

**Kauko Jarva & Mauri Niskanen**  
**STIRLING-MOOTTORI PUUKAASUKÄYTÖSSÄ**

**Opinnäytetyö**  
**KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU**  
**Sähkötekniikan koulutusohjelma**  
**Toukokuu 2011**

## TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Yksikkö</b> Ylvieska	<b>Aika</b> Toukokuu 2011	<b>Tekijä/tekijät</b> Kauko Jarva & Mauri Niskanen
<b>Koulutusohjelma</b> Sähkötekniikka/ Energiatekniikka		
<b>Työn nimi</b> STIRLING- MOOTTORI PUUKAASUKÄYTÖSSÄ		
<b>Työn ohjaaja</b> Yrjö Muilu	<b>Sivumäärä</b> 79 + 5	
<b>Työelämäohjaaja</b> Hannu Snellman		
<p>Tämän opinnäytetyön aihe Stirling- moottori puukaasukäytössä käsittelee maakaasukäytöisen Solo 161 Stirling- moottorin asentamista puukaasulla toimivaksi. Työn olennainen kohde oli maakaasupolttimen saattaminen toimimaan puukaasulla. Opinnäytetyöhön kuului onnistuneen asennuksen jälkeen tehdä hyötysuhdemittauksia CHP- käytössä sähkön- ja lämmöntuotannon sekä kokonaishyötysuhteen osalta. Työssä tutkittiin yleisesti laitteen toimivuutta puukaasulla sekä tarkasteltiin hyötysuhteeseen vaikuttavan lämmönsiirtopintojen likaantumista.</p> <p>Tämä työ tehtiin Ylvieskan Centrian toimeksiantona vuonna 2011. Tämän tutkimustyön toteutuminen oli mahdollista Stirling- moottorin vuokrauksen ja materiaalihankintojen osalta HighBio- Interreg Pohjoinen projektirahoituksen turvin.</p> <p>Tutkimuslaitteisto asennettiin Centrian tiloihin Sievin energialaboratorioon, joka toimi myös laitteiston testauspaikkana - ja tilana. Testauksessa tuotekaasu tuotettiin EK- kaasun myötävirta puukaasutuslaitteistolla.</p> <p>Asennus - ja mittaustulosten perusteella voitiin päätellä, että Stirling- moottorin tarvitsema lämpöenergia voidaan tuottaa hyvällä hyötysuhteella maakaasupolttimen avulla puukaasusta. Laitteisto on automatisoitavissa helppokäyttöiseksi ja toimintavarmaksi. Tehty työ antaa hyvän perustietämyksen laitteistokokonaisuuden jatkokehittelyyn, johon täytyy ohjata voimavaroja sekä kaasutintoimittajan että stirling-moottorivalmistajan toimesta.</p>		
<b>Asiasanat</b> CHP- käyttö, maakaasupoltin, puukaasu, Stirling- moottori		

**ABSTRACT**

<b>CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</b>	<b>Date</b> May 2011	<b>Author</b> Kauko Jarva & Mauri Niskanen
<b>Degree programme</b> Sähkötekniikka/ Energiatekniikka		
<b>Name of thesis</b> Stirling engine in wood gas usage		
<b>Instructor</b> Yrjö Muilu		<b>Pages</b> 79 + 5
<b>Supervisor</b> Hannu Snellman		
<p>The task of this thesis is to use a natural gas driven Solo 161 Stirling engine, and convert it to work with wood gas. After the successful installation and conversion of the fuel supply, the mission was to make laboratory experiments about combined heat and power usage and also measure the total efficiency rate. In this thesis one studied the functionality of the machine and also the fouling of the heat transfer surfaces, which affected the efficiency rate.</p> <p>This thesis was commissioned by Centria of Ylivieska in 2011. The research was made possible by HighBio-Interreg North project funding. This enabled the renting of the Stirling engine and other material purchases.</p> <p>The research hardware was installed in the Energy laboratory of Centria in Sievi, which worked also as a test site. Product gas was made by EK gasifier which is a downdraught type gasifier.</p> <p>Installation and measurement led to the conclusion that the heat energy needed by Stirling engine could be produced by gas burner using wood gas. The hardware is easily converted to a reliable and automatic. One the work gives a good basic knowledge of the hardware package for further development, which requires effort from both the gasifier producer and the Stirling engine manufacturer.</p>		

**Key words**

Combined heat and power usage, gas burner, wood gas, Stirling engine

## ESIPUHE

Opinnäytetyömme kohteena oli Stirling- moottorin asennus puukaasukäyttöiseksi ja laitteiston hyötysuhdemittaukset. Projektin alullepanijana ovat olleet Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulusta energiatekniikan lehtori DI Yrjö Muilu ja Ylivieska Centrian kehitysinsinööri Hannu Snellman. Heidän avustuksellaan oli mahdollista saada vuokrattua Jyväskylän yliopiston tutkimuskäytössä ollut Stirling- moottori opinnäytetyö aiheeksi ja tutkimuskäyttöön Sievin energialaboratorioon. Jyväskylän yliopistolta projektin onnistumiseen ovat olleet vaikuttamassa professori Jukka Konttinen ja laboratorioinsinööri Arjo Heinsola. Tutkimus on saanut rahoitusta High Bio- interreg Pohjoinen projektista laitteiston vuokra- ja materiaalikuluihin.

