolista, jotka kaikki soveltuvat polttoaineeksi ja myös luonnollisiksi polttoainetanolin denaturoimisaineiksi. Kotipoltossa suurin osa sikunaöljystä meni jälkittiseeseen, jota käytettiin reumatismin hoitoon ja eläinten lääkitykseen, ja teollisessa tuotannossa 1940-luvulle asti se pääasiassa poltettiin (Kauppila 1988). Korkeampia alkoholeja, erityisesti pentanolia, tislattiin Suomessa sikunaöljystä vuosina 1918-1970 (Kauppila 1988). Rajamäen tehtaalla valmistettiin vuodesta 1956 alkaen sulfitti- ja viljasikunasta butanolia, pentanolia ja heksanolia, joita kaikkia käytettiin etanolin denaturoimisaineena (Vehviläinen 1963). Alkoholeista isobutanoli ja pentanoli ovat olleet tärkeimmät denaturoimisaineet (Kauppila 1988).

Jo 1900-luvun alussa osattiin fermentaatiolla tuottaa propanolia, butanolia, pentanolia sekä heksanolia ja heptanolia osattiin valmistaa risiiniöljystä (Goldsmith 1922).

Myös synteettiset menetelmät korkeampien alkoholien tuottamiseksi kehittyivät 1900-luvun alussa. Synteesikaasupohjainen Fischer-Tropsch-synteesi tuottaa sekä alkoholeja että hiilivetyjä ja sen alkuperäinen tekniikka vuonna 1923 oli nimenomaan butanolia ja muita alkoholeja tuottava (Stranges 2003). Fischerin ja Tropschin syntetoliksi kutsumaa alkoholiseosta voidaan tuottaa esimerkiksi puun kaasutuksen tai biokaasun höyryreformoinnin avulla tuotetulla synteesikaasulla.

2.34 XXI SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: BODIESEL (1900-LUKU)

Biodieselillä tarkoitetaan perinteisesti kasviöljyistä tai eläinrasvoista vaihtoesteröinnillä valmistettua polttoainetta. Sekä kasviöljyjen että eläinrasvojen vaihtoesteröinti on osattu 1850-luvulta lähtien, mutta alunperin sitä käytettiin saippuan valmistukseen maissi-, pähkinä- ja hamppuöljystä sekä talista (Pahl 2005). Dynamiitin keksimisen jälkeen glyseriinistä eli glyserolista tuli vaihtoesteröinnin tärkein tuote. Liikennekäyttöön biodiesel tuli ilmeisesti vasta 1930-luvulla, jolloin sitä käytettiin rekoissa ja traktoreissa Etelä-Afrikassa. Belgiassa aloitettiin vuonna 1938 palmuöljystä valmistetun biodieselin käyttö Brysselin ja Louvainin välisessä bussiliikenteessä (Pahl 2005).

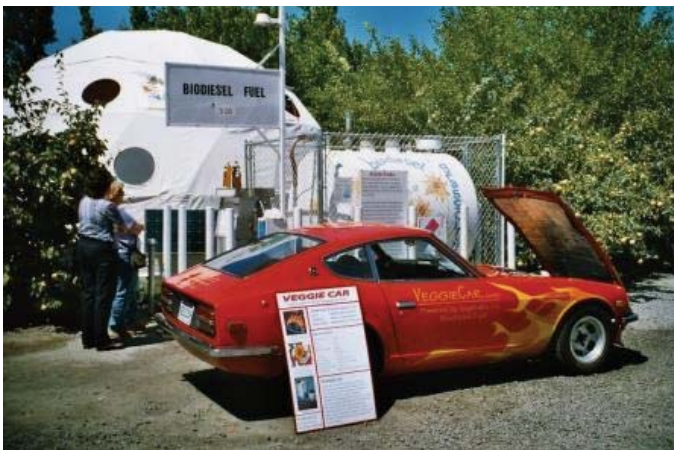
Biodiesel sopii moniin dieselajoneuvoihin 100 %:na (B100) sellaisenaan tai muihinkin korkeintaan pienin muutoksin. Joka tapauksessa B20 sopii kaikkiin dieselajoneuvoihin ilman muutoksia. Esimerkiksi Saksassa, Itävallassa ja Ruotsissa käytetään yleensä B100:aa, Ranskassa B5:a tai B30:a ja USA:ssa B20:a. (IEA 2004)

Ranskan valtionrautateilla on tavoitteena saada dieselvetureistaan 70 % B30-käyttöisiksi vuoteen 2010 mennessä, jonka lisäksi he käyttävät joissakin vetureissa myös PPO100:aa. Jäterasvat ja -öljyt ovat luonnollisestikin halvin resurssi ja esimerkiksi Englannissa jäteperäisen biodieselin tuotantohinta on nykyään sama kuin fossiilidieselin tuotantohinta. Se on siis kilpailukykyinen ilman mitään tukitoimenpiteitä. Englannissa biopolttoaineille sovelletaan alemmaa polttoaineverotasoaa kuin fossiilisille, joten jäteperäisen biodieselin lisäksi myös rypsibiodiesel (RME) ja palmuöljybiodiesel ovat kilpailukykyisiä. Saksassa, jossa liikenteen biopolttoaineilla ei ole lainkaan valmisteveroa, biodieselin myyntihinta on noin 10 % alempi kuin fossiilidieselin (Bomb ym. 2007). Grazin kaupunki Itävallassa on ollut esimerkin näyttävä jäteperäisen biodieselin liikennekäytössä kaupungin busseissa (Kuva 2.124).



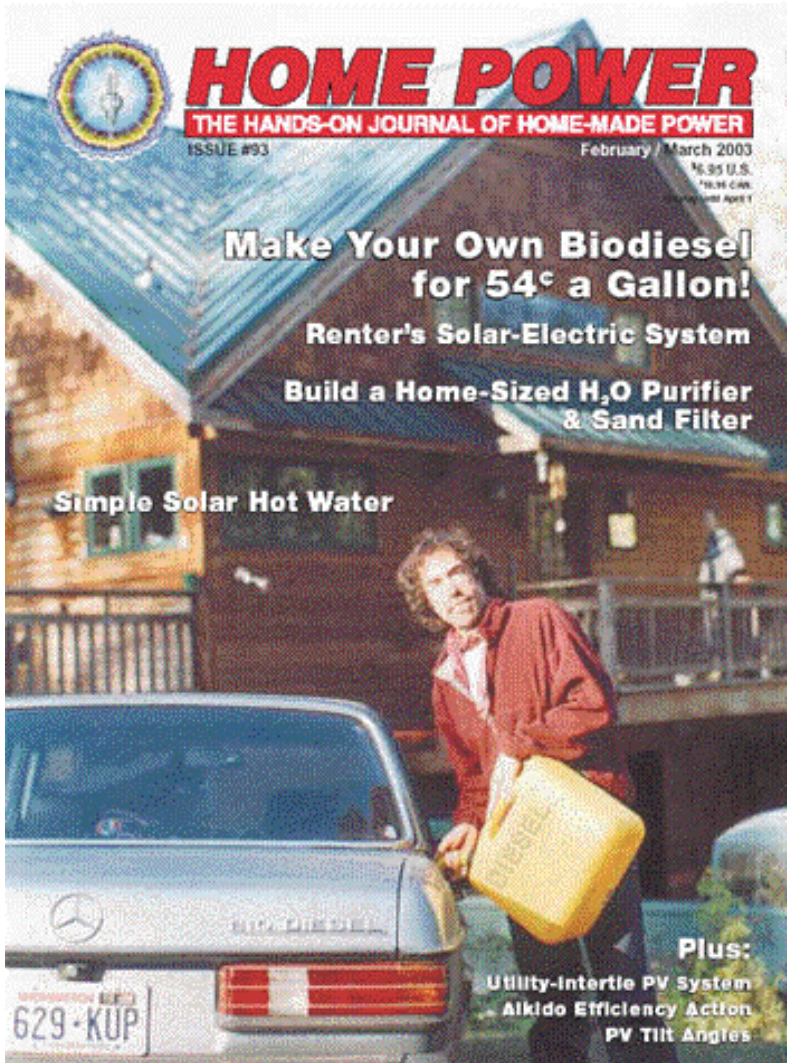
Kuva 2.124. Grazissa Itävallassa käytetään busseissa ravintoloiden jätterasvoista sekä öljykasveista valmistettua biodieseliä. [2007]

Biodieseliä on mahdollista valmistaa yksinkertaisilla laitteistoilla hyvin pienessä mittakaavassa ja edullisesti lähes kotiviinin ja kotioluen tapaan, joten kotivalmistusta varten on laadittu runsaasti opaskirjoja (mm. Tickell & Tickell 1999 ja Carter ym. 2005) ja koiteihin myytäviä valmiita biodieselin tuotantolaitteistoja (Kuva 5.1). Tämä on puolestaan mahdollistanut omavaraisuutta ympäristönsuojelun ohella korostavan ruohonjuuritason toiminnan ja suorastaan biodieselliikkeen synnyn (Estill 2005). Biodieselosuuskunnat ovat niistä eräs merkittävä ilmenemismuoto (Kuva 2.125, Kansikuva 6). Suomessa vastaavaa ilmiötä ei ole syntynyt paljolti vuodesta 1965 voimassa olleiden veroesteiden takia (Lampinen 2008b), mutta myös samanlaisista sosiologisista syistä, jotka ovat yhtä poikkeusta lukuun ottamatta estäneet tuulivoimaosuuskuntien synnyn Suomeen Tanskan mallin mukaisesti (Palmroth 2004).



Kuva 2.125. Biodieselosuuskunnan Yokayo Biofuels ylläpitämä yleinen tankkausasema Hoplandissa Kaliforniassa. Etualalla biodieselin käyttöön konvertoitu Nissan. Pumpun päällä on pulloissa kolme kasviöljylajia, joista biodieseliä osuuskunnassa tehdään. [2004]

Biodiesel on kasviöljyn, etanolin, ekosähkön, UE-vedyn ja UE-paineilman ohella yksi niistä uusiutuvista liikennepolttoainevaihtoehtoista, jotka on valmistettavissa jopa omakotitalokohtaisesti (Kuva 2.126).



Kuva 2.126. Amerikkalainen Home Power -lehti on erikoistunut käsittelemään talokohtaista energiantuotantoa ja energiaomavaraisuutta niin liikennepolttoaineiden, sähkön kuin lämmönkin osalta. Esimerkiksi biodieseliä voidaan omakotitalossa valmistaa kilpailukykyiseen hintaan.

2.35 MAAKAASU JA MUUT FOSSIILISET METAANIRESURSSIT (1900-LUKU)

Fossiilisen metaanin pääasiallinen lähde on ollut maakaasu, joka otettiin energiakäyttöön aluksi valaistuksessa noin 3000 eaa. Varsinaisten maakaasulähteiden lisäksi metaania saadaan sivutuotteena kivihiilen louhinnan yhteydessä (kaivoskaasu) ja raakaöljyn porauksen ja jalostuksen yhteydessä. Suurin osa on perinteisesti jätetty hyödyntämättä ja laskettu suoraan ilmakehään. Ilmastopolitiikan seurauksena ja myös raakaöljylähteiden tarkemman hyödyntämisen takia tämä metaaniresurssi on nykyisin yleensä vähintään soihdutettu ja usein myös otettu käyttöön ainakin porauslaitteiston energianlähteenä ja joissakin tapauksissa myös erilleen kerättyinä ja putkistosiirtona markkinoille tuotettuna. Metaanin lisäksi maakaasu sisältää muitakin keveitä hiilivetyjä kuten etaania, propaania ja butaania. Maapallon suurimmat metaanivarannot ovat kuitenkin metaaniklatraateissa eli kiinteissä metaanihydraateissa meren pohjissa ja ikiroudan alla (Luku 4.3).

Metaania löytyy myös muilta planeetoilta ja kuista, esimerkiksi Saturnuksen Titan-kuusta hyvin runsaasti (Suominen 2007b). Avaruuslennoilla on periaatteessa mahdollista käyttää sitä energianlähteenä. Se on helpointa mikäli myös happea tai sitä sisältäviä yhdisteitä tai muita kemikaaleja, jonka kanssa metaani voi eksotermisesti reagoida polttomoottorissa tai polttokennossa, on saatavilla. Esimerkiksi ionimoottoreita, aurinkotermisiä tai ydintermisiä moottoreita käytettäessä happea ei tarvita.

Maakaasun ensimmäinen liikennekäyttö oli Johannes Winklerin nestemäistä maakaasua LNG käyttävä koeraketti vuonna 1931. Paineistettu maakaasu CNG on ollut kaupallisessa liikennekäytössä Italiassa, Australiassa, Japanissa ja Venäjällä 1930-luvulta alkaen. Esimerkiksi Fiat on valmistanut CNG-autoja vuodesta 1935 alkaen (Kuva 2.127). Japanissa CNG-bussien käyttö aloitettiin 1930-luvulla ja vuonna 1939 niitä oli käytössä lähes 1000 Tokiossa ja Chibassa. Australiassa metaaniautojen valmistus ja käyttö aloitettiin vuonna 1937 ja Neuvostoliitossa vuonna 1939.



Kuva 2.127. Fiatin metaaniautoja 1930-luvulla. (Volpi & Vafidis 2007)

Vuonna 1990 Italia oli edelleen maailman johtava maa 270.000:lla maakaasuajoneuvolla (Kuva 2.128), kun taas Uusi-Seelanti johti tankkausasematilastoja 450 asemallaan (Stephenson 1991).



Kuva 2.128. Maakaasun tankkausasemia Italiassa: a) taksi (Fiat Multipla Bipower bifuel-auto) tankkaamassa 1970-luvun alussa Milanon lentokentällä avatulla maakaasuasemalla, b-c) moderni aurinkopaneelilla sähköistetty huoltoasema Pisan lähellä Pohjois-Italiassa. [2004]

Raakamaakaasu ei sovellu liikennepolttoaineeksi, vaan se on jalostettava siten, että mm. hiilidioksidi (jota eräissä raakamaakaasulajeissa on yli 50 %), rikkivety (jota raakamaakaasulajeissa on pahimmillaan kolmasosa) sekä typpi (jota raakamaakaasussa on pahimmillaan neljäsosa) poistetaan suurimmalta osalta. Raakamaakaasu on eräissä lähteissä selvästi huonompilaatuista kuin raaka biokaasu, joten jalostusjärjestelmiltä vaaditaan paljon. Suomen kuten muidenkin maiden maakaasuverkkoissa kulkee tuotantopaikoilla jalostettu maakaasu. Erona jalostettuun biokaasuun jalostettu maakaasu sisältää myös etaania, propaania ja butaania, jotka myös sopivat polttoaineeksi. Autojen lisäksi maakaasu on yleisessä käytössä moottoripyörien polttoaineena etenkin Aasiassa (Kuva 2.129).



Kuva 2.129. CNG-moporiksa Delhissä Intiassa. Delhin kaikki motorisoidut riksat ja taksit ovat CNG-käyttöisiä, koska Intian korkein oikeus määräsi niin ilmansuojeluyistä. Intiassa on runsaasti biokaasutuotantoa, mutta sitä ei toistaiseksi käytetä liikenteessä. [© Pavel Simecek 2005]

Maakaasu käytetään, varastoidaan ja kuljetetaan useimmiten paineistettuna, mutta nesteytetyn maakaasun käyttö on yleistymässä. Maakaasun nesteytys toteutettiin laboratoriossa 1860-luvulla ja ensimmäinen tehdas käynnistyi vuonna 1917. Maakaasua on kuljetettu LNG-rahtilaitoilla vuodesta 1959. Ajoneuvoissa LNG:tä on käytetty 1970-luvulta lähtien: LNG-rahtilaitoissa, rekoissa ja junissa.

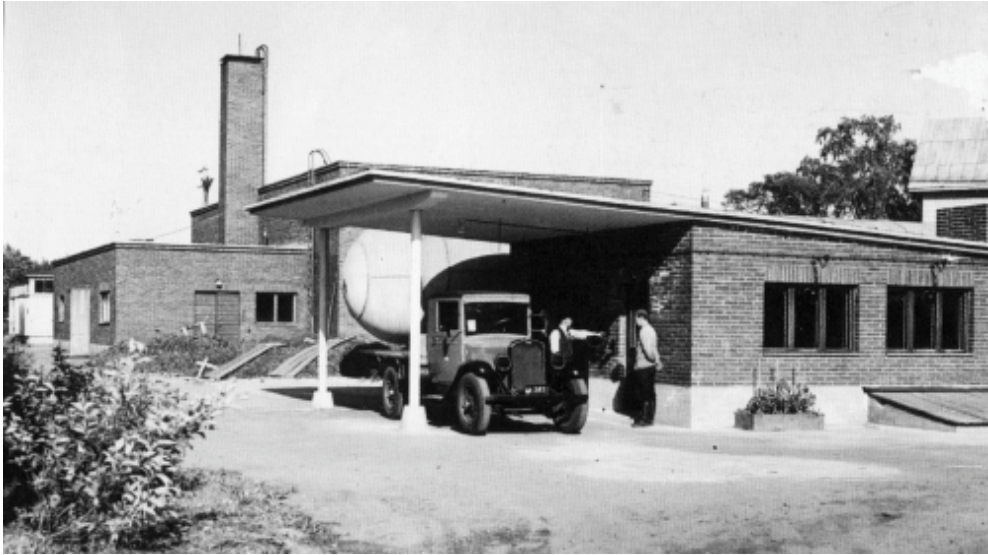
2.36 XXII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET:

BIOKAASU (1900-LUKU)

Biokaasua on tuotettu biokaasureaktoreissa Kiinassa jo yli 1000 vuotta, mutta länsimaissa vasta 1800-luvulta alkaen. Suomen ensimmäinen mädätyslaitos oli Helsingin piirilääkäri Albert Palmbergin jätevesien biologisen puhdistuksen koelaitos, joka toimi Helsingissä vuosina 1902–1904; ensimmäiset kunnalliset mädätystä käyttävät jäteveden puhdistuslaitokset valmistuivat vuonna 1910 Lahteen ja Helsinkiin tanskalaisten kaupunkien mallien mukaan tanskalaisella teknologialla (Laakkonen 2001). Biokaasun hyödyntäminen alkoi vasta vuonna 1932 Helsingin Kyläsaaren jätevedenpuhdistamolla, jossa liete käsiteltiin reaktorissa mädättämällä ja kaasu myytiin kaupungin kaasulaitokselle (Katko 1996). Biokaasun hyödyntäminen teollisuudessa alkoi vuonna 1938 Rajamäen hiivatehtaalla, jossa jätevedenpuhdistuksen lietteen mädätyksessä syntynyt kaasu poltettiin tehtaan voimalaitoksella (Vehviläinen 1963).

Jätevedestä valmistettua biokaasua käytettiin liikennepolttoaineena Helsingissä sodan aikana. AGA perusti ensimmäisen biokaasutankkausaseman vuonna 1941 Kyläsaaren jätevedenpuhdistamolle ja toisen vuonna 1943 Rajasaaren jätevedenpuhdistamolle kapasiteetiltaan 30 ja 140 m³/h (Haapaniemi 1983, Katko 1996). Kaasu tankattiin alun perin keskitetysti 150 ilmakehän paineessa oleviin kaasupulloihin, jotka vaihdettiin autojen tyhjentyneisiin kaasupulloihin – aivan kuten nestekaasua käytettäessä – mutta myöhemmin siirryttiin 350 ilmakehän varastosäiliöön, josta voitiin tankata autojen kiinteisiin kaasusäiliöihin (SK 1941). Kuvassa 2.130 tankataan biokaasua kuorma-autoon Rajasaaren tankkausasemalla (Katko 1996). Biokaasulle konvertoitujen autojen tehot olivat suunnilleen samat kuin bensiiniä käytettäessä (SK 1941).

Biokaasun liikennekäyttö Helsingissä vuosina 1941–1946 on esitetty taulukossa 2.10. Kapasiteettia oli noin 150 autolle ja se oli varattu pelkästään Helsingin kaupungin ajoneuvoille (SK 1941). Kokonaistuotanto vuosina 1941–1946 oli 48,8 TJ, joka riitti noin 14 miljoonan kilometrin ajoon.



Kuva 2.130. Biokaasukuorma-auto Helsingin Rajasaaren jätevedenpuhdistamon biokaasutankkausasemalla vuonna 1943. [Foto Roos 18.6.1943/Helsingin kaupunginmuseon kuva-arkisto]

Taulukko 2.10. Biokaasun ajoneuvokäyttö Helsingissä 1940-luvulla Määrät: Eriksson ym. 1991.

Vuosi	Metaani [Nm ³]	Energia [TJ]
1941	87.899	3,2
1942	174.452	6,3
1943	241.643	8,7
1944	347.192	12,5
1945	394.104	14,2
1946	109.448	3,9
YHT.	1.354.738	48,8

Biokaasun liikennekäyttö aloitettiin ensimmäisenä maailmassa Boråsissa Ruotsissa vuonna 1940 (Kuva 2.131). Tukholman kaupunkiliikenteessä biokaasun käyttö aloitettiin heinäkuussa 1942, jolloin käyttöön otettiin 23 biokaasubussia ja 17 biokaasuhuoltoajoneuvoa (ASS 1942, Kuva 2.66).

Biokaasun liikennekäyttö aloitettiin uudelleen öljykriisin seurauksena 1980-luvun alussa Uudessa-Seelannissa. Jätevedenpuhdistamon yhteyteen Christchurchiin valmistui vuonna 1983 liikennebiokaasun tuotantolaitos, joka puhdisti vesipesulla ja kompressoi raaka-kaasusta 95 %:ta metaania (CBG) tuotantokapasiteetilla 1200 Nm³ päivässä. CBG:n tuotantokustannukset alittivat maakaasun (CNG) hinnan ja ajoneuvojen bifuel-konversioiden takaisinmaksuaika oli parhaimmillaan 1,1 vuotta. (Stephenson 1991)

Kuten maakaasun, myös biokaasun käyttö on valtaosin kompressoituna. Ruotsissa sitä on tarjolla yli 100 asemalla (Kuva 2.132, Lampinen 2008a).



Kuva 2.131. Volvon biokaasuauto Ruotsissa 1940-luvulla. Nuoli osoittaa katolla oleviin kompressoitun biokaasun (CBG) tankkeihin. (Holm 2006)



Kuva 2.132. Kolme erityyppistä CBG-autoa biokaasutankkaamassa OKQ8-aseamalla Tukholmassa. Raskas kuorma-auto MB Eonic NGT (monofuel), pakettiauto MB Sprinter NGT (bifuel) ja henkilöauto VW Caddy Ecofuel (bifuel). [2009]

Ruotsissa aloitettiin vuonna 2009 nesteytetyn biokaasun käyttö (Kuva 2.133). Se sopii yhteen kryojalostuksen kanssa, joka tuottaa joka tapauksessa nesteytettyä metaania. Kryojalostus puolestaan sopii erityisen hyvin kaatopaikkakaasulle, koska perinteisillä puhdistusmenetelmillä ei kaatopaikkakaasussa olevaa typpeä saada pois. Kaupallisesti on tarjolla LBG-käyttöisiä vetureita ja rekkoja, mutta henkilö- ja pakettiautokoluokkaan sitä tekniikkaa ei vielä ole. LBG-ajoneuvot ovat yleensä dualfuel-dieseleitä, mutta myös ottomootorilla varustettuja markkinoilta löytyy.



Kuva 2.133. LBG- ja CBG-jakeluasema Sundsvallissa Ruotsissa tavanomaisten liikennepolttoainesten jakeluaseman yhteydessä. [2009]

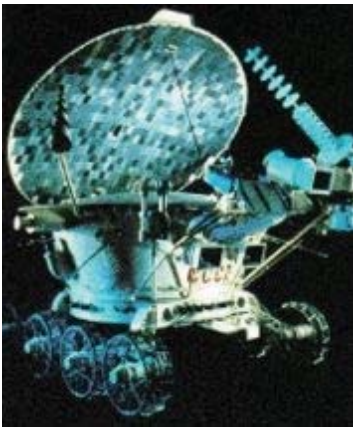
2.37 YDINVOIMA (1900-LUKU)

Fissiodydinvoimaa on käytetty sukellusveneissä 1950-luvulta alkaen ja laivoissa 1960-luvulta alkaen. Sen etuna on, että polttoainetta ei välttämättä koko aluksen eliniän aikana tarvitse täydentää ja tavanomaiset päästöt ovat pienet. Haittana ovat radioaktiiviset päästöt. Vesiliikennesovelluksissa ydinreaktorilla tuotetaan vedestä höyryä ja höyryturbiinia käytetään joko suoraan propellin pyörittämiseen tai sillä tuotetaan sähköä ja propelleja pyöritetään sähkömootoreilla. Kaikki ydinsukellusveneet ovat sotilaskäytössä. Ydinlaivoista suurin osa on sotilaskäytössä, mutta myös jäänsärkijöinä varsinkin Venäjällä. Ydinjäänsärkijöitä on rakennettu Suomessakin, mutta niiden ydintekniikka on suunniteltu, valmistettu ja asennettu Neuvostoliitossa. Rahtilaivoissakin tätä teknologiaa on kokeiltu, mutta kaikissa tapauksissa se on osoittautunut liian kalliiksi ja tilalle on vaihdettu kemiallisella polttoaineella toimivat koneet.

Ilmaliikenteessä on sovellettu toisenlaista teknologiaa. Ydinsuihkumoottorit ovat suihkumoottoreita, joissa tuloilma laajenee ydinreaktorin lämmöllä joko suoraan tai epäsuorasti lämmönvaihtimen kautta. Niitä kehitettiin alun perin Saksassa vuodesta 1942 alkaen (Klee ym. 1965) ja sodan jälkeen USA:ssa ja Neuvostoliitossa 1950-luvulta alkaen pommikoneisiin. Vain yksi sellainen, neuvostoliittolainen Bear-pommikone, todellisuudessa lensi 1960-luvulla. Pääongelmana on, että miehistön säteilysuojasta ei pystytä teknisesti toteuttamaan. Se ei ole esteenä kehittyneillä ydinmoottorikäyttöisillä robottikoneilla, mutta niissäkään ei voida kokonaan välttää helposti havaittavia säteilypäästöjä. Ydinpommeilla varustetuissa risteilyohjuksissa säteilyongelma kääntyy eduksi, mutta ydinmoottorin pitkä käyttöaika on tarpeeton ominaisuus.

Ydinkäyttöistä maaliikennettä ei ole toteutettu säteilyongelman takia, vaikkakin Ford Nucleon –auton prototyyppi rakennettiin vuonna 1958 (ilman reaktoria).

Radioaktiivisia isotooppeja on käytetty avaruusliikenteessä elektroniikan voimanlähteenä lämpösähköilmiöön perustuen ydinparistoksi nimitettävällä laitteella vuonna 1964 laukaistusta vakoilusatelliitista ja vuonna 1972 laukaistusta Pioneer 10 -luotaimesta alkaen. Tämä teknologia on käyttökelpoisen kaukana auringosta tai taivaankappaleiden varjon puolella. Se on elektroniikan lisäksi mahdollinen myös sähkömoottorien voimanlähteenä sähkörakettimoottorissa ja planeetta-ajoneuvoissa. Esimerkiksi vuonna 1989 Jupiteriin lähetetyssä Galileo-luotaimessa isotooppi oli ^{238}Pu , joka on yleisin käytössä olevista. Vuonna 1965 kokeiltiin myös pientä 500 watin ydinreaktoria satelliitissa lämpösähköilmiön avulla (Braun 1967). Ydinparistoja on käytetty varsinkin Neuvostoliitossa myös maassa sovelluksissa, jotka ovat kaukana sähköverkoista, kuten majakat.



Kuva 2.134. Aurinkosähkö- ja ydinparistokäyttöinen neuvostoliittolainen kuuajoneuvo Lunakhod-2. [NASA:n kuva-arkisto]

Koneellinen liikenne kuun pinnalla (kuuliikenne) alkoi vuonna 1970 aurinkokenno- ja ^{210}Po -ydinparistokäyttöisellä miehittämättömällä maasta kaukoohjatulla ajoneuvolla, Neuvostoliiton Lunakhod 1:llä (Angelucci & Bellucci 1974). Se oli myös ensimmäinen millään toisella taivaankappaleella kuin Maassa liikkunut ajoneuvo ja samanlainen tieteellisten instrumenttien eroja lukuun ottamatta kuin 3 vuotta myöhemmin lähetetty kuva 2.134:n esittämä Lunakhod-2.

Ydinvoimalla voi tulevaisuudessa olla merkitystä avaruusliikenteessä useilla eri teknologioilla, joista muutamissa yhdessä vedyn kanssa. Esimerkkinä ovat useat mahdollisuudet ydinkäyttöisen rakettimoottorin toteuttamiseksi. Sekä alusten kuljettaminen maasta avaruuteen että kuljettaminen avaruudessa on periaatteessa mahdollista, mutta niitä ei toistaiseksi ole käytetty sekä teknologisten että ympäristöongelmien

vuoksi. Ydinvoiman potentiaalinen merkitys kasvaa lennettäessä aurinkokunnan ulkoplaneetoille ja pois aurinkokunnasta, koska aurinkotuulen, fotonivoiman ja aurinkosähkön resurssi heikkenee suhteessa $1/r^2$:een, missä r on etäisyys auringosta.

Fissioydinvoiman liikennesovellutusten energettinen merkitys ei ole suuri verrattuna sähköntuotantoon, jossa sillä on 16 % osuus maailman tuotannosta eli yhtä suuri kuin

vesivoimalla. Fuusion kesyttäminen avaruusliikennekäyttöön mahdollistaisi hyvin suuret tehot. Suurimman räjäytetyn 50 megatonnin vetypommin vapauttama energia oli 240 PJ. Mutta ei ole varmaa, saadaanko fuusiovoimaa koskaan sovellettua mihinkään rauhanomaiseen energiantuotantoon.

2.38 AURINKOENERGIA (1900-LUKU)

Aurinkolämpöä voidaan hyödyntää suoraan passiivisesti kuumailmapallossa, mutta yksinomaan aurinkoenergiakäyttöisenä sen käyttösovellukset rajoittuvat opetukseen ja tutkimukseen. Toinen mahdollinen aurinkolämmön liikennesovellutus löytyy avaruudesta. Avaruudessa matkustettaessa rakettimootorit voivat periaatteessa toimia keskitettyjen peilien avulla tuotetulla aurinkolämmöllä eli aurinkotermisillä rakettimootoreilla. Tämä teknologia ei kuitenkaan toistaiseksi ole käytössä.

Aurinkosähkö sen sijaan on käytössä monenlaisessa liikenteessä. Vaikka aurinkokennot keksittiin alun perin jo 1800-luvulla, käyttökelpoinen hyvän hyötysuhteen piiksenno rakennettiin ensimmäisen kerran 1950-luvulla (Perlin 1999). Niiden ensimmäinen sovellus oli avaruudessa, jossa niitä on käytetty vuoden 1958 Vanguard 1-satelliitista alkaen (Gatland 1989) lähes kaikissa satelliiteissa ja avaruusluotaimissa elektroniikan voimanlähteenä. Esimerkiksi International Space Stationin sähkö saadaan 120 kW:n aurinkopaneeliverkosta. Myös kehitteillä olevassa kuumatkoihin tarkoitetussa NASAn Orion-avaruusaluksessa sähkö saadaan aurinkopaneeleista (Dingell 2007). Apollo-aluksissa aurinkopaneeleita ei ollut, vaan sähkö saatiin vetypolttokennoista. Polttoainetta saatiin varastoitua mukaan muutaman päivän Apollo-matkoille, mutta se ei ole mahdollista kaavailuille muutaman kuukauden Orion-matkoille. Aurinkokennot tarjoavat avaruussovelluksissa yli 10-kertaisen teho/painosuhteen (noin 1 kW/kg) verrattuna ydinparistoihin ja polttokennoihin (Westman & Oja 1975).

Aurinkoterminen sähkö, esimerkiksi suljetun Brayton-kierron kaasuturbiinien avulla on aurinkopaneelien rinnalla toinen avaruuskäyttöön soveltuva aurinkosähkön tuotantotapa. Sitä on ehdotettu varsinkin avaruusasemien voimanlähteeksi useampaan otteeseen vuodesta 1928 alkaen ja sitä testattiin 50 kW:n teholuokassa myös ISS-asemaa varten vuonna 1987 (Gatland 1989), mutta toistaiseksi sitä ei ole käytetty.

Varsinaisena liikennesovelluksena aurinkovoima otettiin käyttöön vuonna 1970 ensin satelliiteissa ja myöhemmin avaruusluotaimissa ionimootoreiden ja muun tyyppisten sähköisten rakettimootorien voimanlähteenä. Esimerkiksi vuonna 2003 lähetetyn ruotsalaisen Smart-1-kuuluotaimen liikevoiman lähde oli aurinkokennokäyttöinen ionimootori (Kuva 2.30b).

Kuuliikenne aloitettiin vuonna 1970 Neuvostoliiton aurinkosähkö- ja ydinparistokäytöllä Lunakhod-kuuajoneuvolla (Kuva 2.134). Planeettaliikenne aloitettiin niin ikään aurinkosähkön voimalla, amerikkalaisella Sojourner-roverilla Marsissa vuonna 1997. Ja ESA:n vuonna 2014 Marsiin laskeutuvaksi suunniteltu Exomars-ajoneuvo on myös aurinkokennokäyttöinen (Musser 2007). Pitempiaikaista käyttöä varten kuuajoneuvot voidaan varustaa polttokennolla, jolloin vety- ja happivarastot ladataan paikallaan pysyvistä aurinkovoimaloista käyttäen ajoneuvoon kerättyä polttokennoprosessin lopputuotetta vettä (Braun 1967).

Avaruushissillä tarkoitetaan nykyään suunnittelu- ja kokeiluvaiheessa olevaa ja tulevaisuudessa ehkä mahdollista teknologiaa, jolla sekä tavara- että henkilöliikenne voisi kulkea sähköisesti tai magneettisesti maapallon kiertoradalle (ja muiden taivaankappaleiden pinnoilta niiden kiertoradoille) ja takaisin korvaten rakettimoottorit ja ilman tarvetta kuljettaa polttoainetta hissivaunussa (Bolonkin 2006). Energian lähde olisi satelliitin maapallon kiertoradalla keräämä aurinkovoima, joka voitaisiin hyödyntää esimerkiksi lähettämällä energia laserilla hissiyksikön aurinkopaneeleille. Laser on paljon tarkempi aurinkoenergian siirtotekniikka kuin tässäkin sovelluksessa mahdolliset mikroaallot, joita on jo kauan ideoitu aurinkovoiman siirtoon ilmakehän ulkopuolelta maan pinnalle. Muita mahdollisuuksia ovat auringonsäteilyn keskittäminen ja fotonien lähettäminen hissien aurinkopaneeleille tai fotonipurjeelle.

Maapallolla aurinkovoimaa on käytetty voimanlähteenä sähkömoottorien avulla sekä lentokoneissa, ilmalaivoissa, veneissä että autoissa (Kuva 2.135).



Kuva 2.135. a) Aurinkosähköauto Palo Altossa Kaliforniassa. [1991] b) NASAn miehittämätön 180 m² aurinkopaneelikäyttöinen 40 kW Helios-lentokone [© NASA] c) Aurinkovoima-purjelentokone näytteillä Eurosun96-konferenssissa Freiburgissa Saksassa. Siiven yläpinta on päällystetty aurinkopaneeleilla. [1996]

Mikrobiologiset polttokennot tarjoavat uusimman aurinkosähkön tuotannon vaihtoehdon, jossa sähkö saadaan mikrobien aineenvaihdunnan tuottamista elektroneista. Niitä on tutkittu laboratoriomittakaavassa 1990-luvulta alkaen. (Drapcho ym. 2008b)

2.39 FOTONIVOIMA JA AURINKOTUULIVOIMA (1900-LUKU)

Aurinko säteilee fotoneita ja varattuja hiukkasia, joita voidaan hyödyntää avaruusalusten voimanlähteenä aurinkokunnassa ja maapallon kiertoradalla liikuttaessa. Vastaavasti voidaan menetellä muiden tähtien läheisyydessä, mikäli sinne joskus päästään. Fotonit ja hiukkaset voivat olla peräisin myös muusta lähteestä kuin tähdistä. Auringon fotonien säteilypaino on luokkaa 1000-kertainen hiukkasten säteilypaineeseen eli aurinkotuuleen verrattuna.



Kuva 2.136. Vuonna 1973 lähetetty NASA:n Mariner 10 oli ensimmäinen auringon fotonisäteilypainetta aurinkopurjeella hyödyntänyt avaruusluotain. Se hyödynsi myös gravitaatiolinkoa ja avaruusaluksille tavanomaiseen tapaan se tuotti sähköä elektroniikkaansa aurinkopaneeleilla. [@ NASA]

Auringosta tulevien fotonien säteilypainetta voidaan hyödyntää aurinkopurjeilla eli suurilla keveillä ja ohuilla kalvoilla, jotka saavat liike-energiaa fotonien työntövoimasta. Idea tästä mahdollisuudesta on peräisin 1920-luvun alusta Tsiolkovskilta ja Tsanderilta (Gatland 1989). Toistaiseksi varta vasten rakennettua aurinkopurjetta ei ole käytännön liikenteessä sovellettu, mutta lähellä aurinkoa aurinkopaneeleitaikin, jotka avaruusaluksissa joka tapauksessa tarvitaan sähköä tuotantoon, voidaan käyttää aurinkopurjeina. Näin tehtiin ensi kerran vuonna 1973 laukaistulla Venukseen ja Merkuriukseen lähetetyllä Mariner 10 -luotaimella (Kuva 2.136), joka hyödynsi myös gravitaatiolinkoa (Murray & Burgess 1977).



Kuva 2.137. Lontoon tiedemuseossa esittelyssä oleva malli maapallon kiertoradalla olevasta aurinkoenergiäkäyttöisestä laserista, joka lähettää fotonisuihkuja avaruusalusten fotonipurjeisiin. [2007]

Erillisen aurinkopurjeen ensimmäinen levityskokeilu tapahtui vuonna 2003 Japanin avaruustutkimuskeskuksen ISASin stratosfääri-ilmapallolta ja vuonna 2004 raketilta avaruudessa. Vuonna 1993 Sojuz-avaruusaluksesta oli levitetty ohut kalvo, mutta ei aurinkopurjeena, vaan sillä kokeiltiin valon heijastamista avaruudesta maahan. Tulevaisuudessa tämän energialähteen rooli tulee kasvamaan avaruusliikenteessä ja hyvin suurilla purjeilla suunnitellaan otettavaksi käyttöön.

Fotonien lähde voi olla myös jokin muu kuin aurinko, esimerkiksi keinotekoisesti tuotettu lasersuihku (Kuva 2.137), maserisuihku ja mikroaaltosuihku, jotka tuottavat energiaa fotonipurjeisiin.

Ne soveltuvat myös sähköä ja lämmön siirtoon ja maapallon ilmakehässä tapahtuvan liikenteen, esimerkiksi avaruushissien, voimanlähteeksi. Sähköä siirto ilmalukselle demonstroitettiin ensimmäisen kerran maasta lähetetyillä mikroalloilla mallihelikopterin sähkömoottoriin vuonna 1964 ja lämmön siirto laserilla mallihelikopterin suihkumoottoriin vuonna 2000.

Aurinkotuuli eli auringon hiukkassäteily, joka koostuu pääasiassa protoneista, elektroneista ja alfa-hiukkasista, vaikuttaa ulkoavaruudessa kulkeviin luotaimiin ja avaruusaluksiin sekä Maata kiertäviin satelliitteihin. Aurinkotuulen näkyvin ilmenemismuoto maapallolla ovat revontulet, mutta se aiheuttaa myös magneettisia pulsseja, jotka aiheuttavat häiriöitä sähkölaitteissa. Tätä voimanlähdettä voidaan periaatteessa hyödyntää avaruusliikenteessä aurinkotuulipurjeella eli magneettikentällä, joka poikkeuttaa varattuja hiukkasia ja saa siitä työntövoimaa. Tämä teknologia ei vielä ole käytössä, mutta sitä kehitellään mm. Suomessa (Nummila 2007b). Vastaavalla tavalla voitaisiin hyödyntää muitakin varattujen hiukkasten lähteitä, myös hiukkaskiihdyttimillä tuotettuja keinotekoisia suihkuja.

2.40 MAGNETISMI (1900-LUKU)

Magnetismin liikennesovelluksista kirjoitti ensimmäisenä Jules Verne (1863) soveltaen silloista kestomagneettiteknologiaa yhdessä paineilmateknologian kanssa raitiovaunujen voimanlähteeksi kuvittelemassaan Pariisin 1960-luvun liikennejärjestelmässä. Monenlaisia magnetismin liikennesovelluksia on sen jälkeen pyritty kehittelemään, mutta merkittävää käyttöä niillä ei vielä ole. Tärkeimmät teknologiat ovat sekundäärienergiaa käyttävät MAGLEV ja MHD sekä primääristä maapallon magnetismia hyödyntävät satelliittikaapelit.

2.40.1 MAGLEV-tekniikka

Magneettiset levitoivat junat eli pyörättömät ja raiteettomat maglev-junat leijuvat sähkömagneettien voimalla hieman radan yläpuolella ja liikkuvat lineaarisähkömagneettien avulla nopeammin kuin pyörillä varustetut ajoneuvot. Japanilaisella maglev-junalla on hallussaan kaikkien junien nopeusennätys 581 km/h vuodelta 2003 ja Shanghaissa vuonna 2002 liikennöintinsä aloittanut saksalainen Transrapidin maglev-juna (Kuva 2.138) on 500 km/h huippunopeudellaan ja 430 km/h reittimatkanopeudellaan nopein säännöllisessä reittiliikenteessä oleva maa-ajoneuvo. Tämä teknologia mahdollistaa vauhdin kasvattamisen edelleen lähes kertaluokalla: mikäli rata suljettaisiin tyhjiöputken sisään, voitaisiin matkustajaliikenteessä kulkea 3500 km/h nopeudella. Tyhjiöputki hyödyttäisi myös tavanomaista raideliikennettä ja olisi helpoimmin toteutettavissa tunneleissa, esim. Alppien läpi, ja maanalaisessa liikenteessä, esim. kaupungin keskustan ja lentoaseman välillä.

Junan sijaan radalla voidaan kuljettaa myös yksittäisiä automaattiohjattuja vaunuja, vastaten nykyään sähkötekniikalla käytössä joillakin lentoasemilla, esim. New Yorkissa, olevia vaunuja. Henkilöautokäyttöön soveltaminen on periaatteessa myös mahdollista. Tällöin autoilla ei olisi poistumispaikan valintaa lukuun ottamatta omaa kontrollia radalla. Se myös tarkoittaisi, että liikenneonnettomuuksia ei voisi syntyä muuten kuin itse radan vikaantumisen seurauksena ja siten ajonopeudet voisivat olla suuria ja ajoneuvojen etäisyyden pieniä. Jos haluttaisiin toteuttaa täysi kontrolloitavuus auton sisällä, magneettijärjestelmää voitaisiin käyttää vain leijuttamiseen ja työntövoima synnytetäisiin autossa esimerkiksi propelleilla. Tämän ratkaisun mielekkyyttä olisi kuitenkin vaikea perustella. Maglev-autot olisivat pyörättömiä ja tiet voisivat olla esimerkiksi ruohoa tai muuta mag-

neettikenttää häiritsemätöntä materiaalia, jonka alle magneetit on sijoitettu, eli asfalttia ei tarvittaisi. Luonnollisestikin hybridien mahdollisuus on myös olemassa eli autot voisivat käyttää valtateillä ja valtakaduilla maglev-rataa ja haja-asutusalueilla pyöriä.



Kuva 2.138. Tuulisähkökäyttöinen Transrapidin maglev-juna 31,5 km pitkällä testiradallaan Saksassa. [© Transrapid 2007]

Maglevin periaate ja lineaarimoottorien (Kuva 2.139) hyödyntäminen on peräisin Saksasta 1930-luvulta ja ensimmäiset koejunat rakennettiin 1970-luvulla. Maglev-reittiliikenne aloitettiin Birminghamissä vuonna 1984 ja jatkui siellä vuoteen 1995. Maglevit ovat ajonaikaisesti nollapäästöisiä ZEV-ajoneuvoja ja niiden melupäästöt alittavat sähköjunien tason. Maglev-junien energia on peräisin sähköstä eli ilmastovaikutusta ei ole, mikäli sähkö on uusiutuvilla tuotettua.



Kuva 2.139. Maglev-junan lineaarimoottori Transrapidin koeradon esittelykeskuksessa Dörpenissa Saksassa. [2007]

2.40.2 MHD-moottori

MHD-moottori on tulevaisuuden mahdollinen voimanlähde, jossa hyödynnetään ionisoitua neste- tai kaasuvirtausta.

2.40.3 Maan magneettikentän voima

Maan magneettikenttä on uusiutuva primäärienergiälähde, jota toistaiseksi ei ole pystytty energiantuotannossa varsinaisesti hyödyntämään, mutta sen hyödyntämistä on demonstroitu. Maan magneettikenttää ja ionosfääriä voidaan käyttää sähkön tai liike-energian lähteenä maan kiertoradalla. Satelliiteista voidaan laskea magneettikenttään pitkä sähköä johtavan kaapeli, joka tuottaa sähköä dynamon tavoin tai kääntäen magneettikentällä voidaan vaikuttaa satelliitin liikkeeseen syöttämällä kaapeliin sähköä. Tätä kokeiltiin ensi kerran vuonna 1996 avaruussukkulan ja satelliitin välisellä kaapelilla. Vastaava teknologia olisi mahdollinen muilla planeetoilla ja kuilla, joilla on magneettikenttä.

2.41 XXIII SUKUPOLVEN LIIKENNEBIOPOLTTOAINEET: BIO-DME (2000-LUKU)

DME (dimetyylieetteri) käsitellään tässä erillään muista eettereistä, sillä DME on ainoa, jota käytetään yksinään liikennepolttoaineena. Muut eetterit soveltuvat erinomaisesti lisäaineiksi varsinkin ottomoottoreihin. Valmistusteknisistä syistä on epätodennäköistä, että niitä otettaisiin merkittävästi käyttöön pääpolttoaineena, vaikka moottoriteknisesti se ei olisi ongelma.

Päinvastoin kuin muut moottorieetterit DME on kaasumainen ja soveltuu fossiilista dieselöljyä korkeamman setaanilukunsa takia erityisesti dieselmoottoreihin. Se nesteytyy normaaliolosuhteissa 5 barin paineessa, joten sitä voidaan käyttää nestekaasua varten rakennetuissa polttoainejärjestelmissä. Sitä voidaan myös käyttää ottomoottorilla varustetuissa nestekaasujoneuvoissa korkeintaan 30 % osuutena nestekaasuun sekoitettuna ilman muutoksia ajoneuvoissa (Gårdmark 2007). Lisäksi DME soveltuu myös kaasuturbiineihin.

Sitä valmistetaan synteetikaasusta DME-synteetillä. Kaupallisesti DME:ta valmistetaan varsinkin Japanissa maakaasusta ja Kiinassa kivihiilestä ja kaivoskaasusta (metaanista) (Gårdmark 2007). Vastaavilla teknologioilla sitä voidaan tuottaa myös biokaasusta, hakeesta, mustalipeästä ja muista bioenergiamuodoista. Ruotsissa on käynnissä kaksi suurta demonstraatiota DME:n valmistamiseksi: Värnamossa raaka-aineena on hake ja Piteässä mustalipeä.

DME otettiin Ruotsissa liikennekäyttöön Volvon koebusseissa ja -rekoissa vuonna 1995 fossiilipohjaisena ja vuonna 2007 biomassapohjaisena (Kuva 2.140). DME-ajoneuvot eivät vielä ole sarjatuotannossa, mutta Volvo sekä japanilaiset ja kiinalaiset autonvalmistajat tähtäävät sarjatuotannon aloittamiseen vaihteittain vuosina 2011-2015. Ruotsissa kaupallinen käyttö on tarkoitus aloittaa Växjön kaupungissa ja tähtäimenä on 200.000 tonnin vuosikäyttö Värnamossa valmistettua hakepohjaista DME:tä. (Gårdmark 2007)

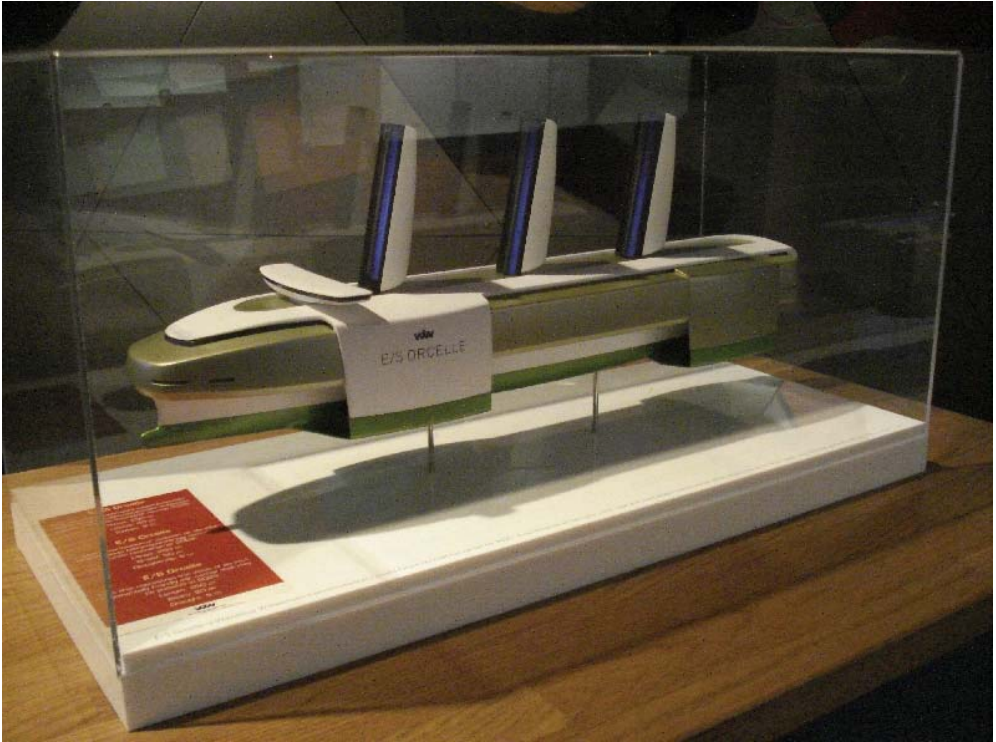


Kuva 2.140. DME-käyttöinen Volvon kuorma-auto esittelyssä synteettisten liikennebiopolttoainien konferenssissa Tukholmassa vuonna 2005. Silloin käytössä oli fossiili-DME, mutta vuodesta 2007 alkaen Volvo on käyttänyt koeajoneuvoissaan bio-DME:tä. [2005]

2.42 AALTOVOIMA (2000-LUKU)

Ensimmäinen aaltovoimakäyttöinen liikenneväline on japanilaisen Kenichi Horien vuonna 2007 käyttöön ottama valtamerikelpoinen 9,5 metriä pitkä katamaraani Suntory Mermaid II (Horie 2007). Normaalikäytössä sen liikevoima saadaan pelkästään aalloista mekaanisten evien avulla, mutta siinä on varavoimana purjeet ja sähkökäyttöinen apuperämoottori. Perämoottorin tarvitsema sähkö kuten myös muu laivan tarvitsema sähkö tuotetaan aurinkopaneeleilla.

Vuonna 2005 ruotsalais-norjalainen varustamo WalleniusWilhelmsen julkaisi suunnitelmansa rakentaa aaltovoimaa hyödyntävän laivademonstraation vuonna 2010 ja kehittää kaupallisen rahtilaivan vuoteen 2025 mennessä (Batchelor & Chant 2006). Kyseisen laivan E/S Orcellen – missä E/S = Environmentally Sound Ship – on tarkoitus käyttää aaltovoiman lisäksi purjeita sekä aurinkopaneeleita ja sisältää vetyyn ja mahdollisesti myös vauhtipyöriin perustuvan energianvarastointijärjestelmän (Knaggs 2005). Mitään polttoon perustuvia teknologioita laivalla ei käytetä (Kuva 2.141).



Kuva 2.141. Aalto- ja tuulivoimakäyttöisen E/S Orçellen malli esitteillä tiedekeskus Heurekaassa Tikkurilassa. [2008]

3

LIIKENTEEN BIOPOLTTOAINEET JA MUUT UUSIUTUVAT LIIKENTEEN VOIMANLÄHTEET SEKÄ HIILIVAPAAT UUSIUTUMATTOMAT POLTTOAINEET

"The use of vegetable oils for engine fuels may seem insignificant today, but such oils may become, in the course of time, as important as petroleum and the coal-tar products of the present time ... Motive power can still be produced from the heat of the sun, always available, even when the natural stores of solid and liquid fuels are completely exhausted."

- Rudolf Diesel vuonna 1912 (Pahl 2005)

Kaikki orgaaniset polttoaineet voidaan valmistaa ainakin periaatteessa joko fossiilisista tai uusiutuvista raaka-aineista. Biopohjaiset erottuvat etuliitteellä "bio-" ja muihin uusiutuviin perustuvat etuliitteellä "UE-". Nestemäiset eetterit MTBE ja ETBE ovat käytännössä vähintään osaksi fossiilisia, mutta silti bio-etuliitettä käytetään, jos niiden valmistuksessa on käytetty biometanolia tai bioetanolia. Tässä käsitellään nimenomaan biopolttoaineita, joten pääsääntöisesti bio-etuliitettä ei käytetä. Hiilivapaat uusiutumattomat polttoaineet kuten primäärinen vety ja monet kiviperäiset polttoaineet eivät aiheuta energiakäytössä kasvihuonekaasupäästöjä, joten ne ovat ilmastonuojelumielessä uusiutuvia vastaavia ja ansaitsevat tulla käsitellyksi samassa yhteydessä. Liitteisiin 5 ja 6 on koottu polttoaineiden ominaisuuksista kertovia taulukoita.

3.1 KIINTEÄT LIIKENNEPOLTTOAINEET

Normaaliolosuhteissa kiinteitä aineita voidaan hyödyntää sellaisenaan kiinteinä tai vesiliuoksina nestemäisinä polttoaineina. Niistä voidaan myös tehdä kemiallisilla, termokemiallisilla tai mikrobiologisilla prosesseilla nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Kiinteiden polttoaineiden etuna nestemäisiin ja kaasumaisiin verrattuna on niiden tuotannon suuri energiatehokkuus, josta syystä niitä käyttämällä polttoaineen elinkaaren energiankulutus saadaan alhaiseksi. Haittana puolestaan on alhainen energiatiheys eli suuri varastointitilan tarve. Vain pieni osa kaikista lämpövoimakoneista soveltuu sellaisenaan kiinteiden polttoaineiden käyttöön: ECE-koneet kuten stirlingkone ja höyrykone sekä EC-turbiinit kuten höyryturbiini ja ORC-turbiini. Mikäli kiinteä polttoaine pro-

sessoidaan, esimerkiksi kaasutetaan, ajoneuvossa, muutkin lämpövoimakonevaihtoehdot ovat käytettävissä.

3.1.1 Sokerit, tärkkelys, proteiinit ja glyseridit (ruoka)

Ihmisruoaksi sopivat yhdisteet ovat käytettävissä liikenne-energiana primäärisesti ihmislihasvoiman avulla, mutta myös eläinlihasvoiman sekä lämpövoimakoneiden avulla.

Ihminen pystyy hyödyntämään aineenvaihdunnassaan vain hiilihydraateista sokereita ja tärkkelystä, lipideistä glyseridejä (eläinrasvoja ja kasviöljyjä) sekä proteiineja ja etanolia (Taulukko 5.1). Esimerkkejä erityyppisten ruoka-aineiden koostumuksista on taulukossa 3.1. Ihmisruokavaliolle on tyypillistä, että vain pieni osa kasveista tai eläimistä voidaan hyödyntää, esimerkiksi jyvät, hedelmät, marjat, juuret, munat, maito, lihakset ja sisäelimet.

Taulukko 3.1. Eräiden ruoka-aineiden ravintoainepitoisuuksia kuiva-aineessa. Nettoenergia tarkoittaa ihmisen hyödynnettävissä olevaa energiaa. Kuitu tarkoittaa selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. (USDA National Nutrient Database).

Kasvi	Nettoenergia [MJ/kg]	Sokerit [p-%]	Tärkkelys [p-%]	Kasviöljyt [p-%]	Proteiinit [p-%]	Kuidut [p-%]
Vehnän jyvät	16,2	3	72	1	16	7
Herneet	16,0	27	17	2	26	24
Rypsiöljy	37,0	0	0	100	0	0
Peruna	15,5	4	75	<1	10	11
Porkkana	14,8	40	12	2	8	24
Omena	15,1	72	<1	1	2	17

Hiilihydraattien kemiallinen kaava on $(\text{CH}_2\text{O})_n$ tai $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_{n-1}$. Ne muodostavat valtaosan biosfäärin energiavarastosta ja syntyvät fotosynteesin kautta. Ne eivät kemiallisesti ole hiilen hydraatteja, vaan polyhydroksialdehydejä ja polyhydroksiketoneita. Tärkeimmät yhdisteet ovat sokerit, tärkkelys, selluloosa ja hemiselluloosat. Niiden ylempi lämpöarvo HHV on noin 17 MJ/kg (Taulukko 3.2).

Taulukko 3.2. Hiilihydraattien, proteiinien, lipidien ja ligniinin energiasisältöjä (Klass 2004). Terpeeneistä suurin osa on normaaliolosuhteissa nestemäisiä.

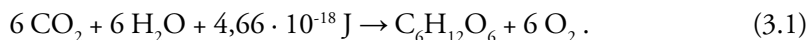
Yhdisteryhmä	Lämpöarvo HHV [MJ/kg]	Hiilen osuus [p-%]
Raakahiilihydraatit	16,6–17,7	41–44
Raakakuidut	18,8–19,8	47–50
Raakarasvat	36,5–40,0	74–78
Monosakkaridit	15,6	40
Disakkaridit	16,7	42
Polysakkaridit	17,5	44
Ligniini	25,1	63
Proteiinit	24,0	53
Lipidit	39,8	76–77
Terpeenit (suurin osa nesteitä)	45,2	41–44

Ihmisen ruoansulatusjärjestelmä pystyy käsittelemään vain osaa näistä yhdisteistä:

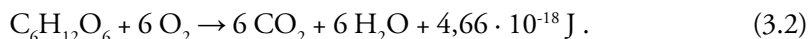
- Monosakkarideista tärkeimpinä glukoosi (rypälesokeri) ja fruktoosi (hedelmäsokeri), mutta myös useita muita. Ne kuuluvat heksooseihin, joiden yleiskaava on $C_6H_{12}O_6$ ja molekyylipaino 180. Myös joitakin pentooseja voidaan hyödyntää: niiden yleiskaava on $C_5H_{12}O_6$.
- Disakkarideista tärkeimpinä sakkaroosi (juurikassokeri eli ruokosokeri) ja laktoosi (maitosokeri), mutta myös joitakin muita. Ne koostuvat kahdesta perussokeriyksiköstä. Sakkaroosi koostuu glukoosi- ja fruktoosiyksiköstä, joten sen yleiskaava on $C_{12}H_{22}O_{11}$ ja molekyylipaino on 342.
- Polysakkarideista tärkeimpinä tärkkelys ja glykogeeni (eläintärkkelys), mutta myös joitakin muita. Niiden molekyylit koostuvat sadoista tai tuhansista glukoosiyksiköistä eli molekyylipaino on kymmeniä tai satoja tuhansia. Tärkkelys on selluloosan ja hemiselluloosien jälkeen biosfäärin yleisin hiilihydraatti.

Biosfäärin yleisimpiä orgaanisia yhdisteitä selluloosaa ja hemiselluloosia ihmisen ruoansulatusjärjestelmä ei pysty hajottamaan.

Glukoosi syntyy fotosynteesissä aurinkoenergian avulla hiilidioksidista ja vedestä (Sørensen 2000):

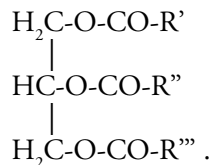


Vastaavasti kaikkien hiilihydraattien energiantuotanto sekä lihaksessa että termisissä polttoprosesseissa on likimäärin sama kuin glukoosin eli



Proteiinit ovat aminohapoista koostuneita polypeptidejä, joiden molekyylipaino on satoja tuhansia tai miljoonia. Yleisimpänä rakenneosana ovat a-aminohapot, joiden kaava on $\text{NH}_2\text{-CHR-COOH}$. Niiden ylempi lämpöarvo HHV on noin 24 MJ/kg (Taulukko 3.2), josta ihminen pystyy hyödyntämään noin 17 MJ/kg (Taulukko 5.1) eli ihmisen energiantuotannon kannalta hiilihydraatit ja proteiinit ovat samantarvoisia.

Kasviöljyt ja eläinrasvat ovat glyserolin rasvahappo(tri)estereitä eli (tri)glyseridejä, joiden yleiskaava on



Radikaalit R' , R'' ja R''' ovat alkyyliradikaaleja, joiden hiiliketjun pituus on pariton, vähintään 3 ja yleensä 17 tai 19. R-COOH tarkoittaa rasvahappoja eli eläimissä ja kasveissa luonnollisesti esiintyviä karboksyylihappoja, joiden hiiliketjun pituus on parillinen, vähintään 4 ja yleensä 18 tai 20. Kasveissa esiintyvät glyseridit ovat yleensä lyhytketjuisia ja nestemäisiä, joten niitä nimitetään öljyiksi. Eläinten glyseridit ovat yleensä pitempiketjuisia ja kiinteitä tai hyvin korkean viskositeetin nesteitä, joten niitä nimitetään rasvoiksi. Poikkeuksena ovat eräät merieläinten glyseridit. Glyseridien ylempi lämpöarvo HHV

on noin 39 MJ/kg, josta ihminen pystyy hyödyntämään 38 MJ/kg (Taulukko 2.1) eli runsaat kaksi kertaa enemmän kuin hiilihydraatit ja proteiinit.

Ihminen pystyy saamaan energiaa myös etanolista, 29,6 MJ/kg (Taulukko 5.1). Sitä käsitellään nestemäisten polttoaineiden yhteydessä.

3.1.2 Selluloosa ja hemiselluloosat (rehu)

Rehu tarkoittaa kasveja, jotka ovat käytettävissä liikennepolttoaineina eläinlihasvoiman (Kuva 3.1) tai lämpövoimakoneiden avulla, mutta jotka eivät sovellu ihmisruoaksi.



Kuva 3.1. Eläinlihasvoiman liikennekäyttöä kahden härän vetämässä rakennuspuun rahtikuljetuksessa Etelä-Nepalissa. Härkien energiantuotantoteho pitkäaikaisessa rasituksessa on luokkaa 500 W, joten kahden härän vetämien vaunujen biovoimateho on 1000 W. Taustalla puun kestävämmän eli ei-uusiutuvan käytön takia erosoituneita kukkuloita. Tällaisissa tapauksissa puuta ei sisällytetä uusiutuvien energiamuotojen joukkoon. [1997]

Karjatalouden eläinten ruoansulatusjärjestelmä pystyy hyödyntämään useampia hiilihydraatteja kuin ihmisen, tärkeimpinä selluloosa ja useat hemiselluloosat, jotka ovat polysakkarideja ja luonnon hiilihydraateista yleisimpiä. Karjatalouden eläimet eivät kuitenkaan pysty hyödyntämään runsaasti ligniiniä sisältäviä kasveja tai niiden osia, kuten puut, pähkinät, oljet ja ruohot. Sen sijaan heinäkasvit ja puiden lehdet (Kuva 2.2) sopivat niiden ruokavalioon ihmisruoaksi sopivien kasvinosien lisäksi. Ja monet kasvit voidaan hyödyntää kokonaan, eikä pelkästään tiettyjä osia niistä.

Selluloosa on biosfäärin yleisin orgaaninen yhdiste. Sitä syntetisoi luonnossa luokkaa 100 miljardia tonnia vuodessa ja on arvioitu sen muodostavan noin puolet biosfäärin orgaanisista aineista (Fessenden & Fessenden, 1986). Vuotuinen uusiutuva selluloosaresurssi on energia-arvoltaan noin 2000 EJ eli noin 5-kertainen ihmiskunnan energiankulutukseen verrattuna (UN 2000). Selluloosamolekyylit koostuvat noin 7000–15000 glukoosiyksiköistä ja molekyylipaino on noin 2000.000. Hemiselluloosat koostuvat glukosin sijaan muista perussokeriyksiköistä, joko pentooseista (pentosaanit) tai heksooseista (heksosaanit). Yksiköiden määrä on noin 200 ja molekyylipaino on noin 40.000. Pentosaanit ovat yleisempiä lehtipuissa ja heksosaanit havupuissa. Selluloosan ja hemiselluloosan sekä ligniinin pitoisuuksia erilaisissa materiaaleissa on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3. Kuituaineiden koostumus kuiva-aineessa eräissä kasveissa ja jätelajeissa (Sun & Cheng 2002).

Biomassa	Selluloosa	Hemiselluloosa	Ligniini
Lehtipuut	40–55 %	24–40 %	18–25 %
Havupuut	45–50 %	25–35 %	25–35 %
Pähkinän kuori	25–30 %	25–30 %	30–40 %
Ruohot	25–40 %	35–50 %	10–30 %
Vehnän olki	30 %	50 %	15 %
Luutahirssi	45 %	31,4 %	12 %
Puiden lehdet	15–20 %	80–85 %	0 %
Paperi	85–99 %	0 %	0–15 %
Sanomalehtipaperi	40–55 %	25–40 %	18–30 %
Yhdyskuntajätevesi	8–15 %	NA	24–29 %
Kuiva yhdyskuntajäte	60 %	20 %	20 %
Sian jäteveden kuiva-aine	6 %	28 %	NA
Lehmän lanta	1,6–4,7 %	1,4–3,3 %	2,7–5,7 %

3.1.3 Muut hiilihydraatit

Sokereiden, tärkkelyksen, selluloosan ja hemiselluloosan lisäksi luonnossa esiintyi monia muitakin hiilihydraatteja, joita toistaiseksi ei ole hyödynnetty liikennepolttoaineina, mutta joita voidaan periaatteessa käyttää esimerkiksi hydrolyysin ja fermentaation kautta. Resurssiltaan näistä yhdisteistä polysakkaridi kitiini on ylivoimaisesti runsain. Sitä esiintyy mm. vesieläinten kuorissa ja hyönteisten tukirangassa. Kitiiniä biosyntetisoi luonnossa luokkaa miljardi tonnia vuodessa (Fessenden & Fessenden, 1986) eli se on yksi yleisimmistä biosfäärin organisista yhdisteistä. Luonnollinen kitiiniresurssi on erittäin hajautunut, joten sen kerääminen liikennekäyttöön tuskin tulee kysymykseen tulevaisuudessakaan. Mutta sen viljelyä ei voida lukea pois tulevaisuuden mahdollisuuksien joukosta.

3.1.4 Lignoselluloosa ja ligniini (puu, olki, ruohokasvit)

Suurin osa biosfäärin hiilihydraateista esiintyy yhdessä ligniinin kanssa (Taulukko 3.3). Mikäli ligniiniä on paljon, resurssin energiahyödyntäminen on mahdollista vain teknologisin menetelmin. Puuta (Taulukko 3.4) eivät korkeammat eläimet pysty hyödyntämään ja mikrobeistakin vain hyvin harvat, erityisesti lahottajabakteerit. Sen tekninen hyödyntäminen edellyttää kemiallisia tai termokemiallisia menetelmiä.

Taulukko 3.4. Puun koostumus (Gullichsen 2000).

Komponentti	Lehtipuut	Havupuut
Selluloosa	42–49 %	41–46 %
Hemiselluloosat	23–34 %	25–32 %
Ligniini	20–26 %	26–31 %
Uuteaineet	3–8 %	10–25 %
Epäorgaaniset (tuhka)	0,2–0,8 %	0,2–0,4 %

Puu (Kuva 3.2), puuhiili, kivihiili ja monet muutkin kiinteät biomassat ja fossiiliset polttoaineet ovat historiallisesti hyvin tärkeitä liikennepolttoaineita erityisesti laiva- ja rautatieliikenteessä, höyrykonetekniikalla. Toisen maailmansodan aikana nämä polttoaineet olivat hyvin tärkeitä häikäpönttötekniikalla kulkevilla ajoneuvoissa. Niitä voidaan käyttää myös pölytettynä tai jauhattuna liuoksissa tai emulsioissa nestemäisten komponenttien kanssa.



Kuva 3.2. Kotimaiset energiat ky:n johtaja Pekka Lahti (oikealla) esittelee kehittämäänsä hakkuutähteen hakentia Jämsässä. [1999]

Sellun tuotannossa ja puun sokeroinnissa ligniini on sivutuote, joka on käytettävissä energiantuotantoon polttamalla ja kaasuttamalla ja myös jauhattuna polttomoottoreissa, mm. saksalaisessa rupamoottorissa (Routala 1934). Ligniinistä voidaan myös valmistaa liikennepolttoaineita pyrolyysillä, kaasutus pohjaisilla prosesseilla ja suoralla nesteytyksellä.

3.1.5 Puuhiili ja puuhiilipöly

Puuhiiiltä syntyy aina puuta poltettaessa sivutuotteena tai jätteenä. Puuhiiiltä valmistetaan puusta termokemiallisesti perinteisellä hitaalla pyrolyysillä (Ranta 1994). Pölytetty kivi- tai puuhiili tai turve ovat mahdollisia, mutta epäilemättä likaisia polttoaineita IC-moottoreissa (ASME 1989). Ne kuuluivat Rudolf Dieselin ensimmäisiin polttoainekoikeiluihin dieselmoottorin prototyypillä 1890-luvulla (Owen ym. 1995). EC-moottoreissa kuten stirlingmoottori karstoittuminen on helpommin hallittavissa.

3.1.6 Muut orgaaniset yhdisteet

Parafiinit eli vahat ovat normaaliolosuhteissa kiinteitä pitkäketjuisia alkaaneja (öljyteollisuudessa kaikkia alkaaneja kutsutaan parafiineiksi). Hiiliketjun pituus on vähintään noin 20. Osa fossiilisen dieselin hiilivedyistä on kiinteitä, mutta nestemäiseen HC-seokseen normaaleissa käyttö- ja varastointiolosuhteissa liukenevia (kiinteytymisen kuitenkin kylmissä olosuhteissa). Dieselöljystä jopa 20 % voi koostua näistä yhdisteistä (Owen ym. 1995). Ne ovat myös pieniin rakettimootoreihin sopivia polttoaineita. Parafiinit ovat yleensä raakaöljypohjaisia, mutta niitä voidaan tuottaa synteettisesti bioresursseista. Luonnollisia bioparafiineja saadaan esimerkiksi hyönteisvahasta.

Rasvahapot eli kiinteät karboksyylit ovat mahdollisia kiinteitä polttoaineita samoissa sovelluksissa kuin parafiinit, esimerkiksi rakettimootoreissa. Niiden yleisin energiasovellus on kynttilöissä käytetty steariini.

Kamferi ($C_{10}H_{16}O$) on terpenoideihin kuuluva rengasmainen yhdiste, jonka Gustaf Komppa onnistui ensimmäisenä valmistamaan synteettisesti tervasta vuonna 1903. Se liukenee esimerkiksi etanoliin ja tärpättiin ja sitä on käytetty polttoaineena niihin liuotettuna. Sen tarkoituksena on ollut etanolin denaturointi, tärpätin hajun peittäminen ja lampukkäytössä liekin värjääminen. Sitä on myös käytetty Zetor-traktoreiden kylmäkäynnistyksessä (Rohila 2006). Kamferi on alun perin peräisin Japanissa ja Kiinassa luontaisesti kasvavasta kamferipuusta. Kamfeeni ($C_{10}H_{16}$) on rengasrakenteinen kiinteä terpeeni, jota on käytetty polttoaineena alkoholeihin liuotettuna.

3.1.7 Kiinteiden polttoaineiden liuokset ja emulsiot ja pölyt

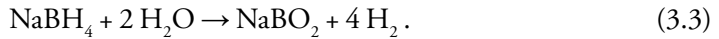
Kiinteistä polttoaineista voidaan tuottaa nestemäisiä polttoaineita liuottamalla niitä nesteisiin tai tuottamalla niistä emulsiota nesteiden kanssa. Niitä on löydettävissä luonnosta myös primäärienergiana, esim. maidot ja marjojen sekä vihannesten mehu. Keinotekoisesti on esimerkiksi sahajauhusta (Benter 1997) ja jauhetusta maissista (Natarajan & Suppes 1997) tuotettu emulsiopolttoaineita. Kiinteitä polttoaineita pölyttämällä ne voidaan sekoittaa kaasumaisiin polttoaineisiin tai polttoilmaan. Esimerkiksi puuhiili soveltuu tähän tarkoitukseen. Nämä menetelmät mahdollistavat yksinkertaisen ja halvan tavan käyttää kiinteitä biopolttoaineita polttomootoreissa. Niitä ei toistaiseksi ole saatavissa kaupallisesti.

3.1.8 Boorihydrit ja muut vetysuolat

Runsaasti vetyä sisältävät suolat ovat eräs mahdollisuus vedyn varastointiin jauhemaisessa muodossa, jolloin sitä on helppo varastoida ja siirtää. Vety voidaan irrottaa yhdisteestä ja jäljelle jäänyt sakka voidaan regeneroida uudestaan vedyn avulla. Esimerkiksi litiumboorihydridi ($LiBH_4$) on tällainen yhdiste. Sen energiatiheys on 1,5-kertainen bensiiniin verrattuna sekä massayksikköä kohti (65,2 MJ/kg) että tilavuusyksikköä kohti (43,4 MJ/l) mitattuna.

Muita tähän tarkoitukseen mahdollisia yhdisteitä ovat esimerkiksi natriumboorihydridi ($NaBH_4$), joka on ollut esillä Islannin vetytaloushankkeissa. Se on valkoista pulveria, jota

valmistetaan Suomessakin Finnish Chemicalsin Äetsän tehtailla elektrolyytisesti valmistetusta vedystä kemianteollisuuden tarpeisiin (Riistama ym. 2005). Vety voidaan poistaa siitä tavanomaisia polttokennoja varten katalyyttisesti:



NaBO_2 varastoidaan ja palautetaan regeneroitavaksi uudestaan vedyllä. Boorihydridipolttokenno on kehitteillä olevaa teknologiaa, joka pystyy hyödyntämään boorihydridien liuoksia sellaisenaan, ilman tarvetta erottaa vety ennen polttokennoa.

3.1.9 Ruudit

Ruudit ovat rakettimoottorien kiinteitä polttoaineina. Ruudit sisältävät lähes aina epäorgaanisia yhdisteitä, mutta useimmat myös biopolttoaineita ja/tai fossiilisia polttoaineita. Ensimmäisenä otettiin käyttöön musta ruuti, joka alun perin koostui puuhiilipölystä, kaliumnitraatista (salpietarista, KNO_3) ja rikistä (Kuva 3.3). Myöhemmin puuhiilipölyn rinnalla käytettiin myös kivihiilipölyä.



Kuva 3.3. Musta ruuti savuaa perinnekanuunalla laukaistaessa Muuramessa. [2008]

Savuttomia ruuteja on otettu käyttöön 1800-luvulta alkaen. Nitroselluloosa eli selluloosanitraatti ($\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4\text{ONO}_2$)_n on selluloosapohjainen orgaaninen ruuti, jota valmistetaan esimerkiksi Vihtavuorella (Riistama ym. 2005). Pyroselluloosa on stabiilimpi ruuti, jota valmistetaan nitroselluloosasta, alkoholista ja eetteristä. Nykyisin synteettiset polymeerit muodostavat kiinteiden rakettipolttoaineiden perustan. Käyttöön on otettu polysulfideja, polyuretaaneja, vinyylipolyestereitä, polyvinyylidiklorideita ja polybutadieenejä. Suosituimpiin yhdisteisiin lukeutuvat 1960-luvulla kehitetyt polybutadieenit PBAN (polybutadiene acrylonitrile), CTPB (carboxy terminated polybutadiene) ja HTPB (hydroxy terminated polybutadiene). Ne valmistetaan normaalisti raakaöljystä, mutta ne voitaisiin valmistaa myös biopohjaisista resursseista. Polybutadieenin rakennekaava on muotoa $(\text{C}_4\text{H}_6)_n$.

USA:n avaruussukkulan apuraketeissa ja monissa muissa avaruusraketeissa käytetään polttoaineena alumiinijauhoa (Al), hapettimena ammoniumperkloraaattia NH_4ClO_4

ja sideaineena orgaanisia polymeereja (PBAN tai HTPB). Myös ammoniumnitraattia NH_4NO_3 käytetään rakettpolttoaineissa hapettavana komponenttina. Alumiinin lisäksi monet muutkin metallit ja metallioksidit sopivat polttoaineeksi samoin kuin eräät suolat, esimerkiksi boorihydraatti (B_2H_6). Rakettimoottori on erittäin polttoainejoustava moottorityyppi, joten periaatteessa kaikki orgaaniset aineet makkarasta muoveihin ja kynttilävahaan sopivat siihen.

Synteettistä HTPB-kumia käytettiin kiinteänä hybridiraketin polttoaineena yhdessä typpioksiduulin kanssa maailman ensimmäisessä ja toistaiseksi ainoassa yksityisessä miehiteyssä avaruusaluksessa, Burt Rutanin suunnittelemassa SpaceShipOnessa, jonka ensilento avaruuteen yli 100 km korkeuteen, tapahtui vuonna 2004 (Kuva 3.4). Siinä toteutettiin Wernher von Braunin alun perin 1950-luvulla esittämä idea avaruusaluksen lähettämisestä suihkukoneesta noin 15 km korkeudesta, jolloin ei tarvita erillisiä polttoainesäiliöitä eikä irrotettavia apuraketteja kuten avaruussukkulassa (Braun 1967). SpaceShipOne käyttää kiinteän rakettpolttoaineensa kiihdytykseen noin minuutin aikana ja toimii sen jälkeen liitokoneena. SpaceShipOne saavutti lentokoneiden korkeusennätyksen 112 km; edellinen ennätys oli X-15:n 108 km vuodelta 1963. Muilla moottorityypeillä sellaisiin korkeuksiin ei päästä: suihkukoneiden korkeusennätys on SR-71:n 26 km vuodelta 1977 km ja propellikoneiden korkeusennätys on Helios-aurinkovoimalentokoneen 29 km vuodelta 2001.



Kuva 3.4. Kumi- ja ilokaasukäyttöisellä rakettimoottorilla varustettu SpaceShipOne-avaruusalus White Knight -kantosuihkukoneen alle kiinnitettynä Mojaven tuulipuiston yläpuolella Kaliforniassa. [© Bill Deaver/Scale Composites picture gallery/scaled.com 2004]

Monia muitakin orgaanisia polymeeriyhdisteitä on käytetty ja käytetään rakettpolttoaineina. Avaruusrakettien pääpolttoaineina käytetään kuitenkin yleensä nestemäisiä polt-

toaineita, joista tärkein on nestemäinen vety. Se on NASAn avaruussukkulun ja ESAn Ariane-rakettien pääpolttoaine.

On mahdollista, että ruutien joukosta löytyy yhdisteitä, joita voidaan käyttää tulevaisuudessa muunlaistenkin liikennemoottorien polttoaineena. Ensimmäinen polttomoottoridemonstraatio 1600-luvulla oli mustaruutikäyttöinen ja mustan ruudin yhtä pääkomponenttia hiilipölyä on käytetty dieselmoottorien polttoaineena. Ruutia (KClO_3 ym.) käytettiin myös ensimmäisessä sukellusveneen anaerobisessa höyrykonemoottorissa 1860-luvulla.

3.1.10 Metallit ja metalliyhdisteet (Al, Fe, Be, B, Li, Mg, Zn, FeO ym.)

Useita metalleja on käytetty polttoaineina jauhemaisessa muodossa, ainakin beryllium, boori, litium, alumiini ja magnesium (Taulukko 3.5). Normaali käyttösovellus tähän asti on ollut rakettpolttoaine. Litium yhdessä fluorin ja vedyn kanssa on voimakkain tunnettu raketimoottorin polttoaine. Sekä teknisten että ympäristöongelmien vuoksi sitä ei kuitenkaan käytännössä käytetä.

Taulukko 3.5. Eräiden metallien polttoaineominaisuuksia verrattuna joihinkin muihin polttoaineisiin (Parker 1981, 380).

Polttoaine	Lämpöarvo HHV [MJ/kg]	Tiheys [kg/l]	Lämpöarvo HHV [MJ/l]	Täydellisen palamisen lopputuotteet (olomuoto)
Beryllium (Be)	68,7	1,85	127	BeO (kiinteä)
Boori (B)	58,6	2,35	138	B_2O_3 (kiinteä)
Litium (Li)	43,0	0,53	23	Li_2O (kiinteä)
Alumiini (Al)	31,2	2,70	84	Al_2O_3 (kiinteä)
Magnesium (Mg)	24,9	1,74	43	MgO (kiinteä)
Hiili (C)	32,9	2,00	66	CO_2 (kaasu)
Bensiini	47,4	0,75	36	CO_2 (kaasu), H_2O (kaasu tai neste)
Hydratsiini (N_2H_4)	21,7	1,00	22	N_2 (kaasu), H_2O (kaasu tai neste)
Vety (H_2)	143,1	0,07	10	H_2O (kaasu tai neste)

Sinkki (Zn) yhdessä kaliumklooraatin (KClO_3) ja mangaaniperoksidin (Mn-O-R) kanssa oli ensimmäisen anaerobisen sukellusvenemoottorin (AIP-moottori) polttoaineena. AIP-moottoreissa on käytetty muitakin kiinteitä polttoaineita ja hapettimia, esimerkiksi kaliumpermanganaatti (KMnO_4).

Noin 50 nm suuriset nanopartikkelit monista aineista, esimerkiksi alumiinista, raudasta ja boorista, ovat mahdollisia tulevaisuuden autojen polttomoottorien tai stirlingmoottorin polttoaineita (Kleiner 2005). Niiden täydellisen palamisen lopputuotteet ovat kiinteitä (Taulukko 3.3) eli niistä ei tule ajonaikaisia pakokaasupäästöjä, joten ne voisivat päästä ZEV-ajoneuvoluokkaan. Rautananopartikkelit vaativat 50 % vähemmän tilaa, mutta painavat yli kaksi kertaa enemmän kuin vastaava energiamäärä bensiiniä. Alumiinia, booria ja monia muita kevyitä metalleja käytettäessä paino jäisi alle vastaavan ben-

siinimäärän painon. Myös joitakin metallioksiedeja, ainakin rautaoksidi (FeO), käytetään rakettipolttoaineissa katalyyttinä, esimerkiksi avaruussukkulun apuraketeissa.

Joissakin polttoaineissa käytetään reaktiota nopeuttavia metalliyhdistekatalyyttejä, esimerkiksi saksalaisissa hypergolisisissa rakettipolttoaineissa (C-Stoff) käyttämä $K_3[Cu(CN)_4]$. Metall- ja metalliyhdistekatalyytit ovat täysin oleellisia tuottaessa synteettisiä polttoaineita.

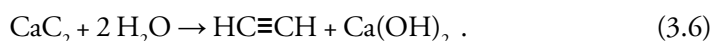
Metalliyhdisteitä käytetään myös bensiinin ja dieselöljyn lisäaineina, oktaaninkohottajat tunnetuimpana esimerkkinä. Monet näistä yhdisteistä on normaaliolosuhteissa nestemäisiä, mutta osa on kiinteitä, esimerkiksi orgaaninen rautayhdiste ferrosiini: $(C_5H_5)_2Fe$. Orgaanisiin liuottimiin kuten bentseeni liukeneva ferrosiini soveltuu oktaaniluvun kohottamiseen bensiinissä sekä nokipäästöjen alentamiseen dieselöljyssä. Orgaaniset metalliyhdisteet ovat raakaöljypohjaisia ja niitä valmistetaan öljynjalostamoilla.

3.1.11 Muut epäorgaaniset yhdisteet

Epäorgaaniset ruudit ja metallit ovat esimerkkejä kiviperäisistä polttoaineista, mutta niiden lisäksi on olemassa muitakin kivistä (mineraaleista) saatavissa olevia polttoaineita. Mineraalipolttoaine olisi niille hyvä yhteisnimitys, mutta se ei valitettavasti ole sopiva käytettäväksi, koska fossiilisia orgaanisia polttoaineita on perinteisesti mutta harhaanjohtavasti kutsuttu mineraalipolttoaineiksi. Eräs esimerkki pitkään käytetystä yhdisteestä on kalsiumkarbidi (CaC_2), jota voidaan valmistaa kalkkikivestä ($CaCO_3$) ja hiilestä:



Sen annetaan reagoida käyttökohteessa veden kanssa muodostaen etyyniä (C_2H_2) eli asetyleeniä, joka on polttoaineeksi sopiva kaasu:



3.1.12 Rikki (S)

Rikkiä on käytetty ruutien osana, mutta sitä esiintyy luonnollisesti monissa fossiilisisissa polttoaineissa ja hieman myös joissakin biopolttoaineissa, joissa se on osa niiden energiasisältöä. Polton SO_2 -päästöjen takia sitä kuitenkin yleensä pyritään puhdistamaan pois polttoaineista ja käyttämään kemianteollisuuden raaka-aineena.

3.1.13 Mikrobit

Mikrobeja on mukana kaikissa kiinteissä ja nestemäisissä polttoaineissa ilman merkittävää energieettistä tai muutakaan panosta. Niitä voidaan kuitenkin kasvattaa nimenomaan polttoaineeksi ja käyttää emulsioina muiden polttoaineiden, veden ja erilaisten lisäainesten kanssa. Esimerkiksi mikrolevät soveltuvat siihen tarkoitukseen biodieselin kanssa: verrattuna 100 %:n REE-biodieseliin 20 % mikroleväemulsio vähentää NO_x -päästöjä,

mutta lisää CO-päästöjä tavanomaisessa muuntamattomassa dieselmoottorissa (Scraggy ym. 2003). Mikrobeja voidaan käyttää myös raaka-aineena erilaisissa polttoaineiden tuotantoprosesseissa kuten biodieselin valmistuksessa (Chisti 2007).

3.2 NESTEMÄISET LIIKENNEPOLTTOAINEET

3.2.1 Alkoholit

3.2.1.1 Metanoli (MeOH) CH₃OH

Metanolia, jonka pääominaisuudet on esitelty taulukossa L6.7 (Liite 6), on valmistettu jo 4000 vuoden ajan pyrolyysiöljyn osana ja puhdasta metanolia valmistettiin ensi keran 1600-luvulla, silloinkin pyrolyysimenetelmällä puusta. Puun pyrolyysin ja tislauksen yhdistelmää kutsutaan myös puun kuivatislaukseksi ja se oli metanolin tärkein tuotantotapa 1900-luvun alkuun asti. Pyrolyysimetanoli on lähtöisin ligniinin metoksyyliryhmistä ja sen määrää voidaan kasvattaa hiiltoa hidastamalla (Talvitie 1924b). Ligniinin metoksyyliryhmät muodostavat noin 4,6 % puun massasta (Pellinen & Roschier 1952). Tyypillisesti puun kuivapainosta metanolia saadaan pyrolyysillä lehtipuusta 1,5 % ja havupuusta 0,75 % (Talvitie 1924b). Ligniinin metoksyyliryhmistä muodostuu metanolia myös sellun valmistuksen yhteydessä ja se voidaan ottaa talteen sekä sulfaatti- että sulfiitiprosessissa (Pellinen & Roschier 1952). Metanolia voidaan tuottaa ligniinin metoksyyliryhmistä myös erillisillä kemiallisilla prosesseilla esimerkiksi puun happohydrolyysin yhteydessä.

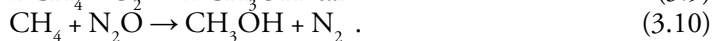
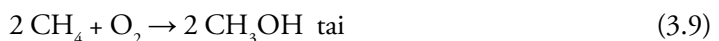
Nykyään suurin osa kaupallisesta metanolista tuotetaan metaanista katalyyttisellä höyryreformoinnilla



ja sitä seuraavalla synteetikaasun katalyyttisellä metanolisynteisillä

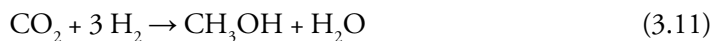


jossa katalyytteinä toimivat esimerkiksi Cu/ZnO/Al₂O₃, Cu/ZnO/Cr₂O₃ tai Zn/Cr (Cheng & Kung 1994). Nykyään höyryreformointiin käytetään maakaasua, mutta se voidaan tehdä myös biokaasulla, synteettisellä biometaanilla ja nestemäisillä biopolttoaineilla. Metaanista voidaan saada synteetikaasua myös autotermisellä reformoinnilla ja osittaishapetuksella (Cheng & Kung 1994). Metanolisynteesi voidaan yhdistää kiinteän biomassan kaasutuksen avulla tuotettuun synteetikaasuun (Hamelinck & Faaij 2002) tai puuhiilen vesikaasuprosessiin (Luku 5.4). Metaanista voidaan valmistaa metanolia myös ilman synteetikaasua välivaiheena, suoralla katalyyttisellä hapetuksella (Cheng & Kung 1994):



Mikrobiologinen metanolin tuotanto on myös periaatteessa mahdollinen, sillä metaania hiilidioksidiksi hapettavat metanotrofiset bakteerit tuottavat metanolia välituotteena. Tämän hyväksikäyttö edellyttäisi teknologiaa, joka estää metanolin edelleenhapettumisen.

Metanolia voidaan tuottaa savukaasujen hiilidioksidista vedyn avulla, mikä on eräs kemian nobelisti George Olahin esittämän metanolitalouden keskeisiä ajatuksia eli metanolia voitaisiin käyttää energian kantajana ja vedyn varastona vetykaasun sijaan (Olah ym. 2005):



Alkoholikäyminen on esihistorialliselta ajalta periytyvä metanolin valmistusmenetelmä, jossa päätuotteen etanolin lisäksi aina syntyy sivutuotteena metanolia. Metanolin myrkyllisyyden takia se on pakko erottaa tislamalla elintarvike-etanolista, mutta polttoaine-etanoliiin se voidaan jättää, koska se toimii denaturoimisaineena. Metanolin erottaminen on perinteisesti osattu tehdä metsän keskellä sijaitsevilla pontikkatislamoissa. Metanolin määrä etanoliiin verrattuna on korkeintaan suuruusluokkaa 0,1 %. Vastaavia määriä esiintyy viineissä ja mehuissa, mutta ne ovat liian alhaisia määriä aiheuttamaan myrkytysoireita.

Metanoli sopii ottomoottoripolttoaineeksi, jolloin sen etuina bensiiniin verrattuna on hyvä nakutuskestävyys eli suuri oktaaniluku sekä polttoaineeseen sisältyvä happi, joka vähentää ilman tarvetta ja palaa täydellisemmin kuin hiilivedyt (Juurikkala ym. 1986). Toisaalta suuren höyrystymislämmön vuoksi ilma-polttoaineseos jäähtyy polttoaineen höyrystyessä imusarjassa seurauksena parantunut täyttöaste ja tehon lisääntyminen, varsinkin ahdinta käytettäessä. Teho lisääntyy myös alhaisen ilmantarpeen vuoksi. Metanolia varten rakennetun ottomoottorin hyötysuhde on bensiinimoottorin hyötysuhdetta noin 5 %-yksikköä korkeampi (Bernhardt ym. 1976). Puhtaalle metanolille kehitetyt moottorit voisivat Exxonin mukaan olla jopa 25–45 % tehokkaampia kuin bensiinimoottorit (Solantausta & Asplund 1980). Suuresta höyrystymislämmöstä on myös haittaa, sillä se vaikeuttaa kylmäkäynnistystä kuten myös bensiiniin verrattuna alhaisempi haihtuvuus. Se voidaan kompensoida esimerkiksi polttoaineen esilämmittimellä, joka on vakiintunutta teknologiaa ja käytössä monen eri polttoaineen kanssa (Juurikkala ym. 1986). Esilämmitin voi toimia moottorin hukkalämmöllä, akusta saatavalla sähköllä tai polttoaineella. Kylmäkäynnistyvyttä voidaan parantaa myös samalla tavalla kuin bensiinille tehdään eli lisäämällä mukaan kevyitä hiilivetyjä, kuten butaania, jotka ovat halpoja energiasäilytöön nähden johtuen markkinoihin nähden ylituotannosta öljynjalostamoilla. Etanolista valmistettu DEE sopii myös siihen tarkoitukseen. Yksinkertainen tapa, jota esimerkiksi Ruotsissa ja USA:ssa käytetään, on lisätä joukkoon bensiiniä talviolosuhteissa enemmän kuin kesällä. Tällä tavalla voidaan taata M85- ja E85-alkoholipolttoaineiden käytön toimivuus moottoreissa myös Alaskan ja Ruotsin talviolosuhteissa.

Sekä metanolin että etanolin energiatiheys on bensiiniä pienempi, mikä johtaa litramääräisesti mitattuna suurempaan kulutukseen, mutta silti pienempään energiankulutukseen, johtuen täydellisemmästä palamisesta. Metanolia (M100) varten rakennetut autojen ottomoottorit saavuttavat bensiinimoottoriin verrattuna Fordin tutkimusten mukaan kaikilla käyttöasteilla 2–3 prosenttiyksikköä suuremman hyötysuhteen (Suzuki 1997). Suuremmasta energiatehokkuudesta huolimatta bensiinin käyttöön pystyvät eli alhaisen puristussuhteen ottomoottorit edellyttävät suurempia polttoainetankkeja metanolille ja etanolille, mikäli halutaan sama tankkausväli. Metanoli ja etanoli sallivat

kuitenkin ottomoottorin puristussuhteen nostamisen 14–16:een (Juurikkala ym. 1986). Tällaisessa moottorissa etanolin litramääränsänsä kulutus ei enää ylitä bensiinin kulutusta puristussuhteen < 10 moottorissa ja energian kulutus on vähintään 20 % bensiiniä alempi. Metanolin tapauksessa vastaava energiatehokkuuden parannus ei kuitenkaan riitä, vaan metanolin litramääräinen kulutus on aina bensiiniä korkeampi.

Alkoholien happipitoisuus aiheuttaa myös eräitä polttoainejärjestelmän kumi-, muovi- ja metallimateriaaleja kuluttavan vaikutuksen, josta syystä halvimpia materiaaleja käytävissä autoissa puhtaan alkoholin käyttö lyhentää joidenkin komponenttien elinikää huomattavasti. Jos kuitenkin bensiiniin lisätään enintään noin 15 % alkoholia, ei vaikeuksia juuri ilmene ja samalla se muuttaa polttoaineen ominaisuuksia voittopuolisesti moottorille paremmin sopiviksi (Juurikkala ym. 1986). Vaihtamalla kestävämmät komponentit alkoholin osuutta voidaan lisätä. Paras tapa olisi saada autoteollisuus poistamaan huonolaatuiset materiaalit kokonaan käytöstä eli tähtäämään polttoainejoustaviin autoihin. Se edistäisi yleisesti biopolttoaineiden käyttöä, sillä niistä useimmissa on paljon happea mukana ja ne ovat siten reaktiivisempia kuin hiilivedyt. Alkoholeilla on myös korroosiota vähentävä ominaisuus, vesiliukoisuus, jonka johdosta ne pystyvät sitomaan polttoainejärjestelmään jäänyttä vettä ja siten vähentämään veden aiheuttamaa korroosiota ja siitä aiheutuvia huoltokustannuksia. Metanolin myrkyllisyys ja vesiliukoisuus ovat terveys- ja ympäristöriskejä, mutta pienempiä kuin bensiinin ja dieselöljyn riskit (Taulukko 7.7). Metanolin biohajoavuus vähentää vesiliukoisuusominaisuuden aiheuttamaa ympäristöriskiä. Metanolin palamisessa syntyvä formaldehydi on kevyistä VOCeista haitallisin, josta syystä metanolikäyttöisissä autoissa käytetään formaldehydin hapetukseen erityisesti sopivia katalysaattoreita. Kalifornia, jossa metanoliautoja on perinteisesti käytetty eniten, on formaldehydipäästöille annettu erilliset raja-arvot.

Metanoli mahdollistaa ottomoottorissa paljon suurempien tehojen saavuttamisen kuin tavanomaiset fossiilipolttoaineet. Esimerkiksi ”monster truck” -autot ovat perusrakenteeltaan tavallisia katumaastoautoja tavanomaisella moottorilla, mutta metanolia varten viritettynä 7-litraisesta moottorista saadaan noin 2000 hevosvoimaa eli kolminkertaisesti suurimpiin 16-litraisella diesel-moottorilla varustettuihin maantierekkoihin verrattuna. (Kuva 3.5). Traktorivetokilpailuiden tehokkaimmat traktorit ovat myös metanolikäyttöisiä ja voivat saavuttaa 7000 hevosvoiman tehon eli kaksinkertaisen maailman suurimpiin, avokaivoskäyttöön tarkoitettuihin 117-litraisiin dieselrekkoihin verrattuna. Kaikkein nopein kiihdytysajoneuvoluokka ”top fuel” käyttää polttoaineenaan 15 % metanolia ja 85 % nitrometaania, joka antaa 8 litran moottoreilla 8000 hevosvoiman tehon eli noin 10-kertaisen Formula 1 -autoihin verrattuna.



Kuva 3.5. Korkeatehoisia M100-autoja: a) USA:n NASCAR-sarjassa käytetty 625 hv:n Chevrolet vuodelta 1981 Speuerin tekniikkamuseossa Saksassa. c) Pensken 1026 hv:n Indy-auto Mercedes-Benz-museossa Stuttgartissa. c) Vesa Kivimäen rakentama 2000 hv:n ”monster truck” Jyväskylän messukeskuksessa. [2007]

Alkoholeja voidaan käyttää myös dieselmootoreissa niiden alhaisesta setaaniluvusta huolimatta. Ruotsissa käytetään E93:a dieselbusseissa sekoitettuna korkean setaaniluvun lisäaineen kanssa. Metanolin ja dieselin erillisellä suihkutuksella voidaan päästä 90 %:n metanoliosuuteen, minkä lisäksi moottorin ominaisuudet ovat hyvät (Juurikkala ym. 1986).

Metanolia on käytetty rakettimootorien polttoaineena alkaen 2. maailmansodan aikaisista saksalaisista Me163-lentokoneista ja ottomootorien ahtimiin vesiliuoksena suihkutettuna lisätehon lähteenä alkaen saksalaisista Me109-lentokoneista. Metanoli sopii sellaisenaan eräiden polttokeinojen energianlähteeksi (Kuva 3.6).

Metanolin tuotanto vuonna 2007 oli 32 Mt, josta 19 % kului MTBE:n valmistukseen bensiiniin sekoitettavaksi ja 3 % meni muuhun polttoainekäyttöön eli sellaisenaan käytettäväksi tai raaka-aineeksi DME:n ja biodieselin tuotannossa (MI 2007a). Metanolin yhteenlaskettu polttoainekäyttö oli 142 PJ. Valtaosa metanolista tehdään maakaasusta ja puu on merkittävä resurssi vain Kiinassa (MI 2007b). Bioresurssin käyttö on siellä lisääntymässä, sillä Kiinan hallitus kielsi syyskuussa 2007 maakaasun käytön metanolin valmistukseen säästääkseen omia maakaasuvarantojaan suoraan energiakäyttöön.



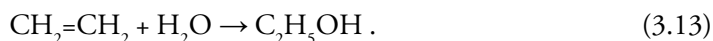
Kuva 3.6. Metanolipolttokennolla varustettu saksalainen postinjakeluajoneuvo Münchenin liikennetekniikan museossa. [2007]

3.2.1.2 Etanoli (EtOH) CH_3CH_2OH

Etanoli, jonka pääominaisuudet on esitetty taulukossa L6.8 (Liite 4), on toiseksi vanhin ihmiskunnan käyttämä nestemäinen polttoaine. Elintarvikekäytössä se on ollut ainakin 9000 vuotta, moottorikäytössä 1700-luvulta alkaen ja moottoroidun liikenteen käytössä 1800-luvulta alkaen. Etanolin yleisin valmistusmenetelmä on alkoholifermentaatio mikrobin (sienet ja bakteerit) avulla sokeri- ja tärkkelyskasveista kokonaisreaktiona (Sørensen 2000)

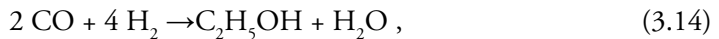


Sivutuotteena syntyy hiilidioksidiä, jota käytetään elintarvikealkoholin tuotantopaikoilla mm. juomien hiilihapotukseen ja kuivajään (kiinteän hiilidioksidin) valmistukseen. Fermentaation lisäksi etanolia valmistetaan monilla muilla menetelmillä. Teollisuusetanolia valmistetaan synteettisesti raakaöljypohjaisesta eteenistä (eli etyleenistä) höyryhydrauksella öljynjalostamoissa (Owen ym. 1995):



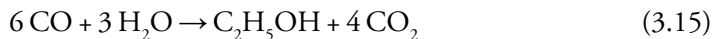
Karbidiväkiiviina valmistettaessa hydrataan vastaavasti etyyniä (eli asetyleeniä) $CH\equiv CH$, jolloin välituotteena syntyy asetaldehydiä CH_3-CHO . Sekä eteeni- että etyynipohjainen valmistus tuottaa valmiiksi väkevää etanolia, joten tislausta ei tarvita.

Bioetanolin valmistusmenetelmiä, jotka soveltuvat kaikille kasveille ovat happo- tai entsyymiesikäsittely yhdistettynä fermentaatioon (Wyman 1996) sekä kaasutus ja höyryreformointi yhdistettynä FT-synteesiin (Perry & Green 1984) tai etanolisynteesiin (Owen ym. 1995). Terminen etanolisynteesi tapahtuu katalyyttisesti synteesikaasusta:



jossa synteesikaasu voidaan valmistaa höyryreformoinnilla metaanista (maa- tai biokaasu) tai kaasutuksella kiinteästä biomassasta (Luku 5.4).

Etanolia voidaan tuottaa myös synteesi- ja savukaasuista biosynteettisesti seuraavin kokonaisreaktioin (Rajagopalan ym. 2002):



Tislaamalla saatu etanoli on 96 t-%:sta (94 p-%) spriiä, joka kelpaa ajoneuvokäyttöön sprii moottoreissa sellaisenaan, mutta ei sekoitettuna bensiiniin, koska silloin vesi erottuu omaksi faasikseen. Veden erottuminen voidaan estää, mikäli sprii absolutoidaan vähintään 99,6 t-%:ksi etanoliksi. Tällöin etanolia ja bensiiniä voidaan sekoittaa toisiinsa missä suhteessa tahansa. Jo vuonna 1939 Alko raportoi, että pienissä bensiinin osuuksissa, korkeintaan 10–20 %, veden erottumisongelma on vähäinen ja tässä tapauksessa bensiini olisi lähinnä denaturoimisaineena (Kaukoranta 1981). Samalla se toimii myös höyrynpaineen nostajana kylmäkäynnistystä varten.

Absoluuttisen alkoholin valmistukseen on olemassa paljon menetelmiä, joista ensimmäinen, puuhiilisuodatus, keksittiin jo 1700-luvun lopulla. Suomessa käytettiin sulfittispriiin absolutoimiseen Hiag-menetelmää eli natrium- ja kaliumasetaatien vedensitomiskykyä (Pellinen & Roschier 1952). Myös bentsolin ja glyseriinin käyttöön perustuvat menetelmät olivat tunnettuja jo 1920-luvulla (Talvitie 1930). Suurin osa absoluuttisesta etanolista valmistettiin keskitetysti Alkon tehtailla Rajamäellä ja vain muutamalla sulfittispriihtehtaalla oli oma absoluutoimislaitteisto (Pellinen & Roschier 1952).

Etanolin korkea puristuskestävyys ottomoottorissa oli tunnettua jo Otton kehitystyöstä. Se mahdollistaa korkean puristussuhteen (14-15) sprii moottorien käytön (Airas 1919). Jo 1920-luvulla oli hyvin tiedossa, että sprii moottorien korkean puristussuhteen takia näillä moottoreilla on saavutettavissa samanlainen litramääräinen kulutus kuin bensiinimoottoreissa, vaikka etanolin energiatiheys on kolmannelle bensiiniä pienempi (Kaukoranta 1981), toisin sanoen energiatehokkuus etanolilla oli tällöin kolmannelle bensiiniä parempi. Autojen lisäksi myös traktoreita (Drane 1980) ja lentokoneita (Kuva 6.2, Kansikuva 5) on valmistettu sprii moottoreilla. Myös tavanomaisissa bensiinille tehdyissä moottoreissa etanolilla saadaan bensiiniä parempi hyötysuhde (IEA 2004). Turbolla varustetuissa moottoreissa voidaan etanolin korkea puristuskestävyys hyödyntää lisäämällä ahtopainetta, jolloin samassa autossa saadaan enemmän tehoa kuin bensiinillä. Näin on Saab tehnyt BioPower-autoissaan (Kuvat 3.7 ja 6.4) ja niin voitaisiin tehdä myös muita korkean oktaaniluvun polttoaineita, kuten metanoli ja metaani, käytettäessä.

TURBO

162

**Gör en insats för miljön.
Skaffa ytterligare 30 hästar.**

Nya Saab 9-5 BioPower drivs av etanol. Det ger radikalt minskade utsläpp av fossilt koldioxid till atmosfären. Dessutom har etanolen ett högre oktantal. Det betyder att Saab 9-5 BioPower, som även kan köras på bensin, får 30 extra hästkrafter när du kör på etanol. 150 hästkrafter blir 180, och vridmomentet ökar från 240 till 280 Nm. Välkommen att boka en provkörning på telefon 020-99 99 00 eller www.saabsverige.com

**Nya Saab 9-5 BioPower.
Renare kraft med etanol.**

 **SAAB**
move your mind®

Kuva 3.7. Saabin FFV-auton mainosposteri Tukholman keskusrautatieasemalla. Sama auto antaa 30 hevosvoimaa enemmän tehoa ja 40 Nm enemmän vääntöä etanolipolttoaineella E85 tankattuna kuin tavallisella bensiinillä tankattuna. [2005]

Etanolin palaessa täydellisesti muodostuu vain hiilidioksidia ja vesihöyryä:



Epätäydellisestä palamisesta seuraa asetaldehydin muodostumista



ja etikkahapon muodostumista



Sekä asetaldehydi että etikkahappo palavat edelleen suurelta osin hiilidioksidiksi ja vedeksi, mutta kaasumainen asetaldehydi karkaa osittain pakokaasujen mukana ja etikkahappo aiheuttaa korroosiota. Etikkahapon aiheuttama korroosio oli ongelma etanolimoottoreissa ennen 1920-lukua, kun käytettiin 90 % etanoli-vesiseoksia ja riittämätöntä ilmamäärää (Talvitie 1930). Epätäydellistä palamista vähennetään imuilman esilämmityksellä, yksinkertaisella teknologialla, joka on 1900-luvun alusta alkaen osattu liittää etanolimoottoreilla varustettuihin ajoneuvoihin. Polttomoottorien kaikkien polttoainesten energiasisällöstä suurin osa, noin 2/3, päättyy hukkalämmöksi. Se on käytävissä myös imuilman esilämmitykseen, joka puolestaan parantaa hyötysuhdetta ja vähentää jäätymisongelmia. Siitä syystä se on normaalia teknologiaa kaikenlaisissa polttomoottoreissa. Erityisiä lämmönvaihtimia ei yleensä maaliikenteessä tarvita, vaan riittää ottaa imuilma pakosarjan päältä, johon lämpö siirtyy johtumalla sylintereistä poistuvasta kuumasta pakokaasusta. Polttomoottorilentokoneissa, joiden imuilma voi olla erittäin kylmää, käytetään lämmönvaihtimia.

Etanolia on yli 100 vuoden ajan käytetty bensiiniä varten rakennetuissa autoissa 10-30 % osuudella bensiiniin sekoitettuna ilman minkäänlaisia muutoksia autoissa (Kovarik 1998). Suomen kylmissä olosuhteissa Juurikkalan ym. (1986) mukaan 15 % etanoli-sekoitus käy tavallisiin autoihin ilman muutoksia. Etanolin ja muidenkin nestemäisten biopolttoainesten kylmäkäynnistys- ja kylmäajo-ominaisuuksia voidaan tarvittaessa parantaa seuraavilla tavoilla, jotka kaikki olivat käytössä jo 1920-luvulla (Talvitie 1930):

- Eetterin, butaanin tai muiden korkean höyrynpaineen yhdisteiden lisääminen
- Bensiinin tai teollisuusbensiinin lisääminen
- Polttoaineen rikastaminen (ryyppy)
- Moottorin käynnistys toisella, korkeamman höyrynpaineen polttoaineella
- Polttoaineen esilämmitys
- Tuloilman esilämmitys
- Kaasuttimen esilämmitys
- Sylinterien esilämmitys

Lämmitys voidaan tehdä akun avulla sähkövastuksella, moottorin hukkalämmöllä tai ulkoisella lämmönlähteellä, jota tekniikkaa Suomessa nykyisin yleiset lämmitystolpat edustavat. Esilämmitys ja bensiinillä käynnistys olivat välttämättömiä Suomessakin yleisessä käytössä 1920–1950-luvuilla olleissa petrolitraktoreissa ja varhaisissa dieseltraktoreissakin käytettiin bensiinikäynnistystä (Kotta 2007a-b). Siten teknologia myös etanolin käyttöön oli sarjavalmisteista ja helposti saatavilla 1920-luvulta alkaen. Käytön vähäys

traktoreissa johtui etanolin valmistuksen laittomuudesta kieltolain aikana. Veden erottamista on osattu estää korkeammilla alkoholeilla (propanoli, butanoli ym.) sekä eettereillä 1920-luvulta alkaen (Kovarik 1998). Ruotsissa etanolin talvikäyttö hallitaan edelleen (Kuva 3.8).



Kuva 3.8. OKQ8:n talvietanolin jakeluasemia Pohjois-Ruotsissa: Jällivaarassa (a) ja Kiirunassa (b). [2006]

Kaikki bensiinikäyttöiseksi valmistetut ajoneuvot joitakin hyvin vanhoja lukuun ottamatta pystyvät kaikissa olosuhteissa käyttämään ainakin 10 t-% etanolia (E10) (IEA 2004). Suomessa voidaan autotekniikan käsikirjan mukaisesti käyttää ainakin 15 t-% etanolia eli E15:a (Juurikkala ym. 1986). Brasiliassa voidaan käyttää ainakin 26 t-% etanoliseoksia (E26) ja kaikessa bensiinissä on siellä vähintään 22 t-% etanolia (IEA 2004). Kuvan 3.9. brasilialaisilla jakeluasemilla Gasolina Comum tarkoittaa perusbensiiniä, jossa on vähintään 22 t-% etanolia. Sen alemmaa etanolin osuutta ei myytävässä bensiinissä missään Brasiliassa ole eli tiedetään, että kaikki bensiiniä varten rakennetut autot toimivat sillä. Gasolina Supra tarkoittaa korkeaoktaanisempaa polttoainetta, jossa etanolin osuutta on kasvatettu. Alcool Comum on puhdasta etanolia (E100). Maaliikenteen lisäksi myös veneet ja laivat käyttävät Brasiliassa etanolibensiiniä (Kuva 2.8).

FFV-autot pystyvät tavanomaisten fossiilipolttoaineiden lisäksi käyttämään vähintään yhtä biopolttoainetta ja automaattisesti tunnistamaan ja säätämään sytytystä ja polttoaineen ja ilman syöttöä polttoaineen mukaan. Ne poikkeavat tavanomaisista autoista parempien materiaalivalintojen ja paremman säätöjärjestelmän ansiosta. Kyseiset valinnat tekevät autosta kestävämmän myös tavanomaisilla fossiilipolttoaineilla ajettaessa. Kestävämpien materiaalien tarve johtuu biopolttoaineiden sisältämän hapen korrosoivasta vaikutuksesta. Alkoholeilla on vesiliukoisina myös veden tuoma korrosoiva vaikutus, jota toisaalta tasapainottaa näiden polttoaineiden kuivatusvaikutus eli kyky imeä polttoainejärjestelmään joka tapauksessa myös fossiilisia käytettäessä päässyt vesi. Materiaalimuutoksia voidaan tarvita seuraavasti:

- polttoainetankin sisäpinnoite voi olla esim. tinaa, mutta ei esim. tina-lyijyä
- polttoaineputket voivat olla esim. kadmium-pronssia, mutta ei sinkki-terästä



Kuva 3.9. Shellin ja Petrobrasin jakeluasemilla Fortalezaassa Brasiliassa myydään E100:aa (A Comum), kahdenlaista etanolibensiiniä (G Comum ja G Supra), dieselöljyä (D Comum) ja maakaasua (Gas Natural). [2006]

Materiaalivalintojen hintaa nostavan vaikutuksen vastapainona on myös hintaa alentavia muutoksia: alkoholeja käytettäessä palladium- ja molybdenium-päällysteiset katalysaattorit toimivat paremmin kuin tavanomaiset palladium-rhodium, päällysteet, mikä merkitsee katalysaattorin halventumista.

Vastaavanlaisesta materiaalin parantaminen oli tarpeen siirryttäessä lyijyllisestä lyijyttömään bensiiniin. Lyijyn voiteluvaikutus oli mahdollistanut heikkotasoisten ja mahdollisimman halpojen materiaalien kuten valurauta käytön venttiileissä, mutta lyijyttömältä bensiiniltä tämä voiteluvaikutus puuttui, joten venttiilimateriaali vaihdettiin parempaan, esim. rauta-koboltti-lejeerinki. Parempi materiaali nosti luonnollisesti hieman autojen hintaa, mikä aikanaan oli eräs argumentti Suomessa lyijyttömän bensiinin ja katalysaattorien käytön vastustustoiminnassa.

FFV-autojen muutokset tavanomaisiin versioihin maksavat valmistuksen yhteydessä tehtynä korkeintaan 200 €, mikä tarkoittaa, että niitä voidaan myydä lähes samaan hintaan fossiiliautojen kanssa. Tai kyseinen hinta voitaisiin vähentää autoverosta, kuten tehtiin katalysaattoreiden käyttöönoton yhteydessä. Se on huomattavasti helpompi tehdä, koska FFV-autojen lisähinta on vain 0-20 % katalysaattorin hinnasta. Olisi toivottavaa, että asia toteutettaisiin samalla tavalla kuin katalysaattorien tapauksessa tehtiin. Tätä on esitetty kansalaisaloitteessa, joka jätettiin eduskunnalla vuonna 2005 (Lampinen ym. 2005a-b).

Jälkiasennettuna konversio etanolille maksaa enemmän, mutta se voi silti olla kannattavaa, varsinkin jos konversion ja polttoaineen tekee itse, kuten USA:ssa päinvastoin kuin Suomessa on sallittua jopa kotitalousmittakaavassa (Wortham 1979). Joissakin maissa, kuten USA:ssa, jälkikonversioita tehtiin erityisesti 1970-luvulla öljykrisisen seurauksena ja sitä varten laadittiin oppaita myös itserakentajille (Drane 1980). Jälkikonversiossa auto voidaan muuntaa joko pelkästään etanolikäyttöiseksi tai kaksoispolttoainejärjestelmällä varustetuksi bifuel-ajoneuvoksi, joka voi käyttää myös bensiiniä. Tarvittavat toimenpiteet Dranen (1980) mukaan silloisille bensiiniä varten rakennetuille kaasutinautoille olivat bi-fueliksi konvertoitaessa:

- kaasuttimen vaihtaminen ja/tai säätäminen (koska sen on pystyttävä syöttämään suurempi polttoainemäärä johtuen etanolin alemmasta energiatihydestä, ja pienempi ilmamäärä johtuen etanolin sisältämästä hapesta)
- sytytyksen aikaistaminen (koska etanoli palaa hitaammin ja tasaisemmin eli vähemmän räjähtävästi kuin bensiini)
- sytytystulppien vaihtaminen kuumempiin (koska etanoli höyrystyy bensiiniä huommin)
- polttoainetankki etanolille ja T-liitäntä olemassa olevaan polttoainejärjestelmään bensiinitankin rinnalle

Käyttäen kierrätysosia Dranen esimerkkinä toteuttaman vuosimallin 1969 Dodge Dartin konversio bifuel-autoksi maksoi 36 \$. Jälkikonvertointia harjoitetaan USA:ssa myös moottoripyörille (Kuva 3.10).



Kuva 3.10. Tehdasvalmisteisesti E85-käyttöinen Ford Ranger -auto ja Yamahan jälkikonvertoitu E100-moottoripyörä esittelyssä uusiutuvan energian messuilla Hoplandissa Kaliforniassa. [2004]

FFV-autoissa käytetään Brasiliassa etanolia aina 100 %:iin asti (E100), mutta USA:ssa (Kuva 3.10) ja Ruotsissa 85 t-%:iin (E85) johtuen mahdollisuudesta käyttää sitä myös erittäin kylmissä olosuhteissa Alaskassa ja Pohjois-Ruotsissa talvella (Kuva 3.8). Tällaisissa olosuhteissa etanoliosuutta pudotetaan 60 t-%:iin. Taustalla on erittäin kylmien olosuhteiden käynnistysominaisuuksien parantaminen.



Kuva 3.11. Scanian etanolikäyttöinen (E93) dieselbussi Tukholmassa. Etanolin alhainen setaaniluku on korvattu setaaninkorottajalisäaineella ja puristussuhde on 22, joten hyötysuhde on dieselöljykäyttöisiä busseja parempi. [2006]

Etanolia voidaan käyttää myös dieselmootoreissa dieselöljyyn sekoitettuna korkeintaan 20 % osuudella ilman muutoksia moottorissa (Agarwal 2007) ja 10 % osuudella ilman muutoksia suorituskyvyssä (Hansen ym. 2005). Etanolin sisältämä happi täydellistää palamista ja vähentää rikki- ja hiilidioksidipäästöjä puhtaaseen fossiilidieseliin verrattuna. Ruotsissa etanolia käytetään myös 93 t-%:na dieselmootoreissa yhdessä setaanilukua korottavan lisäaineen kanssa (Kuvat 3.11 ja 7.20).

Etanolin denaturoimiseen on käytetty lukuisia kemikaaleja, joihin lukeutuvat metanoli, isobutanoli, pentanoli, krotonaldehydi, propanoni, metyylietyyliketoni, metyyli-isobutyryliketoni, eetteri, tärpätti, pyridiini, kolokvinttiute, bentseeni, bentsoli ja bensiini (Kauppila 1988).

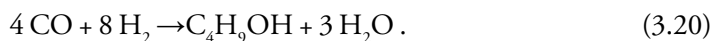
3.2.1.3 Propanoli (NPA, IPA) C_3H_7-OH (2 isomeeriä), C_3H_8O

Propanolin eli propyylialkoholin kahdesta isomeeristä yleisimmin käytetään isopropanolia (IPA), koska sitä on helppo valmistaa öljynjalostamoilla raakaöljystä. Sekä IPA:a että NPA:a (n-propanolia) voidaan valmistaa fermentaatiolla sokereista ja aminohapoista.

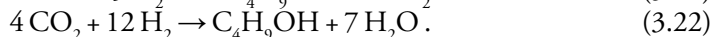
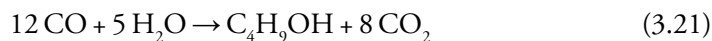
3.1.1.4 Butanoli (NBA, IBA, TBA) C_4H_9-OH (3 isomeeriä), $C_4H_{10}O$

Butanolin eli butyylialkoholin kolmesta isomeeristä yleisimmin käytetään isobutanolia (IBA) ja tert-butanolia (TBA) bensiinin lisäaineina, koska niitä on helppo valmistaa öljynjalostamoilla raakaöljystä ja ne liukenevat bensiiniin kaikissa sekoitussuhteissa ilman metanolin ja etanolin kaltaista vedenerotusongelmaa. Suoraketjuista n-butanolia (NBA) käytetään nykyään harvemmin polttoaineena, mutta sillä on suurin potentiaali puhtaana biopolttoaineena. TBA on normaaliolosuhteissa kiinteä, joten sitä ei voi käyttää sellaiseen nestemäisille polttoaineille tarkoitettuihin ajoneuvoihin.

Butanolia voidaan valmistaa myös bioresursseista. Perinteinen tapa on sokeripohjainen fermentaatio. Butanolisynteesi on mahdollinen biokaasun höyryreformoinnilla tai biomassan kaasutuksella valmistetusta synteetikaasusta:



Butanolia voidaan tuottaa myös synteesi- ja savukaasuista biosynteettisesti seuraavin kokonaisreaktioin (Rajagopalan ym. 2002):



3.2.1.5 2,3-Butandioli $\text{CH}_3\text{-(CH-OH)}_2\text{-CH}_3$, $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$

Butandioli on kaksiarvoinen alkoholi, jota voidaan valmistaa fermentaatiolla sokereista ja muista hiilihydraateista useiden mikrobien avulla. Sen ylempi lämpöarvo HHV on 27,2 MJ/kg eli metanolin ja etanolin välissä. Anaerobinen fermentaatio tuottaa likimain saman verran 2,3-butandiolia ja etanolia. Aerobinen fermentaatio tuottaa 2,3-butandiolia ainoana lopputuotteena tai päätuotteena, jolloin sivutuotteena saadaan etanolia. (Brown 2003)

3.2.1.6 Muut alkoholit ja sikunaöljy

Myös monet muut alkoholit sopivat liikennepolttoaineeksi, mutta niillä ei ole yhtä suotuisia olemassa olevia tuotantoteknologioita kuin edellä esitetyillä viidellä alkoholilla. Vanhin korkeampien alkoholien tuotantotapa on etanolifermentaatio, jonka sivutuotteena saadaan sikunaöljyä eli finkkeliöljyä (fusel oil). Teollisissa prosesseissa sikunaöljyn määrä on luokkaa 0,5 % etanolin määrästä (Talvitie 1945a). Sikunaöljy sisältää etanolia raskaampien alkoholien lisäksi pieniä määriä estereitä ja aldehydejä. Perinteinen sikunaöljy on peräisin lähinnä aminohappojen fermentaatiosta (Talvitie 1945a), mutta myös sokerin fermentaatiosta. Metanolin, etanolin, propanolin ja butanolin lisäksi on jo 1900-luvun alussa osattu tuottaa fermentaatiolla myös pentanolia (amyylialkoholi) sekä heksanolia (heksyylialkoholia) ja heptanolia (heptyylialkoholia) on osattu valmistaa risiinöljystä (Goldsmith 1922). Näitä alkoholeja on käytetty muiden alkoholien kanssa pieninä pitoisuuksina sekä hapettimina bensiiniin sekoitettuna. Furfuraalialkoholi $\text{C}_5\text{H}_6\text{O}_2$ on hypergolinen rakettpolttoaine, jota on käytetty yhdessä aniliinin ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$) kanssa (Sutton 2005).

3.2.2 Eetterit DEE, MTBE, ETBE, TAE, TAME ym.

Nestemäisiä eettereitä käytetään lähinnä polttoaineiden, erityisesti bensiinin, lisäaineina merkittävän suurissa luokkaa 15 % olevissa pitoisuuksissa, mutta teknisesti ne soveltuvat myös pääpolttoaineeksi. Dietyylieetterillä on pisimmät perinteet biopolttoaineena, mutta nykyään eniten käytetyt eetterit MTBE, ETBE, TAE ja TAME valmistetaan öljynjalos-

tamoilla ja ne ovat normaalisti täysin fossiilisia. Niitä valmistettaessa toisena lähtöaineena on metanoli tai etanoli, jotka voidaan valmistaa biomassasta. Toisena lähtöaineena oleva isobuteeni tai isopenteeni on aina raakaöljypohjainen fossiilinen komponentti, joten tuotettu eetteri on vain osittain biopolttoaine. Ne lasketaan biopolttoaineeksi käytetyn bioetanolin tai biometanolin energiasisällön osalta. Periaatteessa nämä tai näitä vastaavia eettereitä voidaan valmistaa kokonaan bioperäisesti termisillä synteettisillä menetelmillä.

3.2.2.1 Dietyylieetteri (DEE) $CH_3-CH_2-O-CH_2-CH_3$, $C_4H_{10}O$

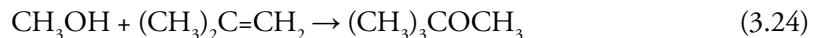
Dietyylieetteri on pisimpään käytetty eetteri, josta syystä sitä kutsutaan yleensä vain eetteriksi. Kuuluisin sovellus on nukutusaine, mutta se soveltuu myös sekä työkaasuksi eetterimoottoreihin että polttoaineeksi. Sen korkean höyrynpaineen (59 kPa @ 20 °C) ja alhaisen kiehumispisteen (35 °C) johdosta sitä on kauan käytetty alkoholeihin sekoitettuna näiden kylmäkäynnistysominaisuuksien parantamiseen (Talvitie 1930). Esi-merkkinä on Ruotsissa 1900-luvun alkupuoliskolla nataliitiksi kutsuttu polttoaine, jossa on 23 % eetteriä, 68 % etanolia ja 9 % bensiiniä (Nykänen 2000). Bensiini toimii siinä denaturoimisaineena. Etelä-Afrikassa nataliitilla tarkoitettiin laajassa käytössä ollutta otomoottoripolttoainetta, jossa on 45 % eetteriä, 54 % etanolia ja 1 % trimetyyliamiinia (Talvitie 1930). DEE:n oktaaniluku on alhainen, joten se ei yksinään sovi korkeapuristeisiin ottomoottoreihin.

Dietyylieetteriä valmistetaan etanolista rikkihapon katalysoimalla synteesillä:



3.2.2.2 MTBE $(CH_3)_3C-O-CH_3$, $C_5H_{12}O$

MTBE:tä (Metyyli-Tert-Butyyli-Eetteri) valmistetaan öljynjalostamoilla metanolista ja raakaöljypohjaisesta isobuteenista:

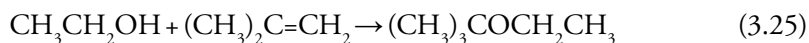


Kun käytetään biometanolia, lopputuotetta voidaan kutsua bio-MTBE:ksi, vaikka buteeni on raakaöljypohjainen. Bio-MTBE:stä on tällöin 36 % biopolttoainetta (EY 2003).

Vuonna 1999 MTBE:tä tuotettiin yli 21 miljoonaa tonnia (Kraus & Harremoës 2001) eli se oli yksi maailman eniten tuotetuista orgaanisista kemikaaleista. MTBE liukenee bensiiniin ilman erottumista, mutta se liukenee erinomaisesti myös veteen. Vesiliukoisuutensa ja pysyvyytensä takia esimerkiksi USA:ssa tehdyissä tutkimuksissa se on osoittautunut olevan toiseksi yleisin kemikaali pohjavedessä (Kraus & Harremoës 2001). Se on pohjaveden saastumistapauksissa yleisin syy. Sen haju- ja makuhaittojen, karsinogeenisyyden ja muiden haittojen, mukaan lukien mahdollinen hormonihäiritsemiskyky, takia se on kielletty joissakin maissa ja tulevaisuudessa yhä useammat maat tullevat sen käytön kieltämään.

3.2.2.3 ETBE (CH₃)₃C-O-CH₂CH₃, C₆H₁₄O

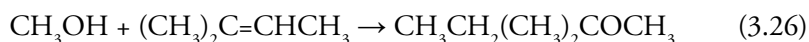
ETBE:tä (Etyyli-Tert-Butyyli-Eetteri) valmistetaan öljynjalostamoilla etanolista ja raakaöljypohjaisesta isobuteenista:



Kun käytetään bioetanolia, lopputuotetta voidaan kutsua bio-ETBE:ksi, vaikka buteeni on raakaöljypohjainen. Bio-ETBE:stä on tällöin 47 % biopolttoainetta (EY 2003).

3.2.2.4 TAME CH₃CH₂(CH₃)₂C-O-CH₃, C₆H₁₄O

TAMEa (Tert-Amyyli-Metyyli-Eetteri) valmistetaan öljynjalostamoilla metanolista ja raakaöljypohjaisesta isopenteenistä:



Kun käytetään biometanolia, lopputuotetta voidaan kutsua bio-TAMEksi, vaikka penteeni on raakaöljypohjainen.

3.2.2.5 TAEE CH₃CH₂(CH₃)₂C-O-CH₃, C₆H₁₄O

TAEEa (Tert-Amyyli-Etyyli-Eetteri) valmistetaan öljynjalostamoilla etanolista ja raakaöljypohjaisesta isopenteenistä:



Kun käytetään bioetanolia, lopputuotetta voidaan kutsua bio-TAEEksi, vaikka penteeni on raakaöljypohjainen.

3.2.2.6 Muut eetterit R₁-O-R₂

Myös muita eettereitä on vähäisemmässä määrin käytetty lisäaineina, esimerkiksi DIPE eli di-isopropyli-eetteri. Dimetyylieetteriä (DME) käytetään dieselmootoreissa pääpolttoaineena. Se on normaaliolosuhteissa kaasumainen, joten se käsitellään kaasumais-ten polttoaineiden yhteydessä.

3.2.3 Kasviöljyt ja eläinrasvat (triglyseridit) (PPO ym.)

Triglyserideitä saadaan kasveista, eläimistä tai mikrobeista joko raakana tai jätteinä, esimerkiksi paistorasvat ja paistoöljyt (Kuva 3.12). Kasviöljyjen ominaisuudet dieselmootoripolttoaineina vaihtelevat varsin vähän lämpöarvon (LHV n. 40 MJ/kg), tiheyden (n. 0,91 kg/l) ja setaaniluvun (n. 40) osalta, mutta kylmäominaisuudet vaihteleva erittäin paljon (Agarwal 2007). Rypsiöljyn kylmäominaisuudet ovat lähes fossiilidieselin luok-

kaa, kun taas palmuöljyn ominaisuudet ovat niin huonot, että sen käyttö on mahdollista vain tropiikissa, jos sielläkään. Kaikkien kasviöljyjen setaaniluku on kohtalaisen alhainen. Kasviöljyistä osalla, esim. pähkinä- ja palmuöljy, setaaniluku mahtuu fossiilidieselin normien sisään, mutta suurin osa jää sen alle. Lämpöarvoiltaan suurin osa kasviöljyistä jää fossiilidieselin alle, mutta pähkinäöljy on fossiilidieseliä parempi. Kasviöljyjen tiheys on fossiilidieseliä korkeampi, mutta niiden korkeasta happipitoisuudesta johtuen niiden energiatiheys on hieman dieselöljyä alempi.



Kuva 3.12. Suomen Kasviöljykierrätys Oy:n auto hakee käytettyä kasviöljyä kiinalaisesta ravintolasta Jyväskylässä. [2008]

Kasviöljyjen ja eläinrasvojen ominaisuudet ovat sopivia dieselmoottorikäyttöön. Mutta niiden viskositeetti kylmänä on selvästi fossiilidieseliä korkeampi, joten ne eivät sovi nykyisiin fossiilidieselkäyttöiseksi suunniteltuihin ajoneuvoihin johtuen oheislaitteiden (pumput, suuttimet jne.) kapeasta toleranssista. Siitä syystä yleisin tapa kasviöljyjen käyttöön on vaihtoesteröidä ne biodieseliksi, jonka viskositeetti on fossiilidieselkäyttöiseksi suunniteltujen ajoneuvojen oheislaitteiden toleranssien sisällä. Muita vaihtoehtoja ovat emulsiopolttoaineiden valmistus ja termiset synteettiset prosessit kuten pyrolyysi ja suora nesteytys.

Kasviöljyä voidaan käyttää sellaisenaan PPO100-polttoaineena (pure plant oil) esilämmittämällä, jolloin niiden viskositeetti laskee. Tai vaihtoehtoisesti suihkutinjärjestelmän toleranssia voidaan kasvattaa siten, että se pystyy selviämään suuremman viskositeetin polttoaineesta. Itse dieselmoottorin toiminnan kannalta sekä kasviöljyt, jäteöljyt että jäte-eläinrasvat vastaavat fossiilidieselin käyttöä, kun niiden ominaisuudet on moottorin oheisjärjestelmässä otettu huomioon (Tashtoush 2007). PPO100:n käyttö on yleistä Saksassa ja sillä on oma kansallinen standardinsa (Kuva 3.13). PPO100-autoja ei tehdasvalmisteisesti tehdä, joten etenkin Saksaan on syntynyt varsin suuri konversioliiketoiminta. Eräänä esimerkkinä on kansainvälisesti toimiva Elsbett-yhtiö (Kuva 6.8).



Kuva 3.13. Huoltoasemalla Lahriissa Saksassa myydään Saksan standardin DIN V 51605 mukaisia kasviöljyjä. [2007]

Kasviöljyt voivat soveltua myös lisäaineiksi, esimerkiksi hapettimena. Aasian kurkkukasvin hedelmistä peräisin olevaa kolokvinttiuutetta on käytetty etanolin denaturoimiseen (Kauppila 1988).

3.2.4 Biodieselit (FAAE, FAME, FAEE ym.)

Biodieselillä tarkoitetaan perinteisesti rasvahappojen alkyyliestereitä. Niitä voidaan valmistaa kasviöljyjen (Kuva 3.14), eläinrasvojen tai mikrobiöljyjen vaihtoesteröinnillä, rasvahappojen esteröinnillä tai vaihtometyloinnillä (Luku 5.3).

Biodieselin moottoritekniset ominaisuudet ovat lähellä fossiilidieseliä: setaaniluku ja viskositeetti ovat hieman korkeammat ja lämpöarvo hieman alempi ja vaihteluväli on pieni eri kasviöljyistä valmistetuilla biodieseleillä (Agarwal 2007). Kylmäominaisuudet sen sijaan vaihtelevat varsin paljon riippuen käytetystä kasviöljystä ja ne ovat yleensä fossiilidieseliä huonommat. Biodieselin fossiilidieseliä korkeampi setaaniluku merkitsee kylmäkäynnistyksen helpottumista ja päästöjen laskua erityisesti kylmäkäynnistyksessä, mutta myös ajossa. Biodieselin voiteluominaisuudet ovat fossiilidieseliä parempi, mikä johtaa moottorin parempaan suorituskykyyn ja kestoon (Drapcho ym. 2008a). Suurin osa päästökomponenteista, hiilivedyt, häkä, hiukkaset, rikin oksidit, PAH:t ja tietenkin hiilidioksidi, on biodieselillä selvästi eli vähintään 50 % fossiilidieseliä alemmat. PAH-päästöt vähenevät Cvengrošin ja Považanecin (1996) mukaan 97 %. Hiukkaspäästöjen alenema johtuu täydellisemmästä palamisesta ja rikkittömyydestä (Lapuerta ym. 2005, Durán ym. 2006). Sen sijaan typen oksidien päästöt ovat 6–9 % fossiilidieseliä korkeammat. Tämän yksittäisen päästökomponentin kasvu voi estää biodieselin käytön, mikäli päästönormi sen osalta ylittyy ja muiden päästökomponenttien laskua ei oteta huomioon EY-tuomioistuimen soveltaman ekologisten hyötyjen korvausperiaatteen (Jans 2000, Lampinen 2008a) vastaisesti. On yleistä, että biodieseliä ja muita biopoltoaineita vastustetaan yksittäisen fossiilisia korkeamman päästökomponentin takia, vaikka kokonaispäästöt aleni-

sivat paljon. Kaikilla biopolttoaineilla on niille luonteenomaiset (karakteristiset) päästöt, ja kaikkien biopolttoaineiden päästöjakaumasta löytyy jokin päästökomponentti, joka on vastaavaa fossiilipolttoainetta korkeampi. Biodieselin käytön NO_x-päästöjä voidaan vähentää lisäaineilla (Drapcho ym. 2008a).

FAME-biodiesel soveltuu dieselmoottorilla varustettuihin ajoneuvoihin sellaisenaan 100 %:na (B100), tai vaatii korkeintaan hyvin pienen muutoksen ja ainakin B20 sopii joka tapauksessa kaikkiin dieselajoneuvoihin (IEA 2004). Biodiesel myös sopii fossiilidieselin jakelujärjestelmään sellaisenaan (Bomb ym. 2007). Korkean setaanilukunsa takia biodieselillä saavutetaan fossiilidieseliä korkeampi hyötysuhde (IEA 2004). Biodiesel on EU:n eniten käytetty liikennebiopolttoaine. Sitä käytettiin EU:ssa vuonna 2008 noin 8 miljoonaa öljytonnia vastaava määrä ja sen osuus kaikista biopolttoaineista oli 78,5 % (EurObserv'ER 2009). Kuluttajien tukena ovat kansainväliset ja kansalliset laatustandardit sekä laaja jakeluverkko Keski-Euroopassa, etenkin Saksassa (Kuva 3.15). Biodieselistä myydään, kuten fossiilidieselistäkin, talvella talvilaatua, joka on standardoitu kesälaadun tapaan.



Kuva 3.14. Energifabriken-yritys mainostaa biodieselii rapsipellon keskellä maantien varrella Mjölbyssä Ruotsissa. [2009]



Kuva 3.15. Biodieselin myyntipiste huoltoasemalla Sinsheimissä Saksassa. Pumpulla ilmoitetaan, että tuote on Saksan ja Euroopan biodieselstandardin mukainen sekä lisäksi, että tuote on Saksan biodieselin laatuhallintajärjestelmän mukaisesti tuotettua. [2007]

USA:ssa biodieselin tuotanto ja käyttö on huomattavasti pienimuotoisempaa kuin Euroopassa. Siellä pientuottajien valmistamaa biodieseliä myydään myös kanistereissa huoltoasemilla (Kuva 3.16). Asiakkaat voivat sitten tarvittaessa sekoittaa sitä fossiilidieseliin autonsa ominaisuuksien ja vuodenajan mukaan.



Kuva 3.16. Biodieseliä myynnissä kanistereissa huoltoasemalla Boulderissa Coloradossa. [2004]

Kehitteillä on biodieselin tuotantoprosesseja, joissa katalyyttejä vaihtamalla voidaan saavuttaa sekä suurempi tuotto että puhtaammat lopputuotteet (Bournay ym. 2005). Lisäarvoa saadaan tuottamalla biodieseliiä jätevesissä kasvaneista levistä. Nämä levät käyttävät kasvaessaan jätevesien ravinteita biomassaa ilmakehän hiilidioksidista tuottaen ja puhdistuen samalla jätevettä. On myös mahdollista käyttää voimaloiden savukaasujen hiilidioksidia levien ravinteena. Biodieselin lisäksi levistä voidaan valmistaa synteettisiä polttoaineita termisillä prosesseilla sekä biokaasua. Näissä tapauksissa voidaan käyttää myös leviä, jotka eivät sisällä triglyseridejä.

3.2.5 Muut kemiallisilla konversioilla valmistettavat biodieselpolttoaineet (FAA, FAGC ym.)

Vaihtoesteröinnin eli alkoholireaktion sijaan biodieseleitä voidaan valmistaa myös muilla kemiallisilla konversioilla. Esimerkkejä näistä on luvussa 5.3.3.

3.2.6 Emulsiopolttoaineet

Emulsiopolttoaineet tarkoittavat toisiinsa liukenemattomien yhdisteiden heterogeenisiä seoksia, joiden komponentit voivat olla esimerkiksi nestemäisiä polttoaineita, kiinteitä polttoaineita, vettä, lisäaineita ja mikrobeja. Esimerkkejä erityyppisistä emulsiopolttoaineista ovat kasviöljyt + vesi (Crookes ym. 1997), sahajauho + dieselöljy (Benter 1997), jauhettu maissi + vesi (Natarajan & Suppes 1997), kasviöljy, metanoli + vesi (Kerihuel ym. 2005) ja REE-biodiesel + mikrolevät (Scraggy ym. 2003). Emulsiopolttoaineet eivät vielä ole kaupallisesti käytössä.

3.2.7 Tärpätti ja puubentsoli (C₅H₈)_n

Tärpätti oli ensimmäinen nestemäinen polttomoottoreissa käytetty liikennepolttoaine. Tärpätti tarkoittaa puussa esiintyvien terpeenien seosta, jossa on mukana pieninä pitoisuuksina muitakin orgaanisia yhdisteitä. Terpeenit ovat yhdestä tai useammasta C₅H₈-yksiköstä koostuvia alkeeneja, joiden lämpöarvo HHV on korkea 45 MJ/kg (Klass 2004, Taulukko 3.2). Terpeeneillä on korkea puristuskestävyys, esimerkiksi eucalyptus-puun öljyllä RON on 100 (Sudo ym. 1989), joten ne soveltuvat ottomoottorien polttoaineiksi. Melvin Calvin, joka sai Nobelin palkinnon vuonna 1961 selvitettyään fotosynteesin toimintamekanismin, on kutsunut terpeeneitä tuottavia puita bensiinipuiksi (gasoline trees) koska niiden lämpöarvo on lähes sama kuin bensiinin ja korkeaktaanisina yhdisteinä ne sopivat samoihin tarkoituksiin kuin moottoribensiini (Calvin 1979). Terpeenejä tuottavia kasveja yhdessä glyseridejä tuottavien öljykasvien (dieselmoottoreihin sopivien dieselkasvien) kanssa kutsutaan myös bioraakaöljykasveiksi (petroleum plants, Nishimura 1989). Pohjoisten havupuiden tärpätin terpeenikoostumus on esitetty taulukossa 3.6. Yleisimmät havupuiden terpeenit a-pineeni, b-pineeni ja Δ³-kareeni ovat rengasrakenneisiä, josta syystä tärpätin oktaaniluku on korkea ja se soveltuu ottomoottorien polttoaineeksi. Terpeenipitoisuus puissa kasvaa kylmempiin kasvuolosuhteisiin siirryttäessä.

Taulukko 3.6. Terpeenien osuudet pohjoisen havupuiden tärpätissä (Gullichsen & Lindeberg 2000, Isotalo 1990).

Yhdiste	Osuus [p-%]
α -pineeni	50–83 %
β -pineeni	2–7 %
Δ^3 -kareeni	10–30 %
Muut monoterpeenit	2–6 %
Muut terpeenit	5–10 %

Tärpättiä on perinteisesti tuotettu puun pyrolyysillä, jolloin sitä saatiin noin 8 % puun kuivapainosta (Talvitie 1924b). Nykyään tärkeämpi tuotantotapa on talteenotto sellunvalmistuksen sivutuotteena. Sitä saadaan sellutehtaissa sulfaattikeiton yhteydessä lauhduttamalla kaasutuksella syntyneet kaasut (Gullichsen & Lindeberg 2000). Raaka-tärpätissä on epäpuhtautena myrkyllisiä ja voimakkaasti haisevia rikkiyhdisteitä kuten metyyli-sulfidi ja metyyli-merkaptani, jotka puhdistetaan pois raakatärpätin jalostamisen (tislauksen) yhteydessä. Raakatärpätille sellaisenaan on poltto sellutehtaissa ainut käyttösovellus. Osa siitä joka tapauksessa liukenee mustalipeään ja tulee joko poltetuksi tai kaasutetuksi tai vaihtoehtoisesti joutuu jäteveeten pesun yhteydessä.

Puhdistettua tärpättiä on käytetty yleisesti polttoaineena – varsinkin valaistukseen, mutta myös ottomoottoreissa – sellaisenaan ja seoksena alkoholien kanssa. Alkoholi-tärpättiseosta on USA:ssa kutsuttu kamfeeniksi (Kovarik 1998), mutta kamfeeni tarkoittaa myös yhtä terpeeneihin kuuluvaa kiinteää yhdistettä ($C_{10}H_{16}$), jota on käytetty alkoholeihin liuotettuna lamppuöljynä.

Puubentsoliksi kutsuttiin aiemmin puun pyrolyysin jälkeen tärpättitislamoilla saatavaa matalissa lämpötiloissa tislautuvaa osaa, joka soveltuu erityisen hyvin ottomoottoripolttoaineeksi (Salmenkallio 1924). Nimitys johtuu kivihiilen pyrolyysillä – vastaavasti kuin puubentsoli puun pyrolyysillä – saatavasta bentsoliksi kutsutusta ottomoottoripolttoaineesta, joka koostuu pääasiassa bentseenistä, mutta sisältää myös muita aromaattisia hiilivetyjä. Aromaattisten hiilivetyjen määrä puubentsolissa on vähäinen, mutta siinä on muita rengasrakenteisia yhdisteitä ja se sisältää hiilivetyjen lisäksi happipitoisia yhdisteitä, kuten estereitä, furaaneita ja ketoneita (Salmenkallio 1924).

Tärpätin käyttö polttoaineena on nykyisin harvinaista, vaikka sen lämpöarvo on korkea. Yleisimmät sovellukset ovat liuottimet, ohennusaineet sekä lääke- ja hajuvesiteollisuuden tuotteet.

3.2.8 Pihka ja terva

Sekä pihka että terva ovat hyvin jäykkiä nesteitä, joita voidaan laimennettuina, esim. tärpätillä, käyttää moottoreissa. Ne ovat voimakkaasti karstaa aiheuttavia eli lyhentävät moottorien huoltoväliä, joten niitä sellaisenaan ei käytetä kuin korkeintaan kriisiaikoina samoin kuin raakaöljyä ja kivihiilitervaa. EC-moottoreissa niiden käyttö on helpompaa kuin IC-moottoreissa, koska palaminen on helpompi hallita ja itse sylinteri ei karstoituu.

Ne ovat myös mahdollisia kiinteiden rakettimoottoripolttoaineiden liima-aineita. Niistä voidaan valmistaa polttomoottoreihin sopivia nestemäisiä polttoaineita, esimerkiksi tärpättiä, mutta suurin merkitys niillä on ollut voiteluaineiden valmistuksessa, sillä voiteluaineiden arvo on huomattavasti polttoaineita korkeampi (Nykänen 2000). Puun hitaalla pyrolyysillä saadaan runkopuun kuivapainosta 5-9 % ja kantojen kuivapainosta 17-19 % vedetöntä tervaa (Talvitie 1924b).

3.2.9 Mustalipeä ja sulfiittilipeä

Mustalipeä on sulfaattiselluloseprosessissa muodostuva sivutuote, joka keittimestä tullessaan sisältää vettä noin 85 % ja haihdutuksen jälkeen noin 20 % (Ekblom ym. 2003). Mustalipeän kuiva-aineesta 55–80 % on orgaanisia yhdisteitä (Vakkilainen 2000a, Häggblom & Ranta 1966, Ekblom 2003): noin puolet on ligniiniä, 5 % selluloosaa ja hemiselluloosia ja loput happoja. Loppuosa kuiva-aineesta on epäorgaanisia keittokemikaaleja, jotka otetaan talteen mustalipeän poltto- tai kaasutusprosessissa. Mustalipeän kuiva-aineen lämpöarvo HHV on 13–15 MJ/kg riippuen puulajista, puun laadusta, massan kovuudesta ja keittokemikaalien määrästä (Vakkilainen 2000a, Häggblom & Ranta 1966).

Mustalipeää tai mustalipeän orgaanista osaa ei sellaisenaan ole mielekästä käyttää polttoaineena, paitsi kriisiolosuhteissa. Mutta se sopii erinomaisesti kaasutukseen ja kaasutusperäisten liikennepolttoaineiden valmistukseen, jolloin niiden tuotannon hyötysuhde on selvästi parempi kuin suoraan puun kaasutuksen kautta on saavutettavissa. Siitä syystä on perusteltua käyttää sellutehtaissa nimenomaan mustalipeää liikennepolttoaineiden tuotantoon ja puujätteitä tehtaan höyryn ja sähkön tarpeisiin. Suomen sellutehtaista olisi sivutuotteina saatavissa mustalipeä kaasuttamalla noin puolet Suomen liikenteen energiantarpeesta. (Ekblom ym. 2003)

Sulfiittiselluloseprosessissa muodostuva jätelipeä on käytettävissä paitsi perinteiseen sulfiittisäiliön tuotantoon (119 litraa sellutonnin kohti) myös muiden liikennepolttoaineiden tuotantoon esimerkiksi kaasutuspuhdistuksen kautta kuten mustalipeäkin. Suomessa ei nykyään ole sulfiittisellutehtaita, mutta muissa maissa on ja tulevaisuudessa voi olla jälleen Suomessa.

3.2.10 Synteettiset biobensiinit

Bensiini on pääasiassa C5-C12-hiilivedyistä koostuva heterogeeninen seos. Fossiilibensiiniä vastaavia heterogeenisiä polttoaineseoksia on mahdollista valmistaa bioresursseista monella menetelmällä (Luku 5). Maailman autourheiluliiton FIA:n hallinnoimassa Formula 1 MM-sarjassa synteettisen biobensiinin käyttö alkoi vuonna 2008, jolloin polttoaineen tekniset kriteerit edellyttivät vähintään 5,75 e-% biopolttoaineosuutta vastaten EU:n biopolttoainedirektiiviä vuodelle 2010, mutta lisävaatimuksena on, että biopolttoaineiden on tultava ruokaketjun ulkopuolelta (Kuva 3.17). Tätä osuutta suunnitellaan nostettavan 10 e-%:iin eli EU:n vuoden 2020 tavoitteeseen aikaisintaan vuonna 2011. FIA:n vakioautojen maailmanmestaruussarjassa ryhdyttiin vuodesta 2009 lähtien käyttämään pelkästään synteettisiä ruokaketjun ulkopuolisia biopolttoaineita.



Kuva 3.17. Hondan maapallovärityinen 800 hv:n F1-auto mainostamassa vuoden 2007 Frankfurtin autonäyttelyssä F1-sarjassa vuonna 2008 tapahtuvaa synteettisen biobensiinin käyttöönottoa. [2007]

3.2.11 Synteettinen bionafta

Naftalla tarkoitetaan nykyään useimmiten teollisuusbensiiniä, joka alhaisen oktaanilukunsa takia ei sovi ottomoottorin polttoaineeksi. Se sopii kuitenkin lisäaineeksi esimerkiksi bioetanolin kylmäkäynnistyksen parantamiseen. Sitä voidaan valmistaa synteettisesti biomassasta.

Naftalla on tarkoitettu ja edelleen tarkoitetaan myös muunlaisia hiilivetysekoituksia. Alun perin nafta oli kaukasialaista raakaöljyä, joka sisältää paljon rengasrakenteisia sykloalkaaneja eli nafteeneja. Myöhemmin sillä nimellä on kutsuttu muitakin raakaöljyjä sekä monenlaisia raakaöljytuotteita, kuten dieselöljyä ja teollisuusbensiiniä. Se on myös tarkoittanut lamppuöljyn valmistuksessa jääneiden jätteiden ja raakaöljyn sekoitusta, jota lämmitysöljynä ja höyrykonepolttoaineena käytettiin (Forsman 1909). Eri aikakausina naftalla on siis tarkoitettu eri asioita, useimmiten kuitenkin jalostusjätettä sen jälkeen kun arvokkain osa raakaöljystä, petroli ja bensiini, on erotettu. Oletettavasti siis 1800-lu-

vulla markkinoidussa naftassa lamppuöljyn/kerosiinin/petrolin osuus oli yleensä hyvin pieni, sillä se oli silloin raakaöljyn arvokkain osa. Ja 1900-luvun alusta lähtien myös bensiinin osuus markkinoidussa naftassa oli vähäinen, sillä bensiinistä tuli ottomoottorin yleistettyä raakaöljyn arvokkain komponentti. Siten nafta oli koostumukseltaan pääasiassa dieselöljyä ja raskasta polttoöljyä. Sodan jälkeen dieselmoottorien yleistettyä dieselöljyäkään ei enää normaalisti ole kannattanut jättää naftaan, mutta toisaalta kerosiinin alhaisen hinnan takia sitä on voitu myydä naftan osana.

3.2.12 Synteettiset biokerosiinit ja biopetrolit

Kerosiini ja petroli koostuvat pääasiassa C8–C16-hiilivedyistä eli niitä saadaan raakaöljyn jalostamoissa jakotislauksessa bensiinin ja dieselöljyn välistä. Niiden alkuperäinen käyttö oli lamppuöljy, mutta 1900-luvun alussa petrolista tuli merkittävä moottoripolttoaine (Kuva 3.18) ja kerosiini eli lentopetroli otettiin suihkumoottorikäyttöön 1940-luvulla ja rakettimoottorikäyttöön 1950-luvulla.

Useimmat termiset synteettisten biopolttoaineiden kaasutukseen, suoraan nesteytykseen ja pyrolyysiin perustuvat valmistusprosessit tuottavat myös raakaöljypohjaista kerosiinia ja petroolia vastaavia heterogeenisiä nesteitä (Luku 5). Ne sopivat ensisijaisesti suihkumoottoreihin lentokoneissa, mutta myös kaasuturbiineihin laivoissa sekä rekoissa, ottomoottoreihin autoissa, rakettimoottoreihin avaruusaluksissa sekä lentokoneissa ja alhaisissa sekoitussuhteissa dieselmoottoreihin laivoissa ja autoissa.

Fossiilipetroli oli yleinen hehkukupumoottorien polttoaine sekä maamoottoreissa että veneissä (Pero 1945). Hehkukupumoottoreissa pystyttiin käyttämään myös bensiiniä, naftaa (raakaöljyä), dieselöljyä ja kasviöljyjä. Sitä on käytetty myös ottomoottoreissa erityisesti veneissä ja traktoreissa, mutta myös autoissa mm. 1970-luvun öljykriisin seurauksena.

Johtuen petrolin huonosta höyrystyvyydestä ajoneuvot käynnistetään bensiinillä ja lisäksi petroli ja syöttöilma esilämmitetään moottorin hukkalämmöllä (Juurikkala ym. 1986). Petrolin alhaisen oktaaniluvun (20–25) takia 100 %:sti petroolia käyttämään pystyvän ottomoottorin puristussuhde rajoittuu alle 8:n. Esim. Saabin ja Talbotin 1970-luvun petro-malleissa puristussuhteet olivat 7,3 ja 7,8, kun vastaavassa bensiinimallissa se oli 9,5 (Juurikkala ym. 1986). Mikäli petroolia käytetään seoksena bensiinin kanssa, puristussuhde voi olla korkeampi.



Kuva 3.18. Kerosiinia myynnissä autokäyttöön huoltoasemalla Israelissa. [1999]

3.2.13 Synteettiset biodieselit

Dieselöljy on pääasiassa C9–C20-hiilivedyistä koostuva heterogeeninen polttoaine. Synteettistä biodieseliä voidaan valmistaa samoilla menetelmillä kuin muita synteettisiä BTL-polttoaineita, siis pyrolyysillä, suoralla nesteytyksellä ja kaasutus pohjaisella FT-synteesillä (Luku 5). Suomessa on myynnissä Nesteen NExBTL-biodieseliä, joka on valmistettu pääasiassa palmuöljystä hydraamalla. Ruotsin markkinoilla on useita vuosia ollut GTL-dieseleitä, jotka on valmistettu FT-synteesillä (Kuva 3.19).



Kuva 3.19. EcoPar-FT-dieseliä käyttävä Sundsvallin kaupunkiliikenteen bussi esittelyssä Tukholman ekoautokonferenssissa. [2004]

3.2.14 Orgaaniset ja epäorgaaniset metalliyhdisteet TEL, FeO ym.

Joitakin metalliyhdisteitä käytetään polttoaineina, esimerkiksi trietyyli-alumiini ja dietyyli-sinkki rakettimootorien hypergolissa polttoaineissa ja rautaoksidi (FeO) kiinteissä rakettimoottoripolttoaineissa. Huomattavasti yleisemmin metalliyhdisteitä käytetään lisäaineina, varsinkin bensiinissä, mutta myös dieselöljyssä. Niistä suurin osa on orgaanisia yhdisteitä, mutta osa on epäorgaanisia. Suurin osa on normaaliolosuhteissa nestemäisiä, mutta osa on kiinteitä. Tärkeimpiä ovat bensiinin oktaania kohottavina lisäaineet (Owen ym. 1995). Lyijyn yhdisteet ovat selvästi yleisimpiä, mutta lyijyn toksisuuden takia niistä on luovuttu monissa maissa. Niitä käytetään kuitenkin edelleen lentokonebensiinissä ja joissakin maissa myös tieliikenteen bensiinissä. Useita orgaanisia lyijy-yhdisteitä ja niiden seoksia on käytetty. Tärkeimmät ovat:

- TEL (Tetra-Etyyli-Lyijy): $(C_2H_5)_4Pb$
- TML (Tetra-Metyyli-Lyijy): $(CH_3)_4Pb$

Myös monia muita metalleja on käytetty jo 1920-luvulla (Talvitie 1930) ja edelleen käytetään samassa tarkoituksessa. Esimerkkejä ovat:

- Mangaani: MMT (Metyyli-syklopentadienyli-Mangaani-Trikarbonyyli) eli $(CH_3C_5H_4)Mn(CO)_3$
- Rauta: rauta-pentakarbonyyli $Fe(CO)_5$ (epäorgaaninen) ja ferrosiini eli $(C_5H_5)_2Fe$ (kiinteä)
- Nikkeli: nikkelikarbonyyli $Ni(CO)_4$ (epäorgaaninen)
- Tina: tetraetyylitina $(C_2H_5)_4Sn$

Orgaaniset metalliyhdisteet ovat yleensä raakaöljypohjaisia ja niitä valmistetaan öljynjalostamoissa. Kaikki metalliyhdisteet aiheuttavat moottorissa karstoittumista ja monet metallit ovat ekotoksisia.

3.2.15 Muut orgaaniset yhdisteet

Kaikki noin 6 miljoona nyt tunnettua ja vielä suurempi joukko mahdollisia orgaanisia yhdisteitä sekä niiden seokset ovat periaatteessa mahdollisia nestemäisiä, kaasumaisia tai kiinteitä polttoaineita. Eräillä niistä on parempia moottoritekniisiä ominaisuuksia kuin normaalisti käytettävillä polttoaineilla. Monia niistä on mukana bensiinissä ja muissa seospolttoaineissa. Polttoaineiksi valikoituvat ne yhdisteet ja seokset, joita saadaan valmistettua edullisesti, hyvällä saannolla ja hyvällä hyötysuhteella. Tulevaisuudessa kehitys johtaa polttoainevaihtoehtojen laajenemiseen.

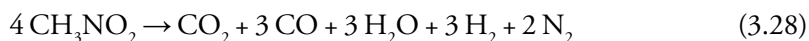
3.2.15.1 Nitrometaani ja muut nitroalkaanit CH_3-NO_2 ym.

Nitrometaani on metaanin johdannainen, jota käytetään kilpa-autoissa, kuten kiihdytyskilpailuissa (Kuva 3.20) ja radio-ohjattavissa malliajoneuvoissa johtuen sen erittäin korkeasta ominaisenergiasta ja alhaisesta ilma/pa-suhteesta (Owen ym. 1995) (Taulukko L6.5). Vaikka sen lämpöarvo ei ole korkea, suuresta hapen osuudesta (52,5 %) johtuen ilmaa tarvitaan vähän ja siten tiettyyn sylinteritilavuuteen mahtuvan polttoaineen energiamäärä ja yhden työtahdin aikana tehty työmäärä on korkea. Nitrometaanin tapauksessa se on yli kaksinkertainen bensiiniin verrattuna, vaikka lämpöarvo on vain neljäsosa. Moottorin teho voidaan siis kaksinkertaistaa vaihtamalla bensiinin tilalle nitrometaani.



Kuva 3.20. Jaska Salakarin 1500 hv:n kiihdytysmoottoripyörä, jonka polttoaineesta 85–95 % on nitrometaania ja loput metanolia. [2006]

Nitrometaani voi myös ”palaa” kokonaan ilman happea reaktioyhtälön



mukaisesti. Nitrometaanin lisäksi myös monet muut nitroalkaanit sopivat moottori-polttoaineiksi. Ainakin nitroetaania, nitropropania ja 2,2-dinitropropania on käytetty (Owen ym. 1995).

3.2.15.2 Alkaanihydratsiinit MMH, UDMH ym.

Monometyylihydratsiinia (MMH, $\text{CH}_3\text{N}_2\text{H}_3$) ja 1,1-dimetyylihydratsiinia eli epäsymmetristä dimetyylihydratsiinia (UDMH, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{N}_2\text{H}_2$) käytetään rakettimoottorien polttoaineina sekä puhtaina että seoksina muiden polttoaineiden kanssa. Jälkimmäisestä ovat esimerkkeinä (Gatland 1989):

- UH25: 75 % UDMH + 25 % hydratsiinia, esim. ESA/Ariane 4
- Aerozine 50: 50 % UDMH + 50 % hydratsiinia, esim. NASA/Titan
- Hydyne: 60 % UDMH + 40 % DETA (dietyylitriamiini), esim. NASA/Juno

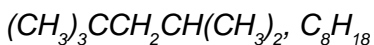
MMH oli käytössä yhdessä typpitetroksidin kanssa USA:n Gemini- ja Apollo-avaruus-alusten ohjausmoottoreissa ja nykyään esimerkiksi ESA:n Ariane 5 -raketin 2. vaiheessa (Gatland 1967, 1989). UDMH:aa ovat käyttäneet kaikki avaruusraketteja lähettäneet kansakunnat Israelia, Englantia ja Saksaa lukuun ottamatta, siis Neuvostoliitto, USA, Eurooppa (ESA), Ranska, Kiina, Japani ja Intia (Gatland 1989).

3.2.15.3 Toluenei, symeeni ja muut aromaattiset hiilivedyt

Toluenei (C_7H_8) on aromaattinen hiilivety, jonka oktaaniluku on korkea: RON 120. Sitä käytetään pääkomponenttina yksin (jopa 84 %) tai yhdessä muiden aromaattisten hiilivetyjen kanssa joissakin kilpa-autojen polttoaineissa (Owen ym. 1995). Näin on erityisesti Euroopassa ja kansainvälisissä sarjoissa, mutta USA:ssa metanoli ja etanoli ovat tärkeimmät polttoaineet. Aromaattisia on erittäin paljon myös tavallisessa bensiinissä, esimerkiksi Neste Futura 95:ssä niitä on 32 %. Tyypeä sisältävistä aromaattisista yhdisteistä ainakin aniliinia ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$) on käytetty polttoaineena rakettimoottoreissa (Sutton 2005). Se muodostaa hypergolisen polttoaineen typpihapon ja vetyperoksidin kanssa.

Toluenei ja muut aromaattiset hiilivety-polttoaineet ovat lähes aina raakaöljypohjaisia, mutta niitä voidaan valmistaa myös bioresursseista. Symeeni ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}$) on sulfittisellun valmistuksen yhteydessä syntyvä aromaattinen hiilivetyöljy, jota yleensä käytetään liuottimena, mutta joka on mahdollinen polttoaineenakin ja josta voidaan valmistaa toluenei ja muita aromaattisia polttoaineita (Pellinen & Roschier 1952). Niitä voidaan valmistaa myös sulfaattisellun sivutuotteesta täpätistä.

3.2.15.4 Iso-oktaani ja muut haaroittuneet alkaanit



Iso-oktaani eli 2,2,4-trimetyylipentaani on oktaanilukuasteikon perusyhdiste. Se on haaroittunut alkaani, jonka molemmat oktaaniluvut ovat 100 määritelmän mukaan. Iso-oktaani ja muut haaroittuneet alkaanit ovat raakaöljypohjaisia. Niitä on hyvin vähän raakaöljyssä ja tavallisessa bensiinissä, mutta niitä valmistetaan öljynjalostamoilla alkylointiprosessilla ja käytetään alkylaattibensiinissä, kuten esimerkiksi Nesteen Futura Green. Alkylaattibensiinissä korkean oktaaniluvun komponentit ovat haaroittuneita alkaaneja erotuksena tavallisista moottoribensiineistä, joissa käytetään aromaattisia yhdisteitä vastaavaan tarkoitukseen, esimerkiksi Nesteen autoilijoille tarkoittamissa bensiineissä on noin kolmasosa aromaattisia yhdisteitä. PAH:it ja muut aromaattiset hiilivety-päästöt sekä ilmaan että vesistöihin ovat huomattavan suuri ympäristöongelma johtuen niiden myrkyllisyydestä ja toksisuudesta. Se voidaan välttää poistamalla ne bensiinistä ja korvaamalla ne esimerkiksi haaroittuneilla alkaaneilla. Suomessa alkylaattibensiiniä myydään vain kanistereissa pienmoottorien käyttäjille johtuen heidän erityisen suuresta altistumisestaan pakokaasuille ja hinta on kolminkertainen tavalliseen aromaattibensiiniin verrattuna. Ruotsissa alkylaattibensiiniä myydään myös autoihin samanlaisista pumpuista kuin muita liikennepolttoaineita (Kuva 7.10), koska sen avulla kaupunki-ilman laatua voidaan parantaa aromaattibensiinin käyttöön verrattuna. Siellä hinta on vain noin 20 % korkeampi kuin aromaattibensiinin. USA:ssa sitä käytetään myös kilpa-autoissa (Owen ym. 1995).

3.2.15.5 MeTHF ja P-series-polttoaineet

Metyylitetrahydrofuraani (MeTHF) on USA:ssa vuodesta 1997 lähtien kokeiltu biopolttoaine, jota käytetään osana ns. P-series-polttoainetta. Se on vuonna 1999 virallisesti nimetty vaihtoehtoiseksi polttoaineeksi, joka sopii E85/M85-FFV-autoihin ja vastaa oktaaniluvultaan bensiiniä. P-series-polttoaineessa on noin 45 % etanolia, noin 35 % pentaania ja muita kevyitä nestemäisiä C5+-jätehiilivetyjä maakaasun puhdistuksesta sekä noin 20 % lignoselluloosapohjaista MeTHF:aa. P-series-polttoaineita ei toistaiseksi myydä yleiseen käyttöön.

MeTHF valmistetaan heikkohappohydrolyysillä lignoselluloosamateriaaleista kuten oljesta ja jätepuusta. Syynä sen käyttöön on yksinkertaisempi valmistusprosessi verrattuna sokerointiin ja sitä seuraavaan etanolifermentointiin.

3.2.15.6. Muita orgaanisia yhdisteitä

Etikkahappo (CH_3COOH) muodostuu sivutuotteena alkoholifermentaatiossa sekä puun pyrolyysissä (puuhappo), ja sitä päätyy myös kyseisillä tavoilla valmistettujen polttoaineiden joukkoon. Puun hitaassa pyrolyysissä saadaan etikkahappoa 2–4 % puun kuivapainosta (Talvitie 1924b). Sitä myös lisättiin tarkoitukselliseksi denaturoimisaineena tekniseen etanoliin 1800-luvulla (Kauppila 1988). Sen moottoriin ja polttoainejärjestelmään aiheuttaman korroosion takia sen määrää pyritään nykyään minimoimaan.

Ketoneita, erityisesti propanoni eli asetoni, esiintyy etanolissa ja gasoholissa alkoholi-hapettimien fermentaatiovalmistuksen sivutuotteina. Propanonia, metyylietyyliketonia ja metyyli-isobutyryliketonia on myös tarkoituksellisesti lisätty etanoliin denaturoimisai-neena (Kauppila 1988). Aldehydejä esiintyy polttoaineissa hiilivetyjen hapettumisen seurauksena. Krotonaldehydiä (C_4H_6O) on käytetty etanolin denaturoimisaineena (Kauppila 1988).

Orgaanisista typpiyhdisteistä DIPE:ä eli dietyylitriamiinia ($H_2N-CH_2CH_2-NH-CH_2CH_2-NH_2$) käytetään nestemäisissä rakettpolttoaineissa, esimerkiksi Hydyne, jossa on 40 % DIPE:ä ja 60 % UDMH:ta. Nitroglyseriini ($C_3H_5N_3O_9$) on nestemäinen räjähdysaine, jota käytetään kiinteissä rakettpolttoaineissa. Myös isopropyylinitraattia on kehitetty rakettpolttoaineena. Dietyyliamiinia käytetään FAA-biodieselin valmistuksessa. Pyridiiniä (C_5H_5N), joka on aromaattinen amiini, on käytetty etanolin denaturoimiseen ja varastoinnissa syntyvän etikkahapon neutraloimiseen. Trimetyyliamiinia on käytetty vastaavissa tarkoituksissa yhdessä etanolin ja etterin kanssa (Talvitie 1930).

Bensiinin oktaanilukua korottavia lisäaineita ovat esimerkiksi (Owen ym. 1995):

- Monet tyyppiä sisältävät aromaattiset yhdisteet, kuten N-metyylianiiliini (NMA) $CH_3C_6H_6N$
- Monet happea sisältävät aromaattiset yhdisteet
- Dibromoetaani BrC_2H_4Br
- Monet jodia tai seleeniä sisältävät yhdisteet

Iso-oktyylinitraattia ($C_8H_{18}-NO_2$) on käytetty dieselpolttoaineen setaanilukua korottavana lisäaineena (Owen ym. 1995).

3.2.16 Epäorgaaniset yhdisteet

Monet epäorgaaniset nesteet ovat mahdollisia polttoaineita. Useimmat niistä ovat täysin hiilivapaita eli ne eivät tuota poltossa lainkaan hiilidioksidia eikä orgaanisia yhdisteitä. Siitä syystä ne ovat ilmastonsuojelumielessä suotuisia silloinkin, kun ne ovat peräisin uusiutumattomista resursseista (ja tuotanto on tapahtunut vähäpäästöisesti).

3.2.16.1 Hydratsiini N_2H_4

Hydratsiiniä (N_2H_4) käytetään sekä rakettimootoreiden että kaasuturbiinien polttoai-neena ja myös ottomootoreilla varustetuissa kilpa-autoissa metanolin tai nitrometaanin lisäaineena pienissä pitoisuuksissa (Owen ym. 1995). Se soveltuu periaatteessa myös polttokennoihin. Sitä valmistetaan ammoniakista. Rakettimootoreissa hydratsiini toimi hypergolisten polttoaineiden osana, eli 2-komponenttisten polttoaineiden, jotka sytyvät spontaanisti, kun komponentit saatetaan kosketuksiin toistensa kanssa. Esimerkkejä ovat:

- Hydratsiini/typpihappo
- Hydratsiini/dityppitetraoksidi
- Metanoli-hydrotsiinihydraatti-seos/vetyperoksidi-vesiseos (C-Stoff/T-Stoff)
- Hydratsiini (50 %)-UDMH (50 %)-seos (Aerozine 50)/dityppitetraoksidi
- Hydratsiini (25 %)-UDMH (75 %)-seos (UH25)/dityppitetraoksidi

Hydratsiinin lisäksi hydratsiinihydraatti ja sen johdannaiset UDMH ja MMH ovat yleisiä nestemäisiä rakettpolttoaineita. Aerozine 50 on polttoaine, jossa on puolet hydratsiinia ja puolet UDMH:a. UH25:ssa on puolestaan 25 % hydratsiinia ja 75 % UDMH:ta.

Hydratsiini voidaan myös hajottaa katalyyttisesti (iridium) erittäin eksotermisissä reaktioissa vedyksi, ammoniakiksi ja typeksi. Ne voidaan polttaa, jolloin savukaasut koostuvat vesihöyrystä ja typen oksideista. Vaihtoehtoisesti syntyvät kaasut voidaan käyttää suoraan työntövoiman lähteenä, jolloin kyse on yksiosaisesta ajoaineesta (monopropellant). Tällaiset raketit ovat yleisiä avaruusalusten ohjauksessa.

Hydratsiinin kaasuturbiinisovelluksista tärkeimmät ovat apuvoimanlähteen polttoaineena toimiminen avaruussukkulussa ja joissakin lentokoneissa (Gatland 1989).

3.2.16.2 Vetyperoksidi H_2O_2

Vetyperoksidia (H_2O_2) voidaan käyttää ilman hapetinta rakettimootoreissa ja kaasuturbiineissa, kuten walterturbiini. Vetyperoksidi voidaan hajottaa katalyyttisen eksotermisen reaktion kautta korkean lämpötilan ($600\text{ }^\circ\text{C}$) vesihöyryksi ja hapeksi, joilla voidaan käyttää kaasuturbiinia, rakettimootoria tai muita moottoreita. Hajoaminen kasvattaa tilavuuden normaalipaineessa noin 1000-kertaiseksi eli vastaa 1000 barin painetta. Katalyytteinä käytetään esim. hopeaa, platinaa, kaliumpermanganaattia ($KMnO_4$) tai kalsiumpermanganaattia ($Ca(MnO_4)_2$), mutta moni muukin materiaali, kuten rauta ja kupari, voi toimia katalyyttinä. Walterturbiineissa on käytetty permanganaatteja.

Maailman ensimmäinen alun perin rakettimootorikäyttöiseksi suunniteltu lentokone saksalainen Heinkel He176, joka lensi ensi kerran vuonna 1939, oli vetyperoksidikäyttöinen. Ensimmäinen kokeilu vetyperoksidiraketilla tapahtui 1937 He76-koneen lentoonlähden apuraketina (Gatland 1989). Ensimmäinen AIP-sukellusvene vuonna 1940 oli vetyperoksidikäyttöisellä walterturbiinilla varustettu. Vetyperoksidiraketteja sovelletaan myös avaruusalusten ohjauksessa, torpedoissa ja pienissä henkilökohtaisissa lentorepissa sekä apuvoimalähteinä, esimerkiksi V2- ja Sojuz-rakettien polttoainepumpuissa.

Vetyperoksidia käytetään rakettimootoreissa myös hapettajana, mm. hypergolisisissa polttoaineissa. T-Stoff oli Saksan 2. maailmansodan aikainen rakettimootoripolttoaineen hapetin, jossa on 80 % vetyperoksidia ja 20 % vettä. Polttoaine oli metanolin ja hydratsiinin seosta (C-Stoff). Sitä käytettiin mm. Me163-lentokoneessa.

Vetyperoksidia käytetään runsaasti monissa teollisuusprosesseissa, kuten paperin valkaisuissa, yleensä alhaisissa pitoisuuksissa (30 %), jolloin valtaosa liuoksesta on vettä, eikä vaarallinen katalyyttinen kaasuuntuminen ole mahdollinen. HTP (high test peroxide) tarkoittaa korkean konsentraation (85–98 %) vetyperoksidia polttoaine- tai hapetinkäyttöön. Sen huolellisen käsittelyn välttämättömyyttä kuvaa venäläisen ydinsukellusvene Kurskin vuoden 2000 onnettomuus, jonka alkusyy oli HTP-käyttöisen harjoitustorpedon HTP-vuotoa ja sen rautakosketusta seurannut räjähdys. HTP:n etuna puolestaan on sen hajoamistuotteiden – vesi ja happi – myrkyttömyys ja suorastaan terveellisyys. Walterturbiinia käytettäessä ne on mahdollista ottaa talteen juomavedeksi ja hengityshapeksi.

3.2.16.3 Muut epäorgaaniset nesteet N_2O_4 , HNO_3 ym.

Dityypitetraoksidia eli typpitetroksidia (N_2O_4), typpihappoa (HNO_3), bromipentafluoridia (BF_3), nesteytettyä happea (LO_2) ja nesteytettyä fluoria (LF_2) on käytetty rakettimoottoreissa hapettajina sekä sellaisenaan tai komponenttina yhdessä muiden yhdisteiden kanssa. Jälkimmäisestä ovat esimerkkeinä

- IWFNA (Inhibited White Fuming Nitric Acid): on 97,5 % HNO_3 + 2 % H_2O + 0,5 % NO_x
- RFNA (Red Fuming Nitric Acid): 84 % HNO_3 + 13 % N_2O_4 + 3 % H_2O
- SV-Stoff: 94 % HNO_3 + 6 % N_2O_4
- S-Stoff: 96 % HNO_3 + 4 % rautaklorodia ($FeCl_3$)

Osalla hapettimilla on myös lämpöarvoa, joten ne toimivat myös polttoaineina. Vettä (H_2O) sisältyy moniin polttoaineisiin ja hapettimiin.

Runsasti vetyä sisältävien nestemäisten ja kiinteiden polttoaineiden uusi käyttömahdollisuus on vedyn varastointi polttokennoja varten. Esimerkkinä on rakettimoottoreissa 1950-luvuilla kokeiltu pentaboraani (B_5H_9). Nesteytettyjen kaasujen lisäksi rakettimoottoreissa on käytetty myös nesteytettyjä kiinteitä aineita, kuten nesteytetty litium (LLi).

Oktaanilukua korottavista lisäaineista nestemäisiä epäorgaanisia metalliyhdisteitä ovat rauta-pentakarbonyyli $Fe(CO)_5$ ja nikkelikarbonyyli $Ni(CO)_4$. Niissä on mukana epäorgaanista hiiltä, joten poltossa vapautuu myös hiilidioksidia. Niiden vähäisen käyttömäärän takia se ei kuitenkaan ole ongelma, mutta niiden tuotanto sen sijaan voi olla.

3.2.17 Nanotipat

Nesteiden suihkuttaminen nanotippoina on eräs nykyinen perustutkimuksen aihe, joka tulevaisuudessa voi mahdollistaa hyvin monien nesteiden, kaasujen ja kiinteiden aineiden käytön polttoaineina. Tutkimus ei toistaiseksi ole edennyt liikennepolttoainesovellutuksien tarkasteluun.

3.3 KAASUMAISET LIIKENNEPOLTTOAINEET

Kaasumaiset polttoaineet tarjoavat parhaimman saatavissa olevan hyötysuhteen kaikissa polttoprosesseissa johtuen polttoaineen ja polttoilman parhaasta mahdollisesta sekoittumisesta. Yleisimmät liikennekäytössä olevat moottorit otto-moottorit polttavat kaasuja eli nestemäiset polttoaineet pitää kaasuttaa (tai vähintään muuttaa aerosoleiksi) ennen polttoa. Kaasutinta ei tarvita, mikäli polttoaine on jo valmiiksi kaasumainen. Moottoriteknisesti siis ottomoottorit sopivat parhaiten kaasumaisille polttoaineille.

3.3.1 Vety H_2

Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine, joka vastaa noin 75 %:sta maailmankaikkeuden massasta ja 90 %:sta maailmankaikkeuden molekyyleistä. Kiinnostus vedyn käyttöön energijärjestelmässä johtuu yleisyyden lisäksi sen korkeasta lämpöarvosta, sen

käytön päästöjen alhaisuudesta ja mahdollisuudesta käyttää sitä Jules Vernen (1874) ensimmäisenä ideoiman tulevaisuuden vetytalouden energiavarastona ja energian siirtäjänä.

Vedyn energiasisältö massayksikköä kohti on kaikista kemiallisista polttoaineista korkein, mistä syystä se on valittu suurimpien avaruusrakettien polttoaineeksi. Vedyn teollinen lämpöarvo (LHV) on 120 MJ/kg eli lähes kolminkertainen öljyyn verrattuna (42 MJ/kg) ja yli kaksinkertainen metaaniin verrattuna (50 MJ/kg). Matalan lämpötilan polttokennoilla (Kuva 3.21) voidaan hyödyntää vedyn koko stoikiometrinen eli ylempi lämpöarvo (HHV = high heating value), joka on 142 MJ/kg. Siis vedyn energiakäytössä voidaan käyttää oletusarvona HHV:tä, kun muiden kemiallisten polttoaineiden energiakäytössä joudutaan käyttämään LHV:a. Vetykilon energiasisältö vastaa matalalämpötila-polttokennokäytössä, esimerkiksi ajoneuvokäytössä, siis noin 4,3 bensiinilitraa.



Kuva 3.21. Ford FCV -polttokennoauto vuosimallia 2004 Tukholman ekokonferenssin näyttelyssä. [2004]

Vapaata kaasumaista primäärivetyä muodostuu luonnossa jatkuvasti suuria määriä sekä geosfäärissä että biosfäärissä: mm. ihmisten paksusuolella sitä syntyy Suomessa 38 tonnia eli miljoonan henkilöautokilometriin riittävä määrä. Vety on yksi yleisimmistä orgaanisten yhdisteiden hajoamistuotteista luonnossa hydrogenaasientsyymien katalysoiman mikrobien aineenvaihdunnan tuloksena (Kodama & Igarashi 1989). Suurin osa vedystä sitoutuu uudelleen kemiallisesti, mm. metanogeneenin kautta metaanin muodostukseen, ja osa karkaa avaruuteen. Vuotuinen luonnollinen vetykaasun emissio maanpinnalta avaruuteen on noin 30 Mt (Na Trompme ym. 2003), joka vastaa 100 Mtoe:n energiamäärää.

Vedyn luonnollinen emissio on erittäin hajautettua, joten sen käyttömahdollisuudet primäärienergiana ovat vähäiset. Potentiali ei kuitenkaan ole nolla, sillä geotermisten voimaloiden porauskaivoista saadaan monien muiden kaasujen ja nesteiden lisäksi vetyä, joka on periaatteessa erotettavissa, mutta joka toistaiseksi on päästetty ilmakehään. Esi-

merkiksi Islannissa on arvioitu kymmenistä kaivoista tulevan kustakin vuodessa primäärienergiavetyä noin kolmen vetybussin tarpeiden verran (Sigfusson 2003) ja sen käyttöönottomahdollisuuksia tutkitaan. Tämä geovety on eräs uusiutuvan primäärienergian muoto. Lisäksi muitakin potentiaalisesti hyödynnettäviä luonnollisia vetylähteitä saattaa löytyä.

Käytännössä vety on lähes aina sekundäärienergiamuoto kuten bensiini, dieselöljy, sähkö, kaukolämpö ja teollisuushöyry. Vety voi korvata muita sekundäärienergiamuotoja, erityisesti sähköä ja perinteisiä liikennepolttoaineita. Mikäli vety tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla, sen avulla voidaan toteuttaa globaalisti 100 %:sti uusiutuvilla energialähteillä toimiva yhteiskunta, koska se voi toimia keskeytyvän uusiutuvan energian tuotannon varastona ja siten se sallii tarvittaessa suuren kyseisen energiantuotannon osuuden. Mikäli vetytalouden vety tuotetaan fossiililla polttoaineilla kuten maakaasulla, merkittävää muutosta elinkaaripäästöissä ei voida saavuttaa, joten tällaiseen vetytalouteen siirtyminen ei edusta merkityksellistä edistystä nykyiseen tilanteeseen verrattuna.

Vetypolttoaineen etuja ovat mm.:

- Vedyllä on kemiallisista polttoaineista suurin energiasisältö massayksikköä kohden.
- Vety leviää nopeasti ilmassa, mikä vähentää räjähdysvaaraa.
- Vetyä voidaan siirtää turvallisesti putkistoissa.
- Vety on myrkytön.
- Vetyä on helpompi varastoida kuin sähköä.
- Vedyn polttokennokäytön päästönä on pelkkä vesihöyry.

Haittoja ovat mm.:

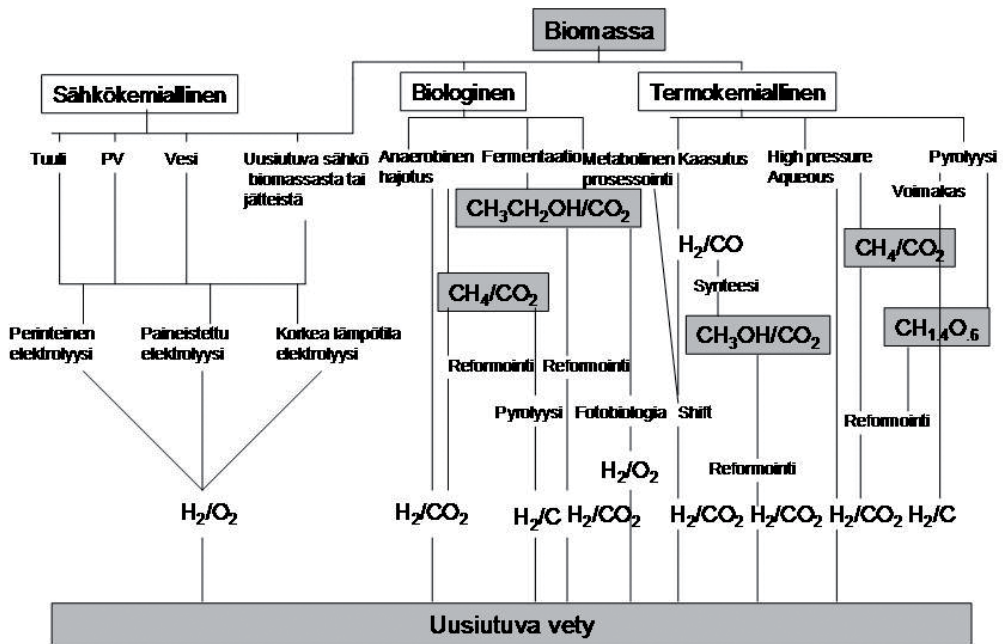
- Vedyllä on alhainen energiasisältö tilavuusyksikköä kohden.
- Vedyllä on laaja syttyvyysalue ja se palaa alhaisissa pitoisuuksissa.
- Korkean paineen tai alhaisen lämpötilan vuoksi vetyä on vaikeampi varastoida kuin muita kaasumaisia tai nestemäisiä polttoaineita.

Vetyä tuotetaan nykyään suuressa mittakaavassa kaupallisesti. Globaali vuosituotantomäärä on noin 500 miljardia normaalikuutiometriä eli noin 40 Mt (Taulukko 3.7) Se vastaa energiasisällöltään 5,7 EJ eli 38 % EU:n liikenteen energiankulutuksesta (Taulukko L7.2). Tuotanto tapahtuu pääasiassa öljynjalostamoissa ja lannoiteteollisuudessa. Esimerkiksi USA:ssa noin 1 % primäärienergian kulutuksesta käytetään vedyn valmistukseen ja tuotantomäärä on 9 Mt vastaten 30 Mtoe:n energiasisältöä. USA:ssa 95 % vedystä tehdään maakaasusta höyryreformoinnilla. Biomassaperäisen ja muun uusiutuvan (elektrolyysin ym. kautta) vedyn osuus on nykyään erittäin pieni.

Taulukko 3.7. Maailman ja Euroopan vedyntuotannon rakenne (Kohler 2003, DOE 2004).

Raaka-aine	Maailma [10 ⁹ Nm ³ /a] (Osuus [%])	Eurooppa Osuus [%]
Maakaasu	240 (48)	} 94
Öljy	150 (30)	
Kivihiili	90 (18)	
Elektrolyysi	20 (4)	6
Biomassa	–	<< 1
Yhteensä	500 (100)	100

On kuitenkin olemassa hyvin suuri määrä menetelmiä vedyn tuottamiseksi uusiutuvilla energialähteillä tai uusiutuvista energianlähteistä (Kuva 3.22).



Kuva 3.22. UE-vedyn tuotantomenetelmiä. Varastoitavat välimuodot on laatikoitu (muokattu: Milne ym. 2001).

Suurin osa niistä perustuu bioenergiaan, jolloin tuotetta voidaan kutsua biovedyksi (Taulukko 3.8).

Taulukko 3.8. Bioenergiaan perustuvia vedyn tuotantomenetelmiä.

Tuotantotapa	Mekanismi
Sähkökemialliset	• Elektrolyysi bioenergialla tuotetulla sähköllä
Biologiset	• Pimeäfermentaatio (happofermentaatio) • Biokaasun höyryreformointi • Biokaasun osittaishapetus • Biokaasun pyrolyysi • Alkoholifermentaatio (alkoholikäyminen) ja sen jälkeinen reformointi • Biofotolyysi (fotobiologinen) eli metabolinen vedyntuotanto auringonvalolla • Mikrobiologinen elektrolyysi
Lämpökemialliset	• Kaasutus • Synteettisen biometaanin höyryreformointi • Synteetisikaasusta tuotettujen polttoaineiden osittaishapetus ja reformointi • Biojätteen korkeapaineinen kaasutus ja osittaishapetus • Pyrolyysi suoraan vedyksi tai reformoinnin kautta
Fotokemialliset	• Fotodekompositio eli biomassan hajottaminen auringonvalolla

Muita kuin bioenergiaan perustuvia vedyn tuotantomenetelmiä ovat elektrolyysituotanto UE-sähköllä sekä suora veden hajotus aurinkoenergialla (Taulukko 3.9). Myös fotobiologinen prosessi sopisi tähän, koska se perustuu auringon valoon. Mutta kuten IEA tekee (Kuva 3.22), niin myös tässä se luokitellaan biologiseksi energiamuodoksi. Lisäksi primäärinen geovety täyttää uusiutuvuuden vaatimukset. UE-vetyyn voidaan mahdollisesti myös rinnastaa teollisuuden sivutuotteina muodostuvan vedyn käyttö. Lähteitä ovat mm. metsä-, metalli- ja petrokemian teollisuus.

Taulukko 3.9. Muihin kuin bioenergiaan perustuvia UE-vedyn tuotantomenetelmiä.

Tuotantotapa	Mekanismi
Primäärivety sellaisenaan	• Geovedyn pumppaus
Sähkökemialliset	• Elektrolyysi UE-sähköllä, siis mm. vesivoima, tuulivoima, geoterminen voima, aurinkovoima, vuorovesivoima ja aaltovoima • Mikrobiologinen elektrolyysi UE-sähköllä • Magnetolyysi (elektrolyysi, jossa potentiaali synnytetään magneettisella induktiolla) UE-sähköllä
Lämpökemialliset (veden tai höyryn hajotus aurinko- tai geotermisellä lämmöllä tai UE-sähköllä)	• Termolyysi (terminen hajottaminen) • Termokatalyyysi (katalyyttien avulla tapahtuva terminen hajottaminen) • Plasmolyysi (plasman avulla tapahtuva hajottaminen) • Radiolyysi (radioaaltoin/mikroaaltoin tapahtuva hajottaminen) • Höyry-rauta-prosessi
Fotokemialliset (veden hajotus auringon valo- ja UV-säteilyllä)	• Fotelektrokemiallinen (metallikatalyyttien avulla) • Fotokatalyyysi (puolijohdekatalyyttien avulla)

Vety sopii lähes kaikkien lämpövoimakoneiden ja polttokennojen polttoaineeksi. Vety tankataan autoihin yleensä kompressoidussa muodossa (LH). Kuva 3.23. esittää ensimmäistä yleiselle huoltoasemalle (joka tarjoaa tavanomaisiakin polttoaineita) liitettyä kompressoidun vedyn tankkausasemaa, joka avattiin Reykjavikissa vuonna 2003. Sitä ennen yleisiä vetyasemia oli vain kylmäasemina ja useimmiten erillään muiden polttoaineiden jakelusta. Vetyä voidaan käyttää 100 %:na tai polttomoottorikäytössä myös sekoituksena metaanin ja nestekaasun kanssa.



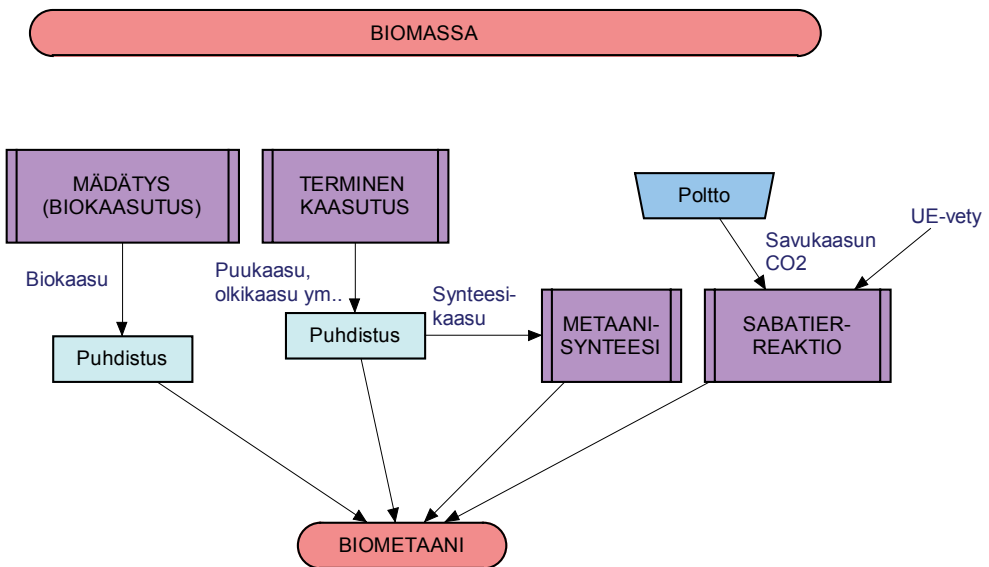
Kuva 3.23. Maailman ensimmäisen huoltoasemaketjun tavanomaisella lämminasemalla olevan vetytankkauspisteen avajaiset vuonna 2003 Reykjavikissa. Vety tuotetaan asemalla vesijohtovedestä elektrolyysillä geotermisen ja vesivoiman avulla. [2003]

Nesteytetty vety (LH) on nykyään tärkein avaruusrakettien polttoaine. Se on käytössä mm. avaruussukkulan päämoottoreissa, ESan ja ArianeSpacen Ariane-raketeissa ja kaikkein uusimmassa kaupallisia laukaisupalveluja tarjoavassa Japanin H-IIA-raketissa. Nesteytettyä vetyä käytetään myös BMW:n polttomoottorilla varustetuissa vetyautoissa.

Vetyä löytyy maapallon lisäksi muilta planeetoilta, planeettojen välisestä avaruudesta ja jopa tähtien välisestä avaruudesta. Bussard (1960) on esittänyt mahdollisuuden tähtien välisen vedyn, jonka tiheys on keskimäärin 1 atomi/cm³ käyttöön ramjet-suihkumoottorissa.

3.3.2 Metaani, biokaasu ja SBG CH₄

Metaanin ominaisuuksia on koottu liitteen 6 taulukkoon L6.9 ja biometaanin valmistustapoja kuvaan 3.24. Biometaanin yleisin valmistustapa on mädätys, jota myös hapofermentaatioksi, anaerobiseksi hajotukseksi ja biokaasutukseksi kutsutaan. Se tuottaa biokaasua (BG) mikrobin aineenvaihdunnan tuloksena. Biokaasureaktoreissa tuotetussa biokaasussa metaania on 55–85 % loppuosan ollessa pääasiassa hiilidioksidia. Kaatopaikoilta kerätystä kaatopaikkakaasussa metaanin osuus on alempi, noin 40–50 %, koska keräyksen yhteydessä kaatopaikkakaasuun sekoittuu merkittävä määrä ilmaa.



Kuva 3.24. Biometaanin valmistustapoja. Lisäksi metaania saadaan sivutuotteena muissa kaasutukseen pohjautuvissa synteesissä kuten Fischer-Tropsch-synteesissä sekä kaasutusvetyä Haber-Bosch-synteesiin valmistettaessa.

Metaania voidaan valmistaa hiilidioksidista nikkelin, alumiinin tai ruteniumin katalysoimalla endotermisellä Sabatier-reaktiolla



Sen avulla metaania voidaan käyttää vedyn varastona ja toteuttaa hiilidioksidinielu kuten esimerkiksi Islannin vetytaloushankkeessa suunnitellaan. Siellä hiilidioksidi olisi peräisin metalliteollisuuden karkaavista päästöistä eli ei fossiilisista polttoaineista. Vastaava olisi mahdollista Suomessakin, mutta täällä hiilidioksidi voisi olla peräisin myös bioenergiaa käyttävästä voimalasta. Useimmiten kuitenkin Sabatier-reaktiota ajatellaan käytettäväksi fossiilivoimaloiden hiilidioksidilla (Paul & Pradier 1994). Tällainen on päästötaseen kannalta mielekästä vain, jos vety on tuotettu ilman hiilidioksidipäästöjä. Oma lukunsa ovat avaruussovellukset, jolloin tätä reaktiota voidaan käyttää sekä avaruusaluksissa että taivaankappaleilla, joiden kaasukehässä on hiilidioksidia, esimerkiksi Marsissa.

Metaanisynteesi-nimeä tai metanointi-nimeä käytetään yleensä synteesikaasupohjaisen termisen metaanin synteesistä, joka on myöskin Paul Sabatierin ensimmäisenä osoittama:



Metaanisynteesiä käytetään myös hiilimonoksidin poistomenetelmänä kaasutusvedyn tuotannossa esimerkiksi polttokennoihin, jolloin vältytään hiilimonoksidin myrkytysvaikutukselta polttokennossa (Dagle ym. 2007) ja ammoniakkin tuotannossa, jolloin vältytään hiilidioksidin myrkytysvaikutukselta Haber-Bosch-synteesin katalyyteissä (Moulijn ym. 2001).

Uusin metaanin valmistusmenetelmä on vuonna 2008 laboratoriossa demonstroitu mikrobiologinen elektrolyysi (Luku 5.2.5), jossa metaania valmistetaan sähkön avulla hiilidioksidista ja protonista (Cheng ym. 2009). Se tarkoittaa, että metaania voidaan valmistaa millä tahansa tavalla tuotetulla UE-sähköllä, joten tuotettua polttoainetta voidaan kutsua biometaanin sijaan UE-metaaniksi. Samoin Sabatier-reaktiolla UE-vedyn avulla tuotettu metaani on luontevammin UE-metaania kuin biometaania.

Metaanin yksihiielisyyden perussyynä siihen, että se palaa puhtaammin kuin mikään muu kemiallinen polttoaine vetyä lukuun ottamatta. Terveydelle vaarallisimpia aromaattisia kaasuja ei muodostu lainkaan ja muitakin orgaanisia kaasuja sekä hiukkaspäästöjä hyvin vähän. Nestemäisten polttoaineiden palamisprosessiin verrattuna polttoaineen ja ilman sekoittuminen on metaaninpoltossa paljon parempi, joten muitakaan epätäydellisiä palamistuotteita kuten hiilimonoksidia ei tule yhtä paljon ja hyötysuhde on saatavissa korkeammaksi. Poltossa syntyy erittäin vähän rikkidioksidia, koska rikkivety on helppo puhdistaa biokaasusta ja niin tehdäänkin aina. Taulukko 3.10:ssä on listattu tärkeimpien päästöjen vähenemät liikennekäytössä biokaasuun siirryttäessä. Koska biokaasu on uusiutuva energianlähde, sen polttamisesta aiheutuvaa hiilidioksidia ei lasketa mukaan kasvihuonekaasupäästöihin.

Taulukko 3.10. Biokaasumetaania käyttävien bussien ja henkilöautojen päästövähennykset ajoneuvokilometriä kohti verrattuna EURO4-normin mukaisiin diesel-busseihin sekä diesel- ja bensiiniautoihin kaupunkiliikenteessä (Lampinen 2003). Merkki ”>” tarkoittaa, että vähenemä on suurempi kuin esitetty lukuarvo.

Päästölaaji	Bussi: dieselistä biokaasuun (otto)	Auto: dieselistä biokaasuun (otto)	Auto: bensiinista biokaasuun (otto)
Kasvihuonekaasut (CO ₂ , CH ₄ ja N ₂ O)	>-96%	>-95%	>-96%
Pienhiukkaset PM 2,5	-94%	-99,9%	-66%
SO ₂	>-98%	>-99%	>-98%
NO _x	-39%	-88%	-57%
NMVOC	-70%	-33%	-79%
Meluintensiteetti	-50%	-50%	

Metaania voidaan käyttää varta vasten sitä varten rakennetuissa ajoneuvoissa (Kuva 3.25), vaihtamalla ajoneuvon moottori kaasumoottoriksi tai konvertoimalla bensiiniä tai dieseliä käyttäviä ajoneuvoja. Aina 1980-luvulle asti kaikki metaanikäyttöiset auto-moottorit olivat jälkikonvertoituja. MAN ja MB toivat ensimmäisenä tehdasvalmisteiset bussi- ja rekkamoottorit markkinoille 1980-luvun lopulla (Stephenson 1991). BMW toi metaanimoottorit ensimmäisenä markkinoille tehdasvalmisteisissa henkilöautoissa (316g ja 518g) vuonna 1995.



Kuva 3.25. Suomen ensimmäinen ja toistaiseksi ainut biokaasutaksi Juha Kalmari toimistonsa edessä Laukaassa. Auto on tehdasvalmisteinen bifuel-auto VW Caddy Ecofuel. [2009]

Bensiinimoottorin konvertointi on helpointa toteuttaa joko pelkästään metaanikäytölle tai sekä metaanin että bensiinin käyttöön pystyväksi bifuel-moottoriksi. Tämä on mahdollista otto-moottoreissa ja muissakin kipinäsytytteisissä moottoreissa, kuten wankel. Maakaasukäytössä ottomoottorin puristussuhteen voi nostaa tasolle 15:1 johtuen metaanin korkeasta oktaaniluvusta 130 (Stephenson 1991). Biokaasun oktaaniluku on maakaasua korkeampi, jopa 150. Biokaasulla puristussuhteen voi nostaa jopa tasolle 18:1, joka on tavallisen bussidieselmoottorin puristussuhde, ja siten dieselmoottorista konvertoitaessa puristussuhteen alentaminen ei ole välttämätöntä. Tämä tarjoaa bensiinimoottoreita korkeamman hyötysuhteen, koska bensiinikäyttöisten moottoreiden tyypillinen puristussuhde on vain 10:1 ja korkein mahdollinen on 12:1. Moottorin käyttöiän pidentämiseksi korkeimpia toimivia puristussuhteita ei yleensä käytetä, joten useimmissa ahtamattomissa moottoreissa arvona on 12–14:1 (Stephenson 1991). Se merkitsee tehon ja hyötysuhteen laskua alkuperäiseen dieselmoottoriin verrattuna, mutta vääntö tyypillisellä käyttöalueella voi kasvaa, koska metaanin käyttö ei aiheuta savutusongelmia, joiden johdosta dieselautoissa joudutaan käyttämään 25 % ilmaylimäärää (Stephenson 1991).

Bifuel-ajoneuvossa puristussuhde joudutaan jättämään bensiinin vaatimusten mukaiseksi. Metaani palaa hitaammin kuin bensiini, joten bi-fuel autoissa sytytystä säädetään aikaisemmaksi metaania käytettäessä. Puukaasulle tilanne on sama.