Haluamme kiittää kyseisiä tahoja mahdollisuudesta tehdä tästä merkittävästä aiheesta opinnäytetyö, sekä yhteistyöstä projektin aikana. Ohjauksesta ja työhön opastuksesta haluamme kiittää lehtori Yrjö Muilua, työelämän ohjaaja Hannu Snellmania ja lehtori Kari Pieniniemeä, joiden suurella avustuksella oli mahdollista saada laitteisto toiminta - ja käyttökuntoon.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## ESIPUHE

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1. JOHDANTO</b>	
1.1 Taustaa	1
1.2 Työn tavoitteet	1
1.3 Tavoitteet ja rajaukset	1
<b>2. PUUKAASU</b>	<b>3</b>
2.1 Historiaa	3
2.2 Kaasutus	4
2.3 Kaasutintyytit	8
2.4 Myötävirtakaasutus	9
2.5 Tuotekaasu	13
2.6 Kaasun puhtaus	15
2.7 Polttoaineen lämpöarvo	16
<b>3. EK- KAASUTIN</b>	<b>18</b>
3.1 Kaasutin	18
3.2 Kaasun puhdistus	20
<b>4. YHDISTETTY SÄHKÖN- JA LÄMMÖNTUOTANTO (CHP)</b>	<b>22</b>
4.1 Polttomoottorit ja kaasuturbiinit	23
4.2 Höyryvoimalaitokset	24
4.3 Välittäjäaineisiin liittyvät tekniikat	24
4.4 Polttokennot	24
<b>5. STIRLING MOOTTORI</b>	<b>26</b>
5.1 Historiaa	26
5.2 Stirling- moottorin toiminta	27
5.3 Scmidtin teoria	28
5.4 Moottorityypit	30
5.5 Ominaisuudet	33
5.6 Generaattori	34
5.7 Stirling- moottorien valmistajia	35
<b>6. STIRLING MOOTRTORI PUUKAASUKÄYTÖSSÄ</b>	<b>37</b>
6.1 Yleistä	37
6.2 Biomassan käytön ongelmat	37
6.3 Poltinpoltto	38
6.3.1 Kaasun palamistekniset ominaisuudet	39
6.3.2 Polttimen ohjaus ja säätö	41
6.3.3 Poltintyytit	42

<b>7. TYÖN KULKU</b>	<b>44</b>
7.1 Laitteiston rakentaminen	44
7.2 Poltin	47
7.3 Asennus ja koekäyttö	48
<b>8. KOETULOKSET</b>	<b>56</b>
8.1 Koelaitteisto	56
8.2 Mittauslaitteisto	58
8.3 Kokeiden suoritus	60
8.4 Mittaustulokset	62
<b>9. TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>65</b>
9.1 Hyötysuhde	65
9.2 Likaantuminen	68
9.3 Palamiskaasut	70
9.4 Yleinen toiminta	73
<b>10. YHTEENVETO</b>	<b>74</b>
<b>11. LÄHTEET</b>	<b>76</b>
<b>12. LIITTEET</b>	

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Taustaa

Puun kaasutuksella voidaan tuottaa tuotekaasua biomassasta korkeassa lämpötilassa vähähappisissa olosuhteissa. Kaasua voidaan käyttää suoraan kaasuturbiini-, moottori- ja lämmityskäytössä. Tuotekaasusta voidaan myös erottaa vetyä tai metaania muualla tapahtuvaa käyttöä varten tai jalostaa synteetikaasua muiden polttoaineiden valmistamiseksi. Kaasutustekniikkaa voidaan käyttää sekä sähkön että lämmön tuotantoon hyvinkin pienessä kokoluokassa.

Hyvän hyötysuhteen omaava Stirling- moottori on suunniteltu maakaasulla, nestemäisellä polttoaineella tai auringon lämpösäteilyllä toimivaksi. Moottorin toimintaperiaate mahdollistaa myös puukaasun käytön energian lähteenä.

## 1.2 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena oli Jyväskylän yliopistolta vuokratun Solo- Stirling moottori/ generaattori yksikön saattaminen käyttökuntoon, jolloin olisi mahdollista käyttää maakaasukäyttöön suunniteltua laitteistoa puukaasukäytössä. Tavoitteena oli myös hyötysuhdemittaukset sähkön- ja lämmöntuotannon osalta.

## 1.3 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän työn tavoitteena oli tuottaa puukaasua hakkeesta EK- kaasun puukaasutuslaitteistolla ja Solo- Stirling moottorin käyttäminen puukaasulla maakaasun

sijasta. Laitteistokokonaisuutta käytettiin työssä CHP- käytössä (Combined Heat Power) eli yhdistettyyn sähkön - ja lämmön tuotantoon. Aiheen teoreettisessa käsittelyssä on aihe rajattu kaasuttimien osalta kiinteäkerroskaasutukseen ja tarkemmin myötävirtakaasutukseen, sekä generaattorien osalta aihe on rajattu käytössä olevaan laitteeseen.



## 2. PUUKAASU

### 2.1 Historiaa

Puukaasun alun historian katsotaan ajoittuvan 1850- luvun paikkeille. Tuolloin oli höyrykattiloiden ja lämmityskattiloiden polttoaineena alettu hiilen ohella kokeilemaan myös masuunikaasua. Masuunikaasulle pyrittiin kuitenkin löytämään parempaa käyttöä. Vähitellen onnistuttiin kehittämään pienitehoisia kiinteästi asennettuja kaasumoottoreita. Aktiivisimmin kaasumoottoreita kehittivät englantilaiset, saksalaiset ja ranskalaiset tutkijat.

Ensimmäinen puukaasutin syntyi italialainen Garuffan rakentamana. Grauffan rakentamassa kaasugeneraattorissa käytettiin polttoaineena puuta. Toimivan kaasuttimen autoissa ja traktoreissa italialaiset rakensivat ja esittelivät 1920- luvun paikkeilla. Merkittävin puukaasulaitteiden kehittäjä oli saksalais- ranskalainen kemisti- insinööri Georges Imbert (1884- 1950). Georges Imbertiä voidaan pitää puukaasulaitteiden tärkeimpänä kehittäjänä. Hänen patenttinsa pohjalta Suomesakin alettiin valmistaa puukaasutinlaitteistoja 1920- luvun lopulla. Nykyiset puukaasulaitteistot perustuvat pitkälti toimintaperiaatteeltaan Imbertin patentoimaan tekniikkaan.

Georges Imbertille 1920- luvulla myönnetty saksalainen patentti on tunnettu siitä että kaasutinvyöhyke on kahden päällekkäin olevan kammion välissä. Ylempää kammiota täytetään polttoaineella ylhäältä päin ja alempana oleva kammiotäyttyy vähitellen palamisesta muodostuvasta hiilestä suunnilleen suuttimen korkeuteen saakka. Samalla poistuvat kaasut ja sisään tuleva kaasutusilma joko kokonaan tai vain osittain huuhtovat vastavirtauksella polttoainesäiliötä.

Suomessa tehtiin ensimmäisiä puukaasukokeita jo 1920- luvun alussa. Suomessa puukaasututkimusta 1920- luvulla tekivät kemisti- professori Gustaf Komppa ja professori Harald Kyrklund. Vuodesta 1926 alkaen Kyrklund julkaisi useita puukaasua käsitteleviä tutkimuksia. (Köhler 2007, 15- 28.)

Talvi- ja jatkosodan ajalta Suomessa puukaasu autot lienevät yksi konkreettisimmista sota- ajalta muistiin jääneistä asioista. Ensimmäiset häikäpöntöt linja-autoihin asennettiin syksyllä 1939. Seuraavan vuoden toukokuussa oli 300 linja-autoa saanut häikäpöntöstä voimansa. Vuoden 1941 lopulla 95% linja- autoista kulki häikäkaasulla. Myös kuorma- autoihin alettiin asentaa puukaasulaitteistoja. Asennettujen häikäpönttöjen määrä lisääntyi nopeasti. Puukaasuautoja oli lukumääräisesti eniten vuonna 1945, jolloin määrä oli n. 15000 kpl. Maatalouden traktoreita ja työkoneita oli vuonna 1941 yhteensä 5900, joista puukaasukäyttöisiä oli 1300. Enimmillään maassa oli samanaikaisesti käytössä noin 25000 pilke- ja hiilikaasutinta. (Puukaasun aika, Stuart Köhler 139- 143.) Sodan päätyttyä säännöksiä väljennettiin asteittain. Vuodesta 1947 alkaen liikenne saattoi palata nestemäisten polttoaineiden käyttöön. (Köhler 2007, 139- 171).

## **2.2 Kaasutus**

Kiinteän polttoaineen kaasutus on kiinteän polttoaineen muuttamista kaasumaiseen muotoon. Kysymyksessä ei ole pelkkä osittaispoltto. Kaasutus on sarja hapetus- pelkistysreaktioita yhdistettynä pyrolyysiin. Käytettäessä kaasutusaineena pelkästään ilmaa, tai ilmaa vesihöyryn kanssa, saadaan tuotekaasuksi pienlämpöarvoista kaasua. Kaasun lämpöarvoa on mahdollista nostaa käyttämällä kaasutuksessa epäsuoraa lämmitystä tai happea. (Leppälahti & Kurkela 1985, 8.)