Diesel-moottori voidaan konvertoida korkeapuristeiseksi ottomoottoriksi tai dual-fuel-dieselmoottoriksi, jolloin moottorin sytytys tehdään nestemäisellä dieselpolttoaineella (kuten biodiesel ja kasviöljy) ja ilman sijaan puristetaan metaanin ja ilman seosta. Tällaisessa autossa korkeintaan 90 % energiasta saadaan metaanista ja loppu nestemäisestä polttoaineesta. Aivan pienimmissä moottoreissa, joita esimerkiksi mopoissa voitaisiin käyttää, metaanin osuus voi pudota 50 %:iin ja suurimmissa laivamoottoreissa metaanin osuus voi nousta 99 %:iin. Usein dual-fuel-konversio tehdään siten, että jää edelleen mahdollisuus myös käyttää pelkästään nestemäistä polttoainetta (Stephenson 1991). Jälkiasennettuja dual-fuel-dieseleitä käytetään esimerkiksi Scanian rekoissa Ruotsissa (Hansson 2007). Dual-fuel-moottorissa voidaan käyttää normaalia dieselmoottorien puristussuhdetta 18:1. Maakaasu mahdollistaa ottomoottorissa bensiiniin verrattuna 15 % korkeamman hyötysuhteen (Ingersoll 1996) ja biokaasu vielä hieman enemmän. Metaania voidaan käyttää sellaisenaan eli suorasuihkutuksella dieselmoottoreissa, jolloin kompressiosuhde on noin 23:1 (Vermet & Ferrone 1995). Ensimmäisenä tämän teknologian, joka mahdollistaa suurimman polttomoottorilla saavutettavissa olevan hyötysuhteen, toi markkinoille Isuzu vuonna 2003 Elf CNG DI -pakettiautossa.

Metaanin tankkaus tapahtuu joko hidastankkaus- tai nopeatankkausjärjestelmällä. Hidastankkauksessa kompressoidaan tankkauksen yhteydessä eli välivarastoa ei ole. Nopeatankkausjärjestelmässä käytetään korkeapaineista kaasuvälikamaria, jonka paine on yleensä 250–400 bar. Kompressorikapasiteetti vaihtelee yleensä välillä 3–600 Nm³/h (Stephenson 1991). Kompressorit ovat yleensä sähkökäyttöisiä, mutta myös metaanilla toimivia käytetään (Stephenson 1991). Metaanin tankkausjärjestelmät mittaavat joko tilavuutta (Nm³) tai massaa (kg).

Metaanikäyttö vähentää moottorin kulumista bensiinin ja dieselin käyttöön verrattuna (Stephenson 1991). Huoltokulut metaanikäyttöisellä kalustolla eivät ole korkeammat kuin bensiini- ja dieselkalustolla (Stephenson 1991).

Metaani soveltuu myös kaasuturbiinajoneuvokäyttöön, suihkumoottoreihin ja rakettimoottoreihin (Kuva 3.26). Nesteytettyä metaania (LCH₄/LO₂) käytettiin ensimmäisen kerran Johannes Winklerin koerakettimoottorissa vuonna 1931 ja se oli ensimmäinen nestemäisellä polttoaineella kulkevan raketin lennätys Euroopassa (Gatland 1989).



Kuva 3.26. Nesteytettyä metaania käyttänyt rakettimoottoriauto “Blue Flame” oli ensimmäinen auto, joka ylitti 1000 km/h nopeuden, vuonna 1970. Se on nykyään esillä Sinsheimin auto- ja tekniikkamuseossa Saksassa. [2007]

Nesteytettyä metaania (yleensä LNG) on käytetty liikennepolttoaineena 1970-luvulta lähtien erityisesti LNG-rahtilaivoissa, rekoissa, junissa ja busseissa, mutta myös suihkumoottoreissa lentoliikenteessä ja rakettimoottoreissa avaruusliikenteessä (Lampinen 2008a). Se on esimerkiksi USA:ssa paljon käytettyä, kypsää ja standardoitua teknologiaa (Bechtold 1997). Nesteytetty metaani on erityisen puhdasta ja rikkiyhdisteet ja metaani raskaammat orgaaniset yhdisteet, joita biokaasussa on vähän, mutta maakaasussa paljon, puuttuvat. Nesteytetyn metaanin tiheys on 400 kg/m³ eli 2,8-kertainen 200 barin paineistetun metaanin tiheyteen 144 kg/m³ verrattuna, joten varastointitilan tarve pienenee vastaavasti. Nesteytettyä metaania käytetään joskus varastona silloinkin, kun tankataan vain paineistettua metaania. Tätä kutsutaan joskus LCNG/LCBG-järjestelmäksi (Kuva 3.27).

Moderni metaaniraketin sovellus on EADS Astrium -yhtiön suunnittelema Spaceplaneturistiavaruusalus, jossa on heidän suunnittelemansa ja rakentamansa LCH₄-LO₂-rakettimoottori ja 2 turbojet-suihkumoottoria (Belfiore 2007). Suihkumoottoreilla lennetään 12 km korkeuteen, jonka jälkeen käytetään rakettimoottoria ja maahan palataan jälleen suihkumoottoreilla. Nestemetaani voi olla LBG:tä, LNG:tä tai niiden sekoitusta. EADS Astrium teknisen johtajan Robert Lainéen (2007) mukaan heidän kehittämänsä metaanimoottorin käyttökokemukset ovat erittäin hyvät ja tarkoituksena on kaupallistaa se erillisenä tuotteena avaruustutkimuskäyttöön myytäväksi. Metaani häviää jonkin verran tehoissa vedylle, jota EADS Astrium käyttää Ariane 5 –raketeissaan, mutta on paljon helpompi käsitellä. Lainéen (2007) mukaan EADS Astrium olisi kiinnostunut käyttämään metaania myös Spaceplanen suihkumoottoreissa, mutta he eivät itse rakenna suihkumoottoreita. Tällä hetkellä metaanisuihkumoottoreita ei valmisteta kaupallisesti, mutta lentokoneiden päästöjen vähentämistä koskevat vaatimukset ja päästökauppa todennäköisesti tuovat ne markkinoille.



Kuva 3.27. AGA:n LCBG-tankkausasema rakenteilla Sundsvallissa Ruotsissa Preemin bensa-ase-
man yhteyteen. LBG pumpataan korkeasta varastotankista (A) höyrytimen (B) kautta punaisiin
CBG-välivarastopulloihin (C), josta kaasu saadaan autoihin Preemin tankkauspistoolin kautta.
[2009]

NASAn kehitteillä olevassa Orion-avaruusaluksessa, joka vuodesta 2015 alkaen korvaa
avaruussukkulat käytetään ohjauksrakettimoottoreissa kompressoitua metaania ja happea,
koska ne ovat myrkyttömiä päinvastoin kuin aiempien miehitettyjen avaruusalusten oh-
jauksrakettimoottorien polttoaineet, esimerkiksi avaruussukkulun hydratsiini. Tämä tek-
nologia siirretään vuonna 2001 lakkautetusta X-33-avaruusalusprojektista, jota varten se
oli kehitetty ja josta oli saatu myönteisiä kokemuksia. (Dingell 2007)

3.3.3 Hytaani $\text{CH}_4 + \text{H}_2$

Hytaani tarkoittaa vedyn ja metaanin seosta, jota voidaan käyttää metaanille suunni-
telluissa ajoneuvoissa ilman muutoksia. Vetyä voi olla jopa 20 %, mutta kaikki alem-
mat pitoisuudet ovat myös mahdollisia. Se on kaupallisesti tarjolla olevaa polttoainetta
esimerkiksi Kaliforniassa (Kuva 3.28). Hytaani mahdollistaa 5 % hyötysuhteen noston
kaasumoottorissa puhtaaseen metaaniin verrattuna (Ingersoll 1996).

Autoja voidaan valmistaa myös korkeampia vetyn osuuksia varten (Kuva 3.29).



Kuva 3.28. Kaupallinen hytaanin tankkausasema Davisissä Kaliforniassa. Samalla asemalla on tarjolla myös vetyä ja metaania. [2004]



Kuva 3.29. Hytaanikäyttöinen Panda Aria Frankfurtin autonäyttelyssä. Se hyväksyy korkeintaan 30 e-% vetyä. [2007]

3.3.4 Hiilimonoksidi CO

Hiilimonoksidi on tärkeä osa kaasutuksella tuotettua kaasua, yhdessä vedyn ja metaanin kanssa. Hiilimonoksidia saadaan sivutuotteena, kun vety erotetaan kaasutuksella tuotetusta kaasusta. Tällöin se käytetään prosessin energianlähteenä tai muuten paikallisesti. Sitä saadaan myös vesi- ja ilmakaasusta. Alhaisen lämpöarvon johdosta pelkkää hiilimonoksidia ei varastoida eikä käytetä liikenteessä, vaikka teknisesti se olisi mahdollista.

3.3.5 Tuotekaasu, kaupunkikaasu, valokaasu, generaattorikaasu, puukaasu ja olkikaasu

Termisellä kaasutuksella tuotettua kaasua nimitetään tuotekaasuksi silloin, kun tuotanto tehdään hajautetusti suoraan kulutuskohteessa, ja kaupunkikaasuksi silloin, kun tuotanto on keskitettyä ja kaasu toimitetaan verkon kautta kuluttajille. Puukaasu ja olkikaasu ovat esimerkkejä resurssin mukaan nimeämisestä ja valokaasu kulutuskohteen mukaan

nimeämisestä. Kaikki nämä kaasut ovat kemiallisesti lähes samanlaisia pääenergiakomponentteina hiilimonoksidi, vety ja metaani ja muina energiakomponentteina hiilivetyjä ja muitakin orgaanisia yhdisteitä pieninä pitoisuuksina. Lisäksi mukana on runsaasti typpeä, hiilidioksidia ja vesihöyryä, joilla ei ole lämpöarvoa. Epäpuhtautena mukana on hiukkasia ja rikkiyhdisteitä. Kaasun koostumukseen vaikuttaa sekä käytetty resurssi että teknologia. Alhaisessa lämpötilassa kaasutettaessa metaanin osuus on suuri ja vedyn pieni; korkeassa lämpötilassa kaasutettaessa vedyn osuus on suuri ja metaanin pieni. Puukaasun tyypillinen koostumus on (Parmala 1980b):

Energiakaasut:

- Hiilimonoksidi (CO): 17–22 t-%
- Vety (H₂): 16–20 t-%
- Metaani (CH₄): 2–3 t-%
- Muut hiilivedyt (C_nH_m): 0,2–0,4 t-%

Inertit kaasut:

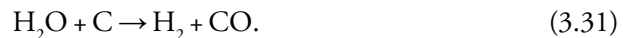
- Typpi (N₂): 45–50 t-%
- Hiilidioksidi (CO₂): 10–15 t-%

Inerttien kaasujen suuren osuuden vuoksi puukaasun lämpöarvo on alhainen. Typpeä ei kuitenkaan ole kaasussa, mikäli kaasutus tehdään hapella ilman sijaan.

3.3.6 Vesikaasu, ilmakaasu, voimakaasu ja masuunikaasu

Johdettaessa ilmaa kuuman puuhiilikerroksen läpi saadaan pääasiassa hiilimonoksidia ja typpeä sisältävää kaasua, jonka polttoarvo on alhainen. Ilmakaasua on kuitenkin käytetty stationäärisissä moottoreissa (Pero 1945).

Kun puuhiilikerroksen läpi johdetaan ilman sijaan vesihöyryä saadaan vesikaasua, joka koostuu pääasiassa hiilimonoksidista ja vedystä:



Pääkomponentit ja epäpuhtaudet ovat samat kuin tuote- ja kaupunkikaasussa, mutta metaania ja muita hiilivetyjä on paljon vähemmän. Voimakaasuksi on nimitetty vesi- ja ilmakaasun seosta, joka valmistetaan johtamalla kuuman puuhiilikerroksen läpi sekä vesihöyryä että ilmaa (Talvitie 1930).

Masuunikaasu on pääasiassa hiilimonoksidia, hiilidioksidia ja typpeä sisältävä kaasu, jota muodostuu raudanvalmistuksen yhteydessä ja joka käytetään raudanvalmistusprosessin polttoaineena. Kun raudan pelkistys tehdään puuhiilellä, kuten Suomessa 1800-luvulla ja edelleen joissakin maailman maissa, muodostuva masuunikaasu on biopolttoaine; useimmissa tehtaissa pelkistys tehdään koksilla, jolloin masuunikaasu on fossiilinen polttoaine.

3.3.7 Synteesikaasu CO + H₂

Synteesikaasu on hiilimonoksidin ja vedyn seos, joka valmistetaan tuotekaasusta, vesikaasusta tai muulla tavalla tuotetusta kaasusta puhdistamalla (Taulukko 3.11). Nimi johtuu sen käytöstä synteettisten nestemäisten (esimerkiksi metanoli ja FT-nesteet) ja kaasumaisten (esimerkiksi SBG ja bio-LPG) polttoaineiden, erityisesti hiilivetyjen ja alkoholien, valmistukseen katalyyttisillä polymerisointiprosesseilla. Synteesikaasua käytetään myös muiden kemikaalien kuin polttoaineiden valmistukseen tärkeimpänä esimerkkinä ammoniakksynteesi.

Taulukko 3.11. Biosynteesikaasun valmistustapoja. Suluissa olevat esimerkkikatalyytit ovat Chengin & Kungin (1994) esittämiä.

Bioresurssi	Prosessi (katalyytti suluissa)
Biokaasu, terminen biometaan	Metaanin höyryreformointi (Ni/Al ₂ O ₃) $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$
	Metaanin autoterminen reformointi (Ni) $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$, $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
	Metaanin osittaishapetus (lantanidit/Ru) $2 \text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2 \text{H}_2$
Nestemäiset biopolttoaineet	Höyryreformointi (Ni/Al ₂ O ₃ tai Ca/Al ₂ O ₃) $n\text{CH}_2 + n \text{H}_2\text{O} \rightarrow n \text{CO} + 2n \text{H}_2$
	Kaasutus
Kiinteät biopolttoaineet	Kaasutus
Puuhiili	Vesikaasu $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$

Vaikka biosynteesikaasun valmistusprosesseja on lukuisia, nykyään lähes kaikki kaupallinen synteesikaasu valmistetaan fossiilisista polttoaineista maakaasun höyryreformoinnilla tai joko kivihiilen tai raakaöljyn raskaiden tislauustuotteiden kaasutuksella. Kaupallisesti biosynteesikaasua valmistetaan toistaiseksi vain Kiinassa, ja lisäksi Etelä-Afrikassa sitä on valmistettu koeluonteisesti kaupalliseen jakeluun. Demonstraatioprojekteja on lukuisia, joista globaalisti huomattavimpiin kuuluvat ruotsalaiset projektit Värnamossa raaka-aineena hake ja Piteässä raaka-aineena mustalipeä. Synteesikaasua voidaan käyttää myös mikrobiologisessa synteesissä hiilivetyjen ja muiden orgaanisten yhdisteiden kuten etanolin tuottamiseen (Rajagopalan ym. 2002).

Synteesikaasu sopii sellaisenaankin esimerkiksi ottomoottorien polttoaineeksi. Hiilimonoksidin takia sen varastointi vie selvästi enemmän tilaa kuin vesimerkiksi vety tai metaani, josta syystä sitä ei käytännössä kompressoitavaksi ajoneuvokäyttöön varastoitavaksi. Toisaalta häikäpönttöajoneuvoissa ei ole käytännöllistä puhdistaa tuotekaasua synteesikaasuksi ennen käyttöä, koska vähäisempikin puhdistus riittää ja koska tuotekaasun sisältämät metaani ja muut VOCit halutaan myös hyödyntää poltossa.

3.3.8 Hiilidioksidi ja savukaasu

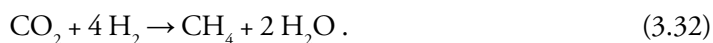
CO₂, H₂O, O₂, N₂, NO_x, CO, VOC, SO_x, H₂S, C

Kemiallisista polttoaineista polttoprosesseissa muodostuva savukaasu on pääasiassa täydellisen palamisen lopputuotteita hiilidioksidia ja vesihöyryä, mutta myös typpeä, happea, typpidioksidia ja rikkidioksidia, joilla myöskään ei ole kemiallista lämpöarvoa (vetyä ja muita hiilivapaita polttoaineita poltettaessa savukaasut eivät sisällä hiilidioksidia). Korkean lämpötilan vuoksi (tavanomaisissa auton bensiinimoottoreissa pakokaasujen lämpötila on luokkaa 800 °C) niitä voidaan kuitenkin hyödyntää sekä lämmitykseen että mekaanisen voiman lähteenä esimerkiksi savukaasuturbiinin ja savukaasumäntämoottorin avulla. Tärkeimmät liikennesovellukset ovat suihkumoottorin kompressoria pyörittävä kaasuturbiini ja samalla periaatteella toimivat ajoneuvojen kaasuturbiinimoottorit ja polttomoottorien turboahtimet. Toinen liikennesovellutus on suihkukoneiden, erityisesti hävittäjäkoneiden, jälkipoltin, joka hyödyntää savukaasujen korkeaa lämpötilaa polttoaineen sytyttämiseen ja lisäenergiaa tuottamiseen.

Savukaasuissa on aina mukana hieman myös komponentteja, joilla on lämpöarvoa, etenkin VOCeja, hiilimonoksidia, typpimonoksidia, rikkimonoksidia, rikkivetyä ja nokihiukkasia. Niitä hyödynnetään liikenteessä suihkukoneiden jälkipolttimissa.

Savukaasuja voidaan käyttää myös termokemiallisessa (Paul & Pradier 1994) ja mikrobiologisessa (Ohtaguchi ym. 1997, Rajagopalan ym. 2002) synteesissä vedyn sekä hiilivetyjen, alkoholien ja muiden orgaanisten yhdisteiden tuottamiseen. Nämä menetelmät ovat vasta tutkimusasteella, mutta esimerkiksi Islannin vetytaloussuunnitelmissa eräs kaavailtu vedyn käyttötapa on yhdistää se metalliteollisuuden savukaasujen hiilidioksidin kanssa metanoliksi ja käyttää metanolia polttoaineena mm. kalastuslaivastossa.

Koska hiilidioksidi on erityisen pysyvä yhdiste, sen käyttö orgaanisten yhdisteiden tuotannossa on energiaa kuluttavaa, mutta mahdollisuuksia on runsaasti katalyyttisten prosessien kautta (Paul & Pradier 1994). Sen osoitti ensimmäisen kerran vuonna 1901–1905 tekemillään tutkimuksilla Paul Sabatier (Sabatier 1912), jonka nimeä kantava alun perin nikkeli-polykatalyyttinen reaktio on seuraava:



3.3.9 Synteettinen bionestekaasu (bio-LPG), bio-propaani ja bio-butaani

Nestekaasun (LPG) eli alhaisessa paineessa (n. 5 bar) nesteytyvän kaasun ajoneuvokäyttö on vakiintunutta teknologiaa. Noin 1 % maailman autoista on LPG-käyttöisiä, mukaan lukien 2,5 miljoonaa Euroopassa (Verheye 2000). LPG :tä käytetään ottomoottoreissa joko yksinomaan polttoaineena – erityisesti raskaat ajoneuvot – tai bifuel-autoissa bensiinin kanssa. Raskaissa ajoneuvoissa on käytettävissä myös duel-fuel-dieselmootoreita. Markkinoilla on tarjolla jälkiasennussarjoja LPG-option lisäämiseksi sekä otto- että dieselmootoriajoneuvoihin.

LPG :tä käytetään yleisesti trukeissa ja muissa liikkuvissa työkoneissa (Kuva 3.30). Alhaisista päästöistä johtuen se soveltuu myös sisätilakäyttöön. Liikkuvissa työkoneissa käytetään normaalisti vaihtopulloja, kuten kuvassa 3.30, mutta autoissa edellytetään kiinteitä kaasutankkeja.



Kuva 3.30. a) Tenant-merkkinen nestekaasukäyttöinen lakaisukone Jyväskylässä. LPG-tankkina on kotitalous- ja teollisuuskäytöstä tuttu vaihtopullo. a) Vaihtopullon LPG-tuotetiedot sisältävä etiketti. [2006]

Tavallisesti nestekaasu koostuu pääosin propaanista (C_3H_8) ja butaanista (C_4H_{10}), mutta mukana on myös propeniä (C_3H_6), buteenia (C_4H_8) ja mahdollisesti hieman etaania (C_2H_6) ja pentaania (C_5H_{12}). Normaalisti LPG:ta valmistetaan raakaöljystä öljynjalostamoilla sekä raakamaakaasusta erottamalla. Öljynjalostamoiden tuottama LPG on peräisin sekä raakaöljyn sisältämistä komponenteista että krakkaamalla raskaammista yhdisteistä syntyvistä komponenteista. LPG:ta tulee yleensä öljynjalostamoilla enemmän kuin sitä saadaan markkinoitua, joten sitä käytetään jalostamoiden omaan energiantarpeeseen sekä soihdutetaan. Tavanomaisen LPG:n resurssi on sidoksissa raakaöljy- ja maakaasuresursseihin, joten sen käyttö tilastoidaan niiden alle.

Sitä voidaan valmistaa myös biomassasta sekä kiinteistä fossiilisista polttoaineista, mukaan luettuna turve. Useimmat termiset synteettisten biopolttoaineiden kaasutukseen, suoraan nesteytykseen ja pyrolyysiin perustuvat valmistusprosessit tuottavat nestekaasuja, jolloin niitä voidaan kutsua bio-LPG:ksi.

Nestekaasun koostumus vaihtelee paljon eri maissa ja eri vuodenaikoina siten, että kylmissä maissa ja talvisaikaan propaanin osuus on suurempi kuin lämpimissä maissa ja kesäaikana (Taulukko 3.12). Suomessa LPG:n ajoneuvokäyttö on ollut muutaman yksittäisen kokeilun varassa, kuten Valmetin ECO-bus -prototyyppi, joka ei hyvistä kokeimuksista huolimatta päässyt sarjavalmistukseen, mutta joka on palvellut vuosia Helsingissä kaupunkiliikenteessä (Intosalmi 1999).

Taulukko 3.12. Autokäyttöön myytävän nestekaasun propaani/butaani-suhde eräissä maissa (Juurikkala ym. 1986).

Maa	Propaani/butaani-suhde	
	Kesälaatu	Talvilaatu
Belgia	30/70	50/50
Hollanti	30/70	70/30
Itävalta	20/80	80/20
Ruotsi	50/50	100/0
Tanska	50/50	70/30

LPG:n oktaaniluku riippuu luonnollisesti käytetystä propaani/butaani-suhteesta, mutta se on normaalisti parempi kuin bensiinin. Myös lämpöarvo on LPG:llä korkeampi kuin bensiinillä. Kuten kaikki kaasumaiset polttoaineet LPG sekoittuu moottorissa polttoilmaan paremmin kuin nestemäiset polttoaineet, josta seuraa nestemäisiä polttoaineita täydellisempi palaminen ja siten vähemmän epätäydellisestä palamisesta aiheutuvia päästöjä ja moottoriin karstaa aiheuttavia palamisjätteitä (Juurikkala ym. 1986). LPG:n komponenteilla on suuri potentiaalinen merkitys sekoitettuna alkoholisten kanssa, sillä niiden avulla voidaan pienillä pitoisuuksilla, luokkaa 5 %, saavuttaa riittävä höyrystyvyys Suomen talviolosuhteissa, jolloin polttoaineen alkoholipitoisuus voidaan nostaa noin 95 %:iin.

3.3.10 Dimetyylieetteri (DME) $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$

DME on dieselmootoreihin sopiva polttoaine, jonka setaaniluku on yli 55 eli enemmän kuin fossiilidieselillä (Ekblom ym. 2003). Se on normaalipaineessa kaasumainen, mutta se nesteytyy jo alhaisessa paineessa ja sitä käytetään samanlaisessa polttoainejärjestelmässä kuin nestekaasua (Kuva 3.31).



Kuva 3.31. DME-käyttöinen Volvon kuorma-auto esittelyssä synteettisten liikennebiopolttoaineiden konferenssissa Tukholmassa vuonna 2005. Polttoainetankit ovat samanlaiset kuin nestekaasujoneuvoissa ja sijoitettu tavaratilan etuosaan. [2005]

3.3.11 Etyyni (asetyleeni) CH≡CH

Etyyni eli asetyleeni oli Gustav Weißkopf ensimmäisen lentokoneen voimanlähde vuonna 1901. Sitä on perinteisesti valmistettu kalkkikivipohjaisesta kalsiumkarbidista. Etyyniä voidaan kuitenkin tuottaa myös krakkaus- ja kaasutusprosesseilla raakaöljystä, biomassasta ja muista orgaanisista raaka-aineista. Nykyään hitsauskaasu on sen yleisin käyttösovellus.

Etyynin oktaaniluku on alhainen, joten sitä yksinään käytettäessä kipinäsytytteisen asetyleenimoottorin puristussuhde voi olla korkeintaan 6. Sitä voidaan kuitenkin käyttää, ja todella käytetäänkin, yhdessä korkean oktaaniluvun polttoaineiden kuten alkoholien ja nestekaasun kanssa tavanomaisen puristussuhteen ottomoottoreissa. Lisäksi se soveltuu kaasuturbiinien ja suihkumoottoreiden polttoaineeksi. Etyynin suuren tiheyden takia se sisältää kuutiota kohti 1,6-kertaisen energiamäärän metaaniin verrattuna, vaikka painoyksikköä kohti sen lämpöarvo on metaania alempi.

3.3.12 Muut orgaaniset kaasut

Etaania ei käytetä pääenergianlähteenä, mutta sitä on mukana maakaasussa usein merkittäviä määriä, luokkaa 10 %. Myös nestekaasussa sitä voi pienissä pitoisuuksissa olla.

3.3.13 Ammoniakki NH₃

Ammoniakkia voidaan valmistaa ilman typestä ja veden vedystä, josta syystä resurssi on käytännössä rajaton:



Tämä Haber-Bosch-synteesi, josta Fritz Haber sai vuoden 1918 Nobelin kemian palkinnon, tapahtuu katalyyttisesti korkeassa paineessa (n. 200 bar) ja lämpötilassa (n. 500 °C). Se on erittäin runsaasti lannoiteteollisuudessa käytetty prosessi, mutta vetyä ei tehdä vedestä vaan maakaasusta, jolloin koko prosessin hyötysuhde on noin 60 %. Mikäli lasketaan mukaan myös nesteytys ja kuljetus huoltoasemille tankkausvalmiiksi, prosessin hyötysuhde on 51 % (ACCEPT 2003). Sama on saavutettavissa biokaasulla. Myös puun ja biomassan termisellä kaasutuksella valmistettua vetyä on tarkoitukseen käytetty. Typpipitoisten kasvien pyrolyysi oli tärkeä ammoniakkin valmistustapa ennen Haber-Bosch-synteesin kaupallistamista 1910-luvulla.

Ammoniakin globaali tuotanto kemianteollisuuden raaka-aineeksi vuonna 2006 oli 122 Mt tyyppiä (USGS 2007) eli 148 Mt ammoniakkia. Sen energiasisältö (LHV) on 2,8 EJ, joka vastaa 3 % maailman liikenteen energiankulutuksesta.

Ammoniakki voi palaa, kun sitä on 16-25 % ilmassa. Se palaa typen oksideiksi ja vesihöyryksi, mutta edellyttää yleensä katalyytin. Polttoaineena ammoniakki soveltuu lisäaineiden kanssa sekä ottomoottoriin, dieselmoottoriin, kaasuturbiiniin että rakettimoottoriin. Sillä on korkea oktaaniluku: 110-130 (Feibelman & Stumpf 2006). Hiilettömänä sen käytön päästöt ovat vapaat paitsi hiilidioksidista myös kaikista muistakin

hiiliyhdisteistä. Päästöinä saadaan vesihöyryä, typen oksideja ja ammoniakkia, jotka vesihöyryä lukuun ottamatta lukeutuvat haitallisiin päästöihin. Päästöjä voidaan puhdistaa katalyysaattoreilla, jotka ensin tuottavat ammoniakista ja NO_x:eista tyypeä ja vesihöyryä ja sitten puhdistavat loput NO_x:it tavanomaiseen tapaan (Feibelman & Stumpf 2006).

Kuuluisin ammoniakkia käyttänyt ajoneuvo lienee USA:n ilmavoimien ja NASAn käyttämä lentokoneiden nopeus- ja korkeusennätyksen tehnyt X-15-rakettimoottorikone, jonka hapettimena oli LO₂. X-15 saavutti yli 100 km korkeuden eli se pystyi myös avaruuslentoihin.

Ammoniakkia voidaan säilyttää kaasumaisena, pienessä ylipaineessa (9 bar) nesteytettyinä normaalilämpötilassa kuten nestekaasua, jäädytettynä -78 °C:een normaalipaineessa, veteen liuotettuna tai kiinteänä ammoniumsulana. Mikäli ammoniakkin valmistuksessa käytetään vettä ja uusiutuvia energianlähteitä, voitaisiin saavuttaa ns. ammoniakkitalous, jossa ammoniakki olisi uusiutuvan energian pääasiallinen välittäjä sähkön ohella eli mm. liikennemoottoareiden polttoaine. Mikäli ammoniakki valmistetaan maakaasusta, kuten nykyään tehdään, kasvihuonekaasupäästöt eivät vähene. Kivihiilen käytöllä, kuten myös on ammoniakkitaloudeksi ehdotettu, kasvihuonekaasupäästöjä saadaan lisättyä runsaasti.

Ammoniakkia voidaan käyttää voimakoneissa myös muuten kuin kemiallisena polttoaineena. Ammoniakkimoottorissa höyrytetty ammoniakki käyttää moottoria ja sen jälkeen absorboidaan veteen, regeneroidaan vedestä ja nesteytetään paineistamalla uutta höyrytämistä varten. Ammoniakkia ei tässä suljetussa prosessissa kuluteta ja liukeneislämpöä hyödynnetään ammoniakkin höyryttämisessä. Kalina-syklin turbiinit ovat toinen esimerkki. Siinä 70 % ammoniakki-vesiseos toimii turbiinin kiertoaaineena höyryn asemasta mahdollistaen matalampien lämpötilojen ja hukkalämpölähteiden hyödyntämisen.

Ammoniakki on myös eräs vaihtoehto vedyn varastoksi, ja vety voidaan irrottaa siitä polttokenokäyttöä varten tai kehittää ammoniakkipolttokennoja sitä varten (Feibelman & Stumpf 2006).

3.3.14 Muut epäorgaaniset kaasut N₂O, H₂S ym.

Ilokaasua eli typpioksiduulia (N₂O) käytettiin sodan aikana ahtimeen ruiskutettuna esimerkiksi Me109-lentokoneissa. Niissä saatiin tehoa korotettua enimmillään 280 hv (20 % luokkaa), joka merkitsi nopeuden lisääntymistä 100 km/h (Valtonen 1999).

Typpioksiduulia käytetään tehoa nostavana hapettimena edelleen joissakin kilpakäyttöön tarkoitetuissa ajoneuvoissa (Owen ym. 1995). Ja sitä on käytetty samassa tarkoituksessa myös rakettimoottoreissa, mm. SpaceShipOnen hybridirakettimoottorissa. Ilokaasun merkitys energiaa tuottavana yhdisteenä on vähäinen, mutta sen hapetinkäytön avulla muun polttoaineen polttoprosessia voidaan huomattavasti tehostaa.

Hapetinkäytössä on myös muita kaasuja, normaalisti nesteytettyinä, mutta myös nesteisiin liuotettuina. Niistä tärkein on suurten avaruusrakettien päärakettimoottorien hapettimena käytetty happi (LO₂) (Kuva 3.32). Typen oksideja (NO_x) on käytetty hapetti-

mena rakettipolttoaineissa, esim. IWFNA:ssa (Inhibited White Fuming Nitric Acid) sitä on 0,5 %. Muita mahdollisuuksia ovat fluori (LF₂), klooripentafluoridi (ClF₅), perkloorifluoridi (ClO₃F) ja klooritrifluoridia (ClF₃). Fluori on voimakkain tunnettu hapettaja, mutta sen käytöstä on luovuttu erityisen suurten käsittelyvaikeuksien ja myrkyllisyyden takia.



Kuva 3.32. Saksalainen LO₂-kuljetusperävaunu 1940-luvulta (Zaloga & Calow 2003). [© NARA]

Rikkivetyä (H₂S) muodostuu luonnollisesti ja sitä on mukana eräissä polttoaineissa kuten raakabiokaasussa. Se on polttoainetta, joka tuottaa energiaa palaessaan, mutta sen korroosiota ja rikkidioksidipäästöjä aiheuttavista ominaisuuksista johtuen sen määrää polttoaineessa pyritään useimmiten vähentämään. Sen poistaminen ei kuitenkaan moottoriteknisistä syistä ole välttämätöntä, sillä moottori voidaan sitä varten varustaa korroosiota paremmin kestäville materiaaleille (tiivisteet, suuttimet jne.) ja sen haitallista vaikutusta vähennetään myös tiheämmällä moottoriöljyn vaihtovälillä.

Ionimoottoreissa voidaan hyödyntää kaikkia kaasuja, mukaan lukien argon, helium ja muut jalokaasut.

3.3.15 Paineilma ja painekaasut

Paineilma ei ole kemiallinen polttoaine, mutta se pystyy käyttämään paineilmamootoreita (mäntämootorit, turbiinit, suihkumootorit) fysikaalisen energiapotentiaalinsa ansiosta. Sen liikennekäytöllä on pitkät perinteet, joita on käsitelty luvussa 2. Sitä voidaan valmistaa bioresursseilla ja kaikilla muillakin uusiutuvilla energioresursseilla, joita käytetään kompressorin voimanlähteenä joko sähkömoottorilla tai suoraan lämpövoimakoneella.

Ilman lisäksi muitakin kaasuja, esimerkiksi typpi, hiilidioksidi, helium ja argon, käytetään paineistettuna vastaavalla tavalla. Varsinaisen ajoneuvon liikevoiman lisäksi painekaasut voivat toimia apulaitteissa, kuten rakettimoottorien polttoaineiden ja hapettimien syöttömoottoreiden tai avaruusalusten ohjausmoottoreiden voimanlähteinä.

Paineistetun kaasuvaramon lisäksi painekaasuja voidaan tuottaa nesteytetyistä kaasuista ja nesteisiin tai kiinteisiin aineisiin monella eri tavalla sitoutuneista absorboituneista kaasuista lämpötilaa nostamalla. Lisäksi eräät nestemäiset yhdisteet, kuten vetyperoksidi ja hydratsiini voidaan hajottaa paineisiksi kaasuiksi.

3.3.16 Nostekaasut

Nostekaasuja ei käytetä kemiallisina polttoaineina – vaikka osa niistä olisi siinäkin tarkoituksessa mahdollisia – vaan ilmaa kevyempinä ne mahdollistavat nousun ilmakehässä ja siten myös tuulivoiman hyväksikäytön. Osa kaasuista kuten vety ja helium toimivat nostekaasuuina normaaliolosuhteissa. Moni muu kaasu, kuten ilma, voi toimia nostekaasuna lämmitettäessä sitä esimerkiksi kemiallisilla polttoaineilla.

Maapallon ilmakehän lisäksi nostekaasuja voidaan käyttää muilla taivaankappaleilla, joilla on kaasukehä. Toistaiseksi niin on tehty vasta Venuksen valtaosin hiilidioksidista koostuvassa kaasukehässä Neuvostoliiton Vega 1–2-luotainten heliumpaloilla vuonna 1984. Heliumilla on paras noste, joten se käy nostekaasuksi sellaisenaan muualla paitsi heliumkaasukehässä. Kaasukehän kaasujen lämmitys mahdollistaa noston kaikissa kaasukehissä. Esimerkiksi Jupiterin valtaosin vedystä ja heliumista koostuvassa kaasukehässä olisi periaatteessa mahdollista käyttää kuumavety-heliumpaloja, Saturnuksen kuun Titanin valtaosin tyyppistä ja metaanista koostuvassa kaasukehässä kuumatyyppi-metaanipaloja ja Marsin valtaosin hiilidioksidista koostuvassa ilmakehässä kuumahiilidioksidipaloja. Pallojen lämmitys voi tapahtua passiivisesti aurinkolämmöllä tai aktiivisesti käyttäen aurinkoenergia- tai ydinenergiatekniikkaa, ja lyhytaikaisesti kemiallisten reaktioidenkin avulla.

Nostekaasut soveltuvat myös vedenalaisessa liikenteessä ylöspäin nousuun. Tässä tarkoituksessa käytetään sukellusveneissä lähinnä ilmaa ja sukellusveeneen prosesseissa vapautuneita kaasuja kuten hiilidioksidia. Vastaavasti voidaan periaatteessa menetellä muiden taivaankappaleiden muista nesteistä kuten Saturnuksen kuun Titanin nestemäisistä hiilivedyistä (pääasiassa metaanista ja etaanista) koostuvien järvien pinnan alapuolisessa liikenteessä. Teoriassa jopa nostenesteet olisivat mahdollisia, mutta lienee vaikea löytää käytännöllistä sovellusta niille.

3.3.17 Plasman tuotekaasut

Kaikkia kaasuja voidaan ionisoida plasmaksi ja käyttää ionimoottoreissa. Esimerkiksi ruotsalaisessa Smart-luotaimessa ionit tuotetaan aurinkosähköllä xenon-kaasusta (Kuva 2.30b).

3.4 LIKENNEMPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIEN VERTAILUA

Otto- ja dieselmootoreihin sopivien polttoaineiden moottoritekniset pääominaisuudet ovat oktaani- ja setaaniluku. Monilla biopolttoaineilla saavutetaan huomattavasti korkeampi moottoritekkinen laatu otto- ja dieselmootoreissa kuin fossiilisella bensiinillä ja dieselöljyllä (Taulukko 3.13).

Taulukko 3.13. Eräiden polttoaineiden moottoritekniset pääominaisuudet otto- ja dieselmootorikäytössä.

Ottopolttoaine	Oktaaniluku	Dieselpolttoaine	Setaaniluku
Biokaasu	140	NExBTL DI-diesel	84–99
Maakaasu	130	Ecopar FT-diesel	73–81
Propani (nestekaasu)	112	TME (talibiodiesel)	75
Etanoli	108	DME	55–68
Metanoli	107	Biodiesel	45–75
Ferraribensiini	99	Pähkinäöljy	42
Tavallinen bensiini	95–98	Fossiilidiesel	38–55

Kuten liitetaulukoista L6.5 ja L6.6 nähdään, biopolttoaineet ovat pääsääntöisesti fossiilisia parempia myös kylmäkäyttöominaisuuksiltaan. Kylmäkäyttöominaisuuksiltaan parhaita ovat sellaiset, joiden jäätymispiste on alhainen ja ottomoottoripolttoaineissa lisäksi höyrynpaine on korkea (vety ja muut kaasumaiset polttoaineet parhaita). Kylmäkäyttöominaisuuksia on kuitenkin helppo parantaa lisäaineilla ja koostumuksen muutoksilla yhtä lailla biopolttoaineille kuin on totuttu tekemään fossiilisille bensiinille ja dieselille, joiden normaalilaadut eivät ole käyttökelpoisia talvisin. Talvella myydään vain talvilautuja, joten esimerkiksi biodiesel ja etanoli toimivat myös Pohjois-Ruotsin talven olosuhteissa kuten fossiilisetkin (Kuva 3.8).

Kuten luvussa 7 käy ilmi kasviuonekaasujen lisäksi biopolttoaineilla tavanomaisetkin päästöt ovat pääsääntöisesti fossiilisia polttoaineita alemmat ja biopolttoaineet ovat turvallisempia onnettomuus-, palo- ja vuototilanteissa.

Dieselmoottoripolttoaineet saavat tiettyjä päästöetuja ottomoottoripolttoaineisiin verrattuna johtuen dieselmoottorin paremmasta energiatehokkuudesta: sen puristussuhde on dieselöljyllä 16–20, mutta etanolilla 22. Ottomoottorin puristussuhde on bensiinillä 8–12, mutta biokaasu mahdollistaa sen noston jopa 18:aan. Polttoaineen kulutusta litroina mitattaessa syntyy siis lisähyöty dieselöljyn ja useiden vaihtoehtoisten dieselmoottoripolttoaineiden korkeammasta energiatihedystä bensiiniin ja useisiin vaihtoehtoisten ottomoottoripolttoaineisiin verrattuna.

Dieselmoottorin haittapuolia ottomootoreihin verrattuna on noin 1,5–3-kertainen paino tehoyksikköä kohti. Hiukkaspäästöjen hillitsemiseksi ilmaa on syötettävä stoikiometristä vaatimusta enemmän. Korkean ilma/polttoainesuhteen takia dieselmoottoriin mahtuu iskuilavuutta kohti 20–30 % vähemmän polttoainetta kuin ottomoottoriin. Dieselmoottorin etuja ottomoottoriin verrattuna ovat puolestaan korkeampi hyötysuhde ja dieselöljyn 10 % suurempi tiheys, joista johtuen litramääräinen kulutus on noin 30 % alempi. (Suzuki 1997)

4

LIIKENTEEN UE-POLTTOAINEIDEN RESURSSIT

"For countries buffeted by soaring oil prices and possible supply disruptions, the prospect of an easily available substitute for some of the imported oil is an inviting one. Although the world's oil reserves are concentrated in a handful of countries, the potential for producing energy crops is as widely diffused as agriculture itself."

- Lester R. Brown vuonna 1980 (Brown 1980)

Liikenteen UE-polttoaineet tarkoittavat sekä biopolttoaineita että muita uusiutuvien energialähteiden avulla valmistettavissa olevia polttoaineita. Liikenteen biopolttoaineilla on pitkät perinteet ja niitä käytetään jo nykyisin paljon. Eräät niistä ovat täysin kypsää ja kaupallisesti kilpailukykyistä teknologiaa ja useita muita ollaan tuomassa markkinoille. Biopolttoaineiden haittapuolena on rajallinen resurssipohja ja energiakasvipohjaisilla biopolttoaineilla lisäksi potentiaalinen kilpailu alueiden muiden käyttömuotojen kanssa, mukaan lukien luonnolliset ekosysteemit.

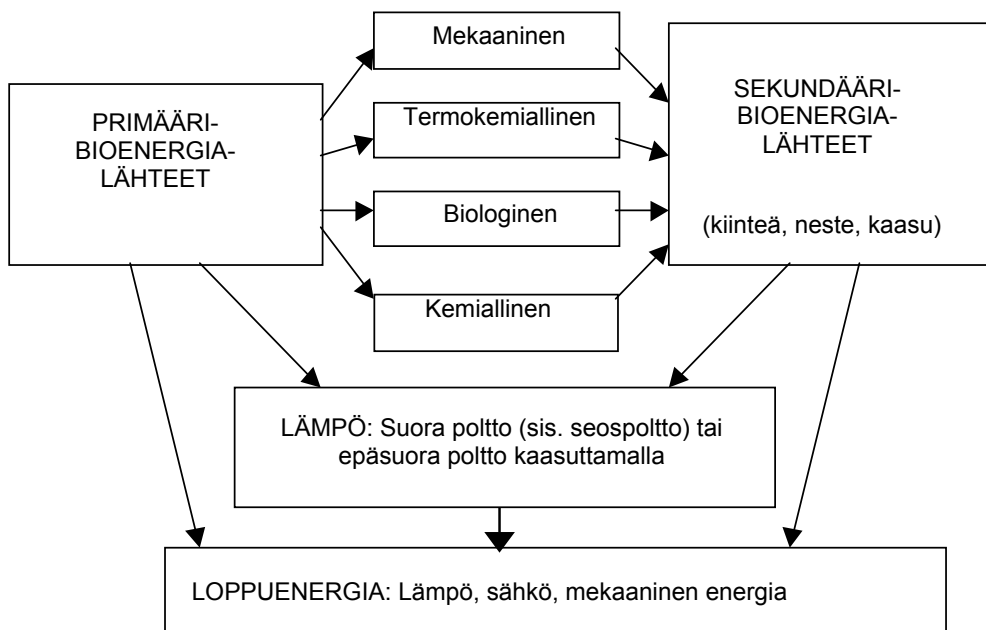
Bioresurssien lisäksi liikennepolttoaineita voidaan valmistaa myös vedestä ja useista muista yhdisteistä. Vedyn tuotanto merivedestä aurinkoenergialla on käytännössä rajaton resurssi, jonka avulla liikenteen lisäksi kaikki muutkin ihmiskunnan energiatarpeet olisi tyydytettävissä. Tämä on teknisesti mahdollista monilla tavoilla. Tuotetun UE-vedyn suoran käytön lisäksi sillä voidaan valmistaa monia muita polttoaineita esimerkiksi hydroprosessien avulla. Nämä teknologiat eivät nykyisin ole kaupallisesti kilpailukykyisiä, mutta se on monien kehitysprojektien tavoitteena. Samojen resurssien avulla voidaan valmistaa myös sähköä ja käyttää sitä suoraan tai epäsuoraan liikenne-energiana.

Alla annetaan katsaus erikseen bioenergiaresursseista ja muiden liikenteen uusiutuvien energialähteiden resursseista.

4.1 PRIMÄÄRIBIOENERGIAN LÄHTEET JA NIIDEN RESURSSIT

4.1.1 Globaali katsaus

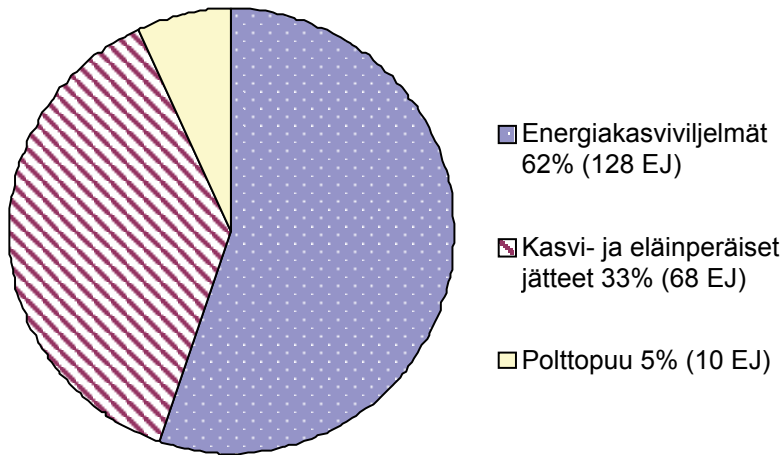
Kuva 4.1 on yleiskaavio bioresurssien energiahierarkiasta ja konversioteknologioista. Primäärienergian suorasta liikenne-energiakäytöstä ovat esimerkkinä raakana käytetty ruoka ja rehu sekä höyrykoneessa ja muissa ulkoisesti lämmitettävissä lämpövoimakoneissa käytettävä puu ja olki. Yleensä liikennebiopolttoaineet kuten myös fossiiliset liikennepolttoaineet ovat sekundäärienergiamuotoja, jotka on valmistettu jostakin primäärienergiamuodosta. Etanoli, biodiesel, puukaasu ja biokaasu ovat tunnetuimpia esimerkkejä näistä.



Kuva 4.1. Bioenergian konversioteknologiat ja loppukäyttö. (Lampinen & Jokinen 2006, Huttunen & Lampinen 2005).

Biomassan vuotuinen primäärituotanto maapallolla on noin 117,5–109 kuivatonna, josta 68 % maaekosysteemeissä (josta 10 % pelloilla) ja 32 % vesiekosysteemeissä (Whittaker & Likens 1975). Se tarkoittaa noin 2400 EJ energiaa, joka on 29-kertainen maailman liikenne-energiankulutukseen verrattuna. Maanviljelyn kokonaistuotanto vastaa noin 163 EJ:a energiaa, joka on kaksinkertainen liikenne-energiankulutukseen verrattuna. Koska bioenergian tuotanto jätteitä lukuun ottamatta kilpailee muiden maa-alan käyttömuotojen ja siten mm. ekologisten arvojen kanssa, sen käytön mahdollisuudet ovat rajalliset.

Kasvien viljely energiaksi ruoan sijaan on ollut kriittisen keskustelun kohteena 1970-luvun öljykriiseistä lähtien (esim. Brown 1980), koska silloin alettiin vakavasti pohtia raakaöljyn korvaamista biopolttoaineilla. Brasilian (Goldemberg ym. 1993, Moreira & Goldemberg 1999) ja USA:n liikenne-etanoliohjelmat, jotka synnyttivät nykyisin maailman suurimmat liikennebiopolttoaineiden käytön ohjelmat, syntyivät 1970-luvulla. Energiakasvipohjaisten biopolttoaineiden tuotannon potentiaalinen kilpailu ruoan ja muun tuotannon kanssa sekä potentiaaliset haitalliset ekologiset vaikutukset ovat olleet YK:n korkean tason tutkimusten kohteena. YK:n Rion vuoden 1992 (Johansson ym. 1993) ja Johannesburgin vuoden 2002 (UN 2000) ympäristöhuippukokouksia varten teettämässä laajoissa selvityksessä suurin osa globaalista ekologisesta tuotettavasta bioenergiaresurssista saadaan energiakasviviljelmiltä, jotka perustetaan kehitysmaissa maatalouden köyhdyttämille maille ja teollisuusmaissa ylituotantomaille, yhteensä 429 Mha vuonna 2050 (Kuva 4.2). Toiseksi suurin potentiaali tulee metsien hakkuujätteistä, peltokasvijätteistä ja eläinperäisistä jätteistä. Loppuosa tulee metsätalouden viljelymetsistä (polttopuu kuvassa 4.2). Vanhoja metsiä ei käytetä lainkaan ja kasvava ruokatuotannon tarve on otettu huomioon.



Kuva 4.2. Globaali ekologinen potentiaali bioenergian tuotannolle vuonna 2050 Rion ympäristökokousta varten tehdyssä RIGES-skenaariossa (Renewables Intensive Global Energy Scenario); yhteismäärä on 206 EJ (Johansson ym. 1993). Autiomaiden ja merien käyttö eivät ole mukana näissä potentiaaleissa.

Käytettäessä maatalouden köyhdyttämiä maita energiakasvituotantoon eroosiota voidaan vähentää ja jopa ennallistaa maaperää. Tällä toimenpiteellä on positiivinen vaikutus myös biodiversiteettiin. Autiomaita riittää runsaasti energiaviljelyyn esimerkiksi jatrophan avulla biodieselin tuotannossa, kunhan huolehditaan siitä, että kaikkia alkuperäisiä autiomaakosysteemejä jää myös suojelun piiriin. Brasilian esimerkin mukainen sokeriruokoviljelmien laajentaminen laidunmaille ja karjanhoidon korvaaminen etanolin tuotannolla on ekologisesti myönteistä johtuen lihantuotannon erittäin alhaisesta hyötysuhteesta ja sen moninaisista ympäristöhaitoista.

Maatalouden ylituotantomaita käytettäessä korvataan normaalisti yksivuotiset ruokakasvit monivuotisilla energiakasveilla. Tällöin vähennetään maanmuokkausta siihen liittyvine kasvihuonekaasupäästöineen ja pellon ekosysteemiin kohdistettua häiriötä. Biodiversiteetti nousee esimerkiksi lintujen osalta poikkeuksena erittäin laajat monokulttuurit (Anderson ym. 2004). Biodiversiteetin kannalta valtaosin haitallista on villiintyneiden peltujen ottaminen energiakäyttöön (kuten myös ruokaviljelyyn). Ne korvaavat nykyisessä maanhoitokulttuurissa aiemmin luonnollisten palojen synnyttämiä ekosysteemejä.

Merillä on erittäin suuri toistaiseksi käyttämätön bioenergian tuotantokapasiteetti, josta huomattavan suuri määrä voi osoittautua myös ekologisesti hyväksyttäväksi. Esimerkkinä ovat vetyä auringonvalon ja (meri)veden avulla aineenvaihdunnassaan tuottavat levät alueilla, jotka ovat lannoitepäästöjen ja muiden ihmistoiminnan vaikutuksien vuoksi kuolleet. Nämä teknologiat ovat käytettävissä myös kasvihuoneissa, autiomaissa ja kaikenlaisella hukkamaalla ja ne sopivat samalla myös jäteveden puhdistamiseen. Öljyn tuotannossa niillä on saatavissa 15–20-kertainen hehtaarisato verrattuna perinteisiin kasveihin (Decker 2009). Kuitenkin houkutus geenimanipulaation käyttöön tuottaa suuren ekologisen riskin, kuten makrokasvienkin geenimanipulointi.

Bioenergiaresurssit siis teoriassa sallisivat maailman liikenteen siirtämisen biopolttoaineille ekologisesti kestäväällä tavalla ja ilman kilpailua ruokatuotannon tai muun tuotannon kanssa. Mutta ongelma, johon Worldwatch-instituutin perustaja Lester Brownkin tämän luvun alussa olevassa lainauksessa viittaa, on se, että biopolttoainetuotanto on vaikea suunnata oikeille alueille. Ongelmat johtuvat siis etupäässä kestäättömästä resurssien hallinnoinnista. Eräs tällä hetkellä biopolttoainetuotantoa paljon vakavampi esimerkki on siirtyminen kasvivaltaisesta ruokavaliosta lihavaltaiseen ruokavalioon, jolloin lihantuotannon 10-kertaisesti heikomman tuotantohyötysuhteen takia ravinnon tuottamiseen vaadittava maa-ala 10-kertaistuu (Taulukko 5.1). Esimerkiksi Terailta Etelä-Nepalissa suuret karjatilalliset ovat hankkineet omistukseensa ja karjan laidunmaaksi suuren määrän entistä kyläläisten ruokapeltota ja pakottaneet kyläläiset hakkaamaan suojelumetsiä myydäkseen polttopuita ruoan ostoa varten (Kuvat 4.3 ja 3.1). Lihankasvatus on ollut jo pitkään pääsyynä Amazonin sademetsän häviämislle (UNEP 1992).

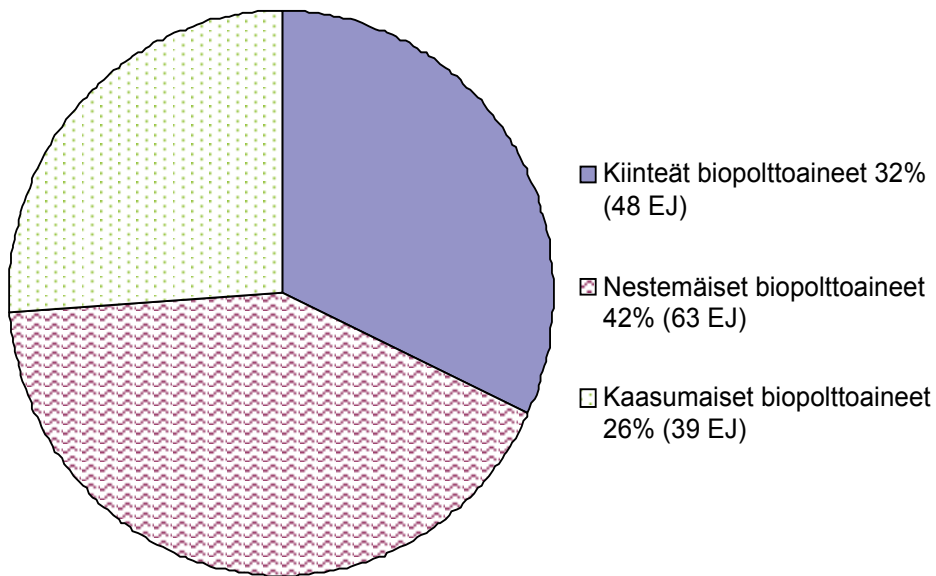


Kuva 4.3. Nepalilaiset salakuljettavat puuta Etelä-Nepalista Pohjois-Intiaan saadakseen rahaa ruoan hankintaan, koska he ovat menettäneet ruokapeltonsa karjan laidunmaaksi. [1997]

Historian opetusten eli inhimillisten virheiden takia energiakasviviljelyyn on pakko suhtautua varauksellisesti, mutta samalla hyväksyä kestäväällä tavalla tehdyt hankkeet. Energiakasvituotannon kestävyysnormien luominen on olennaista, ja sitä edellytetään esimerkiksi EU:n uudessa uusiutuvan energian direktiivissä (2009/28/EY). Jäteperäisten biopolttoaineiden tuotannolla sekä ekologisen että sosiaalisen kestävyuden riskit ovat erittäin paljon pienemmät kuin energiakasveilla ja ympäristönsuojeluhyödyt erittäin paljon suuremmat kuin energiakasveilla. Siitä syystä jätteperäisiä biopolttoaineita tulee

suosia energiakasviperäisiin biopolttoaineisiin verrattuna. EU:n uudessa UE-direktiivissä asia hoidetaan siten, että jäsenmaiden UE-liikenne-energiatavoitteen (10 % vuonna 2020) toteuttamisessa jäteteräisten biopolttoaineiden osuus lasketaan kaksinkertaisena.

Raakaöljyn hinnan nousu ja tuotantohuipun läheisyys ovat suurin globaali energiahuoltovarmuusriski. Energian käyttömuodoista liikenne on kaikkein raakaöljyriippuvain ja kaikkein vaikeimmin korvattavissa muilla energiamuodoilla. Syynä on nestemäistä tai kaasumaista polttoainetta vaativien polttomoottorien täysin vallitseva asema. Bioenergia tarjoaa kaikista ei-fossiilisista energiamuodoista helpoimman tien nestemäisiin ja kaasumaisiin polttoaineisiin. Siten YK:n RIGES-skenaariossa bioenergia oletetaan tulevaisuudessa käytettävän valtaosin nestemäisenä tai kaasumaisena (Kuva 4.4). Kyseisessä skenaariossa oletetaan lisäksi, että vedyn tuotanto muilla uusiutuville energiamuodoilla on jo merkittävää vuonna 2050, mutta ei vielä yllä bioenergian tasolle liikenteen polttoaineiden osuudessa. Jatkossa se kuitenkin tarjoaa ylivoimaisesti suurimman ekologisen potentiaalilin liikenteen polttoaineiden tuotantoon.



Kuva 4.4. Bioenergiamuotojen jakautuminen vuonna 2050 Rion ympäristökokousta varten tehdyssä RIGES-skenaariossa; yhteismäärä on 150 EJ, jonka tuottamiseen käytetään 206 EJ primääribioenergiaa (Johansson ym. 1993).

Nestemäisten ja kaasumaisten biopolttoaineiden resurssi RIGES-skenaariossa on 102 EJ. Globaali liikenne-energian kulutus on nykyään 70 EJ, mikä tarkoittaa, että globaalit bioenergiaresurssit teoriassa riittäisivät ekologisesti kestäväällä tavalla ja ilman merkittävästi haittaavaa kilpailua ruoka- ja muun tuotannon kanssa kattamaan liikenteen energiatarpeet, mutta se edellyttäisi politiikan tason erittäin huomattavaa paranemista. Nykyisellä politiikalla se ei ole mahdollista. Toisaalta globaali energiankulutus kokonaisuudessaan on nykyään 450 EJ, ja siitä yli 80 % on fossiilista. Bioenergia ei yksin riitä, vaan tarvitaan suurten resurssien uusiutuvia energiamuotoja kuten aurinko- ja tuulienergiaa, joita käsitellään luvussa 4.2. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään Suomen biopolttoaineresursseja.

4.1.2 Puu Suomessa

Puu on Suomessa selvästi suurin bioenergiaressurssi. Suomen puuvarat on esitetty liitteen 4 taulukossa L4.1 ja runkopuiden ja teollisuuden raaka-ainepuun energiasisältö taulukossa L4.2. Taulukko L4.3:ssa on näiden pohjalta ja vuoden 2003 tilastojen perusteella arvioitu teollisuuden runkopuukäytön ylijäämänä syntyvä vuotuinen resurssi, joka koostuu sekä jätetuusta (856 PJ) että hakkuuvarasta (204 PJ) eli vuotuisen kasvun ja hakkuun erotuksesta. Resurssi, joka siis ei kilpaile metsäteollisuuden puunkäytön kanssa, on yhteensä yli 1000 PJ eli 6,5-kertainen tieliikenteen primäärienergiankäyttöön 164 PJ (Taulukko L7.1) verrattuna. Päätulokset on koottu taulukkoon 4.1.

Taulukko 4.1. Puun vuotuinen energiaressurssi Suomessa vuonna 2003 (Taulukot L4.2-3 ja L7.1). Jätetuusta on otettu huomioon Venäjältä tuodun puun jätteet, mutta materiaalipuu tarkoittaa vain suomalaista puuta.

Lähde	Primäärienergia			Vrt. liikenteen kulutus
	[PJ]	[Mtoe]	[TWh]	
Jätetuu	856	20	238	522 %
- Päätehakkuutähde	531	12,7	148	324 %
- Harvennushakkuutähde	95	2,3	26	58 %
- Kuoret	59	1,4	16	36 %
- Mustalipeä	147	3,5	41	90 %
- Muu jätetuu	24	0,6	7	15 %
Energiapuu (hakkuuvara)	204	4,9	57	124 %
ENERGIARESURSSI YHTEENSÄ	1060	25,3	294	646 %
Teollisuuden materiaalipuu	390	9,3	108	

Suurin osa jätetuusta muodostuu päätehakkuissa oksista, latvuksista, kannoista, juurisista, neulasista ja lehdistä. Muita jätetuuresursseja saadaan metsän hoidosta (harvennustähteet), metsäteollisuudesta (kuori, sahanpuru, mustalipeä, puuöljyt, suopa, metanoli, bioliete) ja yhdyskunnista (paperi, rakennusteollisuuden purkujätteet, huonekaluteollisuuden jätteet). Mustalipeästä noin kolmasosa ja kuoresta noin kymmenesosa on peräisin Venäjältä tuodusta runkopuusta. Valtaosa jätetuusta on ekologisesti hyväksyttävästi käytettävissä, mikäli polton tuhka palautetaan metsiin ja neulasten annetaan kuivua metsässä ja vapauttaa sinne niihin varastoituneet ravinteet. Vuonna 2003 jätetuuresurssista käytettiin energiantuotantoon 290 PJ eli kolmasosa (METLA 2004). Liikenteen energianlähteenä käytettiin erittäin pieni osa, luokkaa 10-4 %, sillä noin 20 puukaasukäyttöistä ajoneuvoa muodostavat nykyään Suomen ainoan puun liikennekäytön mahdollistavan teknologian. Ruotsissa on tämän lisäksi käytössä puuperäinen etanoli sekä metsähakkeesta että sulfittisellujäteliemestä valmistettuna, suopabiodiesel ja mustalipeästä ja metsähakkeesta valmistetut synteettiset polttoaineet.

Päätehakkuu- ja harvennustähteitä käytettiin metsähakkeena 15 PJ vuonna 2003 (METLA 2004) eli vain 2,4 % resurssista. Koko jätetuuresurssin käytöstä 95 % saadaan runkopuu-jätteistä metsäteollisuudessa. Metsähake muodostaa siis erittäin suuren käytettävissä olevan resurssin. Hakkuuvaran (200 PJ) voi ennakoita tulevaisuudessa kasvavan, sillä erityisesti selluteollisuus on siirtymässä muualle. Energia on yksi sen käyttömuoto.

Muita ovat esimerkiksi luonnonsuojelualueiden laajentaminen ja raudan pelkistäminen puuhiilellä Brasilian tapaan (Rosillo-Calle ym. 2000)

4.1.3 Peltokasvit Suomessa

Peltokasvit muodostavat puun jälkeen toiseksi suurimman resurssin. Taulukossa 4.2 on esitetty tärkeimpien peltoenergiaresurssien suuruus. Kasvijätteet (oljet ja naatit) muodostavat noin 80 PJ:n resurssin, joka muodostuu sivutuotteena ruokatuotannosta eikä se siten kilpaile ruokatuotannon kanssa. Energiakasvien viljelyllä on mahdollista saavuttaa huomattavasti suurempi potentiaali.

Taulukko 4.2. Eräiden energiantuotantoon soveltuvien peltokasvien vuotuinen energiaresurssi (Lampinen & Jokinen 2006) sekä energiakasvituotannon potentiaaliarvioita.

Kasvi/kasviryhmä	Viljelyala 2005 [ha]	Keskimääräinen energiasato [GJ/ha]	Primääri- energia [PJ]	Vrt. liikenteen kulutus
<i>Vuoden 2005 tilanne</i>				
Viljan oljet	1 168 400	65	76	46 %
Sokerijuurikas ja sen naatti	31 200	230	7	4 %
Ruokohelpi	10 200	140	1,4	1 %
Rypsin ja rapsin siemenet ja olki	76 500	80	6	4 %
KASVIJÄTTEET YHTEENSÄ			80	49 %
<i>Lisäysmahdollisuuksia</i>				
Energiakasvit 500.000 ha	500 000	180	90	55 %
Energiakasvit 2.000.000 ha	2 000 000	150	300	183 %

4.1.4 Biojätteet Suomessa

Biojätteet eli mätänevät (haisevat) jätteet muodostavat kolmannen bioenergiaresurssi-ryhmän. Se koostuu ruoan ja rehun käytön jätteistä ja on siten suoraan verrannollinen ihmis- ja eläinpopulaatioihin. Taulukko 4.3. esittää kyseisen jäteresurssin oletuksena sen hyväksikäyttö mädätystekniikalla. Myös suoraa nesteytystä voidaan käyttää kaikkien näiden jätteiden kanssa ja etanolifermentaatiota sekä vaihtoesteröintiä voidaan soveltaa osaan näistä jätteistä.

Taulukko 4.3. Biojätteiden energiaresurssi Suomessa tuotettavissa olevana metaanin energiana (Lampinen 2003).

Lähde	Jätteen massa [t]	Sekundääri-energia [PJ]	Vrt. liikenteen kulutus
Kaatopaikkakaasu		5,4	3 %
Yhdyskuntien biojäte (keittiöjäte)	360 000 (tuorepaino)	1,3	1 %
Yhdyskuntien jätevesi	160 000 (kiintoainetta)	1,1	1 %
Eläinten lanta	21 500 000 (tuorepaino)	15	9 %
Elintarviketeollisuuden jätteet	960 000 (tuorepaino)	1,7	1 %
Teollisuuden jätevesi	22 300 (kiintoainetta)	0,1	» 0 %
YHTEENSÄ		25	15 %

4.1.5 Mikrolevät ja muut mikrobit

Mikroleviä ja muita mikrobeja voidaan kasvattaa missä tahansa, sekä maalla että vesialueilla ja kasvihuoneissa. Hukka-alueilla tuotettuna ne muodostavat ekologisesti kestävästi liikennepolttoaineresurssin, joka voi myös hyödyntää voimaloiden hiilidioksidiresurssia. Mikrobitien avulla voidaan tuottaa kasviöljyjä, biodieseliä, etanolina, vetyä tai metaania (Ronkainen ym. 2005, Drapcho ym. 2008a). Mikrobipolttoaineiden vuosituotantopotentiaali on suurempi kuin Suomen muiden bioenergiaresurssien. Kyseinen alun perin Saksassa 1940-luvulla käyttöön otettu teknologia ei vielä ole tuotantokäytössä Suomessa, mutta tutkimuksen kohteena se on (esim. Ronkainen ym. 2005).

4.1.6 Primääribioenergiaresurssien käytön priorisointi

Biojätteet pitää joka tapauksessa käsitellä, joten ne olisi syytä priorisoida energiantuotannossa. Ne ovat peräisin ravinnon tuotannosta ja käytöstä, joten niiden tuotanto henkilöä kohti on lähes vakio teollisuusmaissa ja tämän jäteluokan synnyn vähentämisen mahdollisuudet ovat vähäiset. Niillä ei ole lannoitekäyttöä lukuun ottamatta muita materiaalihyödyntämistapoja. Biokaasuteknologia mahdollistaa näiden jätteiden energiasisällön hyödyntämisen menettämättä – ja itse asiassa parantaen - niiden lannoitearvoa.

Peltokasvi- ja puujätteet tai sivutuotteet ovat seuraavaksi tärkeimpiä resursseja, koska ne eivät kilpaile ruokakäytön eivätkä maan muun käytön kanssa. Niillä on kuitenkin enemmän hyödyntämissovelluksia materiaalina ja toisaalta niitä ei ole pakko käsitellä. Elinkaarianalyysissä kaikki jäte/sivutuoteresurssit ovat ympäristövaikutusten kannalta ylivoimaisia energiakasveihin verrattuna, sillä niillä ei ole viljelyn kulutus- ja päästövaihtokuituksia.

Energiakasvien resurssi on kuitenkin suurempi kuin jätteiden, koska Suomessa on paljon maa-alaa käytettävissä. Vaikka teknisesti nämä resurssit on mahdollista käyttää liikenteessä primäärienergiana, käytännössä se ei nykyisellä eikä odotettavissa olevalla teknologialla onnistu, vaan käytetään nestemäisiä ja kaasumaisia sekundäärienergianlähteitä. Taulukko 4.4 sisältää yhden mahdollisen resurssivalikoiman, jolla bioenergialla voitaisiin saavuttaa täydellinen omavaraisuus liikenteessä ilman kilpailua bioresurssien ruoka- ja materiaalikäytön ja biosähkön tuotannon kanssa. Mustalipeän liikenne-energiakäyttö ja leväperäiset polttoaineet eivät ole siinä mukana.

Taulukko 4.4. Eräs mahdollisuus täydellisen liikenne-energiaomavaraisuuden saavuttamiseen bioresursseilla käyttöprioriteetteineen.

Prioriteetti	Lähde	Osuus	Polttoaineet
1.	70 % nopeasti hajoavista biojätteistä	10 %	Biokaasu, biodiesel, etanoli, suora nesteytys
2.	80 % oljista ja naateista	20 %	Biokaasu, etanoli, synteettiset
2.	30 % käyttämättömistä hakkuu- ja metsän-hoitojätteistä (puu)	50 %	Synteettiset, etanoli
3.	Energiakasveja 500.000 ha	20 %	Biokaasu, etanoli, biodiesel, synteettiset
YHTEENSÄ		100 %	

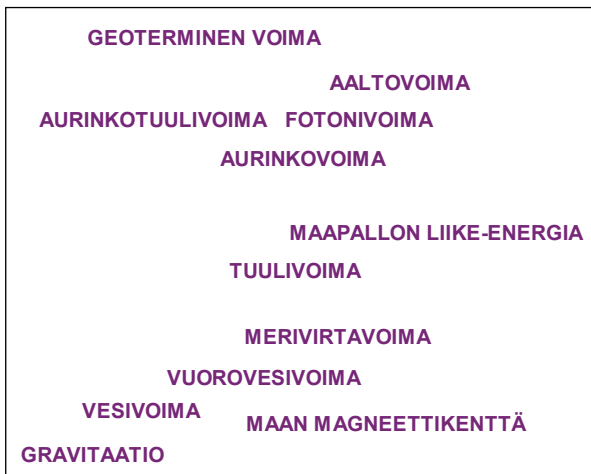
Sähkön tuotannossa Suomen bioenergiaresurssit eivät käytännössä riitä täydelliseen omavaraisuuteen, mutta 50 %:n omavaraisuus olisi mahdollista. Taulukko 4.5 esittää eräitä potentiaaleja verrattuna nykyiseen tilanteeseen eli 10 %:n biosähköosuuteen siten, että lisäys on 25 % Suomen sähköntuotannosta. Tämä riittäisi liikenneomavaraisuuteen sähköajoneuvotekniikalla.

Taulukko 4.5. Eräs mahdollisuus liikenneomavaraisuuden saavuttamiseen biosähkön ja sähköajoneuvojen avulla.

Lähde	Osuus Suomen sähkön kulutuksesta
30 % käyttämättömistä jätepuuresurssista	15 %
5 % hakkuuvarasta	1 %
50 % maatalouden jätekasveista	4 %
50 % mätäneivistä biojätteistä	2 %
Energiakasvit 200.000 ha	3 %
YHTEENSÄ	25 %

4.2 MUIDEN UUSIUTUVIEN POLTTOAINEIDEN RESURSSIT

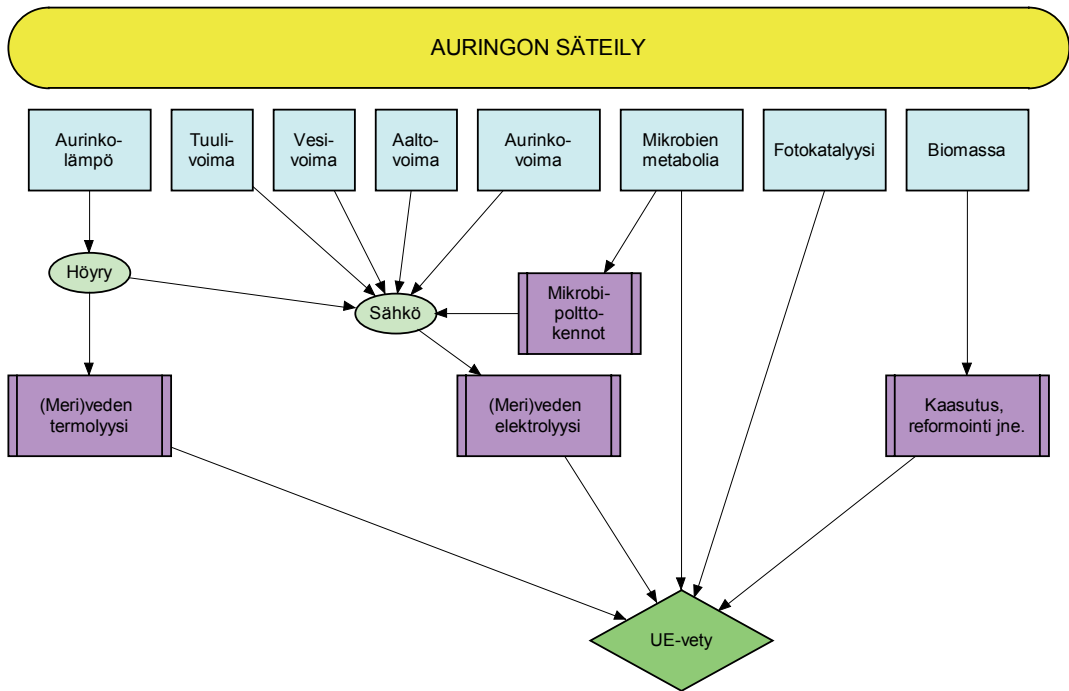
Globaali fotosynteesin kautta bioenergiaksi muuntuva aurinkoenergiaresurssi on vain 0,06 % aurinkoenergian koko vuotuisesta resurssista 3.900.000 EJ (UN 2000), joka on 9000-kertainen ihmiskunnan kaikkien energiankulutukseen verrattuna. Suoran aurinkoenergian lisäksi epäsuorat aurinkoenergian muodot tuulivoima, aaltovoima, vesivoima ja merivirtavoima tarjoavat kertaluokkia suuremman energiaresurssin kuin bioenergia ja lisäksi geoterminen resurssi on jopa aurinkoenergiaresurssia suurempi (UN 2000). Kaikkia näitä täydentää vielä vuorovesivoiman suuri resurssi sekä monet liikenteen erikoissovelluksissa, kuten avaruusliikenteessä, hyödynnettävät uusiutuvan energian lähteet (Kuva 4.5). Näitä kaikkia on käsitelty luvussa 2.



Kuva 4.5. Uusiutuvat liikenteen energianlähteet.

Globaalit uusiutuvan energian resurssit riittävät helposti ilman bioenergian käyttöä, ekologisesti kestävästi ja ilman kilpailua ruoan- tai muun tuotannon kanssa kattamaan kaiken ihmiskunnan energiantarpeen suurimmatkin ennakoituvat kasvuodotukset mukaan lukien. Energian resurssikriisin sijaan nykyiset energiaongelmat johtuvat amerikkalaisen arkkitehdin Buckminster Fullerin sanoin ”mielikuvituksen kriisistä”. Kykenemättömyys siirtyä pois lukittuneesta fossiilisesta energiataloudesta (lock-in-ilmiö) uusiutuvan energian taloudellisesta kannattavuudesta huolimatta on YK:n ilmastonmuutoksen asiantuntija- ja elimen IPCC:n mukaan keskeinen ilmastonmuutoksen torjunnan este (IPCC 2001; Lampinen 2000, 2002c, 2008b). Muutospyrkimyksiä kuitenkin on, ja myös fossiilienergiäteollisuuden sisällä. Esimerkkinä on Shellin energiaskenaario- ja tutkimustyö, josta eräs tulos on muokattuna kuvassa 4.6.⁴

⁴ Shellin pääjohtaja Mark Moody-Stuart oli yhdessä Italian ympäristöministeriön kansliapäällikkö Corrado Clinin kanssa vetämässä G8-maiden erittäin kunnianhimoista ja korkealaatuista uusiutuvan energian tavoiteohjelmaa (G8 2001), mutta Bushin hallinto esti sen hyväksymisen G8-maiden yhteisen politiikan osaksi ja YK:n Johannesburgin vuoden 2002 ympäristöhuippukokouksen esityslistalle.



Kuva 4.6. UE-vedyn tuotantoketjuja. Muokattu Gosselinin (2002) esityksestä. Aurinkoenergian lisäksi myös geoterminen energia ja vuorovesivoima tarjoavat UE-vedyn tuotantoketjuja, mutta niitä ei ole kuvaan sisällytetty.

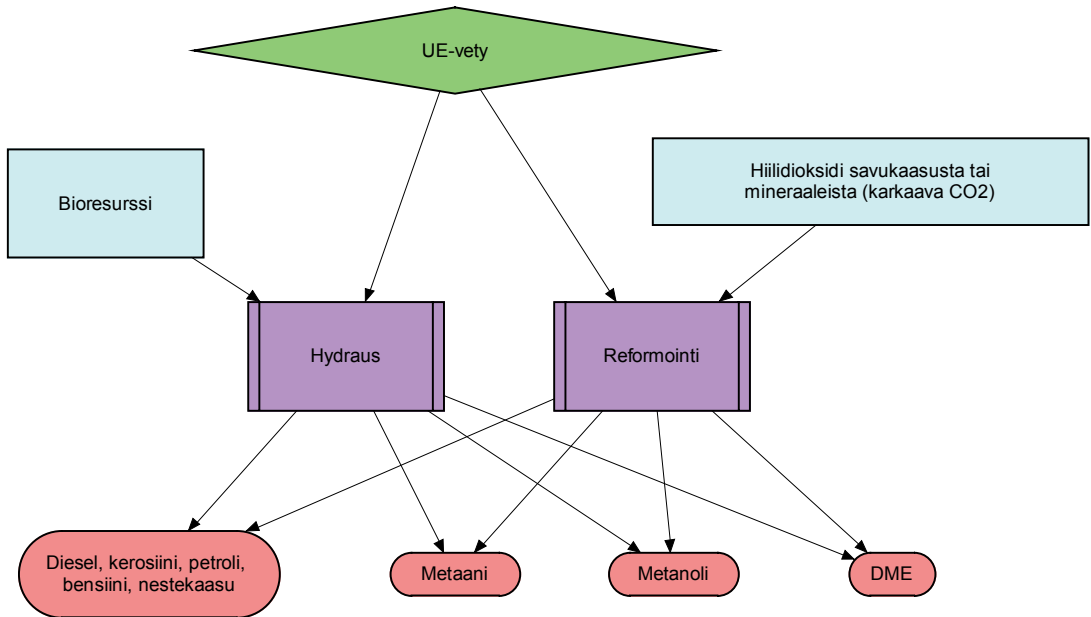
Vetyä voidaan käyttää sellaisenaan liikennepolttoaineena sekä polttomoottoreiden että polttokeinojen avulla. Kuvassa 4.6 mainittujen aurinkoenergiamuotojen avulla UE-vedyn resurssi on 100.000-kertainen liikenteen globaaliin energiankulutukseen verrattuna ja se kasvaa suuresti, mikäli geotermisen energian resurssit otetaan huomioon.

Vetykaasun suoran käytön vaihtoehtona vedyn avulla voidaan valmistaa synteettisiä polttoaineita (kuten synteettistä biobensiiniä, biodieseliä, bionestekaasua, biopetrolia ja bio-kerosiinia) hydraamalla tai metanolia ja monia muita polttoaineita reformoimalla (Kuva 4.7).

Kuvan 4.7 synteettisiä polttoaineita voidaan kutsua paitsi UE-polttoaineiksi myös biopolttoaineiksi, vaikka vety olisikin peräisin muista UE-lähteistä kuin bioenergiasta, sillä niissä käytetään bioenergiaressursseja. Reformoitujen polttoaineiden valmistuksessa käytettävä hiilidioksidi voi olla peräisin bioenergiälähteestä, mutta myös fossiilienergiälähteestä tai epäorgaanisista hiiltä sisältävistä mineraaleista kuten karbonaateista.

Uusiutuvien energiamuotojen käyttö liikenteessä lisää energiajärjestelmän varastointikapasiteettia, joka on erittäin merkityksellistä varsinkin silloin, kun merkittävä osa sähkön tuotannosta tehdään keskeytyvillä uusiutuvilla (tuuli-, aurinko-, aalto- ja vuorovesivoima) ja lämpökuormaan kytketyllä bioenergia-CHP:llä (Lund & Münster 2006). Esi-

merkiksi Tanskassa on tavoitteena saavuttaa pelkästään tuulivoimalla 50 % osuus sähkön tuotannosta. Koska keskeytyvien uusiutuvien energiamuotojen resurssi on kantalukuja suurempi kuin bioenergian, myös Suomessa, niin uusiutuvien energiamuotojen käyttö liikenteessä on yksi keinoista näiden energiamuotojen suuren käyttöosuuden saavuttamiseen.

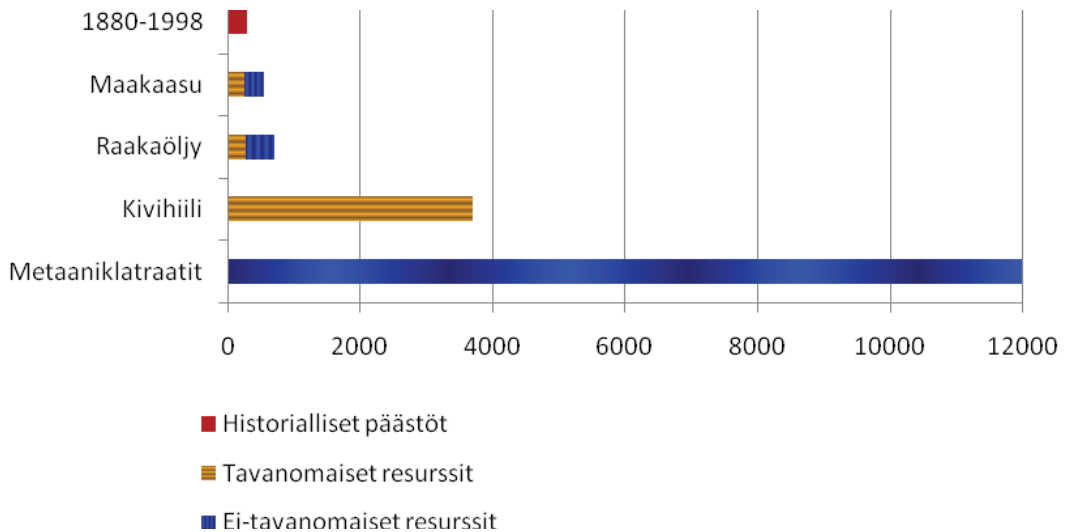


Kuva 4.7. UE-polttoaineiden tuotantoketjuja.

4.3 FOSSIILISTEN POLTTOAINEIDEN RESURSSIT

Vertailun vuoksi edellä käsiteltyihin uusiutuvien polttoaineiden resursseihin kuvassa 4.8 esitetään fossiilisten polttoaineiden resurssit, kuten YK:n hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC ne koosti kolmannessa arvioreportissaan vuonna 2001 (IPCC 2001). Kuvassa 4.8 on esitetty arviot fossiilisten polttoaineiden tavanomaisten resurssien ylärajasta sekä epätavanomaisista resursseista. Kivihiilen epätavanomaiset resurssit, kuten turve, on jätetty arvioimatta. Kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös ihmiskunnan fossiilisista polttoaineista vuoteen 1998 mennessä ilmakehään vapauttama hiili, josta puolet on peräisin kivihiilen, kymmenesosa maakaasun ja loput raakaöljyn poltosta. Se on samaa luokkaa kuin raakaöljyn ja maakaasun tavanomaiset resurssit. Joko raakaöljyn tai maakaasun tavanomaisten resurssien käyttö siis kaksinkertaistaa ihmiskunnan fossiiliset hiilipäästöt. Koska tavanomaiset maakaasun varannot eivät ole suuremmat kuin raakaöljyn, tavanomainen maakaasu ei pysty pitkällä tähtäimellä korvaamaan raakaöljyä, vaan se voi olla korkeintaan väliaikainen ratkaisu. Sekä raakaöljyn että maakaasun tavanomaiset resurssit ovat suhteellisen pienet eli niiden varassa ei liikenteen energiantarve voi pitkällä tähtäimellä olla. Mutta ottamalla huomioon myös ei-tavanomaiset raakaöljyn

ja maakaasun resurssit sekä kivihiilen ja metaaniklatraatit, fossiiliset resurssit sisältävät hiiltä yhteensä 17.000 Gt eli 60-kertaisesti ihmiskunnan historiallisiin päästöihin verrattuna, vaikka siitä puuttuvat huomattavat turveresurssit ja muut epätavanomaiset kivihiiliresurssit. On siis ilmeistä, että niiden avulla liikenteen energiantarve voitaisiin kattaa monien vuosisatojen ajan. Mutta yhtä ilmeistä on, että niiden käyttö olisi ilmastolle katastrofaalista.



Kuva 4.8. Fossiilisten polttoaineiden resurssit ja ihmiskunnan toistaiseksi fossiilisista polttoaineista ilmakehään vapauttama hiili gigatonneina. Muokattu lähteestä IPCC (2001). Kivihiilen epätavanomaisia resursseja ei arvioitu.

Sekä fossiilisilla että uusiutuvilla energiamuodoilla voidaan resurssien, teknologian ja talouden puolesta kattaa liikenteen energiantarve pitkälläkin tähtämellä. Valinta niiden välillä on puhtaasti poliittinen kysymys.

5

LIIKENTEEN UE-POLTTOAINEIDEN VALMISTUSMENETELMÄT

”The fuel of the future is going to come from fruit like that sumach out by the road, or from apples, weeds, awdust – almost anything... There is fuel in every bit of vegetable matter that can be fermented. There’s enough alcohol in one year’s yield of an acre of potatoes to drive the machinery necessary to cultivate the fields for a hundred years.”

- Henry Ford New York Timesissa (“Ford Predicts Fuel from Vegetation”) 20.9.1925

5.1 MEKAANISET JA MUUT FYSIKAALISET KONVERSIOMENETELMÄT

Mekaanisista menetelmistä osa tuottaa sekundäärienergiamuotoja ja osa ei. Mekaanisiin konversiomenetelmiin lukeutuvat erilaiset primääripolttoaineen kokoa pienentävät toimenpiteet kuten hakkuu, haketus, jauhatus ja pölytys. Niihin kuuluvat myös polttoaineiden tiheyttä kasvattavat toimenpiteet kuten paalaus, pelletöinti, briketöinti ja risutukkien valmistaminen. Näiden prosessien lopputuotteet luetaan edelleen primäärienergiamuodoiksi, koska lopputuote on kemiallisesti samaa ainetta kuin alkuperäinen tuote.

Esimerkki mekaanisesta konversiosta primäärienergiasta sekundäärienergiaksi on öljykasvien mekaaninen käsittely (Kuva 5.1a). Siihen kuuluu öljyä sisältävien kasvinosien puristus, joka tuottaa raakakasviöljyä, sekä raakakasviöljyjen laskeutus, joka sakkauttaa kiinteät osat ja tuottaa puhdasta kasviöljyä (PPO) (Kuva 5.8). PPO100 voidaan sellaisenaan tankata kasviöljykäyttöiseen ajoneuvoon (Kuva 6.8) tai sitä voidaan käsitellä edelleen monilla eri tavoilla, kemiallisesti (erityisesti vaihtoesteröinti, jonka laitteistoja on kuvassa 5.1b), termokemiallisesti (esim. suora nesteytys) ja mikrobiologisesti.

Mekaanisten konversioiden lisäksi on käytettävissä muita fysikaalisia (tai fysikaaliskemiallisia) konversioita sekundäärienergiaksi. Näitä ovat esimerkiksi emulsioiden, liuosten ja kaasuseoksien muodostaminen siten, että alkuperäiset aineet säilyvät ilman kemiallisia muutoksia sekä tislaukset, uutukset ja muut erotusmenetelmät, joilla erilaisten seosten komponentit saadaan erilleen. Myös olomuodon muutokset ovat fysikaaliskemiallisia konversioita.



Kuva 5.1. Öljynpuristin (a) sekä amerikkalainen biodieselin kotituotantolaitteisto FuelMeister ja tankkauslaite (b) opetuskäytössä Jyväskylän ammattikorkeakoulun bioenergiakeskuksessa Saarijärvellä. [2006]

5.2 MIKROBIOLOGISET KONVERSIOMENETELMÄT

5.2.1 Ruoansulatus

Ruoansulatuksen avulla ihmiset ja eläimet voivat hyödyntää ruoan ja rehun sisältäviä ravintoaineita, joista hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat ovat tärkeimpiä (Kuva 5.2). Ihminen pystyy hyödyntämään myös eräitä muita yhdisteitä kuten etanolia ja monet eläimet voivat käyttää useita muitakin ravintoaineita kuten selluloosaa ja hemiselluloosaa. Ruoansulatus koostuu mekaanisista, kemiallisista ja mikrobiologisista konversioista. Ruoansulatuksen ensi vaiheena on hampaiden ja kielen avulla tapahtuva mekaaninen pilkkominen. Ravinnon kemiallisen hajottamisen esikäsittelyä on suolahappoa hyödyntävä heikkohappohydrolyysi mahalaukussa, jota seuraa entsyymihydrolyysi ohutsuolessa. Paksusuolessa tapahtuu bakteerien aiheuttamia mikrobiologisia konversioita, jotka tuottavat suolistokaasua.

Kuva 5.2. Trilobiitit (vas. Ohioista löytnyt fossiili) ottivat mikrobiologisen ruoansulatuksen käyttöön runsaat 500 miljoonaa vuotta sitten. Dinosaurusten lantafossiilit (70 miljoonaa vuotta vanha kalifornialainen fossiili oik.) kertovat muinaisista ruokavalioista. [2009]



Ihminen tuottaa suolistokaasua noin litran vuorokaudessa, mistä noin 7 % on metaania ja noin 21 % vetyä. Suomalaisten suolistokaasuna vuosittain vapauttama metaanimäärä on noin 140.000 Nm³, mikä vastaa noin 2,8 miljoonaa henkilöautokilometriä. Vastavasti vetyä vapautetaan 420.000 Nm³, mikä vastaa noin 1,8 miljoonaa henkilöautokilometriä. Suolistokaasuresurssia ei kuitenkaan pystytä energiahyödyntämään.

Suolistokaasun lisäksi ruoansulatusjärjestelmä tuottaa jätteenä ulostetta ja virtsaa. Ulosteen määrä ihmisillä on noin 100–900 g päivässä, siten että suurin määrä syntyy runsaasti viljapitoista eli kuitua (eli selluloosaa ja hemiselluloosaa) sisältävää ruokaa syöville; tyypillinen suomalainen lihansyöjä ulostaa päivässä keskimäärin kiintoainetta noin 50 g (Turunen 2005). Kiintoaineesta on noin 30 % kuolleita bakteereja, 10–20 % rasvaa, 10–20 % epäorgaanisia aineita, 2–3 % proteiineja ja 30 % sulamattomia ravintoaineita, sappiväriaineita ja epiteelisoluja (Jeronen 1987). Virtsaa, josta vettä on 95 %, ihminen erittää noin 1–1,5 litraa päivässä (Nienstedt ym. 1991). Virtsan kautta poistuu kuivaainetta siis noin 50 g päivässä, josta ureaa on 15–30 g ja muihin yhdisteisiin lukeutuvat kreatiiniini, virtsahappo, mineraalit, rasvahapot, ketonit sekä hormonien ja lääkeaineiden hajoamistuotteet (Nienstedt ym. 1991). Tavallista liharuokavaliota nauttiva tuottaa siis ulosteen kautta noin 20 kg kuiva-ainetta vuodessa ja kasvissyöjä jopa 160 kg. Lisäksi kuiva-ainetta tuotetaan virtsan kautta noin 20 kg vuodessa. Olettaen, että kuiva-aine on metaanintuotantokyvyltään samanlaista kuin sian lietelanta (AD-Nett 2000), metaania saadaan minimissään 10 Nm³ vuodessa. Suomalaisten vuosittainen metaanintuotantopotentiaali on siis noin 50 Mm³, energiasisällöltään 500 GWh, mikä vastaa miljardia henkilöautokilometriä eli noin 50.000 auton vuotuista polttoainetarvetta olettaen ajomatkaksi 20.000 km/v ja keskilukulutukseksi 0,5 kWh/km (eli 6,4 bensa-l/100 km). Lampisen (2003) arvion mukaan 320 GWh eli 64 % tästä resurssista on hyödynnettävissä kunnallisten jätevedenpuhdistamoiden kautta. Mikäli ihmiset siirtyvät kuitupitoiseen kasvisruokavalioon, metaanin tuotanto moninkertaistuu. Ruotsissa ihmisten uloste- ja virtsajätteen liikennekäyttö on yleistä. Esimerkiksi kuvan 5.3 Bodenissa ja kansikuvan 7 Tukholmassa biokaasu on kokonaan peräisin ihmisten ulosteesta ja virtsasta. Monissa Ruotsin kunnissa biokaasun tuotantoon käytetään näiden lisäksi biojätteitä. Suomessa kyseistä resurssia ei vielä liikenteessä käytetä. Virtsan ureaa voitaisiin käyttää dieselmoottorien aktiivisissa NO_x-puhdistuslaitteissa, mutta nykyään urea valmistetaan maakaasulla synteettisesti (Kuva 7.19).



Kuva 5.3. Ihmisten ulosteesta ja virtsasta tehtyä biokaasua käytetään liikennepolttoaineena lukuisissa Ruotsin kunnissa, näissä esimerkeissä talvella Bodenissa Ruotsin Lapissa Volvo-jätetrekassa (a) ja VW Transporter -pakettiautossa (b). [2009]

Huolimatta huomattavasta jätteen tuotannosta, ihmisen ruoansulatuselimistön hyötysuhde on hyvin korkea, n. 99 % hiilihydraateille, 95 % rasvoille sekä öljyille ja 92 % proteiineille (Smil 1991). Lisäksi proteiineja menetetään virtsan kautta noin 20 %. Ot-

tamalla huomioon ruoansulatusjärjestelmän häviöt ihmisen hyödyntämä energiasisältö on 17 MJ/kg sekä hiilihydraateille että proteiineille ja 38 MJ/kg rasvoille. Etanolin koko energiasisältö voidaan hyödyntää maksassa vain, mikäli sitä juodaan korkeintaan 0,1 g ihmisruumiin kiloa kohti tunnissa. Keskikokoiselle ihmiselle se tarkoittaa noin 8 ml/h (2 cl vodkaa/h) eli 50 watin polttoainetehoa. Ravintoaineiden ja eräiden ruoka-aineiden ja ihmisen aineenvaihdunnan lopputuotteiden energiasisältöjä on listattu taulukossa 5.1.

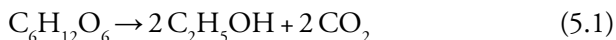
Taulukko 5.1. Eräiden ravintoaineiden, ruoka-aineiden ja ihmisen aineenvaihdunnan lopputuotteiden energiasisältöjä [MJ/kg HHV] (Smil 1991). Hyötysuhde tarkoittaa eläinperäisen ruoan tuotannon hyötysuhdetta rehusta.

Ravintoaine	Yhteensä		Käytettävissä	
Lipidit (rasvat ja öljyt)	39,0		38,0	
Etanoli	29,6		3,0–29,6	
Proteiinit	23,0		17,0	
Hiilihydraatit	17,0		17,0	
Ruoka-aine	Raaka	Hyötysuhde	Keitetty	Hyötysuhde
Kasviöljyt	37,0		37,0	
Voi	30,0		30,0	
Taloussokeri	16,1		16,1	
Viljakasvien jyvät	15,2–15,4		5,0–10,0	
Nisäkkäiden liha	5,6–23,1	5–10 %	5,6–18,0	2–5 %
Lintujen liha	4,9–13,6	10–15 %	6,9–13,3	5–7 %
Lintujen munat	6,8–8,0	12–17 %	6,8–8,0	
Kalojen liha	2,9–9,3		2,9–7,6	
Perunat	3,2–4,8		3,2–4,9	
Hedelmät	1,5–4,0		1,5–4,0	
Vihannekset	0,6–1,8		0,6–1,5	
Maidot	1,5–2,9	14–18 %	1,5–2,9	
Alkoholijuomat	1,7–12,3			
Metabolian lopputuote	Raaka		Kuiva	
Ihra	31,0–37,0		36,0–38,0	
Lihäs	5,9–9,5		23,8	
Uloste	1,8–3,0		7,2–12,0	
Virtsa	0,1–0,2		(urea 10,6)	

Taulukossa 5.1 on myös mainittu hyötysuhde, jolla eläinperäistä ruokaa syntyy rehusta. Verrattuna kasvisruokaan eläinperäinen ruoka aiheuttaa 82–98 % energiahäviön eli sen tuottaminen karjataloudessa vaatii 5–50 kertaa suuremman pinta-alan kuin kasvisruoan tuottaminen maataloudessa.

5.2.2 Käyminen (alkoholifermentaatio)

Vaikka käymisprosessia on osattu soveltaa tuhansia vuosia, sen mikrobiologinen luonne alkoi paljastua vasta Louis Pasteurin tutkimuksissa 1850-luvulla. Fermentaatio on mikrobiologinen prosessi, jossa mikro-organismien (erityisesti hiivasienet ja bakteerit) tuottamat entsyymit katalysoivat biokemiallisia reaktioita. Fermentaatio voi tapahtua hapen läsnä ollessa eli aerobisesti tai hapettomissa olosuhteissa eli anaerobisesti. Tunnetuin ja käytetyin esimerkki on käyminen eli alkoholifermentaatio, jossa yleisin päälopputuote on etanoli. Glukoosin ja muiden heksoosien alkoholikäyminen toteuttaa päätuotteen osalta reaktion



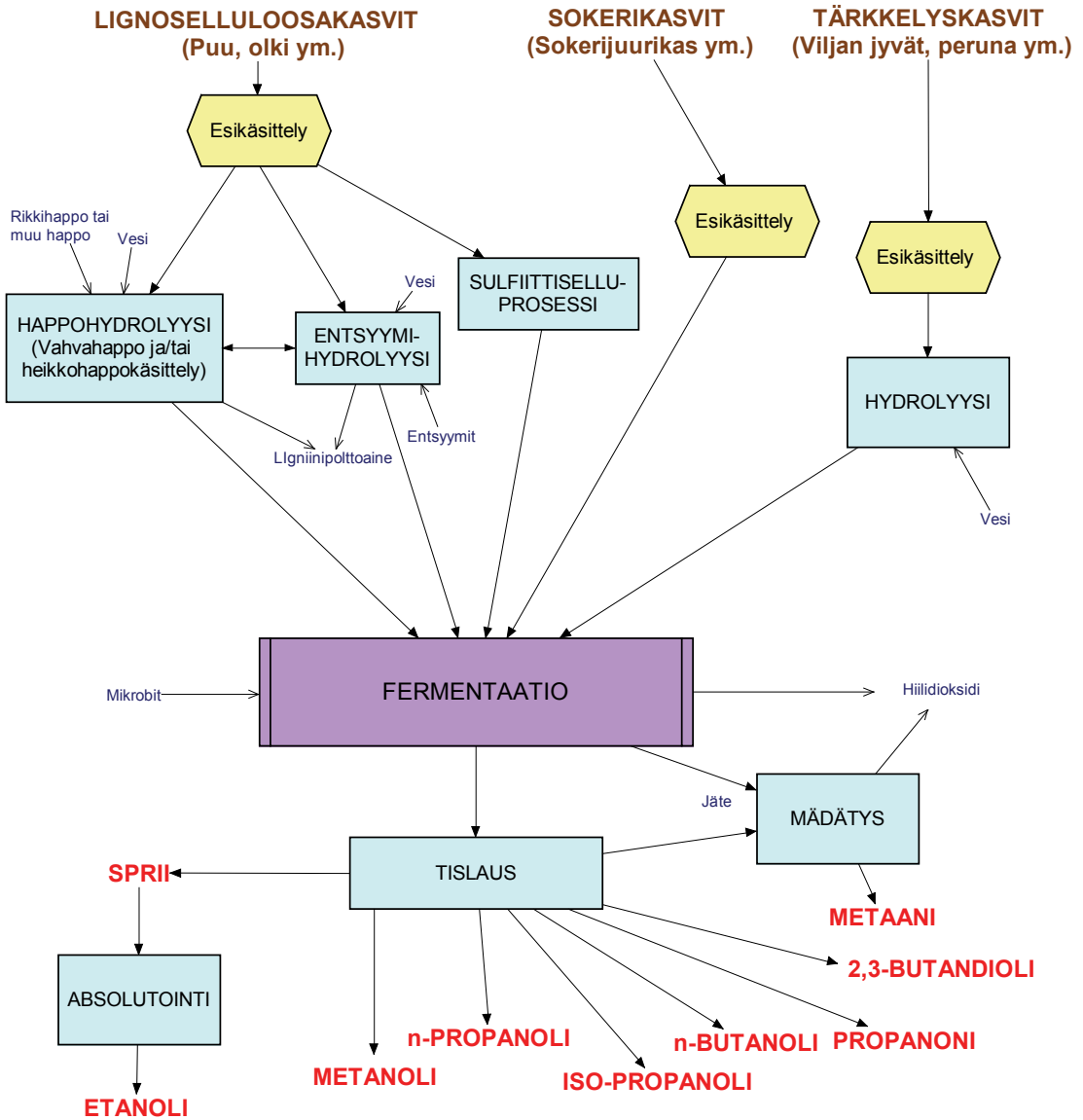
Monia muitakin kemikaaleja on mahdollista tuottaa, erityisesti alkoholeja ja karboksyylihappoja, mutta myös ketoneja. Taulukko 5.2 esittää liikennepolttoaineiksi soveltuvien yhdisteiden tuotantomahdollisuuksia.