Kaasutuksessa tai tarkemmin sanottuna termisessä kaasutuksessa biomassaa muunnetaan korkeassa lämpötilassa vähähappisissa olosuhteissa tuotekaasuksi kutsutuksi kaasuseokseksi. Puukaasu sisältää hiilimonoksidia (CO), typpeä (N<sub>2</sub>), vetyä (H<sub>2</sub>) sekä metaania (CH<sub>4</sub>) ja muita hiilivetyjä. Hiukkasia syntyy epäpuhtautena. Kaasuseos voidaan käyttää suoraan hiukkassuodattimen jälkeen polttoaineena esimerkiksi kaasuturbiineissa tai polttomoottoreissa. Polttomoottorikäyttöiset häikäpönttöajoneuvot ovat kuuluisin liikennesovellutus tästä. Vaihtoehtoisesti puukaasusta voidaan erottaa vetyä tai metaania muualla tapahtuvaa käyttöä varten tai jalostaa synteetikaasua muiden polttoaineiden valmistamiseksi. Kaasutustekniikkaa voidaan myös käyttää joko lämmöntuotantoon tai sähköntuotantoon hyvin pienistä 1 kW sovelluksista alkaen. (Lampinen 2009, 287.)

Kaasutusreaktiossa tapahtuvat reaktiot voidaan esittää seuraavan taulukon yhtälöillä:

TAULUKKO 1. Kaasutusreaktiot (Filen, Janatuinen & Salo, 1984, 13.)

Reaktioyhtälö		Reaktiossa vapautuva (+) tai sitoutuva (-) lämpö.
1. Terva	→	CH <sub>4</sub> + C + CO <sub>x</sub>
2. C + 1/2 O <sub>2</sub>	→	CO +111 (KJ / mol)
3. CO + 1/2 O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub> +283 “
4. H <sub>2</sub> + 1/2 O <sub>2</sub>	→	H <sub>2</sub> O +242 “
5. C + H <sub>2</sub> O	→	CO + H <sub>2</sub> -131 “
6. C + CO <sub>2</sub>	→	2CO -172 “
7. C + 2H <sub>2</sub>	→	CH <sub>4</sub> +75 “
8. CO + 3H <sub>2</sub>	→	CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O +206 “
9. CO + H <sub>2</sub> O	→	CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> +41 “
10. CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub>	→	CH <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O +165 “
11. C + O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub> +394 “

Taulukosta 1. voidaan havaita, että hiiliaineksen kaasuttamiseen tarvitaan happea, vesihöyryä, vetyä, hiilidioksidia tai näiden seoksia. Vety osallistuu kaasutukseen veden hajoamisen seurauksena. Tavallisesti kaasutukseen käytetään happea, tai ilman ja vesihöyryn seosta.

Ensimmäinen reaktio on endoterminen. Reaktion tarkkaa energiankulutusmäärää ei voida sanoa, koska esiintyviä tervayhdisteitä on satoja. Tähän vaikuttaa myös käytettävä polttoaine ja kaasutusolosuhteet. Tämä reaktio tarvitsee yli 800 °C:n lämpötilan (Filen ym. 1984, 12- 13.)

Taulukon reaktiot 2, 3, 4 ja 11 ovat palamisvyöhykkeen reaktioita. Reaktio 11 on reaktioiden 2 ja 3 summa. Pääosin nämä reaktiot kattavat kaasutuksen energiatarpeen. (Filen ym. 1984, 13.)

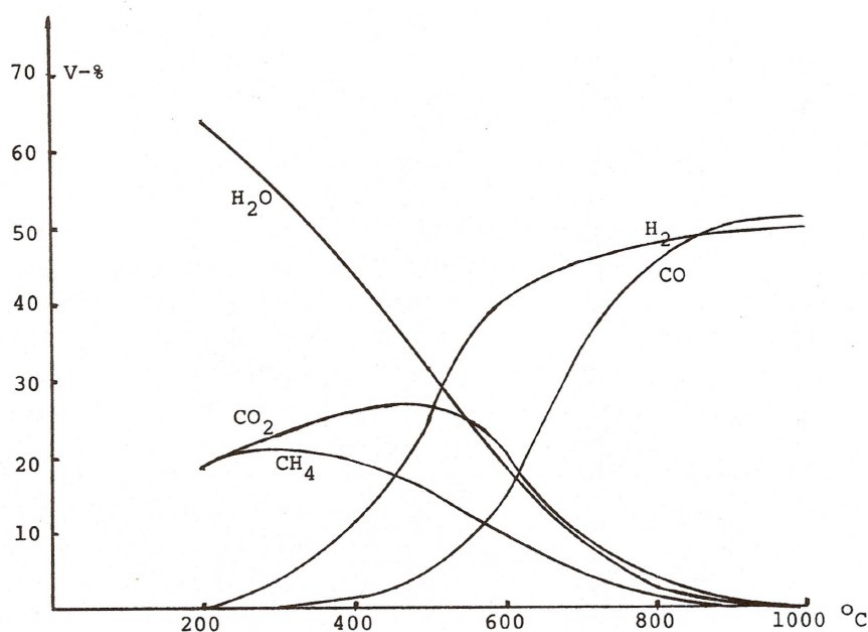
Varsinaisia kaasutusreaktioita ovat 5 ja 6, joiden tuloksena saadaan hiilimonoksidi eli häkää ja vetyä. Reaktiot ovat endotermisiä ja vaativat haluttuun suuntaan kulkeakseen 800 - 1000 °C:n lämpötilan. (Filen ym., 1984, 13.)

Reaktiot 7, 8 ja 10 tuottavat metaania. Tämä on merkitykseltään pieni, sillä suurin osa metaanista on peräisin polttovyöhykkeessä krakkautuneista tervahöyryistä. (Filen ym. 1984, 13.)

Reaktiota 9 kutsutaan vesikaasureaktioksi. Reaktion tasapaino siirtyy lämpötilan kohotessa vasemmalle lähtöaineiden suuntaan. Tämä tarkoittaa sitä, että korkeissa lämpötiloissa hiilimonoksidi ei juuri reagoi vesihöyryn kanssa. Vesikaasureaktiolla pystytään tietyissä rajoissa säätämään tuotekaasun hiilimonoksidin ja vedyn suhdetta, vaikkakin käytännössä tämä on vaikeaa. (Filen ym. 1984, 14.)

Tarkasteltaessa tilannetta kaasutusvyöhykkeessä termodynamiikan kannalta, voidaan laskennallisesti osoittaa vedyn ja hiilimonoksidin osuuksien kasvavan sekä metaanin, vesihöyryn ja hiilidioksidin osuuksien pienenevän lämpötilan kasvaessa. Kuviossa 1. ovat kyseisten kaasukomponenttien esiintyminen kaasuseoksessa lämpötiloissa 200 - 1000 °C. Kuvan pitoisuuskäyrät on laskettu termodynaamisen tasapainon perusteella, jonka asettuminen vaatii pitkän ajan. Käytännön tilanteessa kaasukomponenttien määrät poikkeavat jonkin verran kuvan käyristä. (Filen ym. 1984, 14.)

Kuviota 1. tarkasteltaessa havaitaan, että kaasutusvyöhykkeen lämpötilan on oltava vähintään 800 °C, mieluummin vielä enemmän. Näin saadaan tuotekaasun toivottujen komponenttien hiilimonoksidin ja vedyn pitoisuudet mahdollisimman suuriksi. Jos kaasu tämän jälkeen nopeasti jäähdytetään tai käytetään, ei sen koostumus ehdi juurikaan muuttua. (Filen ym. 1984, 14.)



KUVIO 1. Vetyä, hiilimonoksidia, hiilidioksidia, vesihöyryä ja metaania sisältävän kaasuseoksen tasapainokoostumus lämpötilan funktiona yhden ilmakehän paineessa (Filen ym. 1984, 15.)

### 2.3 Kaasutintyytit

Biomassalle sopivat kaasuttimet jaetaan kiinteäpeti- ja leijupetikaasuttimiin. Molemmat kaasutintyytit ovat käytettävissä monilla kiinteillä polttoaineilla synteettisten liikennepolttoaineiden valmistukseen. Ristivirtakaasutin on vähiten kaasutuksessa käytetty kaasutintyyppi.