Taulukko 5.2. Eräitä liikennepolttoaineeksi sopivien yhdisteiden tuotantomahdollisuuksia fermentaatiolla (Leeper ym. 1991, Brown 2003).

Tuote	Lähtöaine	Mikro-organismi
Etanoli (EtOH)	Monet sokerit	<i>Kluyberomyces sp.</i> , <i>Candida utilis</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Zymomonas mobilis</i>
n-propanoli (NPA)	Glukoosi	<i>Clostridium fallax</i>
Isopropanoli (IPA)	Monet sokerit	<i>Clostridium fallax</i>
n-butanoli (NBA)	Monet sokerit ja muut yhdisteet	<i>Clostridium sp.</i>
2,3-butandiol	Monet sokerit ja hapot	<i>Aerobacter aerogenes</i> , <i>Bacillus polymyxa</i> , <i>Klebsiella oxatoca</i> , <i>Klebsella pnauminiae</i>
Propanoni	Monet sokerit	<i>Clostridium sp.</i>

Normaalisti fermentaatio tuottaa useita lopputuotteita, jotka erotetaan tislamalla (Kuva 5.4). Kaikkia taulukon 5.2 yhdisteitä voi muodostua päätuotteena ja lisäksi pieniä määriä metanolia voi syntyä sivutuotteena. Periaatteessa fermentaatio, jossa metanoli olisi päätuotteena, voisi olla mahdollinen, mutta käytännössä sitä ei ole onnistuttu toteuttamaan (Klass 1998). Termodynaamisesti metanolireitti on epäsuosiollinen. Alkoholien sekoitustakin voidaan käyttää liikennepolttoaineena tai hapettajana, jolloin niitä ei tarvitse tislata erilleen. Polttoaine-etanolia valmistettaessa sivutuotteet ovat hyödyllisiä, koska ne toimivat luonnollisina denaturointiaineina. Propanoli ja butanoli ovat hyödyllisiä sivutuotteita myös siksi, että ne vähentävät etanolin ja metanolin vedenerottumisominaisuuksia.

Käymisreaktion lähtöaineeksi soveltuvat parhaiten viljelykasvit, joilla on korkea sokeripitoisuus, kuten sokerijuurikas, tai tärkkelyspitoisuus, kuten viljat. Myös muita resursseja, kuten puuta ja olkea, voidaan hyödyntää happo- tai entsyymiesikäsittelyn jälkeen. Prosessissa mikrobien (hiivat tai bakteerit) tuottamat entsyymit pilkkovat orgaanista ainetta muodostaen lopputuotteena etanolia. Taulukossa 5.3 on annettu joidenkin bioenergiaressurssien tyypillisiä etanolisaantoja.



Kuva 5.4. Alkoholifermentaatiopohjainen liikennebiopolttoaineiden valmistus.

Taulukko 5.3. Eräiden bioresurssien etanolisaantoja alkoholikäymisessä litroina kenttäkosteudessa olevaa resurssitonnia kohti (Klass 1998).

Bioresurssi	Saanto [l/t]
Kauran jyvät	330
Ohran jyvät	265
Rukiin jyvät	329
Vehnän jyvät	355
Sokerijuurikas	88
Sokeriruoko	160–187
Maissi	355–370
Omenat	64
Viinirypäleet	63
Perunat	96–143
Riisi	332
Selluloosa	259

Sokerien ja tärkkelyksen fermentaatiota edeltää hydrolyysi eli veden avulla tapahtuva hajottaminen. Teoreettisesti 100 kg:sta tärkkelystä saadaan 56,8 kg eli 72 litraa 100 % etanolia ja jo vuonna 1935 Rajamäellä saavutettiin tulos 54,6 kg (69 l) eli 96,1 % teoreettisesta maksimista (Vehviläinen 1963). Ruotsissa on pitkät perinteet liikennepolttoaineena käytettävän etanolin valmistuksesta (Kuva 5.5). Sitä käytetään bensiiniin sekoitettuna E85:na tai E5:na ja dieselpolttoaineena E93-E95.

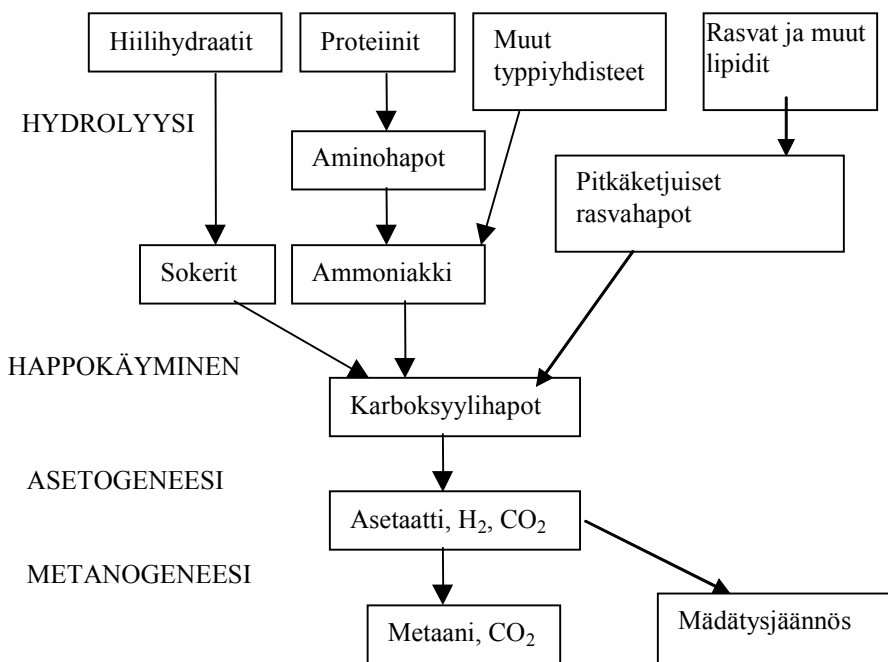


Kuva 5.5. Agroetanol-yhtiön viljaperäisen liikenne-etanolin tuotantolaitos Norrköpingissä Ruotsissa. Vuosituotanto on 210 miljoonaa litraa. Sivutuotteena saadaan 175.000 tonnia proteiinirikasta rehua, jolla korvataan ulkomaisen soijarehun tuontia. [2006]

Mikäli lähtötuote on lignoselluloosaa, tavanomainen hydrolyysi ei riitä, vaan on käytettävä happo- tai entsyymihydrolyysia tai niitä molempia (Wyman 1996, Luku 2.25). Näitä prosesseja on kutsuttu myös sokeroinniksi. Happohydrolyysissä voidaan käyttää vahvoja tai heikkoja happeja. Sulfiittiselluloproessissa osa selluloosasta sokeroituu valmiiksi ja sokerit voidaan ottaa talteen jäteliemestä. Ruotsissa on pitkät perinteet myös puuperäisen liikenne-etanolin valmistuksella ja Kanadassa liikenne-etanolia valmistetaan oljesta.

5.2.3 Mädätys (happofermentaatio)

Mädätyksellä eli anaerobisella happofermentaatiolla (Kuva 5.6) voidaan tuottaa bioenergiaa nopeasti hajoavista eli mätänevistä biojätteistä kuten lannasta, teurastusjätteistä, teollisuuden ja yhdyskuntien biojätteestä sekä jätevedestä. Myöskin peltokasveja ja kasvijätteitä voidaan hyödyntää. Lietteen mädätys tapahtuu hapettomissa oloissa tiiviissä reaktorissa, ja se perustuu anaerobisten bakteerien orgaanisen aineen hajotustoimintaan. Käsittelyssä syntyy biokaasua, joka sisältää pääasiassa metaania sekä hiilidioksidia. Biokaasusta voidaan tuottaa lämpöä ja sähköä tai puhdistuksen jälkeen liikennepolttoainetta metaaniajoneuvoihin ja vetyajoneuvoihin. Vaikka mädätysprosessi on mikrobiologisesti monimutkainen, se on teknisesti yksinkertainen verrattuna termokemiallisiin prosesseihin, koska se toimii normaalipaineessa ja lähes normaalilämpötilassa. Siitä syystä se on mahdollinen suuren kokoluokan lisäksi myös pienessä kokoluokassa: yleisesti maatilakokoluokassa, mutta jopa omakotitalokohtaisena. Se on siten eräs hajautettuun liikennepolttoaineiden valmistukseen soveltuvista teknologioista.



Kuva 5.6. Mädätyksen prosessikaavio (Lampinen 2004a). Mädätysjäännös on erinomaista lannoitetta, jossa kaikki mädätetyn resurssin ravinteet, mukaan lukien typpi, ovat tallessa.

Prosessin ensimmäinen vaihe on veden avulla tehtävä lähtöaineiden pilkkominen eli hydrolyysi, jossa haponmuodostajabakteerit katalysoivat erityisesti pitkäketjuisimpien molekyylien hajoamista erittämiensä entsyymien avulla. Sen lopputuotteet ovat sokereita, aminohappoja ja rasvahappoja. Aminohapot hajoavat edelleen ammoniakiksi. Hydrolyysi edellyttää, että syöttömateriaalin vesipitoisuus on oltava yli 50 % ja useimmissa prosesseissa se on yli 90 %. Yleensä vesi on valmiiksi mukana syöttömateriaalissa, esi-

merkiksi jäteveden puhdistamoilla ja eläinten lietalannassa. Kuivaprosesseissa, joita Suomessa ei vielä ole käytössä, voidaan hyödyntää vaikkapa pelkkiä olkia tai energiakasveja, mutta silloin vettä on lisättävä lähtöaineisiin. Vesi voidaan kierrättää, jolloin puhtaan veden kulutus jää vähäiseksi.

Prosessin toisessa vaiheessa hydrolyysituotteet hajoavat happokäymisen kautta lyhytketjuisiksi karboksyylihapoiksi kuten etikkahappo, propionihappo ja voihappo. Happokäymistä kutsutaan myös happofermentaatioksi ja mätänemiseksi. Kunkin hydrolyysituotteen hajoamista katalysoivat niihin erikoistuneet anaerobiset bakteerit.

Prosessin kolmannessa vaiheessa asetogeneesissä asetaattia tuottavat eli asetogeneettiset bakteerit hajottavat karboksyylihapot asetaatti-ioneiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi.

Prosessin viimeisessä vaiheessa metanogeneettiset bakteerit tuottavat metaania asetaatti-ioneista tai vedystä ja hiilidioksidista. Noin 70 % metaanista muodostuu asetaatti-ioneista ja 30 % vedystä hiilidioksidi toisena lopputuotteena. Mikäli hajotettavassa materiaalissa on mukana sulfaatteja, lopputuotteena muodostuu lisäksi rikkivetyä sulfaatinpelkistäjäbakteerien toiminnan tuloksena. Vedyn reaktiot voidaan estää, jolloin lopputuotteena saadaan vetyä (Ronkainen ym. 2005). Se on eräs vaihtoehtoista uusiutuvan vedyn tuotantoon tulevaisuuden mahdollisessa vetytaloudessa.

Prosessia katalysoivat bakteerit jaetaan kolmeen ryhmään kasvulle optimaalisen lämpötilan mukaan. Psykrofilisille bakteereille optimilämpötila on 0–15 °C, mesofilisille 30–45 °C ja termofilisille 50–60 °C. Biokaasureaktoreiden lämpötila pyritään pitämään mahdollisimman vakiona optimilämpötilassa reaktorilämmittimen avulla. Suomessa käytetään pääasiassa mesofiilistä aluetta. Termofiilisen alueen käyttö lienee tulevaisuudessa yleistä, sillä se nopeuttaa prosessia ja tarjoaa samalla korkeatasoisen hygienisoinnin. Sen haittana on suurempi lämmön kulutus ja vaativampi säätö.

Biokaasuprosessi on energian nettotuottaja, sillä biokaasussa olevan metaanin energia on mesofiilisessä prosessissa luokkaa 10-kertaisesti suurempi kuin prosessin lämmitykseen, sekoitukseen ja pumppaukseen tarvittava energia. Lisäksi energia saadaan erityisen arvokkaassa muodossa. Metaanin tehollinen energiasisältö 50 MJ/kg on suurempi kuin minkään kemiallisen polttoaineen vetyä lukuun ottamatta. Kaasuna se kuitenkin vie tilavuutta paljon nestemäisiä ja kiinteitä polttoaineita enemmän. Yksi kuutio metaania vastaa energiasisällöltään 1,13 litraa bensiiniä. Reaktorin lämmitykseen kuluu luokkaa 10 % tuotetusta energiasta. Biokaasun korkean laadun vuoksi sitä ei kannata käyttää reaktorin lämmitykseen, vaan sen sijaan puuta.

Kun biokaasua käytetään sähkön ja lämmön yhteistuotantoon hiilidioksidia ei tarvitse poistaa, mutta rikkivety pitää poistaa. Se voidaan tehdä reaktorin yläosassa hyväksikäyttäen alkuainerikkiä tuottavia bakteereita tai vaihtoehtoisesti se voidaan poistaa vesipesussa. Liikennekäytössä myös hiilidioksidi pitää pääosin poistaa. Se voidaan tehdä vesipesulla, joka samalla poistaa rikkivedyn. Tai se voidaan pestä muulla liuoksella, adsorboida aktiivihilleen, absorboida kemiallisesti, suodattaa kalvoilla tai tislata kryotekniikalla (IEA 2000, Persson ym. 2006). Lisäksi tuotettu kaasu, jossa metaanipitoisuus on 85–98 % kompressoitua ajoneuvoihin 200 ilmakehän paineeseen. Mikäli biokaasua ei kuluteta tuotantopaikassa, se voidaan kuljettaa rekkojen avulla kuten muitakin polttoaineita. Esimerkiksi Tukholmassa jätevedenpuhdistamossa tuotettu liikennebiokaasu kuljetetaan

huoltoasemille rekoilla. Mutta lisävaihtoehtona on putkikuljetus, joka kiinteille ja nestemäisille polttoaineille ei ole mahdollinen. Esimerkiksi Malmössä liikennebiokaasua siirretään maakaasuverkossa, Göteborgissa raakaa biokaasua kaupunkikaasuverkossa ja Kristianstadissa on rakennettu liikennebiokaasulle oma verkko.

Kaasumaisen lopputuotteen lisäksi biokaasuprosessi tuottaa kiinteän mädätysjäännöksen, joka on erinomaista lannoitetta. Prosessi ja kaasun energiakäyttö eivät lainkaan kuluta alkuperäisen syöttömateriaalin ravinteita, vaan päinvastoin saattaa ne kasveille helpoiten saatavaan vesiliukoiseen muotoon kuten typpi ammonium-ioneina. Lisäksi patogeenipitoisuus putoaa merkittävästi. Esimerkiksi Erkki Kalmarin liikennebiokaasua tuottavalla maatilalla Laukaassa (Lampinen 2004c, Kuvat 5.27 ja 2.19c) mesofilisen prosessin mädätysjäännöksen patogeenipitoisuus alittaa ihmisruoaksi tarkoitetulle jauhelihalle säädetyt raja-arvot. Ja hygienisointia voitaisiin edelleen tehostaa termofilisen prosessin avulla. Biokaasuprosessilla saavutettava hygienisointitaso on ylivoimainen ilmastukseen ja kompostointiin verrattuna. Kompostointiprosessin haittoina biokaasuprosessiin verrattuna ovat huonon hygienisoinnin aiheuttamien hajuhaittojen ja lannoitekäyttörajoitusten lisäksi merkittävä ravinteiden menetys, energian kulutus sekä ilmastukseen että sekoitukseen ja jätteen energiasisällön hukkaaminen. Siten kompostointia voidaan pitää hyvin perusteltuna nopeasti hajoavan biojätteen käsittelyratkaisuna vain talokohtaisissa järjestelyissä haja-asutusalueilla.

Biojätteen mädätyksellä saavutetaan monipuolisia ekologisia etuja verrattuna muihin biopolttoaineiden tuotantomenetelmiin ja muihin biojätteen käsittelymenetelmiin:

1. Mädätys säilyttää ravinteet selvästi parhaiten biojätteen eri käsittelymuodoista eli se mahdollistaa jätteen materiaalikäytön lannoitteena jätehierarkian ensisijaisena jätteenkäyttömuotona. Kaikki muut biojätteen käsittelymenetelmät hukkaavat merkittävän osan ravinteista, erityisesti typen osalta. Typpilannoitteiden valmistus on kaikkein energia- ja päästöintensiivisintä lannoitevalmistusta ja siten keinolannoitteiden välttäminen alentaa merkittävästi viljelyn elinkaaren päästöjä. Maatiloilla lannan ravinteiden mahdollisimman tehokas käyttö parantaa tilan kannattavuutta, koska vähennetään ostolannoitteiden hankintoja. Mädätysjäännös myös ylläpitää maaperän kuntoa ja estää eroosiota ravinnevaikutuksensa lisäksi, toisin kuin polton tuhka.
2. Mädätysjäännöksessä merkittävä osa tuestä on vesiliukoisessa, kasvien helposti käytettävässä muodossa, mikä vähentää viljelyn typpioksiduulipäästöjä ja typpiyhdisteiden vesistö päästöjä verrattuna keinolannoitteiden käyttöön.
3. Mädätysprosessia käytettäessä metaanipäästöt vähenevät muihin käsittelymenetelmiin verrattuna, sillä metaani hyödynnetään suljetussa prosessissa energiana. Sen sijaan useissa muissa menetelmissä biojätettä varastoidaan pitkiä aikoja (esim. lantaa varastoaltaissa), jolloin se tuottaa merkittäviä metaanipäästöjä. Myös keskitetty kompostointi tuottaa kasvihuonekaasupäästöjä.
4. Mädätysprosessi tuottaa energiaa metaanina, joka on moottoriteknisesti erityisen korkeatasoinen yli 140-oktaaninen polttoaine eli sitä voidaan käyttää erityisen suurella hyötysuhteella ja alhaisilla päästöillä liikenteen sekä liikkuvien työkonien – kuten traktorien, leikkuupuimurien, trukkien ja kaatopaikkajyrien – polttoaineena. Tällöin sillä korvataan fossiilisia polttoaineita ja vältetään niiden käytöstä aiheutuvat päästöt. Maatiloilla se mahdollistaa tuotetun ruoan fossiiliihiilisisällön merkittävän alentamisen eli ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen merkittävän alentamisen. Lisäksi metaania voidaan hyödyntää myös sähkön ja lämmön

yhteistuotantoon sekä keskitetysti että hajautetusti, jolloin myös korvataan fossiilisia polttoaineita päästöineen. Polttoon lukuun ottamatta muut Suomen markkinoilla olevat biojätteen käsittelymenetelmät hukkaavat jätteen energiasisällön kokonaan. Poltto mahdollistaa käytännössä biojätteen energiahyödyntämisen vain lämpönä ja suurissa laitoksissa lisäksi pieneltä osin sähköinä, mutta mahdollisuus liikenne- ja työkonepolttoaineiden valmistukseen menetetään. Mädätys soveltuu erityisen hyvin kosteiden jätteiden käsittelyyn, kun taas poltto edellyttää energiaa runsaasti vievää kuivausta, joten elinkaaren energiatehokkuudessa mädätys on parempi (Myllymaa ym. 2008a-b). Biojäte on polttoprosessin kannalta erityisen likainen polttoaine, joka merkitsee alhaista hyötysuhdetta ja lyhyttä huoltoväliä. Poltto hävittää suurimman osan jätteen materiaalihyödyntämispotentiaalista eli lannoitearvosta.

5. Biokaasun liikenne alentaa erittäin merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna muiden biopolttoaineiden ja fossiilisten polttoaineiden käyttöön (Luku 7.2).
6. Biokaasun liikennekäyttö alentaa erittäin merkittävästi typen ja rikin oksidien ja pienhiukkasten päästöjä sekä melua verrattuna fossiilisten polttoaineiden polttoon (Lampinen 2003, 2005c).
7. Mädätys vähentää merkittävästi lannan ja muiden biojätteiden hajuhaittoja muihin käsittelymenetelmiin verrattuna, sillä prosessi on suljettu ja hajottaa hajua aiheuttavia yhdisteitä. Lannan hajuhaittojen väheneminen lisää maatalouden hyväksyttävyyttä ja toimintaedellytyksiä.
8. Suomen biojätteiden käsittelymarkkinoita dominoivassa kompostoinnissa jätteen energiasisältö jätetään kokonaan hyödyntämättä ja lisäksi käytetään energiaa käsittelyprosessiin, mm. ilmastukseen ja sekoitukseen. Koska kyseinen energia on käytännössä usein fossiilista, siitä aiheutuu kasvihuonekaasupäästöjä.
9. Mädätyksessä jätemassan määrä vähenee (osan poistuessa metaanina ja hiilidioksidina) ja taudinaiheuttajien määrä vähenee oleellisesti.
10. Mädätys mahdollistaa maatalojen energiaomavaraisuuden, millä on paikallisesti suuri merkitys.
11. Mädätys mahdollistaa myös maatalojen energiayliomavaraisuuden eli tulot polttoaineiden, sähkön ja lämmön sekä tulevaisuudessa mahdollisesti myös hiilidioksidisertifikaattien ja vihreän energian sertifikaattien myynnin kautta. Energian huoltovarmuus lisääntyy paitsi maatilalla myös sen ympäristössä. Maatiloille saadaan uusia tulonlähteitä ja maatalojen teknologiaa palvelemaan syntyy uutta yritystoimintaa. Molemmat ovat tärkeitä tavoitteita erityisesti nykyisessä kiristyneessä kulujen kasvun tilanteessa.
12. Mädätyksen laaja käyttö maataloudessa sekä kuntien ja teollisuuden biojätteiden käsittelyssä merkitsisi etuja koko valtakunnan tasolla, koska se edistää ympäristön suojelua, energian huoltovarmuutta, työllisyyttä ja terveysongelmien vähentämistä sekä parantaa kriisivalmiutta ja turvaa ruoantuotannon kriisitilanteissa, jolloin yleinen sähkön ja polttoaineiden jakelu keskeytyy tai katkeaa. Nykyään ko. teknologiaa käytetään Suomessa äärimmäisen vähän, vain 0,01 %:lla maataloista ja 4 %:ssa kunnista (Kuittinen & Huttunen 2009).

Näistä syistä kuntien biojätteistä valmistettua biokaasua käytetään Ruotsissa liikennepolttoaineena kymmenissä kunnissa, tankkauspaikkoja on yli 100 ja sekä uusien että käytettyjen ja konvertoitujen biokaasuautojen markkinat ovat suuret (Lampinen 2008a, Wahlström 2009, Goldman 2009, Kuva 5.7).



Kuva 5.7. Bromman jätevedenpuhdistamolla Tukholmassa on vuodesta 1996 lähtien valmistettu liikennebiokaasua kaupunkilaisten ulosteista ja virtsasta. Sitä myydään monen huoltoasemaketjun jakeluasemilla Tukholman alueella, mm. jätevedenpuhdistamon vieressä. [2005]

5.2.4 Mikrobiologinen vedyntuotanto

Jo 1800-luvun lopulla havaittiin, että sinilevät eli syanobakteerit pystyvät tuottamaan aineenvaihdunnassaan vetyä auringon säteilyn energialla eli ne hajottavat vettä biofotolyysiprosessissa. Mikrobiologisia (bioteknisiä) eli mikrobien metaboliaa hyväksi käyttäviä vedyntuotantomekanismeja tunnetaan nykyisin useita muitakin ja syanobakteerien lisäksi monet muutkin mikrobit tuottavat metaboliassaan vetyä (Taulukko 5.4). Suoran ja epäsuoran biofotolyysin etuna on, että ne käyttävät (meri)vettä ja aurinkoenergiaa, joita molempia on käytännössä rajattomasti saatavissa ja siten niiden avulla olisi resurssimielessä helppo tuottaa jopa kaikki ihmiskunnan tarvitsema energia (Milne ym. 2001). Toistaiseksi nämä teknologiat eivät ole kaupallisessa tuotantokäytössä.

Taulukko 5.4. Mikrobiologisia vedyntuotantomekanismeja. Muokattu: Ronkainen ym. 2005.

Mekanismi	Periaate
Suora biofotolyysi (viherlevät)	$2 \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Valoenergia}} 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$
Epäsuora biofotolyysi (syanobakteerit)	$6 \text{H}_2\text{O} + 6 \text{CO}_2 \xrightarrow{\text{Valoenergia}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 9 \text{O}_2$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Valoenergia}} 12 \text{H}_2 + 6 \text{CO}_2$
Vesi-kaasu vaihtoreaktio (fotoheterotrofiset bakteerit)	$\text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \longrightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g})$
Valofermentaatio	Esimerkiksi $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Valoenergia}} 12 \text{H}_2 + 6 \text{CO}_2$
Pimeäfermentaatio (fermentatiiviset bakteerit)	Esimerkiksi $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{CH}_3\text{COOH} + 4 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \longrightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2$

5.2.5 Mikrobiologiset polttokennot ja mikrobiologinen elektrolyysi

Bioenergiaresurssi voidaan muuntaa suoraan sähköksi mikrobiologisilla polttokennoilla (MFC), joissa mikrobien aineenvaihduntansa yhteydessä orgaanisten yhdisteiden hajottamisen seurauksena luovuttamat elektronit ohjataan ulkoisen virtapiirin kautta (Niessen ym. 2004, Topcagic & Minteer 2006), jolloin jopa 80-90 % primäärienergiasta voidaan muuttaa sähköksi (Kaaro 2007). Tämän myös bioparistoiksi kutsutun teknologian toimintaperiaate on tunnettu jo 1960-luvulla (Williams 1966, Braun 1967), mutta se on toistaiseksi edelleen laboratorioasteella. Hyvin monenlaisten bioenergiamuotojen käyttö on osoitettu mahdolliseksi, esimerkiksi useat sokerit, tärkkelys, asetaatti, etanoli, yhdyskuntien jätevesi, sikaloiden lietelanta ja vesistöjen pohjasedimentit (Drapcho ym. 2008b) eli tämä teknologia tarjoaa uuden mahdollisuuden erilaisten jätteiden käsittelyyn. Lisäksi mikrobiologiset polttokennot voivat saada energiansa myös auringon säteilystä (Drapcho ym. 2008b). Mikäli mikrobiologisia polttokennoja tulevaisuudessa käytetään liikenteessä sähköajoneuvoissa, polttoaineiksi kävisivät monet nestemäiset biopolttoaineet ja myös monien kiinteiden polttoaineiden vesiliuokset, periaatteessa jopa jätevesi. Osa biopolttoaineista, esimerkiksi biokaasu ja metanoli, voidaan hyödyntää myös perinteisemmällä sähkökemiallisilla metaani- ja metanolipoltttokennoilla.

Mikrobiologisille polttokennoille käänteinen reaktio eli mikrobiologinen elektrolyysi tarkoittaa yhdisteiden tuottamista mikrobien aineenvaihdunnan avulla elektroneja reaktoriin syöttämällä. Se on uusi menetelmä, joka todennettiin ensimmäisen kerran vuonna 2005 vedyn tuotannossa, jolloin prosessia kutsutaan elektrohydrogeneesiksi (Logan ym. 2008). Elektrometanogeneesi puolestaan tarkoittaa metaanin tuottamista sähkön avulla. Se on laboratoriossa todennettu ensi kertaa vuonna 2008 arkkibakteerin *Methanobacterium palustre* avulla, jolloin metaania tuotettiin etikkahaposta 80 % energiahyötysuhteella (Cheng ym. 2009). Mikäli nämä teknologiat saadaan kaupallistettua, niiden avulla voidaan tuottaa vetyä ja metaania esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoiman avulla.

5.2.6 Muut mikrobien metaboliaan perustuvat biosynteesimenetelmät

Paitsi alkoholeja, metaania ja vetyä mikrobit (bakteerit, levät, sienet) pystyvät tuottamaan aineenvaihdunnassaan sekä aerobisissa että anaerobisissa olosuhteissa hyvin monia hiilivetyjä ja muita orgaanisia yhdisteitä (Ladygina ym. 2006). Samat prosessit, jotka ovat tuottaneet raakaöljyn ja maakaasun, ovat periaatteessa käytettävissä hiilivetyjen tuottamiseen biosynteettisesti. Esimerkiksi sademetsissä elävä sieni *Gliocladium roseum* tuottaa aineenvaihdunnassaan selluloosasta ja tärkkelyksestä monia bensiinin ja dieselin aineosina olevia hiilivetyjä sekä alkoholeja ja öljyjä, josta syystä sienen ominaisuuksien löytäjät kutsuvat sienen avulla tuotettavissa olevaa dieselpolttoainetta mycodieseliksi eli sienidieseliksi (Strobel ym. 2008).

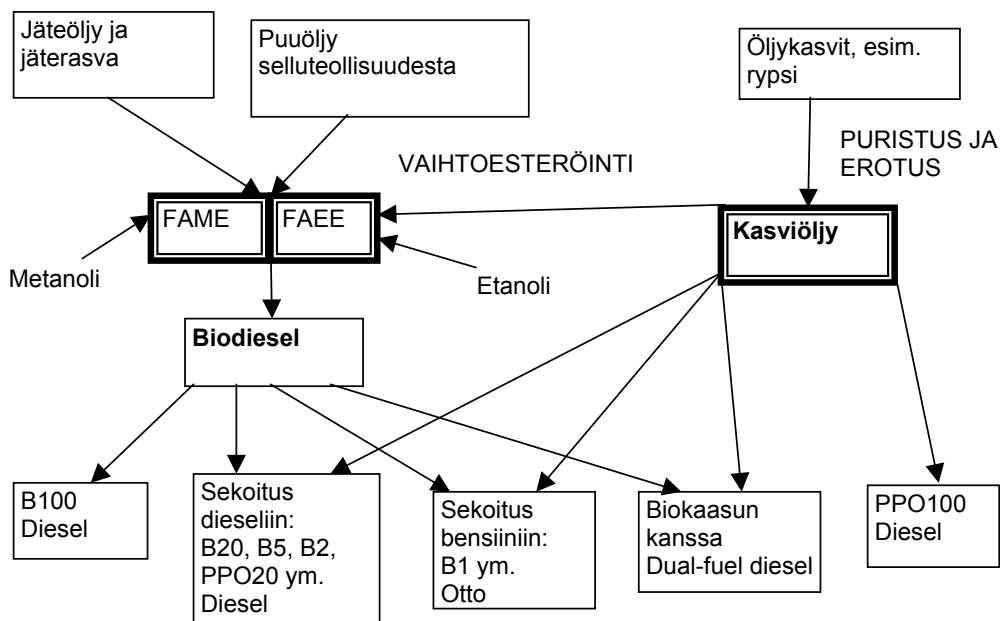
Raaka-aine voi olla biomassaa tai myös kaasuja kuten hiilidioksidi ja hiilimonoksidi eli esimerkiksi biomassaperäisistä savukaasuista ja puukaasusta voidaan tuottaa hiilivetyjä ja muita orgaanisia yhdisteitä kuten alkoholeja (Rajagopalan ym. 2002). Nämä menetelmät ovat nykyään laboratoriotutkimusasteella.

5.3 KEMIALLISET KONVERSIOMENETELMÄT

Kemiallinen konversio, reformointi ja reformulointi tarkoittavat lukuisia kemiallisia prosesseja, joiden avulla lähtöaineista saadaan muokattua paremmin erityisiin käyttötarkoituksiin soveltuvia polttoaineita tai lisäaineita. Esimerkkejä ovat ETBE-eetterin tuottaminen etanolista, MTBE-eetterin tuottaminen metanolista ja DME-eetterin tuottaminen metanolista. Höyryreformointi on monikäyttöinen konversioprosessi, jolla voidaan tuottaa esimerkiksi metanolia, vetyä ja synteetisikaasua metaanista. Useimmat liikennepolttoaineiden valmistuksessa käytettävät kemialliset konversiot tapahtuvat korkeissa lämpötiloissa ja ne käsitellään termokemiallisina konversioina luvussa 5.4. Tässä keskitytään normaalilämpötilassa tehtäviin konversioihin, joilla voidaan valmistaa biodieseliä.

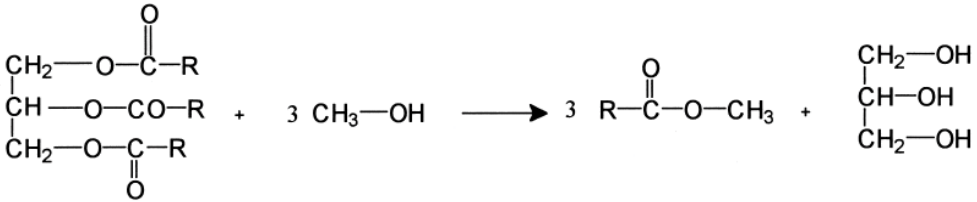
5.3.1 Vaihtoesteröinti

Vaihtoesteröinti tarkoittaa esterin muuntamista toiseksi esteriksi. Vaihtoesteröinnillä voidaan kasviöljyistä, eläinrasvoista, jäterasvoista sekä mänty- ja muista puuöljyistä tuottaa dieselmootoreihin sopivia biodiesel-polttoaineita. Sekä biodieseleitä että kasviöljyjä voidaan käyttää muissakin moottorityypeissä (Kuva 5.8), kaasuturbiineissa sekä lämmityslaitteissa kevyen polttoöljyn sijaan.



Kuva 5.8. Kasviöljyjen ja biodieseliä tuotanto- ja käyttömahdollisuuksia eri moottorityypeissä. FAME (fatty acid methyl ester) ja FAEE (fatty acid ethyl ester) ovat biodiesel-tyyppejä. B(nro) tarkoittaa polttoainetta, jossa on (nro):n ilmoittama prosenttiosuus biodieseliä. PPO(nro) (pure plant oil) tarkoittaa polttoainetta, jossa on (nro):n ilmoittama prosenttiosuus kasviöljyä. (Lampinen & Jokinen 2006)

Vaihtoesteröinnissä triglyseridi, joka on triesteri, muunnetaan alkoholin ja katalyyttien avulla rasvahappoesteriksi ja saadaan sivutuotteena glyserolia. Kun alkoholi on metanolia, tuote on rasvahapon metyyliesteri eli FAME:



Triglyseridi

Metanoli

FAME

Glyseroli (5.2)

Tämä on helpoimmin toteutettava reaktio, joten sitä käytetään biodieselin kotivalmistusohjeissa (kuten Tickell & Tickell 1999 ja Carter ym. 2005) sekä kotivalmistuslaitteistoissa, kuten kuva 5.1b 3000 \$:n hintainen Tickellien kehittämä ja myymä FuelMeister. Samaa reaktiota käytetään useimmiten myös maatilakokoluokan laitteistoissa, kuten kuvan 5.9 25.000 €:n hintainen Presecon SOL-10. Katalyyttinä käytetään joko kalium- tai natriumhydroksidia. Yleisimmin Euroopassa käytettävä öljy on rypsi- tai rapsiöljyä, jolloin tuote on rypsiöljyn metyyliesteri eli RME; USA:ssa yleisin öljy on soijaöljy, jolloin tuote on soijaöljyn metyyliesteri eli SME. Katalyyttejä ei näissä yksinkertaisissa laitteistoissa yleensä pystytä regeneroimaan.



Kuva 5.9. Kotimainen Presecon SOL-10-biodiesellaitteisto Haapajärven ammattiopistolla opetuskäytössä. [2007]

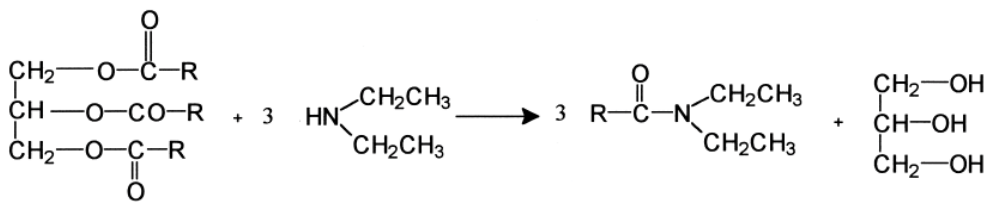
Metanolin sijaan voidaan käyttää muitakin alkoholeja, joita kaikkia on valmistettavissa bioresursseista, mutta nykyisin biodieselin tuotannossa käytettävä metanoli on lähes aina fossiilista. Etanolin avulla tuotetaan FAEE-biodieseliä (rasvahapon etyyliesteri), propanolin avulla FAPE-biodieseliä (rasvahapon propyyliesteri), butanolin avulla FABE-biodieseliä (rasvahapon butyyliesteri) ja myös raskaampien alkoholien estereitä. Näiden yhteisnimi on FAAE eli rasvahapon alkyyliesteri. Kaikissa tapauksissa reaktio edellyttää normaalilämpötilassa katalyytin käyttöä. Katalyytti voi olla nestemäinen emäs, kuten KOH tai NaOH edellä, mutta myös nestemäinen happo, kuten rikki- ja suolahappo, kiinteä emäs, kiinteä happo tai entsyymi (Drapcho ym. 2008). Emäkset toimivat paremmin lyhytketjuisten alkoholien ja hapot pitkäketjuisten alkoholien kanssa. Teollisissa järjestelmissä katalyytti yleensä regeneroidaan. Lämpötilaa ja painetta nostamalla vaihtoesteröinti voidaan toteuttaa myös ilman katalyyttiä (Drapcho ym. 2008).

5.3.2 Esteröinti

Esteröinti tarkoittaa yhdisteen, joka ei ole esteri, muuntamista esteriksi. Rasvahapot voidaan rikki- tai suolahapon katalysoimana muuntaa rasvahapon alkyylistereiksi eli kemiallisesti samanlaisiksi biodieseleiksi kuin triglyseridien vaihtoesteröinnillä saadaan (Drapcho ym. 2008).

5.3.3 Muita kemiallisia konversioita

Dieselmootoreihin sopivia polttoaineita voidaan valmistaa myös muilla kemiallisilla konversioilla. Eräs esimerkkinä on amidoiminen (Alcantara ym. 2000), jossa käytetään dietyyliamiinia ja tuotetta kutsutaan amidibiodieseliksi (FAA), joka siis sisältää myös tyyppiä hiilen, vedyn ja hapen lisäksi. Sivutuotteena saadaan glyserolia samalla tavalla kuin vaihtoesteröinnissä (Alcantara ym. 2000):



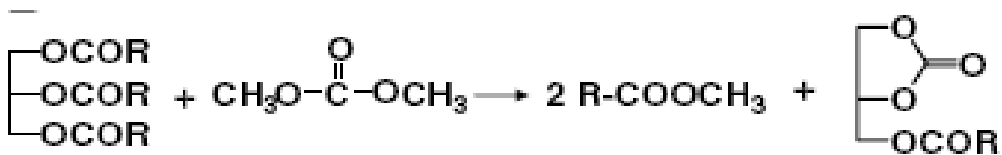
Triglyseridi

Dietyyliamiini

AMIDI

Glyseroli (5.3)

Toisentyypinen esimerkki on vaihtometylointi (Fabbri ym. 2007), jossa toimenpide aikaansaadaan dimetyylikarbonaattilla (DMC) ja tuotteeksi saadaan sekä tavanomaista FAME-biodieseliä että FAGC-biodieseliä (fatty acid glyserol carbonate ester). Syntyvää kahden biodieselyypin seosta voidaan kutsua DMC-biodieseliksi. Päinvastoin kuin vaihtoesteröinnissä ja amidoinnissa sivutuotetta, glyserolia, ei synny, vaan koko resurssi saada konvertoitua liikennepolttoaineeksi (Fabbri ym. 2007):



Triglyseridi

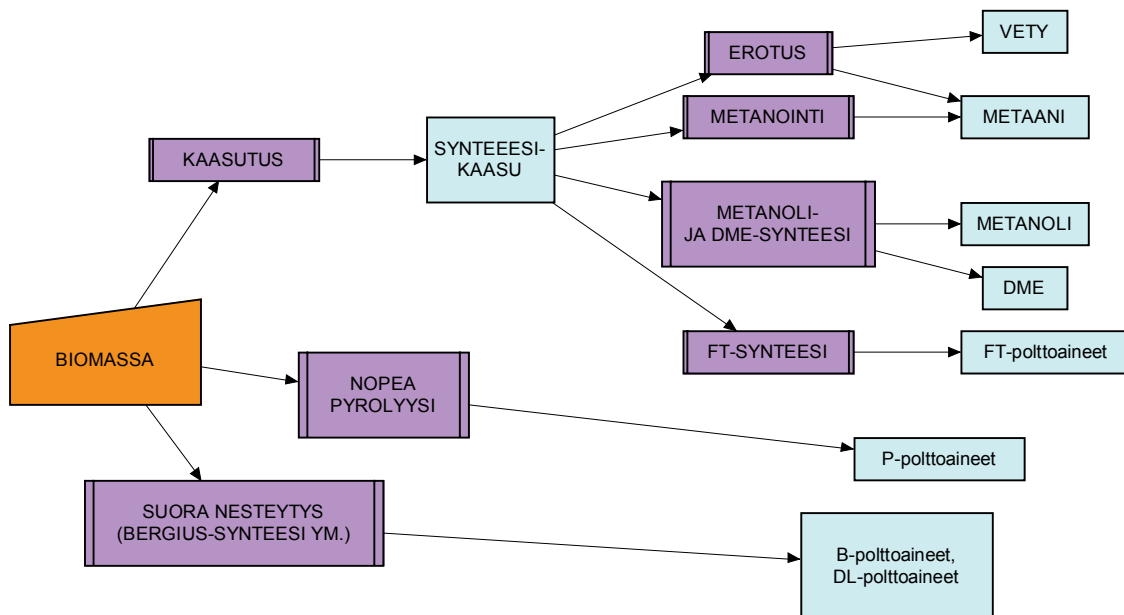
DiMetyyliKARBONAATTI

FAME

FAGC (5.4)

5.4 TERMOKEMIAALLISET KONVERSIOMENETELMÄT

Termokemialliset menetelmät soveltuvat kiinteän ja nestemäisen biomassan konversioon liikennepolttoaineiksi, mukaan lukien puu, olki ja muu lignoselluloosapitoinen kasvi- tai jättemateriaali. Kaikissa menetelmissä aine hajotetaan lämmön ja osassa lisäksi paineen, katalyyttien ja vedyn avulla vähähappisissa olosuhteissa. Nämä menetelmät pystyvät hyödyntämään resurssin kaikki orgaaniset osat. BTL (biomass to liquid) on yhteisnimitys biomassasta valmistetuille nestemäisille synteettisille polttoaineille. Koska osa synteettisistä polttoaineista on kaasumaisia, niitä voidaan puolestaan kutsua BTG-yhteisnimellä (biomass to gas). Tärkeimmät menetelmät ovat pyrolyysi, suora nesteytys ja kaasutus-pohjaiset prosessit (Kuva 5.10).



Kuva 5.10. Synteettisten biopolttoaineiden päävalmistusprosessit.

Kaikki menetelmät tuottavat heterogeenisen tuotejakauman, jossa on aina sekä kiinteä, nestemäisiä että kaasumaisia komponentteja (Taulukko 5.5). Haluttu lopputuote ratkaisee menetelmän valinnan. Kiinteän lopputuotteen, puuhiilen tai yleisemmin biohiilen, määrä maksimoituu hitaassa pyrolyysissä. Lannoitukseen soveltuva tuhka on toinen kiinteä lopputuote: tuhkan ja puuhiilipölyn sekoitusta on äskettäin ryhdytty kutsumaan biochar-nimiseksi maanparannusaineeksi. Nestemäisiä komponentteja saadaan eniten nopealla pyrolyysillä ja suoralla nesteytyksellä. Kaasun määrä maksimoituu kaasutuksella ja sen päälopputuote synteesikaasu puolestaan toimii raaka-aineena nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita synnyttävälle synteesille.

Taulukko 5.5. Eräiden termokemiallisten konversiomenetelmien ominaisuuksia. Saantojakaumat vaihtelevat voimakkaasti teknologiasta riippuen.

Menetelmä	Lämpötila	Paine	Komponenttien saanto-osuudet kuivana		
			Kiinteä	Neste	Kaasu
Hidas pyrolyysi (hiiltäminen)	Alhainen (250–400 °C)	Alhainen (1 bar)	55 % (30–80)	15 % (10–30)	30 % (3–50)
Nopea pyrolyysi	Keskikorkea (450–900 °C)	Alhainen (≤1 bar)	12 % (10–15)	75 % (60–80)	13 % (10–70)
Kaasutus	Korkea (500–1500 °C)	Alhainen (1–20 bar)	5 % (1–10)	5 % (1–10)	90 % (80–99)
Suora nesteytytys	Keskikorkea (500 °C)	Korkea (40–600 bar)	10 % (1–25)	70 % (50–80)	20 %
Plasmakaasutus	Erittäin korkea (3000–5000 °C)	Alhainen (< 1 bar)			

5.4.1 Hidas pyrolyysi

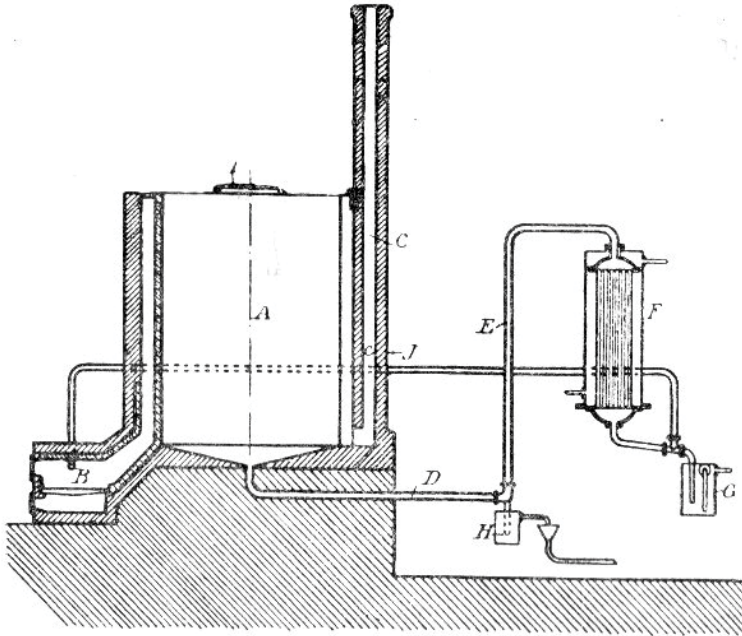
Perinteistä puun pyrolyysiä on aiemmin kutsuttu puun kuivatislaukseksi (Lassila 1945) (englannin kielessä tuhoavaksi tislaukseksi, destructive distillation) tai hiiltämiseksi ja nykyään sitä voi kutsua myös hitaaksi pyrolyysiksi erotuksena modernista nopeasta pyrolyysistä. Raakaöljyteollisuudessa sitä kutsutaan termiseksi krakkaukseksi, joka kuvaa ilmiötä parhaiten, sillä kysessä on lämmön avulla tapahtuva aineen hajottaminen normaali-ilmanpaineessa vähähappisissa olosuhteissa. Puun hajoaminen alkaa lämpötilassa 160 °C. Normaalisti hidas pyrolyysi toteutetaan normaali-ilmanpaineessa ja noin 400 °C lämpötilassa ja prosessi kestää noin 10–48 tuntia (Talvitie 1924b). Puun lisäksi hidasta pyrolyysiä voidaan käyttää minkä tahansa bioresurssin ja myös fossiilisten resurssien hajottamismenetelmänä (Bridgwater & Grassi 1991), esimerkiksi muovien sisältävien sekajätteiden käsittelymenetelmänä (Paajala ym. 1997) sekä sulfaattisellun tuotannon sivutuotteena saatavan raakasuoan jalostusmenetelmänä (Oasmaa ym. 1997).

Puun hidas pyrolyysi voidaan jakaa neljään vaiheeseen, jotka kuvaavat hajoamistuotteiden muodostusta. Ensimmäisessä vaiheessa (100–170 °C) puun kosteutena oleva vesi haihtuu yhdessä muiden helposti haihtuvien yhdisteiden, kuten puun pihkan terpeenit, kanssa. Toisessa vaiheessa (170–270 °C) varsinainen puuainee alkaa hajota tuottaen

hiilen oksideja, vesihöyryä, metanolia, etikkahappoa, asetonia ja terpeenien seosta eli tärpättiä. Kolmannessa vaiheessa (270–400 °C) syntyy hiilivetyjä, etenkin metaania, ja myös vetyä. Kaasujen ohella tislautuu myös metanolia, etikkahappoa, tärpättiä ja tervaa. Neljäs vaihe (400–500 °C) tuottaa runsaasti hiilivetyjä ja vetyä sekä hiiltojäännöksen eli puuhiiltä. (Arpiainen ym. 1982)

Kaikissa pyrolyysiprosesseissa syntyy aina kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia tuotteita. Pyrolyysikaasu, joka sisältää vähintään puolet hiilidioksidia sekä lämpöarvoa sisältäviä kaasuja kuten hiilimonoksidia, vetyä, ammoniakia ja hiilivetyjä, käytetään normaalisti prosessin energianlähteenä, mutta aiemmin myös muuhun paikalliseen energiankäyttöön kuten valaistukseen kaasulampuissa. Kiinteä osa, puuhiili, on ollut perinteisesti tärkein pyrolyysin myyntituote tervan ohella. Nestemäisistä komponenteista tärkeimpiä ovat terva, tärpätti, metanoli ja etikkahappo. Pieniä määriä lukuisia muitakin yhdisteitä muodostuu, esimerkiksi etanolia, butanolia, muurahaishappoa ja asetonia. Koska vesiliukoinen osa nestemäisistä tuotteista on sen sisältävien karboksyylihappojen vuoksi hapanta, sitä kutsutaan puuhapoksi ja loppuosaa nesteestä puuöljyksi tai tervaksi. Raaka puuhappo on yli 90 % vettä ja siinä olevat tuotteet erotetaan tislamalla. Terva, joka on lähtöisin pääasiassa ligniinistä, sisältää tärpättiä, hartsia, puubentsolia ja monia muita yhdisteitä. Terva puhdistetaan vedestä sedimentaatiolla. Polttopuuta kuluu 1 – 70 % hiiltopuuhun verrattuna riippuen uunityypistä ja hiilto-olosuhteista, hiiltopuun kosteudesta ja lajista sekä hiilto- ja polttopuun tyypistä. Esimerkiksi käytettäessä pyöreää havupuuta hiiltoon ja polttoon noin 30 % kosteudessa, polttopuuta kuluu noin 15 % hiiltopuuhun verrattuna. Kun poltetaan sahajauholla, kulutus pienenee. Alhaisin polttopuun kulutus on silloin, kun merkittävä osa lopputuotteista toimii energianlähteenä vähentäen siten lopputuotteiden määrää. (Talvitie 1924b)

Hitaan pyrolyysin teknologiat jakaantuvat perinteisiin maakuoppiin eli miiluihin ja 1800-luvulta alkaen käytettyihin hiiltouuneihin eli retortteihin. Molempia on olemassa hyvin suuri määrä erilaisia tyyppisiä ja niitä on käytetty kauan ympäri maapallon (Talvitie 1924b, Lassila 1945, Ranta 1994, Hollingdale ym. 1999, Wereko-Brobby & Hagen 1996). Perinteisessä maakuopassa valmistetaan pääasiassa puuhiiltä ja tervaa, mutta useimmiten ei muita tuotteita. Retorttiuuneissa puolestaan tuotetaan myös tärpättiä, metanolia ja muita nesteitä. Miiluissa lämmityspuut palavat samassa tilassa kuin prosessoitavat puut. Uuneissa puolestaan lämmitys on epäsuora eli poltto tapahtuu erillisessä kattilassa, joista lämpö johdetaan retorttiin. Kuva 5.11 esittää pyrolyysilaitteistoa, jollaisia Suomessakin rakennettiin jo 1800-luvun lopulla (Bonsdorff 1907). Tiilimuurin sisällä olevan rautaisen hiiltokammion eli retortin (A) kannessa on aukko (I), josta puu ladotaan sisään ja josta syntyneet puuhiilet poistetaan. Kuumat palokaasut tulevat vasemmalta tulipesästä (B) tiilimuurin ja retortin väliseen tulikanavaan ja poistuvat lopuksi savupiipun (C) kautta. Retortissa syntyneet nestemäiset ja kaasumaiset aineet johdetaan pois putkea (D) myöten. Nestemäinen osa, terva, valuu astiaan (H) ja kaasumaiset johdetaan putkea (E) myöten vesijäähdytteiseen lauhduttimeen (F), jossa ne tiivistyvät nesteiksi. Tislautumattomat kaasut (pyrolyysikaasu) johdetaan putkea (J) myöten tulipesään, jossa ne poltetaan. Tiivistyneet nesteet päätyvät erotusastiaan (G), joka erottaa kevyen tärpätin muista nesteistä eli raakapuuöljystä (metanoli, etikkahappo jne.). Raakapuuöljyn, josta suurin osa on vettä, eri komponentit voidaan puolestaan erottaa tislamalla.



Kuva 5.11. Pyrolyysilaitteisto hidasta pyrolyysiä varten. A=retortti, B=tulisija, C=savupiippu, D=nesteiden ja kaasujen poistoputki, E=kaasujen poistoputki, F=lauhdutin, G=tärpätin ja muiden nesteiden erotusastia, H=tervan keruuastia, I=retortin kansi, J=pyrolyysikaasun syöttöputki tulisijaan. (Lassila 1945)

Pyrolyysistä saatavat tuotteet riippuvat voimakkaasti käytetystä puulajista. Esimerkiksi 1 p-m³:sta koivua saatiin 1920-luvulla kaupallisen arvon mukaan järjestettynä (Talvitie 1924a):

1. Puuhiiliä 0,4 – 0,45 i-m³
2. Metanolia 4–5 kg
3. Tervaa 18–22 kg
4. Harmaakalkkia (johon etikkahappo sitoutettu) 16–18 kg

Alhaisen pihkapitoisuuden takia tärpättiä saadaan koivusta hyvin vähän.

Männyn kannoista saatiin vastaavasti 1 p-m³:a kohti (Talvitie 1924a):

1. Tervaa 25–40 kg
2. Tärpättiä (puhdistettua) 7–10 kg
3. Puuhiiliä 0,3–0,4 i-m³

Metanolia ja etikkahappoa saadaan havupuista alle puolet lehtipuiden määristä.

Männyn runkopuusta saatiin 1 p-m³:a kohti (Talvitie 1924a):

1. Puuhiiliä 0,6 m³
2. Harmaakalkkia (jossa etikkahappo sitoutunut) 5–10 kg
3. Metanolia 0,7–2 kg
4. Tervaa 8–15 kg

Koivun ja männyn kannon pyrolyysituotteet olivat taloudelliselta arvoltaan yhtä suuria, mutta männyn runkopuu vain noin 2/3 niiden arvosta ja sitä käytettiin etupäässä puuhiilten tuottamiseen.

Puukaasuajoneuvojen polttoaineena pilke on kokonaisuhyötysuhteeltaan selvästi puuhiiltä parempi, sillä yhdestä koivumotista ($p\text{-m}^3$, energiasisällöltään 5400 MJ) saadaan noin 1,2 $i\text{-m}^3$ pilkettä (4300 MJ), mutta vain 0,4 $i\text{-m}^3$ puuhiiltä (2000 MJ) ja lisäksi hiilestämisen energialähteeksi tarvitaan noin 15 % konvertoitavan puun määrästä. Hiilestämisen konversiohyötysuhde (30 %) on siis alhainen pilkettämisen konversiohyötysuhteeseen (80 %) verrattuna. Hiilestäminen saattaa silti olla taloudellisesti kannattavampaa, mikäli puuhiilten yhteydessä saatavien nestemäisten tuotteiden markkina-arvo on korkea. Puun kulutusta olisi vuoden 1943 laskelmien mukaan vähentänyt puoli miljoonaa kuutiota, mikäli puuhiilen käytöstä olisi kokonaan siirrytty pilkkeeseen (Nykänen 1999). Puuhiilen korkeamman energiatihyeden vuoksi kuljetuskustannukset ja tilantarve ovat kuitenkin puuhiilellä pilkettä pienempiä ja puuhiilikaasutin teknisesti on hieman pilkekaasutinta yksinkertaisempi.

Moderneissa teollisen mittakaavan paineistetuissa pyrolyysilaitoksissa, joita esimerkiksi Brasilian terästeollisuus käyttää, puuhiilen saantoa on saatu nostettua 25 % perinteisiin menetelmiin verrattuna (Bezzon & Rocha 2000).

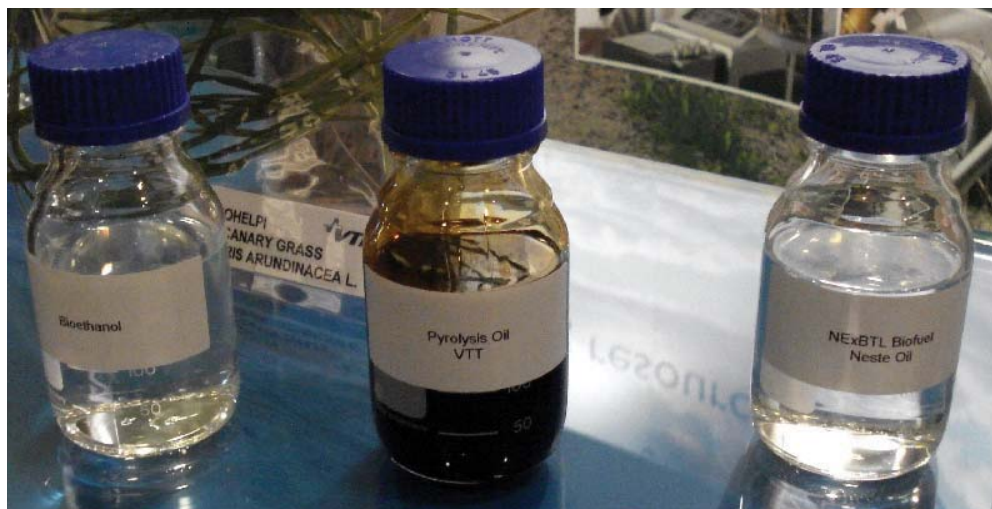
Pyrolyysi voidaan jättää kesken siten, että puun ei anneta hiiltyä, vaan ainoastaan poistetaan siitä vesi ja helpommin haihtuvat aineet lämmittämällä sitä hapettomissa olosuhteissa noin 200–300 °C:een. Tällaista prosessia kutsutaan torrefioinniksi ja se on hitaan pyrolyysin ja tavanomaisen kuivauksen välisellä alueella operointia, jolla saavutetaan osa hitaan pyrolyysin eduista, kuten lähtöainetta korkeampi energiatiheys (ei kuitenkaan niin korkea kuin puuhiilellä), mutta vähennetään energian kulutusta (energiaa silti menetetään tässäkin prosessissa verrattuna puun suoraan käyttöön). Torrefioinnin lopputuote ei siis ole puuhiiltä, eikä sitä voi käyttää kuten kivihiiltä ja koksia.

5.4.2 Nopea pyrolyysi (P-polttoaineet)

Nopea pyrolyysi on prosessi, jossa orgaaninen materiaali kuumennetaan nopeasti hapettomissa oloissa korkeaan lämpötilaan, mikä aiheuttaa sen hajoamisen pääasiassa nestemäisiksi yhdisteiksi. Öljynjalostuksessa tätä teknologiaa nimitetään termiseksi krakkaukseksi. Se tehdään normaali-ilmanpaineessa tai alipaineessa noin 500 °C lämpötilassa (Gevert 1987). Lämpötilan nousu voi olla jopa 10.000–100.000 °C sekunnissa, kun hitaassa pyrolyysissä se on noin 0,01–2 °C sekunnissa (Arpiainen ym. 1982). Prosessissa syntyy pääasiassa nesteitä (pyrolyysiöljy), mutta myös kaasua (pyrolyysikaasu) ja kiinteitä komponentteja (puuhiili ja tuhka). Pyrolyysikaasu käytetään prosessin omaan lämmöntarpeeseen. Nopeassa pyrolyysissä saadaan tyypillisesti noin 65 % kiinteän biomassan energiasisällöstä konvertoitua nestemäiseen muotoon (Bridgwater & Hogan 1996).

Pyrolyysiöljyä (Kuva 5.12) voidaan käyttää lämmitysöljyä korvaamaan tai jalostaa sekundäärisiksi polttoaineiksi raakaöljyn tavoin, jolloin saadaan dieselöljyä, kerosiinia, bensiiniä ja nestekaasua vastaavia heterogeenisiä polttoaineita (P-polttoaineita) sekä monia kemianteollisuuden hyödyntämiä kemikaaleja (Bridgwater & Grassi 1991, Bridgwater & Hogan 1996). Pyrolyysiöljyä nimitetään myös bioöljyksi (bio-oil) ja bioraakaöljyksi

(bio crude oil), jolloin korostetaan sen käyttöä raakaöljyä vastaavasti öljynjalostamon raaka-aineena. Lähes pelkästään hiilivetyjä sisältävästä raakaöljystä poiketen bioöljy sisältää pääasiassa hapellisia orgaanisia yhdisteitä kuten karboksyylihappoja, hiilihydraatteja, alkoholeja ja aldehydejä. Etuna energiakäytössä raakaöljyyn verrattuna on se, että polyaromaattisia yhdisteitä on äärimmäisen vähän.



Kuva 5.12. Pyrolyysiöljyä keskellä verrattuna etanoliin (vas.) ja NExBTL-palmuöljydieseliin (oik.) esittelyssä EU-komission biojalostamokonferenssissa Helsingissä. [2006]

Korkean happipitoisuuden (jopa 50 p-%) ja korkean karboksyylihappopitoisuuden (pH jopa vain 2) takia pyrolyysiöljy on erittäin reaktiivista, mikä vaatii paljon polttoainejärjestelmän komponenteilta. Samasta syystä pyrolyysiöljy ei sovi pitkäaikaiseen varastointiin (Oasmaa 2003). Vaikka pyrolyysiöljyä on kokeiltu polttomoottorissa ja vaikka se kriisiaikana voi sellaisessa käytössä olla, kuten esimerkiksi toisen maailmansodan aikana Japanin Kamikaze-lentokoneissa, pyrolyysiöljyn käyttö sellaisenaan rajoittuu normaalisti vain lämmitykseen. Suomessa on pyrolyysiöljyä valmistettu lämmitystarkoituksiin kevyttä ja raskasta polttoöljyä korvaamaan (Oasmaa 2003).

Pyrolyysiöljyn jalostus voidaan tehdä monilla tavoilla, kuten uutto, hydraus, ionisuihkutus, katalyyttinen bensiinisynteesi ja höyryreformointi (Bridgwater & Hogan 1996).

Hydraamalla eli vedyn avulla toisaalta hajotetaan yhdisteitä (vetykrakkaus), mutta vielä tärkeämpänä vaikutuksena on hapen vähentäminen ja sitä kautta myös stabiiliuden eli varastointikelpoisuuden parantaminen. Vedyn käytön vähentämiseksi, lopputuotteiden selektiivisyyden parantamiseksi ja käsittelyn lämpötilan alentamiseksi käytetään katalyyttistä hydrausta, jossa katalyyteiksi sopivat mm. NiMo ja CoMo. Bensiinisynteesi pyrolyysiöljystä on mahdollinen zeoliittien katalysoimana samaan tapaan kuin metanoliperäinen bensiinisynteesi. Tyypillisessä synteesilämpötilassa 450 °C happi poistuu vetenä, hiilimonoksidina ja hiilidioksidina, jolloin tuotteet ovat pääasiassa hiilivetyjä. (Grange ym. 1996)

5.4.3 Suora nesteytys (DL-polttoaineet)

Suoran nesteytyksen nimi johtuu alun perin kivihiiliteknikasta, jossa kaasutuksen jälkeistä synteettisten polttoaineiden valmistusta on alun perin kutsuttu epäsuoraksi nesteytykseksi. Suora nesteytys siis tarkoittaa kivihiilen tai muun kiinteän materiaalin hajottamista suoraan nestemäiseksi ilman kaasutusvälivaihetta. Edellä käsitelty nopea pyrolyysi on periaatteessa yksi suoran nesteytyksen teknologioita. Käytännössä pyrolyysiä ei lueta niiden joukkoon, sillä pyrolyysistä poiketen suoran nesteytyksen teknologioilla tarkoitetaan korkeassa paineessa tapahtuvaa vedyn tai muun yhdisteen avulla tehtävää, yleensä katalyyttistä hajottamista. Pyrolyysi on siis puhtaasti lämmön avulla tapahtuvaa (joskus lievällä ylipaineella tai alipaineella) hajottamista eli lämpökrakkausta, kun taas suora nesteytys on katalyyttistä krakkausta yleensä – mutta ei aina – paineistettuna. Usein käytetään jotain hajottavaa yhdistettä luovuttamaan prosessiin vetyä, jonka avulla hajottaminen tapahtuu. Tällaista prosessia kutsutaan vetykrakkaukseksi.

Nimestään huolimatta suora nesteytys ei tuota pelkästään nestemäisiä tuotteita (kuten DL-diesel, DL-kerosiini ja DL-bensiini) vaan myös kaasumaisia (kuten DL-nestekaa-su) tuotteita. Kuten pyrolyysiöljy, suoran nesteytyksen lopputuote on heterogeenista ja edellyttää jalostusta. Jalostus on kuitenkin huomattavasti helpompaa kuin pyrolyysiöljyn tapauksessa. Hydrausta soveltavaa jalostusta kutsutaan nimellä HTU (hydrothermal upgrading).

Suorassa nesteytyksessä biomassa voidaan hajottaa jonkin redusoivan yhdisteen, kuten vedyn tai hiilimonoksidin, tai vetyä luovuttavan yhdisteen, kuten tetraliini, avulla korkeassa paineessa yleensä katalyytin läsnä ollessa (Gevert 1987). Suora nesteytys on mahdollista myös vesihöyryn avulla (Probstein & Hicks 1990). Mikäli suora nesteytys tapahtuu vedyn avulla, kyse on hydrauksesta (vetykrakkauksesta). Suora nesteytys, silloin kun ei käytetä vetyä, vastaa katalyyttistä krakkausta öljynjalostuksessa, eli vuonna 1938 teolliseen käyttöön otettua teknologiaa (Palucka 2005). Esimerkiksi palmuöljystä voidaan valmistaa bensiiniä, kerosiinia ja dieselöljyä katalyyttisesti krakkaamalla normaali-paineessa ilman vedyn käyttöä (Ooi ym. 2004).

5.4.3.1 Hydraus ja Bergius-synteesi (B-polttoaineet)

Hydrausmenetelmän julkisti alun perin vuonna 1897 Paul Sabatier, joka sai tästä vuoden 1912 Nobelin kemian palkinnon. Tällöin kohdeaineena oli hiilidioksidi. Katalyyttinen vetykrakkaus (Bergius-prosessi) on suoran nesteytyksen eniten sovellettu tyyppi. Friedrich Bergius kehitti sen kivihiilelle vuonna 1913 ja sai siitä Nobelin kemian palkinnon vuonna 1931. Pyrolyysin ja kaasutuksen tapaan nesteytyksellä voidaan muodostaa monia nestemäisiä hiilivetyjä ja muita orgaanisia yhdisteitä. Nesteytyksen etuna pyrolyysiin verrattuna on kuitenkin sen suurempi tuotto ja nesteen korkeampi energiasisältö sekä alhaisempi happipitoisuus, mikä tekee lopputuotteesta stabiilimman ja helpommin jalostettavan. Kivihiilen lisäksi Bergius-synteesi osoitettiin jo 1920-luvulla toimivaksi myös puu- ja turvepohjaisten nestemäisten polttoaineiden valmistuksessa. Hydrauksessa käytetään nykyään noin 100–300 barin painetta ja 450–475 °C lämpötilaa, mutta saksalaisissa sodanaikaisissa tuotantolaitoksissa paine oli yli 700 bar (Probstein & Hicks 1990).

Vetykäsittely paitsi hajottaa pitkäketjuisia orgaanisia yhdisteitä myös poistaa happea (muodostaen vesihöyryä), rikkiä (muodostaen rikkivetyä) ja typpeä (muodostaen ammoniakkaa) (Probstein & Hicks 1990). Suoralla nesteytyksellä on useita vuosia valmistettu biojätteistä liikennepolttoaineita USA:ssa (Lemley 2006). Suomessa tuotanto alkoi Nesteen pääasiassa palmuöljyä käyttävästä NExBTL-prosessista, joka käynnistyi Porvoon jalostamolla vuonna 2007. Nesteen NExBTL-palmuöljydiesel on eräs esimerkki hydruspohjaisesta polttoaineesta, jossa vetyä käytetään sekä krakkaukseen että hapen poistoon (Kuvat 5.12 ja 5.13).

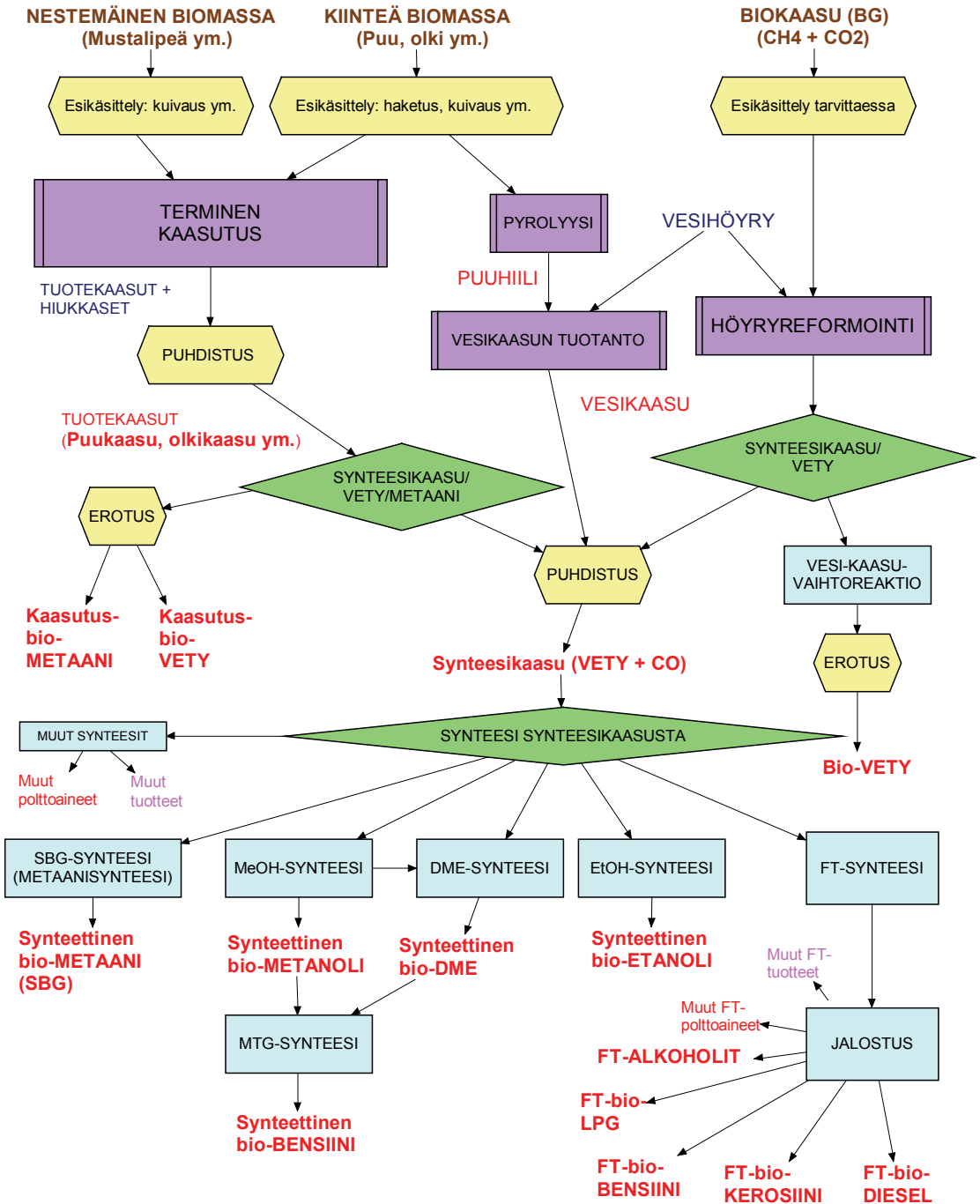


Kuva 5.13. Nesteen Green diesel -tuotenimellä on vuodesta 2008 alkaen myyty autoilijoille dieselpolttoainetta, jossa on 90 % fossiilidieseliä ja 10 % NExBTL-palmuöljydieseliä. Nämä kuvat ovat Tikkurilasta. [2008]

5.4.4 Kaasutus, höyryreformointi ja vesikaasuprosessi (G-polttoaineet)

5.4.4.1 Kaasutus

Kaasutuksessa tai tarkemmin sanottuna termisessä kaasutuksessa biomassa muunnetaan korkeassa lämpötilassa vähähappisissa olosuhteissa tuotekaasuksi kutsutuksi kaasuseokseksi, esimerkiksi puu- ja olkikaasu, joka sisältää hiilimonoksidia, hiilidioksidia, typpeä, vetyä sekä metaania ja muita hiilivetyjä (Kuva 5.14). Hiukkasia syntyy epäpuhtautena. Kaasuseos voidaan käyttää suoraan hiukkassuodattimen jälkeen polttoaineena esimerkiksi kaasuturbiineissa tai polttomoottoreissa. Häkäpönttöajoneuvot ovat kuuluisin liikennesovellutus tästä. Vaihtoehtoisesti siitä voidaan erottaa vetyä tai metaania muualla tapahtuvaa käyttöä varten tai synteetikaasua muiden polttoaineiden valmistamiseksi. Kaasutustekniikkaa voidaan myös käyttää joko lämmön tuotantoon tai sähkön tuotantoon alkaen hyvin pienistä 1 kW_e sovelluksista.



Kuva 5.14. Kaasutusperusteiset menetelmät kaasumaisten ja nestemäisten liikennebiopolttoaineiden valmistuksessa. Mukana kuvassa ovat lisäksi biokaasun höyryreformointi ja vesikaasuprosessi, jotka myös tuottavat synteetikaasua. Metaanin osittaishapetus ja nestemäisten biopolttoaineiden höyryreformointi puuttuvat kuvasta.

Biomassalle sopivat kaasuttimet jaetaan kiinteä- ja leijupetikaasuttimiin, jotka molemmat ovat käytettävissä monilla kiinteillä polttoaineilla synteettisten liikennepolttoaineiden valmistukseen (Bridgwater ym. 2002, Higman & Burgt 2003). Leijupetikaasuttimien yleisin sovellus on sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Ne ovat teholtaan megawattien ja satojen megawattien välillä. Kiinteäpetikaasuttimet soveltuvat pieneen kokoluokkaan kilowateista alkaen ja aina kymmeneen megawatteihin asti. Niistä yleisimpiä ovat myötävirtakaasuttimet, joissa polttoaine ja kaasut virtaavat samaan suuntaan ja vastavirtakaasuttimet, joissa polttoaine ja kaasut virtaavat eri suuntiin. Vastavirtakaasuttimet olivat laajamittaisessa käytössä kaupunkikaasun tuotannossa esimerkiksi Suomessa (Talvitie 1944) ja niitä käytetään edelleen lämpölaitoksissa (Filén ym. 1984). Suoraan ajoneuvoihin asennetut puukaasuttimet eli häikäpöntöt olivat sodan aikana ja ovat edelleen lähes pelkästään myötävirtakaasuttimia johtuen niiden tuottaman raakakaasun alhaisesta teravapitoisuudesta. Kaasuttimien toimintaperiaate selitetään alla vain perinteisille myötävirtakaasuttimille, mutta suurin osa kemiasta on yhteistä muille kaasutintyypeille (Higman & Burgt 2003).

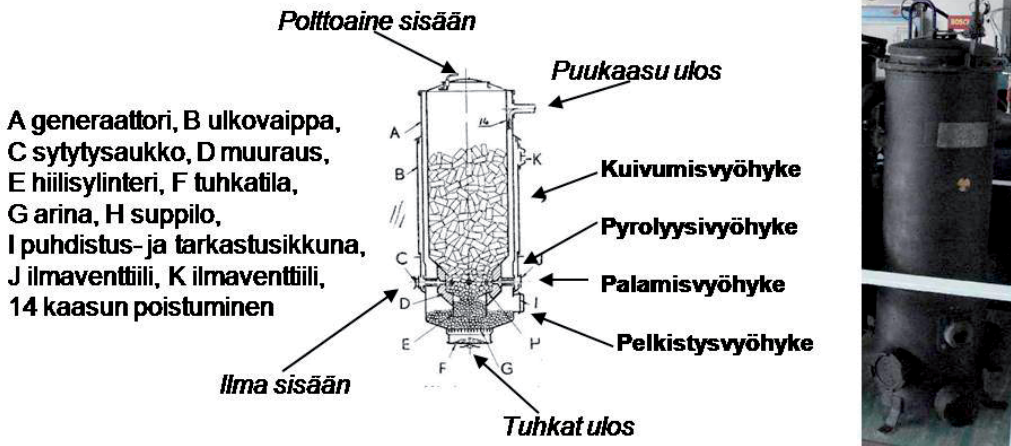
Toisen maailmansodan aikana kaasuttimia oli lukumääräisesti eniten, globaalisti miljoonia, sekä ajoneuvo- että paikalliskäytössä (LaFontaine & Zimmerman 1989). Suomessa käytettiin pilke- ja puuhiilikaasuttimia (Kuva 5.15), mutta muissa maissa myös kivihiliä, koksia ja muita kiinteitä polttoaineita.



Kuva 5.15. Viisi kaupallista puukaasugeneraattoria Vaasan auto- ja moottorimuseossa: vasemmalta suomalainen AKMO-pilkekaasutin, suomalainen Petsmo-pilkekaasutin, ruotsalainen Svedlund-puhiilikaasutin, saksalainen Imbert-pilkekaasutin ja suomalainen Kelo-puhiilikaasutin. [2007]

Sodan jälkeen myös haketta, pellettejä ja muita kiinteitä biopolttoaineita on kaasuttimissa käytetty. Tärkein kaasutinmalli Suomessa oli ranskalais-saksalaisen Georges Imbertin

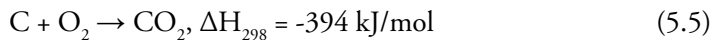
vuonna 1920 patentoima pilkekaasutin (toinen oikealta kuvassa 5.15), jonka erilaisia muunnoksia valmistettiin kymmenissä tehtaissa ja työpajoissa Suomessa (esimerkiksi AKMO ja Petsmo kuvassa 5.15 ja Otso kuvassa 5.16). Otso-kaasuttimen osat on esitetty kuvassa 5.16.



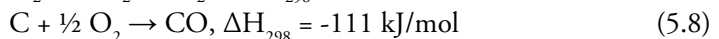
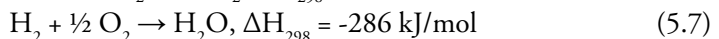
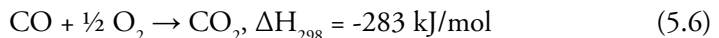
Kuva 5.16. a) Otso-pilkekaasuttimen osat (Pohjanen & Walli 1943) ja toiminta, b) Otso näyttelyssä Uudenkaupungin automuseossa [2008].

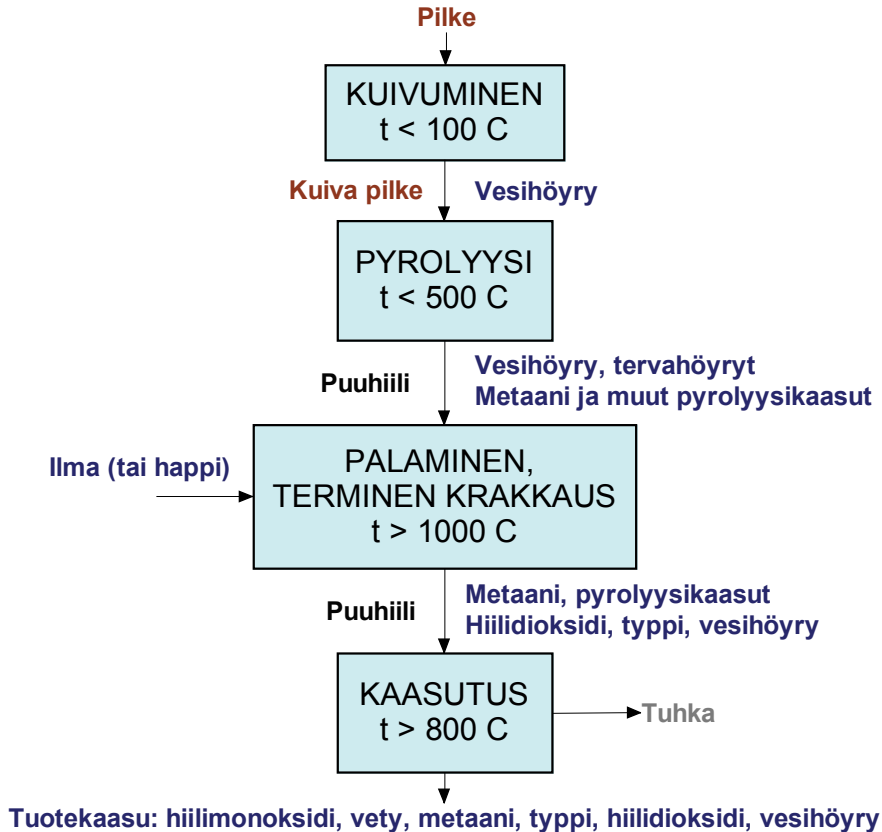
Otso-pilkekaasutin on esikuvansa Imbert-pilkekaasuttimen ja kaikkien muidenkin autokaasuttimien tavoin myötävirtakaasutin, jossa kaasut ja polttoaine virtaavat samaan suuntaan, ylhäältä alas. Muodostuva puukaasu otetaan Otsossa ja Imbertissä kaasuttimen yläosasta johon se on virrannut ulko- ja sisävaipan välitse. Pilkekäyttöisen myötävirtakaasuttimen toiminnan lohkokaaevio on kuvassa 5.17.

Pilkkeet lisätään kaasuttimen yläosasta. Ne kuivuvat laskeutuessaan alas palamisen aiheuttamassa lämmössä (kuivumisvyöhyke) eli tuottavat vesihöyryä. Lämpö kuivumisvyöhykkeelle tulee palamisvyöhykkeeltä kaasuttimien metalliseinää pitkin johtumalla sekä konvektiolla. Pyrolyysivyöhykkeellä pilkkeestä höyrystyy terva sekä metaania ja muita pilkkeen hajoamisessa syntyviä kaasuja. Jäljelle jää puuhiili, joka palaa palamisvyöhykkeessä vapauttaen runsaasti energiaa (394 kJ/mol):



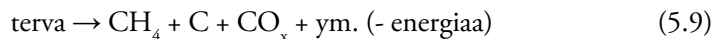
Palamisvyöhykkeessä, johon ilma johdetaan sivulta useasta suuttimesta, tapahtuu myös muita palamisreaktioita, mukaan lukien kaasutuksen päätuotteiden hiilimonoksidin ja vedyn palamista:



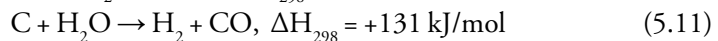
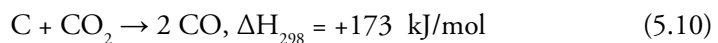


Kuva 5.17. Pilkekäyttöisen myötävirtakaasuttimen toiminnan lohkokaavio.

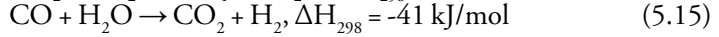
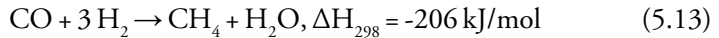
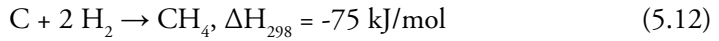
Palamisvyöhykkeellä suurin osa tervahöyryistä krakkautuu muodostaen pääasiassa metaania sitoen osan palamisessa vapautuvasta lämmöstä:



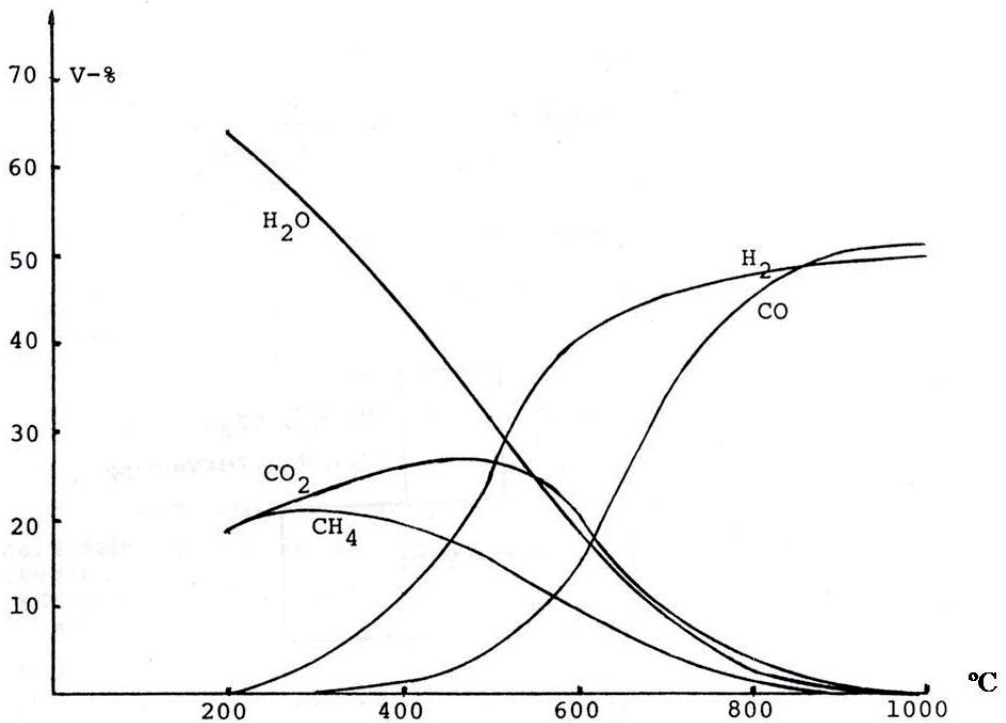
Kaasut virtaavat alaspäin kaasutusvyöhykkeelle moottorin, yleensä ottomoottorin, ja käynnistyksessä sähkömoottorin tai käsikäyttöisen pumpun aiheuttaman alipaineen imemänä. Tästä syystä näitä järjestelmiä kutsuttiin aiemmin imukaasulaitoksiksi (esim. Talvitie 1944). Kaasutusvyöhykkeellä palamisessa ja muissa prosesseissa syntyneet kaasut reagoivat hehkuvan puuhiilen kanssa synnyttäen pääasiassa hiilimonoksidia ja vetyä, mutta myös metaania. Tärkeimmät kaasutusreaktiot eli hiilidioksidin ja vesihöyryn hajottaminen ovat endotermisia:



Muut kaasutusvyöhykkeen reaktiot ovat eksotermisia:



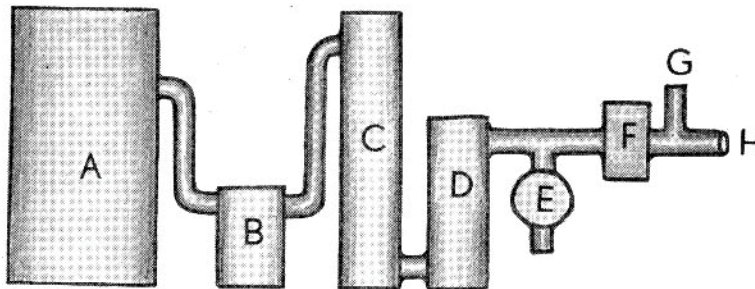
Reaktio 5.15 on ns. vesi-kaasu-vaihtoreaktio, jota on käytetty vedyn tuotannossa jo 1700-luvun lopulta. Kaasutuksessa syntyvät palavien kaasujen pääkomponentit ovat siis CO, H₂, CH₄ ja lisäksi syntyy hieman myös raskaampia hiilivetyjä. Pääkomponenttien suhteellinen osuus riippuu kaasutusvyöhykkeen lämpötilasta siten, että korkea lämpötila suosii hään ja vedyn muodostumista ja matala lämpötila metaanin muodostumista (Kuva 5.18).



Kuva 5.18. Kaasutinvyöhykkeen kaasujen tasapainokoostumus lämpötilan funktiona yhden ilma-kehän paineessa (Domann 1950).

Palavien kaasujen lisäksi tuotekaasu sisältää runsaasti typpeä, joka on peräisin ilmasta ja joka alentaa tuotekaasun lämpöarvoa oleellisesti. Siltä vältytään, mikäli palamisvyöhykkeelle syötetään ilman sijaan happea (Kuva 5.17). Typen lisäksi tuotekaasussa on muitakin ilman sisältämiä kaasuja kuten argon sekä prosessissa syntyneitä kaasuja hiilidioksidia ja vesihöyryä. Nämä kaikki ovat inerttejä komponentteja, jotka alentavat tuotekaasun energiasisältöä, mutta jotka eivät tuota muita ongelmia tuotekaasun käytössä. Kondensoituvat tervahöyryt ja puuhiilihiukkaset ovat energiaa sisältäviä komponentteja, jotka ovat hyödynnettävissä esimerkiksi kaasupolttimessa lämmöntuotantoon, mutta ajoneuvokaasua polttomoottoriin tuotettaessa ne ovat karstoittumista aiheuttavia epäpuhtauksia, jotka puhdistetaan ennen moottoriin syöttämistä. Hyvin toimivan myötävirtakaasuttimen puhdistamattomassa kaasussa eli raakakaasussa on tervaa alle 1 g/m^3 , kun sitä on vastavirtakaasuttimen raakakaasussa $40\text{--}50 \text{ g/m}^3$ (Filén ym. 1984).

Puhdistus tehdään useassa vaiheessa kuvan 5.19 mukaisesti. Jo generaattorissa poistetaan hiukkasia sekä tervaa ja vesihöyryä sisältäviä kondensaattipisaroihin dynaamisten inertiaerottimien periaatteella rakentamalla kaasujen kulku mutkikkaaksi, jolloin hiukkasmaiset epäpuhtaudet erottuvat kaasuista keskipakovoiman avulla. Myötävirtakaasuttimissa kaasujen kulku pelkistysvyöhykkeen kautta vähentää niin ikään epäpuhtauksia.



Kuva 5.19. Pilkekaasuttinjärjestelmän osat (Pohjanen & Walli 1943): A generaattori, B karkeapuhdistin, C jäädytyn, D hienopuhdistin, E käynnistysimuri, F vaihtoventtiili, G lisäilmaputki, H syöttö moottoriin.

Silti erillinen hiukkaspuhdistin on tarpeen. Tämä ns. karkeapuhdistin on yleensä sykroni, mutta myös muut inertiaerottimet ja nestepesu soveltuvat tarkoitukseen (Pohjanen & Valli 1943). Karkeapuhdistimen jälkeisen jäädyttimen päätarkoitus on kaasun kompressointi, mutta se voidaan rakentaa myös siten, että se toimii inertiaerottimena ja kaasun mukana tulevan vesihöyryn tiivistyessä muodostuvat vesipisarot toimivat kaasun vesipesuna (Pohjanen & Valli 1943). Jäädyttimen jälkeinen kaasu ei välttämättä vielä ole riittävän puhdasta moottorille, koska hiilitomu pystyy seuraamaan kaasua inertiaerottimista huolimatta. Hienopuhdistin voidaan toteuttaa lukuisilla tekniikoilla, jolloin puhdistusaineena on esimerkiksi kangas, hamppu, lastuvilla, puunappulat, lasivilla, korkkimurska (Pohjanen & Valli 1943) tai meriheinä (Talvitie 1944). Moderni mahdollisuus on nykyisiin dieselmootoreihin valmistettujen hiukkaspuhdistusteknologioiden soveltaminen. Lairoissa ja junissa ovat käytettävissä myös voimalaitosten hiukkaspuhdistinteknologiat kuten sähkösuodatin ja märkäpesurit.

Perinteiset kaasutuslaitokset jaettiin korkealämpötilakaasua (1000–1300 °C) tai matalalämpötilakaasua (500–600 °C) tuottaviin (Nykänen 2000). Jälkimmäisessä metaanipitoisuus on korkea ja vetytitoisuus on matala. Korkealämpötilakaasussa, jota nykyään suurissa laitoksissa yleensä tuotetaan, vetytitoisuus on korkea ja metaanipitoisuus alhainen. Kaasutus tehdään normaalipaineessa tai pienessä ylipaineessa, n. 10–20 bar (Talvitie 1945b). Kaasutuksen hyötysuhde, kun sillä tarkoitetaan ulos tulleen energiamäärän ja kaasutukseen käytetyn energiamäärän suhdetta on 92–97 % (Filén ym. 1984), mutta tällöin ei oteta huomioon kaasutukseen käytettävän resurssin energiasisältöä. Plasma-kaasutus on uusi menetelmä, joka kaupallistettiin Japanissa 2000-luvun alussa kiinteää yhdyskuntajätettä käyttävänä (Higman & Burgt 2003). Siinä käytetään erittäin korkeaa kaasutuslämpötilaa, mikä merkitsee, että se soveltuu myös ongelmajätteiden käsittelyyn.

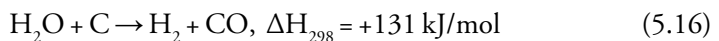
Kaasutuksessa syntyy vetyä ja metaania, jotka voidaan erottaa suoraan tuotekaasusta (Kuva 5.14). Tuotekaasu voidaan myös puhdistaa synteetikaasuksi (CO + H₂) käytettäväksi Fischer-Tropsch-, metaani-, metanoli-, DME- tai muissa synteeseissä (Berndes ym. 2001, Hamelinck & Faaij 2002). Synteetikaasua saadaan myös johtamalla vesihöyryä hehkuvan hiilikerroksen läpi eli tuottamalla vesikaasua tai höyryreformoimalla biokaasua (Kuva 5.14).

5.4.4.2 Osittaishapetus

Osittaishapetus tarkoittaa hiilivetyjen reaktiota hapen kanssa siten, että hiilivedyt eivät pala, vaan muodostavat palamiskelpoisia molekyylejä. Kaasutus on esimerkki osittaishapetuksesta. Osittaishapetus voidaan tehdä termisesti tai katalyyttisesti hapen, ilman tai höyryn avulla. Autotermisessä osittaishapetuksessa prosessin tarvitsema energia saadaan kokonaan reaktioissa vapautuvasta lämmöstä ja allotermisessä osittaishapetuksessa energiaa tuodaan prosessiin ulkoa. Osittaishapetuksella voidaan valmistaa synteetikaasua esimerkiksi metaanista ja nestemäisistä polttoaineista.

5.4.4.3 Vesikaasuprosessi

Vesikaasuprosessi tarkoittaa synteetikaasun valmistamista johtamalla höyryä (puu)hiilikerroksen läpi:



Tämä reaktio on endoterminen. Puuhiilen valmistaminen sitä varten ei ole perusteltua, mutta menetelmä tulee kyseeseen, mikäli puuhiiltä jostain muusta syystä on tarjolla. Yleensä tämä prosessi on kivihiilipohjainen, jolloin tuotettu vety on fossiilista.

5.4.4.4 Höyryreformointi

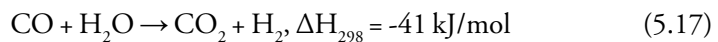
Kuvassa 5.14 höyryreformointi tarkoittaa biokaasun höyryreformointia, joka on (maa-kaasulla) nykyään yleisin tapa synteetikaasun valmistamiseksi. Höyryreformointi on sovellettavissa kaasumaisten biopolttoaineiden lisäksi myös kiinteiden ja nestemäisten

käsittelyyn. Esimerkiksi pyrolyysiöljystä on tehtävissä liikennepolttoaineita höyryreformoinnin avulla (Chornet ym. 1996).

Vuodesta 1865 alkaen 1900-luvun alkuun höyryreformoitiin myös puuta varsinkin USA:ssa. Tämä niin sanottu puun vesihöyrytislauk oli eräs tärpätin tuotantotavoista, jota ei kuitenkaan käytetty Suomessa. Se on nopea prosessi verrattuna pyrolyysiin, kestäen 1-6 tuntia, ja tarvittava laitteisto on pieni kuivatislaukseen verrattuna. Höyrytislauksen ainut lopputuote on tärpätti. Vesihöyrytislaukusta käytettiin myös hartsin valmistukseen pihkasta, jolloin samalla saatiin tärpättiä (Talvitie 1924b).

5.4.4.5 Vesi-kaasu-vaihtoreaktio

Vesi-kaasu-vaihtoreaktio (Kuva 5.14) on eksoterminen vetyä tuottava hiilimonoksidin ja vesihöyryn reaktio, jota myös kaasuvaihtoreaktioksi ja vaihtoreaktioksi (shift) kutsutaan:



Sitä käytetään erityisesti höyryreformoinnin katalyyttisena (Fe, Cr, Co, Zn, Co, Mo) jälkiprosessina nostamaan vedyn määrää synteetikaasussa alle 225 °C lämpötilassa (Probstein & Hicks 1990). Se on myös yksi kaasuttimissa tapahtuvista reaktioista.

5.4.5 Synteetikaasupohjaiset synteetit

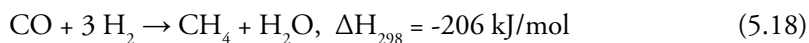
Synteeti tuottaa biopolttoaineita, mikäli synteetikaasu (vedyn ja hiilimonoksidin seos) on valmistettu bioresursseista, esimerkiksi puun kaasutuksella tai biokaasun höyryreformoinnilla. Kaikki synteetikaasupohjaiset synteetit edellyttävät katalyyttiä ja useimmiten myös korkeaa lämpötilaa ja/tai painetta. Puusta syntetisoitujen polttoaineiden tuotantohyötysuhteet on ilmoitettu taulukossa 5.6. Metaanisynteeti on selvästi energiatehokkain vaihtoehto.

Taulukko 5.6. Synteetikaasupohjaisten polttoaineiden tuotannon hyötysuhde puusta (Probstein & Hicks 1990, Ekbohm ym. 2003).