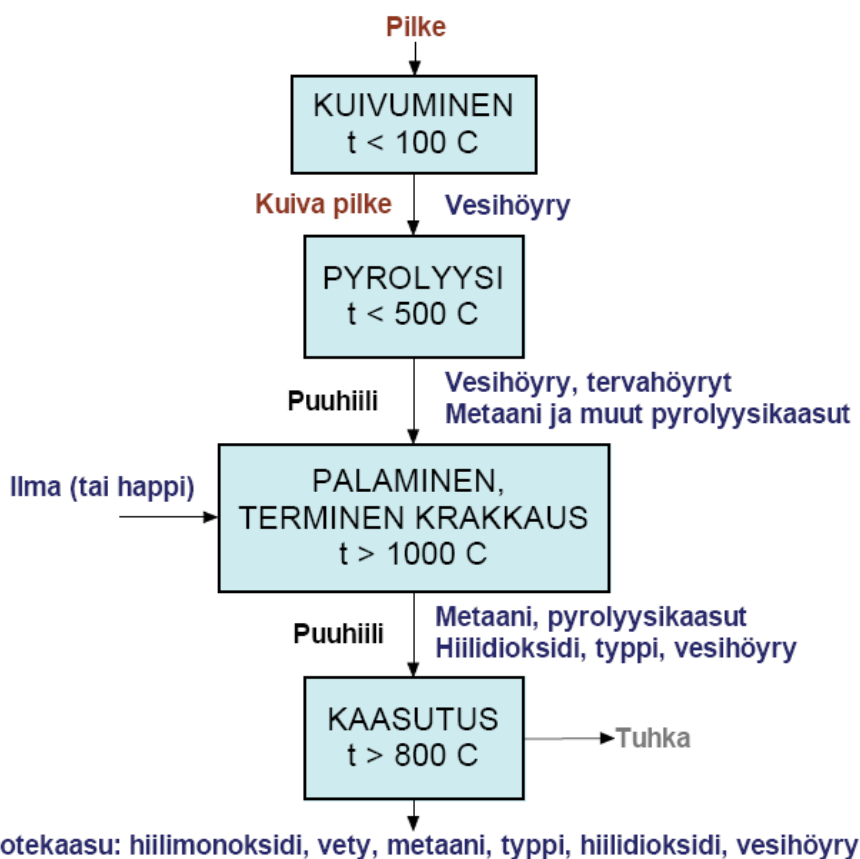
Leijupetikaasuttimien yleisin sovellus on sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Leijupetikaasuttimien tehoalue on megawattien ja satojen megawattien välillä.

Kiinteäpetikaasuttimet soveltuvat pieneen kokoluokkaan muutamista kilowateista alkaen aina kymmeneen megawattiin asti. Niistä yleisimpiä ovat myötävirtakaasuttimet, joissa polttoaine ja kaasut virtaavat samaan suuntaan. Vastavirtakaasuttimessa polttoaine ja kaasut virtaavat eri suuntiin. (Lampinen 2009, 288.) Ristivirtakaasuttimia on käytetty lähinnä etupesinä, eikä niillä yleensä pystytä tuottamaan hyvälaatuista tuotekaasua.

Vastavirtakaasuttimet olivat laajamittaisessa käytössä kaupunkikaasun tuotannossa, Suomessa ja niitä käytetään edelleen lämpölaitoksissa.

Suoraan ajoneuvoihin asennetut puukaasuttimet eli häkäpöntöt olivat sodan aikana ja ovat edelleen lähes pelkästään myötävirtakaasuttimia. Myötävirtakaasuttimille on ominaista niiden tuottaman raakakaasun alhainen tervapitoisuus. Perinteisen myötävirtakaasuttimen kemiasta on suurin osa yhteistä muille kaasutintyypeille. (Lampinen 2009, 289.)

## 2.4 Myötävirtakaasutus



KUVIO 2. Pilke käyttöisen myötävirtakaasuttimen toiminnan lohkokaavio (Lampinen 2009, 290.)

Myötävirtakaasuttimessa polttoaine syötetään reaktorin yläosaan. Ilma tai happi syötetään reaktorin keskiosaan. Tuotekaasu poistuu reaktorin alaosasta. (Filen ym. 1984, 8).

Polttoainepartikkelin palaminen tai kaasutus jakautuu eri vaiheisiin. Aluksi partikkeli lämpenee kuivumislämpötilaan. Kuivumisen jälkeen seuraa pyrolyysi. Pyrolyysin jälkeen seuraa jäännöshiilen palaminen tai kaasutus. Suurelle hiukkaselle nämä eri vaiheet voivat olla osittain päällekkäisiä. Poltettaessa esimerkiksi puukappaletta, kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen voivat tapahtua tietyissä olosuhteissa kaikki samanaikaisesti, jolloin partikkelin pinta palaa kun

keskiosa on vielä kostea. (Raikko, Saastamoinen, Huppa & Kurki- Suonio 2002, 186.)

Puulle pyrolyysi alkaa noin 200°C:ssa ja on voimakkaimmillaan noin 350°C tai suurella lämmitysnopeudella jonkin verran korkeammassakin lämpötilassa. (Raikko ym. 2002, 195.)

Kaasutus voi tapahtua samanaikaisesti pyrolyysin kanssa siten, että hiukkasen sisällä syntyvän pyrolyysikaasun komponentit CO<sub>2</sub> ja H<sub>2</sub>O reagoivat hiilen kanssa virratessaan jäännöshiilen läpi ulos. Lämpötila on oltava riittävä, yli 800°C. (Raikko ym. 2002, 212.)

Pyrolyysi olosuhteilla on merkitystä partikkelin palamis- tai kaasutusaikaan. Mitä suurempi osuus aineesta poistuu partikkelista pyrolyysivaiheessa, sitä lyhyempi on palamis- tai kaasutusaika. Pyrolyysi on suhteellisen nopea prosessi verrattuna jäännöshiilen palamiseen ja etenkin kaasutukseen. (Raikko ym. 2002, 193.)