Synteeti	Terminen hyötysuhde
SBG	75–85 %
Metanoli	42–66 %
DME	31–67 %
FT	40–50 %
MTG	40–50 %

5.4.5.1 Metaanisynteesi (SBG)

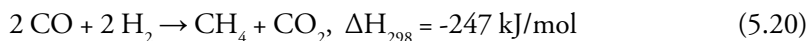
Metaanisynteesin eli metanoinnin



alkuperäinen katalyytti Sabatierin ja Senderensin vuonna 1902 julkaistussa tutkimuksessa oli nikkeli, mutta he löysivät vuoteen 1925 mennessä useita muitakin sopivia katalyyttejä, joista tärkeimmät ovat rutenium, koboltti, rauta ja molybdeeni (Mills & Cusumano 1980). Myös iridium ja rodium sopivat katalyyteiksi, mutta ne ovat vähemmän selektiivisiä (Probstein & Hicks 1990). Metaanisynteesin katalyytit voivat olla lähes 100 % selektiivisiä (Dagle ym. 2007), josta syystä vaativaa jalostusta ajoneuvokäyttöä varten ei tarvita. Kaupallisissa laitoksissa yleisin katalyytti on nikkeli, jota käytettäessä lämpötila on 300–400 °C (Probstein & Hicks 1990), mutta muiden katalyyttien kanssa laajempi lämpötilaväli 120–650 °C on mahdollinen. Nikkeliä käytettäessä saadaan myös hiilidioksidia hyödynnettyä Sabatier-reaktiolla



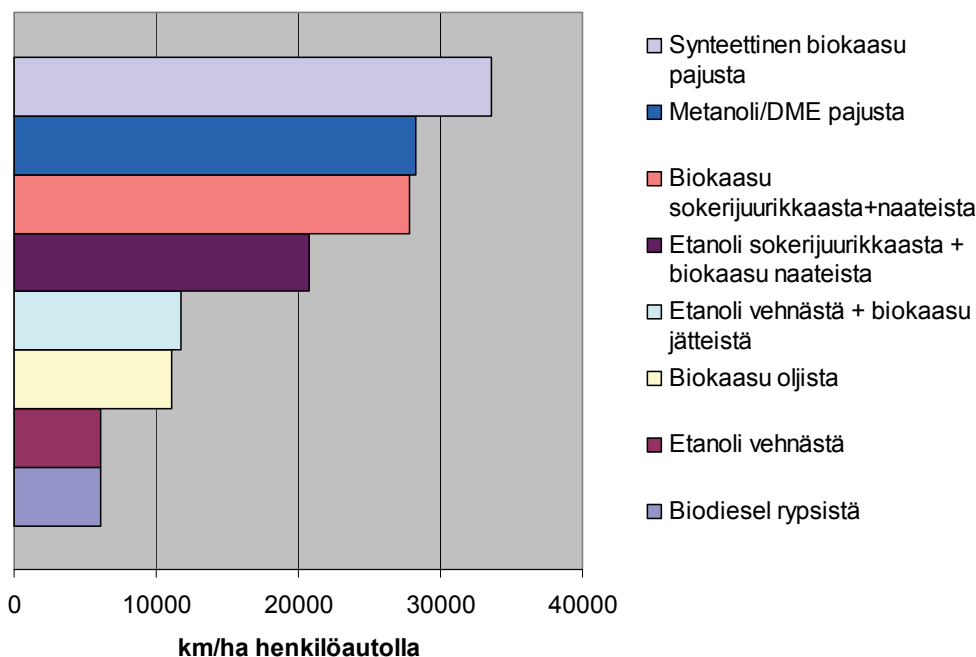
Hiilidioksidia on synteesikaasussa kaasutuksen tuottamana epäpuhtautena ja sitä syntyy toisessa metaanisynteesireaktiossa, jonka etuna on, että vetyä ei menetetä vesihöyrynä:



Nikkelikatalyytit pystyvät toimimaan lähes 100 % selektiivisesti samanaikaisesti hiilimonoksidin ja hiilidioksidin konversiossa (Sehsted ym. 2007). Mikäli hiilidioksidia ei haluta konvertoida ja menettää vetyä esimerkiksi polttokennokäyttöön, on käytettävä muita katalyytteja, esimerkiksi rutenium-pohjaisia (Dagle ym. 2007).

Tuotekaasun happi poistuu siis pääasiassa vesihöyrynä, mutta myös hiilidioksidina. Metaanisynteesi on mahdollinen normaalipaineessakin, mutta yleensä käytetään lievää ylipainetta, 5–30 bar (Moulijn ym. 2001) tai joidenkin katalyyttien kanssa korkeampiakin paineita 140 bariin asti. Metaanisynteesi on voimakkaasti eksotermisenä, joten laitoksissa tuotetaan myös lämpöä.

Päinvastoin kuin FT-synteesissä, metanolisynteesissä ja DME-synteesissä, metaanisynteesissä voidaan käyttää vaativan korkean lämpötilan kaasutuksen sijaan matalan lämpötilan kaasutusta, joka on halvempi ja teknisesti yksinkertaisempi ratkaisu (Refuel 2009). Metaanisynteesin avulla saavutetaan 20 % korkeampi hyötysuhde kuin FT-synteesissä ja 10 % korkeampi kuin metanoli- ja DME-synteesissä (Refuel 2008). Tietystä kuivasta bioresurssimäärästä tai energiakasvien kasvatuspinta-alasta saadaan siis metaanisynteesin avulla enemmän hyödynnettävää liikennepolttoainetta kuin muilla termisillä menetelmillä ja myös enemmän kuin mädätyksellä, käymisellä ja vaihtoesteröinnillä (Kuva 5.20). Kuvasta puuttuu FT-synteesi, joka sijoittuisi biokaasun alapuolelle. Märän bioresurssin kuten biojätteen tapauksessa mädätys nousee SBG:n ja kaikkien muidenkin termisten menetelmien edelle, koska kuivausenergiaa ei tarvita.



Kuva 5.20. Nettoenergiasaanto liikennebiopolttoainetta Etelä-Ruotsissa yhdeltä hehtaarilta erilaisilla teknologioilla ja kasveilla mittana henkilöautokilometrit. Bussikilometrit saadaan jakamalla luvut kolmella. Kuvan tietojen lähde on Ruotsin öljyriippumattomuusstrategiassa esitelty Pål Börjessonin tutkimus (Sveriges Regeringskansliet 2006).

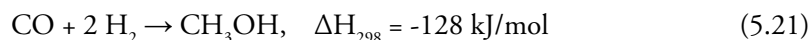
Itävallan Güssingissa käynnistettiin vuonna 2009 1 MW_{SBG} biometaanisynteesilaitos ja liikennemetaanin jakeluasema, jotka käyttävät vuonna 2002 toimintansa aloittaneen 8 MW_{th} kaasutus-CHP-laitoksen tuottamaa puuperäistä synteetisikaasua. Laitoksen tekninen diagrammi on saatavissa EU-projektin sivuilta (Bio-SNG 2009). Metaanisynteesin kokonaishyötysuhde on 74–90 %, josta metaania saadaan 52–72 % hyötysuhteella ja lisäksi lämpöä 10–25 %. Kaasutuksessa saadaan tuotekaasua 70–80 % hyötysuhteella ja loppu menee lämmöksi. Kokonaishyötysuhde puusta kaasutuksen ja metaanisynteesin kautta metaaniksi on 55–65 %, jonka lisäksi saadaan hyödynnettävää lämpöä. (PSI 2009)

5.4.5.2 Metanolisynteesi

Metanolisynteesi (MeOH-synteesi kuvassa 5.14) on katalyyttinen korkeassa paineessa ja lämpötilassa tapahtuva prosessi, joka on nykyään vallitseva kaupallinen metanolin valmistusmenetelmä. Nykytuotanto pohjautuu enimmäkseen maakaasun höyryreformointiin, mutta biokaasun höyryreformointi on teknisesti samanlainen. Kivihiilen kaasutukseen perustuvaa tuotantoa puolestaan vastaa kiinteän biomassan kaasutus. Teollisessa mittakaavassa biometanolia tuotetaan nykyään vain Kiinassa. Puun etu kivihiileen verrattuna on vetyrikkaampi synteetisikaasu (Alanko 1950). Puukaasulla vedyn ja hiilimonoksidin

suhde on lähellä optimaalista 2:1, kun taas kivihiilipohjaisella vesikaasulla suhde on 1:1, joka edellyttää lisätoimenpiteitä vedyn osuuden nostamiseksi (Talvitie 1945b).

Metanolisynteesin reaktioyhtälöt hiilimonoksidista ja hiilidioksidista ovat:



Imatralla vuonna 1949 käynnistyneessä Enso-Gutzeitin hakepohjaisessa metanolisynteesitehtaassa kaasutus tehtiin hapella, jolloin tyyppiä ei synteesikaasussa ollut. Synteesikaasun H_2/CO -suhde oli ihanteellinen 2:1. Synteesikaasu puhdistettiin vesipesulla, jossa myös hiilidioksidi liukenee, ja siten hiilidioksidia ei synteesissä käytetty. Synteesireaktorissa paine oli 600 baria ja lämpötila 400 °C. Metanoli puhdistettiin tislamalla. (Alanko 1950)

Imatran tehdas oli teknisesti vaativa prosessi hyvin korkean paineen takia ja onnistuminen sen toteuttamisessa merkitsee, että huomattavasti yksinkertaisemmin toteutettavissa olevalla nykyisellä matalapainetekniikalla vastaava tehdas olisi helpompi toteuttaa. Teollisessa metanolisynteesissä käytettiin sinkki- ja kromipohjaisia katalyyttejä (Talvitie 1945b) vuoteen 1966 asti, jolloin ICI perusti ensimmäisen matalapainetehtaan Billingtoniin Englantiin. ICI onnistui pudottamaan paineen 50 bariin käyttäen kuparipohjaisia katalyyttejä (Cheng & Kung 1994). Näistä esimerkkejä ovat $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ja $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Cr}_2\text{O}_3$. Merkittävänä lisätuna on näiden katalyyttien suuri selektiivisyys.

Metanolisynteesissä muodostuu sivutuotteena ammoniakkiä. Haber-Bosch-synteesi vastaa metanolisynteesiä päätuotteenaan ammoniakki ja sivutuotteena metanoli. Nämä synteesit voidaan tehdä joustavasti samassa tehtaassa, kuten käytännössä on meneteltykin ja valmistettava tuote määräytyy kysynnän ja markkinahintojen perusteella. Typpi Oy:n (nykyään Kemiran Oulun tehtaas) ammoniakksynteesiä varten vuonna 1952 valmistunut kaasutuslaitos Oulussa oli Suomen toinen synteesikaasun tuotantolaitos Imatran metanolitehtaan jälkeen, mutta sen raaka-aineena on käytetty vain fossiilisia polttoaineita, ensin kivihiiltä ja myöhemmin raskasta polttoöljyä (Hase ym. 1990). Ruotsissa metanolisynteesi on käytössä puujättepohjaisessa demonstraatiolaitoksessa Värnamossa (Kuva 5.21) ja mustalipeäpohjaisessa demonstraatiolaitoksessa Piteässä (Kuva 5.22).



Kuva 5.21. Puuta käyttävä 18 MW:n kaasutus- ja metanoli/DME-synteesilaitos Värnamossa Ruotsissa. [2006]

5.4.5.3 DME-synteesi

DME:tä (dimetyylieetteri) saadaan synteesikaasusta



ja sitä voidaan erikseen valmistaa metanolista eksotermisellä reaktiolla



Reaktiolämpötila on noin 300–325°C ja paine 23 bar (Probstein & Hicks 1990). Metanoli voi olla synteesikaasusta valmistettua, kuten yleensä on, mutta se voi olla myös muulla tavalla valmistettua. Valmistettaessa DME:ta ja metanolia yhdessä, saavutetaan suurempi hyötysuhde kuin erikseen valmistettaessa, mustalipeällä jopa yli 60 % (Ekbom ym. 2003). Ruotsissa DME-synteesi on käytössä puujättepohjaisessa demonstraatiolaitoksessa Värnamossa (Kuva 5.21) ja mustalipeäpohjaisessa demonstraatiolaitoksessa Piteässä (Kuva 5.22).

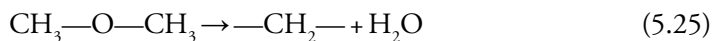


Kuva 5.22. Mustalipeästä DME:tä ja metanolia valmistava Chemrecin 3 MW:n demonstraatiolaitos Kappan sellutehtaan yhteydessä Piteässä Ruotsissa. [2005]

5.4.5.4 MTG-synteesi ja muut katalyyttiset bensiinisynteesit

Zeoliittien avulla happea sisältävistä yhdisteistä, kuten metanoli ja pyrolyysiöljy, saadaan noin 450 °C lämpötilassa tuotettua bensiiniä vastaavia hiilivetyjä (Grange ym. 1996). Lähtöaineet voivat olla synteesikaasusta tai muilla tavoilla valmistettuja.

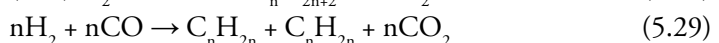
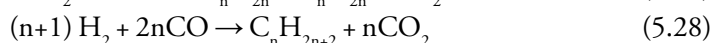
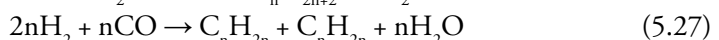
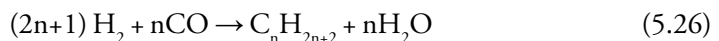
Mobilin 1970-luvulla kehittämä MTG-synteesi (methanol-to-gasoline) on katalyyttisistä bensiinisynteesistä kaupallisesti laajimmin hyödynnetty. Siinä muunnetaan ensin metanoli DME:ksi (reaktio 5.24) ja bensiini syntetisoidaan DME:stä noin 300 °C lämpötilassa ja 22 barin paineessa (Probstein & Hicks 1990):



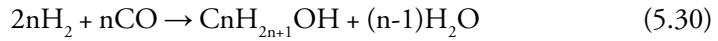
Todellisuudessa tämä synteesi etenee useiden välivaiheiden kautta ja se on kokonaisuudessaan voimakkaasti eksoterminen (Moulijn ym. 2001).

5.4.5.5 FT-synteesi (Fischer-Tropch-synteesi)

FT-synteesi on katalyyttinen polymeeraatioprosessi, jossa tuotetaan synteesikaasusta heterogeenisiä eli monista komponenteista koostuvia polttoaineita. FT-synteesi tuottaa hiilivetyjä vesihöyry ja hiilidioksidi sivutuotteina yleisillä reaktioyhtälöillä (Perry & Green 1984)



ja alkoholeja reaktioyhtälöllä



Butanoli on esimerkki polttoainekäyttöön sopivasta alkoholista, jota on pystytty tuottamaan jo 1940-luvulla (Talvitie 1945b). Myös muita happea sisältäviä yhdisteitä, kuten karboksyylihappoja, prosessissa syntyy. Katalyyteiksi sopivat useat metallit, kuten rauta, koboltti, nikkeli ja rutenium (Probstein & Hicks). Paine on 100–300 bar ja lämpötila 220–450 °C.

Etelä-Afrikassa SASOL (South African Coal, Oil and Gas Corporation) on tuottanut liikennepolttoaineita kaupallisesti kivihiilestä FT-synteesillä vuodesta 1955. Tyypillinen tuotejakauma on esitetty taulukossa 5.7 eli saadaan merkittäviä määriä myös kaasumaisia CTG-polttoaineita (42 p-%) eikä pelkästään nestemäisiä CTL-komponentteja. Tuotejakauma voidaan vaihtaa katalyyttejä, painetta ja lämpötilaa vaihtamalla.

Taulukko 5.7. SASOLin FT-synteesin tyypillinen tuotejakauma (muokattu: Probstein & Hicks 1990).

Tuote	Saanto
Metaani	11 p-%
Etaani ja eteeni	10 p-%
Nestekaasu	21 p-%
Bensiini, kerosiini ja petroli	41 p-%
Dieselöljy	6 p-%
Alkoholit	9 p-%
Hapot	2 p-%

FT-synteesiprosessi vastaa Imatran vuonna 1949 käynnistyneen metanolitehtaan prosessia lukuun ottamatta sitä, että 1–10 ilmakehän paine olisi riittänyt 600 ilmakehän sijaan (Alanko 1950). Myöskään happikaasutusta ei olisi tarvittu vaan ilmakaasutus olisi riittänyt. Siten biomassapohjainen FT-synteesiteollisuus olisi teknisesti helposti voitu toteuttaa Suomessa jo 1940-luvulla. Halvan raakaöljyn sekä öljyteollisuuden ja kansallisten prioriteettien takia sitä ei toteutettu. Stora-Enson Varkauden tehtaiden ja Nesteen Porvoon jalostamon hanke kyseisen teknologian käyttöönottamiseksi käynnistyi maaliskuussa 2007 ja koelaitos otettiin käyttöön vuonna 2009. Kaupallisen kokoluokan laitosta suunnitellaan käynnistettäväksi vuoteen 2013 mennessä.

FT-dieseliä löytyy Ruotsin markkinoilta kahden valmistajan tuotenimillä Ecopar ja Paradiesel (Kuva 5.23). Molemmat ovat tällä hetkellä GTL-tuotteita, mutta tarkoitus on saada 10 vuoden sisällä ne vähitellen korvattua BTL:llä (Wahlström 2008).

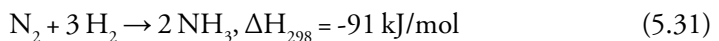


Kuva 5.23. FT-dieseliä myydään Ruotsissa kahdella tuotenimellä: a) Ecoparin myyntipiste Uppsalassa. [2005] b) Paradieselin myyntipiste Sundsvallissa. [2009]

5.4.6 Muita termokemiallisia konversioita

Monia muitakin termokemiallisia konversioita voidaan käyttää liikennepolttoainesten tuottamiseen. Yksi vanhimmista, jo 1700-luvulta asti tunnettu, menetelmä vedyn tuotannossa on rauta-höyry-prosessi. Reformointi on yleisnimi kemiallisille prosesseille, joiden avulla polttoaineen ominaisuuksia säädetään käyttötarkoitukseensa sopiviksi. Esimerkkinä on hapen lisääminen hiilivetyihin niiden palamisen tehostamiseksi (Moulijn ym. 2001). Synteesikaasu tarjoaa mahdollisuuksia monille muillekin synteeseille kuin edellä on kuvattu. Esimerkkinä on butanolisynteesi, jonka avulla voitaisiin korvata nykyinen raakaöljypohjainen butanolin valmistus sekä lisäaineeksi että puhtaaksi biopolttoaineeksi. Etanolipohjaiset synteetit ovat myös iso prosessiryhmä: etanolista on 1900-luvun alusta lähtien osattu valmistaa eteeniä eli etyleeniä ja tuottaa siitä hiilivetyjä, esimerkiksi bensiiniä, petroolia ja voiteluöljyjä (Routala 1934).

Haber-Bosch-synteesi tarkoittaa ammoniakkin syntetisointia typestä ja vedystä rautaoksidin (magnetiitin) katalysoimana 300–550 °C lämpötilassa ja 150-300 barin paineessa:



Sen toteutti ensimmäisenä laboratoriossa Fritz Haber vuonna 1909 ja Carl Bosch kehitti sen kaupallisen version BASFin tehtaaseen Oppaussa Saksassa vuonna 1913. Typpi otetaan ilmasta ja vety valmistetaan joko kaasuttamalla tai elektrolyysillä. Kaasutusvedyn valmistuksen yhteydessä saadaan sivutuotteena mm. metaania. Suomessa tätä prosessia käytettiin Typpi Oy:n (nykyään Kemira) tehtailla Oulussa vuodesta 1952 alkaen kaasutuksen avulla raaka-aineena kivihiili, raskas polttoöljy, teollisuusbenssiini ja turve (Riistama ym. 2005).

5.5 SÄHKÖKEMIALLISET KONVERSIOMENETELMÄT UE-POLTTOAINEIKSI

Sähkökemiallisilla konversiomenetelmillä voidaan millä tahansa uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetulla sähköllä valmistaa UE-polttoaineita joko epäorgaanisista tai or-

gaanisista yhdisteistä. Epäorgaanisista yhdisteistä tässä tarkoituksessa tärkeimmät ovat vesi ja hiilidioksidi.

5.5.1 Elektrolyysi

Yleisin sähkökemiallinen konversio on jo 1700-luvun lopulta tunnettu elektrolyysi, jossa vesi hajotetaan sähköllä vedyksi ja hapeksi (elektrolyysillä voidaan hajottaa monia muitakin yhdisteitä kuin vettä). Ihmisperäisen ilmastomuutoksen teorian isänä tunnettu Svante Arrhenius sai elektrolyysin teoreettisesta ymmärtämisestä Nobelin kemian palkinnon vuonna 1903 (Crawford 1996). Elektrolyysi mahdollistaa erittäin puhtaan, yli 99,9 %:n, vedyn tuottamisen kaikissa kokoluokissa tehtaista omakotitaloihin ja jopa pieniin demonstraatiolaitteisiin, joista kuvassa 5.24 on esimerkki. Étienne Lenoir otti elektrolyysivedyn liikennekäyttöön vuonna 1860 rakentamassaan Hippomobile-autossaan.



Kuva 5.24. 2 watin PEM-elektrolyseri ja malliautoon sijoitettu 0,24 watin PEM-polttokenno. Noin 100 euron hintaiseen Horizonin demonstraatioosarjaan kuuluu myös taustalla näkyvä 0,5 watin aurinkokenno aurinkovedyn tuottamiseksi. [2009]

Elektrolyysin osuus on noin 4 % maailman vedyntuotannosta. Suomessa vetyä on tuotettu elektrolyysillä teollisesti vuodesta 1912. Teollisesti käytetään yleisimmin alkalielektrolyysereitä erityisesti suurissa laitoksissa ja pienemmissä sovelluksissa PEM-elektrolyysereitä. Nämä molemmat tyypit soveltuvat liikennevedyn tuotantoon joko keskitetysti tai omakotitaloissa (Agbossou ym. 2003). Ensimmäinen aurinkovetyjärjestelmään pohjautuva täysin energiaomavarainen omakotitalo valmistui Freiburgiin Saksaan vuonna 1992 (Kuva 5.25a).

Liikennevedyn valmistukseen soveltuvien kaupallisten alkalielektrolyyserilaitteistojen hyötysuhde (vedyn HHV/koko laitteiston käyttämä sähköenergia) vaihtelee välillä 63–73 % ja PEM-elektrolyyserien noin 56 % (Ivy 2004). Pelkän elektrolyyserin hyötysuhde on parhaimmillaan 83 %, mutta laitteiston muut osat aiheuttavat 10 %-yksikön lisähäviön. Kuvassa 5.25 on esimerkki talokohtaisesta tuuli- ja aurinkosähkökäyttöisestä elektrolyyseristä. Jyväskylän yliopiston uusiutuvan energian koulutus- ja tutkimusohjelma käyttää laitteistoa Arto Salosen Kokemäenjokilaakson ammattiopistossa ja e3-yhtiössä

vetämän hankkeen tuottaman Fantasia-polttokennoauton vedyn tuottamiseen (Paananen ym. 2005, Granath 2005). Vety tuotetaan yliopiston kemian laitoksen katolle sijoitettujen aurinkopaneelien ja tuuliturbiinin avulla (Kuva 7.4). Elektrolyysivedyn keskitetystä liikennekäytöstä on esimerkkinä Tukholman UE-vetybussiprojekti (Kuva 5.26, Kansikuva 7).



Kuva 5.25. a) Aurinkovetyjärjestelmän avulla energiaomavaraisen talon vetyvarasto Freiburgissa Saksassa. [1996] b) Kotimainen Labgasin omakotitalokokoluokan PEM-elektrolyysilaitteisto vedyn valmistamiseksi vedestä (oikealla) sekä kotimainen Hydrocellin vedyn varastointisäiliö (vasemmalla). Tällä laitteistolla valmistetaan paikallisella tuuli- ja aurinkosähköllä vetyä kotimaiseen e3:n Fantasia-polttokennoautoon Jyväskylän yliopistossa. [2005]



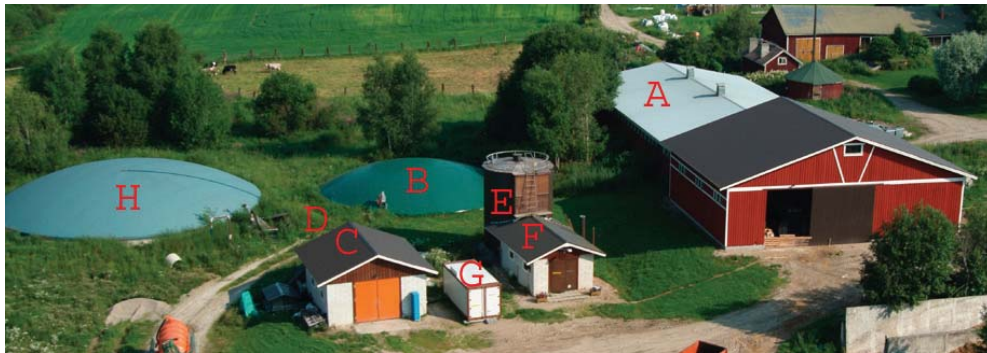
Kuva 5.26. Stuart Energy:n elektrolyysi- ja vetytankkauslaitteisto, jonka avulla tuotetaan vesi-, tuuli- ja biosähköllä vetyä MB Citaro -polttokennobusseihin Tukholmassa. [2005]

5.5.2 Muut sähkökemialliset konversiot

Magnetolyysi on harvemmin käytetty prosessi, jossa elektrolyysi toteutetaan magneettisella induktiolla. Mikrobiologinen elektrolyysi on vasta vuonna 2005 demonstroitu menetelmä, jolla voidaan tuottaa vedyn lisäksi myös metaania ja resurssina on veden lisäksi hiilidioksidi ja orgaanisia yhdisteitä (Luku 5.2.5).

5.6 MONITUOTANTO JA BIOJALOSTAMOT

Monituotanto ja biojalostamot tarkoittavat bioraaka-aineen monipuolista hyödyntämistä jalostamalla siitä monia energia- ja muita tuotteita. Monituotanto-termin (polygeneration) juuret ovat voimalaitostekniikassa. Mikäli voimalassa valmistetaan sähkön lisäksi myös muuta, yleensä lämpöä kaukolämpöverkkoon, teknologiaa kutsutaan termillä cogeneration (yhteistuotanto) tai combined heat and power (CHP). Mikäli tuotteita on kolme, edellisten lisäksi yleensä teollisuushöyry tai kaukokylmä, kyse on tri-generation-teknikasta. Polygeneration tarkoittaa, että tuotteita on vähintään neljä. Esimerkkinä tästä on Kalmarin maatila Laukaassa (Kuva 5.27). Siellä tuotetaan mädätystekniikalla sähköä, lämpöä, liikennepolttoaineita sekä lannoitteita (Lampinen 2004c).



Kuva 5.27. Monituotantolaitos Kalmarin maatilalla Laukaassa. Siellä valmistetaan liikennepolttoainetta (metaani), sähköä, lämpöä ja lannoitteita yhteismädätyksellä lannasta, teollisuusjätteistä, kasvijätteistä, ruokajätteistä ja energiakasveista. (Lampinen 2004c) [Lauri Jokela 2004]
Kirjainselitteet: A = navetta, B = navettalietteen välivarasto, C = oheismädätettävän jätteen välivarasto, D = jätteiden sekoitusallas, E = biokaasureaktori, F = CHP-yksikkö ja prosessin valvonta, G = liikennemetaanin puhdistus, H = mädätysjätteen varasto ja metaanin jälkikaasuuntumisallas

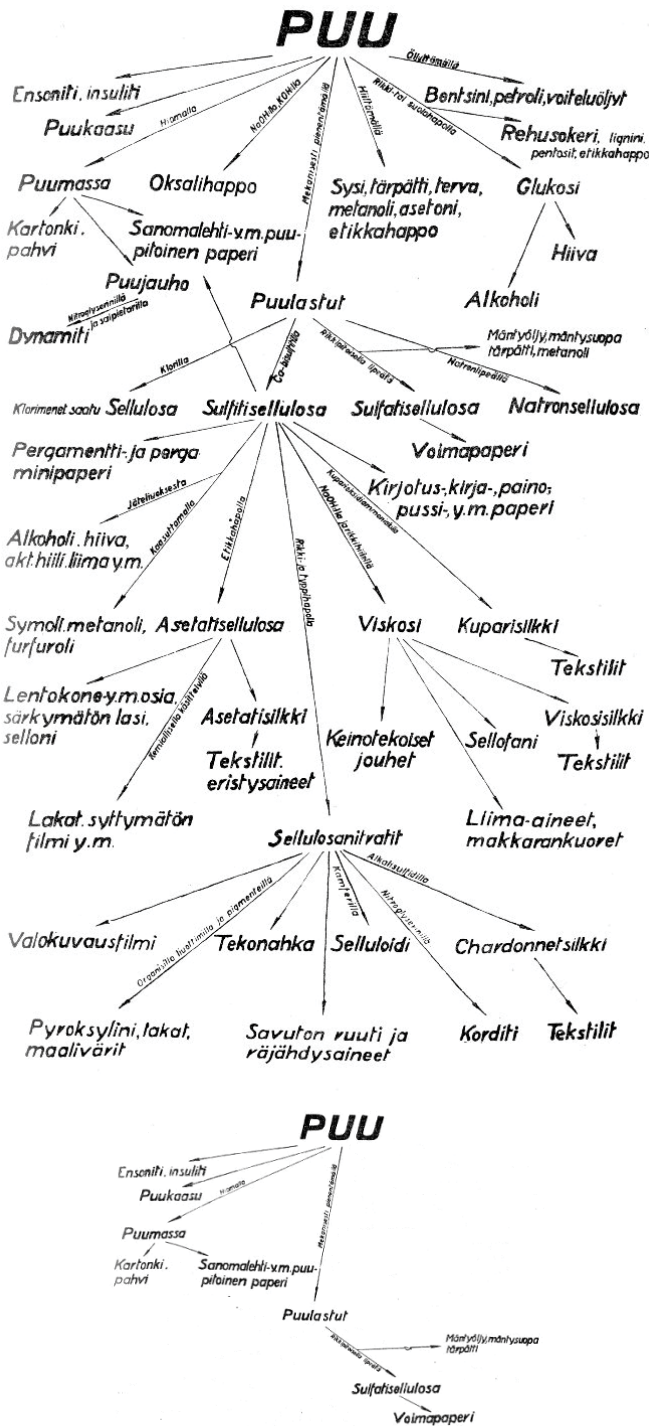
Biojalostamo-termin (biorefinery) juuret ovat puolestaan raakaöljyn jalostuksessa. Biomassasta voidaan tuottaa samoja tuotteita kuin raakaöljystäkin ja suurimmaksi osin samoilla prosesseilla kuin raakaöljyn jalostamoilla on käytössä.

Keskitettyssä liikennebiopolttoaineiden tuotannossa voidaan hyödyntää olemassa olevia teollisia laitoksia ja niiden valmiita logistisia ketjuja ja tuotantovälineistöä. Erityisen sopivia teollisuuslaitoksia on lueteltu taulukossa 5.8.

Taulukko 5.8. Esimerkkejä teollisista laitoksista, joiden tuotantovalikoima sopii erityisen hyvin laajennettavaksi liikennebiopolttoaineilla.

Teollisuuslaitos	Teknologiat	Edut
Sellutehtaat	Kaasutus, suora nesteytys, pyrolyysi, mädätys, fermentaatio, vaihtoesteröinti	Olemassa oleva bioraaka-aineen logistiikka
Kunnalliset CHP-voimalat	Kaasutus, pyrolyysi, elektrolyysi, fermentaatio	Olemassa oleva bioraaka-aineen logistiikka
Raakaöljyn jalostamot	Pyrolyysi, suora nesteytys, kaasutus	Olemassa oleva jalostusteknologia ja polttoaineen myyntilogistiikka
Sokeritehtaat	Fermentaatio, mädätys	Olemassa oleva sokeri- ja tärkkelyskasvilogistiikka
Elintarviketehtaat	Mädätys, fermentaatio, vaihtoesteröinti, suora nesteytys	Jäteresurssi, josta on joka tapauksessa päästävä eroon
Yhdyskuntien jäteveden puhdistamot	Mädätys	Jäteresurssi, josta on joka tapauksessa päästävä eroon

Suomen koko metsäteollisuus käyttää puuta vuosittain noin 75 miljoonaa kuutiota (METLA 2004), joka tarkoittaa noin 40 miljoonaa tonnia kuiva-ainetta ja 100 miljoonaa tonnia puiden metsäkosteudessa. Koska runkopuun massa on noin 60 % koko puun massasta, metsäteollisuuden vuosittainen puun käyttö kuiva-aineena metsään jäävä hakkuutähde mukaan luettuna on noin 65 Mt. Suomen liikennebiopolttoaineiden käyttötavoite vuonna 2010 on 5,75 % liikenteen kulutuksesta eli noin 0,22 Mtoe. Se vastaa massavirtana noin 0,3 % metsäteollisuuden puunkäyttäjärjestelmän kuiva-aineen kokonaisuusmassavirrasta. Selluteollisuuden osuus koko metsäteollisuuden puunkäytöstä oli 40 % vuonna 2004 (METLA 2004). Resurssien riittävyyden kannalta vuoden 2010 tavoite on siis erittäin helppo saavuttaa pelkästään metsäteollisuuden sivuvirtana. Teknisesti tämä on osattu jo 1930-luvulla (Kuva 5.28), mutta tuotevalikoima on sen jälkeen supistunut. Perusteiksi siihen on annettu esimerkiksi ydinliiketoimintoihin keskittyminen ja rönsyjen kitkeminen.



Kuva 5.28. Puunjalostusteollisuuden tuotevalikoima Suomessa 1930-luvulla sahateollisuutta lukuun ottamatta (Routala 1936).

5.6.1 Sulfaattisellutehtaat

Sellua eli kemiallista massaa valmistetaan useilla menetelmillä, joista Suomessa käytetään nykyään vain sulfaattimenetelmää. Sulfaattimenetelmällä on noin 90 % markkinaosuus maailman selluntuotannosta (Ekblom ym. 2003). Kaikki sellutehtaat teknologiasta riippumatta ovat erittäin sopivia liikennepolttoainetuotantoon, koska

- ne ovat jo toteuttaneet puun logistiikan,
- ne ovat jo valmiiksi jalostamotyyppisiä laitoksia,
- energiantuotanto tuotannon jätteistä on jo käytössä,
- ne ovat energiayliomavaraisia, joten energian myynti on jo osa liiketoimintaa, ja
- hakkuutähteet muodostavat erittäin huomattavan lisäresurssin.

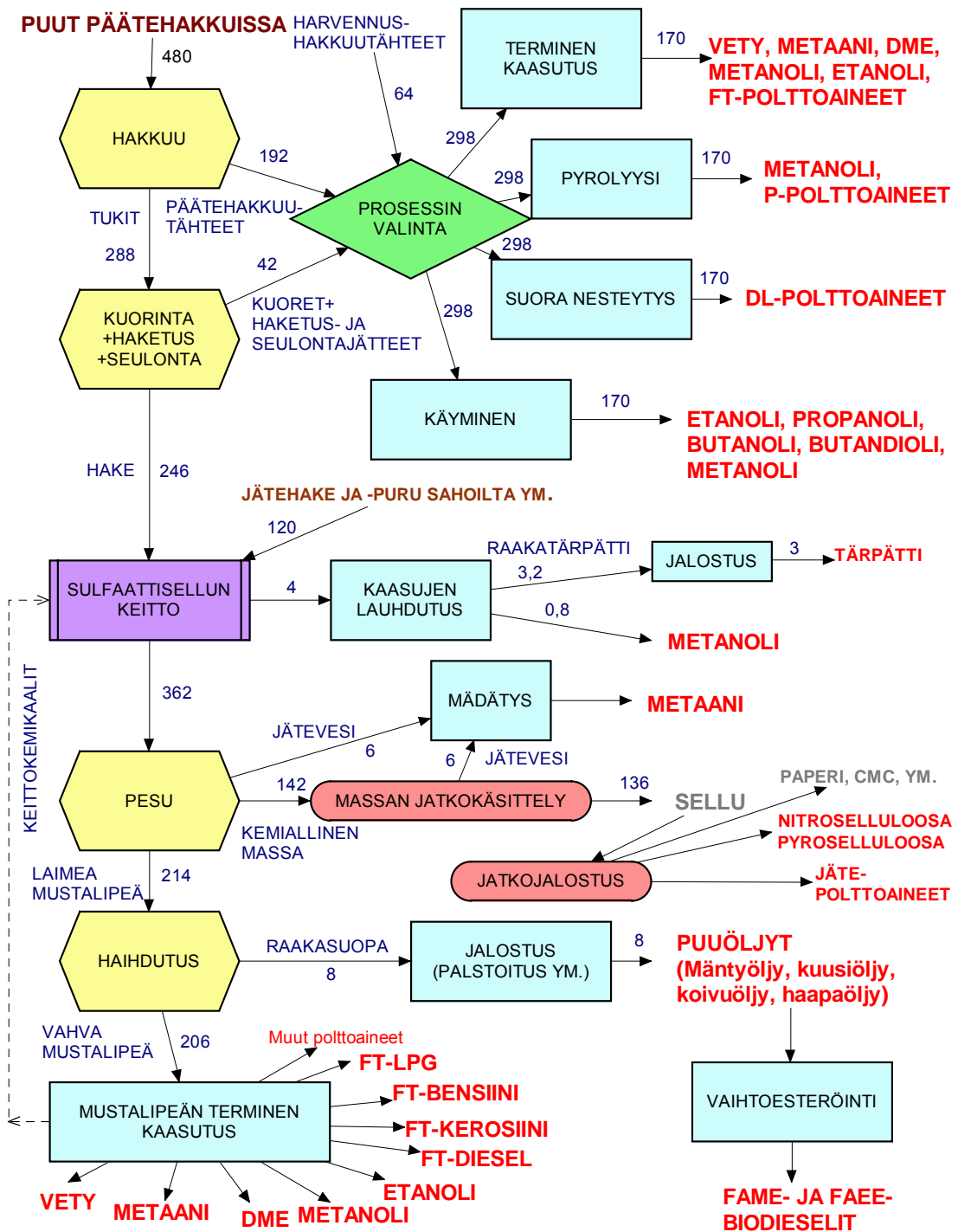
Suomessa on 19 sulfaattisellutehdasta neljällä omistajalla (Kuva 5.29).

Stora Enso Oyj		Botnia, Oy Metsä-Botnia Ab	
Enocell, Uimaharju	635	Rauma	570
Kaukopää, Imatra	795	Kemi	560
Veitsiluoto, Kemi	355	Äänekoski	485
Kemijärvi	230	Kaskinen	425
Kotka	155	Joutseno	600
Oulu	360	Yhteensä	2640
Tainionkoski, Imatra	170		
Varkaus	205		
Yhteensä	2905		

UPM-Kymmene Oyj		Sunila Oy	
Kymi,Kuusaankoski	525	Kotka	350
Kaukas, Lappeenranta	720	Yhteensä	350
Wisaforest, Pietarsaari	750		
Tervasaari, Valkeakoski	235		
RaumaCell, Rauma (fluff)	90		
Yhteensä	2320		

Kuva 5.29. Metsäteollisuus ry:n mukainen sellun tuotantokapasiteetti Suomessa vuonna 2006 [kt] (Näyhä 2006). Vuosituotanto on viime vuosina vaihdellut välillä 7–8 Mt maailman ja Suomen markkinoiden olosuhteiden mukaan.

Liikennepolttoaineiden tuotantoon käytettävissä olevat teknologiat riippuvat selluteknologiasta. Sulfaattiprosessin osalta mahdollisuudet on esitetty kuvassa 5.30, joka sisältää myös massa- ja energiavirrat.



Kuva 5.30. Sulfaattisellunprosessiin lisättävissä olevat liikennebiopolttoaineiden tuotantovaihtoehdot. Ne kaikki eivät ole mahdollisia yhtä aikaa ja osa energiasta käytetään höyryn ja sähkön tuotantoon sekä jätetään metsiin. Numerot tarkoittavat vuotuista teoreettista energiavuota [PJ] Suomen vuoden 2003 tuotantolukujen pohjalta laskettuna.

Esimerkiksi vuonna 2003 Suomen metsäteollisuus käytti runkokuuta 73,5 miljoonaa kiintokuutiometriä, josta selluteollisuuden osuus oli 28,9 Mm³ eli 39 % (METLA 2004). Koska rungon osuus koko puun massasta on noin 60 % (Taulukko 5.9), tähdettä jää sellupuun päätehakkuista 19,2 Mm³. Sekä käytetyn että käyttämättömän puun yhteismäärä on siis 48,1 Mm³. Tämä tarkoittaa 24 Mt kuiva-ainetta, sillä puiden tiheys on noin 0,5 t/m³ (Taulukko 5.9). Se vastaa 480 PJ energiaa, sillä puun lämpöarvo HHV on noin 2 MJ/kg kuiva-ainetta. Päätehakkuiden lisäksi metsien hoidon yhteydessä suoritetaan harvennushakkuita, joiden tuottama puumäärä on noin kolmasosa päätehakkuiden hakkuutähteistä (BENET 2003). Energiana se tarkoittaa sellupuuviljelyksien osalta 64 PJ. Sellupuuviljelysten yhteenlaskettu vuotuinen energiatuotto on siis 544 PJ. Se vastaa noin 40 %:a koko Suomen primäärienergian käytöstä. Näiden lisäksi selluteollisuus käytti sahojen haketta vuonna 2003 8,61 Mm³ ja tuontihaketta 1,57 Mm³ eli yhteensä 10 Mm³ (METLA 2004), energiasisällöltään 120 PJ.

Taulukko 5.9. Puun osien massaosuudet (Kellomäki 1998) ja tiheydet (Paloheimo 2000).

Puun osa	Mänty	Kuusi	Koivu
Runko	59 %	52 %	68 %
Juuristo	24 %	25 %	13 %
Oksat	12 %	15 %	19 %
Neulas	5 %	8 %	
YHT.	100 %	100 %	100 %
Tiheys [t/m ³]	0,49 (0,3–0,86)	0,43 (0,3–0,64)	0,61 (0,46–0,8)

Jätepuuresurssi koostuu päätehakkutähteistä (192 PJ), harvennushakkutähteistä (64 PJ) sekä kuorinta-, haketus- ja seulontajätteistä (42 PJ). Niiden yhteismäärä 298 PJ on käytettävissä liikenteen biopolttoaineiden valmistamiseen joko termisellä kaasutuksella, pyrolyysillä, suoralla nesteytyksellä tai fermentaatiolla. Vain osa näihin konversioprosesseihin tulevasta energiasta päätyy lopulta valmiiden liikennepolttoaineiden energiaksi. Loppuosaa eli yli 100 PJ kuluu prosessin itsensä tarpeisiin ja synnyttää kaasumaisia ja kiinteitä jäännöspolttoaineita sekä hukkalämpöä. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää sellutehtaassa esimerkiksi sellun kuivauksessa, mustalipeän haihdutuksessa ja biokaasureaktorin lämmityksessä vähentäen siten erillisen lämmöntuotannon tarvetta. Sitä voidaan hyödyntää myös sellutehtaan yhteyteen mahdollisesti integroidussa paperitehtaassa tai muussa tuotantolaitoksessa sekä kaukolämmityksen kautta asuintaajamissakin. Kaasumaisia ja kiinteitä konversioprosessin jäännöspolttoaineita – ja periaatteessa hukkalämpöäkin – voidaan käyttää myös sähkön tuotannossa vähentäen siten erillisen sähköntuotannon tarvetta. Nämä hukkaenergiavuot eivät ole mukana kuvassa 5.30. Jätepuuresurssista voidaan teoriassa saada liikennepolttoaineita noin 170 PJ, joka vastaa Suomen tieliikenteen polttoaineen kulutusta (164 PJ vuonna 2004). Näin ollen vuoden 2010 liikenteen biopolttoainetavoite 5,75 % eli noin 10 PJ saavutettaisiin, mikäli 5,75 % jätepuuresurssista hyödynnettäisiin liikenteen biopolttoaineiden valmistukseen.

Nykyään selluteollisuus ei käytä metsähaketta eli päätehaku- ja harvennushakkutähteitä, mutta pieni osa niistä käytetään CHP-voimaloissa ja lämpökeskuksissa. Metsähakkeen energiakäyttö vuonna 2003 oli 3,4 TWh eli 12 PJ (METLA 2004). Se vastaa alle 5 %:a pelkästään selluteollisuuden käyttämän runkokuun yhteydessä syntyvästä pääte- ja

harvennushakkuutähteiden energiasta ja se on puolestaan 39 % koko metsäteollisuuden käytöstä. Koko metsäteollisuuden puusta tuotiin Venäjältä 22 % ja selluteollisuuden puusta kolmasosa vuonna 2003 (METLA 2004), joten hakkuutähteet jäivät siltä osin Venäjälle. Suomen metsiin jäävistä hakkuutähteistä hyödynnettiin yhteensä noin 2 %. On ilmeistä, että hakkuutähteen käyttöä voidaan lisätä huomattavasti ilman, että metsien keinolannoitusta tarvitsee lisätä, mikäli polton tuhkat palautetaan metsiin. Nykyään niiden palauttaminen metsiin on kuitenkin erittäin harvinaista.

Kuorinta-, haketus- ja seulptajäte käytetään kokonaisuudessaan energiantuotannossa, normaalisti sellutehtaan yhteydessä olevassa kuorikattilassa, jossa siitä tuotetaan höyryä ja/tai kaukolämpöä ja/tai sähköä. Koko metsäteollisuus käytti vuonna 2003 kuorta energiantuotantoon 14,3 TWh eli 51 PJ (METLA 2004).

Noin 47 % puusta saadaan konvertoitua selluksi (Gullichsen 2000). Esimerkki männyn konversiosta on taulukossa 5.10. Puun energiasta jää selluun keskimäärin noin 40 %, kun otetaan huomioon eri puulajien komponenttien jakauma (Taulukko 3.4), komponenttien energiasällöt (Taulukko 3.2) ja selluteollisuuden puunkäytön jakauma (METLA 2004).

Taulukko 5.10. Esimerkki puun konversiohyötysuhteista selluksi (Gullichsen 2000). Glukomannaanit ja ksylaanit ovat hemiselluloosia.

Komponentti	Puussa	Tuotto puusta	Selluun	Jää mustalipeään
Selluloosa	39 %	88,5 %	34,5 %	4,5 %
Glukomannaanit	17 %	33,0 %	5,6 %	11,4 %
Ksylaanit	8 %	60,0 %	4,8 %	3,2 %
Uuteaineet	8 %	5,0 %	0,4 %	7,6 %
Ligniini	28 %	6,0 %	1,7 %	26,3 %
YHTEENSÄ	100 %		47 %	53 %

Varsinaisessa sellun valmistuksessa jokaista sellutonnia kohti syntyy

- 1,8 tonnia (1,5...1,9) mustalipeää kuiva-aineena (HHV = 13–15 MJ/kg) ja noin 10 tonnia pesun jälkeisenä laimeana mustalipeänä (Ekbom ym. 2003, Vakkilainen 2000a-b, Gullichsen 2000, Häggblom & Ranta 1966)
- 45 kg (18...90) raakamäntyöljyä (Gullichsen & Lindeberg 2000, Riistama ym. 2005, Häggblom & Ranta 1966) mäntyä keitettäessä, 25 kg raakakuusiöljyä kuusta keitettäessä (Gullichsen & Lindeberg 2000) ja 15–18 kg raakakoivuöljyä koivua keitettäessä (Gullichsen & Lindeberg 2000, Solantausta ym. 1997) (huom. selluteollisuus käyttää mäntyöljy-termiä riippumatta siitä, mistä puulajista se on valmistettu)
- 10 kg (2...15) raakatärpättiä (Gullichsen & Lindeberg 2000, Riistama ym. 2005, Häggblom & Ranta 1966) ja 8 kg puhtaaksi tislattua tärpättiä mäntyä keitettäessä (Pellinen & Roschier 1952); kuusta keitettäessä saanto on 75 % alempi (Gullichsen & Lindeberg 2000, Pellinen & Roschier 1952)
- 5 kg (2...9) metanolia (Häggblom & Ranta 1966, Pellinen & Roschier 1952)

Nämä luvut ovat yhdenmukaiset nykyisissä ja 50 vuotta sitten käytössä olleissa sulfaattisellutehtaisiin. Erona on se, että 50 vuotta sitten metanoli otettiin talteen, mutta nyky-

ään niin ei enää tehdä, joten kyseinen sivutuotemahdollisuus on uusimmassa kirjallisuudessa yleensä sivuutettu. Vuonna 2003 sellua tuotettiin 7,35 Mt (METLA 2004), joten sivutuotteiden määrien ja energiasisältöjen arviot ovat:

- Mustalipeää 13.000.000 t (HHV 14 MJ/kg) = 180 PJ
- Raakapuujyvä 220.000 t (HHV 37 MJ/kg) = 8 PJ
- Raakatärpättiä 70.000 t (HHV 45 MJ/kg) = 3,2 PJ
- Metanolia 35.000 t (HHV 22,7 MJ/kg) = 0,8 PJ

Sivutuotteiden määrät on arvioitu kuvaan 5.30 ottaen huomioon selluteollisuuden puunkäytön jakauma: 49 % mäntyä, 8 % kuusta ja 43 % lehtipuuta (METLA 2004).

Jätevettä syntyy puun kuorinnassa ja seulojen pesussa, haihdukseltaan lauhdeesta sekä sellun pesussa että valkaisuissa. Sekä sellun pesussa että valkaisuissa jätevedessä on orgaanisia yhdisteitä 28–76 kg kuiva-aineena sellutonnin kohti (Gullichsen 2000). Se tarkoittaa kahta noin 6 PJ:n hukkaenergiavirtaa. Siitä osa voidaan hyödyntää mädätyksellä metaaniksi jätevesien biologisessa käsittelyjärjestelmässä.

EU:n Altener-ohjelmassa tehtiin vuonna 2003 selvitys mustalipeän kaasutuksella saatavissa olevista liikennebiopolttoaineista (Ekbon ym. 2003). Sen mukaan 50,9 % Suomen liikenteen polttoainetarpeista voitaisiin tuottaa Suomen sellutehtaissa sivutuotteina (Kuva 5.31). Esimerkiksi noin 700.000 sellutonnin vuodessa tuottava tehdas voisi nostaa vuotuista liikevaihtoaan noin 200 M€:sta 300 M€:oon eli 50 %:lla vaihtamalla soodakattila mustalipeän kaasutuslaitteistoon ja liikennebiopolttoaineiden synteasilaitteistoihin. Investointikustannukset olisivat 150 M€ ja takaisinmaksuaika korkeintaan 4 vuotta olettaen, että laitteisto kokonaisuudessaan olisi markkinoilta saatavissa.



Kuva 5.31. Botnian sellutehdas Äänekoskella. Suomen sellutehtaissa voitaisiin tuottaa sivutuotantona puolet tieliikenteen polttoainetarpeesta. [2006]

Mustalipeän kaasutus on kaupallisessa käytössä ja taloudellisesti kannattavaa teknologiaa, mutta se on toistaiseksi harvinaista (Larson ym. 2003). Polttoainesynteesi puolestaan on kaupallista teknologiaa kivihiili- ja maakaasupohjaisena. Näitä teknologioita ei vielä toistaiseksi ole yhdistetty kaupallisessa mittakaavassa, mutta yhdistäminen on demonstroitu Kappan sellutehtaan yhteydessä olevassa Chemrecin 3 MW:n yksikössä (Kuva 5.32), joka otettiin käyttöön Piteässä Ruotsissa vuonna 2005.



Kuva 5.32. Chemrecin mustalipeän kaasutukseen perustuva synteettisten liikennepolttoaineiden tuotannon 3 MW:n demonstraatiolaitos Kappan sulfaattisellutehtaan yhteydessä Piteässä Ruotsissa. [2005]

5.6.2 Sulfiittisellutehtaat

Suomessa oli aikanaan 25 sulfiittisellutehdasta, joista ensimmäinen käynnistyi vuonna 1885 ja viimeinen suljettiin vuonna 1991. Niiden tuotanto oli suurimmillaan 1930-luvun lopulla yli miljoona tonnia vuodessa ja osuus kaikesta sellusta 60 % (Pellinen & Roschier 1952). Tämän tekniikan käyttö loppui lähinnä siitä syystä, että ympäristönormien kiristyessä Suomessa ei löydetty tapoja selvittää niistä sulfiittitekniikalla, mutta kyläkin sulfaattitekniikalla – tai paremminkin normien kiristys tapahtui Suomen sulfaattiselluteollisuuden ehdoilla. Esimerkiksi Ruotsissa myös sulfiittitekniikalla on pystytty alittamaan vastaavat päästönormit, koska siellä on päinvastoin kuin Suomessa kierrätetty keittokemikaalit. On mahdollista, että tämä teknologia palaa joskus Suomeenkin. Noin 10 % maailman kemiallisen sellun tuotannosta perustuu sulfiittiteknoologiaan (Ekbom ym. 2003). Suomessa käytettiin kolmea tehdasta lukuun ottamatta pelkästään kalsiumbisulfiittitekniikkaa ($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$). Sitä ei osata kierrättää johtuen kalsiumin huonosta vesiliukoisuudesta (Hägglom & Ranta 1966). Mutta kierrätys onnistuu liukoisemäksillä

natriumbisulfittiteknikalla (NaHSO_3) ja magnesiumbisulfittiteknikalla ($\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$), jotka molemmat ovat jo 1800-luvulla kehitettyjä menetelmiä, sekä ammoniumbisulfaattilla (NH_4HSO_3) (Hägglom & Ranta 1966). Niitä on käytetty paljon Ruotsissa, Kanadassa ja USA:ssa. Örnsköldsvikissä Ruotsissa valmistetaan puuperäistä liikenne-etanolia sekä sulfittisellun prosessin jätevedestä että sokeroimalla suoraan puusta (Kuva 5.33).



Kuva 5.33. Sekabin tehdas, joka valmistaa etanolia sulfittisellutehtaan jätevedestä ja hakkeesta Modon sulfittisellutehtaan yhteydessä Örnsköldsvikissä Ruotsissa. [2005]

Liikennepolttoainesektorilla sulfittisellutehtailla oli sodan aikana suuri merkitys etanolin tuottajana. Suomen 25 sulfittisellutehtaasta 17 tuotti sulfittisprää ainakin osan toiminta-ajastaan (Kaukoranta 1981). Sulfittisprää tuotettiin vuodesta 1920 alkaen yli 60 vuoden ajan ja valmistuskapasiteetti oli suurimmillaan 40.000 tonnia.

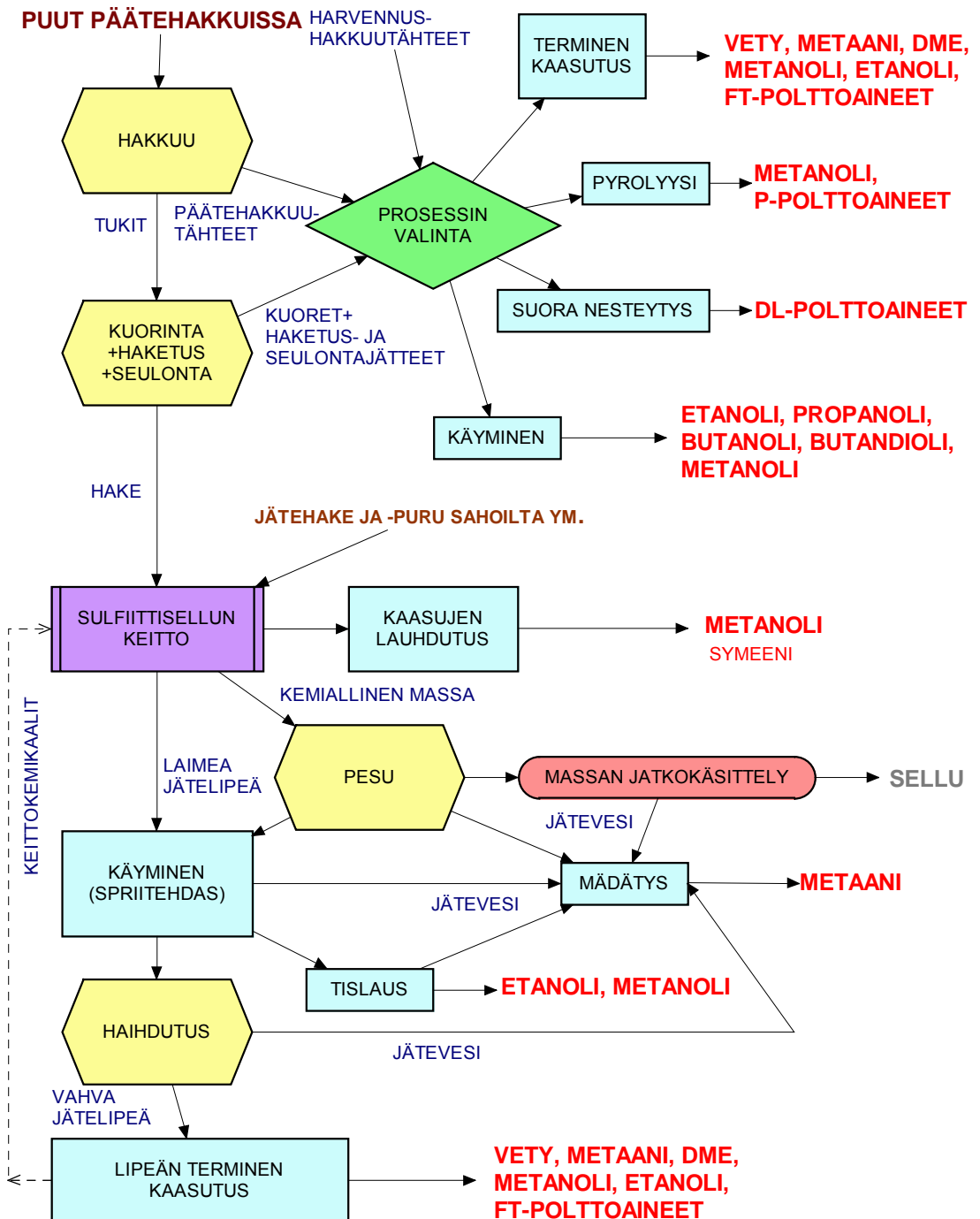
Sulfittilipeä sisältää paljon eri sokerialajeja, joista hemiselluloosasta syntyvät heksoosit ovat normaalisti käytettävillä hiivalajeilla (*Saccaromyces*) käymiskelpoisia. Näitä on kuusisulfittilipeässä 56–60 % kaikista sokereista kun taas koivusulfittilipeässä niitä on 23 % ja haapasulfittilipeässä 10 %. Pentoositkin ovat käymiskelpoisia esimerkiksi Torula-hiivoilla, mutta niiden käyttö on ollut vähäistä. (Pellinen & Roschier 1952)

Etanolin lisäksi sekä sulfitti- että sulfaattikeiton yhteydessä syntyy metanolia. Se on peräisin pääasiassa ligniiniin sisältyvistä metoksyyliryhmistä $\cdot\text{CH}_2\text{OH}$, joka muodostaa 4,6 % puun massasta. Pihkan terpeeneistä syntyy keiton aikana symeeniä ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}$), joka on aromaattinen öljy. Se on mahdollinen polttoaine tai aromaattisten polttoaineiden kuten toluenin valmistuksen raaka-aine, vaikka sitä on lähinnä käytetty liuottimena. Käymisprosessissa muodostuu hieman myös etanolia raskaampia alkoholeja. Muita sivutuotteita ovat rengasrakenteinen pentoosisokereista syntyvä aldehydi furfuraali, hiilihappo sekä etikka- ja muurahaishappo. (Pellinen & Roschier 1952)

Sulfiittisellun valmistuksessa syntyy ilmakeivää sellutonna kohti (Pellinen & Roschier 1952):

- Etanolia teoreettisesti havupuista 96 kg; käytännössä on havupuista saatu talteen korkeintaan 90 kg eli 119 litraa
- Metanolia 7 kg, joista 2 kg saadaan tislamalla kaasujen lauhdutuksessa ja 5 kg jää jätelipeään ja saadaan tislamalla spriistä
- Propanolia, butanolia ja muita korkeampia alkoholeja 0,3 kg (sikunaöljy)
- Symeeniä 2 kg
- Etikka- ja muurahaishappoa 40–45 kg
- Hiivaa 2–3 kg
- Jätelipeää 6–8 t, josta 10–15 % (600–1000 kg) on orgaanisia aineita, pääasiassa ligniiniä

Liikennepolttoaineita on saatavissa jätetuusta samoin kuin sulfaattiprosessissa. Myös jätelipeän kaasutus ja keittokemikaalien kierrätys sekä siihen liittyvä pääasiassa ligniini-peräisten liikennepolttoaineiden valmistus on järjestettävissä kuten sulfaattiprosessissa. Lisäksi liikennepolttoainetta, metaania, on saatavissa prosessin jätevesien biokaasukäsittelystä. Kuva 5.34 esittää sulfiittiproessiin sisällytettävissä olevat liikennepolttoaineiden tuotantomahdollisuudet.



Kuva 5.34. Sulfiittiselluosiin lisättävissä olevat liikennebiopolttoaineiden tuotantovaihtoehdot. Ne kaikki eivät ole mahdollisia yhtä aikaa ja osa energiasta käytetään höyryn ja sähkön tuotantoon sekä jätetään metsiin.

6 AJONEUVOJEN POLTTOAINEJOUSTAVUUS

”At that busy corner, Grand Street and the Bowery, there may be seen cars propelled by five different methods of propulsion – by steam, by cable, by underground trolley, by storage battery, and by horses.”

- New York Sun vuonna 1898 (Kirsch 2000)

Edellä on tarkasteltu lukuisia liikenteen voimanlähteitä. Tässä luvussa käsitellään teknisiä mahdollisuuksia polttoainejoustavuuteen eli useiden polttoaineiden ja voimanlähteiden käyttöä samassa ajoneuvossa. Kronologia voimanlähteiden käyttöönotosta on liitteessä 2.

6.1 MONOFUEL-AJONEUVOT

Lähes 100 % Suomen tieajoneuvoista, liikkuvista työkoneista, laivoista ja lentokoneista on monofuel-ajoneuvoja, jotka pystyvät käyttämään vain yhtä polttoainetta. Ja lähes kaikki on suunniteltu jotakin fossiilista polttoainetta varten: autot bensiiniä tai dieselöljyä (ja harvinaisena maakaasua), moottoripyörät bensiiniä, laivat dieselöljyä, lentokoneet kerosiinia tai bensiiniä ja liikkuvat työkoneet dieselöljyä tai nestekaasua. Raideliikennettä lukuun ottamatta sähkökäyttöiset ajoneuvot ovat toistaiseksi harvinaisia ja biopolttoainekäyttöiset erittäin harvinaisia. Kuten hybridejä käsittelevässä luvusta 6.6 selviää, kaikki Suomessa nykyisin hybrideinä mainostetut autot ovat monofuel-fossiiliautoja. Hybriditekniiikan polttoainejoustavuusominaisuutta ei siis Suomessa myynnissä olevissa autoissa vielä hyödynnetä, eikä myöskään monofuel-biopolttoainemahdollisuutta.

UE-polttoaineita voidaan aina käyttää fossiilimonofuel-ajoneuvoissa pieninä osuuksina, tyypillisesti 5 t-% fossiilipolttoaineeseen sekoitettuna. Fossiilimonofuel-ajoneuvo voidaan kuitenkin saada kokonaan UE-polttoainekäyttöiseksi muokkaamalla kemiallisesti UE-polttoaine lähes samanlaiseksi kuin ajoneuvon alkuperäinen polttoaine. Se on mahdollista synteettisten biopolttoaineiden jalostuksen avulla bensiini-, dieselöljy-, kerosiini- ja nestekaasuajoneuvoille.

Maakaasuajoneuvojen osalta UE-polttoainekäyttö on helpompaa, sillä kaikki puhdistettua maakaasua varten suunnitellut ajoneuvot pystyvät sellaisenaan käyttämään myös puhdistettua biokaasua ja muilla tavoilla tuotettua UE-metaania. Kuva 6.1 esittää eri-

laisia paineistettua metaania (CBG tai CNG) käyttäviä monofuel-metaaniautoja. Ras-
kaat ottomoottorilla varustetut metaaniautot ovat aina monofuel-autoja, kuten kuvan
6.1a-b biokaasukäyttöiset bussit ja jäterekat Ruotsissa.⁵ Syynä on energiatehokkuus: kun
puristussuhde nostetaan bifuel-autolle tyyppillisestä 9,5:stä monofuel-autolle tyyppilliseen
12,5:een moottorin hyötysuhde kasvaa 9 %:lla (JRC 2007). Dieselmoottorilla varustetut
metaaniautot ovat lähes aina dualfuel-autoja, mutta toistaiseksi harvinaisena poikkeuk-
sena on Isuzu Elf CNG, joka on monofuel-diesel. Pakettiautokokoluokasta markkinoilta
löytyy tehdasvalmisteisina yleisesti sekä monofuel- että bifuel-autoja: Iveco Daily (Kuva
6.1c) on saatavissa vain monofuelina. Henkilöautokokoluokassa monofuel-autot ovat
harvinaisia. Esimerkkinä sellaisesta on USA:ssa erittäin suosittu Honda Civic GX, joka
on useiden vuosien ajan valittu USA:n vuoden ekoautoksi (Kuva 6.1d).⁶



Kuva 6.1. Metaanimonofuel-autoja: a) Eskilstunan biokaasubusseja hidastankkauksessa bus-
sivarikolla. [2009] b) Biokaasujätetrekka nopeatankkauksessa Linköpingissä. [2009] c) Biokaasu-
pakettiauto Iveco Daily CNG Tukholmassa. [2004] d) Maakaasuhenkilöauto Honda Civic GX
Davisissä Kaliforniassa. [2004]

⁵ Helsingistä löytyy vastaavia autoja, mutta niitä käytetään biokaasun sijaan 100 %:sti maakaasulla
huolimatta Helsingin huomattavan suuresta biokaasun tuotannosta (Kuittinen & Huttunen 2009).

⁶ Suomen vastaavissa ”vuoden Ekoauto” -kilpailuissa se ei ole mahdollista. Tämän paljon mediahuo-
miota saavan vertailun, jonka Työ- ja elinkeinoministeriön alainen energiansäästön ja uusiutuvan
energian palvelukeskus MOTIVA on järjestänyt vuodesta 1996 alkaen, voittaa aina bensiiniä tai
dieselöljyä käyttävä monofuel-auto, sillä vaihtoehtoisilla polttoaineilla ja voimanlähteillä kulkevia
autoja ja polttoainejoustavia autoja – mukaan lukien kaikki biopolttoaineet, sähköautot ja muut
UE-autot sekä lisäksi vaihtoehtoiset fossiiliset polttoaineet kuten maakaasu – ei koskaan ole hy-
väksytty kilpailuun mukaan. Energiatehokkaita autoja (Luku 7.4.3) on hyväksytty kilpailuun vain
kerran: Audi A2 1.2 TDI oli voittaja vuonna 2002.

On myös olemassa monofuel-ajoneuvoja pelkästään UE-polttoaineille. Esimerkkinä ovat sprimoottorit, jotka käyttävät etanolin ja veden seosta. Niitä varten etanolia siis ei tarvitse absolutoida, vaan tislaukseen riittää. Sarjavalmistettuja sprimoottoriautoja, jotka korkean puristussuhteen vuoksi eivät voi käyttää bensiiniä, on nykyään käytössä lähinnä vain Brasiliassa. Niitä oli 1990-luvun lopulla 3,8 miljoonaa (Bajay ym. 2000). Vuonna 2005 niiden myyntiosuus oli pudonnut runsaaseen prosenttiin, mutta vuonna 2003 markkinoille tulleet FFV-autot olivat saavuttaneet jo 70 % osuuden. Autojen lisäksi Brasiliassa käytetään sprimoottoreita vesi- ja lentoliikenteessä. Kuvan 6.2 ja kansikuvan 5 Embraer Ipaneman E100-malli sekä konversiosarjat bensiinimallien muuntamiseksi julkistettiin vuonna 2004 (Embraer 2004). Esimerkiksi 12 lentokoneen ilmataksityhtiössä etanolin käyttö merkitsee 40 % säästöjä polttoainekuluissa (Theil 2005).



Kuva 6.2 Brasilialaisen Embraer-yhtiön sarjavalmistuksessa oleva E100-etanolikäyttöinen Ipanema-lentokone [© Embraerin kuva-arkisto 2006].

6.2 FFV-AJONEUVOT

FFV-ajoneuvoissa (flexible fuel vehicle/fuel flexible vehicle) on tavanomaisen ajoneuvon tapaan yksi moottori ja yksi polttoainejärjestelmä, mutta se pystyy käyttämään useampaa kuin yhtä polttoainetta joko tehdasvalmisteisena tai jälkikonvertoituna. Polttomoottorilla varustettuja FFV-autoja on rakennettu 1820-luvulta lähtien ja kuuluisin varhainen esimerkki on T-Ford, joka pystyi tehdasvalmisteisesti käyttämään kolmea polttoainetta: etanolia, bensiiniä ja bentsolia. Varhaisissa FFV-autoissa polttoaineen vaihdon yhteydessä piti käsin muuttaa säätöjä, kuten sytytystä ja polttoaine-ilmaseosta. Uuden teknologian FFV-autoissa tietokone pystyy tunnistamaan tankista tulevan polttoaineen ja tekemään säädöt automaattisesti (IEA 2004). FFV-ominaisuus maksaa henkilöautoa valmistettaessa noin 100–200 euroa, joten on vaikea ymmärtää, miksi suurin osa valmistettavista autoista on edelleen monofuel-autoja. Kyse lienee vain siitä, että muutos tulisi riittävän korkealla poliittisella tasolla saada tiedostettua. Sitä on toki ehdotettu (Lampinen ym. 2005a-b).

Yleisimpiä FFV-ajoneuvoja ovat ottomoottorilla varustetut bensiiniä sekä E100- tai E85-etanolia tai M100- tai M85-metanolia käyttävät autot. Suomessa etanolin myynti autoihin lopetettiin pian sodan jälkeen ja ainoita Suomen FFV-autoja olivat pitkään 116 museorekisterissä olevaa T-Fordia, jotka nekään eivät voineet tankata etanolia. Tilanne muuttui 1.4.2009, kun St1 aloitti E85:n myynnin kolmella pääkaupunkiseudun huolto-

asemallaan (Kuva 6.3) edistyksellisesti jäte-ressursseista tuotetulla etanolilla. Sen seurauksena E85-automallit otettiin mukaan useiden Suomen maahantuojien valikoimiin.



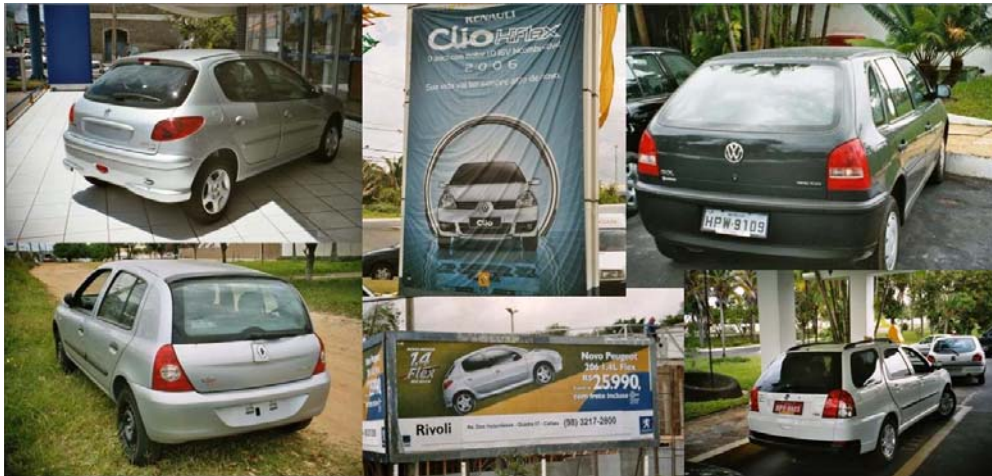
Kuva 6.3. St1 aloitti 1.4.2009 jäteperäisen E85:n myynnin REfuel-tuotemerkillä kolmella pääkaupunkiseudun asemallaan. Kuvassa on Vallilan asema, joka on Viitasaaren ABC:n jälkeen Suomen toinen huoltoasema, joka tuottaa sähköä tuuliturbiinilla ja aurinkopaneeleilla. Sähkö on aseman omaan käyttöön; sähköautolatauspistettä ei ole. [2009]

Ruotsissa E85:ta on käytetty jo kauan ja paljon. Pelkästään Ford Focus FFV -autoja (Kuva 6.4a) on myyty siellä yli 100.000 kpl ja E85:a myyviä huoltoasemia on noin 1500. Saabin E85:ta käyttävä Biopower-mallisto on erityisen edistyksellinen, koska etanolin korkea oktaaniluku hyödynnetään turbon korkeampana ahtopaineena, josta syystä E85:llä tehoa tulee 30 hv enemmän kuin samasta autosta bensiinillä tankattuna (Kuva 3.7). Saab Biopower ehti myös Eestin markkinoille ennen Suomea (Kuva 6.4b-c).



Kuva 6.4. a) Ford Focus FFV tankkaamassa E85:ta Statoilin asemalla Jönköpingissä. [2006] b-c) Saab Biopower Tallinnassa. [2008]

Etanolin osuuden jättäminen korkeintaan 85 t-%:iin Ruotsissa, Suomessa ja myös E85-autojen johtavassa maassa USA:ssa johtuu etanolin bensiiniä alhaisemman höyrinpaineen (Taulukko L6.5) aiheuttamasta ottomootorin kylmäkäynnistysongelmasta. Raakaöljyteollisuuden suosima ratkaisu on lisätä joukkoon bensiiniä tarpeen mukaan eli kesällä 15 t-% ja talvella jopa 40 t-%. Jo 1800-luvulta lähtien on Ruotsissa kuitenkin osattu ratkaista asia toisinkin eli lisäämällä joukkoon etanolista tehtyä eetteriä (DEE). Myös monet muut korkean höyrinpaineen biopolttoaineet sopivat etanolin sekoitettavaksi, jolloin käynnistys arktisissakin olosuhteissa voidaan taata ilman fossiilisten polttoainesten käyttöä. Lämpimässä ilmastossa kuten Brasiliassa asia on helpompi hoitaa. Brasiliassa kaikki FFV-etanoliautot ovat E100-autoja eli ne eivät edellytä bensiinin sekoittamista joukkoon (Kuva 6.5). Toisaalta ne toimivat myös bensiinillä ja millä tahansa etanolin ja bensiinin sekoituksella. Lisäksi Brasiliassa on paljon E100-monofuel-autoja, joihin bensiini ei lainkaan sovi. Teknistä estettä FFV-E100- ja monofuel-E100-autojen käyttöle ei Suomessakaan ole.



Kuva 6.5. E100-FFV-autoja Manauksessa Brasiliassa: Renault Clio HiFlex kadunvarsimainoksen kera, VW Golf Total Flex, Peugeot 206 Flex kadunvarsimainoksen kera ja Fiat Palio Flex. [2006]

Dieselmootorilla varustetut FFV-autot pystyvät yleisimmin käyttämään fossiilidieselin lisäksi perinteistä B100-biodieseliä. B100-ominaisuuden lisääminen maksaa auton valmistuksen yhteydessä 100-200 euroa eli kyse on yhtä pienestä muutoksesta kuin E100-tai E85-ominaisuuden lisääminen ottoautoihin. Jälkikonvertointi maksaa kymmenen kertaa enemmän kuten E85:n ja E100:n tapauksessakin. Kuva 6.6 esittää tehdasvalmisteista ja konvertoitua biodieselautoa. Kuvan 6.6b VeggieVan:in konversio toteutettiin USA:ssa Joshua ja Kaia Tickellin yliopistogradutyön osana. Samalla toteutettiin siihen liitettävissä oleva perävaunu, joka sisältää biodieselin valmistuslaitteistot. Auto teki vuonna 1997 laajan mainoskiertueen USA:ssa käyttäen vain ilmaiseksi saatavaa pikaravintoloiden jäterasvaa. Mainoskiertueesta seurasi paljon uutta liiketoimintaa, sisältäen biodieselin kotivalmistusoppaita (Tickell & Tickell 1999) ja FuelMeister-kotivalmistuslaitteita.



Kuva 6.6. Biodieselautoja: a) Tehdasvalmisteinen Peugeot 308 Biodiesel Frankfurtin autonäyttelyssä. [2007] b) Australialaisesta Winnebago-asuntoautosta konvertoitu pikaravintoloiden jäterasoilla kulkeva pakettiauto ”Veggie Van” Hoplandissa Kaliforniassa uusiutuvan energian messuilla. [2004]

Biodiesel-FFV-ajoneuvojen joukossa erittäin tärkeitä ryhmä ovat veneet, laivat ja liikkuvat työkoneet, jotka ovat valtaosin dieselmoottorilla varustettuja. Kuvassa 6.7a-b on vaasalainen dieselmoottorilla varustettu vuonna 1997 rakennettu purjelaiva, jonka dieselmoottori pystyy käyttämään biodieseliä fossiilidieselin lisäksi. Laiva on modernia dieselmoottoria lukuun ottamatta kopio vuonna 1679 rakennetusta postijahdistista. Sillä liikennöi perinnealusyhdistys Skutan ry. Vaasassa. Kuvan 6.7c Valmet-traktori on esimerkki suuresta maataloilla olevasta dieselmoottorikäyttöisestä liikkuvien työkoneiden kannasta, joka voitaisiin konvertoida hyödyntämään myös maataloilla valmistettu biodiesel.



Kuva 6.7. a-b) Biodieseliä ja tuulta käyttävä hybridilaiva Vaasassa. [2008] c) Biodieseliä käyttävä Valmetin traktori Haapajärven ammattiopistolla käyttää opiston itse rypsiä tuottamaa biodieseliä. [2007]

Markkinoilta löytyy myös puhdasta kasviöljyä käyttäviä eli PPO100-ajoneuvoja, jotka ovat myös biodieselin ja fossiilidieselin käyttöön pystyviä FFV-autoja. Pisimpään, jo vuodesta 1964 lähtien, on toiminut saksalainen Elsbett-yhtiö, joka alun perin rakensi omia kasviöljyjen käyttöön pystyviä dieselmoottoreita, ns. elsbettmoottoreita, mutta jonka toiminta nykyisin painottuu konversiosarjojen valmistamiseen autoja, veneitä, laivoja, lentokoneita ja työkoneita, kuten traktorit ja leikkuupuimurit, varten (Kuva 6.8).



Kuva 6.8. Puhdasta kasviöljyä PPO100 käyttävä saksalaisella Elsbettin konversiosarjalla konvertoitu VW Jetta näytteillä uusiutuvan energian markkinatapahtumassa Hoplandissa Kaliforniassa. Moottoriin on lapuilla merkitty konversiossa lisätyt/vaihdetut komponentit. [2004]

ECE-mäntämoottorit kuten stirlingkone ja höyrykone sekä EC-turbiinit kuten höyryturbiini ja ORC-turbiini ovat kaikkein polttoainejoustavimpia moottoreita, sillä ne pystyvät helposti hyödyntämään kaikkia kaasumaisia, nestemäisiä ja kiinteitä polttoaineita. Varsinkaan kiinteiden polttoaineiden käyttöön muut lämpövoimakoneet eivät käytännössä sovellu, vaikka teoriassa se mahdollista onkin. Muista moottorityypeistä kaasuturbiinit ovat polttoainejoustavimpia eli niissä on helppo käyttää mitä tahansa nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita. Polttomoottorityypeistä hehkukupumootoria hyödyntäen voitaisiin valmistaa kaikkein polttoainejoustavimpia ajoneuvoja, mutta kyseistä tekniikkaa ei 1950-luvun jälkeen ole käytetty.

6.3 BIFUEL-AJONEUVOT

Bifuel-ajoneuvoissa on yksi ottomoottori tai muu kipinäsytytteinen moottori, kuten monofuel- ja FFV-ajoneuvoissa, mutta näistä poiketen kaksi polttoainejärjestelmää. Polttoaineita käytetään vaihtoehtoisesti, mutta ei sekoittaen (joskin joissakin itse rakennetuissa järjestelmissä yhtäaikainenkin käyttö onnistuu, esim. kuvan 6.9b kuorma-autossa). Yleensä bifuel-autoissa on nestemäisen ja kaasumaisen polttoaineen järjestelmät, mutta harvinaisempana on valmistettu kahden nestemäisen polttoaineen bifuel-autoja (kuten

Suomessa valmistetut petroli-bensiini-Saabit ja -Talbotit) ja kahden kaasumaisen polttoaineen bifuel-autoja (esimerkiksi metaani-vety ja metaani-nestekaasu). Bifuel-ajoneuvoista toistaiseksi tunnetuimpia Suomessa ovat puukaasu-bensiini-autot, joilla oli suuri historiallinen merkitys ja joita alan harrastajat edelleen käyttävät ja rakentavat (Kuva 6.9).



Kuva 6.9. Puukaasu-bifuel-autoja: a) Risto Höylän omistama, monissa elokuvissa esiintynyt, alun perin Puolustusvoimien käytössä ollut vuosimallin 1939 Ford Deluxe Keski-Suomen tieliikennemuseossa Petäjävedellä. [2008] b) Käytössä oleva Mauri Heikkisen Bedford Kangasalan auto- ja tiemuseo Mobilian puukaasupäivillä. [2007]

Modernit bifuel-autot tunnistaa kahdesta erilaisesta polttoaineen tankkausaukosta kuten kuvan 6.10 biokaasuautoesimerkeistä nähdään. Tehdasvalmisteisissa autoissa (Volvo V70 Bi-fuel kuvassa 6.10a) on kaksi tankkausaukkoa saman kannen alla. Konvertoiduissa autoissa toisen polttoaineen tankkausaukko joko porataan erillisenä koriin kuten Opel Astrassa kuvassa 6.10b tai sijoitetaan konepellin alle.



Kuva 6.10. Bifuel-autojen tunnusomaisin merkki on kaksi erilaista polttoaineen täyttöaukkoa: a) Tehdasvalmisteisissa autoissa molemmat ovat saman kannen alla. Tässä tankataan biokaasua vasemmalla olevan kaasutankin aukosta ja bensatankin korkki jää oikealle. b) Erillinen koriin porattu kaasuntankkausaukko konvertoidussa autossa. [2008]

Yleisimpiä bifuel-autoja ovat metaani-bensiini-autot, joita on maailmassa lähes 10 miljoonaa sekä nestekaasu-bensiini-autot, joita on maailmassa noin 8 miljoonaa (Kuva 6.11). Muita esimerkkejä kaasun ja bensiinin käytön yhdistävistä autoista ovat puukaasu-bensiini-, ja vety-bensiini-autot.



Kuva 6.11. Yleisimmät bifuel-tyypit: a) Metaani-bensiini-bifuel-auto MB B170 NGT biokaasukäyttöisenä taksina Tukholmassa. [2009] b) Nestekaasu-bensiini-biofuel-auto Kia Cee'd LPG Frankfurtin autonäyttelyssä. [2007]

6.4 MULTIFUEL-AJONEUVOT

Multifuel-ajoneuvoissa on bifuel-järjestelmä, mutta toinen tai molemmat polttoainejärjestelmät ovat FFV-järjestelmiä. Tämä mahdollistaa polttoainejoustavuuden olennaisen lisäämisen. Esimerkkejä sarjavalmisteisista multifuel-autoista ovat Fiat Siena Tetrafuel (Kuva 6.12a) ja Chevrolet Astra Multipower, jotka pystyvät käyttämään nestemäisen polttoaineen järjestelmässä E100-etanolia, bensiiniä tai mitä tahansa niiden sekoitusta ja metaanijärjestelmässä bio- ja maakaasua. Esimerkki uutena jälkikonvertoidusta multifuel-autosta on Volvo V70 FT 2.5 GAS (Kuva 6.12b). Se on E85-FFV-auto, johon asennetaan Göteborgissa metaanijärjestelmä bio- ja maakaasun käyttöä varten. Volvo ei itse asenna kaasujärjestelmää, mutta se myy tätä mallia oman myyntiverkostonsa kautta. Auto on alun perin suunniteltu siten, että kaasujärjestelmä on helposti lisättävissä, mm. tila kaasuaukolle on valmiina polttoainetankin kannen alla, joten erillistä aukkoa ei tarvitse koriin puhkaista.

Edellä olevissa esimerkeissä vain nestemäisen polttoaineen järjestelmä on FFV-järjestelmä. Muunlaisia ei toistaiseksi tehdasvalmisteisena löydy. Jälkikonvertoituna markkinoilta kuitenkin löytyy autoja, joissa myös kaasujärjestelmä on FFV-järjestelmä. Kuvassa 6.13 on Intergalactic Hydrogen -yhtiön kaupallisella asennussarjalla jälkikonvertoitu Toyotan maastoauto. Sen nestemäisten polttoaineiden järjestelmä pystyy käyttämään puhdasta etanolia (E100), metanolia (M100) ja bensiiniä sekä mitä tahansa niiden seosta. Kaasujärjestelmä puolestaan pystyy käyttämään metaania (CBG100 ja CNG100), vetyä (CH100) tai mitä tahansa niiden sekoitusta. Tietokone on ohjelmoitu tunnistamaan kulloisenkin moottoriin tulevan polttoaineen ja tekemään tarvittavat säädöt.



Kuva 6.12. Multifuel-takseja: a) Fiat Siena TetraFuel Manauksessa Brasiliassa. Se pystyy käyttämään biokaasua, maakaasua, 100 % etanolia ja bensiiniä. [2006] b) Volvo V70 FT 2.5 GAS Tukholmassa. Se pystyy käyttämään biokaasua, maakaasua, 85 % etanolia ja bensiiniä. [2009]



Kuva 6.13. Biokaasun, maakaasun, vedyn, etanolin, metanolin ja bensiinin käyttöön pystyvä jälkikonvertoitu Toyota-maastoauto uusiutuvan energian messuilla Hoplandissa Kaliforniassa. [2004]

6.5 DUALFUEL-AJONEUVOT

Dualfuel-ajoneuvoissa on yksi dieselmoottori tai muu kompressiosytytteinen moottori ja kaksi polttoainejärjestelmää. Bifuel-ajoneuvoista poiketen molempia polttoaineita käytetään yhtäaikaaisesti siten, että kaasumainen polttoaine, joka imetään ilman mukana sylinteriin, on pääpolttoaine, ja sytytys tehdään nestemäisellä polttoaineella. Tällaisia ovat monet nestemäistä maakaasua kuljettavat laivat, joihin Wärtsilä tekee dualfuel-moot-

toreita. Kuvan 6.14 esimerkkejä ovat maakaasukäyttöinen dieselveine ja puukaasukäyttöinen dieseltraktori. Normaalisti näitä ajoneuvoja voidaan vaihtoehtoisesti käyttää myös pelkästään nestemäisellä polttoaineella. Vaikka dualfuel-ajoneuvoja on rakennettu 1960-luvulta alkaen, ne ovat toistaiseksi paljon harvinaisempia kuin bifuel-ajoneuvot.



Kuva 6.14. Dualfuel-ajoneuvoja: a) Sydneyssä liikennöivä maakaasukäyttöinen dualfuel-moottorivene (Stephenson 1991). b) Valmetin Brasilian tehtaiden 1980-luvulla valmistama puukaasukäyttöinen dualfuel-dieseltraktori. [© Valtra].

6.6 HYBRIDIAJONEUVOT

Hybridi tarkoittaa ajoneuvoa, jossa on vähintään kaksi erilaista toisistaan riippumatonta moottoria tai muuta liikevoiman lähdettä. Esihistorialliset purje-soutuveenet ja -laivat olivat ensimmäisiä hybridiajoneuvoja. Ne pystyivät käyttämään tuulivoimaa ja lihasvoimaa toisistaan riippumatta, mutta myös yhtä aikaa. Kuvassa 6.15a on malli 1700-luvun purje-soutulaivasta, joka pystyi liikkumaan pelkästään tuulivoimalla purjeiden avulla, pelkästään biovoimalla soutajien airojen avulla tai molemmilla yhtä aikaa. Kuvassa 6.15b on puukäyttöisellä 39 hv höyrykoneella ja purjeilla varustettu vuonna 1874 Viipurissa valmistunut höyrykuunari Salama, joka on nykyään sijoitettu Savonlinnan maakuntamuseoon. Se liikennöi vuosina 1874–1898 pääasiassa Saimaan satamien, Viipurin ja Pietarin välillä, mutta teki matkoja myös ja Lyypekkiin. Salama upposi vuonna 1898 Saimaalla.



Kuva 6.15. UE-hybridilaivoja: a) Malli vuonna 1764 rakennetusta Ruotsin saaristolaivaston tuuli- ja lihasvoimaa hyödyntäneestä Pohjanmaa-luokan aluksesta Suomen merimuseossa Kotkassa. [2009] b) Purje-puu-höyrylaiva Salama Savonlinnassa. [2008]

Tuulivoima-biovoima-hybrideitä on edelleen käytössä paitsi vesiliikenteessä myös maaliikenteessä. Kuvassa 6.16a on italialainen sähköavusteinen polkupyörä, joka käyttää tuulisähköllä ladattua istuimen takana olevaa akkua pyörittämään etupyörän keskiössä olevaa 250 watin sähkömoottoria, joka perustuu van Depoelen patenttiin vuodelta 1894⁷. Lihaskivillä pyöritetään pedaalien ja ketjujen avulla takapyörää. Sekä tuulisähköä että biovoimaa voidaan siis käyttää yhtä aikaa ja biovoimaa myös yksin, mutta sähköavusteisuus rajoittaa järjestelmän siten, että sähkömoottori ei toimi polkematta. Koska molempia voimanlähteitä ei siis voi käyttää toisistaan riippumatta, tämä pyörä ei ole täyshybridi vaan osittainen hybridi. Sen sijaan kuvien 6.16b-c sähköpolkupyörä on oikea hybridi, joka on rakennettu 1970-luvun amerikkalaisesta rakennussarjasta. Etulokasuojaan asennettu 1000 watin sähkömoottori pyörittää kiven avulla etupyörää riippumatta takapyörää pyörittävästä lihasvoimasta.⁸



Kuva 6.16. a) Tuulivoima-biovoima-hybridiajoneuvoja, joissa tuulisähkö saadaan lataamalla akut tuulisähkösopimuksen tekevän kotitalouden pistorasiasta: sähköavusteinen Piaggio-polkupyörä (a) ja rakennussarjasta koottu sähköpolkupyörä (b-c). [2005]

Nykyään hybrideistä puhuttaessa tarkoitetaan lähes aina sähköhybridiautoa (HEV = hybrid electric vehicle) eli polttomoottorin ja yhden tai useamman sähkömoottorin sisältämää ajoneuvoa. Aidossa hybridissä sekä polttomoottoria että sähkömoottoria voidaan käyttää liikevoiman lähteenä toisistaan riippumatta. Se tarkoittaa, että tuulisähköä tai muuta sähköä voidaan ladata pistorasiasta auton akkuihin ja käyttää sitä auton pyörien pyörittämiseen ja toisaalta, että biokaasua tai muuta kemiallista polttoainetta voidaan tankata autoon ja käyttää polttomoottoria auton pyörien pyörittämisen. Tällaista autoa käytettäisiin sähköllä lyhyillä matkoilla, esimerkiksi kaupungin sisällä, johtuen akuston pienestä energianvarastointikapasiteetista ja sähkömoottorien suuresta energiatehokkuudesta. Maantietmatkoilla käytettäisiin polttomoottoria johtuen kemiallisten polttoainesten suuresta energiatihedystä. Valitettavasti aitoja hybridejä eli ns. ladattavia hybridejä (plug-in-hybridejä) ei vielä tehdasvalmisteisina ole saatavissa, mutta monet valmistajat, kuten Volvo, ovat esitelleet sellaisista prototyyppejä (Kuva 6.17a). Konversiosarjojen kautta rinnakkaishybrideistä kuten Toyota Prius ja Honda Insight saadaan aitoja hybridejä. Tällaista konversiotoimintaa harjoitetaan erityisen paljon USA:ssa, mutta myös

⁷ Polkupyöristä puhuttaessa hybridillä valitettavasti ymmärretään useimmiten maastopyörän ja maantiipyörän yhdistelmää, mutta tässä kirjassa polkupyörähybridi määritellään kuten muutkin hybridit.

⁸ Johtuen tuulivoiman erityisen alhaisista elinkaari päästöistä ja suomalaisen ruokavalion korkeasta fosfiilihiilipitoisuudesta, tuulisähköpyörällä vähennetään liikenteen päästöjä polkemiseen verrattuna.

monissa muissa maissa. Kuvan 6.17b Chevrolet Volt on plug-in-sarjahybridi kuten Fisker Karma, jota Uudessakaupungissa vuodesta 2009 alkaen valmistetaan. Se tarkoittaa, että niiden pyöriä ei voida liikuttaa polttomoottorilla.



Kuva 6.17. Plug-in-hybridien prototyyppiä Frankfurtin autonäyttelyssä: a) Volvo C30 ReCharge Concept -rinnakkaishybridi pystyy käyttämään tuulisähköä ja etanolia. b) Sarjahybridi Chevrolet Voltin vetypolttokeino-versio. Autosta on olemassa myös bensiinimoottoriversio, joka on tulossa myyntiin vuonna 2011. [2007]

Mikään Suomessa ja muualla maailmassa hybridinä myytävä auto ei siis vielä vuonna 2009 ole aito hybridi, mutta lähivuosina niitä on markkinoille tulossa. Vaillinaisuuden asteita on useampia. Lähelle aitoa hybridiä päästään ns. rinnakkaishybrideillä, joita kaikki Suomessa nykyään myytävät hybrideiksi mainostetut autot ovat, myös kuvan 6.18 Toyota Prius. Niissä pyöriä voidaan liikuttaa sekä polttomoottorilla että sähkömoottoreilla, mutta sähkömoottoreiden sähkö tehdään aina polttomoottorilla. Se tarkoittaa, että vaikka sähkömoottoreiden avulla voidaan vähentää auton energiankulutusta ja CO₂-päästöjä jopa 20 %:lla, kyseiset autot ovat edelleen monofuel-autoja ja Suomessa myytävät autot pelkästään monofuel-bensiiniautoja. Näistä autoista on kuitenkin mahdollista tehdä aitoja hybridejä konversiosarjan avulla. Ne voidaan myös konvertoida biokaasulle tai muille biopolttoaineille (Kuva 6.18). Hybriditekniikka yhdistettynä biokaasun käyttöön tuottaa erityisen alhaiset polttoaineen elinkaari päästöt, Toyota Priukselle vain 6 g/km, mutta bensiinillä käytettynä sama auto on korkeapäästöinen yli 100 g/km tasolla (Taulukko 7.3).⁹

Sarjahybrideissä sähköjärjestelmä toimii voimansiirtolaitteistona eli mekaanisen voimansiirron sijaan polttomoottorilla tuotetaan sähköä, jolla pyöritetään sähkömoottoreita. Tämä teknologia on jo kauan ollut yleisessä käytössä ns. dieselvetureissa, joita ei hybrideiksi ole nimetty, mutta jotka tämän uuden määritelmän mukaan ovat sarjahybridejä (Kuva 6.19). Kyse on siis käsittemarkkinoinnista. Polttokeinoautot (Kuva 6.17b) ovat aina sarjahybridejä, sillä polttokeino ei pysty luomaan mekaanista energiaa, vaan ainoastaan sähköä.

⁹ Uudessa vuonna 2009 esitellyssä Priuksessa ajonaikaiset päästöt ovat hieman alle 100 g/km, mutta elinkaari päästöt menevät edelleen yli 100 g/km.



Kuva 6.18. Metaanikäyttöiseksi konvertoitu Toyota Prius -rinnakkaishybridiauto (Goldmann 2006). Sen ajonaikaiset CO₂-päästöt ovat maakaasulla 80 g/km ja bensiinillä 104 g/km. Biokaasulla elinkaari-CO₂^{ekv}-päästöt ovat 6 g/km. [© Gröna bilister -kuva-arkisto 2006]



Kuva 6.19. Dieselveureina tunnetuksi tulleet veturit ovat dieselsarjahybridejä. [2009]

Henkilö- ja pakettiautojen päästönormit asettavassa EY-asetuksessa 715/2007 määritellään hybridiajoneuvo ajoneuvoksi, jossa on vähintään 2 erilaista energiamuunninta ja kaksi erilaista energianvarastointijärjestelmää ajoneuvon voimanlähteinä. Tämä määritelmä koskee vain autoja ja sisältää sekä rinnakkais- että sarjahybridit. Esimerkiksi purjelaivahybridit eivät sisältyisi tähän määritelmään, sillä niissä ei ole tuulivoimavaraa, ja monet diesel-sähköhybridiveturit eivät sisältyisi määritelmään, sillä niissä ei ole sähkövarausta.

Sukellusveneissä hybriditekniikka on ollut välttämätöntä: perinteisissä sukellusveneissä on käytetty yleensä polttomoottoreita pinta-ajossa ja sähkömoottoreita veden alla. Ilmailu ovat hybridejä, jotka käyttävät tuulta ja kemiallista polttoainetta.

6.7 SÄHKÖÄ SUORAAN TAI EPÄSUORAAN KÄYTTÄVÄT AJONEUVOT

Sähköä voidaan valmistaa kaikista primäärienergiaressursseista, joten sähköajoneuvot ovat polttoainejoustavia, vaikka niissä ei olisikaan hybriditekniikkaa. Mikäli sähkö on uusiutuvilla energiamuodoilla tuotettua, kuten Tukholman julkisessa sähköisessä liikenteessä tehdään, elinkaaripäästöt ovat alhaiset (Kuva 6.20).



Kuva 6.20. Kaikki Tukholman sähköinen joukkoliikenne kulkee Ruotsin luonnonsuojeluliiton sertifioimalla ”Bra miljöveral”-ekosähköllä eli vesi-, tuuli- ja biovoimalla: a) paikallisjunat, b) nopeat lentokenttäjunat, c) metrot ja d) raitiovaunut. Junat ja raitiovaunut saavat sähkön radan yläpuolisista kaapeleista ja metro radan kolmannesta raiteesta. Myös Ruotsin valtion rautatiet käyttää vain Bra miljöveral -ekosähköä. [2004-2007]

Sähkömoottorin korkeasta, jopa yli 90 %, hyötysuhteesta johtuen vesi-, tuuli-, aurinko-, aalto- ja vuorovesivoiman käyttö tuottaa kaikkein alhaisimman elinkaarienergiankulutuksen ja myös alhaisimmat elinkaaripäästöt, lukuun ottamatta uutta padollista vesi- ja vuorovesivoimaa, joiden kasvihuonekaasupäästöt voivat ylittää kivihiihivoimaloidenkin tason. Mikäli sähkö tehdään bioresursseista, tuotannon hyötysuhde on alhainen, josta syystä sähköajoneuvo ei välttämättä pääse elinkaarienergiankulutuksessa UE-polttoaineden suoran käytön alapuolelle.

Ulkoisilla kaapeilla varustetut sähköajoneuvot eivät kärsi niistä haitoista, joita akkuajoneuvoilla on, siis lyhyt ajomatka latausten välillä, akkujen varsin suuri paino ja tilan tarve ja tuntien pituinen latausaika. Nämä ovat vaikuttaneet sähköautojen alhaiseen nykyiseen käyttötasoon ja ne ovat ominaisuuksia, joita modernien sähköautojen kehitystyössä jatkuvasti parannetaan. Varsinkin akkuteknologiassa edistysaskeleet ovat olleet viimeisen 10 vuoden aikana suuret (Kuva 6.21). Sähköautomalleja on ollut jo kauan tarjolla. Tehdasvalmisteisten lisäksi niitä tuotetaan konvertoimalla: esimerkiksi suomalaisessa ”Sähköautot – Nyt!” -hankkeessa konvertoidaan bensiiniautoja, kuten Toyota Corolla, sähköautoiksi.



Kuva 6.21. Moderni Li-ioniakkuteknologiaa hyödyntävä Mitsubishi i-MiEV esittelyssä, ja seinäpistokelatauksessa, Frankfurtin autonäyttelyssä. Se kulkee 160 km latausten välissä 130 km/h maksiminopeudella ja on tulossa myyntiin Euroopassa vuoden 2009 lopulla. Aika 80 % lataukseen on 20 minuuttia. [2007]

Sähköä suoraan käyttävien ajoneuvojen lisäksi sähköä epäsuorasti hyödyntävät ajoneuvot ovat polttoainejoustavia. Näitä ovat magnetismia hyödyntävät ajoneuvot kuten MAG-LEV-junat sekä paineilma- ja painekaasujoneuvot.

Sähköllä voidaan elektrolyysin avulla valmistaa vetyä, jonka avulla voidaan vähentää akkuautojen käytön päästeitä eli saada aikaan nopea tankkaus ja suuri energiavarasto elinkaaren energiatehokkuuden vähenemisen kustannuksella. Mikäli sähkö on esimerkiksi tuulisähköä, energiatehokkuuden väheneminen ei kuitenkaan lisää päästöjä.

6.8 KOMBIMOOTTORIAJONEUVOT

Kombimoottorit koostuvat kahdesta tai useammasta moottorista, joista jälkimmäinen käyttää edellisen hukkalämpöä ja siten kokonaishyötysuhde paranee verrattuna yhden moottorin käyttöön. Kombimoottorit ovat korkeasta hyötysuhteestaan huolimatta liikenteessä nykyään erittäin vähän hyödynnettyjä ja siten ne tarjoavat suuren energiatehokkuuden parantamispotentiaalin tulevaisuudessa. Tavanomaisten bensiinikäyttöisten ottomoottoreiden pakokaasujen lämpötila on luokkaa 800 °C, joten niistä on monella tavalla saatavissa lisää mekaanista energiaa.