Palamisessa eri ainesosat, pääasiassa hiilivedyt ja hiili yhtyvät happeen (palavat) eri lämpötiloissa. Alemmissa lämpötiloissa hapettuvat aineet palavat noin 600°C:ssa ja hiili 850°C:ssa. Polttoaineessa oleva vesi höyrystyy ja kuluttaa energiaa poistuessaan savukaasujen mukana höyrynä, jonka lämpötila on noin 120-150°C. (Muilu 2010.)

Merkittävä tekijä myötävirtakaasutuksessa on polttoaineen pyrolyysi tuotteiden joutuminen sellaisenaan kuumaan polttovyöhykkeeseen, johon myös syötetään ilmaa. Korkea lämpötila saa tervan hajoamaan pienemmiksi molekyyleiksi. Tuotekaasua ajatellen tämä on edullista sillä tervasta on lähes kaikissa kaasun käyttökohteissa enemmän haittaa kuin hyötyä. Poikkeuksena tästä on ainoastaan tuote-



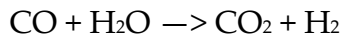
kaasun poltto esimerkiksi öljykattilassa, jolloin tervahöyryt nostavat tuntuvasti polttokaasun lämpöarvoa. (Filén ym. 1984, 11.)

Perinteiset kaasutuslaitokset jaettiin korkealämpökaasua (1000- 1300 °C) tai matalalämpökaasua (500- 600 °C) tuottaviin. Matalalämpökaasussa metaanipitoisuus on korkea ja vetypitoisuus matala. Nykyisin suurissa laitoksissa yleensä tuotettavaan korkealämpökaasun vetypitoisuus on korkea ja metaanipitoisuus alhainen. (Lampinen 2009, 293.)

Palamisvyöhykkeeseen joutuvat pyrolyysi vyöhykkeessä syntynyt koksiaines, hiil-tokaasut, tervahöyryt ja vesihöyry. Pyrolyysi tuotteiden ja reaktoriin puhallettavan ilman välisen reaktion ansiosta lämpötila nousee yli 1000 °C:een . Ilmansyötöä säädetään sopivasti siten, että ainoastaan osa palavista aineista palaa loppuun asti. Loppuosa pyrolyysituotteista, esimerkiksi jäännöshiili, osallistuu varsinaisiin kaasutusreaktioihin reaktorin alaosassa. Jotta reaktorin toiminta olisi tasaista ja tervaa ei pääsisi palamisvyöhykkeen läpi hajoamatta kaasuiksi, ilma tulee syötää sisään pyrolyysivyöhykkeeseen useista kohdista. Näin saadaan lämpötila pysymään tasaisena kautta koko reaktorin poikkipinnan. (Filén ym. 1984, 11.)

Myötävirtakaasuttimessa alemmassa lämpötilassa hapettuvat aineet tuottavat kaasutuksen primäärienergian ja korkeammassa lämpötilassa hapettava hiili muodostaa pelkistyskerroksen kaasuttimen alemmaan osaan. Kaikki savukaasut ja myös vesi "imetään" tämän kerroksen läpi, jolloin syntyy otolliset olosuhteet vesi- hiili-reaktion synnylle. (Muilu 2010.)

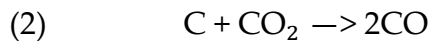
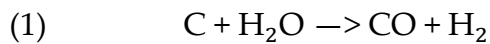
Vesi- kaasu- vaihtoreaktio on eksoterminen vetyä tuottava hiilimonoksidin ja vesihöyryn reaktio, jota kutsutaan myös kaasuvaihtoreaktioksi ja vaihtoreaktioksi (shift reaction):



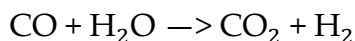
Se on yksi kaasuttimissa tapahtuvista reaktioista. (Lampinen 2009, 295.)

Tuotekaasusta saadaan huomattavasti enemmän energiaa kuin veden ja hiilen yhtyminen vaatii, samalla hiilikerros toimii pelkistäen tervoja ja oksideja.

Alaspäin kulkevan jäännöshiilen kuumennuttua hehkuvaksi, on lämpötila niin korkea, että hiili alkaa reagoida kaasutusvyöhykkeeseen tulevan vesihöyryn ja hiilidioksidin kanssa seuraavien yhtälöiden mukaisesti:



Reaktiossa (1) vesihöyry reagoi hehkuvan hiilen kanssa, jolloin syntyy hiilimonoksidia ja vetyä. Myötävirtareaktorissa vesihöyry saadaan polttoaineen kosteudesta. Hiilen ja vesihöyryn reaktio on lämpöä kuluttava reaktio ja vaatii noin 1000 °C lämpötilan. Hiilimonoksidia ja vetyä tuottavaan reaktioon liittyy aina olennaisesti myös reaktio



Kyseinen reaktio on käänteinen ja määrittää kussakin lämpötilassa kaasussa vallitsevan CO/ H<sub>2</sub>- suhteen. (Filen ym. 1984, 18-19.)