Ensimmäisiä kombimoottoreita olivat kaksoispaisuntahöyrykoneet, jotka keksittiin 1780-luvulla ja otettiin käyttöön 1840-luvulla. Kolmoispaisuntakoneet ja useampiakin vaiheita sisältävät monipaisuntamoottorit olivat yleisessä käytössä laivoissa ja vetureissa 1800-luvun lopulta alkaen (Kuva 6.22). Nikolaus Otto sovelsi kaksoispaisuntaperiaatteen vuonna 1879 ottomoottoriin, mutta siitä ei syntynyt menestynttä kaupallista tuotetta (Suzuki 1997). Otton koneessa oli 2 normaalia ottomoottorin sylinteriä, joiden pakokaasut johdettiin kolmanteen, höyrykoneen periaatteella toimivaan sylinteriin. Kyseessä oli siis ottomoottorin ja savukaasumoottorin yhdistelmä. Ottomoottorin ja savukaasuturbiinin muodostama kombimoottori kaupallistettiin lentoliikennekäytössä 1950-luvulla. Ensimmäinen kombimoottorin liikennekäyttö ei kuitenkaan perustunut kaksoispaisuntamoottoriin, vaan se hyödynsi kahta erilaista moottoria. Se tapahtui vuonna 1850 du Tremblayn höyrykoneella ja eetterimoottorilla varustetussa laivassa, jossa eetterimoottori käytti höyrykoneen hukkalämpöä (Self 2007).



Kuva 6.22. Kaksoispaisuntahöyrykoneella eli kombikoneella varustettu, Tampereella vuonna 1943 valmistettu halkokäyttöinen veturi Tk3 eli Pikku-Jumbo Haapamäen höyryveturipuistossa. Tämä veturityyppi oli käytössä vuosina 1928-1975. [2007]

Kaasuturbiini-höyryturbiini-kombi, jonka hyötysuhde on jopa 58 %, on kaupallista, mutta hyvin harvinaista teknologiaa laivoissa (COGAS, combined gas and steam). Autoissa ovat mahdollisia esimerkiksi ottomoottori-höyrykone-kombi, jota kokeiltiin aina-

kin jo vuonna 1914 Scientific Americanin 7.3.1914 uutisen mukaan. Auton moottorin hukkalämmön hyötykäyttö väliaineen höyrytämiseen turbiinia varten nostaa hyötysuhdetta luokkaa 15 %-yksikköä (Thomas 1980).

Dieselmoottori-kaasuturbiini-höyryturbiini-kombi mahdollistaisi rekoissa hyötysuhteen nostamisen parhaimpien tavanomaisten dieselmoottorien 38 %:sta 63 %:iin Kamon kombimoottorin avulla (Suzuki 1997). Kamo-moottorissa poistokaasujen hukkalämpöä hyödynnetään ensin kahdella kaasuturbiinilla, joista toinen käyttää turboahdinta ja toinen tuottaa mekaanista energiaa vetoakselille. Jälkimmäisen kaasuturbiinin hukkalämmöllä höyrytetään vettä höyryturbiinille, joka myös tuottaa mekaanista energiaa vetoakselille dieselmoottorin ja kaasuturbiinin lisäksi. Suuri hyötysuhteen parannus olisi saavutettavissa myös muunlaisilla lämpövoimakoneilla, esimerkiksi ottomoottorilla dieselmoottorin sijaan ja ORC-turbiinilla höyryturbiinin sijaan – tai jopa höyryturbiinin lisäksi.

6.9 MONIMOOTTORIAJONEUVOT

Monimoottoriajoneuvot ovat sellaisia, joissa on useampi kuin yksi samanlainen moottori. Lentokoneissa, sähköjunissa (Kuva 6.23) ja avaruusraketeissa tämä teknologia on yleisimmin käytössä, mutta se löytyy myös monista sähköautoista, joissa on sähkömoottori jokaisessa pyörässä tai jokaisessa akselissa. Muita tätä teknologiaa käyttäviä ajoneuvotyypppejä ovat laivat ja sukellusveneet. Useimmiten monimoottoriajoneuvot ovat monofuel-ajoneuvoja eli käyttävät vain yhtä polttoainetta. Polttoainejärjestelmiä voi kuitenkin olla useampia ja tarvittaessa ne voivat käyttää eri polttoaineita. Esimerkkejä tästä ovat nykyiset suihkulentokoneiden biopolttoainekokeilut, joissa yhtä moottoria nelimoottorikoneesta käytetään biopolttoaineilla.

Kuva 6.23. Pääasiassa ydinsähkökäyttöinen Eurostar-juna Lillen asemalla Ranskassa. Eurostar hiilidioksidikompensoi päästönsä eli fossiilisten päästöjen osuuden verran rakennetaan uusiutuvan energian järjestelmiä kehitysmäihin. [2007]



7

LIKENNEPOLTTOAINEIDEN JA NIIDEN KÄYTÖN YMPÄRISTÖ- JA TERVEYSVAIKUTUKSET



”The enduring legacy of Apollo 8 is an image of our home planet, a lovely blue-green sphere suspended above the harsh lunar landscape. Set against the blackness of space, the earth looks small, delicate, and incredibly inviting. If that photo did not inspire the environmental movement, it certainly fueled growing concerns over the irreversible effects of human civilization on the earth. Seldom has a single photograph had

do profound an impact, reminding everyone of the fragility of our planet and the need for cooperation among all those who call it home.”

- Tom Crouch kirjassaan avaruuslentojen historiasta (Crouch 1999)
(kuva © NASA 1968)

7.1 PÄÄSTÖTÖN LIIKENNE JA ZEV-TEKNOLOGIAT

Päästötön liikenne on mahdollinen monilla tässä julkaisussa esitellyillä teknologioilla. ZEV-teknologiat (zero emission vehicle) on koottu taulukoihin 7.1 (energianlähteen koko elinkaareltaan päästöttömät) ja 7.2 (käytönaikaisesti päästöttömät, mutta energianlähteen tuottamisen yhteydessä päästöjä aiheuttavat). Päästöttömiksi luokitellaan myös teknologiat, jotka tuottavat haitattomia päästöjä, siis

- Neutraali CO₂ (uusiutuva biomassa)
- Ilma
- Typpi
- Jalokaasut
- Vesi alailmakehässä (yläilmakehässä päästettynä aiheuttaa kasvihuonekaasuvaikutusta)

Kaikissa tapauksissa elinkaari sisältää vain energialähteen elinkaaren, kuten polttoaineiden WTW-vertailussa (well-to-wheel eli päästöt energialähteen tuotannosta sen käyttöön asti) on tapana. Liikennevälineen ja energialähteen tuotantoteknologian rakentamisen ja

romituksen päästöjä ei sisällytetä mukaan. Niissäkin päästöjä voidaan hallita käyttämällä päästöttömiä uusiutuvia energiamuotoja. Sähkötuotannossa ja mekaanisen energian tuotannossa päästöttömiä uusiutuvan energian lähteitä ovat:

- Aurinkoenergia
- Tuulivoima
- Aaltovoima
- Merivirtavoima
- Padoton vesivoima
- Vanha padollinen vesivoima
(tekoaltaan alle jääneen biomassan hajoamisen metaanipäästöt loppuneet)
- Padoton vuorovesivoima
- Vanha padollinen vuorovesivoima
(tekoaltaan alle jääneen biomassan hajoamisen metaanipäästöt loppuneet)
- Geoterminen energia binääriteknologialla

Päästöjä aiheuttavia uusiutuvan energian lähteitä ovat

- Bioenergia
- Uusi padollinen vesivoima
- Uusi padollinen vuorovesivoima
- Geoterminen energia binääriteknologiaa lukuun ottamatta.

Taulukko 7.1. Elinkaareltaan päästöttömiä ajoneuvoteknologioita.

Energianlähde	Sovellus/Teknologia	Päästö	Luku
Maapallon gravitaatio	Maa-, ilma- ja avaruusliikenne		2.2
Taivaankappaleiden gravitaatio	Avaruusliikenne: gravitaatiolinko		2.2
Vesivoima	Jokiliikenne, kanavaliikenne		2.3
Vesivoima	Vesihissit, rinnevaunut		2.3
Vuorovesivoima	Meriliikenne		2.4
Merivirtavoima	Meriliikenne, vedenalainen meriliikenne		2.5
Tuulivoima	Vesi-, ilma-, maa- ja planeettaliikenne		2.7
Maapallon liike-energia	Meri- ja avaruusliikenne		2.8
Päästötön UE	Mekaaninen voima: jouset, vauhtipyörä ym.		2.10
Päästötön UE	Vety polttokennossa sekä lämpövoimakoneissa hapella poltettaessa	Vesi	2.14
Päästötön UE	Sähköajoneuvot		2.20
Päästötön UE	Paineilma-ajoneuvot	Ilma	2.9, 2.21
Päästötön UE	Painehöyryajoneuvot	Vesi	2.9, 2.21
Päästötön UE	Painekaasuajoneuvot	Typpi, jalokaasut	2.9, 2.21
Päästötön UE	Lämpöakkuajoneuvot	Vesi	2.23
Fotonivoima	Avaruusliikenne		2.39
Aurinkotuulivoima	Avaruusliikenne		2.39
Päästötön UE	Magnetismia hyödyntävät ajoneuvot		2.40
Maan magneettikenttä	Avaruusliikenne		2.40
Aaltovoima	Vesiliikenne		2.42

Taulukko 7.2. Käytönaikaisesti päästöttömiä ajoneuvoteknologioita. Energianlähteen tuottamisen yhteydessä päästöt voivat olla suuretkin.

Energianlähde	Teknologia	Käytönaikainen päästö	Luku
Ruoka	Ihmislihasvoima	Ilma, neutraali CO ₂ *	2.1, 2.10
Rehu	Eläinlihasvoima	Ilma, neutraali CO ₂ *	2.6, 2.10
Painehöyry	Painehöyryajoneuvot	Vesi	2.9, 2.21
Paineilma	Paineilma-ajoneuvot	Ilma	2.9, 2.21
Painekaasu	Painekaasuajoneuvot	Typpi, jalokaasut	2.9, 2.21
Plasma	Ionimoottori	Jalokaasut	2.9
Vety	Polttokennot, lämpövoimakoneet hapella poltettaessa	Vesi	2.14
Sähkö	Sähköajoneuvot		2.20
Lämpöakku	Lämpöakkuajoneuvot	Vesi	2.23
Magnetismi	MAGLEV ym.		2.40

**Vain hengityksen päästöt.*

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan biopolttoaineiden ja fossiilisten polttoaineiden päästöjä.

7.2 KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT

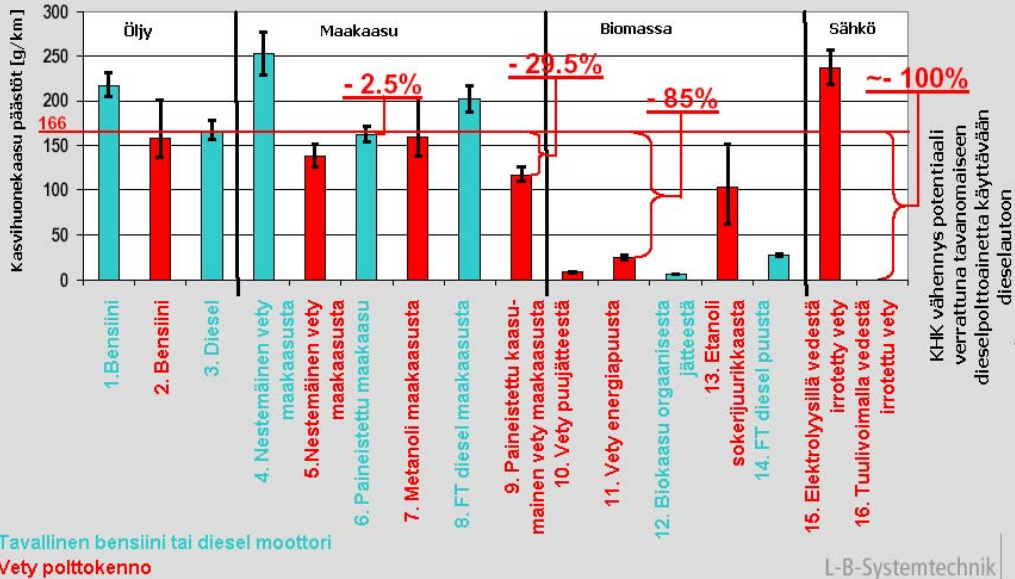
Laaja polttoaineiden elinkaaren kasvihuonekaasuvvertailututkimus (LBS 2002) antaa kuvan uusiutuvilla ja fossiililla energialähteillä kulkevan liikenteen päästöistä ja päästövähennyspotentiaaleista (Kuva 7.1). Kyseisessä well-to-wheel-tutkimuksessa verrattiin polttoaineen aiheuttamia hiilidioksidiekvivalentteja kasvihuonekaasupäästöjä polttoaineen tuotannosta (well) ja kuluksesta sen käyttöön eli ajoneuvon pyörien (wheel) liike-energiaan asti käyttäen kaikissa tapauksissa Opel Zafira -autoa (Kuva 7.2a). Kasvihuonekaasuista otettiin huomioon hiilidioksidin lisäksi metaani ja typpioksiduuli, jotka ovat selvästi merkittävimmät komponentit sekä liikenteen päästöissä että ihmiskunnan kokonaispäästöissä (IPCC 2001). Vastaavia tuloksia on saavutettu monissa muissakin elinkaarivertailuissa. Niitä on koottu Lampisen (2008a) julkaisuun.

Vertailussa olivat mukana raakaöljypohjaiset polttoaineet (benssiini ja diesel), maakaasu, biopolttoaineet (puu, biojäte, sokerijuurikas) ja sähkö (EU:n sekasähkö, tuulisähkö). Moottoriteknoologioista sekä polttomoottori (otto ja diesel) sekä polttokenno (joko vetytankilla tai ajoneuvokohtaisella vedyntuotannolla reformattorin avulla) olivat mukana. Mikään fossiilisykli, ei edes mikään maakaasuperäinen vetypolttokennosykli, edustanut merkittävää parannusta verrattuna nykyiseen diesel-sykliin (kuvan 7.1 referenssivaaka- viiva 166 g/km kohdalla), mutta biopolttoaineilla oli monella tavalla suuri parannuspotentiaali. Biojätteen mädätyksellä tuotetun biokaasun elinkaaripäästövähennämä parhaaseen maakaasupohjaiseen polttokennosykliin oli 92 % tavallisella polttomoottorilla (Kuva 7.2).

Polttoaineiden kasviuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalenteina



Auto: Opel Zafira



Kuva 7.1. Liikennepolttoaineiden elinkaaren kasviuonekaasupäästöjen vertailu (LBS 2002). Tummat pylväät tarkoittavat polttokennosyklejä ja vaaleat pylväät polttomoottorisyklejä. Alin pylväs saadaan vaihtoehdossa 12, joka on jäteräinen biokaasu käytettynä tavanomaisessa otto-moottorissa. Täysin päästötön vaihtoehto 16 on paikallisella tuulivoimalla tuotettu elektrolyysi-vety.



Kuva 7.2 Elinkaariarviovertailussa (LBS 2002) biopolttoaineista alhaisimmat kasviuonekaasu-päästöt saavutettiin biojätteen mädättämössä valmistetulla biokaasulla. Kuvassa Kristianstadin kaupungin Opel Zafira CNG kaupungin ylläpitämällä tankkausasemalla (a), jonka kaasu on peräisin pääasiassa yhdyskuntajätteiden mädättämöstä (b), mutta myös jätevesilietteen mädättämöstä. Tämä on normaalia toimintaa monissa muissakin Ruotsin kunnissa, mutta ei vielä yhdes-säkään Suomen kunnissa. [2003]

Polttokennon avulla biokaasun käytön päästöjä voidaan edelleen alentaa, samoin kuin kaatopaikkakaasulla (Kuva 7.3).



Kuva 7.3. a) Reykjavikin kaatopaikkakaasua käyttävä VW Caddy. [2003] b) Vaasan kaatopaikkakaasusta sähköä ja lämpöä tuottava Wärtsilän metaanipolttokenno. [2008]

Biokaasua alemmat päästöt voidaan saavuttaa vain paikallisella tuulivoimalla tuotetulla elektrolyysivedellä polttokennokäytössä, joka on vaihtoehto 16 kuvassa 7.1. Tuulivety ei ole biopolttoaine, vaan kuuluu laajempaan UE-polttoaineiden ryhmään. Esimerkki tästä on kuvassa 7.4. Jyväskylän yliopiston uusiutuvan energian ohjelman hankkeena yliopiston katolle asennetuilla aurinkopaneelilla ja tuuliturbiinilla tehdään sähköä, jolla elektrolyytisesti erotetaan vetyä vesijohtovedestä ja käytetään sitä polttokennoauton polttoaineena (Paananen ym. 2005, Luku 5.5).



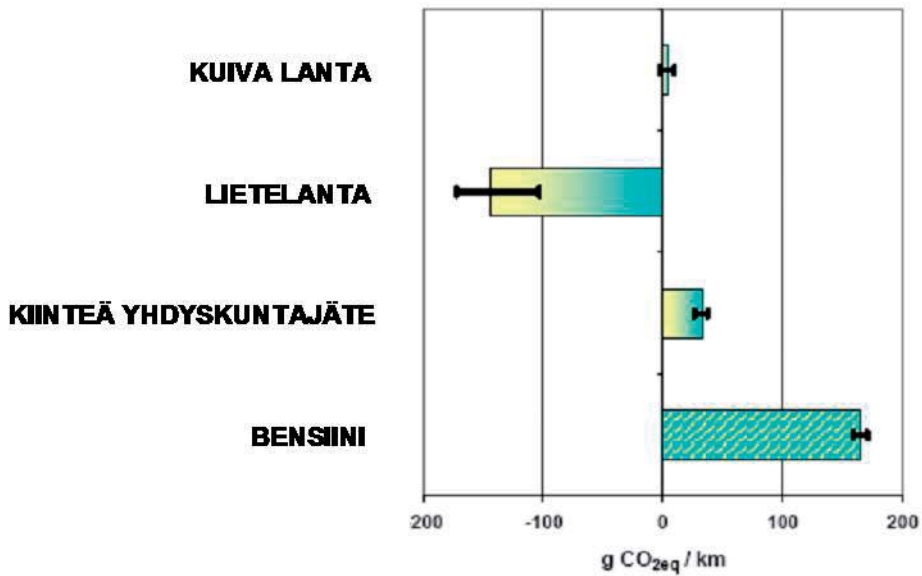
Kuva 7.4. Jyväskylän yliopiston tuuli- ja aurinkovedyn tuotantolaitteisto ja E3:n valmistama kotimainen Fantasia-polttokennoauto. [2005]

Tuuli- ja aurinkovedyn lisäksi nollapäästöihin päädytään myös tuuli- ja aurinkosähköllä. Sen sijaan EU:n keskimääräinen sähkö ja sillä tehty vety (vaihtoehto 15 kuvassa 7.1) aiheuttavat erittäin suuret päästöt johtuen kivihiilen ja muiden fossiilisten sähköntuotantomenetelmien käytöstä. Myös EU:n keskisähkön käyttö suoraan sähköajoneuvoissa aiheuttaa erittäin suuret elinkaaripäästöt, jotka vastaavat maakaasuautojen päästöjä. Suomessakin sähköinen liikenne aiheuttaa suuret elinkaaripäästöt, kun käytetään sekasähköä UE-sähkön sijaan, kuten esimerkiksi Posti on menetellyt. Suomen Posti (2002) on käyttänyt sähköautoja jakeluautoina ensin kokeiluina vuodesta 1985 lähtien (Kansikuva 2) ja kaupallisesti vuodesta 1990 lähtien alun perin Elcatin malleilla (Kuva 7.14b), joiden kehittämiseen Posti osallistui. Tehdasvalmisteisia Citroen Berlingo Electric-malleja on käytetty vuodesta 2002 lähtien (Kuva 7.5). Enimmillään sähköautoja oli 61 kappaletta vuonna 1998, mutta sen jälkeen niiden määrää on vähennetty ja vuonna 2006 niiden määrä oli enää 42. Elcat valmisti yhteensä yli 200 sähköautoa, mutta lopetti valmistuksen Fortumin luovuttua toiminnasta vuonna 2001 (TM 2002). Koska Posti ei käytä sähköautoissaan UE-sähköä, vaan sekasähköä, ne aiheuttavat CO₂-päästöjä. Berlingojen päästöt kaupunkiajossa ovat 54 g/km ja postinjakelujossa keskimäärin 120 g/km, kun vastaavan bensiinikäyttöisen auton, joita suuri enemmistö jakeluautoista on, postinjakelujopäästöt ovat 300 g/km (Posti 2002).



Kuva 7.5. Postin Citroen Berlingo Electric -sähköauto. [© Postimuseo, Postin Nordia-ehiökortissa numero 6, joka julkaistiin 27.10.2006]

Nollatasokin on mahdollista alittaa, mikäli käytetään polttoaineena metaania, joka muussa tapauksessa vapautuisi ilmakehään. Tämä nähdään EU-komissio ja Euroopan auto- ja öljyteollisuusliittojen tuottamasta elinkaaripäästövertailusta (Kuva 7.6).



Kuva 7.6 Kolmen biokaasuketjun ja bensiinin elinkaarikasvihuonekaasupäästöt EU-komission ja Euroopan auto- ja öljyteollisuuden vertailussa keskikokoisella henkilöautolla (JRC 2007). Lietelantabiokaasun päästöt ovat -150 g CO₂ ekv/km.

Esimerkki tällaisesta tuotantolaitoksesta on Laukaassa sijaitseva Kalmarin maatila (Lampinen 2004c), jonka pihalla olevaa tankkauspaikkaa kuva 7.7 esittää. Tästä esimerkistä kerrotaan luvussa 5.6. Vain osa siellä tuotetusta biokaasusta on lietelantaperäistä, joten keskimääräiset päästöt nousevat lähelle nollaa.



Kuva 7.7. Volvo V70 Bi-fuel biokaasutankkauksessa Kalmarin maatilalla Laukaassa. Se on vielä vuonna 2009 Suomen ainut biokaasun julkinen tankkauspaikka, mutta eri puolilla Suomea on hankkeita liikennebiokaasun tuottamiseksi ja tankkauspaikkojen perustamiseksi. [2007]

Taulukko 7.3. Eräiden autojen elinkaari-CO₂-päästöjä Ruotsin Gröna Bilister -järjestön tilastojen pohjalta ja useiden muiden lähteiden pohjalta modifioituna. Biokaasu on valmistettu jätevedestä. Kulutus kaasuautoille on annettu Nm³/100 km ja sähköautolle bensiinilitraekvivalenttina/100 km. Sähköauton arvot ovat Postin kokemusten pohjalta kaupunkiajossa ja jakeluajossa (Posti 2002).

Merkki ja malli	Polttoaine	Kulutus [l/100 km]	Elinkaari-CO ₂ [g/km]
Toyota Prius Hybrid (konvertoitu)	Biokaasu (CBG100)	4,2	6
Opel Astra Kombi 1.6 CNG	Biokaasu (CBG100)	6,3	9
Audi A2 1.2 TDI 3L	Biodiesel (B100)	3,0	10
Volkswagen Lupo 3L TDI	Biodiesel (B100)	3,0	10
Volvo S60 Bi-fuel	Biokaasu (CBG100)	8,2	11
Volvo V70 Bi-fuel	Biokaasu (CBG100)	8,7	12
Neoplan-hybridibussi	Biokaasu (CBG100)	18	25
Mopo	2T-bensiini	1,8	35
Ford Focus 1.8 FFV	Etanoli (E85)	9,7	58
Saab 9-3 BioPower	Etanoli (E85)	10,6	64
Audi A2 1,2 TDI 3L	Dieselöljy	3,0	82
Volkswagen Lupo 3L TDI	Dieselöljy	3,0	82
Citroen Berlingo Electricque	Sähkö (seka)	2,6–5,8	54–120
Toyota Prius Hybrid	Bensiini	4,3	115
Smart Fortwo	Bensiini	4,7	126
Opel Astra Kombi 1.6 CNG	Maakaasu (CNG100)	6,3	137

7.3 MUUT PÄÄSTÖT

Hiilivetyjen (esim. bensiinin ja dieselin pääosa) ja happea sisältävien orgaanisten yhdisteiden (kuten alkoholit ja eetterit) palaessa täydellisesti tuloksena on vain hiilidioksidia ja vesihöyryä. Tyyppiä sisältävien polttoaineiden (esim. nitrometaani) palamistuotteina on myös typen oksideja. Lisäksi ilmalla poltettaessa polttoilman tyypestä muodostuu typen oksideja ja myös komponentteja, pääasiassa tyyppiä ja happea, pääsee aina läpi polttoprosessissa. Näin käy myös vetyä ilmalla poltettaessa (Kuva 7.8). Typpioksideista voidaan vapautua vain polttokennoilla tai poltettaessa ilman sijaan hapella.

Polttoainetta ei saada palamaan kokonaan, vaan päästöinä saadaan palamatonta polttoainetta (alkaaneja, aromaatteja, metaania, vetyä ym.), osittain palanutta polttoainetta (aldehydejä, ketoneja, karboksyylihappoja, hiilimonoksidia ym.), termisen krakkautumisen tuloksia (PAHeja, eteeniä ym.), termisen polymeroitumisen tuloksia (PAHeja) sekä hiukkasia. Lisäksi päästöjä syntyy polttoaineiden lisäaineista (lyijyoksidit ym.), polttoaineiden epäpuhtauksista (rikin oksidit ym.), moottoriöljystä, katalysaattorista ja ilmaan päästessään fotokemiallisten reaktioiden kautta (alailmakehän otsoni). Päästölajeja on koottu taulukkoon 7.4.



Kuva 7.8. Ottomoottorilla varustettu vety-bensiini-bifuel-auto BMW Hydrogen 7 Frankfurtin autonäyttelyssä. Harmittoman vesihöyryn lisäksi vedyn polton päästöinä saadaan ilman typen ja hapen yhdistymistuotteita eli NO_x:eja ja N₂O:ta. [2007]

Taulukko 7.4. Kemiallisten polttoaineiden pakokaasupäästöjä.

Syntymekanismi	Päästölajit
Täydellinen palaminen	H ₂ O*, CO ₂ **
Ilman tyyppi ja happi	NO _x , N ₂ O, N ₂ *, O ₂ *
Palamaton polttoaine	VOCEja, H ₂ *
Osittain palanut polttoaine	VOCEja, CO, hiukkaset, savu
Termisen krakkauksen ja polymeroitumisen tuloksia	VOCEja
Polttoaineiden epäpuhtauksista	SO _x , raskasmetallit
Polttoaineiden lisäaineista	lyijyöksideja, eettereitä ym.
Moottoriöljystä	hiukkaset, VOCEja
Katalysaattori	N ₂ O
Fotokemiallisesti	O ₃ , orgaaniset peroksidit
*Ei haitallinen	
**Ei haitallinen, jos biopolttoaineesta	

Käytön päästöjen lisäksi liikennepolttoaineilla on ympäristö- ja terveysvaikutuksia tuotannon, kuljetusten, varastoinnin ja tankkauksen aikana sekä kaasumaisena että nestemäisenä. Palamis- ja räjähdysherkkyyden takia kaikki liikennepolttoaineet aiheuttavat turvallisuusriskin. Haihtumishäviöt ovat suuremmat korkean höyrynpaineen polttoaineilla, erityisesti bensiinillä. Raakaöljypohjaisten nestemäisten polttoaineiden haihtumishäviöt ajoneuvoista ja niiden tankkauksesta ovat merkittävä hiilivetyjen lähde ilmakehässä. Niiden suuruus oli 1980-luvulla lähes puolet ajoneuvojen pakokaasujen kautta syntyvistä HC-päästöistä (CONCAWE 1987).

Huoltoasemavuodot ovat esimerkki nestemäisistä päästöistä (Kuva 7.9). Bensa-asetat ovat yksi merkittävimmistä pohjavesien pilaantumisen aiheuttajista Suomessa ja muualla, ongelmana hitaasti biohajoavat toksiset yhdisteet, kuten bensiinissä ja dieselöljyssä olevat aromaattiset yhdisteet ja bensiinin lisäaineena käytetty MTBE (EEA 2001).



Kuva 7.9. Maaperää puhdistetaan vanhan bensiinaseman vuotojen jäljiltä Jyväskylässä. Bensa-asettien vuodot ovat yleisin pohjavesien likaantumisen syy Suomessa. [2007]

Muita merkittäviä nestemäisten päästöjen lähteitä ovat raakaöljyn ja siitä valmistettujen polttoaineiden kuljetukset merillä, maanteillä, rautateillä ja putkissa sekä öljynjalostamot ja varastot. Vesiliukoisuus edistää leviämistä ympäristössä, joten esimerkiksi alkoholit, eetterit (erityisesti MTBE, mutta myös ETBE) ja aromaattiset HC:t ovat suurin riski. Mutta alkoholit ovat nopeasti biohajoavia, josta syystä niiden riski pohjavesien pilaamiseen on pieni ja väliaikainen. Kaasumaisten polttoaineiden kuten biokaasun (Kuva 7.10) tankkausasemat, varastot ja kuljetus eivät aiheuta vesistöjen, pohjavesien eikä maaperän pilaantumiseriskää.



Kuva 7.10. Biokaasun tankkausasemat eivät aiheuta pohjavesien pilaantumiseriskää. Kuvissa kaksi esimerkkiä Ruotsin kuntien ylläpitämistä tankkausasemista, joiden kaasu on peräisin kaupungin jätevedenpuhdistamolta: a) VW Transporter Ecofuel tankkaamassa ja MB Sprinter NGT odottamassa vuoroaan biokaasuasemalla Eskilstunassa. b) VW Passat Ecofuel tankkaamassa biokaasua Östersundissa. [2009]

Kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi muutkin haitalliset päästöt ovat pääsääntöisesti biopolttoaineilla alemmat kuin bensiinillä ja dieselöljyllä (Greene & Santini 1993, Bata 1995, SAE 1996, Ingersoll 1996, Bechtold 1997, Klass 1998, Reynolds & Khan 1999, Nigge 2000, Friedrich & Bickel 2001, DeCicco & Kliesch 2002, Lampinen 2003, IEA 2004, Olah ym. 2005, Farrell ym. 2006 ja Drapcho ym. 2008a). Merkittävimpiä poikkeuksia ovat biodieselin NO_x-päästöt ja metanolin formaldehydipäästöt. Näilläkin poltto-

aineilla kokonaispäästöt vähenevät ja ongelmakomponentin hallintaan on käytettävissä teknisiä keinoja. Kullakin biopolttoaineella on oma luonteenomainen päästöprofiilinsa, joka sisältää yksittäisiä yhdisteitä, joiden päästöt ovat korkeammat kuin bensiiniä tai dieselöljyä käytettäessä. Ne eivät kuitenkaan minkään biopolttoaineen tapauksessa tuota kokonaispäästöprofiilia, joka olisi haitallisempi kuin bensiinillä ja dieselöljyllä johtuen jälkimmäisten ominaislikaisuudesta, josta millään jalostusprosessilla ei voida päästä eroon.

Bensiini on luokkaa 400 yhdisteestä koostuva seos, jossa on mukana monia toksisia, ekotoksisia, karsinogeenisiä ja mutageenisia yhdisteitä (Owen ym. 1995). Koostumus vaihtelee riippuen raakaöljyalaadusta, jalostamosta ja jalostamoprosesseista. Bensiini on myrkyllinen sekä hengitettynä että nieltynä. Ensimmäistä ongelmaa lisää bensiinihöyryjen raskaus eli höyryt viiptyvät kauan vuoto- ja tankkauspaikassa mahdollistaen sekä hengityksen kautta altistumisen että räjähdysvaaran. Jälkimmäistä ongelmaa lisää monien bensiinin komponenttien, erityisesti aromaattisten ja hapettimien, vesiliukoisuus. Näistä suurimpia huolen aiheita ovat monoaromaattiset bentseeni, tolueeni, etyylibentseeni ja xyleeni, di-aromaattiset naftaleeni ja metyyli-naftaleeni sekä hapettimet MTBE, ETBE ja metanoli (Owen ym. 1995). Bensiinin lailla dieselöljy on useista sadoista yhdisteistä koostuva seos, jossa on mukana monia toksisia, ekotoksisia, karsinogeenisiä ja mutageenisia yhdisteitä, vaihdellen raakaöljyalaadusta, jalostamosta ja jalostamoprosesseista riippuen. Dieselöljy on myrkyllinen sekä hengitettynä että nieltynä. Ensin mainittu ongelma on paljon vähäisempi kuin bensiinin tapauksessa johtuen dieselöljyn paljon vähäisemmästä höyrystymisestä eli alemmasta höyrinpaineesta. Mutta dieselöljyn höyryt ovat, kuten bensiininikin, ilmaa raskaampia eli ne viiptyvät kauan vuotopaikassa mahdollistaen sekä hengityksen kautta altistumisen että räjähdysvaaran. Taulukko 7.5 esittää eräiden polttoaineominaisuuksien muutoksien vaikutuksia dieselmoottorin päästöihin.

Taulukko 7.5. Dieselpolttoaineen ominaisuuksien muutoksen vaikutukset moottorin suorituskykyyn ja päästöihin (Owen ym. 1995). Merkintä + tarkoittaa suorituskyvyn paranemista tai päästöjen vähentymistä. Merkintä - tarkoittaa suorituskyvyn heikkenemistä tai päästöjen kasvua.

Polttoaineen ominaisuus	Moottorin suorituskyky		Moottorin käyttö			Päästöt						
	Max teho	Polttoaineen kulutus	Kylmäkäynnistys	Lämminkäynnistys	Kylmä ajo	Valkea savu	Musta savu	HC	CO	NOx	PM	Melu
TIHEYS												
- kasvaa	+	-				-	-					
- alenee	-	+				+	+					
SETAANILUKU												
- kasvaa	+	+	+		+	+		+	+	+	+	+
- alenee	-	-	-		-	-		-	-	-	-	-
VISKOSITEETTI												
- kasvaa	+	-	-	+			-				-	-
-alenee	-	+	+	-			+				+	+

Taulukon 7.5 mukaan setaaniluvun kasvattaminen auttaa eniten päästöjen vähentämisessä. Suurin osa dieselmoottoreihin soveltuvista biopolttoaineista on setaaniluvultaan fossiilista dieselöljyä parempia (Taulukko 7.6), joten biopolttoaineilla saadaan monia tavanomaisia päästökomponeentteja vähennettyä kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi.

Taulukko 7.6. Dieselmoottoripolttoaineiden setaanilukujen vertailu.

Polttoaine	Setaaniluku
NExBTL DI-diesel	84–99
Ecopar FT-diesel	73–81
TME (talibiodiesel)	75
DME	55–68
Biodiesel kasviöljyistä	45–72
Pähkinäöljy	42
Fossiilinen dieselöljy	38–55

7.3.1 Typen oksidit (NO_x)

NO_x-päästöt ovat lähes kokonaan peräisin ilman typen ja hapen reaktiosta ja päästöt kasvavat polttolämpötilan noustessa. Hapettimien käyttö bensiinissä pienissä pitoisuuksissa vähentää hieman NO_x-päästöjä, mutta suureissa pitoisuuksissa NO_x-päästöt kasvavat (Owen ym. 1995). NO_x-päästöjä syntyy lisäksi myös typpeä sisältävistä polttoaineista, mutta useimmissa liikennepolttoaineissa ei ole typpeä tai sitä on vähän. Polttoaineperäisen typen päästöt eivät merkittävästi riipu polttolämpötilasta. Muista biopolttoaineista poiketen biodieselillä NO_x-päästöt kasvavat verrattuna fossiilidieselin päästöihin. Niitä voidaan vähentää esimerkiksi antioksidanteilla (Drapcho ym. 2008).

NO_x:ien vähentäminen johtaa usein muiden päästökomponenttien lisääntymiseen. Esimerkiksi 3-toimikatalyysaattorissa HC- ja CO-puhdistus perustuu hapettamiselle kun taas NO_x-puhdistus pelkistämiseksi. Suurempi NO_x-puhdistustehokkuus 3-toimikatalyysaattorissa aiheuttaa HC- ja CO-päästöjen kasvua. NO_x-päästöjen pudotus polttolämpötilaa alentamalla johtaa puolestaan huonompaan hyötysuhteeseen ja muiden päästökomponenttien lisääntymiseen.

NO_x-päästöistä päästäisiin eroon ilman negatiivista vaikutusta muihin päästökomponentteihin ja samalla mahdollistaen hyötysuhteen nostamisen, mikäli ilmasta poistettaisiin typpi ennen sen syöttämistä moottoriin. Typen erotus ajoneuvossa ei ainakaan toistaiseksi ole teknistaloudellisesti mahdollista ja typen viilentävää vaikutusta suorastaan käytetään nykyisissä moottoreissa hyväksi. Mutta voimalaitoksissa happipolttu on nykyään kaupallista teknologiaa kaikkein korkeimman hyötysuhteen voimalaitoksissa (Suomessa sellaisia ei ole).

7.3.2 Orgaaniset yhdisteet (HC:t ja muut VOCit)

HC-päästöt ja muut VOC-päästöt ovat seurausta polttoaineen epätäydellisestä palamisesta. HC-päästöistä haitallisimpia ovat aromaattiset yhdisteet, kuten bentseeni ja PAH:t, 1,3-butadieeni. Esimerkiksi Nesteen bensiinissä on noin kolmasosa aromaattisia yhdisteitä, mikä johtaa suuriin ja monista yhdisteistä koostuviin aromaattisiin päästöihin. Biopolttoaineissa aromaattisia yhdisteitä on vähän tai ei ollenkaan. Bensiinin HC-päästöt vähenevät, jos siinä käytetään hapettimia (yleensä alkoholeja ja eettereitä) palamisen parantamiseksi ja aromaattisten osuuden vähentämiseksi. Aromaattisten osuutta voidaan

vähentää myös korvaamalla ne alkylointiprosessilla valmistetuilla haaroittuneilla hiilivedyillä. Tällaista bensiiniä kutsutaan alkylaattibensiiniksi. Suomessa sitä myydään vain kanistereissa pienmoottoreihin tavalliseen bensiiniin verrattuna 3-kertaiseen hintaan, mutta Ruotsissa sitä on saatavissa autoihin huoltoasemilta (Kuva 7.11) 20 % lisähintaan tavalliseen aromaattibensiiniin verrattuna. Aromaattisten osuus alkylaattibensiinissä on alle 1 %. Öljynjalostuksessa syntyvät alkeetit ja alkyynit ovat fotokemiallisesti erityisen aktiivisia, joten ne tuottavat runsaasti otsonia.



Kuva 7.11. Alkylaattibensiiniä (pumppu 5) myytävänä autoihin Qstarin huoltoasemalla Norrköpingissä Ruotsissa. Samalla asemalla myydään myös paikallisesti valmistettua etanolia (E85, pumppu 4), biokaasua (CBG100, pumput 6–7) ja biodieseliä (RME2 ja RME100, pumput takana). [2005]

Metaaniautoista pääsee osa metaanista palamattomana moottorin ja katalysaattorin läpi. Metaanipäästö on 3-litraisessa autossa noin 0,03 g/km (Ishii ym. 1995), mikä vastaa noin 0,7 g CO₂^{ekv} kasvihuonekaasupäästöjä kilometriä kohti, kun CO₂-päästöt kyseisellä autolla ovat 170 g/km (ja 220 g/km bensiinillä ajettaessa). Metaanista karkasi tässä tapauksessa 0,04 %. Metaania voi karata huonolla katalysaattorilla varustetusta autosta enemmän, mutta se on joka tapauksessa vähäinen kasvihuonekaasupäästö verrattuna fossiilisten polttoaineiden käytön hiilidioksidipäästöihin. Metaani on myrkytön, hajuton ja terveydelle haitaton, joten sen päästöjen hallinta kuuluisi pelkästään kasvihuonekaasuvaikutusten piiriin.

HC-yhdisteiden lisäksi haitallisia päästöjä syntyy muistakin VOceista, erityisesti aldehydeistä. Aldehydien määrä lisääntyy hapettimia käytettäessä. Alkoholien palaminen tuottaa enemmän aldehydejä kuin hiilivetyjen palaminen. Erityishuomiota saa metanolin formaldehydipäästöt, joita kontrolloidaan Kaliforniassa erillisenä komponenttina johtuen M100- ja M85-autojen käytöstä siellä.

7.3.3 Hiilimonoksidi (CO)

CO-päästöt ovat seurausta polttoaineen epätäydellisestä palamisesta. Bensiinin CO-päästöt vähenevät, jos siinä käytetään hapettimia (alkoholit ja eetterit). Esimerkiksi 2 %:n happiosuudella CO-päästöt vähenevät luokkaa 30 % HC-bensiiniin verrattuna (Owen ym. 1995).

7.3.4 Hiukkaset (PM)

Moottorin hiukkaspäästöt ovat seurausta polttoainepisaroiden epätäydellisestä palamisesta. Ne koostuvat noesta, johon muita epätäydellisiä palamistuotteita on adsorboitunut tai kondensoitunut. Näitä päästöjä rajoitetaan ajoneuvojen tyypikatsastusnormeilla. Hiukkaspäästöjä syntyy erityisesti raskaita polttoaineita käytettäessä. Siksi dieselmoottorissa syntyy sekä fossiilisia että biodieseleitä käytettäessä hiukkaspäästöjä enemmän kuin ottomoottorissa, eikä vain mustan ja valkoisen savun päästöjen aikana. Käytettäessä kaasumaista ja molekyylipainoltaan kevyttä dieselpolttoainetta DME:tä dieselmoottorinkin hiukkaspäästöt alenevat olennaisesti. Yleensä dieselmoottoreissa hiukkaspäästöjen alentaminen johtaa NO_x-päästöjen kasvuun (Suzuki 1997). Myös polttoaineen sisältämä rikki lisää hiukkaspäästöjä. Hiukkaspäästöjä syntyy moottorin lisäksi renkaista ja renkaiden nostattamasta pölystä.

7.3.5 Musta, valkoinen ja sininen savu

Valkoista savua syntyy etenkin dieselmoottorin kylmäkäynnistyksessä, mutta myös rasi-tuksessa. Se koostuu vesihöyrystä, palamattomasta polttoaineesta sekä palamattomasta tai osin palaneesta polttoaineesta muodostuneista hiukkasista (PM) ja valkoinen väri syntyy kondensoituneista vesipisaroista. Syynä on moottorisylinterien alhainen lämpötila, josta johtuen palaminen jää epätäydelliseksi. Myös melutaso on normaalia korkeampi. Tätä päästöä ei lainsäädännöllisesti kontrolloida. Sitä voidaan pienentää moottorin ja polttoaineen esilämmityksellä, polttoaineen setaaniluvun nostamisella sekä polttoaineen tiheyden alentamisella (Owen ym. 2005).

Mustaa savua syntyy dieselmoottoria kuormitettaessa (Kuva 7.12). Se koostuu nokihiu-kkasista ja muista palamattomasta polttoaineesta muodostuneista hiukkasista (PM) sekä vesihöyrystä ja musta väri johtuu nokihiu-kkasista. Sitä voidaan vähentää ajoneu-von kuormitusta vähentämällä ja setaanilukua korottamalla (Owen ym. 2005). Diesel-ajo-neuvojen mustalle savutukselle on normit sekä tyypikatsastuksessa että määräaikaikatsastuksessa. Suomessa se on die-selajoneuvojen ainut päästökomponeentti, joka mitataan määräaikaikatsastuksessa.



Kuva 7.12. Mustaa savua katalysaattorilla varustetun M/S Silja Symphony -laivan yhdestä sen neljästä 8145 kW:n dieselmoottorista Tukholman satamasta lähtiessä. Käytössä on ns. matalarikkinen, alle 0,5 %, dieselöljy. [2006]

Sinistä savua syntyy voiteluöljyn palaessa tai joskus myös osittain palaneiden polttoainehiukkasten päästöissä. Se on oire mekaanisesta ongelmasta eikä ole dieselmoottorin luonteenomainen ominaisuus kuten valkoinen ja musta savutus (Peyton 2002).

7.3.6 Rikin oksidit (SO_x)

Polttoaineen sisältämä rikki päätyy savukaasuihin varsinkin rikin oksideina (SO_x), erityisesti rikkidioksidina (SO₂) ja rikkiatrioksidina (SO₃), mutta myös kiinteinä sulfaattihiukkasina. Savukaasut sisältävät vähäisemmässä määrin useita muitakin rikin yhdisteitä kuten rikkivetyä (H₂S), joihin katalysaattorilla voidaan vaikuttaa. Helposti ja pienessä pitoisuudessa tunnistettavan rikkivedyn suurempia päästöjä syntyy katalysaattorin rikkoontuessa ja akun sisältämän rikkihapon vuotaessa. Polttoaineen suuri rikkipitoisuus voi estää katalysaattorin toiminnan.

Rikin päästöt olivat ensimmäiset diesel-moottoreilla varustettuihin ajoneuvoihin kohdistuvien päästönormien kohde. Raakaöljy sisältää rikkiä eri yhdisteinä, joilla on erilaiset höyrystymispisteet. Näitä yhdisteitä päätyy öljynjalostamoiden tislauksessa kaikkiin polttoainejakeisiin. Päästönormit edellyttävät nykyään erillistä rikin puhdistusyksikköä. Se perustuu yleensä vetykäsittelyyn, jolloin rikin yhdisteet poistuvat rikkivetyä. Biopolttoaineissa rikkiä on erittäin vähän.

7.3.7 Metallit

Metallipäästöistä haitallisimpia ovat raskasmetallipäästöt. Raakaöljy sisältää kaikkia raskasmetalleja ja osa niistä jää jalostusprosessin jälkeen liikennepolttoaineisiin. Suurin raskasmetalliongelma oli lyijyn (TEL) lisääminen bensiiniin puristuskestävyyden lisäämiseksi. Niin tehdään edelleen osalle vanhoista ilman katalysaattoria olevista bensiini-autoista. Terveydelle haitallisia metallipäästöjä tulee myös jarruista ja renkaista: sinkkiä (erityisesti renkaat), antimonia (erityisesti jarrut), kadmiumia ja kuparia.

7.3.8 Melu

Dieselmoottorin korkea melutaso johtuu moottorin suuresta puristussuhteesta ja korkeiden huippupaineiden aikaansaamasta diesel-nakutuksesta. Nakutusta voidaan vähentää tarkalla sytytyksen ajoituksella, setaaniluvun nostolla ja viskositeetin alentamisella. Melutaso on suurimmillaan käynnistyksessä ja ajon alussa. IDI-dieseliä melutaso on yleensä alempi kuin DI-dieseliä. IDI-dieselit antavat myös paljon enemmän joustavuutta polttoaineen valinnassa ja siten setaaniluvun korottamisessa. Hyvin säädetty DI-moottori toimii kuitenkin paremmalla hyötysuhteella ja siitä syystä IDI-dieselit harvinaistuvat. (Owen ym. 1995)

Kaupunkiliikenteessä korkeimmat melutasot tulevat päivisin busseista ja öisin jäterekoista. Niitä voidaan alentaa merkittävästi käyttämällä sähkö- tai biokaasuajoneuvoja (Lampinen 2005c), kuten Ruotsissa yleisesti tehdään (Kuva 7.13).



Kuva 7.13. Ruotsissa liikenteen melutasoa alennetaan biokaasuajoneuvoilla: a) Vesteråsin kaupunkiliikenteen Volvo-biokaasubussi. b) Scanian jätterekka biokaasutankkauksessa Katrineholmssa. [2009]

7.4 PÄÄSTÖJEN TEKNISET VÄHENTÄMISMAHDOLLISUUDET

7.4.1 ZEV-ajoneuvot

Paras tapa päästöjen alentamiseen on käyttää päästöttömiä ZEV-ajoneuvoja, joihin annetaan katsaus luvussa 7.1. Esimerkkejä ZEV-ajoneuvoista on kuvassa 7.14. Jyväskylän Energia käytti aiemmin Elcatin sähköautoja huoltoautoina (Kuva 7.14b). Niitä käytettiin itse tuotetulla UE-sähköllä (puu-, pienvesi- ja tuulisähköllä), joten niiden laskennalliset CO₂-päästöt olivat 0 g/km. Nykyään Jyväskylän Energian huoltoautot kulkevat bensiinillä.



Kuva 7.14. Esimerkkejä ZEV-ajoneuvoista: a) Aurinkosähköistetty vene Eurosun96-konferenssin näyttelyssä Freiburgissa Saksassa vieressään Twike-merkinen katettu polkupyörä. [1996] b) Jyväskylän Energian suomalainen Elcat-konversiosähköauto. Auto on konvertoitu Subaruun pakettiautosta. [1997]

7.4.2 Biopolttoaineet

Biopolttoaineiden käytöllä vähennetään kasviuonekaasupäästöjen lisäksi muitakin päästöjä. Tämä onnistuu esimerkiksi etanolia käyttämällä, kuten kuvassa 7.15 tehdään ruotsalaisessa autokoulussa. Useimmat biopolttoaineet sisältävät enemmän happea kuin fossiiliset polttoaineet, vaikka niihin onkin lisätty happea sisältäviä komponentteja. Polttoaineessa oleva happi auttaa polttoaineen palamista täydellisemmin eli korkeammalla hyötysuhteella ja vähentää siten kaikkia epätäydellisestä palamisesta aiheutuvia päästöjä, kuten CO, HC:t ja hiukkaset (Owen ym. 1995). Biopolttoaineet voivat hapen ansiosta palaa korkeammassa lämpötilassa ja antaa sitäkin kautta korkeamman moottorihyötysuhteen, mutta korkeamman palamislämpötilan haittapuolena NO_x-päästöt lisääntyvät. Tätä ongelmaa voitaisiin vähentää teknisesti voimakkaammin pelkistävillä katalysaattoreilla, mutta toistaiseksi sitä keinoa ei käytetä. NO_x-päästönormien tiukentumisen myötä se voi käydä tulevaisuudessa välttämättömäksi joidenkin biopolttoaineiden osalta, erityisesti useat biodiesel-tyypit.



Kuva 7.15. E85-käyttöisellä Volvo C30 1.8F -autokouluautolla opetetaan Östersundissa Ruotsissa uusia autoilijoita biopolttoaineiden käyttöön ja niiden ympäristövaikutuksiin verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. [2009]

7.4.3 Ajoneuvojen energiatehokkuuden parantaminen

Autojen energiatehokkuutta voidaan käyttövoimasta riippumatta parantaa pienentämällä ilmanvastusta ja auton painoa sekä käyttämällä turboahdinta. VW Lupo 3L TDI ja Audi A2 1.2 TDI 3L ovat vuonna 1999 ja 2001 markkinoille tulleita autoja, joiden polttoainekulutus on 3 l/100 km (Kuva 7.16). Biodieseliä käyttäen niiden CO₂-päästöt ovat noin 10 g/km eli vastaavat isojen biokaasuautojen päästöjä ja fossiilidieselilläkin ne pääsevät tasolle 80 g/km (Taulukko 7.3).



Kuva 7.16. 3 l/100 km kuluttavia 4-paikkaisia autoja: a) Käytettynä Suomeen tuotu VW Lupo 3L TDI Muuramessa. [2008] b) Eestiläinen Audi A2 1.2 TDI 3L Varkaudessa. [2009]

Näiden autojen kulutustaso on kuitenkin korkea verrattuna dieselmoottorilla varustettuun 4-paikkaiseen Loremoon, jonka kulutus on alle 2 l/100 km (Kuva 7.17). Se on hyvä energiatehokkuustavoite 2010-luvun autoille. Auton sarjavalmistus on tarkoitus aloittaa vuonna 2010.



Kuva 7.17. Loremo, jonka kulutus on alle 2 l/100 km, Frankfurtin autonäyttelyssä. Biodieselillä ja synteettisellä biodieselillä saavutetaan erittäin alhainen päästötaso. [2007]

Painon pudotuksella ja aerodynaamisuuudella voidaan ääritapauksissa päästä reilusti alle 0,1 l/100 km kulutustasoja, kuten Shell Eco Marathon -kilpailuun osallistuneilla autoilla kuvassa 7.18. Ne eivät kuitenkaan ole käyttökelpoisia käytännön liikennesovelluksissa.



Kuva 7.18. Energiatohokkuuskilpa-autoja Frankfurtin autonäyttelyssä. [2007]

Myös hybriditekniikalla voidaan vähentää kaikkien ajoneuvojen polttoainenkulutusta. Bensiini- tai dieselautoon liitetyillä sähkömoottoreilla voidaan vähentää kulutusta 10–20 % luvun 6.6 esittelemillä epäaidoillakin hybrideillä, joita kaupasta nykyisin saa. Se johtuu erityisesti jarrutusenergian talteenotosta ja alhaisesta energiankulutuksesta kaupunkiajossa, sisältäen moottorin sammumisen pysähdyttäessä. Johtuen alhaisesta sähkön tuotannon hyötysuhteesta sähkömoottorilla ei maantieajossa saada hyötyä polttomoottoriin verrattuna. Bensiinihybrideistä edistyneisin on vuonna 1999 markkinoille tullut Honda Insight (Kuva 7.19). Sen kulutus bensiinillä on 3,2–3,4 l/100 km eli litran Suomen markkinoille tulleen Toyota Prius -hybridin kulutusta alempi. Suomen markkinoilla myytävä uusi Honda Insight ei jaa alhaista energiankulutusominaisuutta edeltäjänsä kanssa. Dieselhybrideistä esimerkiksi japanilaisella Hino Motorsin HIMR-bussilla saatiin polttoaineen kulutusta alennettuna tavanomaiseen dieseliin verrattuna 5–15 % ja lisäksi alennettua NO_x-päästöjä 20–30 %:lla, mustaa savua 70 %:lla ja lähtömelua 2–3 dB(A):lla (Suzuki 1997).



Kuva 7.19. Rocky Mountain Institutun johtajan Amory Lovinsin Honda Insight-rinnakkaishybridiauto Aspenissa Coloradossa. Takapuskurissa oikealla olevassa tarrassa sanotaan ”I’d rather be driving a HYPERCAR” viitaten instituutin 1 l/100 km hyperautoprojektiin (Weizsäcker ym. 1996). Tätä mallia ei tuotu Suomeen. [2004]

7.4.4 Katalysaattorit

Katalysaattoreilla voidaan vähentää suurimmalta osalta, mutta ei kokonaan poistaa, useita päästökomponeentteja. Ne otettiin käyttöön stationäärisissä moottoreissa 1920-luvulla ja liikenteessä 1970-luvulla (Liite 3). Kolmitoimikatalysaattorit, joita nykyään yleensä käytetään, vähentävät CO- ja HC-päästöjä hapettamalla ne CO₂:ksi ja vesihöyryksi, ja NO_x-päästöjä pelkistämällä ne typeksi ja hapeksi. Koska niiden täytyy sekä hapettaa että pelkistää, kumpikaan ei maksimoidu. Kaksitoimikatalysaattorilla, joka pelkästään hapettaa, CO- ja HC-puhdistuksen hyötysuhde on korkeampi, mutta NO_x-päästöt eivät vähene. Nämä molemmat katalysaattorityypit hapettavat myös muita VOC-yhdisteitä. Negatiivisena ominaisuutena on, että ne hapettavat myös ilman tyypeä, josta seuraa N₂O-päästöjen kasvu.

Metaaniajoneuvoissa, joissa CO-, NMHC- ja NMVOC-päästöt ovat erittäin alhaiset, voitaisiin käyttää pelkästään pelkistäviä yksitoimikatalysaattoreita, joilla saavutettaisiin kolmitoimikatalysaattoreita suurempi NO_x-päästöjen vähenemä sekä lisäämisen sijaan vähennettäisiin N₂O-päästöjä. Toistaiseksi niitä ei käytetä, koska määräaikaikatsastusten HC-normit estävät kyseisen tekniikan käytön.

Katalysaattorien käyttö edellyttää lyijytöntä, tai paremminkin vähälyijyistä, polttoainetta johtuen lyijyn katalysaattoreihin aiheuttamasta myrkytysvaikutuksesta. Siten katalysaattorien käyttöönotto on myös vaikuttanut merkittävästi toksisen ja ekotoksisen lyijyn päästöjä vähentävästi.

7.4.5 Muut tekniset toimenpiteet polttomoottoriajoneuvoissa

Pakokaasupäästöjä vähennetään myös jo ennen katalysaattoreiden käyttöönottoa, ensimmäisenä Kaliforniassa vuonna 1961, moottoreihin pakollisena lisätyllä kampikammion tuuletuksella (PCV, positive crankcase ventilation) sekä pakokaasujen takaisinkierätyksellä (EGR, exhaust gas circulation) ja moottorisylinterien kehitystyöllä. Ilma-polttoainesuhteen tarkka automaattinen säätö on mahdollistunut 1990-luvulta lähtien suorasuihkutusmoottoreissa ja siten päästöt hallitaan aikaisempaa paremmin ja eri päästökomenttien vähennys voidaan optimoida. Mutta johtuen erilaisten päästöjen erilaisesta käsittelyvaatimuksesta mitään päästökomenttia ei voida minimoida aiheuttamatta toisten komponenttien merkittävää kasvua. Normaali-moottoreissa ilma-polttoainesuhde pidetään lähellä polttoaineen stoikiometristä arvoa eli λ -arvo on yksi. Niin sanotuilla laihaseosmoottoreilla käytetään ilmaylijäämää ($\lambda > 1$), jonka avulla etenkin CO- ja NO_x-päästöjä sekä polttoaineen kulutusta voidaan vähentää verrattuna stoikiometriseen polttoon, haittapuolena HC-päästöjen kasvu ja moottorin tehon alenema. Päästöjä voidaan vähentää myös välijäähdyttimellä ja hiukkasloukuilla. (Owen ym. 1995)

Dieselin HC-, NO_x-, PM- ja savupäästöt alentuvat aromaattisia vähentämällä (Owen ym. 1995). Dieselmootoreissa NO_x-päästöjä voidaan alentaa myös käyttämällä epäsuoraa suihkutusta (IDI) suoran suihkutuksen (DI) asemasta tai muulla tavoin hidastamalla palamista sekä palamislämpötilan ja/tai paineen alentamisella, mutta ne kaikki lisäävät hiukkaspäästöjä (Suzuki 1997). Sekä NO_x-päästöt että muut päästöt on mahdollista saada alemmaksi käyttäen ECE-mootoreita kuten stirling-koneita ja höyrykoneita (Suzuki 1997).

EU:n Euro V -normit kiristivät raskaan liikenteen NO_x-päästötasoa vuonna 2009 niin paljon, että fossiilidieselillä ja biodieselillä käytettävillä dieselmootoreilla normeihin on vaikea päästä muuten kuin aktiivisella puhdistustekniikalla. Yleiseen käyttöön otettiin SCR-tekniikka (Selective Catalytic Reduction): pakokaasuun sekoitetaan urealiuosta, jolla pelkistetään NO_x:it typpikaasuksi ja vesihöyryksi. Urealiuos tankataan erilliseen säiliöön ja sen kulutus on noin 5 % polttoaineen kulutuksesta (Kuva 7.20). Urea valmistetaan synteettisesti maakaasun avulla eli ihmis- ja eläinvirtsan pääaineosaa ei käytetä (Luku 5.2).

SCR-tekniikkaa ei tarvita Euro V -normien saavuttamiseksi, mikäli dieselmootoreita käytetään biokaasulla, DME:lla tai etanolilla (Kuva 7.21). Tämä on halvempi tapa kaikkien päästökomenttien vähentämiseksi.

NO_x-päästöistä voitaisiin päästä kokonaan eroon polttamalla puhtaalla hapella ilman sijaan. Se johtaisi myös korkeampaan moottorihyötysuhteeseen, vaikkakin kokonaisyötysuhde laskisi johtuen tyypin erotuksen energiankulutuksesta. Hapen erottaminen ilmasta on periaatteessa mahdollinen ainakin kalvotekniikoilla myös ajoneuvoissa, mutta teknologiaa ei vielä ole saatavissa. Voimalaitoskäytössä happipolttot on jo kaupallista teknologiaa, mutta Suomessa sitä ei käytetä.

Teknisesti ei raakaöljypohjaisella dieselöljyllä käytettävillä dieselmootoreilla ole enää paljoa varaa normien kiristykseen (Owen ym. 1995). Sen jälkeen vaihtoehtoiset diesel-polttoaineet jäävät ainoaksi vaihtoehdoksi.



Kuva 7.20. Statoilin AD BLUE -ureatankkausasema Sundsvallissa Ruotsissa. [2009]



Kuva 7.21. Scanian etanolikäyttöinen dieselmoottori esittelyssä kansainvälisessä joukkoliikennekonferenssissa Helsingissä. [2007]

7.5 TERVEYSVAIKUTUKSET

Edellä käsiteltyjen päästöjen lisäksi terveysvaikutuksiin lukeutuvat polttoaineiden myrkyllisyys sekä onnettomuusturvallisuus. Bensiini ja dieselöljy ovat pääsääntöisesti kaikkien terveysvaikutusten osalta vaarallisempia kuin biopolttoaineet. Taulukkoon 7.7 on koottu tietoja eräiden liikennepolttoaineiden myrkyllisyydestä. Vaikka osa biopolttoaineista on myrkyllisiä, pahimpana metanoli, niin metanolikin merkitsee myrkyllisyyden olennaista vähentämistä bensiiniin ja dieselöljyyn verrattuna.

Taulukko 7.7. Eräiden liikennepolttoaineiden myrkyllisyys.

Polttoaine	Luokitus	Akuutti myrkyllisyys: LD50 suun kautta (rotta) [mg/kg]	HTP (iho) 15 min	Ekotoksisuus LC50 (kalat) [mg/l]
Bensiini	T, F+, Xn, N, Syöp, Mut, Rep.	>2000	1000 mg/m ³	10–18
Diesel	Xn, N, Syöp	>2000	5 mg/m ³ (8h)	21–230
Metanoli	T, F	5628	250 ppm 330 mg/m ³	14000–29000
Etanoli	F	7060	1300 ppm 2500 mg/m ³	8140
MTBE	F	3870	50 ppm (8 h) 180 mg/m ³ (8 h)	110
ETBE	F			
Vety	F+	-	-	-
Metaani	F+	-	-	-
Propaani	F+		1100 ppm 2000 mg/m ³	

Merkkien selitys: T+ = erittäin myrkyllinen, T = myrkyllinen, C = syövyttävä, Xn = haitallinen, Xi = ärsyttävä, E = räjähtävä, O = hapettava, F+ = erittäin helposti syttyvä, F = helposti syttyvä, N = ympäristölle vaarallinen, Syöp = syöpää aiheuttava, Mut = perimää vaurioittava, Rep = lisääntymiselle vaarallinen

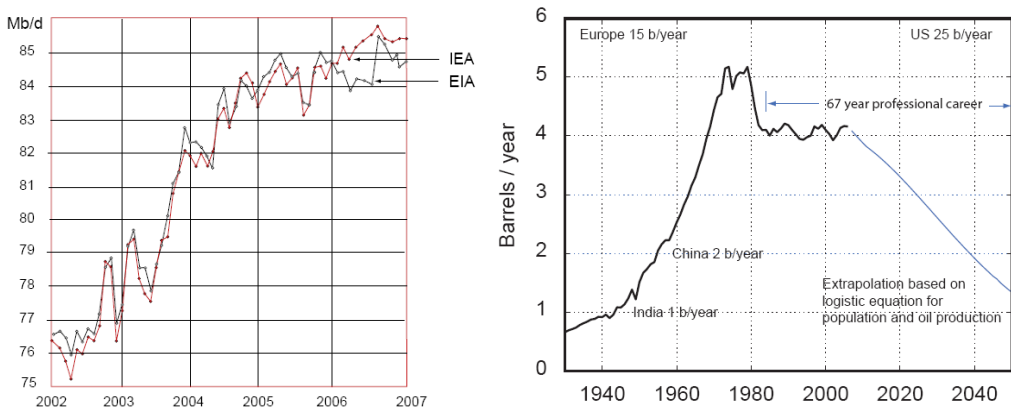
Onnettomuusturvallisuuden kannalta tärkeää ovat polttoaineiden käyttäytyminen törmäys- ja palotilanteissa. Törmäystilanteissa turvallisimpia ovat polttoaineet, joilla on korkein syttymisraja (metanoli paras ja bensiini huonoin taulukossa L6.5) ja jotka ovat keveimpiä (vety paras ja butanoli huonoin taulukossa L6.5), sillä tällöin vuodon tapahtuessa kipinän aiheuttama polttoaineen syttyminen on epätodennäköisintä. Tulipalotilanteissa turvallisimpia ovat puolestaan polttoaineet, joiden itsesyttymislämpötila on korkea (metaani paras ja bensiini huonoin taulukossa L6.5). Vuototilanteissa turvallisimpia ovat vähiten toksiset polttoaineet (bensiini ja diesel huonoimmat, vety ja metaani parhaimmat taulukossa 7.6).

8 RAAKAÖLJYN PUMPPAUSHUIPPU

”Kun maailman vuoriöljyvarastot ovat todennäköisesti rajoitetut, niin on laskettu, että jo ehkä noin 100 vuoden kuluttua alkaa vuoriöljytuotteiden saanto olla lopussa ja jo huomattavasti sitä ennen kiristyy. ... on kuitenkin selvää, että hyvissä ajoin on ryhdyttävä harkitsemaan, mitä juoksevaa polttoainetta vuoriöljytuotteiden sijasta voitaisiin käyttää. Tämän lisäksi on monella kansalla aivan erikoiset syytä voida tarpeen tullen olla riippumaton vuoriöljytuotteista. Nämä syyt ovat taloudellinen ja sotilaallinen it-senäisyys.”

- Yrjö Talvitie kirjansa ”Automobiilien polttoaineet ja kaasuttajat” esipuheessa vuonna 1929 (Talvitie 1930)

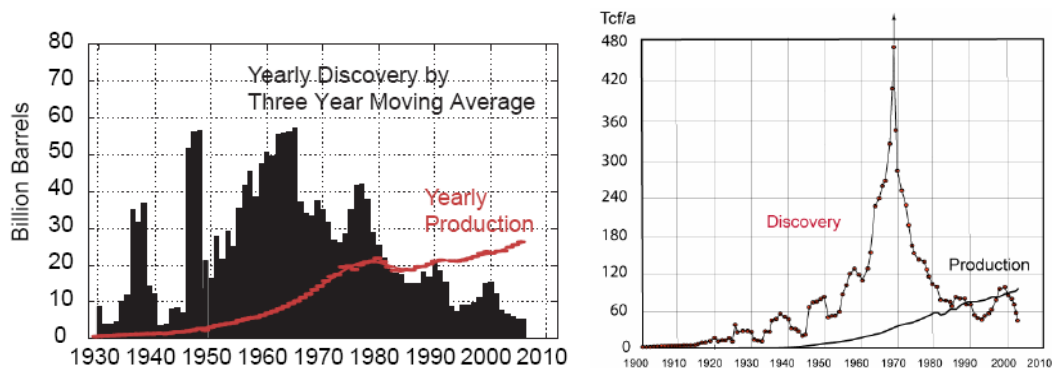
Globaali öljynporauksen huippu (Kuva 8.1a) on ennustettu saavutettavan todennäköisesti korkeintaan 10 vuoden sisällä tai epätodennäköisten uusien öljylöytöjenkin tapauksessa viimeistään 20 vuoden sisällä perustuen samantyyppiseen geologiseen analyysiin kuin Shellin geologi M. King Hubbert käytti vuonna 1956 (Hubbert 1956) ennustessaan oikein USA:n saavuttavan öljypiikin 1970-luvun alussa (Campbell 1997, Campbell & Leherrère 1998, Leherrère 2001, 2003, Deffeyes 2001, Korpela 2004, 2006, Simmons 2005, Hirsch ym. 2005, Tuomela 2005, Hoffrén 2006, ASPO 2009). Tuotantohuipun saavuttaminen tilanteessa, jossa öljyn kysyntä pyrkii kasvamaan, johtaa hintojen voimakkaaseen nousuun erityisesti raakaöljystä riippuvassa liikenteen energiakäytössä, ellei vaihtoehtoisia polttoaineita ole siihen mennessä saatu merkittäviä määriä markkinoille.



Kuva 8.1. Öljyn tuotannon kasvu on pysähtymässä (a) ja per capita -kulutuksen huippu ohitettiin jo 1970-luvulla (b) (Korpela 2007). Lähteet: IEA = OECD:n International Energy Agency, EIA = USA:n energiainisteriön Energy Information Administration.

Oireisiin globaalin öljyntuotantohuipun lähestymisestä lukeutuvat seuraavat havainnot:

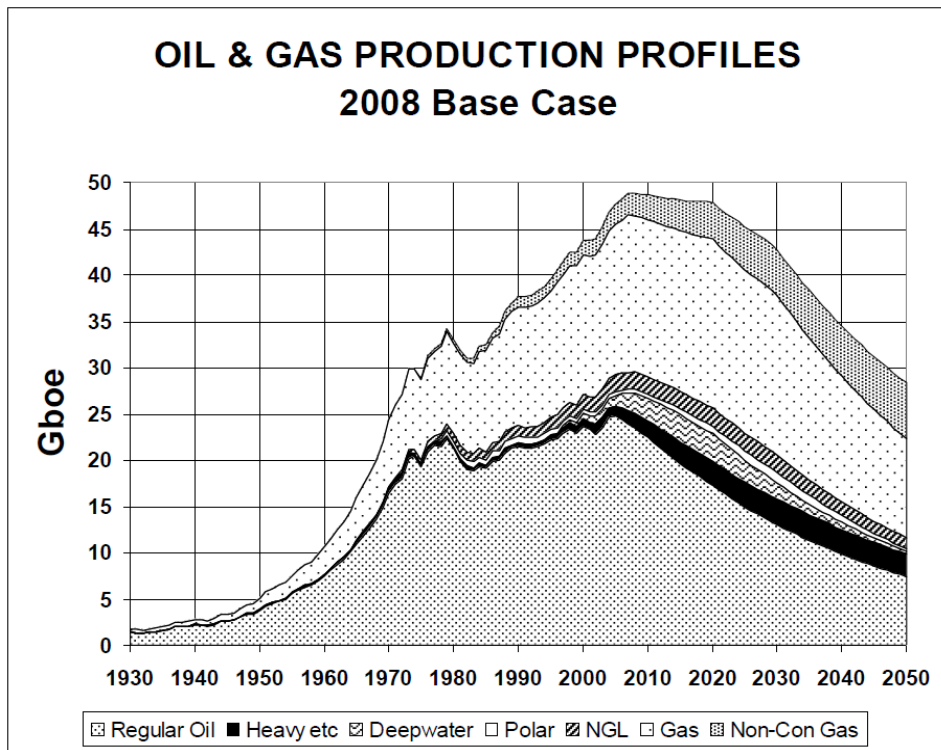
- USA:n lisäksi öljyntuotantohuippu on jo ohitettu Kanadassa, Pohjanmerellä ja seitsemässä Opec-maassa
- Globaali öljynlöytöhuippu tapahtui 1960-luvulla (Kuva 8.2a)
- Suuri öljykenttä löydettiin viimeksi 1970-luvulla
- Globaali öljyntuotanto per capita saavutti huippunsa 1970-luvun lopulla (Kuva 8.1b)
- Tunnettujen resurssien ja kulutuksen välinen suhde (riittävyys nykykäytöllä) saavutti huippunsa 1980-luvun lopulla (BP 2006)
- Öljyn kulutus on ylittänyt uusien öljylöytöjen määrän 1990-luvun alusta alkaen (Kuva 8.2b)



Kuva 8.2. Raakaöljyn (a) ja maakaasun (b) varantojen löydön ja käytön historia (Korpela 2007: kuva a on tehty Campbellin tietokannan ja kuva b Leherrèrin esityksen (2004) pohjalta). Sekä öljy- että maakaasulöytöjen piikki tapahtui 1960-luvulla. Öljyn kulutus on ylittänyt uusien löytöjen määrän 1990-luvun alusta lähtien ja maakaasun kulutus on ylittänyt uusien löytöjen määrän 2000-luvun alusta lähtien. Öljyn yksikkö on miljardeja tynnyreitä vuodessa, kaasun yksikkö tcf/a = trillion cubic feet.

Maakaasun tunnetut globaalit varat ovat samansuuruiset kuin raakaöljyn (UN 2000, IPCC 2001, BP 2006), joten kun oletettavasti sitä tullaan enenevästi käyttämään raakaöljyä korvaavana energianlähteenä, sen tuotantohuippu ajoittuu muutaman vuoden raakaöljyn jälkeen (Leherrère 2004, ASPO 2009, Kuva 8.3). Maakaasun tuotantohuipun läheisyydestä kertovat seuraavat havainnot:

- Maakaasulähteiden löytöhuippu tapahtui 1960-luvun lopulla (Leherrère 2004, Kuva 8.1b)
- Maakaasun tunnettujen resurssien ja kulutuksen välinen suhde (riittävyys nykykäytöllä) saavutti huippunsa 2000-luvun alussa (BP 2006)



Kuva 8.3. Öljyn ja maakaasun tuotantopiikit alaa seuraavan kansainvälisen järjestön Association for the Study of Peak Oil and gas mukaan (ASPO 2009).

9

LIIKENTEEN ENERGIANLÄHTEIDEN TULEVAISUUDEN TIEKARTTA

"I do not believe that the airplane will ever take the place of trains or steamships for the carrying of passengers."

- Orville Wright sanomalehti Dayton Heraldin haastattelussa 2.1.1909
(Crouch 1999)

Luvussa 2 käsiteltiin liikenteen energialähteiden historiallista tiekarttaa ja huomattiin, että on saatu kehitettyä 23 sukupolven verran liikenteen biopolttoaineita sekä suuri määrä teknologioita, joita voidaan käyttää kaikilla muillakin uusiutuville primäärienergian lähteillä. Suurinta osaa näistä olemassa olevista teknologioista on kuitenkin valittu käytettäväksi erittäin vähän. Tulevaisuuden tiekartassa teknologioiden valintoja ei enää ohjaa raakaöljyyn lukkiutunut talous, vaan sitä ohjaavat toisaalta ilmastonmuutos ja muut liikenteen ympäristövaikutukset (Luku 7) sekä toisaalta raakaöljyn pumppaushuippu ja sen aiheuttama raakaöljypohjaisten liikennepolttoaineiden hinnan nousu (Luku 8). Kuten luvussa 4 tuli ilmi, raakaöljy voidaan resurssien puolesta korvata pitkällä tähtäimellä joko muilla fossiililla energialähteillä tai uusiutuville energialähteillä. Luvuissa 3 ja 5 kerrottiin, että teknologisia vaihtoehtoja on olemassa erittäin paljon, valittiinpa kumpi tahansa. Ilmastonmuutoksen kannalta tämä valinta on äärimmäisen tärkeä, sillä siirtyminen muiden fossiilisten energialähteiden käyttöön merkitsisi liikenteen elinkaarikasvihuonekaasupäästöjen kaksinkertaistumista, kun taas uusiutuville energialähteillä elinkaarikasvihuonekaasupäästöt voitaisiin pitkällä tähtäimellä saada lähelle nollaa. Fossiilista vaihtoehtoa ei tässä käsitellä, koska se on pitkällä tähtäimellä poliittisesti mahdoton. Uusiutuvien valinta kohdistuu sellaisiin resursseihin ja teknologioihin, jotka eivät aiheuta ekologisia ja sosiaalisia vahinkoja (Luku 4). Uusiutuvien osalta tulevaisuuden tiekartassa ei ole enää näkyvissä mitään kokonaan uutta teknologiaa, sillä mitään uutta ei tarvita. Ponnistelut niin politiikassa, liike-elämässä kuin tutkimuksessa kohdistuvat tunnettujen teknologioiden tietoiseen käyttöönottoon. Valinnat tieliikenteessä ovat kaikkein keskeisimmät, mutta vastaava muutos kuitenkin tarvitaan lento-, vesi-, raide- ja avaruusliikenteessä sekä liikkuvissa työkonseissa.

Keskeisimmät lähitulevaisuuden kehityspolut ovat energiadiversiteetin ja polttoainejoustavuuden lisääminen kuten General Motors paviljonkinsa sisääntulon yläpuolella Frankfurtin autonäyttelyssä vuonna 2007 julisti (Kuva 9.1).



Kuva 9.1. GM:n Frankfurtin autonäyttelyssä olevan mainoksen mukaan autotekniikan tulevaisuus on energialähteiden suuren diversiteetin hyväksikäytössä. [2007]

Paljon nykyistä useampia primäärienergian lähteitä tulee käyttöön ja niistä valmistetaan nykyistä monimuotoisemmin erilaisia polttoaineita tai muita liikenteen voimanlähteitä. Ajoneuvot ovat nykyistä älykkäämpiä eli pystyvät hyödyntämään monia polttoaineita monilla teknisillä ratkaisuilla, joihin polttoainejoustavuutta käsittelevässä luvussa 6 tutustuttiin. Huoltoasemien tuotevalikoima kehittyy nykyisestä olennaisesti, kuten monilla Suomen ulkopuolisilla huoltoasemilla on jo nähtävissä (Kuva 9.2). Teknologinen diversiteetti on oleellisen tärkeää niin ajoneuvoissa kuin polttoaineissakin. Kaikille polttoainejoustavuuden mahdollistaville teknologioille on tilaa samoin kuin UE-monofuel-teknologioille.

Pitemmällä tähtäimellä siirrytään rajoitettujen bioresurssien käytöstä valtaosin suuren resurssin uusiutuviin kuten aurinko- ja tuulienergiaan, joiden avulla myös vältetään bioresurssien huonosti suunnitellun käytön ekologiset ja sosiaaliset haitat. Biojäte samoin kuin hukka-alueilla ilman ekologisia ja sosiaalisia haittoja kasvatetut energiakasvit ovat pitkälläkin tähtäimellä tiekartan oleellisia osia. Volkswagen esittelee fossiilisista bioresurssien kautta aurinkoenergian ja tuulienergian käyttöön johtavaa liikenteen energialähteiden kehityspolkua tehtaillaan Wolfsburgissa (Kuva 9.3). VTT:n (2001) vuoteen 2030 ulottuvassa teknologiaskenaariotarkastelussa polttokennoautojen oletetaan nousevan markkinajohtajaksi 2020-luvulla ja yli 70 %:n osuuteen vuonna 2030. Normaalin sarjavalmistuksen oletetaan alkavan vuoden 2010 jälkeen. USA:ssa on arvioitu, että polttokennoautojen hinnan putoaminen polttomoottoriautojen tasolle edellyttää vähintään 100.000:n vuosituotantoa, joka voitaisiin saavuttaa vuosien 2015 ja 2020 välissä (Sperling & Cannon 2004). Ensi vaiheessa vedyn käyttöön soveltuvat parhaiten paikallisliikenteen linja-autot, jotka tankataan keskitetysti sekä muut kaupunkiliikenteeseen sidotut ajoneuvot. Yksityisautoilua palveleva vedyntuotanto- ja jakeluinfrastruktuuri tulevat tämän jälkeen.



Kuva 9.2. Huoltoasema moottoritien varrella Lahrissa Saksassa myy tavanomaisten fossiilisten polttoaineiden lisäksi etanolia, metaania, biodieseliä, kasviöljyä ja nestekaasua. [2007]

Vetytaloudessa vetykaasu ei ole ainoa energian välittäjä, vaan myös monet vetyä sisältävät yhdisteet kuten metaani ja metanoli (Olah ym. 2005). Vaikka vety nykyään tuotetaan pääasiassa fossiilisilla energialähteillä, tulevaisuuden vetytaloudessa niin ei tehdä, vaan tuotanto perustuu uusiutuviin energialähteisiin ja niiden sisällä valtaosin keskeytyviin uusiutuviin eli aurinko-, tuuli-, aalto- ja vuorovesivoimaan. Suuri ero nestemäisten fossiilisten polttoaineiden ja vedyn käytössä on myös se, että vedyn valmistaminen voidaan tehdä paikallisesti, jopa omakotitalokohtaisesti. Tämä luo paikallisten pientenkin energiayhtiöiden liiketoiminnalle uusia mahdollisuuksia ja ulottaa toiminnan sähkön ja lämmön tuotannosta liikennepolttoaineiden tuotantoon. Myös biojätteitä tuottava teollisuus ja maatalous saavat liikennepolttoaineista laajennuksia tuotevalikoimiinsa.

Biomassaa hyödyntävien UE -vetyteknologioiden yhteenlaskettu pitkän tähtäimen kestävä tekninen potentiaali on korkeintaan kymmeniä prosentteja (15–50 %) ihmiskunnan energiankulutuksesta, koska globaali fotosynteesituotanto on vain nelinkertainen ihmiskunnan nykyiseen energiankulutukseen verrattuna (UN 2000). Sen sijaan aurinkoenergiaan ja veteen sekä tuuli- ja aaltovoimaan perustuvilla tuotantotavoilla voitaisiin periaatteessa kullakin erikseenkin kattaa ihmiskunnan energiantarve kaikissa kuviteltavissa olevissa energiankulutuksen kasvuskenarioissa (UN 2000). Aurinkoenergiaan ja veteen perustuvat tuotantotavat, siis elektrolyyttiset, fotobiologiset ja veden fotokemialliset ja lämpökemialliset hajottamismenetelmät, tarjoavat kukin ihmiskunnan energiankulutusta suuremman pitkän tähtäimen teknisen potentiaalil ilman vaikutusta maapallon ener-



Kuva 9.3. VW:n Autostadtissa Wolfsburgissa esitetään VW:n näkemys autopolttoaineiden kehityksestä. Se kulkee nykyisistä fossiilipolttoaineista biopolttoaineiden kautta UE-vetyyn. [2007]

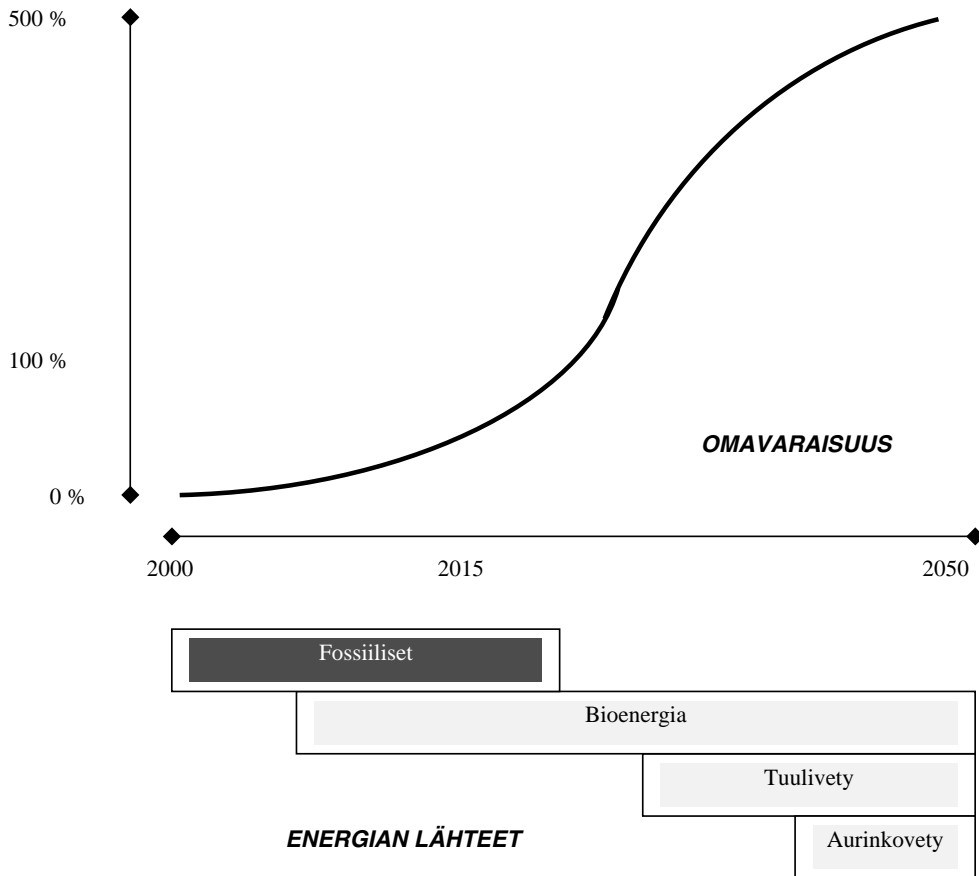
giataseeseen. Siis niillä kaikilla teknologioilla erikseenkin voitaisiin kattaa ihmiskunnan energiantarve 100 %:sti kaikissa kuviteltavissa olevissa energiankulutuksen kasvuskenaarioissa (Taulukko 9.1). Samaan päästään elektrolyysiä hyödyntämällä myös muilla UE-voiman muodoilla, siis ilman suoraa aurinkoenergiaa, johtuen muiden muassa tuuli- ja aaltovoiman erittäin suuresta potentiaalista (WEA 2000).

Taulukko 9.1. UE-vedyn pitkän tähtäimen globaali tuotantopotentiaali (UN 2000, Lampinen 2003).

Teknologia	Potentiaali ihmiskunnan primäärienergian kulutuksesta
Aurinkoenergiaa ja vettä hyödyntävät teknologiat	>> 100%
Tuulivoima, vesivoima, aaltovoima, vuorovesivoima ja geoterminen voima yhteensä veden elektrolyysin kautta	> 100%
Bioenergiateknologiat biologisia vetyresursseja hyödyntäen	15–50%
Nopeasti hajoavien biojätteiden mädätys (osa bioenergiaa)	1–2%

Tiekartta siis seuraa samanlaista polkua kuin Suomen maatalojen liikenne-energian tuotannolle laadittu tiekartta (Lampinen & Jokinen 2006) eli lyhyellä tähtämellä fossiilisista energiamuodoista siirrytään bioresurssien käyttöön ja pitkällä tähtämellä muut

uusiutuvat, kuten aurinko- ja tuulienergia, tulevat dominoimaan (Kuva 9.4). Silti osa bioenergiaresurssista, erityisesti biojäteperäiset, jäävät merkittävään rooliin pitkälläkin tähtäimellä.



Kuva 9.4. Liikenne- ja työkonepolttoaineiden tiekartta Suomen maataloilla 2000–2050: Keskimääräinen moottoripolttoaineomavaraisuus ja niiden valmistamisen käytetyt energialähteet Suomen maataloilla ja maatalojen resurssilla keskitetyissä laitoksissa vuoteen 2050 asti. Moottoripolttoaineiden kokonaistuotanto vuonna 2050 on 100 PJ. (Lampinen & Jokinen 2006)

Ajoneuvot kehittyvät tiekartassa paitsi älykkäämmiksi uusiutuvien energian käyttäjinä, myös älykkäämmiksi energian tehokkaammassa käytössä. Enää ei mainosteta muiden autoja kevyiksi, kuten Ford on muutaman vuoden ajan tehnyt (Kuva 9.5), vaan omia autoja mainostetaan kevyiksi, koska se on tärkein energiatehokkuutta parantava ominaisuus. Lisäksi voidaan hyödyntää muitakin ratkaisuja, kuten hybriditeknologioita.



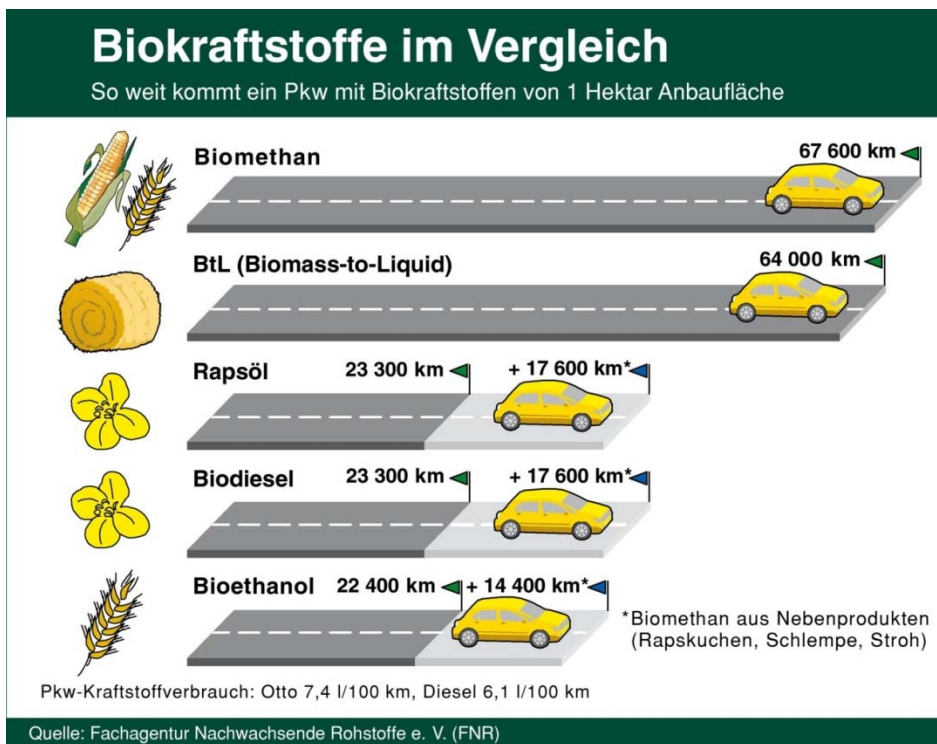
Kuva 9.5. Ford mainostaa Frankfurtin autonäyttelyssä (kuten Suomen TV:ssä), että muut autot ovat niin kevyitä, että ne nousevat ilmapalloilla. Tulevaisuudessa mainostus muuttuu käänteiseksi. [2007]

Itse ajoneuvojen lisäksi liikenteen infrastruktuuria kehitetään energiatehokkaammaksi mm. korvaamalla liikennettä viestiliikenteellä ja saattamalla joukkoliikenne nykyistä houkuttelevammaksi. Erinomainen esimerkki jälkimmäisestä on Curitiba kaupunki Brasiliassa (Weizsäcker ym. 1997). Yksityisautoilua saatiin olennaisesti vähennettyä, ruuhkat poistettua ja kaupunki-ilmaa puhdistettua eristämällä merkittävä osa kaistoista katukivillä vain bussien käyttöön (Kuva 9.6). Koska muilla autoilla ei koskaan pääsyä bussikaistoille, bussien aikataulut ja palvelut saatiin pitämään kuten metroissa. Bussit ja muu joukkoliikenne luonnollisesti kulkee tulevaisuuden tiekartalla vain uusiutuvalla energialla aivan kuten henkilökohtainenkin liikenne. Curitiba tapauksessa polttoainena on etanoli. Ruuhkamaksut, tietullit ja autottomat keskustat ovat muita hyviä esimerkkejä joukkoliikenteen houkuttelevuuden parantamisesta.



Kuva 9.6. Curitiba Brasiliassa busseille on varattu omat katukiveyksiin erotetut kaistat, joihin muilla ajoneuvoilla ei ole pääsyä. Tässä ns. pintametrojärjestelmässä liikennöivät erikoispitkät Volvon etanolikäyttöiset korkealattiabussit, jotka ottavat matkustajia metroaseman tapaisilta laitureilta. [2000]

Energiätehokkuus on ajoneuvojen ja liikennejärjestelmien lisäksi myös liikennebiopolttoaineiden tuotantoprosesseja valittaessa olennainen tekijä. Vaikka teknologinen diversiteetti on itseisarvoisesti tärkeää eli kaikkia ekologisesti ja sosiaalisesti kestäviä teknologioita tulee käyttää, energiätehokkuus kuuluu niiden välisen painotuksen motivaatioihin. Esimerkiksi energiakasveja viljeltäessä maa-alan käyttö optimoituu biometania tuotettaessa, kuten Saksassa (Kuva 9.7) ja Ruotsissa (Kuva 5.20) tehdyissä vertailututkimuksissa on osoitettu. Vastaavasti biojätettä käytettäessä biokaasun tuotanto on energiätehokäintä. Selvästi korkeampiin tuotannon energiätehokkuuksiin päästään aurinko-, tuuli-, aalto-, vesi- ja vuorovesisähköllä, mutta ei biosähköllä. Elinkaaripäästöt ovat kuitenkin energiätehokkuutta tärkeämpi tuotantomenetelmien painotustekijä eli ristiriitatilanteessa alemmat päästöt ohittavat korkeamman energiätehokkuuden (Luku 7.2).



Kuva 9.7. Hehtaarikohtainen energiakasveilla saatavissa oleva henkilöautokilometrimäärä eri teknologioilla Saksan maatalousministerön alaisen FNR:n selvityksessä (FNR 2008).

Tiekartan päässä on lopputuloksena tilanne, jonka Tea Mäkipää on taiteellisesti kuvannut vuoden 2007 teoksessaan ”Motocalypse Now” (Kuva 9.8).



Kuva 9.8. Taiteilija Tea Mäkipään teos ”Motocalypse Now” vuodelta 2007 taidemuseo Retretissä Punkaharjulla. Auton konepellin päällä oleva laatta on erillisessä kuvassa oikealla. [2007]

LÄHTEET

- Aarnio K (1987) Traktori. Teoksessa Näri O (toim.) Koneellistuva maataloutemme – 85 vuotta maatalouskoneiden tarkastus- ja koetustoimintaa. Vakola, 74–105.
- Aatelo M (toim.) (1995) Lähteiltä tuotteiksi – Öljyn tie. Kemianteollisuus ry, Taloudellinen tiedotustoimisto, Suomen muoviteollisuusliitto ja Öljyalan keskusliitto; Tampere, 1995, 159s.
- ACCEPT (2003) Ammonia Cracking for Clean Electric Power Technology. EU Energy research program project presentation, FUERO project cluster workshop, Paris 12 October 2003, 34p.
<http://www.ika.rwth-aachen.de/fuero/temp/3rdws/accept_presentation.pdf>
- AD-Nett (2000) Anaerobic digestion: Making energy and solving modern waste problems. Ørtenblad H (ed), The European Anaerobic Digestion Network (AD-Nett), Herning municipal utilities, Denmark, 195p.
- Agarwal AK (2007) Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 33: 233–271.
- Agbossou K, Kolhe M, Hamelin J & Bose TK (2003) Integrated stand-alone renewable energy system based on energy storage in the form of hydrogen. *IEEE Canadian Review*, Summer 2003, 17–20.
- Ahokas J (1987) Energia, polttoaine ja lämmitys. Teoksessa Näri O (toim.) Koneellistuva maataloutemme – 85 vuotta maatalouskoneiden tarkastus- ja koetustoimintaa. Vakola, 62–73.
- Airas VV (1919) Kotimaisista polttoaineista polttomoottoreissa. *Teknillinen Aikakauslehti*, 9:228–232.
- Airas VV (1935) Polttomoottorit. Teoksessa: Saraoja (1935), 443–694.
- Alakangas E (2000) Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 189s.
- Alanko L (1950) Metanoliteollisuus. Teoksessa: Metsäteknologia – oppi- ja käsikirja. Yksityismetsänhoitajyhdistyksen oppikirjasarja N:o 3, Keskusmetsäseura Tapio, Helsinki, 317–318.
- Alcantara R, Amores J, Canoira L, Fidalgo E, Franco MJ & Navarro A (2000) Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow. *Biomass & Bioenergy* 18: 515–527.
- Anderson GQA, Haskins L & Nelson SH (2004) The effect of bioenergy crops on farmland birds in the United Kingdom: A review of current knowledge and future predictions. In: *Biomass and Agriculture - Sustainability, markets and policies*, OECD, Paris, 199–218.
- Anderson J & Anderson CD (2005) *Electric and Hybrid Cars – A History*. McFarland & Company, Jefferson, NC, USA, 189p.
- Angelucci E & Bellucci A (1974) *Le Automobili*. Arnoldo Mondadori Editore, Milan, Italia. English translation (1976) *The Automobile from Steam to Gasoline*. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 278p.
- Arpiainen V, Kytö M, Asplund D & Äijälä M (1982) Metsäenergian käyttö ja jalostus – Osa 7. Pyrolyysiöljyn ja puuhiilen tuotantomahdollisuus metsätähteestä Suomessa. Tutkimuksia 119, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 55s.
- ASME (1984) St. Charles Avenue Streetcar Line, 1835. National historic mechanical engineering landmark, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA, 8p.
<<http://files.asme.org/ASMEORG/Communities/History/Landmarks/3106.pdf>>

- ASME (1989) Coal-Fueled Diesel Engines. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA, 80p.
- ASPO (2009) ASPO Newsletter No. 100, April 2009, Association for the study of Peak Oil & Gas. <<http://www.peakoil.net/>>
- ASS (1942) Styrelse och revisionsberättelser för år 1942 samt årsredogörelse med statistiska uppgifter. Aktieföretaget Stockholms Spårvagnar.
- Bain A (2004) The Freedom Element: Living with Hydrogen. Blue Note Books, Cocoa beach, FL, USA, 302p.
- Bajay SV, de Carvalho EB & Ferreira AL (2000) Energy from biomass in Brazil. In: Rosillo-Calle F, Bajay SV & Rothman H (eds.) Industrial uses of biomass energy – The example of Brazil. Taylor & Francis, London, UK, 27–52.
- Balfour H (1907) The Firepiston. In: Anthropological Essays Presented to Edward Burnett Tylor in Honour of His 75th Birthday Oct. 2 1907, Clarendon Press, Oxford, 16–53.
<<http://www.firepiston.net/balfour/balfour.html>>
- Barrow K (2007) French smash world speed record – Train reaches 574.8 km/h on TGV Est. International Railway Journal 12(5)4–6.
- Bata RM (ed.) (1995) Alternate Fuels – A Decade of Success and Promise. SAE PT-48, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 726p.
- Batchelor J & Chant C (2006) The Complete Encyclopedia of Sailing Ships 2000 BC – 2006 AD. Rebo publishers, UK, 318p.
- Bechtold RL (1997) Alternate Fuels Guidebook – Properties, Storage, Dispensing and Vehicle Facility Modifications. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 204p.
- Beckman C-G (2006) Forest-Based Sector Technology Platform – FTP. European Conference on Biorefinery Research, Helsinki, 19–20 October.
- Belfiore M (2007) Europe's tourist rocket. Popular Science October 271(4)40–43.
- BENET (2002) Wood fuels basic information pack. BENET (Bioenergy network), Energi Dalen & Jyväskylän Polytekninen, Gummerus, Saarijärvi, 191p.
- BENET (2003) Puuenergia. BENET-bioenergiaverkosto ja Jyväskylän teknologiakeskus, Jyväskylä, 115s.
- Benter MM, Gilmour IA & Arnoux L (1997) Biomass-oil slurry fuels: An investigation into their preparation and formulation. Biomass & Bioenergy 12: 253–261.
- Berndes G, Azar C, Käbberger T & Abrahamson D (2001) The feasibility of large-scale lignocellulose-based bioenergy production. Biomass & Bioenergy 20:371–383.
- Bernhardt W, König A & Lee W (1976) Der Einsatz von Methanol-Benzin-Gemischen und Reinmethanol in Personkraftwagen. Mineralöltechnik 21:6, 22s. (Viitattu: Solantausta & Asplund 1980)
- Bezzon G & Rocha JD (2000) Pyrolysis. In: Rosillo-Calle et al. (eds.), 238–247.
- Bio-SNG (2009) EU:n 6. tutkimuksen puiteohjelman Bio-SNG-projektin sivut, <http://www.ie-leipzig.de/Energetik/Bio-SNG/Index.htm> (6.7.)
- Bird A (1967) Vanhoja autoja. Tekniikan maailma, Helsinki, 168s.
- Bisio A & Boots S (eds.) (1997) The Wiley Encyclopedia of Energy and the Environment. Vol. 1–2, Wiley, New York, NY, USA, 1562p.
- Black E (2006) Internal Combustion – How corporations and governments addicted the world to oil and derailed the alternatives. St. Martin's Press, New York, NY, USA, 408p.
- Blomberg O (2006) Suomalaista Sisua vuodesta 1931. Oy Sisu Auto Ab, Karjaa; Gummeruksen kirjapaino, Jyväskylä, 454s.

- BMW (1920) B.M.W. laivamoottorien laivaanasetus- ja hoito-ohjeet. Porin konepaja Oy, Pori, 28s.
- Boijer R (1935) ote kapt R. Boijerin kirjoituksesta Sotilasaikakauslehdessä (Mäkipirtti 2006, 75).
- Bolonkin A (2006) Non-Rocket Space Launch and Flight. Elsevier, Oxford, UK, 488p.
- Bomb C, McCormick K, Deurwaarder E & Käberger T (2007) Biofuels for transport in Europe: Lessons from Germany and the UK. *Energy Policy* 35: 2256–2267.
- Bonsdorff V (1907) Kemiallinen teollisuus. Teoksessa: Peltonen W (toim.) Keksintöjen kirja, I Osa, WSOY, Porvoo, 392-446.
- Boschert S (2006) Plug-in Hybrids. New Society Publishers, Gabriola Island, BC, Canada, 231p.
- Boucher ME, Chaala A & Roy C (2000) Bio-oils obtained by vacuum pyrolysis of softwood bark as a liquid fuel for gas turbines. Part I: Properties of bio-oil and its blends with methanol and a pyrolytic aqueous phase. *Biomass & Bioenergy* 19:337–350.
- Bournay L, Casanave D, Delfort B, Hillion G & Chodorge JA (2005) New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced at biodiesel plants. *Catalysis Today* 106:190–192.
- Boyle G, Everett B & Ramage J (eds.) (2003) *Energy Systems and Sustainability – Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press, UK, 619p.
- BP (2006) BP Statistical review of world energy, June 2006. BP, London, 45p. <<http://www.bp.com/statisticalreview>>
- von Braun W (1967) *Space frontier*. Holt, Rinehart & Winston, USA. Suom. (Jotuni P) Avaruusrintama. WSOY, Porvoo, 1970, 394+28 s.
- Bridgwater AV & Grassi G (eds.) (1991) *Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization*. Elsevier, Essex, UK, 377p.
- Bridgwater AV & Hogan EN (eds.) (1996) *Bio-oil Production and Utilization*. Proceedings of the 2nd EU-Canada Workshop on Thermal Biomass Processing. CPL Press, Berkshire, UK, 266p.
- Bridgwater A, Toft A & Brammer J (2002) A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 6(3)181–246.
- Brown LR (1980) *Food or Fuel: New Competition for the World's Cropland*. Worldwatch Paper 35, Worldwatch Institute, Washington, DC, USA, 43p.
- Brown RC (2003) *Biorenewable resources: engineering new products from agriculture*. Blackwell Publishing Company, Iowa, USA, 286p.
- Brumm (2007) *Brummin myyntituoteluettelo*, <http://www.brumm.it/HTML/nw6x6-i.htm>
- Bussard RW (1960) *Galactic Matter and Interstellar Flight*. *Astronautica Acta* 6:179–194.
- Calvin M (1979) *Petroleum plants for fuel and materials*. *Bioscience* 29: 553-558.
- Campbell CJ (1997) *The Coming Oil Crises*. Multi-Science Publishing Company & Petroconsultants, Brentwood, UK, 210p.
- Campbell CL & Laherrère JH (1998) *The End of Cheap Oil*. *Scientific American*, March, 60-65.
- Carter D, Darby D, Hallé J & Hunt P (2005) *How to make biodiesel*. Low-Impact Living Initiative, Bucks, UK, 121p.

- Caselotti P, Conchetto A & Tavner PJ (2000) High Efficiency Motors – Performance, Economy & Reliability, by Optimisation. In: Bertoldi P, Almeida AT de & Falkner H (eds.) *Energy Efficiency Improvements in Electronic Motors and Drives*. Springer, Berlin, Germany, 95–101.
- Cash JD & Cash MG (1942) *Producer Gas for Motor Vehicles*. Angus and Robertson Ltd., Sydney, Australia, 194p. Reprint by Lindsey Publications, Bradley, IL, USA, 1997.
- CAT (2007) Centre for Alternative Technology, <http://www.cat.org.uk/> (17.7.)
- Cheng S, Xing D, Call DF & Logan BE (2009) Direct Biological Conversion of Electrical Current into Methane by Electromethanogenesis. *Environ. Sci. Technol.* 43:3953–3958.
- Cheng W-H & Kung HH (eds.) (1994) *Methanol production and use*. Marcel Dekker, New York, NY, USA, 326p.
- Chisti Y (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, in press, 13p.
- Chornet E, Wang D, Montané D & Czernik S (1996) Hydrogen production by fast pyrolysis of biomass and catalytic steam reforming of pyrolysis oil. In: Bridgewater & Hogan (eds.), 246–262.
- Christeller R (2007) Flywheel technology helps reduce costs. *Public Transport International* No 3, May/June.
- Cleveland CJ (ed. in chief) (2004) *Encyclopedia of Energy*. Vol. 1-6, Elsevier, Amsterdam, NL, 5376p.
- Clymer F (1953) *Those wonderful old automobiles*. Bonanza books, New York, NY, USA, 214p.
- Cohen AD & Stack EM (1997) Peat: Environmental and energy uses. In: Bisio & Boots, 1242–1255.
- CONCAWE (1987) *An investigation into evaporative hydrocarbon emissions from European vehicles*. Report 87/60, The Hague, NL, 87p.
- Cooke R (1982) Oil doesn't grow on trees – but it might one day. *The Boston Globe*, September 21.
- Crawford E (1996) *Arrhenius – From Ionic Theory to the Greenhouse Effect*. Science History Publications, Canton, MA, USA, 320p.
- Crookes RJ, Kiannejad F & Nazha MAA (1997) Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels. *Energy Conversion and Management* 38:1785–1795.
- Crouch TD (1999) *Aiming for the stars – The dreamers and doers of the space age*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, USA, 338p.
- Cvengroš J & Považanec F (1996) Production and treatment of rapeseed oil methyl esters as alternative fuels for diesel engines. *Bioresource Technology* 55:145–152.
- Dagle RA, Wang Y, Zia G-G, Strohm JJ, Holladay J & Palo DR (2007) Selective CO methanation catalysts for fuel processing applications. *Applied Catalysis A* 326:213–218.
- Dale R (1994) *Early Cars*. The British Library, London, UK, 64p.
- Darley J (2004) *High noon for natural gas – The new energy crisis*. Chelsea Green, White River Junction, VT, USA, 266p.
- Davies P (2004) *Sasolin toimitusjohtajan esitelmä Howard Weil Energy Conference:ssa*, http://www.sasol.com/sasol_internet/downloads/HWC_20010404_1089876828459.pdf.
- Davis D (2002) *When Smoke Ran Like Water – Tales of environmental deception and the battle against pollution*. Basic Books, New York, NY, USA, 316p.

- DeCicco J & Kliesch J (2002) ACEE's Green Book – The environmental guide to cars & trucks – Model year 2002. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC, USA, 151p.
- Decker J (2009) Blooming biofuel – How algae could provide the solution. Renewable energy world, May-June, 71–79.
- Deffeyes KS (2001) Hubbert's Peak – The Impending World Oil Shortage. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 208p.
- Dingell C, Johns WA & Kramer White J (2007) To the moon and beyond. Scientific American 297(4)36–42 (October).
- DOD (2000) Protecting National Security and the Environment. U.S. Department of Defense: Climate Change, Energy Efficiency, and Ozone Protection. Office of the Deputy Under Secretary of Defense (Environmental Security), November, Washington, DC, USA, 10p.
- DOE (2004) Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technology programme. US Department of Energy/Energy Efficiency and Renewable Energy, <www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells>.
- DOE (2007). Biomass program. US Department of Energy/Energy Efficiency and Renewable Energy, <http://www.eere.energy.gov/biomass>. (4.7.).
- Domann F (1950) Das Wälzgasverfahren bei atmosphärischen und höheren Druck. Das Gas- und Wasserfach 91:161–164. Viitattu teoksessa: Filén ym. 1984.
- Doxon LE (2001) The Alcohol Fuel Handbook. Infinity Publishing.com, Haverford, PA, USA, 127p.
- Doyle J (2000) Taken for a ride – Detroit's big three and the politics of pollution. Four Walls Eight Windows, New York, NY, USA, 561p.
- Drane KB (1980) Convert your car to alcohol. Marathon international book company, Madison, IN, USA, 60p.
- Drapcho CM, N Phu Nhuan & Walker TH (2008a) Biofuels Engineering Process Technology. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 371p.
- Drapcho CM, N Phu Nhuan & Walker TH (2008b) Microbial Fuel Cells. In: Drapcho ym. 2008a, 303–327.
- Dresden (2007) Gasstraßenbahn. Dresdner Stadtteile, http://www.dresdner-stadtteile.de/Neustadt/Leipziger_Vorstadt/Grossenhainer_Strasse/Gasstrassenbahn/gasstrassenbahn.html
- Durán A, Monteagudo JM, Armas O & Hernández JJ (2006) Scrubbing effect on diesel particulate matter from transesterified waste oils blends. Fuel 85:923–928.
- Ebbinghaus A & Wiesen P (2001) Aircraft fuels and their effect upon engine emissions. Air & Space Europe 3(1–2)101–103.
- Ecofys (2005) Biofuels for transportation: New business opportunities. Greenprices Publishing, Ecofys BV, Utrecht, The Netherlands.
- EEA (2001) Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000. Environmental issue report No 22, European Environment Agency, Copenhagen, 210p. <http://reports.eea.europa.eu/environmental_issue_report_2001_22/en>
- EEA (2007) Size, structure and distribution of transport subsidies in Europe. EEA Technical Report No 3/2007, European Environment Agency, Copenhagen, 36p. <www.eea.eu.int>
- EEA (2008) Annual European Community greenhouse gas inventory 1990–2006 and inventory report 2008. Submission to the UNFCCC Secretariat. Version 26 May 2008. Technical Report 6/2008. European Environment Agency, Copenhagen, 587p. <www.eea.eu.int>

- Ekblom T, Lindblom M, Berglin N & Ahlvik P (2003) Technical and commercial feasibility study of black liquor gasification with methanol/DME production as motor fuels for automotive uses – BLGMF. EU/Altener II project final report. Nykomb, Stockholm, Sweden, 263p. <<http://www.nykomb.se>>
- Embraer (2004) Ethanol-fueled Ipanema certified by the CTA. Embraer News release, October 19, São José dos Campos, Brazil, 2p.
- Eonsuu T, Honkanen P, Kilpinen T & Pöhlö E (1975) Suomen veturit, 1. osa: Valtionrautateiden höyryveturit. Frank Stenvalls Förlag, Malmö, Ruotsi, 176s.
- Eriksson J-T, Keskinen R, Kurki-Suonio I, Myllyntaus T, Simola O & Valanto J (1991) Energiatekniikan tilastoja. Luku 9 julkaisuun Suomen energiategniikan historia. Raportti 37, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Hydraulikka / Tekniikan historia, Tampere, 106s.
- Estil L (2005) Biodiesel power – The passion, the people, and the politics of the next renewable fuel. New Society Publishers, Gabriola Island, BC, Canada, 272p.
- EurObserv'ER (2009) Biofuels barometer. Systèmes solaires – le journal des énergies renouvelables, No 192 (July 2009), 54–77. <<http://www.eurobserv-er.org/pdf/baro192.pdf>>
- Express/DR (2005) Bensaa suonissa – ja lyijyä. TV-dokumentti, Globaalit ympäristöongelmat, osa 4, Ylen avoin yliopisto, syksy 2005, tuotanto Express/DK, Tanska, 30 min.
- EY (2003) Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/30/EY, annettu 8 päivänä toukokuuta 2003, liikenteen biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämiseksi. Euroopan unionin virallinen lehti L 123 (17.5.), 42–46.
- Fabbri D, Bevoni V, Notari M & Rivetti F (2007) Properties of a potential biofuel obtained from soybean oil by transmethylation with dimethyl carbonate. Fuel 86:690–697.
- Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, O'Hare M & Kammen DM (2006) Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science 311:506–508 and supporting online material (23p).
- Feibelman PJ & Stumpf R (2006) On "Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy – A Study of Issues Related to the Use of Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage". Comments submitted to the U. S. Department of Energy Hydrogen Program, Sandia National Laboratories, http://www.sandia.gov/surface_science/pjf/On_NH3_roles_in_H2_economy.pdf
- Fessenden RJ & Fessenden JS (1986) Organic Chemistry, 3rd ed. Brooks/Cole Publishing Company, Monterey, CA, USA, 1129p.
- Filén H, Jantunen M & Salo K (1984) Kotimaisten polttoaineiden kaasutus, Osa 1, Vas-tavirtakaasutus. Tutkimuksia 250, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 64s.
- Finkelstein T & Organ AJ (2001) Air Engines: The History, Science, and Reality of the Perfect Engine, Professional Engineering Publishing, UK, 262p.
- Fisker (2009) Fisker Karman sivut, Fisker Automotive, <http://karma.fiskerautomotive.com/>
- FNR (2008) Biokraftstoffe – Basisdaten Deutschland. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 14s. <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_174-basisdaten_biokraftstoff-freigabe.pdf>

- Forsman WV (1909) Höyrykoneoppi alempia koneenkäyttäjä- sekä lämmittäjäkursseja varten. Toinen painos, Otava, Helsinki, 175s.
- Forsman WV & Saraoja E (1917) Höyrykoneoppi. Kolmas, kokonaan uusittu painos, Otava, Helsinki, 327s.
- Freese B (2003) Coal – A Human History. Penguin edition 2004, London, UK, 304p.
- Friedman HM & Friedman AK (2006) Shot into the air. *Invention & Technology Magazine*, 21, no. 4 (Spring 2006).
- Friedrich R & Bickel P (eds.) (2001) *Environmental External Costs of Transport*. Springer, Heidelberg, Germany, 326p.
- G8 (2001) G8 Renewable Energy Task Force Report. Clini C & Moody-Stuart M (eds.), Italian Ministry of Environment, 61+75p.
- Gatland K (1967) *The pocket encyclopedia of spaceflight in colour – Manned spaceflight*. Blandford press, London, UK. Suom. (Ahlbäck S) *Avaruuslennot*. Otava, Helsinki, 1968, 261 s.
- Gatland K (1989) *The illustrated encyclopedia of space technology*. Salamander books, Kent, UK, 306p.
- GB (2006a) En mil på en halv tesked bensin. *Gröna bilister, Trafik & miljö* 13(2)22.
- GB (2006b) Hybrid + gas = Sant. Toyota Prius CNG tested. *Gröna bilister, Trafik & miljö* 13(3)13.
- Georgano N (1985) *Auto 1880–1920-luvulla*. Gummerus, Jyväskylä, 231s.
- Gevert B (1987) *Upgrading of directly liquefied biomass to transportation fuels*. Department of Engineering Chemistry I, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 163p.
- Gevert BS, Otterstedt J-E & Massoth FE (1987) Kinetics of the HDO of methyl-substituted phenols. *Applied Catalysis* 31:119–131.
- Gipe P (1995) *Wind Energy Comes of Age*. Wiley, New York, NY, USA, 536p.
- Goldemberg J, Monaco LC & Macedo IC (1993) The Brazilian Fuel-alcohol Program. In: Johansson et al (1993), 841–863.
- Goldmann M (2006) Hybrid + gas = Sant. Toyota Prius CNG tested. *Trafik & Miljö* 3/06, 13.
- Goldman M (2009) Sāja och köpa gasbil – en vägledning. *Gröna bilister, Uppsala, Sverige*, 79s.
- Goldsmith DJ (1922) *A Practical Handbook on the Distillation of Alcohol from Farm Products – including the processes of malting, mashing and mascerating, fermenting and distilling alcohol from grain, beets, potatoes, molasses, etc. with chapters on alcoholometry and the de-naturing of alcohol for use in farm engines, automobiles, launch motors, and in heating and lighting, with a synopsis of the new free alcohol law and its amendment and the government regulations*. Reprint edition 2001, Fredonia books, Amsterdam, The Netherlands, 121p.
- Gosselink JW (2002) Pathways to a more sustainable production of energy: sustainable hydrogen – a research objective for Shell. *Int. J. Hydrogen Energy* 27:1125–1129.
- Granath J (2005) Vetyautolla on vauhti päällä. *Kemia* 32(8)6-8. <http://www.kemia-lehti.fi/pdf/Kemia_2005_8_6_8%20Vetyauto.pdf>
- Grange P, Centano A, Maggi R & Delmon B (1996) Hydrotreating of pyrolysis oils: New catalytic systems. In: Bridgwater & Hogan (eds.), 186–197.
- Greene DL & Santini DJ (1993) *Transportation and Global Climate Change*. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC, USA, 357p.

- Griehl M (2006) Luftwaffen koekoneet – Saksan ilmavoimien salaiset suunnitelmat ja prototyyppit. Koala-kustannus, Helsinki, 80s.
- Gullichsen J (2000) Fiber line operations. In: Gullichsen J & Fogelholm C-J (eds.) Chemical Pulping. Papermaking Science and Technology, Vol. 6A, Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI, Gummerus, Jyväskylä, A17–A243.
- Gullichsen J & Lindeberg H (2000) Byproducts of Chemical Pulping. In: Gullichsen J & Fogelholm C-J (eds.) Chemical Pulping. Papermaking Science and Technology, Vol. 6B, Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI, Gummerus, Jyväskylä, B374–B389.
- Gårdmark L (2007) Bio-DME kan bli framtidens bränsle. *Energigas* 66(3)34–35.
- Haapaniemi A (1983) Kemian teollisuutemme historiaa – Tervanpoltosta teollisuudeksi. *Kemia* 10(6)491–542.
- Hackleman M (1996) The new electric vehicles – A clean and quiet revolution. Home Power Publishing, St. Croix Press, New Richmond, WI, USA, 272p.
- Hadfield C (1967) Atmospheric Railways – A Victorian venture in silent speed. David & Charles, Devon, UK, 240p.
- Hakkila P (1998) Structure and properties of wood and woody biomass. In: Kellomäki S (ed.) Forest Resources and Sustainable Management. Papermaking Science and Technology, Vol. 2, Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI, Gummerus, Jyväskylä, 116–185.
- Hamelinck CN & Faaij APC (2002) Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass. *J. of Power Sources* 111:1-22.
- Hansen AC, Zhang Q & Lyne PWL (2005) Ethanol-diesel fuel blends – a review. *Bio-resource Technology* 96:277–285.
- Hansson A (2007) Biogas på arenan I skånst energiting. *Energigas* 66(3)31.
- Hargrave (2007) The Pioneers – Aviation and aeromodelling – Interdependent evolutions and histories, <http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/pioneers.html>
- Hase A, Komppa V, Lokio A, Riistama K & Vuori M (toim.) (1990) Suomen kemianteollisuus. Kemian Keskusliitto, Chemas, Helsinki, 286s.
- Haventon P (2005) Gengas – Dokument från en bister tid. Winberg CityBook AB, Hudiksvall, Sverige, 142s.
- Heatley M (1985) The Illustrated History of Helicopters. Bison books, London, UK, 112p.
- Heinberg R (2003) The party's over – Oil, war and the fate of industrial societies. Clairview, East Sussex, UK, 275p.
- Hermalahti K (2007) Saab 99 Petro. Saabisti 4, 36.
- Hildén NA (1933) Puun käyttö polttoaineena. Teoksessa: Levón M (toim.) Puu, sen käyttö ja jalostus, Osa 1. Keksintöjen kirja, WSOY, Porvoo, 334–348.
- Hirsch RL, Bezdek R & Wendling (2005) Peaking of world oil production: Impacts, mitigation & risk management. Report for US Department of Energy, 91p.
- Hiscox GH (1900) Horseless vehicles – Automobiles, motor cycles operated by steam, hydro-carbon, electric and pneumatic motors – A practical treatise on the development, use and care of the automobile. Sampson Low, Marston & Company Ltd., London, 460p.
- Hoffrén J (2006) Öljyn aikakausi pian ohi. *Futura* 25 (4): 5–19.
- Hollingdale AC, Krishnan R & Robinson AP (1999) Charcoal production: a handbook. Eco-logic books, Bristol, UK, 158p.
- Holm S (2006) Visions of the Pioneers. Biogas I Trollhättan 1996-2006 - 10-årsjubileum biogasseminarier 29 Maj – 1 Juni 2006. <www.biogas.hv.se>

- Holmgren K, Kirkinen J & Savolainen I (2006). The Climate impact of energy peat utilisation - comparison and sensitivity analysis of Finnish and Swedish results. IVL Report B1681, Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden, 71p.
<<http://www.ivl.se/rapporter/pdf/B1681.pdf>>
- Horie K (2007) Kenichi Horien Suntory Mermaid II -sivut, <http://www1.suntory-mermaid2.com/>
- Hubbert MK (1956) Nuclear energy and the fossil fuels. Publication no. 95, Shell development company, Exploration and production research division, Houston, TX, USA, 56p.
- Hubbert MK (1976) Exponential Growth as a Transient Phenomenon in Human History. World Wildlife Fund conference, San Francisco, California, 1976. Reprinted: Daly HE & Townsend KN (eds.) Valuing the Earth: Economics, Ecology, Ethics. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1993, 113–126.
- Hughes M (2005) Railway developments worldwide – Speed, tonnage and capacity. Proc. Excellence in Railway Systems Engineering and Integration, Nat. Conf. 25–26 Nov 2005, Catalis Railway Training Centre, Derby, UK, 8p.
- Huoltouseeriyhdistys (1988) Puolustusvoimien huolto 1918–1986. Huoltouseeriyhdistys ry, Länsi-Savon kirjapaino, Mikkeli, 936s.
- Hutchinson (2001) Jane's submarines – War beneath the waves from 1776 to the present day. Paperpack edition 2003, HarperCollins, London, UK, 223p.
- Huttunen S & Lampinen A (2005) Bioenergy technology evaluation and potential in Costa Rica. Research Reports in Biological and Environmental Sciences 81, University of Jyväskylä, 80p.
<http://ebooks.jyu.fi/1795_6900/9513921549.pdf>
- Häggbloom I & Ranta V (1966) Sulfitti- ja sulfaattiseluloosan valmistus. WSOY, Porvoo, 295s.
- IEA (2000) Biogas upgrading and utilization. IEA Bioenergy Task 24, 20p.
<www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/Biogas%20upgrading.pdf>
- IEA (2002) Transportation & Energy. OECD International Energy Agency, Paris, 12p.
<<http://www.iea.org/textbase/papers/2002/transportation.pdf>>
- IEA (2003) CO2 emissions from fuel combustion 1971–2001, 2003 edition. CD-ROM, OECD International energy agency, Paris.
- IEA (2004) Biofuels for transport – An international perspective. OECD International Energy Agency, Paris, 210p. <www.iea.org>
- Ingersoll JG (1996) Natural Gas Vehicles. Fairmont Press, Lilburn, GA, USA, 468p.
- Intosalmi J (1999) Luonnollisesti ECO-bussilla. *Vipu* 1(1)14–17.
- Ipatiew W & Petrow D (1928) Über die pyrogene Zersetzung von Holzteer in Gegenwart von Wasserstoff und unter Druck. *Angew. Chem.* 1:172–176.
- IPCC (1999) Aviation and the global atmosphere. A special report of IPCC working groups I and III in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer, Penner JE, Lister DH, Griggs DJ, Dokken DJ & McFarland M (eds.), United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK, 373p.
- IPCC (2001) Climate Change 2001: Synthesis Report. Watson RT and the Core Writing Team (eds.), United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK, 397p.
<http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/index.htm>

- IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan on behalf of the IPCC.
<<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.htm>>
- Ishii M, Ishizawa S, Inada E, Idoguchi R & Sekida T (1995) Experimental Studies on a Natural Gas Vehicle. In: Bata (ed.), 221–231.
- Isotalo K (1990) Puu- ja sellukemia. VAPK-kustannus, Ammattikasvatushallitus, Helsinki, 144s.
- Ivy J (2004) Summary of Electrolytic Hydrogen Production – Milestone Completion Report. NREL/MP-560-36734. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 24p. <<http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/36734.pdf>>
- Jans Jan H (2000) European Environmental Law, 2nd revised edition, Europa Law Publishing, Groningen, The Netherlands, 464p.
- Jeronen E (1987) Kliininen fysiologia. WSOY, Porvoo, 287s.
- Johansson TB, Kelly H, Reddy AKN, Williams RH & Burnham L (eds.) (1993) Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity. Earthscan, London, UK, 1160p.
- JRC (2007) Well-to-Wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Version 2c, March 2007. European Commission Joint Research Centre (JRC), The oil companies' European association for environment, health and safety in refining and distribution (CONCAWE) & European Council for Automotive R & D (EUCAR), <http://ies.jrc.ec.europa.eu/wtw>.
- Juhala M (1999) The technological history and future of the motorcar – The macroeconomic position of the car industry. In: Mauranen T (ed.) Traffic, Need, Roads – Perspectives on the Past, Present and Future of Roads in Finland and the Baltic Area. The Finnish National Road Administration (FINNRA, Tiehallitus), Helsinki, 81–95.
- Juurikkala J, Airola L, Pohjanpalo Y & Seppälä P (1986) Polttoainelaitteet. Autotekniikan käsikirja, Tammi, Helsinki, 419s.
- Jääskeläinen J, Koponen A, Vitikainen H-P, Innanen H, Varvio E, Kämppi L, Korhikoski H-L & Halonen A (2005) Pontikkapitäjä. Elokuva Kiteestä 1960-70-luvulla. ArtFilms Production, Helsinki, 55 min.
- Kaaro J (2007) Bioparistossa puurtavat bakteerit. Tiede 10/2007, 50–51.
- Katko TS (1996) Vettä! – Suomen vesihuollon kehitys kaupungeissa ja maaseudulla. Vesi- ja viemärilaitosyhdistys, Hämeen kirjapaino, Tampere, 416s.
- Kaku M (2008) Physics of the Impossible: A Scientific Exploration into the World of Phasers, Force Fields, Teleportation, and Time Travel. Doubleday, New York, NY, USA, 329p.
- Kaukoranta A (1981) Sulfitispriteollisuus Suomessa 1918-1978. Polar, Helsinki, 222s.
- Kauppila O (1988) Rajamäen tehtaat 1888-1988 – Satavuotiskirja. Painokaari, 452s.
- Kellomäki S (1998) Trees, forests, and the forest ecosystems. In: Kellomäki S (ed.) Forest Resources and Sustainable Management. Papermaking Science and Technology, Vol. 2, Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI, Gummerus, Jyväskylä, 20–87.
- Kerihuel A, Kumar MS, Bellettre J & Tazerout M (2005) Use of animal fats as CI engine fuel by making stable emulsions with water and ethanol. Fuel 84:1713–1716.
- Keränen O, Parmala S-P & Ahokas J (1984) Häkäkaasulaitteisto maatalouden poltto-moottorikäytössä. Tutkimuslaskelma N:o 37, Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos (VAKOLA), Vihti, 114s.

- Keskinen R (toim.) (1993a) Suomen energiatekniikan historia – Teknis-historiallinen tutkimus energian tuottamisesta ja käytöstä Suomessa 1840-1980, Osa 1. Julkaisuja 115, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 428s.
- Keskinen R (toim.) (1993b) Suomen energiatekniikan historia – Teknis-historiallinen tutkimus energian tuottamisesta ja käytöstä Suomessa 1840-1980, Osa 2. Julkaisuja 115, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 452s.
- Kirk R & Othmer D (eds) (1978-1984) Encyclopedia of Chemical Technology. 3th ed., 25 volumes, Wiley, New York, NY, USA.
- Kirk R & Othmer D (eds) (1991-1998) Encyclopedia of Chemical Technology. 4th ed., 27 volumes, Wiley, New York, NY, USA, 26000p.
- Kirkinen J, Hillebrand K & Savolainen I (2007). Turvemaan energiakäytön ilmastovai-
kutus - maankäyttöskenaario. VTT Tiedotteita 2365, Espoo, 55s.
<<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2365.pdf>>
- Kirsch D (2000) The Electric Vehicle and the Burden of History. Rutgers University Press, Piscataway, NJ, USA, 291p.
- Kitani O & Hall CW (eds.) (1989) Biomass Handbook. Gordon and Breach Science Publishers, New York, NY, USA, 963 p.
- Klapper C (1961) The Golden Age of Tramways. Routledge & Kegan Paul, London, UK, 327p.
- Klare MT (2001) Resource wars – The new landscape of global conflict. Metropolitan books, New York, NY, USA, 320p.
- Klass DL (1998) Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals. Academic Press, San Diego, CA, USA, 651p.
- Klass DL (2004) Biomass for Renewable Energy and Fuels. In: Cleveland (2004), Vol. 1, 193–212.
- Klee E, Merk O & von Braun W (1965) The Birth of the Missile – The Secrets of Peenemünde. Dutton, New York, 126p.
- Kleiner K (2005) The new iron age. New Scientist 188:2522, 34–37 (22/10).
- Knaggs T (2005) Orcell: pioneering a pure green revolution. Editorial comment, The Naval Architect, April 2005, 3.
- Kodama T & Igarashi Y (1989) Hydrogenase. In: Kitani & Hall (1989), 355–361.
- Kohler H (2003) Fuel and Propulsion system strategy of DaimlerChrysler. In: Proc. Conf. Making Hydrogen Available to the Public, 24.–25.4.2003 Reykjavik.
- Koivisto R (2003) Suihkumoottorit. Opetushallitus, Helsinki, 207s.
- Kolin I (1972) The Evolution of the Heat Engine. Longman. Reprint 1998, Moriya Press, River Falls, WI, USA, 105p.
- Korhonen P (2007) Toivo Kaario (1912–1970) pintakulkuneuvojen kehittäjänä. Historian sivuaineen tutkielma, Historiatieteen laitos, Tampereen yliopisto, 108 s.
- Korpela SA (2004) Prediction of World Peak Oil Production. In: McKillop A & Newman S (eds.) The Final Energy Crisis, Pluto Press, London, UK, 11–28.
- Korpela SA (2006) Oil Depletion in the World. Current Science, 91(9)1148–1152.
- Korpela SA (2007) Peak Oil: Impending Oil and Natural Gas Scarcity. Presentation at University of Kansas, March 21 by Seppo A. Korpela, Dept. of Mechanical Engineering, Ohio State University.
- Kotta K (2007a) Koeajossa aikansa kuumin traktoriuutuus Fordson Major E27N. Koneviesti 14.12. 55(18)6–17.
- Kotta K (2007b) Masinistikesä 2007. Koneviesti 14.12. 55(18)18–37.
- Kovarik B (1998) Henry Ford, Charles Kettering and the "Fuel of the Future". Automotive History Review, No. 32, 7–27. <<http://www.radford.edu/~wkovarik/papers/fuel.html>>

- Kovarik W (2007) Special Motives: Automotive Inventors and Alternative Fuels in the 1920s. Paper to the Society for the History of Technology, Oct. 19, 2007. <<http://www.runet.edu/~wkovarik/papers/Special.motives.shot.2007.html>>
- von Krauss MK & Harremoës P (2001) MTBE in petrol as a substitute for lead. In: EEA (2001), 110-125. <http://reports.eea.europa.eu/environmental_issue_report_2001_22/en/issue-22-part-11.pdf>
- Krugman P (1998) The accidental theorist and other dispatches from the dismal science. Suom. Satunnainen teoreetikko, 1999, WSOY, Juva, 191s.
- Kuisma M (1997) Kylmä sota, kuuma öljy – Neste, Suomi ja kaksi Eurooppaa. WSOY, 616s.
- Kuittinen V & Huttunen MJ (2009) Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 12 – Tiedot vuodelta 2008. Ekologian tutkimusinstituutin raportteja 5, Joensuun yliopisto, 77s. <<http://www.biokaasuyhdistys.net/>>
- Kukkula J (2005) Sähkötyksen historiaa – kuka oli Clemens Gerke? Radioamatööri 56(8)22–23.
- Kula KK (toim.) (1957) 25-vuotias Alko tänään. Oy Alkoholiliike Ab, Helsinki, 95s.
- Kurki-Suonio I (1991) Polttoaineet ja niiden käytön kehitys. Luvun 3 kohta 3.1. julkaisuun Suomen energiatekniikan historia, Raportti 25, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Hydraulikka / Tekniikan historia, Tampere, 22s.
- KV (2007) Viimeisimpiä tietoja maataloustraktoreista 1959. Koneviesti 14.12. 55(18)43.
- Kylläinen M (2007) Juoksukoneesta ketjuvetoiseen polkupyörään. Teoksessa: Antila K (toim.) Pyörällä halki aikojen – Velomania! Tampereen museoiden julkaisuja 98, 7–39.
- Kyrklund H (1934) Erfahrungen mit Holzgas als Automobilreisbstoff. In: Transactions of the World Power Conference 1933, sectional meeting Scandinavia, Vol III Gas, Solid and Liquid Fuels, Reports and discussions, Svenska Nationalkommitten för Världskraftkonferenser, Stockholm, 1934, 336p, 224–225.
- Köhler S (2007) Puukaasun aika. Alfamer, Helsinki, 192s.
- Laakkonen S (2001) Vesiensuojelun synty – Helsingin ja sen merialueen ympäristöhistoriaa 1878–1928. Gaudeamus, Helsinki, 309s.
- Ladykina N, Dedyukhina EG & Vainshtein MB (2006) A review on microbial synthesis of hydrocarbons. Process Biochemistry 41:1001–1014.
- LaFontaine H & Zimmerman FP (1989) Construction of a Simplified Wood Gas Generator for Fueling Internal Combustion Engines in a Petroleum Emergency. ORNL (Oak Ridge National Laboratory) & FEMA (Federal Emergency Management Agency), Washington, DC, USA, 68+12p.
- Lainé R (2007) Turistina avaruuteen: miten ja milloin? EADS Astriumin teknisen johtajan esitelmä Avaruus2007-seminaarissa Helsingissä 10.11.
- Lampinen A (2002a) Stirling-kone opetusvälineestä hyötykäyttöön. Arkhimedes 54(6)19–23.
- Lampinen A (2002b) Huomioita kansantaloudellisten kustannusten käsittelystä Suomen energiatalouspolitiikassa. Kansantaloudellinen aikakauskirja 98(2)207–219.
- Lampinen A (2002c) YK:n energiapolitiikka kestää? Maailmanpyörä 2, 12–14.
- Lampinen A (2003) Jätteiden liikennekäyttöpotentiaali Suomessa. Kuntatekniikka 58(1):31–34.
- Lampinen A (2004a) Biokaasun tuotannon ja hyödyntämisen perusteet. Dimensio 68(3):4–8. <http://www.kaapeli.fi/~tep/projektit/liikenteen_biopolttoaineet/Dimensio_Biokaasujuttu.pdf>

- Lampinen A (2004b) Autoilua ilman huonoa omaatuntoa – Millainen on biokaasuauto. *Dimensio* 68(3):8-9. <http://www.kaapeli.fi/~tep/projektit/liikenteen_biopolttoaineet/Dimensio_Biokaasujuttu.pdf>
- Lampinen A (2004c) Biogas Farming – An Energy Self-Sufficient Farm in Finland. *Refocus*, 5(5):30–32. <http://www.kaapeli.fi/~tep/projektit/liikenteen_biopolttoaineet/Refocus_biogas.pdf>
- Lampinen A (2004d) Energiatekniikan kehitys -kurssin materiaali. Kurssi YMPS455, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Jyväskylän yliopisto.
- Lampinen A (2005a) Energiapolitiikka-kurssin materiaali. Kurssi YMPS435, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Jyväskylän yliopisto.
- Lampinen A (2005b) Globaalimuutoksen fysiikka ja kemia -kurssin luentomoniste. Kurssi YMPA207, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Jyväskylän yliopisto, 198s.
- Lampinen A (2005c) Biokaasuajoneuvot liikennemelun vähentäjänä. *Ympäristö ja Terveys*, 36(2-3)58–61. <www.kaapeli.fi/~tep/projektit/liikenteen_biopolttoaineet/YT_biokaasuani.pdf>
- Lampinen A, Werbos P, Malaska P & Lindström UB (2005a) Ehdotus autojen polttoainejoustavuuslaisiksi. WWW-julkaisu 29.9., 2s, <http://www.kaapeli.fi/~tep/projektit/liikenteen_biopolttoaineet/Poltttoainejoustavuuslakiehdotus.pdf>
- Lampinen A, Malaska P & Lindström U.B. (2005b) Laki edistämään biobensan käyttöä. *Talouselämä* 33, 26 (7.10.).
- Lampinen A (2006) Liikenteen biopolttoaineet -kurssin materiaali. Kurssi YMPS456, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Jyväskylän yliopisto.
- Lampinen A & Jokinen E (2006) Suomen maatalojen energiantuotantopotentiaalit – Ekologinen perspektiivi. Bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 84, Jyväskylän yliopisto, 160s. <http://ebooks.jyu.fi/1795_6900/9513924971.pdf>
- Lampinen A (2008a) Liikennebiokaasulainsäädäntö. *Palvelututkimus No 8/2008*, Levón-instituutti, Vaasan yliopisto, 211s.
- Lampinen A (2008b) Fossiilisten liikennepolttoaineiden tukimekanismien kehitys Suomen verolainsäädännössä. *Oikeus* 37(4)453–473.
- Landels JG (1978) Antiikin insinööritaito. *Suom.* 1985, Insinööritieto Oy, 192s.
- Lapuerta M, Armas O, Bellesteros R & Fernández J (2005) Diesel emissions from bio-fuels derived from Spanish potential vegetable oils. *Fuel* 84:773–780.
- Larson ED, Consonni S & Katofsky RE (2003) *Cost-Benefit Assessment of Biomass Gasification Power Generation in the Pulp and Paper Industry – Final Report*. Princeton University, USA, 138p.
- Lassila I (1945) *Tervan ja tärpätin valmistus*. Keskusmetsäseura Tapio, Helsinki, 128s.
- Lavery B (2004) *Ship – 5000 years of maritime adventure*. National Maritime Museum, London, UK, 400p.
- LBS (2002) *GM Well-to-Wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems – A European Study*. L-B-Systemtechnik GmbH, Germany, 135p.
- Leeper SA, Ward TE & Andrews GF (1991) *Production of Organic Chemicals via Bio-conversion: A Review of Potential*. Report EGG-BG-9033, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID, USA.
- Leffingwell R (1995) *Farm Tractors – A Living History*. Motorbooks International, Osceola, WI, USA, 240p.

- Leherrère J (2001) Estimates of oil reserves. Presentation at the joint meeting of the Energy Modelling Forum, International Energy Agency and the International Energy Workshop, 19–21 June, IIASA, Laxenburg, Austria, 92p. <<http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/IEW2001>>
- Leherrère J (2003) Oil as a Source of Energy: Present Realities and Future Prospects. In: The Future of Oil as a Source of Energy. The Emirates Center for Strategic Studies and Research (ECSSR), RoutledgeCurzon, London, UK, 15-51.
- Leherrère J (2004) Natural Gas Future Supply. Presentation at the IEW Meeting in June 22–24 2004, International Energy Agency, Paris, France, 56p. <<http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/IEW2004>>
- Lemley B (2006) Anything into oil. Discover, April, 46-51.
- Lepo K (2002) Karbidilamppuja ja muita vekottimia. Pikajalka 2(2)18-22.
- Lerner P (2007) Can 6881 laptop batteries change the world? Popular Science May 2007, 68–73, 104–107.
- Lindblad AR (1932) Preparation of oils from wood by hydrogenation. Ing. Vetenskap Akad. Handl. 107:7–59.
- Logan BE, Call D, Cheng S, Hamelers HVM, Sleutels THJA, Jaremiassa AW & Rozendal RA (2008) Microbial Electrolysis Cells for High Yield Hydrogen Gas Production from Organic Matter. Environ. Sci. Technol. 42:8630–8640.
- Lund H & Münster E (2006) Integrated transportation and energy sector CO2 emission control strategies. Transport Policy 13:426–433.
- LVM (2007) Liikenne 2030 – Suuret haasteet, uudet linjat. Ohjelmia ja strategioita 1/2007, Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki, 41s. <<http://www.mintc.fi>>
- Lämsä S (1969) Kuljetukset ja kuljetusten johtaminen Suomen sodassa vv. 1941–1944. Suomen Sotatieteellisen Seuran julkaisuja N:o 9, 170s.
- Maanpuolustuskorkeakoulu (2001) Suomen turvallisuusympäristö 2000-luvun alussa. Tutkimuseloiteita No. 10, Julkaisusarja 2, Strategian laitos, Helsinki, 73s.
- Malvadkar SB, Forbes S & McGurl GV (2004) Formation of Coal Resources. In: Cleveland (2004), Vol. 1, 529–550.
- MDI (2007) Moteur Development International, <http://www.theaircar.com/> (17.7.).
- METLA (2004) Metsätilastollinen vuosikirja 2004. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa, 416s.
- Metsälä H (2000) Puukansa – Puulajiemme perinnettä ja nykyaikaa. Sarmala Oy, Rakennusalan kustantajat RAK, Helsinki, 159s.
- Metsälä H (2001) Pihka. Gummerus, Jyväskylä, 96s.
- MI (2007a) World methanol supply/demand. Methanol Institute, Arlington, VA, USA, <http://www.methanol.org/pdf/methanolSupplyDemand02.pdf> (8.12.).
- MI (2007b) Global methanol capacity. Methanol Institute, Arlington, VA, USA, <http://www.methanol.org/pdf/WorldMethanolPlantsEndOf2006.pdf> (8.12.).
- Miller BG (2005) Coal energy systems. Elsevier Academic Press, Burlington, MA, USA, 526p.
- Mills GA & Cusumano JA (1980) Catalysis. In: Kirk & Othmer (1978-1984), Vol. 5, 16–61.
- Milne TA, Elam CC & Evans RJ (2001) Hydrogen from biomass – State of the art and research challenges. In: Annual Report 2001, IEA Hydrogen, International Energy Agency, 31–36.
- Mondey D (ed.) (1979) The illustrated encyclopedia of aircraft. Hamlyn, Middlesex, UK, 320p.
- Moreira JR & Goldemberg J (1999) The alcohol program. Energy policy 27:229–245.
- Morland A, Henshaw P & Rohila V (2006) Traktorit Euroopassa – Hakuteos eurooppalaisista traktoreista. Alfamer, Helsinki, 176s.

- Morris H (2007) The Fireless Locomotive. National Railway Historical Society, Web exclusives, http://www.nrhs.com/web_exclusives/fireless_cooker/ (19.7.).
- Moulijn JA, Makkee M & van Diepen A (2001) Chemical Process Technology. Wiley, Chichester, UK, 453p.
- Munn T (ed. in chief) (2002) Encyclopedia of Global Environmental Change. Vol. 1–5, Wiley, West Sussex, UK, 3440p.
- Murray B & Burgess E (1977) Flight to Mercury. Columbia University Press, New York, NY, USA, 162p.
- Musser G (2007) 5 essential things to do in space – Planetary scientists have articulated goals for exploring the solar system. *Scientific American* 297(4)43–49 (October).
- Myllymaa T, Moliis K, Tohka A, Rantanen P, Ollikainen M & Dahlbo H (2008a) Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Inventaarioraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28/2008, Suomen ympäristökeskus SYKE, 82s.
<<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=298205&lan=fi&clan=fi>>
- Myllymaa T, Moliis K, Tohka A, Isoaho S, Zevenhofen M, Ollikainen M & Dahlbo H (2008b) Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutukset ja kustannukset – Jätehuollon vaihtoehtojen tarkastelu alueellisesta näkökulmasta. Suomen ympäristö 39 / 2008, Ympäristönsuojelu, Suomen ympäristökeskus, 192s.
<<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=298884&lan=fi&clan=fi>>
- Myllyntaus T (1991) Electrifying Finland – The Transfer of a New Technology into a Late Industrialising Economy. Macmillan, Hampshire, UK, 407s.
- Mäkipirtti M (2006) Puolustusvoimien moottoriajoneuvot 1919–1959. Apali Oy, Tampere; Karisto, Hämeenlinna, 224s.
- Natarajan VP & Suppes GJ (1997) Rheological studies on a slurry biofuel to aid in evaluating its suitability as a fuel. *Fuel* 76:1527–1535.
- NaTrompme TK, Shia R-L, Allen M, Eiler JM & Yung YL (2003) Potential impact of a hydrogen economy on the stratosphere. *Science* 300:1749–1742.
- Nienstedt W, Hänninen O, Arstila A & Björkqvist S-E (1991) Ihmisen fysiologia ja anatomia. WSOY, Porvoo, 635s.
- Niessen J, Schröder U & Scholz F (2004) Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation, a bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochemistry Communications* 6:955–958.
- Nigge K-M (2000) Life Cycle Assessment of Natural Gas Vehicles – Development and Applications of Site-Dependent Impact Indicators. Springer, Heidelberg, Germany, 166p.
- Nilsson K & Nilsson M (2004) The climate impact of energy peat utilization in Sweden - the effect of former land use and after-treatment. Report IVL B1606. Viitattu: IPCC (2006)
- Nishimura (1989) Petroleum plants. In: Kitani & Hall (1989), 114–132.
- Niskanen H (1999) From Munktelles to Valtra. Valtra inc., Suolahti; Gummeruksen kirjapaino, Jyväskylä, 214p.
- Niskanen H (2000) Valtra 50 vuotta – Tarinoita. Valtra inc., Suolahti; Salpausselän kirjapaino, 146s.
- Norrmén PH (1928) Mäntän tehdas 1868-1928. G.A.Serlachius osakeyhtiön muistojulkaisu, Tilgmann ja Otava, 258s.
- Nowacki P (1979) Coal Liquefaction Processes. Noyes data corporation, Park Ridge, NJ, USA, 339p.

- Nummila S (2007a) Sähköisin purjein aurinkokunnan laidalle. *Tähdet ja avaruus* 2/07, 20–25.
- Nummila S (2007b) Sähköisin purjein aurinkokunnan laidalle. *Tähdet ja avaruus* 2/07, 32–34.
- Nykänen P (1994) Gustaf Kompan hydraulikattila Lönnrotinkadulla. *Tekniikan Waiheita* 12(1)9–13.
- Nykänen P (1999) Research into fuel and lubrication oil substitutes in Finland. In: Mauranen T (ed.) *Traffic, Need, Roads – Perspectives on the Past, Present and Future of Roads in Finland and the Baltic Area*. The Finnish National Road Administration (FINNRA, Tiehallitus), Helsinki, 97–102.
- Nykänen P (2000) Bensiinihiilivetyjen valtiat – Voitelu- ja moottoripolttoaineiden tutkimus Suomessa vuoteen 1948. Toinen korjattu painos, SHT julkaisu nro 2, Suomen tekniikan historian seura, Gummerus, Saarijärvi, 329s.
- Näyhä A (2006) Liikenteen biopolttonesteiden tuotanto selluteollisuudessa tulevaisuudessa: Asiantuntijoiden näkemyksiä sivuvirtojen hyödyntämisestä, teknologian soveltuvuudesta ja diffuusiosta. Yritysten ympäristöjohtamisen Pro gradu –tutkielma, Taloustieteiden tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, 81s.
- Oasmaa A, Arpiainen V & McKeough P (1997) Raakasuoivan jalostus poltto- ja voiteluöljyksi. Bioenergian tutkimusohjelman raportti 26.9.1997, Espoo, 16s.
- Oasmaa A (2003) Fuel oil quality properties of wood-based pyrolysis liquids. Research report 99. Department of Chemistry, University of Jyväskylä. 285p.
- Ohtaguchi K, Kajiwara S, Mustaqim D & Takahashi N (1997) Cyanobacterial bioconversion of carbon dioxide for fuel productions. *Energy Conversion and Management* 38:S523-S528.
- Ojanen OJ (1997a) Traktorit Suomessa 1970-luvulle saakka, Osa 2 – Fordson/Ford. Alfamer, Helsinki, 96s.
- Ojanen OJ (1997b) Traktorit Suomessa 1970-luvulle saakka, Osa 4 – Allisista Turneriin, Amerikkalaisia ja englantilaisia traktoreita. Alfamer, Helsinki, 96s.
- Ojanen OJ (1997c) Traktorit Suomessa 1970-luvulle saakka, Osa 5 – Avancesta Zetoriin, Manner-eurooppalaisia traktoreita. Alfamer, Helsinki, 96s.
- Olah HA, Goeppert A & Surya Prakash GK (2005) *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 290p.
- Olsson C (1987) *Volvo lastbilarna under sextio år*. Förlagshuset Norden AB, Zollikofer AG, St. Gallen, Schweiz, 224s.
- Ooi Y-S, Zakaria R, Mohamed AR & Bhatia S (2004) Catalytic conversion of palm oil-based fatty acid mixture to liquid fuel. *Biomass and Bioenergy* 27:477–484.
- Owen K, Coley T & Weaver CS (1995) *Automotive Fuels Reference Book*. 2nd ed., Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale, PA, USA, 963p.
- Paajala J, Karjalainen T & Kiukaanniemi E (1997) Biomassojen ja jätteen käsittelystä pyrolyysiprosessilla. Working Papers 9, REDEC Kajaani, Oulun yliopistopaino, 60s.
- Paananen P, Heinsola A & Lampinen A (2005) Vedyn käyttö liikenteessä – Jyväskylässä meneillään selvitys. *Bioenergia* 4, 38–39.
- Pahl G (2005) *Biodiesel – Growing a New Energy Economy*. Chelsea Green, White River Junction, VT, USA, 281p.
- Palmroth A (2004) Käännösten kautta kollektiiviin – Tuuliosuuskunnat toimijaverkkoina. Jyväskylä studies in education, psychology and social research 241. Jyväskylän yliopisto, 177s.
- Paloheimo E (toim.) (2000) *Metsä ja puu II – Tukista tuotteeksi*. Teknillinen korkeakoulu/Puurakentaminen ja Rakennustieto Oy, Tampere, 205s.

- Palucka T (2005) The Wizard of Octane. *Invention & Technology* 20(3)36–45.
- Papoutsakis ET (1989) Acetone-Butanol Fermentation. In: Kitani & Hall (1989), 271–286.
- Parker SB (ed.) (1981) McGraw-Hill Encyclopedia of Energy, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 838p.
- Parmala S-P (1980a) Puukaasu moottoriajoneuvojen polttoaineena. Tutkimuslaskelma N:o 22, Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos (VAKOLA), Vihti, 44s.
- Parmala S-P (1980b) Polttomoottorien varustaminen kotimaisten polttoaineiden käytön soveltuvaksi. Tutkimuslaskelma N:o 24, Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos (VAKOLA), Vihti, 116s.
- Patterson W (1999) Transforming electricity – The coming generation of change. The Royal Institute of International Affairs, Earthscan, London, UK, 203p.
- Paul J & Pradier C-M (eds.) (1994) Carbon dioxide chemistry – Environmental issues. The Royal Society of Chemistry, Cambridge University Press, UK, 405p.
- Pellinen H & Roschier RH (1952) Hiokkeen ja selluloosan valmistus. Suomen paperinsinöörien yhdistys, Helsinki, 604s.
- Peltola (1984) Auton alkulähteillä. Teoksessa: Linnapuomi A (toim.) Tapahtumia autotekniikan taivaalta. Suomen autoteknillinen liitto, Helsinki, 4–131.
- Peltonen W (1907) Maatalous ja siihen liittyvät teollisuuden haarat. Teoksessa: Peltonen W (toim.) Keksintöjen kirja, I osa, WSOY, Porvoo, 111–214.
- Pentti (1940) Häkähännät yleiseksi. Luku 5 kolumnissa “Pitäjän periltä”. *Maa* 25(8)248.
- Perlin J (1999) From Space to Earth – The Story of Solar Electricity. Aatec, Ann Arbor, MI, USA, 224p.
- Pero P (1945) Maatalouspolttomoottorit ja traktorit. 2., uusittu painos, Ammattienedistämislaitoksen ammattikirjoja N:o 6, Otava, Helsinki, 222s.
- Perry RH & Green D (1984) Perry’s Chemical Engineers’ Handbook. 6th ed., McGraw-Hill, Kuala Lumpur, Malaysia, 2329p.
- Persson M, Jönsson O & Wellinger A (2006) Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection. IEA Bioenergy Task 37, 34p. <www.iea-biogas.net/Dokumente/upgrading_report_final.pdf>
- Peyton KM (2002) ONDEO Nalco Fuel Field Manual, Revised edition. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 380p.
- Piltz M & Levä K (1996) Kuorma-auto höyrykoneesta turboihin – Kuorma-autotekniikka 1770–1996. Teoksessa: Pyörillä kuormat kulkevat. Mobilia auto- ja tiemuseo, Vehoniemen automuseosäätiö; Gummerus, Jyväskylä, 5–13.
- Pleeth SJW (1949) Alcohol, a fuel for internal combustion engines. Chapman & Hall, London, 259 s. (Viitattu: Solantausta & Asplund 1980)
- Pohjanen O & Walli AI (1943) Uusi autokirja – Vuoden 1943 painos. WSOY, Porvoo, 344s.
- Posti (2002) Posti testaa uutta sähköautomallia. Postin tiedote 20.3.2002, www.posti.fi.
- PPM (2007) Parry People Movers, <http://www.parrypeoplemovers.com/>
- Prentice J (2007) Tramway information. <http://www.tramways.freeserve.co.uk/> (15.7.).
- Probstein RF & Hicks RE (1990) Synthetic Fuels. McGraw Hill 1982. Dover edition (unabridged republication of 2nd corrected edition in 1990) 2006, Mineola, NY, USA, 490p.
- PSI (2009) The SNG Technology Platform in Güssing – A Status report of Bio-SNG project. Poster, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland, http://www.bio-fuelstp.eu/spm2/pdfs/Poster_BioSNG_PSI.pdf (6.7.).
- Puolakka NO (1940) Puukaasuttimien kokeileminen traktoreissa. *Maa* 25(10)343–346.

- Pöysä T, Rannikko G & Rannikko R (1982) *Pontikka – Viisi vuosisataa suomalaista paloviinaperinnettä*. Otava, Keuruu, 331s.
- Railfaneurope (2007) The European Railway Server, <http://www.railfaneurope.net/> (16.7.).
- Rajagopalan S, Datar RP & Lewis RS (2002) Formation of ethanol from carbon monoxide via a new microbial catalyst. *Biomass & Bioenergy* 23:487–493.
- Ranta J (1994) *Puuhiilen valmistus – Käsikirja*. Helsingin yliopisto, Maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus, Mikkeli, 132s.
- Refuel (2008) Eyes on the track, Mind on the horizon – From inconvenient rapeseed to clean wood: A European roadmap for biofuels. EU-tutkimusohjelman Refuel raportti, ECN, Hollanti, 52p, <http://www.refuel.eu/fileadmin/refuel/user/docs/REFUEL_final_road_map.pdf>.
- Refuel (2009) Refuel-EU-tutkimusohjelman www-palvelin, <http://www.refuel.eu/home/> (6.7.).
- Regnault P (1732) *Les entretiens physiques d’ariste et d’eudoxe ou physique nouvelle en dialogues*. Jacques Clouzier, Paris, France, 452p.
- Reinikainen A & Reinikainen T (1953) *Maatalous koneellistuu*. Kustannustalo, Lahti, 656s.
- Reinikainen A (1954) *Traktorikirja*. Otava, Helsinki, 470s.
- Reinikainen A, Nieminen L & Näri O (1987) *Maatalouskoneiden tarkastus- ja koetustoiminta maassamme*. Teoksessa Näri O (toim.) *Koneellistuva maataloutemme – 85 vuotta maatalouskoneiden tarkastus- ja koetustoimintaa*. Vakola, 11–46.
- Reynolds JG & Khan MR (eds.) (1999) *Designing Transportation Fuels for a Cleaner Environment*. Taylor & Francis, Philadelphia, PA, USA, 214p.
- Riistama K, Laitinen J & Vuori M (toim.) (2005) *Suomen kemianteollisuus*. Chemas, Helsinki, 269s.
- Roberts P (2006) *Kun öljy loppuu – Uuden energiatalouden vaihtoehdot*. Edita, Helsinki, 412s.
- Rohila V (2006) *Eilispäivän traktoreita*. Alfamer, Helsinki, 184s.
- Ronkainen O, Koskinen P, Lehtomäki A, Lampinen A, Toivainen K, Kaksonen A, Puhakka J & Rintala J (2005) *Biologinen vedyntuotanto pimeäfermentaatioprosessilla*. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 82, 60 s.
- Rosendahl F, Thauss A & Schneider L (1935) *Technische Mitteilungen*. *Naturwissenschaften* 23(17)277–280.
- Rosillo-Calle F, Bajay SV & Rothman H (2000) *Industrial Uses of Biomass Energy – The Example of Brazil*. Taylor & Francis, London, UK, 277p.
- Rosillo-Calle F & Bezzon G (2000) Production and use of industrial charcoal. In: Rosillo-Calle et al (eds.), 183–199.
- Routala O (1934) *Puun eri kemiallisiin aineisiin perustuvat kemialliset teollisuudet*. Teoksessa: Levón M (toim.) *Puu, sen käyttö ja jalostus, Osa II. Keksintöjen kirja*. WSOY, Porvoo, 637–737.
- Routala O (1936) *Puukemia ja puukemiallinen teollisuus*. WSOY, Porvoo, 584s.
- Sabatier P & Senderens JB (1902) *Nouvelles syntheses de methane*. *Compt. Rend.* 134:514–516.
- Sabatier P (1912) *The Method of Direct Hydrogenation by Catalysis*. Nobel lecture 11.12., The Nobel Foundation, Stockholm, Sweden, http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1912/sabatier-lecture.html.

- SAE (1996) Alternative fuel: Composition, performance, engines, and systems. SAE SP-1181, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 275p.
- Sainio (2007) Olosuhteet sanelivat menettelytavat. Teoksessa Köhler (2007), s. 7–8.
- Salmenkallio (1924) Puubentsoolin kemiaa. *Teknillinen Aikakauslehti*, 14(7–8)362–363.
- Sapiensman (2007) History of the automobile, the first steam machines that replaced the horse vehicles. http://www.sapiensman.com/old_cars/ (1.12.2007).
- Saraoja E (toim.) (1935) Polttoaineet ja voimakoneet – Keksintöjen kirja V. WSOY, Helsinki, 811s.
- Sasol (2007) Sasol Ltd. www server, <http://www.sasol.com> (11.12.).
- Savolainen I, Hillebrand K, Nousiainen I & Sinisalo J (1994) Greenhouse gas impacts of the use of peat and wood for energy. VTT Research Notes 1559, Espoo, 65p+app. Viitattu: IPCC (2006)
- Schilstra AJ & Gerding MAW (2004) Peat resources. In: Cleveland (2004), Vol. 4, 805–810.
- Schneider P (2002) Typenkompfaß Lanz Bulldog 1921-1960. Motorbuch Verlag, Stuttgart, Germany, 128p.
- Schröter (1897) Diesels rationeller Wärmemotor. *Z. Ver. Dtsch. Ing.* 41(30)845–852. Viitattu: Kolin (1972).
- Schulz H (1999) Short history and present trends of Fischer-Tropsch synthesis. *Applied Catalysis A* 186: 3–12.
- Schumpeter JA (1942) *Capitalism, Socialism and Democracy*. Allen & Unwin, London, UK, 431p.
- Schuster (1934) Holz als Treibmittel von Explosionsmotoren und die Auswirkung auf die Österreichische Volkswirtschaft. In: Transactions of the World Power Conference 1933, sectional meeting Scandinavia, Vol III Gas, Solid and Liquid Fuels, Reports and discussions, Svenska Nationalkommitten för Världskraftkonferensen, Stockholm, 1934, 336p, 313–319.
- Schäfer W, Luomi V, Palva T, Parmala S-P & Ahokas J (1986) Kasviöljyt dieselmoottorin polttoaineena. Tutkimuslaskelma N:o 42, Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos (VAKOLA), Vihti, 40.
- Sciubba E (2004) Steam Turbines. In: Cleveland (2004), Vol. 6, 231–254.
- Scragg AH, Morrison J & Shales SW (2003) The use of a fuel containing *Chlorella vulgaris* in a diesel engine. *Enzyme and Microbial Technology* 33:884–889.
- Sehested J, Larsen KE, Kustov AL, Frey AM, Johannessen T, Bligaard T, Andersson MP, Nørskov JK & Christensen CH (2007) Discovery of technical methanation catalysts based on computational screening. *Topics in Catalysis* 45: 9–13.
- Self D (2007) The Museum of Retro Technology, <http://www.dself.dsl.pipex.com/MUSEUM/museum.htm> (17.7.).
- Selin P (1999) Turvevarojen teollinen käyttö ja suopohjien hyödyntäminen Suomessa. *Jyväskylä studies in biological and environmental science* 79, Jyväskylän yliopisto, 239s.
- Sigfusson TI (2003) Hydrogen possibilities and spin-offs in Iceland. In: Proc. Conf. Making hydrogen available to the public, 24.–25.4.2003, Reykjavik.
- Simmons MS (2005) *Twilight in the Desert – The coming Saudi oil shock and the world economy*. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 422p.
- Simola (1991) Julkinen kulutus ja palvelut. Luvun 7 kohta 7.8. julkaisuun Suomen energiatekniikan historia, Raportti 35, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Kone-tekniikan osasto, Hydrauliiikka / Tekniikan historia, Tampere, 14s.

- Simpura J (1982) Vapaan viinan aika – 50 vuotta suomalaista alkoholipolitiikkaa. Kirjayhtymä, Helsinki, 414s.
- SK (1941) Bensiinin korviketta – viemäriverdestä. Suomen kuvalehti 25(22)776–777.
- Smil V (1991) General Energetics. Wiley, New York, NY, USA, 369p.
- Smil V (1994) Energy in World History. Westview Press, Boulder, CO, USA, 300p.
- Solantausta Y & Asplund D (1980) Metanolin tuotanto ja käyttö polttoaineena Suomessa – Teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä. Tiedonanto 32, Poltto- ja voitelulaboratorio, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 101s.
- Solantausta Y, McKeough P & Sipilä K (1997) Biopolttonesteet. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 5/1997, Helsinki, 105s.
- Sperling D & Cannon JS (eds.) (2004) The Hydrogen Energy Transition – Moving Toward the Post Petroleum Age in Transportation. Elsevier, The Netherlands, 266p.
- Starkey P & Ndiame (eds) (1988) Animal power in farming systems. GATE (German Appropriate Technology Exchange)/GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), Vieweg, Germany, 363p.
- Stephenson J (1991) Learning from experiences with compressed natural gas as a vehicle fuel. CADDET Analysis Series No. 5, CADDET/IEA/OECD, Sittard, The Netherlands, 116p.
- Stolze R (1983) Automobiili – vuosisatamme kuvajainen. Omakustannus, Kouvolan kirjapaino, 207s.
- Stranges AN (2003) Germany's Synthetic Fuel Industry 1927-45. AIChE 2003 Spring National Meeting, New Orleans, LA, USA, 30/3–3/4 2003, 13p (paper) + 27p (presentation).
<<http://www.fischer-tropsch.org>>
- Strobel GA, Knighton B, Kluck K, Ren Y, Livinghouse T, Griffin M, Spakowicz D & Sears J (2008) The production of myco-diesel hydrocarbons and their derivatives by the endophytic fungus *Gliocladium roseum* (NRRL 50072). Microbiology 154: 3319–3328.
- Sudo S, Takahashi F & Takeuchi M (1989) Chemical properties of biomass. In: Kitani & Hall (1989), 892–933.
- Suominen M (2007a) Avaruudessa käytiin jo 15 vuotta ennen Sputnikia – V-2:n isä Wernher von Braun. Tähdet ja avaruus 3/07, 28–33.
- Suominen M (2007b) Titanissa on sisämeren kokoisia järviä. Tähdet ja avaruus 3/07, 38–41.
- Sun Y & Cheng J (2002) Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresource Technology 83:1–11.
- Sutton GP & Biblarz O (2000) Rocket propulsion elements. 7th ed., Wiley, USA, 751p.
- Sutton GP (2005) History of Liquid Propellant Rocket Engines. American Institute of Aeronautics & Astronautics, Reston, VA, USA, 909p.
- Suzuki T (1997) The Romance of Engines. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 468p.
- Svallner B (1981) Svenska bilar under åttio år. Esselte kartor, Stockholm, Sverige, 112s.
- Sveriges Regeringskansliet (2006) På väg mot ett oljefritt Sverige. Komissionen mot oljeberoende, Statastrådsberedningen, Regeringskansliet, Stockholm, Sverige, 89s.
<<http://www.regeringen.se/content/1/c6/07/57/91/b9f3b671.pdf>>
Englanninkielinen käännös: Making Sweden an oil-free society. Commission on oil independence, Stockholm, Sweden, 51p. <<http://www.sweden.gov.se/content/1/c6/06/70/96/7f04f437.pdf>>

- Sørensen B (2000) *Renewable Energy – Its physics, engineering, environmental impacts, economics & planning*. 2nd ed., Academic Press, London, UK, 912p.
- Talvitie Y (1924a) Puun hiilto ja kaasutus. *Teknillinen aikakauslehti* 14(10)483–489.
- Talvitie Y (1924b) Puun hiilto ja hartsin valmistus. WSOY, Porvoo, 546s.
- Talvitie Y (1930) Automobiilin polttoaineet ja kaasuttajat. WSOY, Porvoo, 264s.
- Talvitie A (1944) Kemiallinen teknologia, Ensimmäinen osa. WSOY, Porvoo, 580s.
- Talvitie A (1945a) Kemiallinen teknologia, Toinen osa. WSOY, Porvoo, 646s.
- Talvitie Y (1945b) Suomen kemiallisen teollisuuden kehitys. *Kemian keskusliiton julkaisuja* 5, Sanoma Oy, Helsinki, 139s.
- Tapio P (2002) The limits to traffic volume growth – The content and procedure of administrative futures studies on Finnish transport CO2 policy. *Acta Futura Fennica* no 8, Tulevaisuuden tutkimuksen seura, Turku, 234p.
- Tashtoush GM, Al-Widyan MI & Albatayneh AM (2007) Factorial analysis of diesel engine performance using different types of biofuels. *J. of Environmental Management*, in press, 11p.
- Taylor WF (1988) Fuels. Special section: The Next 50 years, *Air World* 40(3)29–30.
- Tesla (2007) Tesla Motorsin www-palvelin, www.teslamotors.com (18.7.).
- Theil S (2005) The Next Petroleum. *Newsweek*, August 8, 42–48.
- Thomas A (1980) *Trucks*. Hamlyn, London, UK, 160p.
- Thurston RH (1878) *A History of the Growth of the Steam Engine*. D.Appleton and company, New York, NY, USA, 490p. <<http://www.history.rochester.edu/steam/thurston/1878/>>
- Tickell J & Tickell K (1999) *From the Fryer to the Fuel Tank – The Complete Guide to Using Vegetable Oil as an Alternative Fuel*. 2nd ed., GreenTeach Publishing, Sarasota, FL, USA, 162p.
- Tilastokeskus (2005) *Energiatilasto 2004*. Tilastokeskus, Helsinki, 154s.
- TM (2002) Kiinnostaisiko vähän käytetty sähköauto? *Tekniikan Maailma* 7/2002, 135.
- TNO (2005) Euro 5 technologies and costs for Light-Duty vehicles – The expert panels summary of stakeholders responses. Report for European Commission DG ENV, TNO Science and Industry, Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Delft, The Netherlands, 61p.
- Tolmunen T (2006) “Narutaksin” vaiheita. *Hetku (Suomen linja-autohistoriallisen seuran lehti)* 4/2006, 11–14.
- Topcagic S & Minteer SD (2006) Development of membraneless ethanol/oxygen bio-fuel cell. *Electrochimica Acta* 51:2168–2172.
- Tuomela (2005) Näkymä Hubbertin huipulta. *Voima* 6/2005, verkkolehtiartikkeli: <http://www.voima.fi/content/view/full/1294>
- Turunen S (2005) *Biologia: Ihminen*. WSOY, Helsinki, 197s.
- UN (2000) *World Energy Assessment – Energy and the Challenge of Sustainability*. Goldemberg J (ed.), United Nations Development Programme (UNDP), United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA) and World Energy Council (WEC), UN, New York, NY, USA, 508p. <<http://www.energyandenvironment.undp.org/>>
- UNECE (2008) Report of the working party on pollution and energy on its fifty-fifth session. ECE/TRANS/WP.29/GRPE/55, 21 February 2008, Inland transport committee, World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, UN Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland, 21p. <<http://www.unece.org/trans/doc/2008/wp29grpe/ECE-TRANS-WP29-GRPE-55e.pdf>>

- UNEP (1992) *The World Environment 1972–1992*. Chapman & Hall, London, UK, 884p.
- Uola M (1998) *Räjähdeyt Suomessa – Historiaa mustasta ruudista 2000-luvulle*. Räjähdeyhdistys, Tampere, 266s.
- Uppenberg S, Zetterberg L & Åhman M (2001) *Climate impact from peat utilisation in Sweden*. Report IVL B1423. Viitattu: IPCC (2006)
- USGS (2007) *Mineral Commodities Summaries, January 2007*. US Geological Survey, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>
- Vakkilainen E (2000a) *Chemical recovery*. In: Gullichsen J & Fogelholm C-J (eds.) *Chemical Pulping. Papermaking Science and Technology*, Vol. 6B, Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI, Gummerus, Jyväskylä, B6–B34.
- Vakkilainen E (2000b) *Recovery boiler*. In: Gullichsen J & Fogelholm C-J (eds.) *Chemical Pulping. Papermaking Science and Technology*, Vol. 6B, Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI, Gummerus, Jyväskylä, B94–B132.
- Valanto J (1991a) *Liikenne*. Luvun 7 kohta 7.4 julkaisuun Suomen energiatekniikan historia. Raportti 33, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Hydrauliiikka / Tekniikan historia, Tampere, 48s.
- Valanto J (1991b) *Tilasto liikennevälineistä*. Teoksessa Eriksson ym. (1991), s. 73–106.
- Valtonen H (1999) *Messerchmitt BF 109 ja Saksan sotatalous*. Keski-Suomen ilmailumuseon julkaisuja 8, Gummerus, Jyväskylä, 347s.
- Vehviläinen O (1963) *Rajamäen tehtaas 1888-1963*. Tilgmann, Espoo, 408s.
- Verheye T (2000) *Alternative Fuels LPG. Auto-Oil II Cost-Effectiveness Study, WG 3, DG ENV, European Commission*, 15p.
- Vermet DA & Ferrone CW (1995) *A Review of Natural Gas Engine Development for the Fleet Operator*. In: Bata (ed.), 259–268.
- Verne J (1863) *Paris au XXe siècle*. (Alkuteos julkaistiin Ranskassa vasta 1994) Suom. Pariisi 1900-luvulla. Otava, Keuruu, 1995, 190s.
- Verne J (1874) *L'Île mystérieuse*. *Magasin d'Éducation et de Récréation*, 19(217) (1 January 1874) – 22(264) (15 December 1875). Suom. Salaperäinen saari, Otava, Kuopio, 1904, 222s.
- Viitaniemi M (1978) *I osa teoksessa Viitaniemi M & Mäkelä A (1978) Suomen linja-autoliikenteen historia*. Linja-autoliitto ry; Gummerus, Jyväskylä, 15–412.
- Vivian EC (1920) *A history of aeronautics*. Dayton history books online, <http://www.daytonhistorybooks.citymax.com/page/page/3259323.htm>
- Voitila T & Vaarnas K (toim.) (1972) *Fokus Tekniikka - Kertovasti kuvitettu tekniikan tietosanakirja, Osa 1*. Otava, Helsinki, 761s.
- Volpi E & Vafidis C (2007) *CNG Powertrain Technology for Passenger Cars*. Fiatin moottoritekniikan osaston edustajien esitelmä Ateenassa 29.5.2007, kalvosarja http://www.ecocity.gr/_static/page2/esperida_fiat/Constantinos%20Vafidis-Ta%20epivatika%20autokinita%20fysikou%20aeriu.pdf
- VTT (2001) *Energy visions 2030 for Finland*. VTT Energy, Edita, Helsinki, 237p.
- Väisänen TS, Martikainen P, Hellsten SK, Niskanen A, Huttunen J, Heiskanen M & Nenonen O (1996) *Importance of greenhouse gas emissions from Finnish hydropower production compared to other sources of electricity, with the Kemijoki water body as an example*. IAEA Advisory Group Meeting in Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Full Energy Chain for Hydropower, Nuclear Power and Other Energy Sources, Montreal, Canada, March 1996, 12p.

- Wahlström T (2008) Diesel som miljöbränsle. Allt om miljöbilar 2, 18–24.
- Wahlström T (2009) Gasen som rädder klimatet. Allt om miljöbilar 1, 22–31.
- von Weizsäcker E, Lovins AB & Lovins LH (1997) Factor Four – Doubling wealth, halving resource use – The new report to the Club of Rome. Earthscan, London, UK, 322p.
- Wereko-Brobby C Y & Hagen E B (1996) Biomass conversion and technology. UNESCO energy engineering series, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Wiley, UK, 203p.
- Westbrook MH (2005) The electric car – Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars. IEE Power and Energy Series 38, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 198p.
- Westman J & Oja H (1975) Kohti tähtiä. Gummerus, Jyväskylä, 196s.
- White WJ (1978) Airships for the Future. Revised edition, Sterling publishing co., New York, NY, USA, 160p.
- Whittaker RH & Likens GE (eds.) (1975) Primary productivity of the biosphere. Springer, Berlin. Viitattu: Ohtsubo K & Kainuma K: Biomass as food resource. In: Kitani O & Hall (1989), 83–96.
- Wikipedia (2009) The free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/>
- Williams KR (1966) An Introduction to Fuel Cells. Elsevier, Amsterdam, NL. Viitattu: Drapcho ym. 2008b.
- Williams M (2008) Traktorit – Yli 220 mallia eri maista. Parragon, Bath, UK, 320s.
- Wise DB & Cole L (2000) The new illustrated encyclopedia of automobiles. Greenwich Editions, London, UK, 559p.
- Woody T (2007) Have you driven a fjord lately? Business 2.0, August, 8(7)54-59.
- Wortham J (1979) Forget the Gas Pumps: Make your own fuel – Contains simple engine modifications and a legal way to make moonshine. Marathon international book company, Madison, IN, USA, 48p.
- Wuorela AA (1947) Maaöljytutkimuksen uusimmat saavutukset. Teknillinen aikakauslehti, 37(12)395-403.
- Wyman CE (ed.) (1996) Handbook on Bioethanol: Production and Utilization. Taylor & Francis, Washington, DC, USA, 424p.
- Yergin D (1991) The Prize – The Epic Quest for Oil, Money and Power. Simon & Schuster, UK, 914p.
- Zaloga SJ & Calow R (2003) V-2 Ballistic Missile 1942–52. New Vanguard 82, Osprey publishing, Oxford, UK, 48p.

LIITTEET

- Liite 1.** Sanasto, lyhenteet, määritelmät ja yksiköt
- Yleiset määritelmät
 - Kemikaaleja
 - Teho- ja energiayksiköitä ja muuntokertoimia
 - Muita yksiköitä
 - Säädökset
- Liite 2.** Liikenteen voimanlähteiden käyttöönoton kronologia
- Taulukko L2.1. Liikenteen voimanlähteiden ja energianlähteiden käyttöönoton kronologia
- Liite 3.** Liikenteen ympäristövaikutusten havaitsemisen ja rajoittamisen kronologia
- Liite 4.** Energiaresursseja koskevat liitetaulukot
- Taulukko L4.1. Suomen puuvarat
 - Taulukko L4.2. Puun runkojen vuosikasvu ja teollisuuden käyttämän runkopuun energiasisältö vuonna 2003
 - Taulukko L4.3. Teollisen puunkäytön jätteiden energiaresurssi vuonna 2003
- Liite 5.** Energiasisältöjä koskevat liitetaulukot
- Taulukko L5.1. Fossiilisten polttoaineiden LHV-lämpöarvoja
 - Taulukko L5.2. Biopolttoaineiden LHV-lämpöarvoja
 - Taulukko L5.3. Liikennepolttoaineiden energiasisältövertailuja
- Liite 6.** Polttoaineiden ominaisuuksia koskevat liitetaulukot
- Taulukko L6.1. Kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksia
 - Taulukko L6.2. Nestemäisten polttoaineiden ominaisuuksia
 - Taulukko L6.3. Kaasumaisten polttoaineiden ominaisuuksia
 - Taulukko L6.4. Energian varastointivälineiden ominaisuuksia
 - Taulukko L6.5. Eräiden ottomoottoreihin soveltuvien polttoaineiden fysikaalisia, kemiallisia ja moottoritekniisiä ominaisuuksia
 - Taulukko L6.6. Eräiden dieselmoottoreihin soveltuvien polttoaineiden fysikaalisia, kemiallisia ja moottoritekniisiä ominaisuuksia
 - Taulukko L6.7. Metanolin ominaisuuksia
 - Taulukko L6.8. Etanolin ominaisuuksia
 - Taulukko L6.9. Metaanin ominaisuuksia
- Liite 7.** Liikenteen energiankulutusta koskevat liitetaulukot
- Tieliikenteen energian kulutus ja päästöt Suomessa vuonna 2004
 - Liikenteen energian kulutus maailmassa, OECD-maissa, EU-25:ssa, Ruotsissa ja Suomessa vuonna 2004

LIITE 1.

Sanasto, lyhenteet, määritelmät ja yksiköt

a) Yleiset määritelmät

AC (alternating current)

Vaihtovirta, vaihtosähkö

AIP-moottori (air independent propulsion)

Lämpövoimakone, joka ei tarvitse polttoilmaa eli anaerobinen lämpövoimakone. Käyttö erityisesti sukellusveneissä. Esim. walterturbiini.

AKE

Ajoneuvohallintokeskus, LVM:n alainen virasto (www.ake.fi)

Alkoholikäyminen (alcohol fermentation)

Alkoholikäyminen = alkoholifermentaatio = käyminen; mikrobin katalysoima sokereiden muuntuminen alkoholeiksi, lähinnä etanoliksi
Alkylaattibensiini

Bensiiniä, jossa korkea oktaaniluku on saavutettu alkyloimalla, haarautuneiden alkaani-
en avulla, päinvastoin kuin tavallinen bensiini, jossa korkea oktaaniluku on saavu-
tettu aromaattisten ja muiden rengasmaisten yhdisteiden sekä eetterien ja ennen
lyijy-yhdisteiden avulla.

Alkylointi (alkylation)

Öljynjalostusprosessi, jossa tuotetaan haarautuneita, korkean oktaaniluvun, alkaa-
neita

B-synteesi

Bergius -synteesi, heterogeenisten synteettisten polttoaineiden (esimerkiksi B-die-
sel) valmistusmenetelmä, jossa vetyä käytetään hajottamaan biomassa ym. materiaali
korkeassa paineessa ja lämpötilassa.

B20/B100/Bn

Biodieselin ja fossiilidieselin seos eri tilavuusosuuksilla
(20 % biodieseliä / 100 % biodieseliä / n % biodieseliä). B100 = puhdas biodiesel.

Biodiesel

Vaihtoesteröimällä rasvahapoista ja alkoholeista muodostettu dieselmootoreihin
soveltuva polttoaine.

Bifuel

Ajoneuvo, jossa on 2 erillistä polttoainejärjestelmää, yleensä kaasumaisille ja neste-
mäisille polttoaineille (esim. metaani + bensiini), mutta myös kahdelle nestemäiselle
(esim. etanoli ja bensiini)

Biokaasutus (biogasification)

Mikrobiologinen kaasutusprosessi (mädätys), jossa lopputuotteina on metaani ja
hiilidioksidi.

BTG (biomass-to-gas)

Biomassasta valmistettu kaasumainen synteettinen polttoaine.

BTL (biomass-to-liquid)

Biomassasta valmistettu nestemäinen synteettinen polttoaine.

CAFE

Kaksoismerkitys: lyhenne 1970-luvulta peräisin olevasta USA:n autojen energiankulutusnormistosta (Corporate Average Fuel Economy) ja EU:n uudesta ilmansuojelustrategiasta (Clean Air For Europe).

CARB (California Air Resources Board)

Kalifornian osavaltion ilmansuojeluvirasto, joka on vastuussa ajoneuvojen päästönormeista (www.arb.ca.gov, www.driveclean.ca.gov).

CBG (compressed biogas)

Paineistettu biokaasu (metaani).

CEN (Comité Européen de Normalisation, European Committee for Standardization)

Euroopan standardoimisjärjestö, joka tuottaa EN-standardeja: vastuussa mm. polttoaineiden standardeista.
(www.cenorm.be)

CH (compressed hydrogen), myös CH₂

Paineistettu vety.

CMG (compressed methane gas)

Paineistettu metaani, jossa metaani voi olla mistä lähteestä tahansa, siis esim. biokaasusta, maakaasusta tai termisestä kaasutuksesta. Tämän käyttö on luontevinta silloin, kun on kyseessä useammanlaisen metaanin sekoitus, siis esimerkiksi biokaasu- ja maakaasuperäisen metaanin sekoitus, jota käytetään Etelä-Ruotsissa (nimitys siellä on kuitenkin ”fordonsgas” eli liikennekaasu).

CNG (compressed natural gas)

Paineistettu maakaasu (metaani).

CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe)

Öljy-yhtiöiden ympäristö-, terveys- ja turvallisuusjärjestö, jonka päämaja on Brysselissä. Sen jäsenet ovat yhtiöitä, jotka harjoittavat raakaöljyn jalostamista Euroopassa.

CTG (coal to gas)

Kivihiilestä valmistettu kaasumainen synteettinen polttoaine.

CTL (coal to liquid)

Kivihiilestä valmistettu nestemäinen synteettinen polttoaine.

DC (direct current)

Tasavirta, tasavirta.

DI (direct injection)

Suoraruiskutusmoottori. Diesel-moottorityyppi, jossa polttoaine suihkutetaan suoraan sylinteriin. Käytössä alun perin raskaan liikenteen moottoreissa, mutta yleistynyt myös henkilöautoissa.

DME

Dimetyylieetteri, dieselmootoreihin soveltuva polttoaine.

Dualfuel

Dieselmoottori, jonka pääpolttoaine on kaasu, mutta joka sytytetään nestemäisellä polttoaineella, 2 erillistä polttoainejärjestelmää.

E10/E85/En

Etanolin ja fossiilisen polttoaineen (yleensä bensiini, mutta myös dieselöljy) seos eri tilavuusosuuksilla (10 % etanolia / 85 % etanolia / n % etanolia). E100 = puhdas etanoli.

ea

Ennen ajanlaskun alkua.

EC (external combustion ja European Community)

Ulkoisesti lämmitettävä lämpövoimakone (mäntämoottori tai turbiini). Ja Euroopan yhteisö (EY).

ECE (external combustion engine ja Economic Commission for Europe)

Ulkoisesti lämmitettävä mäntämoottori, esim. stirlingmoottori ja höyrykone. Ja YK:n Euroopan talouskomissio UNECE eli UN/ECE (Economic Commission for Europe, www.unece.org).

Ekotoksinen (ecotoxic)

Myrkyllinen eliöille (ja ihmisille).

EN nro

Eurooppalainen CENin standardi.

EPA (Environmental Protection Agency)

USA:n liittovaltion ympäristönsuojeluvirasto, joka on vastuussa mm. ajoneuvojen päästö- ja kulutusnormeista (www.epa.gov).

ESA (European Space Agency) <http://www.esa.int/>

ETBE

Etyylitertiäributyylieetteri, ottomootoreihin soveltuva polttoaine, jota käytetään oktaanilukua korottavana ja happea tuovana lisäaineena.

EtOH

Etanoli (etyylialkoholi).

EU (European Union)

Euroopan unioni (europa.eu).

FAEE (fatty acid ethyl ester)

Etanolipohjainen biodiesel.

FAME (fatty acid methyl ester)

Metanolipohjainen biodiesel.

FC (fuel cell)

Polttokenno, kts. MFC.

Fermentaatio (fermentation)

Käyminen; mikrobien katalysoima yhdisteiden muokkaus esim. alkoholeiksi (alkoholikäyminen) tai karboksyylihapoiksi (happokäyminen).

FFV (flexible fuel vehicle)

Useamman polttoaineen (esimerkiksi etanoli ja bensiini) suurina osuuksina tai seoksina käyttöön pystyvä ajoneuvo, jossa on 1 polttoainejärjestelmä (flexible fuel vehicle).

FT-synteesi

Fischer-Tropsch -synteesi, eräs kaasutus pohjainen heterogeenisten synteettisten polttoaineiden (esimerkiksi FT-diesel) valmistusmenetelmä.

Gasoholi (gasohol)

Bensiinin ja etanolin seos, jossa etanolia on vähemmän kuin bensiiniä, ja tarkoitettu tavanomaisten bensiinikäyttöisten ajoneuvojen polttoaineeksi ilman muutoksia, esim. E5, E10, E23, E25, E26. Suomessa sitä kutsuttiin 1930- ja 1940-luvulla bentyyliksi (E25).

GTL (gas to gas)

Maakaasusta valmistettu kaasumainen synteettinen polttoaine (esim. DME).

GTL (gas to liquid)

Maakaasusta valmistettu nestemäinen synteettinen polttoaine.

ΔH_T (change in specific enthalpy)

Entalpiamuutos reaktiossa lämpötilassa T ilmoitettuna Kelvin-asteina. Miinusmerkkinen muutos tarkoittaa eksotermistä eli lämpöä vapauttavaa reaktiota; Plusmerkkinen muutos tarkoittaa endotermistä eli lämpöä sitovaa reaktiota.

Haihtuvuus (volatility)

Nestemäisten polttoaineiden höyrystyvyys.

HHV (higher heating value)

Polttoaineen ylempi/kalorimetrinen lämpöarvo.

Hiilivety

Orgaaninen yhdiste, joka sisältää vain hiiltä ja vetyä.

Hybridi

Ajoneuvo, jossa on vähintään 2 erilaista moottoria.

Hydraatio (hydration)

Veden (H_2O) yhdistyminen yhdisteen kanssa uudeksi yhdisteeksi.

Hydraus, hydrogenaatio, vedytys (hydrogenation)

Vedyn (H_2) yhdistyminen yhdisteen kanssa toiseksi yhdisteeksi, esimerkiksi pitkäketjuisten hiilivetyjen pilkkominen (vetykrakkaus).

Hydrolyysi (hydrolysis)

Veden (H_2O) avulla tapahtuva yhdisteen hajoaminen.

Hytaani (hythane)

Metaanin ja vedyn seos.

Hyötysuhde (efficiency)

Lämpövoimakoneen tuottaman energian ja siihen syötetyn energian suhde eli tuotetun mekaanisen energian määrä polttoaineen energiayksikköä kohti.

Höyrykrakkaus (steam cracking)

Vesihöyryn avulla tapahtuva yhdisteen pilkkominen.

Höyrynpaine (vapour pressure)

Lämpötilasta ja paineesta riippuva nestemäisen polttoaineen höyrystymisaste.

Höyryreformointi (steam reforming)

Höyryn avulla tapahtuva reformointi, erityisesti maakaasun metaanin muuntaminen vedyksi ja hiilimonoksidiksi eli synteetikaasuksi.

IBA (iso butyl alcohol)

Isobutanoli (iso-butyyli-alkoholi)

IC (internal combustion)

Sisäisesti lämmitettävä lämpövoimakone (mäntämoottori tai turbiini).

ICE (internal combustion engine)

Sisäisesti lämmitettävä mäntämoottori.

IDI (indirect injection)

Etukammimoottori. Diesel-moottorityyppi, jossa polttoainetta ei suihkuteta suoraan sylinteriin, vaan sylinteriin yhdistettyyn esikammioon, jossa palaminen käynnistyy. Käytössä kevyen liikenteen moottoreissa.

Ilma/pa-suhde (stoichiometric air-fuel ratio)

Ilma-polttoainesuhde kertoo paljonko ilmaa tarvitaan polttoaineen täydellistä palamista varten. Pieni arvo tarkoittaa, että ilmaa tarvitaan vähän eli sylinteriin mahtuu enemmän polttoainetta. Lambda-arvo (λ) yksi tarkoittaa stoikiometristä ilma-polttoainesuhdetta, joka vaihtelee polttoaineesta riippuen. Ykköstä suurempi arvo tarkoittaa stoikiometristä laihempaa seosta eli suhteellista ilmaylimäärää. Ykköstä pienempi luku tarkoittaa stoikiometristä rikkaampaa seosta eli suhteellista ilma-alijäämää. Lambda-arvoa säätämällä voidaan säätää pakokaasujen eri päästökäkomponentteja ja samalla myös moottorin tehoa ja polttoaineen kulutusta.

IPA (iso propyl alcohol)

Isopropanoli (iso-propyyli-alkoholi)

Jalostus (refining)

Lähtöaineiden muuntaminen moniksi hyödynnettäviksi tuotteiksi, esim. öljynjalostus.

Kaasutus (gasification)

Tarkoittaa termistä kaasutusta. (Termi biokaasutus puolestaan tarkoittaa mikrobiologista mädätysprosessia. Joskus termillä kaasutus voidaan virheellisesti tarkoittaa myös biokaasutusta.)

Karakteristinen päästö

Kaikilla polttoaineilla on niiden kemiasta johtuvat tyypilliset päästökomponentit, joita savukaasuissa epätäydellisestä palamisesta johtuen esiintyy. Kaasumaisilla polttoaineilla itse polttoaineen sisältämät kaasut ovat karakteristisia päästöjä, sillä osa aina pääsee palamatta moottorin läpi. Muilla polttoaineilla karakteristiset päästökomponentit ovat yleensä rakenteeltaan kemiallisesti hyvin lähellä polttoainetta olevia kaasuja, esimerkiksi formaldehydi metanolilla ja asetaldehydi etanolilla.

Karsinogeeninen (carsinogenic)

Syöpää aiheuttava.

Katalyytti (catalyst)

Yhdiste, joka nopeuttaa reaktiota siinä itse muuttumatta ja kulumatta. Entsyymi on biologinen katalyytti.

Katalyyttinen krakkaus (catalytic cracking)

Yhdisteiden pilkkominen katalyyttien avulla, yleensä öljynjalostamossa ja korkeassa lämpötilassa.

KTM

Kauppa- ja teollisuusministeriö (www.ktm.fi).

Kompressiosuhde (compression ratio)

Mäntämoottorin sylinterin työsyklin maksimi- ja minimitalavuuksien suhde. Korkea kompressiosuhde mahdollistaa korkean hyötysuhteen.

Krakkaus (cracking)

Yhdisteiden pilkkominen lämmön (lämpökrakkaus), katalyyttien (katalyyttinen krakkaus), vesihöyryn (höyrykrakkaus) tai vedyn (vetykrakkaus) avulla, yleensä öljynjalostamossa. Korkea lämpötila on käytössä kaikissa krakkausprosesseissa ja katalyyttejä käytetään myös vety- ja höyrykrakkauksessa.

Kuivatilaus (destructive distillation)

Yhdistetty pyrolyysi ja tilaus.

LBG (liquified biogas)

Nesteytetty biokaasu (metaani).

Leimahduspiste (flash point)

Alin lämpötila, jossa polttoaineen höyryt voivat syttyä liekistä/kipinästä standardiolosuhteissa.

LDME (liquified DME)

Nesteytetty DME.

LEV (low emission vehicle)

Kalifornian ajoneuvoluokkien neljänneksi vähäpäästöisin eli nykyään kaikkein runsaspäästöisin sallittu ajoneuvo, esim. tavanomaiset katalysaattorilla varustetut bensiini- ja dieselaajoneuvot.

LH (liquified hydrogen), myös LH2

Nesteytetty vety.

LHV (lower heating value)

Polttoaineen tehollinen (alempi) lämpöarvo (= HHV - höyrystyvän veden höyrystymislämpö).

LMG (liquified methane gas)

Nesteytetty metaani, jossa metaani voi olla lähtöisin mistä lähteestä hyvänsä, tai näiden sekoitus (kts. CMG).

LNG (liquified natural gas)

Nesteytetty maakaasu (metaani).

LP (liquified propane)

Nesteytetty propaani.

LPG (liquified petroleum gas)

Nestekaasu = nesteytetty propaani + butaani.

LVM

Liikenne- ja viestintäministeriö (www.mintc.fi); vanha nimi Liikenneministeriö (LM).

Lämpöarvo (heating value)

Polttoaineen täydellisestä palamisesta saatava lämpöenergia (HHV) tai poisluettuna höyrystyvän veden höyrystymislämpö (LHV).

Lämpökrakkaus (thermal cracking; öljynjalostuksessa myös visbreaking)

Lämmön avulla tapahtuva yhdisteen pilkkominen.

Lämpövoimakone

Kone, joka tuottaa lämmöstä mekaanista energiaa.

M10/M85/Mn

Metanolin ja bensiinin seos eri tilavuusosuuksilla (10 % metanolia / 85 % metanolia / n % metanolia). M100 = puhdas metanoli.

MFC (microbial fuel cell)

Mikrobipolttokeno = mikrobiologinen polttokenno = bioparisto, kts. FC

MeOH

Metanoli (metyylialkoholi)

MON (motor octane number)

Oktaaniluku mitattu suuressa rasituksessa.

Mutageeninen (mutagenic)

Aiheuttaa muutoksia DNA:ssa ja sitä kautta perimässä.

Mädätys

Mädätys = anaerobinen hajotus (anaerobic digestion) = happofermentaatio; mikrobien katalysoima ilman hapen läsnäoloa tapahtuva rasva- ja proteiiniyhdisteiden muokkaaminen karboksyylihapoiksi (ja edelleen metaaniksi ja vedyksi, jolloin koko prosessi = biokaasutus).

NA (not available)

Tieto ei saatavissa käytetyistä lähteistä.

NARA (US National Archives and Records Administration) <http://www.nara.gov>

NASA (US National Aeronautics and Space Administration) <http://www.nasa.gov/>

NBA (normal butyl alcohol)

Suoraketjuinen butanoli eli n-butanoli (n-butyylialkoholi)

NPA (normal propyl alcohol)

Suoraketjuinen propanoli eli n-propanoli (n-propyylialkoholi)

Oktaaniluku (octane number)

Polttoaineen soveltuvuuden mittari ottomoottoriin. Korkea oktaaniluku tarkoittaa suurta puristuskestävyyttä ja hyvää ottomoottoripolttoainetta. Käytetään kahta eri määrittystapaa: RON ja MON, joista RON on yleensä korkeampi. Suomessa ilmoitetaan pumpuissa RON-arvo. USA:ssa pumpuissa käytetään RONin ja MONin keskiarvoa eli $(RON+MON)/2$ eli $(R+M)/2$.

Ominaisenergia (specific energy)

Energiantuotanto moottorissa syötetyn ilman yksikköä kohti eli polttoaineen LHV jaettuna ilma/pa-suhteella [LHV/ kg ilmaa]. Mäntämoottorissa se kertoo kuinka paljon energiaa on saatavissa yhden syklin aikana.

PEM (proton exchange membrane)

Protoneja läpäisevä kalvo, jota käytetään polttokennoissa ja elektrolyysereissä.

Polttokenno

Polttokenno-termi kuvaa teknologian vääriin, koska kyseessä ei ole polttoa ja lämpöä hyödyntävä laite, vaan laite, joka konvertoi polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköksi. Se siis ei ole lämpövoimakone.

Polttomoottori

Polttomoottorin määritelmä suomessa on vakiintunut asiaa huonosti kuvaavaksi eli se ei tarkoita kaikkia polttoaineen polttoon perustuvia moottoreita vaan ainoastaan sisäisesti lämmitettäviä IC-koneita (internal combustion engine), joissa poltto tapahtuu työsylinterin tai työkamion sisällä. EC-koneet kuten höyrykone, kuuma-ilmakoneet ja kuumakaasukoneet jäävät sen määritelmän ulkopuolelle eikä niillä ole suomen kielessä lainkaan yhteistä määritelmää.

PPO20/PPO90/PPO_n (pure plant oil)

Kasviöljyn ja fossiilidieselin seos eri tilavuusosuuksilla (20 % kasviöljyä / 90 % kasviöljyä / n % kasviöljyä). PPO100 = pelkkää kasviöljyä.

Primäärienergia (primary energy)

Luonnosta suoraan saatava energianlähde, esimerkiksi puu, raakaöljy, raakamaakaasu, josta valmistetaan hyödynnettäviä sekundäärienergiamuotoja.

PTG (peat to gas)

Turpeesta valmistettu kaasumainen synteettinen polttoaine.

PTL (peat to liquid)

Turpeesta valmistettu nestemäinen synteettinen polttoaine.

Pyrolyysi (pyrolysis)

Vähähappisissa olosuhteissa ja normaalipaineessa lämmön avulla tapahtuva orgaanisten yhdisteiden hajottaminen. Lämmön avulla tapahtuvien yhdisteiden hajoamisprosessien yleisnimi on termolyysi (thermolysis).

REE (rape ethyl ester)

Rypsietyyliesteri ja rapsietyyliesteri, FAEE-biodiesel-lajeja.

Reformointi (reforming)

Yhdisteiden muuntaminen kemiallisesti toisiksi yhdisteiksi, erityisesti öljyteollisuudessa matalaoktaanisen naftan konvertointi korkeaoktaaniseksi bensiiniksi, yleensä katalyyttien avulla.

Reformulointi (reformulation)

Seoksen muodostaminen useista komponenteista (ilman kemiallisia reaktioita) yleensä öljynjalostuksen yhteydessä, jolloin tuotannon jakeita yhdistetään lisäainesten kanssa toivottujen laatuominaisuuksien saavuttamiseksi. Reformuloitu bensiini ja dieselöljy tarkoittavat normaalia puhtaammin palavia bensiiniä ja dieselöljyä.

RME (rape methyl ester)

Rypsimetyyliesteri ja rapsimetyyliesteri, FAME-biodiesel-lajeja.

RON (research octane number)

Oktaaniluku mitattuna vähäisessä rasiuksessa. Suomessa polttoainepumpuissa ilmoitetaan tämä arvo.

RVP (Reid Vapor Pressure)

Höyrynpaine mitattuna standardimenetelmällä ASTM D323 lämpötilassa 37,8 °C:ssa (100 °F) ja höyry-neste-suhteessa 4:1. Yksi polttoaineen höyrystyvyyden mittari. Se ei ole kaikkein havainnollisin mittari, mutta se on yleisesti käytetty ja siten sen mittauservoja on helpoimmin löydettävissä kirjallisuudessa.

SBG (synthetic biogas)

Kaasutusperäinen (terminen kaasutus) tai muilla termisillä synteesimenetelmillä valmistettu metaani puusta tai muusta uusiutuvasta biomassasta, vrt. SNG.

Sekundäärienergia (secondary energy)

Primäärienergiasta muokattu energiamuoto, esimerkiksi sähkö, bensiini, vety.

Setaaniluku (cetane number)

Polttoaineen soveltuvuuden mittari dieselmoottoriin. Korkea setaaniluku tarkoittaa nopeaa syttymistä ja hyvää dieselpolttoainetta.

SNG (synthetic natural gas tai substitute natural gas)

Kaasutusperäinen (terminen kaasutus)) tai muilla termisillä synteesimenetelmillä valmistettu metaani kivihiilestä, turpeesta tai muista uusiutumattomista raaka-aineista, vrt. SBG.

Stoikiometrinen (stoichiometric)

Teoreettinen kemiallisen reaktioyhtälön mukainen reaktio, esim. hiilivetyjen täydellinen palaminen hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi siten, että happea ei jää yli.

TLEV (transitional low emission vehicle)

Kalifornian ajoneuvoluokkien korkeapäästöisin luokka, joka on kielletty vuodesta 2004 alkaen.

SULEV (super ultra low emission vehicle)

Kalifornian ajoneuvoluokkien toiseksi vähäpäästöisin ajoneuvo, esim. metaaniajoneuvot.

Synteesikaasu (synthesis gas)

Vedyn (H_2) ja hiilimonoksidin (CO) seos.

Syttymisrajat (flammability limits)

Minimi- ja maksimikonsentraatio polttoainetta, joka voi syttyä ja palaa ilmassa.

TBA (tertiary butyl alcohol)

Tert-butanoli eli t-butanoli eli tertiaarinen butanoli (tert-butyli-alkoholi).

Teho (power)

Aikayksikössä tuotettu energiamäärä [$W = J/s$].

Terminen kaasutus (gasification) = kaasutus

Korkeassa lämpötilassa tapahtuva kiinteän tai nestemäisen raaka-aineen muuttaminen tuotekaasuksi, jonka pääkomponentit ovat hiilimonoksidi, vety ja metaani. Normaalisti termi kaasutus tarkoittaa nimenomaan termistä kaasutusta.

Tislaus (distillation)

Useasta yhdisteestä koostuvan nesteen komponenttien erottaminen höyrystämällä perustuen komponenttien erilaiseen höyrystymispisteeseen.

Toksinen (toxic)

Myrkyllinen ihmisille (ja muille eliöille; ekotoksinen).

UE (RE = renewable energy)

Uusiutuva energia.

ULEV (ultra low emission vehicle)

Kalifornian ajoneuvoluokkien kolmanneksi vähäpäästöisin ajoneuvo, esim. E85-ajoneuvot ja parhaat hybridit.

UN (United Nations)

Yhdistyneet kansakunnat eli YK.

Vetykrakkaus (hydrocracking)

Vedyn (H_2) avulla tapahtuva yhdisteen pilkkominen.

Vetykäsittely (hydrotreating)

Vedyn (H_2) avulla tapahtuva epäpuhtauksien, esim. O, S, N, alkeelit, poistaminen.

WIG (Wing-in-Ground)

Pintaliitäjä, patosiipialus, eräs tyyppi maaefektialuksia (yleisin on ilmatyynyalus)

ZEV (zero emission vehicle)

Kalifornian ajoneuvoluokkien kaikkein vähäpäästöisin eli ajonaikaisesti päästötön ajoneuvo, esim. sähköajoneuvot.

b) Kemikaaleja

CH_4

Metaani (kasviuonekaasu) (ei toksinen)

CO

Hiilimonoksidi eli häkä (hiilihappoa muodostava ja sitä kautta happamoittava, hiilidioksidia muodostava ja sitä kautta ilmastoa lämmittävä, toksinen, otsonia muodostava ja sitä kautta toksinen ja ilmastoa lämmittävä)

CO_2

Hiilidioksidi (kasviuonekaasu)

HC (hydrocarbons)

Hiilivety: orgaaninen yhdiste, joka sisältää vain hiiltä ja vetyä

HCHO

Formaldehydi

N_2O

Typpioksiduuli = dityppioksidi = ilokaasu (kasviuonekaasu, rehevöittävä)

NO_x

Typhen oksidit, lähinnä typpimonoksidi NO ja typpidioksidi NO_2 (typpihappoa muodostava ja sitä kautta happamoittava, otsonia muodostava ja sitä kautta toksinen ja ilmastoa lämmittävä, rehevöittävä)

NMHC (non-methane hydrocarbons)

Hiilivedyt metaania lukuunottamatta.

NMVOC

(non-methane volatile organic compounds) = NMOG (non-methane organic gases)

Haihtuvat (kaasumaiset) orgaaniset yhdisteet metaania lukuunottamatta (osa toksisia ja kasviuonekaasuja)

O_3

Otsoni (kasviuonekaasu, toksinen)

PAH (polyaromatic hydrocarbon) = PNA (polynuclear aromatics)

Polyaromaattinen hiilivety (monet toksisia)

PM₁ / PM_{2,5} (particulate matter)

Halkaisijaltaan korkeintaan 1 µm:n / 2,5 µm:n pienhiukkaset (toksisia)

R (radical)

Hiilivetyradikaali.

Raskasmetallit

(toksisia)

SO_x

Rikin oksidit, lähinnä rikkidioksidi SO₂ ja rikkitrioksidi SO₃ (rikkihappoa muodostava ja sitä kautta happamoittava, rikkiaerosoleja muodostava ja sitä kautta ilmastoa viilentävä)

VOC (volatile organic compounds)

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet eli kaasumaiset orgaaniset yhdisteet ja nestemäisten orgaanisten yhdisteiden höyryt, sisältää haihtuvat hiilivedyt

c) Teho- ja energiayksiköitä ja muuntokertoimia

TEHON YKSIKÖITÄ:

W Watti = J/s

W_e watin sähköteho

W_m watin mekaaninen teho

W_t watin lämpöteho

W_{pa} watin polttoaineteho

hv hevosvoima = 746 W (huom. on myös muita hevosvoimaksi nimitettyjä yksiköitä)

ENERGIAN YKSIKÖITÄ:

J joule

Wh wattitunti = 3600 J

MWh_{pa} / MJ_{pa} polttoaineen energiasältö

toe ekvivalenttinen öljytonni, raakaöljytonnin keskimäärin sisältämä energiamäärä = 41,87 GJ

b barreli = (raakaöljy)tynnyri = 42 gallonia = 159 litraa; vastaa 0,1364 toe = 5,7 GJ

MUUNTOKERTOIMIA:

	toe	MWh	GJ
toe =	1	11,63	41,87
MWh =	0,086	1	3,6
GJ =	0,02388	0,2778	1

KERTOIMIA:

k	kilo	10 ³	T	tera	10 ¹²
M	mega	10 ⁶	P	peta	10 ¹⁵
G	giga	10 ⁹	E	eksa	10 ¹⁸

d) Muita yksiköitä

brt

Bruttorekisteritonni, laivan rungon tilavuuden mitta: $1 \text{ brt} = 2,83 \text{ m}^3$ (vrt. nrt)

CO_2^{ekv}

Hiilidioksidiekvivalentti: ilmoittaa minkä tahansa kasvihuonekaasun määrän suhteutettuna sen kasvihuonekaasuvaikutuksen voimakkuuteen (GWP = greenhouse warming potential) hiilidioksidiin verrattuna

ea

Ennen ajanlaskun alkua (aiemmin eKr)

ha

Hehtaari = $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 10.000 \text{ m}^2 = 0,01 \text{ km}^2$

hl

Hehtolitra = $100 \text{ litra} = 0,1 \text{ m}^3$, mitta puukaasuautoissa käytetyille pilkkeille tai puuhiilille, vastaa säkillistä

i-m^3

Irtokuutiometri, hakkeille 1 i-m^3 on noin $0,4 \text{ k-m}^3$, energiasältönä puukaasuautojen pilkkeille 1 i-m^3 on noin $1 \text{ MWh} = 3600 \text{ MJ}$ ja puuhiilille 1 i-m^3 on noin 5000 MJ

kp = 9,80665 N

Kilopondi, voiman vanha yksikkö, jota käytetään raketti- ja suihkumoottoreiden voimakkuuden mittana tehon sijaan. Edellytyksenä ilmaan nousulle on, että työntövoima kilopondeina on suurempi kuin ajoneuvon massa kilogrammoina.

k-m^3

Kiintokuutiometri, puumäärän mitta. Vastaa noin 2 MWh :n energiasältöä (riippuu puulajista).

Mach

Äänen nopeus

m^3

Kuutiometri, puun tapauksessa tarkoittaa kiintokuutiometriä (k-m^3)

Nm^3

Normaalikuutio eli kuutiometri kaasua ”normaali”olosuhteissa: $0 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$. Vrt. Sm^3 , joka tarkoittaa maapallon todellisia normaaleja eli keskimääräisiä olosuhteita: Nm^3 on kuitenkin tullut teollisuudessa yleiseen käyttöön ja Sm^3 :n käyttö on harvinaista. Esim. metaanille $1 \text{ Sm}^3 \approx 1,05 \text{ Nm}^3$. Huom. N tässä siis ei tarkoita voiman perusyksikköä newtonia (tältä sekoittumisongelmalta vältyttäisiin, jos käytettäisiin Sm^3 -yksikköä). Vaihtoehtoinen merkintä nm^3 (jossa sekoittumisvaara nanon kanssa).

nrt

Nettorekisteritonni, laivan hyötylastitilan tilavuuden mitta, $1 \text{ nrt} = 2,83 \text{ m}^3$ (vrt. brt)

p-%

Painoprosentti

p-m³

Pinokuutiometri, mitta haloille, 1 p-m³ eli motti on noin 0,65 k-m³, koivuhalkojen energiasisältö 1 p-m³ on noin 1,5 MWh = 5400 MJ

ppm (parts per million)

Miljoonasosa

rpm (rounds per minute)

Moottorin kierrosnopeus: kierrosta minuutissa

Sm³

Standardikuutio eli kuutiometri kaasua maapallon keskimääräisissä olosuhteissa:
15 °C, 1 atm = 1,01³ bar, vrt. Nm³.

t-%

Tilavuusprosentti

LIITE 2.

Liikenteen voimanlähteiden käyttöönoton kronologia

Tiedot ovat peräisin hyvin monesta eri lähteestä ja monet ovat epävarmoja. Päälähteet ovat Cleveland (2004), Smil (1991, 1994), Keskinen (1993a-b), Saraoja (1935), Voitiola & Vaarnas (1972), Boyle ym. (2003), Kirk & Othmer (1991-1998), Lampinen (2004d) ja Wikipedia (2009). Kunkin primäärienergiamuodon ensimmäinen käyttö on alleviivattu. Ihmislajien sekä keksijöiden ja muiden henkilöiden nimet on kirjoitettu kursivilla.

1) Esihistoriallinen aika (2.000.000 eaa – 3000 eaa)

- 2.000.000 eaa (*Australopithecus Africanis*, *Homo Habilis*) (Itä-Afrikka)
 - **Biovoima:** ihmislisävoima (kiinteä ja nestemäinen ruoka)
- 500.000 eaa (*Homo Erectus*) (Kiina, Afrikka)
 - Biomassa (puu ja muut kasvit): tulen teko ja puuhiilen (1. sekundääribiopolttoaine) valmistus (kiinteä arina; 1. polttoteknologia)
- 70.000 eaa (*Homo Sapiens*) (Eurooppa)
 - Nestemäinen bioenergia valaistuksessa (eläinrasva, myöhemmin myös kasviöljyt ja mehiläisvaha)
- 60.000 eaa (*Homo Sapiens*) (Kaakkois-Aasia)
 - **Vesivoima**/biovoima: jokilautat
 - **Vuorovesivoima**/biovoima: merenrantalautat
 - **Merivirtavoima**/biovoima: avomerilautat
- 10.000 - 3000 eaa (*Homo Sapiens Sapiens*) (globaali)
 - Kasviöljyjen käyttöönotto valaistuksessa öljylampun avulla: 10.000 eaa (Lähi-itä)
 - Etanolin valmistus fermentaatiolla juomakäyttöön: 7000 eaa (Kiina)
 - Biovoima eläinlihasvoimalla: 6000 eaa
 - Biovoima kelkkojen avulla: 5000 eaa
 - **Kivihiili:** tilalämmitys ja ruoan valmistus, 4000 eaa (Kiina)
 - **Tuulivoima:** purjelautta, 3500 eaa (Egypti) (myöhemmin purjevene ja -laiva) (soutu/purjelautat olivat ensimmäisiä hybridiajoneuvoja)
 - Biovoima: pyörä ihmis- ja eläinvoiman välittäjänä vaunuissa ym., 3500 eaa (Mesopotamia, Syyria)
 - Vesivoima/vuorovesivoima/merivirtavoima/tuulivoima/biovoima: veneet, 3100 eaa (Egypti)
 - Spriin valmistus tislaamalla, 4. vuosituhat eaa (Babylonia)
 - Biovoima: kompressiosytytteinen mäntämoottori perinteisessä käsikäyttöisessä tulen sytyttimessä, sylinterinä bambu ym. (Kaakkois-Aasia, keksinnön ajankohdasta ei tunneta, mutta se periytyy muinaisilta ajoilta)

2) Historiallisen ajan alku: vanha aika (3000 eaa – 400)

- 3000 eaa – 0 eaa
 - Pyrolyysiöljy/bioöljy: puun pyrolyysi, mm. metanolia (balsamointikäyttöön), 3000 eaa (Egypti)
 - **Raakaöljy:** tilalämmitys, valaistus ja voiteluaine, 3000 eaa (Mesopotamia), raakaöljyn jalostus lampuihin ja sisälämmitykseen, 2200 eaa (Kiina)

- **Maakaasu:** valaistus, 3000 eaa (Lähi-itä)
- Vesivoima/vuorovesivoima/merivirtavoima/tuulivoima/biovoima: laivat, 2500 eaa (Välimeri), soutu/purjelaivat, esim. kaleerit
- Biovoima savukaasulla: kaasuturbiini, mahdollisesti Babyloniassa ja Egyptissä 2000 eaa (tempelikäyttö, esim. ovien liikuttelu, nykyisin koristekäytössä olevan enkelikellon tapaan)
- Tuulivoima maaliikenteessä: purjevaunu (1. auto), 1800 eaa (Egypti)
- Staattinen sähkö (meripihkalla), 1500 eaa (Kreikka)
- Tuulivoima: 1. lentävä kone, leija, 1000 eaa (Kiina)
- Kaasumainen bioenergia: biokaasu (suokaasu) kylpyveden lämmitykseen, 1000 eaa (Assyria)
- Ilmakompressori: palkeet n. 1000 eaa (Lähi-itä)
- Raideliikenne ihmislihasvoimalla (Diolkos): 600 eaa (Korintin kannas, Kreikka, oli käytössä 900-luvulle asti)
- Eläinvoima ilmaliikenteessä (kirjekyyhkyt): mahdollisesti 500-l eaa (Persia)
- Biovoima: höyrysuihkun käyttö lennättämään puista leikkilintua, suihkumoottorin ja tykin edeltäjä, 400 eaa (*Archytas*, Tarentum, Kreikka)
- Katapultti: 350 eaa (Syracuse, Sisilia, Kreikka)
- Sähköparisto: mahdollisesti 250 eaa (Mesopotamia) (Bagdadin paristo)
- Nosteen ymmärtäminen (Arkhimedeen laki): 250 eaa (*Arkhimedes*, Syracuse, Sisilia, Kreikka)
- Metalliset hammaspyörät: 250 eaa (*Arkhimedes*, Syracuse, Sisilia, Kreikka)
- Mäntöjen käyttö (pumpuissa): 240 eaa (*Ktesibios*, Alexandria, Kreikka)
- Paineilman käyttö voimanlähteenä, esim. paineilmatykki: 240 eaa (*Ktesibios*, Alexandria, Kreikka), pneumatiikan teorian perustaja
- Hydrauliiikan käyttö voimanlähteenä, esim. hydraulinen nosturi: 240 eaa (*Ktesibios*, Alexandria, Kreikka), hydrauliiikan teorian perustaja
- Kanava: 214 eaa (Lingqu, Kiina)
- Hissi ihmis- ja eläinlihasvoimalla sekä vesivoimalla: 200-l eaa (Rooma, Kreikka ja Egypti)
- Kuumailmapallo: 200 eaa (*Kongming*, Kiina)
- Metallisten hammaspyörien käyttö monimutkaisessa vaihteistokoneistossa (Antikytheran kone): n. 100 eaa (mm. *Posidonius*, Rhodos, Kreikka) (samaa aikaan myös Kiinassa)
- Raideliikenne eläinvoimalla: 100 eaa (Kreikka, Rooma, Malta)
- 0–400
 - Biovoima: höyryturbiini (reaktioturbiini, suihkumoottorin toimintaperiaate), n. 50 (*Heron*, Alexandria, Kreikka)
 - Paineilmamoottori (Heronin lähde) veden suihkuttamiseen: n. 50 (*Heron*, Alexandria, Kreikka)
 - **Turve:** lämmitys, ruoanlaitto 77 (Rooma)
 - Tervan valmistus puusta (1. teknologian kuvaus): 79 (*Plinius vanhempi*, Rooma),
 - Musta ruuti: 142 (Kiina)
 - Eläinvoima vesiliikenteessä: Siipiraslaiva härkäkierrolla, 300-l (Rooma)

3) Keskiaika (400–1500)

- 400–1000
 - Pyörätuoli: 525 (Kiina)

- Tuulivoima ilmaliikenteessä: miehitetty riippuliidin 559 (*Yuan Huantou*, Kiina), 875 (*Abbas Ibn Firnas*, Andalusia/Espanja)
- Eläinvoima vesiliikenteessä: proomujen veto suurella kanaalilla 600-l (Kiina)
- Laskuvarjo: 852 (*Armen Firman*, Andalusia/Espanja)
- Rakettimoottori (ruutikäyttöiset tuliuolet): 904 (Kiina)
- 1000–1500
 - Tykki (mustaruutikäyttöinen): 1132 (Kiina)
 - Biokaasureaktori: Kiina 1200-l (viimeistään, sillä *Marco Polon* mukaan olivat olleet käytössä jo kauan)
 - Rakettimoottori maaliikenteessä (torpedo mustalla ruudilla): 1420 (*de Fontana*, Italia)
 - Helikopterin toimintaperiaate: 1492 (*da Vinci*, Italia)
 - Jousikäyttöinen auto: 1400-l loppu (*da Vinci*, Italia)
 - Polkupyörä: 1400-l loppu (*da Vinci*, Italia)

4) Uusi aika (1500–1800)

- 1500-luku
 - Polttomoottori (piirros ruutikäytöstä): 1509 (*da Vinci*, Italia)
 - Vedyn tuotanto: 1500-l alku (Paracelsus, Sveitsi)
 - Golf-virran löytäminen ja käyttö meriliikenteessä: 1513 (*León*, Espanja), virran kulun kartoittaminen 1786 (*Franklin*, USA)
 - Eetterin (dietyylieetteri DEE) valmistus etanolista: 1540 (*Cordus*, Saksa)
 - Nestemäisen rakettipolttoaineen ja monivaiheraketin idea: 1569 (*Haas*, Itävalta), monivaiheraketin demonstrointi: 1500-l loppu (*Schmidlap*, Saksa)
 - Kiertomäntämoottorin periaate: 1588 (*Ramelli*, Italia)
 - Raakaöljyn poraus: 1594 (Azerbaijan)
- 1600-luku
 - **Auringon fotonivoima**: aurinkopurjeen idea 1600-l alku (*Kepler*, Saksa), periaate: 1871 (Maxwell, UK), periaatteen kokeellinen todennus: 1900 (*Lebedev*, Venäjä), idea avaruusalukselta 1920-l (*Tsiolkovski*, Tsander, Neuvostoliitto)
 - Puukaasun ja kivihiilikaasun demonstrointi: 1609 (*Helmont*, Hollanti)
 - Sukellusvene (lihasvoimalla): 1626 (*Drebbel*, Hollanti)
 - Impulssihöyryturbiinin periaate: 1629 (*Branca*, Italia)
 - Miehitetty rakettimoottorilento: 1633 (*Lagari Hasan Çelebi*, Turkki)
 - Lihasvoima/kellokoneistokäyttöinen mekaaninen auto: 1649 (*Hautsch*, Saksa) (Nürnbergin vaunu)
 - Mekaaninen sukellusvene (kellokoneistolla): 1653 (*de Son*, Ranska)
 - Ramjet-suihkumoottorin idea: 1655 (*Bergerac*, Ranska)
 - Metanolin tuottaminen puusta: 1661 (*Boyle*, Irlanti) (Egypti 2000 eaa)
 - Sähkögeneraattori (staattinen): 1663 (*Gueriche*, Saksa)
 - Ilmalaiivan toimintaperiaate: 1670 (*Lana-Terzi*, Italia)
 - Vedyn tuotanto hapon ja metallien reaktiolla: 1670 (*Boyle*, Irlanti)
 - Höyrysuihkuauton malli: 1672 (Verbiest, Belgia/Kiina), 1680 (Newton, UK)
 - Polttomoottori (1. rakennettu ja toimiva): 1673 (*Hyugens*, Hollanti), ruutikäyttöinen, pumppukäyttöön
 - Kivihiilikaasun valaistuskäyttö: 1680 (*Becher*, Saksa)
 - Höyrysuihkumoottorin periaate (höyrysuihkuveturi): 1680 (*Newton*, UK)
 - Gravitaation ymmärtäminen: 1687 (*Newton*, UK)

- Höyrykone (mäntäkone): 1690 (*Papin*, Ranska)
- Jäipurjekelkka: 1600-l loppu (Hollanti)
- Tuulivoimakäyttöinen raideliikenne: 1600-l loppu (*Mackworth*, UK)
- 3-pyöräinen polkupyörä pedaalein: 1600-l loppu (*Richard*, Ranska)
- 1700-luku
 - Uudet lämpövoimakoneet
 - Kaupallinen höyrykone: 1712 (*Newcomen*, UK)
 - Liikennekäyttöön soveltuva höyrykone: 1769 (*Watt*, UK)
 - Kiertomäntämoottori (höyrykone): 1769 (*Watt*, UK)
 - Kaksoispaisuntahöyrykoneen toimintaperiaate (kombimoottorin toimintaperiaate): 1781 (*Hornblower, Woolf*, UK), 1. käyttö 1845 (*McNaught*, UK)
 - Kaasuturbiini: 1791 (*Barber*, UK)
 - Etanolimoottori: 1793 (*Cartwright*, UK)
 - 1. nestemäisiä polttoaineita (tärpähti ja terva) käyttävä polttomoottori eli kaasutinmoottori: 1794 (*Street*, UK)
 - 1. kaasumaisia polttoaineita (puu- ja hiilikaasu) käyttävän polttomoottorin eli kaasumoottorin patentti: 1799 (*Lebon*, Ranska)
 - Liikennevälineet
 - Höyryvene (siipirattaalla): 1707 (*Papin*, Ranska), 1775 (*Perrier*, Ranska),
 - Kantosiipialus (lihasvoima): 1716 (*Swedenborg*, Ruotsi)
 - Pyörätuoli (lihasvoima): 1760 (*Merlin*, Ranska)
 - Höyryauto: 1769 (*Cugnot*, Ranska)
 - Höyrylokomobiili: 1769 (*Cugnot*, Ranska)
 - Juoksupyörä (polkupyörän edeltäjä): 1779 (*de Sivrac*, Ranska)
 - Kuumailmapallo: 1782 (*Montgolfier*, Ranska)
 - Höyrylaiva (siipirattaalla): 1783 (*d'Abbens*, Ranska), kaupallisesti menestyneessä reittiliikenteessä (puukäyttöisenä) 1807 (*Fulton*, USA)
 - Vetytallo: 1783 (Charles, Robert, Ranska), idea 1700-l puolivälissä (*Cavendish, Priestly*, UK; *Lavoisier*, Ranska); kaupunkikaasupallo 1812 (*Green*, UK)
 - Ilmalaiha: 1784 (*Blanchart*, Ranska) (käsikäyttöinen propelli), 1785 liikkuvilla siivillä ja pyrstöllä toteutettu ohjaus
 - Heliumtallo: 1785 (*Crosbie*, Irlanti)
 - Lihasvoima/tuulivoimasukellusvene: 1799 (*Fulton*, USA)
 - Öljyn valmistaminen öljyliuskeesta (1. ei-konventionaalinen öljylähde): n. 1700 (Kiina)
 - Ilmatykki (kompressiosytytteisen moottorin esikuva): 1740 (Ranska)
 - Kondensaattori (Leydenin ruukku): 1745 (*Musschenbroek*, Hollanti)
 - Sähköisen viestinnän toimintaperiaate: 1753 (*Morrison*, UK), sähköstaattisen lennättimen toimintaperiaate: 1775 (*Salva*, Espanja)
 - Jousi liikennevälineen mekaanisen voiman lähteenä: tuulivaunun varavoimanlähde 1760 (*Genevois*, Ranska) (1800-luvulla käytössä useita ”kellokoneisto”-ajoneuvoja, esim. bussi New Orleansissa)
 - Sähkösytytys kaasupistoolissa (vetykäyttöinen, kipinäsytytteisen polttomoottorin esikuva): 1777 (*Volta*, Italia) (syttytulppa: 1902, *Bosch*, Honold, Saksa)
 - Puun pyrolyysikaasun valaistuskäyttö: 1779 (*Leban*, Ranska)
 - Sähköpari: 1780 (Galvani, Italia)
 - Vedyn valmistus vesi-kaasu-vaihtoreaktiolla: 1780 (*Fontana*, Italia), teollinen valmistus 1873 (*Lowe*, USA)
 - Vedyn valmistus rauta-höyry-prosessilla: 1784 (*Lavoisier, Meusnier*, Ranska)

- Vedyn valmistus elektrolyysillä: 1789 (*Deiman, Troostwijk*, Hollanti), teoreettinen selitys 1887 (*Arrhenius*, Ruotsi, kemian Nobel 1903)
- Puhtaan (absoluuttisen) 100 % etanolin valmistus spriistä puuhiilisuodatuksella: 1796 (*Lowitz*, Saksa)
- Sähköparisto: 1799 (*Volta*, Italia) (Mesopotamia 250 eaa?)

5) Uusin aika (1800-)

- 1800-luku
 - Polttomoottorit
 - Rivazmoottori (vety): 1806 (*Rivaz*, Sveitsi)
 - Tuli-ilmakone: 1807 (*Cayley*, UK), 1883 (*Buckett*, UK), 1887 (*Bénier*, Ranska)
 - Brownmoottori (vety): 1823 (*Brown*, UK)
 - Moreymoottori (tärpätti, terva, hartsi, etanoli, metanoli, kasviöljyt, kasvijauhot, eläinrasvat, tali, puukaasu, puuhiilikaasu, vesikaasu): 1826 (*Morey*, USA)
 - Paineistettu polttomoottori (vety): 1852 (*Reithmann*, Saksa)
 - Lenoirmoottori, ensimmäinen sarjavalmisteen polttomoottori (kaupunkikaasu): 1859 (*Lenoir, Luxemburg/Belgia/Ranska*), lenoirmoottori nestemäisillä polttoaineilla (tärpätti, etanoli ym.) 1860
 - Nelitahtisen polttomoottorin periaate: 1862 (*Beau de Rochas*, Ranska)
 - Otton 4-tahtinen koemoottori (etanoli): 1862 (*Otto*, Saksa) (1. rakennettu 4-tahtimoottori):
 - Otton ja Langenin kaupunkikaasumoottori: 1867 (*Otto, Langen*, Saksa)
 - Puristuksellinen kaksitahtimoottori: 1872 (*Brayton*, USA), 1877 (*Clerk*, UK), 1878 (*Benz*, Saksa)
 - Otto-moottori (4-tahtimoottori, 1. sarjavalmisteen puristuksellinen polttomoottori, kaupunkikaasu): 1876 (*Otto*, Saksa) ; ottomoottori nestemäisellä polttoaineella (benssiini) 1883 (*Daimler, Maybach*, Saksa); spriimoottori 1887 (*Otto*, Saksa)
 - Puristussytytteinen 4-tahtinen hehkukupumoottori (puolidiesel): 1890 (*Akroyd-Stuart*, Australia/UK), 1. liikennekäyttö lentokoneessa 1902 (*Weisskopf*, Saksa/USA)
 - Daymoottori (2-tahtinen kipinäsytytteinen moottori): 1889 (*Day*, UK)
 - Dieselmootori (puristussytytteinen 4-tahtinen): 1892 (*Diesel*, Saksa) (hiilipöly ym.); todella toimiva 1897 (pähkinäöljy), 1. liikennekäyttö veneessä 1903 (*Diesel*, Saksa), laivassa (Selandia) 1911 (Tanska), veturissa 1912 (*Sulzer*, Sveitsi), diesel-sähköveturissa 1917 (USA), autossa 1923 (MAN-kuorma-auto, Saksa)
 - 2-tahtinen kompressiosytytteinen 1. patentti (hehkukupu): 1897 (*Mietz, Weiss*, USA)
 - Muut uudet lämpövoimakoneet
 - Stirlingmoottori (puu ym.): 1815 (*Stirling*, Stirling, UK)
 - Ericssonmoottori (puu ym.): 1826 (*Ericsson*, Ruotsi/USA)
 - Kylmäilmakone: 1849 (*Gorrie*, USA), 1870 (*Windhausen*, Saksa), 1877 (*Giffard*, Ranska)
 - Kombivoimala: höyry-etterimoottori liikennekäytössä (laiva) 1850 (*du Tremblay*, Ranska)
 - Anaerobinen (AIP) lämpövoimakone (epäorgaaniset polttoaineet + höyrykone): 1864 (*Monturiol*, Espanja)

- Lämpöakkuhöyrykone (tulistettu vesi): 1872 (*Lamm*, Ranska/USA)
- Impulssihöyryturbiini ja sen käyttö separaattorissa: 1875 (*Laval*, Ruotsi), 1. liikennekäyttö 1880-l
- Moderni reaktiohöyryturbiini: 1884 (*Parsons*, UK); 1. liikennekäyttö 0,25 hv:n mallilentokoneessa 1883, Turbinia-laivassa 1894
- o Liikennevälineet
 - Linja-auto (höyrykoneella): 1801 (*Trevithick*, UK)
 - Höyryveturi: 1803 (*Trevithick*, UK), matkustajaliikenne 1929: Liverpool-Manchester, Rocket-veturi (*Stephenson*, UK)
 - Amfibioajoneuvo (ruoppaaja höyrykoneella): 1804 (*Evans*, USA)
 - Polttomoottorikäyttöinen auto (rivazmoottori, vety): 1813 (*Rivaz*, Sveitsi)
 - Polttomoottorikäyttöinen vene (brownmoottori, vety): 1823 (*Brown*, UK)
 - Leijavetoinen tuulivaunu: 1826 (*Viney*, Pocock, UK)
 - Moreymoottorikäyttöinen (tärpätti) auto ja vene: 1829 (*Morey*, USA)
 - Raitiovaunu (hevosvetoinen): 1832 (*Stevenson*, New York, USA)
 - Sähköauto: 1832 (*Anderson*, UK), 1837 (*Davidson*, UK)
 - Höyryraitiovaunu: 1. kokeilu 1833, matkustajaliikenne 1836 (New York, USA),
 - Sähköveturi: 1834 (*Davenport*, USA), 1837 (*Davidson*, UK)
 - Sähkövene: 1838 (*Jacobi*, Saksa)
 - Höyrylaiva potkurilla: 1837 (*Ericsson*, Ruotsi) (potkuri 1836, *Ericsson*, Ruotsi)
 - Polkupyörä (polkimilla): 1839 (*Macmillan*, UK)
 - Paineilmamoottorit maa-ajoneuvoissa: auto 1840 (*Motay*, Ranska), raitiovaunu 1875 (*Mékarski*, Ranska)
 - Alipainejuna: kaivosvaunu 1842, juna 1843 (*Dargan*, *Vignoles*, Irlanti), 1845 (*Brunel*, UK); kirjeiden putkipostiperiaate 1810 (*Medhurst*, UK), periaatteen soveltaminen raskaiden kuormien kuljettamiseen 1838 (*Clegg*, *Samuda*, UK)
 - Mallilentokone: 1848 alkoholi- ja naftakäyttöinen höyrykone sisähallissa (*Stringfellow*, UK), 1857 kellokoneistolla ulkona (*du Temple*, Ranska)
 - Varmennetusti toimiva ihmistä kuljettava riippuliidin: 1849 (*Cayley*, UK), 1891 (*Lilienthal*, Saksa)
 - Traktori: 1849 höyrykoneella *Wilson & Co.* (*Willis*, UK), ottomoottorilla: 1904 (*Holt*, USA), dieselmoottorilla: 1931 *Caterpillar* (USA)
 - Sähkölokomobiili: 1849 (*Farmer*, USA)
 - Moottorikäyttöinen ilmalaiva: 1852 höyrykoneella (*Giffard*, Ranska), polttomoottorilla (lenoir) 1872 (Haenlein, Saksa), sähkömoottorilla 1883 (*Tissandier*, Ranska), ottomoottorilla 1888 (*Daimler*, Saksa)
 - *Ericsson*moottorikäyttöinen laiva: 1853 (*Ericsson*, Ruotsi./USA)
 - Lämpöakkuajoneuvo: tiiliskiviakkuveturi 1861 (*Stephenson*, *Fowler*, UK)
 - Moottorikäyttöinen hissi (höyryhissi); 1861 (*Otis*, USA), sähköhissi 1880 (*Siemens*, Saksa)
 - Lenoirmoottorikäyttöinen auto (tärpätti, etanoli, metanoli, kaupunkikaasu): 1862 (*Lenoir*, Luxemburg/Belgia/Ranska), lenoirmoottorivene 1864, lenoirmoottori-ilmalaiva 1872
 - Metro (höyrykone): 1863 (Lontoo), sähkömetro 1890 (Lontoo)
 - Sukellusvene: paineilmamoottorilla 1863 (*Bourgeois*, *Brun*, Ranska), höyrykoneella (epäorgaaniset polttoaineet) 1864 (*Monturiol*, Espanja), ottomoottorilla 1877, Lampölämpökulla 1879 (*Garrett*, UK), sähkömoottorilla 1885 (*Goubet*, Ranska)

- Moottoripyörä (höyrykone): 1867 (*Roper*, USA)
- Mallihelikopteri: 1870 kuminauhalla (*Penaud*, Ranska), 1877 höyrykoneella (*Forlanini*, Italia)
- Kaapeliraitiovaunu: yläpuolisilla kaapeleilla 1870 (*Beauregard*, New Orleans, USA), alapuolisilla kaapeleilla 1873 (*Hallidie*, San Francisco, UK/USA)
- Painehöyryajoneuvo: raitiovaunu 1872 (*Lamm*, New Orleans, Ranska/USA)
- Sähköjuna: 1879 (*Siemens, Halske*, Berliini, Saksa)
- Sähköraitiovaunu: alapuolisella kaapelilla höyrykonesähköllä 1881 (*Siemens, Halske*, Berliini, Saksa), vesivoimalla 1883 (*Traill*, Irlanti, Siemens, Saksa; *Portrush-Bushmills*, Irlanti), yläpuolisilla sähkökaapeleilla 1883–85 (*van Depoele*, Belgia)
- Johdinbussi: 1882 (*Siemens*, Saksa), 1. kaupallinen (*Schiemann, Bielathal*, Saksa)
- Ottomootorikäyttöinen moottoripyörä: 1885 (*Maybach, Daimler*, Saksa)
- 2-tahtimootorikäyttöinen auto (3-pyöräinen, benzomootorilla): 1885 (*Benz*, Saksa), 1. patentti braytonmootorilla 1879 (*Selden*, USA)
- Ottomootorikäyttöinen auto (3-pyöräinen): 1885 (*Benz*, Saksa) (1. 4-pyöräinen 1886, *Maybach, Daimler*, Saksa)
- Mootorikelkka (ottomootorilla): 1885 (*Maybach, Daimler*, Saksa)
- Höyryturbiinivene : 1880-l (*Laval*, Ruotsi)
- Ottomootorikäyttöinen vene: 1887 (*Maybach, Daimler*, Saksa)
- Vesivoimakäyttöinen rinnevaunu: 1890 (Lynton and Lynmouth Cliff Railway, UK)
- Lentokone (ilmaa painavampi motorisoitu miehitetty lentävä kone): 1890 etanolikäyttöinen höyrykone (*Ader*, Ranska); kompressiosytytteisellä polttomootorilla 1902 (*Weisskopf*, Saksa/USA); 1. ”kontrolloitava” lentokone kipiinäsytytteisellä 9 kW moottorilla 1903 (Wright, USA)
- Raitiotievaunu paineistetulla kaupunkikaasulla (ottomootorilla): 1893 (*Lübrig*, Saksa)
- Höyrykone-sähköveturi (1. lämpövoimakone-sähkömootoriyhdistelmä liikennekäytössä): 1893 (*Heilmann*, Ranska)
- Höyryturbiinilaiva: Turbinia 1894 (*Parsons*, UK)
- Avaruushissin periaate: 1895 (*Tsiolkovski*, Venäjä), moderni versio 1959 (*Artsutanov*, Neuvostoliitto)
- Hybridiauto (sähkö/bensiini): 1897 (*Entz*, USA), sähkö/etanol 1903 (*Krieger*, Ranska)
- Käytännöllinen höyryauto: 1897 (*Stanley*, USA)
- Otto-sähköauto: 1899 (*Lohmer, Porche*, Itävalta) (patentti 1897)
- o Sähkötekniikka
 - Sähköinen viestiliikenne (lennätin): 1809 (*Sömmering*, Saksa)
 - Sähkämoottori: demonstraatiomoottori 1821 (*Faraday*, UK), sähkömagneettinen induktio 1820 (*Ørsted*, Tanska), 1. käytännöllinen moottori (DC-moottori) 1832 (*Sturgeon*, UK), AC-moottori 1888 (*Tesla*, Serbia/USA)
 - Sähkögeneraattori (dynaaminen): 1831 (*Faraday*, UK), sähködynamo 1866 (*Siemens*, Saksa)
 - Sähköisen viestinnän käyttöönotto: 1833 lennätin säännöllisessä sisäisessä käytössä Göttingenissä (*Gauss, Weber*, Saksa), kaupallisessa käytössä (lennätin Lontoon rautateillä): 1839 (*Wheatstone, Cooke*, UK)
 - Polttonkenno: idea 1838 (*Schönbein*, Saksa), toteutus 1839 (*Grove*, UK), käytännöllinen kenno 1932-59 (*Bacon*, UK)

- Sähkökemiallinen akku: lyijyakku 1859 (*Planté*, Belgia), Ni-Cd ja Ni-Fe 1899 (*Jungner*, Ruotsi), Li 1912 (*Lewis*, UK), NiMH 1980-l (*Ovshinsky*, Liettua/USA), Li-ion 1991 (*Goodenough*, USA)
- Sähkövoimalaitos: 1870 vesivoimalla (*Rothbury*, UK), keskusvoimalaitos yleisellä jakelujärjestelmällä höyrykoneella 1882 (*Edison*, New York, USA)
- Langaton sähköinen viestintä: 1878 demonstointi (*Hughes*, UK), radioaaltojen teoria: 1864 (*Maxwell*, UK), kaupallistaminen: 1897 Englannissa (*Marconi*, Italia, fysiikan nobel 1909)
- Kuivapari (Zn-C): 1887 (*Hellesen*, Tanska)
- o Paineilmamoottori: 1805 (*Midhurst*, UK)
- o Etanolin valmistaminen puusta, oljesta ja puuvillasta vahvahappomenetelmällä: 1817 (*Braconnot*, Ranska)
- o Etanolin valmistus synteettisesti eteenistä: 1828 (*Faraday*, UK)
- o Lämpövoimakoneiden teoreettinen hyötysuhde, Carnot-kone: 1824 (*Carnot*, Ranska)
- o Kaasutin nestemäisen polttoaineen (etanoli, metanoli, tärpätti) käyttämiseksi polttomoottorissa: 1826 (*Morey*, USA)
- o Biomassakaasutin (updraft) tuotekaasun valmistamiseksi: kaupallinen 1830 (UK)
- o Biodieselin valmistus vaihtoesteröinnillä: 1853 (*Duffy*, Patrick)
- o Kaupallinen öljyn poraus ja tuotanto, öljyteollisuuden synty: 1854 (Puola), 1857 (Romania, Kanada), 1859 (*Drake*, USA) (poraus: Azerbaidžan 1594; öljynjalostus 1735 Kaspianmeren alueella, offshore-poraus Williams, Santa Barbara, CA, USA 1894)
- o Puuetanoli (/puun hydrolyysi sokeriksi): 1855 (*Melsens*, Ranska)
- o Alkoholifermentaation mikrobiologisen luonteen selviäminen: 1857 (*Pasteur*, Ranska)
- o Lämpökrakkaus raakaöljyllä: 1861 (kaupallistaminen 1913)
- o Vesisuihkumoottori: 1866 (UK) höyrykone-tuuli-hybridilaivassa HMS *Waterwitch*
- o Metaanin nesteytys: 1867 (*Cailletet*, Ranska)
- o Ammoniakkimoottori: 1869 (*Lamm*, Ranska/USA), 1888 (*Campbell*, USA); 1. liikennekäyttö: raitiovaunu 1870 (*Lamm*, New Orleans, Ranska/USA), hinaajalaiva 1891 (*Campbell*, Philadelphia, USA)
- o Puuetanolin valmistus sulfittisellulipeästä: 1874 (*Mitscherlich*, Saksa)
- o Kaasutin kiinteän polttoaineen (puu) käyttämiseksi polttomoottorissa: 1881
- o Nopea höyrystin höyryautokäyttöön: 1885 (*Serpellet*, Ranska)
- o Mikrobiologinen vedyn valmistaminen sinilevien aineenvaihdunnan avulla: 1896 (*Elms, Jackson*, USA)
- o Metaanisynteesi hiilidioksidista (Sabatier-reaktio, hydraus): 1897 (*Sabatier*, Ranska, kemian nobel 1912)
- o Puuetanolin valmistaminen heikkohappomenetelmällä: 1898 (Saksa)
- 1900-luku
 - o Uudet voimanlähteet
 - Moderni kaupallinen kaasuturbiini: 1903 (*Holzwarth* ym., Saksa); autokäyttö: 1950 (*Rover*, UK)
 - Nestemäisellä polttoaineella toimivan rakettimoottorin toimintaperiaate: 1903 (*Tsiolkovski*, Venäjä), nestemäisellä polttoaineella (benssiini) toimiva rakettimoottori: 1926 (*Goddard*, USA), nesteytetyllä kaasumaisella polttoaineella (metaani) toimiva rakettimoottori: 1931 (*Winkler*, Saksa)

- Sysäysputkimoottori (pulsejet): 1903 (*Wiberg*, Ruotsi), 1. käyttö V1-risteilyohjuksissa 1942 (*Schmidt* ym., Saksa)
- Patoputkimoottori (ramjet): 1908 (*Lorin*, Ranska), 1. lentokonekäyttö lisävoimanlähteenä 1936 (*Ladoc*, Ranska), 1. helikopterikäyttö 1944 (*Dobhoff*, Saksa) , 1. lentokonekäyttö ainoana voimanlähteenä 1949 (*Ladoc*, Ranska)
- Motorjet-suihkumoottori: 1910 (*Coanda*, Romania), Caproni Campini -kone 1940 (*Campini*, Italia)
- AIP-moottori: 1925 patentti walterturbiini (*Walter*, Saksa), 1. sukellusvene: 1940 V80 (*Walter* ym., Saksa)
- Hesselman-moottori (1. DI-bensiinimoottori ja polttoainejoustava moottori: pystyy käyttämään myös etanolia., raakaöljyä ja kerosiinia): 1926 (*Hesselman*, Ruotsi)
- Potkuriturbiinimoottori (turboprop): 1926 (*Griffith*, UK), 1. toimiva moottori 1939 (*Jendrassik*, Unkari), 1. lentokone (Trent Meteor, Rolls-Royce Trent-moottorit) 1945 (Englanti)
- Wankel-moottori: 1929 (*Wankel*, Saksa), wankelmoottorikäyttöinen auto: 1965 (NSU, Saksa)
- Kaasuturbiinipohjainen suihkumoottori (turbojet): 1929 (*Whittle*, UK), 1. toimiva moottori HeS 1 (vetykäyttöinen) 1937 (*von Ohain*, Saksa),
- Gravitaatiolinko: idea 1936 (*Cleator*, UK), 1. käyttö avaruusluotaimen voimanlähteenä: 1959 Luna 3 -kuuluotain (Neuvostoliitto)
- Puhallinsuihkumoottori (turbofan): 1943 Daimler-Benz DB 670 (Saksa), 1. lentokonekäyttö 1954 (Victor-pommikone, Rolls-Royce Conway –moottori) (Englanti)
- Mikrobiologinen polttokenno (MFC): periaate 1966 (*Williams*, USA)
- MHD (magnetohydrodynaaminen) moottori: periaate 1937 (*Alfvén*, Ruotsi; fysiikan nobel 1970), toimiva laiva 1991
- Ydinmoottorin periaate: 1942 (Saksa), 1. lentokonekäyttö 1961 Tupolev Tu-95 Bear-pommikoneessa (Neuvostoliitto)
- Vesisuihkumoottori: 1954 (*Hamilton*, Uusi-Seelanti), kokeiluja Ruotsissa 1920-l
- Piiaurinkokenno: 1954 (*Chapin*, Fuller, Pearson, USA 1954), toiminnan selitys 1905 (*Einstein*, Saksa; fysiikan nobel 1921)
- Avaruudessa käytettävän Bussard-ramjet-suihkumoottorin periaate: 1960 (*Bussard*, USA)
- Ionimoottori: 1964 maan kiertoradalla SERT I –satelliitilla (USA), ulkoavaruudessa: 1998 Deep Space 1 -avaruusluotaimella (USA), ionimoottorin periaate: 1929 (*Oberth*, Itävalta), 1. koemoottori 1959 (*Kaufman*, USA)
- Stirling AIP: 1988 (*Kockums*, Ruotsi)
- **Maan magneettikenttä:** 1996 demonstraatiokäyttö johtavalla kaapelilla NASAn Space Tether Experiment:issä (USA, Italia)
- Fotonivoima (malliraketti laserilla): 1999 (*Myrabo*, USA)
- Liikennevälineet
- Sukellusvene: otto/sähkö 1900 (USA) diesel/sähkö 1913 (Saksa, Hollanti), höyryturbiini/sähkö 1917 (UK), walter AIP 1940 (Saksa), PWR-ydinreaktori 1954 (USA), stirling AIP 1988 (Ruotsi)
- Sähköportaat: 1900 (*Seeberger*, Reno, USA)
- Otto-sähköauto: 1901 (*Porche*, Saksa, *Lohner*, Itävalta), linja-auto 1906 (*Tilling*, *Stevens*, UK)

- Häkäpönttöauto: 1901 (*Parker*, UK)
- Helikopteri: 1907 (*Breguet, Richet, Cornu*, Ranska); 1. sarjatuotantohelikopteri Fa 223 Drache, 1937 (Saksa); 1. todella lentänyt mekaaninen mallihelikopteri: 1870 (*Penaud*, Ranska)
- Kantosiipialus: 1906 (*Forlanini*, Italia)
- Höyryrurbiiniveturi: 1907 (*Belluzzo*, Italia), turbiini-sähkö 1910 (UK),
- Suihkumoottorilentokone (motorjet): 1910 (*Coanda*, Romania), turbojet 1939 (Saksa), ramjet 1949 (Ranska), turbofan 1954 (Saksa), scramjet 1991 (Venäjä)
- Dieseljuna (kiskobussi): 1913 (Ruotsi), dieselveturi 1926 (Kanada)
- Tuuliroottorikäyttöinen laiva: Flettner-roottori 1923 (*Flettner*, Saksa)
- Dieselauto: 1924 MAN-kuorma-auto (Saksa)
- Rakettimoottoriauto: 1928 mustaruutikäyttöinen Opel RAK 1 (*Opel, Sander*, Saksa; Valier, Itävalta); 1. kaasulla: 1929 hiilidioksidikäyttöinen Valier RAK 6 (*Valier*, Itävalta); 1. nestemäisellä polttoaineella (etanoli): 1930 Valier-Heyland Rak 7 (*Valier*, Itävalta)
- Rakettimoottorilentokone: 1928 mustaruutikäyttöinen Ente (*Lippisch, Sander*, Saksa); 1. nestemäisellä polttoaineella: 1937 etanolikäyttöinen He-112 (*Heinkel, von Braun* ym., Saksa); 1. alun perin raketikäyttöiseksi valmistettu lentokone: 1939 vetyperoksidikäyttöinen He-176 (*Walter, Heinkel*., Saksa); 1. palveluskäyttöön ja sarjavalmistukseen: 1944 metanoli-hydratsiinikäyttöinen Me163 (*Lippisch, Messerschmitt*., Saksa), 1. äänen nopeuden ylitys: 1947 etanolikäyttöinen X-1 (USA)
- Rakettimoottoriveturi: 1928 Opel RAK 3 (*Opel* ym., Saksa), nopeus 280 km/h; kuumavesirakettimoottorijuna 1974 Komet (Saksa), nopeus 401 km/h
- Rakettimoottorikelkka: 1929 lumikelkka etanolilla (*Valier*, Itävalta), ratakelkka: nopeus 10430 km/h = Mach 8,5 vuonna 2003
- Maglev (magneettinen leijuva kiskoliikenne): 1. patentti 1934 (*Kemper*, Saksa) 1. koejuna Ottobrun, Saksa 1971, 1. kaupallinen Birmingham, UK 1984
- Pintaliitäjä (WIG-alus): 1935 (*Kaario*, Suomi), periaate 1877 (*Thornycroft*, UK), 1. palveluskäytössä turbojet-suihkumoottorikäyttöinen eaanoplan 1961 (*Aleksejev*, Neuvostoliitto)
- Kaasuturbiinisuihkumoottorikäyttöinen lentokone (turbojet): 1939 He-178 (*von Ohain, Heinkel*., Saksa), 1. palveluskäyttöön: 1944 Me-262 (*Messerschmitt*, Saksa), 1. matkustajakone: 1949 de Havilland Comet (UK)
- Kaasuturbiini maa-ajoneuvoissa: veturi 1939 (ABB, Sveitsi) 2200 hv, panssarivaunu: 1950 (Conqueror, USA), auto: 1950 (Rover, UK), kaasuturbiini/sähköhybridiauto (myös biokaasukäyttöinen): 1998 (GM EV1 Series hybrid, USA), moottoripyörä: 2000 (MTT, USA)
- Avaruusliikenne: lyhyt käynti: 1942 V2 (*Braun* ym., Saksa), satelliitti 1957 (Sputnik 1, *Korolev* ym., Neuvostoliitto), kuulento (ohitus) 1959 (Luna 1, Neuvostoliitto) kuulento pinnalle 1959 (Luna 2, Neuvostoliitto), miehitetty avaruuslento 1957 stratosfäärissä 30 km korkeudessa heliumkaasupallolla (*Kittinger*, USA), 1961 avaruusraketilla 315 km korkeudessa (*Gagarin*, Neuvostoliitto). planeettalento (Venuksen ohitus) 1962 (Mariner 2, USA), avaruuskävely 1965 (*Leonov*, Neuvostoliitto), planeettalento pinnalle (Venus) 1966 (Venera 3, Neuvostoliitto) miehitetty kuulento pinnalle 1969 (*Aldrin, Armstrong*, Apollo 11, USA)
- Kaasuturbiini vesiliikenteessä: vene 1947 (UK)

- Suihkumoottoriauto: 1954 (Fiat, Italia)
- Ydinvoimakäyttöinen ajoneuvo (sukellusvene höyryturbiinilla): 1955 (Nautilus, USA)
- Ilmatyynyalus (motorisoitu): 1959 (*Cockerell*, Saunders-Roe SRN-1, UK), lihasvoimakäyttöinen 1716
- Polttokennoajoneuvo: 1959, Allis-Chalmers-traktori, 20 hv (*Ihrig*, USA)
- Sähköajoneuvo langattomalla sähkönsiirrolla: 1964 mallihelikopteri maasta lähetetyillä mikroalloilla (*Brown*, USA)
- Kuuliikenne (lihasvoima): 1969 (*Armstrong, Aldrin*, USA)
- Kuuajoneuvo: 1970 aurinkosähköllä ja ydinparistolla kauko-ohjattava Lunakhod-1 (*Kemurdjian, Babakin* ym., Neuvostoliitto), miehitetty (sähkö kemiallisella paristolla): 1971 Lunar Roving Vehicle (USA)
- Aurinkopurje: 1973 1. käyttö Mariner 10 -avaruusluotaimen voimanlähteenä (USA), 1. erillisrakennetun aurinkopurjeen levitys avaruudessa: 2004 (*Kawaguchi* ym., Japani)
- Lihasvoimakäyttöinen potkurilentokone: 1977 (*McCready, Allen*, USA)
- Kaasupalloliikenne maan ulkopuolella, Venuksen tuulivoiman käyttö: 1984 Vega 1-2:n heliumpallot (Neuvostoliitto, Ranska)
- Tuulisiipilaiva (Turbosail): 1985 (*Cousteau*, Ranska)
- MHD-moottorikäyttöinen laiva: 1991 (Mitsubishi, Japani), periaate 1937
- Planeettaliikenne (Mars): Sojourner-mönkijä 1997 aurinkosähköllä (USA)
- o Synteettiset polttoaineet
 - Metaanisynteesi synteesikaasusta: 1902 (*Sabatier, Senderens*, Ranska; Sabatier kemian nobel 1912)
 - Metanolisynteesi synteesikaasusta: 1905 (*Sabatier*, Ranska), 1. kaupallinen BASFin tuotantolaitos 1923 Leuna (*Pier*, Saksa)
 - Haber-Bosch -synteesi (ammoniakkisynteesi): 1909 (*Haber*, Saksa, kemian nobel 1918), 1. kaupallinen BASF 1913 Oppau (*Bosch*, Saksa, kemian nobel 1931)
 - Bergius-synteesi (suora nesteytys, hydraus) kivihiehellä: 1913 (*Bergius*, Saksa, kemian nobel 1931)
 - FT-synteesi kivihiehellä: 1923 alkoholituotanto, 1926 hiilivetytuotanto (*Fischer*, Saksa; *Tropsch*, Tsekki), 1. tuotantolaitos 1934 Oberhausen-Holten (*Ruhrchemie*, Saksa)
 - Suora nesteytys höyryllä: 1926 (*Fischer*, Saksa, *Tropsch*, Tsekki)
 - Bergius-synteesi biomassalla: 1927 (*Lindblad*, Ruotsi)
 - Katalyyttinen öljyn krakkaus: 1927 (*Houdry*, Ranska), 1. tuotantolaitos 1938 (USA) => 100-oktaaninen bensiini => ottomoottorin puristussuhteen nosto 5:stä 10:een
 - Bergius-synteesi turpeella: 1928 (*Komppa*, Suomi)
- o Nestekaasun nesteytys: 1901 (*Blau*, Saksa)
- o Turboahdin: 1905 (*Büchi*, Sveitsi), 1. kuorma-auto 1953 (Volvo, Ruotsi)
- o Sulfiittispriin teollinen valmistus sellutehtaan yhteydessä: 1907 (*Wallin, Ekström*, Ruotsi)
- 2000-luku
 - o Sukellusvene: polttokenno-AIP 2002 (Saksa), MESMA (etanoli-höyryturbiini-AIP) 2004 (Ranska)
 - o Metaani-monofuel-diesel: 2003 Isuzu Elf CNG DI (Japani)

- Mikrobiologinen elektrolyysi: 2005 vedyn tuotannossa (*Rozental* ym., Hollanti, USA, Australia), 2008 metaanin tuotannossa (*Logan* ym., USA)
- **Aaltovoima:** valtamerikelpoinen katamaraanivene 2007 (*Horie*, Japani)
- Kaupallinen paineilmahenkilöauto ja paineilma-FFV-poltto moottorihybridi: 2008 (*Negre*, MDI, Ranska)
- Nesteytetty kaatopaikkakaasu autokäytössä: 2008 (*Gasrec*, *Albury*, *Surrey*, Englanti)
- Synteettinen biokaasu autokäytössä: 2009 (*Güssing*, Itävalta)
- Aurinkotuulipurje

Taulukko L2.1. Liikenteen voimansiirtäjien ja energianlähteiden käyttöönnoton kronologia

Voimansiirtäjä	Käyttöönotto	Energianlähde	Käyttöönotto	Liikennelaji	Käyttöönotto
Inhimilias (biomekaaninen)	2.000.000 eKr	Sokerit, tärkkelys, proteiinit, eläinrasvat, kasviöljyt, etanoli (ruoka)	2.000.000 eKr	Maaliikenne Vesiliikenne Raideliikenne Ilmailukenne Vedenalainen liikenne Avaruusliikenne Kuuliikenne	2.000.000 eKr 60.000 eKr 600 eKr 500-I 1600-I 1960-I 1960-I
Ajoneuvon runko ja massa (staattinen)	2.000.000 eKr	Maapallon gravitaatio Vesivoima Vuorovesivoima Merivirtavoima Tuulivoima Maapallon ilke-energia Muiden taivaankappaleiden gravitaatio	2.000.000 eKr 60.000 eKr 60.000 eKr 60.000 eKr 60.000 eKr 3000 eKr 1970-I	Maaliikenne Vesiliikenne Ilmailukenne Avaruusliikenne	2.000.000 eKr 60.000 eKr 60.000 eKr 500-I 1950-I
Eläinilias (biomekaaninen)	6000 eKr	Sokerit, tärkkelys, proteiinit, kasviöljyt, selluloosa, hemiselluloosat (rehu)	6000 eKr	Maaliikenne Ilmailukenne Raideliikenne Vesiliikenne Vedenalainen liikenne	6000 eKr 500 eKr 100 eKr 600-I 1940-I
Purje (dynaaminen)	3500 eKr	Tuulivoima Nostekaasu (kuumennettu ilma, vety, helium ym.) Auringon fotonipaine (aurinkopurje) Muun planeetan tuulivoima	3500 eKr 1700-I 1970-I 1980-I	Vesiliikenne Maaliikenne Raideliikenne Ilmailukenne Avaruusliikenne Planeettaliikenne	3500 eKr 1800 eKr 1600-I 1700-I 1700-I 1970-I 1980-I
Leija (dynaaminen)	1000 eKr	Tuulivoima	1000 eKr	Ilmailukenne Maaliikenne Vesiliikenne	1000 eKr 1800-I 1900-I
Siipi (staattinen)	500-I	Tuulivoima	500-I	Ilmailukenne Maaliikenne Vesiliikenne	500-I 1920-I 1930-I
Rakettimeoottori (termo- dynaaminen)	900-I	Ruudit (kiinteät, yleensä epäorg. polttoaineet) Kerosiini Etanoli Hypergoliset nestemäiset polttoaineet (mm. metanoli, hydratsiini, vetyperoksidi, typpihappo), FT-bensiini Vety (LH2)	900-I 1920-I 1930-I 1940-I 1950-I	Ilmailukenne Maaliikenne Vedenalainen liikenne Avaruusliikenne	900-I 1920-I 1940-I 1940-I

Taulukko jatkuu seuraavalla sivulla.

Taulukko L2.1. jatkuu edelliseltä sivulta.

Voimaniähde	Käyttöönotto	Energianlähde	Käyttöönotto	Liikennelaji	Käyttöönotto
Jousi/vauhtipyörä (kineettinen)	1600-I	Lihavoima Kiinteät polttoaineet Nestemäiset polttoaineet Sähkö	1600-I 1700-I 1800-I 1800-I	Maaliikenne Vedenalainen liikenne Vesiliikenne	1600-I 1600-I 1600-I
Höyrykone (termo-dynaaminen)	1600-I	Puu (ligniini, selluloosa, hemiselluloosat ym.), kivihiihi ym. Etanoli Epörgaaniset polttoaineet (Zn, Mn-O-R) ym.	1600-I 1700-I 1800-I	Vesiliikenne Maaliikenne Raideliikenne Vedenalainen liikenne Ilmailiikenne	1700-I 1700-I 1800-I 1800-I 1800-I
Siipi (dynaaminen)	1700-I	Lihavoima	1700-I	Ilmailiikenne	1700-I
Höyryturbiini (termodynaaminen)	1800-I (60 jkr)	Puu, kivihiihi ym. (kaikki polttoaineet)	1800-I	Vesiliikenne Lentoliikenne Raideliikenne Vedenalainen liikenne	1800-I 1800-I 1910-I 1950-I
Poltto moottori (hu-ygens, morey, lenoir, otto, diesel, day, wankel ym.) (termodynaaminen)	1600-I	Ruuti Tärpätti ja etanoli Vety ja kaupunkikaasu Metanoli Bensiini ym. raakaöljypohjaiset	1600-I 1700-I 1800-I 1800-I 1800-I	Maaliikenne Vesiliikenne Ilmailiikenne	1800-I 1800-I 1800-I
Sähkömoottori (sähkömagneettinen)	1800-I	Kaikki sähköntuotantomuodot	1800-I	Maaliikenne Raideliikenne Vedenalainen liikenne Vesiliikenne Ilmailiikenne Kuuliiikenne Planeettaliikenne	1800-I 1800-I 1800-I 1800-I 1970-I 1990-I
Kuumailma- ja kuumakaasumootorit (stirling, ericsson ym.) (termodynaaminen)	1800-I	Puu, kivihiihi ym. (kaikki polttoaineet)	1800-I	Vesiliikenne Maaliikenne Vedenalainen liikenne	1800-I 1970-I 1980-I
Poltto keno (kemiallinen)	1800-I				
Veden massa (dynaaminen)	1800-I	Vesivoima	1800-I	Raideliikenne	1800-I

Taulukko jatkuu seuraavalla sivulla.

Taulukko L2.1. jatkuu edelliseltä sivulta.

Voimaniähde	Käyttöönotto	Energianlähde	Käyttöönotto	Liikennelaji	Käyttöönotto
Kaasuturbiini (termodynaaminen)	1600-I (2000 eKr?)			Vesiliikenne	1800-I
Suihkumoottori (termodynaaminen)	1910-I (60 jKr)			Ilmaliikenne	1910-I
Ydinvoima (termodynaaminen)				Vedenalainen liikenne Vesiliikenne Lentoliikenne	1950-I 1960-I 1960-I
Aurinkokenno				Kuuliikenne Planeettaliikenne Maaliikenne Ilmaliikenne	1970-I 1970-I 1970-I 1980-I
Pneumaattinen moottori (virtausdynaaminen)	1800-I	Kiinteät polttoaineet	1800-I	Maaliikenne Vedenalainen liikenne Raideliikenne	1840-I 1860-I 1870-I
Tuuliturbiini (virtausdynaaminen)	1920-I	Tuulivoima	1920-I	Vesiliikenne	1920-I
Evä (dynaaminen)	2000-I	Aaltovoima	2000-I	Vesiliikenne	2000-I

LIITE 3.

Liikenteen ympäristövaikutusten havaitsemisen ja rajoittamisen kronologia

Tiedot ovat peräisin hyvin monesta eri lähteestä ja monet ovat epävarmoja. Päälähteet ovat Bisio & Boots (1997), Munn (2002), Doyle (2000), Cleveland (2004) ja Lampinen (2004d, 2005a-b, 2006). Henkilöiden nimet on kirjoitettu kursiivilla. Mukana on myös joitakin energiankäytön ympäristövaikutusten yleisiä virstanpylväitä.

1) Esihistoriallinen aika (–3000 eaa)

- 60.000 eaa: Vanhimmat todistetut tulen avulla tahallisesti aiheutetut metsäpalot (Tansania)

2) Vanha aika (3000 eaa–400)

- 460-377 eaa: Ihmisen ekologiasta 1. teos (*Hippokrates*, Kreikka)
- 380 eaa: Vanhin säilynyt kirjoitus laivanrakennuksen ja energiakäytön aiheuttamasta metsätuhosta (*Platon*, Kreikka)
- 380 eaa: Energiavero, 1. käyttö: metsäkadon johdosta puun energiakäytölle (Kreikka)
- 100 eaa: lyijyn hulluutta aiheuttava myrkyllisyys tunnettu Roomassa ja kaivos-työntekijöitä suojattu siltä
- 20: Kansallinen ympäristönsuojelulainsäädäntö, 1. käyttö: rajoitukset puun poltolle ja malmin louhinnalle (Kiina)

3) Keskiaika (400–1500)

- 1230: Keski-Euroopan puupulan (laivanrakennus ja energiakäyttö) seurauksena puun tuonti Keski-Eurooppaan alkaa Pohjoismaista (Englanti)
- 1273: Ilmansuojelulain 1. käyttö: hiilen polton kieltö terveyssyistä (Lontoo)
- 1379: Kansallinen hiilivero, 1. käyttö (Englanti, paitsi Newcastle)

4) Uusi aika (1500–1800)

- 1550: Periaate ja määräykset energiaomavaraisuudesta kansallisen turvallisuuden elementtinä (*Kustaa Vaasa*, Ruotsi)
- 1662: 1. tilastollinen kansanterveystutkimus: n. 25 % Lontoon kuolemista ilmansaasteperäisiä (*Graunt*, Englanti):

5) Uusin aika (1800–)

- 1800-luku
 - 1850-l: Massiivinen valaskantojen romahdus johtuen valasrasvan energiakäytöstä, erityisesti valaistukseen
 - 1865: Jevonsin paradoksi: polttoaineen käytön tehokkuuden kasvu johtaa suurempaan polttoaineenkulutukseen, mikä voi aiheuttaa päästöjen kasvun niiden vähenemisen sijaan (rebound-efekti) (Jevons, Englanti)

- 1865: Englannissa voimaan ”Locomotive act” turvaamaan rautatieliikennettä ja eläinvetoista tieliikennettä höyryautojen kilpailua vastaan. Se määräsi, että kaikkia höyryautoja kuljettamaan tarvitaan 3 miestä ja höyryautojen nopeus rajoitettiin 6,5 km/h maaseudulla ja 3 km/h kaupungissa. Laki hidasti paitsi höyrykoneiden liikennekäyttöä, niin myös muun koneellisen tieliikenneteknologian kehittämistä.
- 1865: 1. öljykriisi, joka autioitti ja hävitti kokonaan 15.000 asukkaan Pithole Cityn Pennsylvaniassa
- 1872: Happosade-käsite (*Robert Smith*, Englanti)
- 1873: 1. suuri tappajasumu tappoi 500 Lontoossa; myöhemmät tappajasumut: 1880 (1000 kuollutta), 1892 (1000 kuollutta), 1952 (4000 kuollutta)
- 1885: Mannheimin kaupunki kieltää autoliikenteen ydinkeskustassa
- 1886: Nicolaus Otton vuonna 1877 saaman ottomoottoripatentin voimassaolo lakkasi ennen aikaisesti oikeuden päätöksellä. Patentti oli viivästyttänyt ottomoottorin liikennekäyttöä, josta Otto itse ei ollut kiinnostunut.
- 1887: Polttoaineverovapaus denaturoidulle etanolille Saksassa
- 1890-l: 1. Liikenne-energiaskenaario: nykyisellä liikenteen kasvuvauhdilla hevosen lannan määrä nousee 100 vuoden kuluessa niin suureksi, että se riittäisi upottamaan Manhattanin (New York)
- 1896: Hiilidioksidipäästöjen aiheuttaman ilmastomuutoksen käsite (*Svante Arrhenius*, Ruotsi, kemian nobelisti 1903)
- 1898: Bensiinikäyttöisen auton katalysaattorin toimintaperiaatteen keksiminen (Ranska)
- 1900-luku
 - 1911: George Seldenille vuonna 1895 myönnetty autopatentti lakkautettiin oikeuden päätöksellä. Patentti oli viivästyttänyt USA:n automarkkinoiden kehittymistä lisenssivaatimusten takia.
 - 1922: Katalysaattorien käyttö stationäärisen bensiinimoottorin päästöjen vähentämiseen kaivoksissa (USA)
 - 1943: Voimakas liikenteen aiheuttama smog ensi kerran Los Angelesissa
 - 1950: Auton katalysaattori (*Houdry*, Ranska/USA)
 - 1952: Ajoneuvojen aiheuttaman fotokemiallisen smogin teoreettinen ymmärtäminen (*Arie Jan Haagen-Smit*, Hollanti/Kalifornia)
 - 1950-l: Hiilidioksidipäästöjen aiheuttaman ilmaston lämpenemisen teoreettinen ymmärtäminen
 - 1959: 1. autojen päästörajoituslainsäädäntö käyttöön Kaliforniassa, perustettiin autojen päästöistä vastaava viranomaisorganisaatio Motor Vehicle Pollution Control Board
 - 1960: USA:n kansallinen ajoneuvolaki (Motor Vehicle Act) sis. rahoitus autopäästöjen vähentämistutkimukselle
 - 1961: PCV-teknologia (kampikammion tuuletus) pakolliseksi uusissa autoissa Kaliforniassa
 - 1963: USA:n kansallinen autojen päästönormilaki Clean Air Act
 - 1960-l: Happosadeilmiön teoreettinen ymmärtäminen (*Gene Likens*, USA)
 - 1966: Autojen päästönormien käyttöönotto Japanissa
 - 1966: Autojen päästönormien käyttöönotto (HC, CO) Kaliforniassa, California Highway Patrol aloitti päästörajoitusteknologian pistotarkastukset maanteillä

- 1966: Suomessa käyttöön moottoriajoneuvoverolaki (722/1966), joka edellyttää korkean vuotuisen lisäveron (nykyrahassa n. 10.000 €/v henkilöautolta) maksua biopolttoaineita käyttävistä autoista häikäpönttöautoja lukuun ottamatta (lisävero poistui käytöstä v. 2004 EU-paineen vuoksi)
- 1970: Raskaille ajoneuvoille päästönormit USA:ssa, Clean Air Act, EPA:n perustaminen, ajoneuvojen päästönormit 1. tehtävänään
- 1970: Autojen päästönormien käyttöönotto EU:ssa direktiivillä 70/220/EEC
- 1970: USA:n öljynpumppaushuippu (oli ennustettu oikein v. 1956/ *Hubbert*, USA)
- 1972: Lyijytön bensiini myyntiin USA:ssa
- 1973: USA:n maakaasunpumppaushuippu
- 1975: Autojen energiankulutusnormit (CAFE-standardit) käyttöön USA:ssa: Energy Policy and Conservation Act
- 1975: 2-toimikatalysaattorit ja lyijytön bensiini käyttöön merkittävässä osassa uusia henkilöautoja USA:ssa
- 1979: Lyijyllinen bensiini kiellettiin Brasiliassa
- 1979: Biopolttoaineen (etanoli) lisäys bensiiniin pakolliseksi Brasiliassa
- 1985: Lyijyttömän bensiinin jakeluvolvoite EU:ssa direktiivillä 85/210/EEC
- 1988: Raskaille ajoneuvoille päästönormit EU:ssa
- 1992: Ajoneuvojen päästönormien käyttöönotto Suomessa
- 1995: YK/IPCC linkittää fossiilisten polttoaineiden käytön varmuudella merkittäväksi nykyistä ilmastonmuutosta aiheuttavaksi tekijäksi
- 2000-luku
 - 2002: Laki autojen hiilidioksidipäästönormien käyttöönotosta Kaliforniassa

LIITE 4. Energiaresursseja koskevat liitetaulukot

Taulukko L4.1. Suomen puuvarat (METLA 2004/Taulukko 1.0).

	Yksikkö	Omistajaryhmät				
		Yksityiset	Yhtiöt	Valtio	Muut	Yhteensä
Suomen maapinta-ala	1000 ha					30 447
Metsätalousmaa	1000 ha	14 027	2 041	8 882	1 327	26 227
- metsämaa	1000 ha	12 334	1 816	5 089	1 064	20 303
- kitumaa	1000 ha	960	115	1 602	118	2 794
- muu	1000 ha	734	110	2 192	145	3 180
Puunrunkojen tilavuus	Mm ³	1 386	176	378	109	2 049
- mänty	Mm ³	589	97	232	55	973
- kuusi	Mm ³	519	50	85	33	688
- lehtipuut	Mm ³	278	28	62	21	388
Puunrunkojen vuotuinen kasvu	Mm ³	58,2	8,3	12,0	4,4	82,9
- mänty	Mm ³	22,8	4,6	7,5	2,1	37,0
- kuusi	Mm ³	20,9	2,2	2,4	1,3	26,7
- lehtipuut	Mm ³	14,5	1,5	2,2	1,0	19,2
Puunrunkojen poistuma 2003						69,9
- mänty	Mm ³					28,3
- kuusi	Mm ³					28,0
- lehtipuut	Mm ³					13,6

Taulukko L4.2. Puun runkojen vuosikasvu ja teollisuuden käyttämän runkopuun energiasisältö vuonna 2003

laskettuna METLAN (2004) ja Alakankaan (2000) tietojen pohjalta, lehtipuiden tiheyden arvona on käytetty koivun tiheyttä

	Tilavuus [Mm ³]	Kuiva-aineen tiheys [kg/m ³]	Kuiva-aineen massa [Mt]	LHV [MJ/kg]	Energia [PJ]
Runkojen vuosikasvu	82,9	418	34,6	19,3	668
- mänty	37,0	400	14,8	19,3	286
- kuusi	26,7	390	10,4	19,1	199
- lehtipuut	19,2	490	9,4	19,5	183
Runkojen poistuma	69,9	418	29,2	19,3	563
- mänty	28,0	400	11,2	19,3	216
- kuusi	28,0	390	10,9	19,1	209
- lehtipuut	13,6	490	6,7	19,5	130
Runkojen hakkuujäännös	13,0	418	5,43	19,3	105

Taulukko L4.3. Teollisen puunkäytön jätteiden energiaresurssi vuonna 2003

Taulukot L4.2 ja 1.1 (METLA 2004, BENET 2002–2003, Hakkila 1998), lehtipuut on laskettu koivun arvoilla

	Tilavuus [Mm ³]	Kuiva-aineen tiheys [kg/m ³]	Kuiva-aineen massa [Mt]	LHV [MJ/kg]	Energia [PJ]	Vrt. liikenteen kulutus
Päätähakkuutähde: oksat ja latvukset	26,1	550	14,3	19,9	285	174 %
- mänty (29 % rungosta)	8,1	450	3,7	20,4	75	45 %
- kuusi (54 %)	15,1	610	9,1	19,7	179	109 %
- lehtipuut (21 %)	2,9	530	1,5	19,7	30	18 %
Päätähakkuutähde: kannot ja juuret	20,9	450	9,4	19,4	182	111 %
- mänty (30 % rungosta)	8,4	450	3,8	19,5	74	45 %
- kuusi (30 %)	8,4	410	3,4	19,1	66	40 %
- lehtipuut (30 %)	4,1	510	2,1	19,5	41	25 %
Päätähakkuutähde: neulaset ja lehdet			3,2	20,1	64	39 %
- mänty (13 % rungosta)			1,5	21,0	31	19 %
- kuusi (13 %)			1,4	19,2	27	17 %
- lehtipuut (5 %)			0,3	19,6	7	4 %
Harvennustähteet					95	58 %
- 33 % päätähakkuun oksa- ja latvustähteestä					95	58 %
Sahanpuru					17	10 %
Kuoret	7,0	370	2,6	20,0	52	32 %
- mänty (10 % rungosta)	2,8	300	0,8	20,0	17	10 %
- kuusi (10 %)	2,8	340	1,0	18,6	18	11 %
- lehtipuut (10 %)	1,4	550	0,8	22,7	17	11 %
Tuontipuun kuori	1	370	0,4	20,0	7	5 %
Mustalipeä (sis. tuontipuu)					147	90 %
Muu jättepuu (rakennusteollisuuden purkujäte, paperi ym.)					7	5 %
JÄTEPUU YHTEENSÄ					856	522 %
Hakkuuvara					204	124 %
- rungot	13,0	418	5,43	19,3	105	64 %
- muut (94 % rungosta)					99	60 %
YHTEENSÄ					1060	646 %

LIITE 5. Energiasisältöjä koskevat liitetaulukot

Taulukko L5.1. Fossiliesten polttoaineiden LHV-lämpöarvoja epävarmuuksineen [TJ/Gg] eli [MJ/kg] (IPCC 2006)

TABLE 1.2 DEFAULT NET CALORIFIC VALUES (NCVs) AND LOWER AND UPPER LIMITS OF THE 95% CONFIDENCE INTERVALS ¹				
Fuel type English description		Net calorific value (TJ/Gg)	Lower	Upper
Crude Oil		42.3	40.1	44.8
Orimulsion		27.5	27.5	28.3
Natural Gas Liquids		44.2	40.9	46.9
Gasoline	Motor Gasoline	44.3	42.5	44.8
	Aviation Gasoline	44.3	42.5	44.8
	Jet Gasoline	44.3	42.5	44.8
Jet Kerosene		44.1	42.0	45.0
Other Kerosene		43.8	42.4	45.2
Shale Oil		38.1	32.1	45.2
Gas/Diesel Oil		43.0	41.4	43.3
Residual Fuel Oil		40.4	39.8	41.7
Liquefied Petroleum Gases		47.3	44.8	52.2
Ethane		46.4	44.9	48.8
Naphtha		44.5	41.8	46.5
Bitumen		40.2	33.5	41.2
Lubricants		40.2	33.5	42.3
Petroleum Coke		32.5	29.7	41.9
Refinery Feedstocks		43.0	36.3	46.4
Other Oil	Refinery Gas ²	49.5	47.5	50.6
	Paraffin Waxes	40.2	33.7	48.2
	White Spirit and SBP	40.2	33.7	48.2
	Other Petroleum Products	40.2	33.7	48.2
Anthracite		26.7	21.6	32.2
Coking Coal		28.2	24.0	31.0
Other Bituminous Coal		25.8	19.9	30.5
Sub-Bituminous Coal		18.9	11.5	26.0
Lignite		11.9	5.50	21.6
Oil Shale and Tar Sands		8.9	7.1	11.1
Brown Coal Briquettes		20.7	15.1	32.0
Patent Fuel		20.7	15.1	32.0
Coke	Coke Oven Coke and Lignite Coke	28.2	25.1	30.2
	Gas Coke	28.2	25.1	30.2
Coal Tar ³		28.0	14.1	55.0
Derived Gases	Gas Works Gas ⁴	38.7	19.6	77.0
	Coke Oven Gas ⁵	38.7	19.6	77.0
	Blast Furnace Gas ⁶	2.47	1.20	5.00
	Oxygen Steel Furnace Gas ⁷	7.06	3.80	15.0
Natural Gas		48.0	46.5	50.4
Municipal Wastes (non-biomass fraction)		10	7	18
Industrial Wastes		NA	NA	NA
Waste Oil ⁸		40.2	20.3	80.0
Peat		9.76	7.80	12.5

Taulukko L5.2. Biopolttoaineiden LHV-lämpöarvoja epävarmuuksineen [TJ/Gg] eli [MJ/kg] (IPCC 2006)

Fuel type English description		Net calorific value (TJ/Gg)	Lower	Upper
Solid Biofuels	Wood/Wood Waste ⁹	15.6	7.90	31.0
	Sulphite lyes (black liquor) ¹⁰	11.8	5.90	23.0
	Other Primary Solid Biomass ¹¹	11.6	5.90	23.0
	Charcoal ¹²	29.5	14.9	58.0
Liquid Biofuels	Biogasoline ¹³	27.0	13.6	54.0
	Biodiesels ¹⁴	27.0	13.6	54.0
	Other Liquid Biofuels ¹⁵	27.4	13.8	54.0
Gas Biomass	Landfill Gas ¹⁶	50.4	25.4	100
	Sludge Gas ¹⁷	50.4	25.4	100
	Other Biogas ¹⁸	50.4	25.4	100
Other non-fossil fuels	Municipal Wastes (biomass fraction)	11.6	6.80	18.0

Taulukko L5.3. Liikennepolttoaineiden energiasältövertailuja

Bensiinivertailu

- 1 Nm³ puhdistettua maakaasua/biokaasua = 1,12 bensiinilitraa (Nm³ = normaalkuutio = kuutio 0 °C:ssa ja 1,013 bar:issa)
- 1 kg puhdistettua maakaasua/biokaasua = 1,5 bensiinilitraa
- 1 kg vetyä ottomoottoriin (LHV) = 3,8 bensiinilitraa (1 gallona)
- 1 kg vetyä low-temp-FC-autoon (HHV) = 4,4 bensiinilitraa
- 1 litra E100-etanolia = 0,65 bensiinilitraa
- 1 litra E85-etanolia = 0,71 bensiinilitraa (Eff. = 0,71–0,77)*
- 1 litra M100-metanolia = 0,5 bensiinilitraa

*Sekä etanoli että metanoli ovat korkeaoktaanisista ja happea sisältäviä polttoaineita, jotka parantavat polttoprosessin hyötysuhdetta bensiiniin verrattuna ja siten niiden käytössä energiankulutus/km on alempi kuin bensiinillä. Tämä vaikutus voi olla alhaisilla pitoisuuksilla (E5) lähes 30 %.

Diesel-vertailu

- 1 litra B100-biodieseliä = 0,92 diesel-litraa*
- 1 litra B20-biodieseliä = 0,98 diesel-litraa*
- 1 litra rypsiöljyä = 0,96 diesel-litraa* (setaaniluku > 38)
- 1 litra Ecopar GTL-dieseliä (FT-diesel) = 0,94 diesel-litraa** (setaaniluku 73–81)
- 1 litra NExBTL BTL-dieseliä = 0,94 diesel-litraa** (setaaniluku 84–99)
- 1 kg DME:tä = 0,79 diesel-litraa* (setaaniluku >55)

*Biodiesel, rypsiöljy, BTL ja DME parantavat polttoprosessin hyötysuhdetta hapen avulla kuten alkoholit otto-moottorissa, joten efektiivinen ero on pienempi.

**GTL ja BTL parantavat hyötysuhdetta korkean setaaniluvun takia

LIITE 6. Polttoaineiden ominaisuuksia koskevat liitetaulukot

Taulukko L6.1. Kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksia

Yhdiste/yhdisteryhmä	Lämpöarvo HHV [MJ/kg]	Lämpöarvo LHV [MJ/kg]
Beryllium Be	68,7	
Litiumborohydridi (LiBH ₄)	65,2	
Boori B	58,6	
Litium Li	43,1	
Tali (eläinrasva)		40
Hiili (puuhiili ja koksi) C	32,8	32,8
Alumiini Al	31,2	
Kivhiili	13,5–35,4	13–35
Magnesium Mg	24,9	
Proteiinit	24,0	
Palaturve	22,5	
Jyrsinturve	22,1	20,9
Puu	18–21	
Olki	18–19	
Polysakkaridit (täkkelys ym.) (CH ₂ O) _n	17,5	
Disakkaridit (sakkarooosi ym.) (CH ₂ O) ₂	16,7	
Monosakkaridit (glukoosi ym.) CH ₂ O	15,6	
Kuiva lanta	15	
Rikki S	9,3	9,3
Tetranitrotolueeni (TNT)	4,2	
Musta ruuti	2,8	

Taulukko L6.2. Nestemäisten polttoaineiden ominaisuuksia
(yhdisteen kaava tai alkuaineiden pitoisuudet p-%)

Yhdiste/yhdisteryhmä	Tiheys [kg/l]	Lämpöarvo HHV [MJ/kg]	Lämpöarvo LHV [MJ/kg]
Pähkinäöljy	0,90		49,8
Bensiini (86 C, 14 F)	0,72–0,78	47	43
Kerosiini (87 C, 13 H)	0,77–0,83	47	43
Petroli (87C, 13H)	0,76–0,86	46	43
Dieselöljy (86 C, 13 H)	0,81–0,86	46	43
Raakaöljy (82 C, 11 H)	0,7–1,0		40–46
Terpeenit (tärpätti) (C ₅ H ₈) _n	0,86	45	42
Ruskohiilitervaöljy (84 C, 11 H)	0,87		41
Bentseeni C ₆ H ₆	0,88	41,9	40,2
Rypsiöljy	0,91		39,7
Soijaöljy	0,91		39,6
Naurisöljy	0,91		39,4
Pellavaöljy	0,92		39,3
Biodiesel	0,86–0,89	42	38
Kivihiihtervaöljy (89 C, 7 H)	1,1	40	37
Propanoni (asetoni) (CH ₃) ₂ CO	0,79		28,5
Etanoli C ₂ H ₅ OH	0,79	29,7	26,8
2,3-Butandioli		27,2	
Pyrolyysiöljy			16–28
Hydratsiini N ₂ H ₂		21,7	
Metanoli CH ₃ OH	0,79	22,7	19,9
Pyrolyysiöljy			15–23
Glyseriini (glyseroli) C ₃ H ₅ (OH) ₃	1,26		16
Mustalipeä		14	
Nitrometaani	1,14	11,3	
Nitroglyseriini	1,6		6

Taulukko L6.3. Kaasumaisten polttoaineiden ominaisuuksia (yhdisteen kaava tai alkuaineiden pitoisuudet p-%)

Yhdiste/yhdisteryhmä	Tiheys [kg/Nm ³]	Lämpöarvo HHV [MJ/kg]	Lämpöarvo LHV [MJ/kg]
Vety H ₂	0,090	142	120,0
Metaani CH ₄	0,72	55,5	50,1
Etyyni (asetyleeni) C ₂ H ₂	1,17	50,0	48,3
Puhdistettu maakaasu (76 C, 24 H)	0,83		47,7
Etaani C ₂ H ₆	1,36	51,9	47,5
Eteeni (etyleeni) C ₂ H ₄	1,26	50,3	47,2
Propani C ₃ H ₈	2,0	50,4	46,4
- L-propani 0,51 kg/l		50,0	46,0
Nestekaasu (C ₃ H ₈ + C ₄ H ₁₀)	2,25		46
- LPG 0,54 kg/l			
Butaani C ₄ H ₁₀ (n-)	2,7	49,6	45,6
- L-butaani (n-) 0,58 kg/l		49,2	45,4
Puhdistettu kaatopaikkakaasu (95 CH ₄ , 5 CO ₂)			38
Kaupunkikaasu (50 H, 8 CO, 30 CH ₄)	0,6		30
DME (CH ₃ -O-CH ₃)	1,92		28,4
Kaatopaikkakaasu (46 CH ₄ , 54 CO ₂)			27
Ammoniakki NH ₃	0,69		19
Vetysulfiidi H ₂ S	1,46	16,5	15,2
Vesikaasu (50 H, 38 CO)	0,71		15
Hiilimonoksidi CO	1,25	10,1	10,1
Masuunikaasu (28 CO, 59 N, 12 CO ₂)	0,83		3,2

Taulukko L6.4. Energian varastointivälineiden ominaisuuksia

Varastointitekniikka	Energiatiheys [MJ/kg]	Hyötysuhde [%]
Vety (CH tai LH)	143	
Litiumborohydridi (LiBH ₄)	65	
Läski	38	22–26
Paineilma 300 bar	4	
Li-ioniakku	0,54–0,72	95
Zn-ilma-akku	0,4–0,72	
Vauhtipyörä	0,5	81–94
Paineilma 20 bar	0,27	64
NiMH-akku	0,22	60
NiCd-akku	0,14–0,22	80
Lyijyakku	0,07–0,11	75–85
Ultrakondensaattori	0,02	90–95
Vesi 100 m korkeudella	0,001	

Taulukko I6.5. Eräiden ortomootoreihin soveltuvien polttoaineiden fysikaalisia, kemiallisia ja moottoriteknisä ominaisuuksia

Koottu monista lähteistä. Huom. etterettä MTBE, ETBE ja TAME käytetään vain lisääneinä, nitrometaania käytetään vain kilpakäytössä, propania ja butaania käytetään yleensä yhdessä nestekaasuna. LHV tilavuusyksiköissä on annettu litroina nestemäisille polttoaineille ja normaalkuutiolina kaasumaisille polttoaineille. Useita lähteitä, joihin kuuluvat (Perry & Green 1984)

Ominaisuus	Bensiini	Metanoli	Etanoli	Propanoli IPA	Butanoli NBA/TBA	MTBE	ETBE	TAME	Nitro-metaani	Butaani (n-)	Propani	Metaani	Vety
Olomuoto @ 15 °C	neste	neste	neste	neste	neste/kiinteä	neste	neste	neste	neste	kaasu	kaasu	kaasu	kaasu
Kemiallinen kaava	C ₄ ..C ₁₂ -seos + lisäaineet	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₄ H ₉ OH	(CH ₃) ₃ C-O-CH ₃	(CH ₃) ₃ C-O-CH ₂ CH ₃	CH ₃ CH ₂ (CH ₂) ₂ C-CH ₃	CH ₃ NO ₂	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈	CH ₄	H ₂
Molekyylipaino [g/mol]	» 103 (58 -170)	32	46	60	74	88	102	102	61	58	44	16	2
Alkuainejakauma [p-%]													
Hilii	81–88	37,5	52,2	60,0	64,8	68,1	70,5	70,5	19,7	82,8	81,7	75,0	0
Vety	10–15	12,6	13,1	13,4	13,6	13,7	13,8	13,8	4,9	17,2	18,3	25,0	100
Happi	0–3,7	49,9	34,7	26,6	21,6	18,2	15,7	15,7	52,5	0	0	0	0
Lämpöarvo HHV [MJ/kg]	47	22,7	29,7							49,6	50,4	55,5	142
Lämpöarvo LHV [MJ/kg]	42,7 (41–44)	20,0	27,0	30,9	36/33,1	35,1		36,7	11,3	46,7	46,4	50,1	120
LHV [MJ/l] tai [MJ/Nm ³]	32	16	21	24	29,2/27	26		28	12	111	94	36	11
Stoikiometrinen ilma/ra-suhde [kg/kg]	14,7	6,5	9,0	10,3	11,1	11,7		12,1	1,7	15,5	15,7	17,2	34,3
Ominaisenergia [MJ/kg ilmaa]	2,9	3,1	3,0	3,0	3,2	3,0		3,0	6,6		2,9	2,9	3,5
Tiheys [kg/Nm ³] @ 15 °C ja 1 bar	720–780	795	790	785	810	744		770	1100	6,1	1,8 (LP 506)	0,72 (CBG 144) (LBG 400)	0,090

Taulukko jatkuu seuraavalla sivulla.

Taulukko L6.5. jatkuu edelliseltä sivulta.

Ominaisuus	Bensini	Metanoli	Etanoli	Propanoli IPA	Butanoli NBA/TBA	MTBE	ETBE	TAME	Nitro-metaani	Butaani (n-)	Propani	Metaani	Vety
Oktaaniuku (suluisa sekoitusoktaaniuku alhaisella, muutaman %:n sekoituksella)													
RON	90-100	107 (130)	108 (130)		(96/104)	(115)	(110)	(111)		92	112	140	106
MON	80-90	90 (103)	90 (106)		(78/94)	(102)	(99)	(100)		89	96	140	
Setaaniuku	5-20	3-5	-20 - 8								5-10	-10	
Jäätymispiste [°C]	-80-70	-98	-114	-89	26	-109		-80	-29	-138	-188	-182	-259
Höyrystymispiste [°C]	25-220	65	78	82	82	55	73	86	102	-0,5	-42	-162	-253
Höyrystymislämpö [kJ/kg] @ 15 °C	348	1170	840	742	430/599	320				385	436	510	460
Höyrinpaine RVP [kPa] @ 37,8 °C	35-100	32	16	12	12	54	30	10		3500	1400	16500	
Leimahduspiste [°C]	-50-40	11	13	12	11	-14		-11		-80	-104	-188	
Itsesytytmislämpötila [°C]	260	464	423	399	478	435				287	432	650	580
Sytytysrajat [t-% ilmassa]													
Alempi	1	7	4	2	2,4	1,6			0	1,8	2	5	4
Ylempi	8	36	19	12	8	8,4			100	8,4	9,5	15	75
Vesiliukoisuus @ 21 °C [t-%]	<<1	100	100	100	100	4,3		0,6		0,033	0,039		
Viskositeetti [centipoise] @ 20 °C / - 20 °C	0,37-0,44/0,60-0,77	0,59/1,15	1,19/2,84	2,38/9,41	4,2/kiinteä	0,35/0,60							

Taulukko L6.6. Eräiden dieselmootoreihin soveltuvien polttoaineiden fysikaalisia, kemiallisia ja moottoriteknisii ominaisuuksia

Koottu monista lähteistä.

Ominaisuus	Diesel	Biodiesel	Rypsiöljy	RME	REE	Soijaöljy	SME	SEE	Pähkinäöljy	Palmuöljy	Pellavaöljy	Tali	DME
Olomuoto @ 15 °C	neste	Neste	neste	neste	neste	neste	neste	neste	neste	neste	neste	kiinteä	kaasu
Kemiallinen kaava	C6-C25	C12-C22-esteri											CH ₃ -O-CH ₃
Molekyylipaino [g/mol]													46
Alkuainejakauma [%]													
Hilii	84-87	77											52
Vety	13-16	12											13
Happi	0	11											35
Tiheys [kg/m ³] @ 25 °C	810-860	860-890	912	890	900	914	890	880	903	918	924		1,92 (LDME 668)
Höyrystymispiste [°C]	180-360	315-350					339						-24,9
Höyrystymislämpö [kJ/kg]	375												410
Höyrönpaine [kPa] @ 37,8 °C	1,4	< 1											800
Oktaaniluku													
RON													13
MON													
(R+M)/2	8-30												
Setaaniluku	38-55	45-72	38	52-55		38	45-47	48	42	42	35		55-68
Jäätymispiste [°C]	-35..-26	-15											-141
Leimahduspiste [°C]	38-80	100-180	246	153	191	254	141-188	195	271	267	241	201	-41
Itsesytyislämpötila [°C]	254												235-350
Sytytysrajat [% ilmassa]													
alempi	0,6												3,4
ylemmpi	6,5												17
HHV	45			40	39		40	40					
LHV [MJ/l] tai [MJ/Nm ³]	35-36	33-36											
Lämpöarvo LHV [MJ/kg]	42-43	38	39,7			39,6			49,8		39,3	40	28,4
Cloud point [°C]	-19 - 5	-3-13	-3,9	-3	8	-3,9	2	1	12,8	31	1,7		
Pour point [°C]	-45 - -8	-15-16	-31,7			-12,2	-2	-4	-6,7		-15		
CFPP [°C]	-36 - -6												
Viskositeetti [centipoise] @ 40 °C	1,9-4,1	1,9-6	37,0	4,8		32,6	4,1-4,5	4,4	39,6	39,6	22,2		0,25
Ilma/pa-suhde	14,5												

Taulukko L6.7. Metanolin ominaisuuksia

Nimet	Metanoli, metyylialkoholi, puualkoholi
Kemiallinen kaava	CH ₃ -OH, CH ₃ OH
Molekyylipaino	32
Sopivuus mootto-reihin	Otto, wankel, diesel (lisäaineen kanssa tai dieseliin sekoitettuna), stirling, raketti, kaasuturbiini, polttokenno
Käyttöönotto	<ul style="list-style-type: none">• Balsamointikäytössä 2000 eKr (Egypti)• Liikennekäytössä 1820-l (USA)
Valmistusmenetelmiä	<ol style="list-style-type: none">1. Höyryreformointi + metanolisynteesi (metaani, muut kaasumaiset ja nestemäiset polttoaineet)2. Kaasutus + metanolisynteesi (kaikki kasvit, mustalipeä, kivihiili)3. Hidas pyrolyysi + tislauk (puu ja muut kasvit)4. Alkoholifermentaatio + tislauk (sokerikasvit, tärkkelyskasvit)5. Ligniinin metoksyyliryhmistä kemiallisesti
Lähtöaineita	<ol style="list-style-type: none">1. Biokaasu, maakaasu2. Puu ja muut kasvit; mustalipeä3. Kivihiili
Moottoritekniisiä ominaisuuksia - Oktaaniluku - Setaaniluku	107 (pienissä pitoisuuksissa efektiivisesti 130)
Terveysominaisuuksia (EU-luokittelu)	Myrkyllinen (T), helposti syttyvä (F)
Ympäristö-ominaisuuksia	Täysin vesiliukoinen, nopeasti biohajoava
Polton päästöjä	<ul style="list-style-type: none">• Karakteristinen päästö: formaldehydi HCHO• Tavanomaiset: CO, NO_x, N₂O, CO₂ (ei biometanolilla)• Vähäiset: muita kevyitä VOCeja, PM• Ei päästöjä: SO_x, metallit, raskaat VOCit, mm. PAHit ja muut aromaattiset

Taulukko L6.8. Etanolin ominaisuuksia

Nimet	Etanoli, etyylialkoholi, sprii (96 t-%, 94 p-% etanoli, loput vettä)
Kemiallinen kaava	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
Molekyylipaino	46
Sopivuus moottoreihin	Otto, wankel, diesel (lisäaineen kanssa tai dieseliin sekoitettuna), stirling, raketti, kaasuturbiini
Käyttöönotto	<ul style="list-style-type: none"> • Elintarvikekäytössä: 7000 eKr (Kiina) • Voimakonekäytössä: 1793 (Englanti) • Absoluuttinen etanoli (E100): 1796 (Saksa) • Moottoroidussa liikennekäytössä: 1826 (USA)
Valmistusmenetelmiä	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alkoholifermentaatio: käyminen (sokerikasvit, tärkkelyskasvit) 2. Eteenin hydraus (raakaöljy) 3. Etyynin hydraus: karbidisprii (kalkki + hiili) 4. Happon/entsyymi/sulfiittilipeähydrolyysi + alkoholifermentaatio (olki, puu, muut kasvit) 5. Kaasutus + terminen etanolisynteesi (kaikki kasvit) 6. Höyryreformointi + etanolisynteesi (biokaasu, maakaasu) 7. Kaasutus/höyryreformointi + FT-synteesi + tislauk (kaikki kasvit, kivihiili, maakaasu, biokaasu) 8. Biosynteesi synteesi/savukaasuista (kaikki kasvit)
Lähtöaineita	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sokerikasvit: sokeriruoko, sokerijuurikas ym. 2. Tärkkelyskasvit: ohra, vehnä, peruna ym. 3. Muut kasvit: olki, puu ym. 4. Muut: kalkkikivi+hiili, raakaöljy, kivihiili, maakaasu ym.
Mootoritekniisiä ominaisuuksia - Oktaaniluku - Setaaniluku	108 (pieninä pitoisuuksina efektiivisesti 130)
Terveysominaisuuksia (E-luokittelu)	Helposti syttyvä (F), Elintarvike
Ympäristöominaisuuksia	Täysin vesiliukoinen, nopeasti biohajoava
Polton päästöjä	<ul style="list-style-type: none"> • Karakteristinen päästöläji: asetaldehydi CH_3CHO • Tavanomaiset: CO, NO_x, N₂O, CO₂ (ei bioetanolilla) • Vähäiset: HCHO, muita kevyitä VOCeja, PM • Ei päästöjä: SO_x, metallit, raskaat VOCit, mm. PAHit ja muut aromaattiset

Taulukko L6.9. Metaanin ominaisuuksia

Kemiallinen kaava	CH ₄
Molekyylipaino	16
Sopivuus moottoreihin	Otto, wankel, diesel, stirling, rakettimoottori, kaasuturbiini, suihkumoottori
Käyttöönotto	<ul style="list-style-type: none"> • 1. käyttö valaistuksessa Lähi-idässä n. 3000 eaa • Liikennekäytössä osana kaupunkikaasua: 1860-l (Ranska) • Liikennekäytössä pääkomponenttina: SNG 1930-l (Saksa), CNG 1930-l (Italia), CBG 1940-l (Ruotsi), LNG 1970-l, LBG 2008 (Englanti), SBG 2009 (Itävalta)
Valmistusmenetelmiä	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mädätys (biokaasutus) 2. Terminen kaasutus 3. Terminen kaasutus + metaanisynteesi 4. Sabatier-reaktio 5. Elektrometanogeneesi.
Lähtöaineita	<ol style="list-style-type: none"> 1. Biojätteet 2. Muut bioresurssit 3. Hiilidioksidi
Moottoritekniisiä ominaisuuksia - Oktaaniluku - Setaaniluku	138 (biokaasulla korkeampi, maakaasulla alempi)
Terveysominaisuuksia (EU-luokittelu)	Helposti syttyvä (F), hajuton, myrkytön
Ympäristö-ominaisuuksia	Kasviuonekaasu
Polton päästöjä	<p>Karakteristinen päästö: metaani</p> <p>Tavanomaiset: CO, NO_x, N₂O, CO₂ (ei biometanolilla)</p> <p>Vähäiset: kevyitä VOCEja</p> <p>Ei päästöjä: SO_x, metallit, raskaat VOCit, mm. PAHit ja muut aromaattiset</p>

LIITE 7. Liikenteen energiankulutusta koskevat liitetaulukot

Taulukko L7.1. Tieliikenteen energian kulutus ja päästöt Suomessa vuonna 2004
(Tilastokeskus 2005)

Mukana ovat vain käytön aikaiset päästöt.

Energiamuoto	Energian loppukäyttö			Käyttö-osuus [%]	Päästökerroin [tCO ₂ /PJ]	Päästöt [MtCO ₂]
	[PJ]	[TWh]	[Mtoe]			
Dieselöljy	85,46	23,74	2,04	52,1	73 200	6,26
Bensiini	78,27	21,74	1,87	47,7	73 200	5,73
Etanoli	0,19	0,05	0,005	0,1	0	0
Maakaasu	0,12	0,03	0,003	0,1	55 000	0,007
YHT.	164,04	45,56	3,92	100,0	73 200	12,00

Taulukko L7.2. Liikenteen energian kulutus maailmassa, OECD-maissa, EU-25:ssa, Ruotsissa ja Suomessa vuonna 2004 (IEA:n tietokanta)

Kulutus tarkoittaa sekundäärienergiaa LHV:nä.

	Maailma	OECD	EU-25	Ruotsi	Suomi
Liikenteen energiankulutus LHV [Mtoe]	1975	1284	361	8,56	4,92
Liikenteen energiankulutus LHV [EJ]	82,7	53,8	15,1	0,358	0,206
Liikenteen osuus kaikesta energian kulutuksesta	26 %	34 %	29 %	24 %	18 %
Energiamuotojen osuus liikenteen kulutuksesta					
1. Raakaöljy	94,41 %	96,96 %	97,30 %	94,91 %	98,33 %
2. Maakaasu	3,45 %	1,57 %	0,43 %	0,18 %	0,47 %
3. Sähkö	1,11 %	0,76 %	1,72 %	3,00 %	1,10 %
4. Uusiutuva energia (poislukien UE-sähkö)	0,78 %	0,70 %	0,55 %	1,91 %	0,10 %
5. Kivihilli	0,23 %	0,006 %	0,002 %	0	0
Liikenteen osuus energiamuotojen käytöstä					
1. Raakaöljy	57,7 %	62,2 %	59,6 %	58,7 %	53,1 %
2. Maakaasu	5,6%	2,7 %	0,5 %	2,9 %	2,5 %
3. Sähkö	1,8 %	1,3 %	2,7 %	2,3 %	0,8 %
4. Uusiutuvan energia (poislukien UE-sähkö)	1,5 %	7,1 %	4,1 %	3,1 %	0,09 %
5. Kivihilli	0,7 %	0,06 %	0,02 %	0	0



Innovatively investing
in Europe's Northern
Periphery for a sustainable
and prosperous future



JOENSUUN SEUDUN
JÄTEHUOLTO OY



Tämä julkaisu on ensimmäinen suomenkielinen yleisesitys uusiutuvien energiamuotojen käyttömahdollisuuksista liikenteessä. Tarkoituksena on palvella sekä yleistä tiedon tarvetta tällä alalla kansallisesti että erityisesti valmisteilla olevaa uusiutuvien liikenteen energiamuotojen koulutus- ja tutkimushanketta Pohjois-Karjalassa.

Kaikkien liikennemuotojen osalta on mahdollista siirtyä uusiutuvien energiamuotojen käyttöön lukuisten olemassa olevien teknologioiden ja resurssien kautta. Koottu tieto auttaa niin opiskelijoita kuin päätöksentekijöitäkin hahmottamaan kasvihuonekaasupäästöjen ja muiden liikenteen aiheuttamien ekologisten ongelmien ratkaisumahdollisuuksia. Tietoa tarvitaan, kun valmistaudutaan niihin yhteiskunnallisiin vaikutuksiin, jotka aiheutuvat raakaöljyn globaalin tuotantohuipun lähestymisestä. Teknologian tietoisien valinnan merkitys korostuu tulevan muutoksen hallinnassa.

Tarkastelun painopisteessä on autoliikenne, mutta myös raide-, vesi-, ilma-, avaruus- ja viestiliikennettä käsitellään. Julkaisussa on historiallinen tiekartta 23 liikenteen biopolttoaineen sukupolven ja muiden uusiutuvien liikenteen energialähteiden teknologioiden käyttöönotosta. Lisäksi on katsaus nykyisin käytettävissä oleviin resursseihin ja niiden hyödyntämisen teknologioihin, sekä tiekartta tulevien valintojen pohjaksi. Julkaisussa on runsas kuvitus ja paljon käytännön esimerkkejä.

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun julkaisuja
B: 17

ISBN 978-951-604-100-4
ISBN 978-951-604-101-1 (pdf)
ISSN 1797-3821
ISSN 1797-383X (pdf)