Reaktiossa (2) hehkuva hiili pelkistää hiilidioksidin häkäkaasuksi. Reaktio on käänteinen ja sen kulkusuuntaan vaikuttaa olennaisesti lämpötila. Kaasussa on sitä enemmän hiilimonoksidia, mitä korkeampi lämpötila on. (Filen ym. 1984, 18.)

Kaasutuksessa syntyy vetyä ja metaania, jotka voidaan erottaa suoraan tuotekaasusta. Tuotekaasu voidaan myös puhdistaa synteetikaasuksi ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) käytettäväksi Fischer- Tropsch-, metaani-, metanoli-, DME- tai muissa synteeseissä. Synteetikaasua saadaan myös johtamalla vesihöyryä hehkuvan hiilikerroksen läpi eli tuottamalla vesikaasua tai höyryreformoimalla biokaasua. (Lampinen 2009, 293.)

Myötävirtakaasutuslaitteistolla tuotettu niin sanottu osin puhdistettu tuotekaasu soveltuu sellaisenaan käyttöön moneen eri käyttötarkoitukseen, kuten esimerkiksi lähijakeluun, poltin polttoon ja moottorikäyttöön. (Leppälahti & Kurkela 1985, 11).

## 2.5 Tuotekaasu

Kaasutuksessa syntyvät palavat kaasut ovat siis hiilimonoksidi, vety ja metaani.

Palavien kaasujen lisäksi tuotekaasu sisältää runsaasti typpeä, joka on peräisin kaasutusilmasta ja joka alentaa tuotekaasun lämpöarvoa oleellisesti. Siltä vältytään, mikäli palamisvyöhykkeelle syötetään ilman sijasta happea. 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. Ne eivät tuota kuitenkaan muita ongelmia tuotekaasun käytössä. Tuotekaasu sisältää lisäksi kondensoituvia tervahöyryjä ja puuhiilihiukkasia jotka ovat energiaa sisältäviä komponentteja ja hyödynnettävissä poltossa. (Lampinen 2009, 292.)

Kuivan kaasun analyyseillä tarkoitetaan kaasun koostumusta, kun raakakaasussa olevat epäpuhtaudet ja vesihöyry on poistettu. Kaasuanalyysi voi vaihdella varsin paljon prosessista ja polttoaineesta riippuen.

Yleensä kaasuttimella valmistetun pienlämpöarvoisen kaasun palavien- ja palamattomien komponenttien vaihtelurajat ovat seuraavat:

TAULUKKO 2. Palavien komponenttien vaihtelurajat (Leppälahti & Kurkela 1985, 9.)

		til-% (kuiva kaasu)
hiilimonoksidi	CO	10- 30
vety	H <sub>2</sub>	10- 25
metaani	CH <sub>4</sub>	0- 5

TAULUKKO 3. Palamattomien komponenttien vaihtelurajat (Janatuinen & Asplund 1981, 8.)

typpi	N <sub>2</sub> ilmakaasutuksessa	45- 60
hiilidioksidi	CO <sub>2</sub>	5- 20
vesihöyryt	H <sub>2</sub> O	

Lisäksi kaasussa on hyvin pieniä määriä typen ja rikin oksideja.

## 2.6 Kaasun puhtaus

Kaasutuksessa polttoaine aina ensin kuivataan, tämän jälkeen tapahtuu pyrolyysi ja vasta lopuksi kaasutus ja pelkistysreaktiot. Kaasutuksessa osa pyrolyysi vaiheessa syntyvistä nestemäisistä hiilivedyistä sekä polttoaineesta olevasta vedestä, joutuu mukaan tuotekaasuun. Kaasutusprosessista ja käytetystä polttoaineesta sekä sovellettavista puhdistusmenetelmistä riippuen saadaan tuotteiksi eri puhtausasteisia kaasuja. Epäpuhtauksilla tarkoitetaan tässä yhteydessä kaasusta kondensoituvia nestemäisiä hiilivety- yhdisteitä, kiintoaineshiukkasia ja vesihöyryjä. (Leppälahti & Kurkela 1985, 8.)

Tervapitoisuudet ja raakakaasun vesipitoisuus riippuvat kaasutusprosessista ja polttoaineesta. Pesu ja suodatuslaitteistolla voidaan tuotekaasun epäpuhtaustasoa laskea merkittävästi. Kun raakakaasu jäähtyy kaasunpuhdistuksessa, määrää tuotekaasun lämpötila vesihöyrymäärän, joka voi olla kaasussa kyllästystilassa. Mitä alhaisempi on tuotekaasun lämpötila, sitä vähäisempi on kaasun vesihöyrymäärä. (Leppälahti & Kurkela 1985, 12.)

Kaasuun joutuvien hiilivetyjen (tervat) määrä riippuu useista tekijöistä, kuten kaasuttimen tyypistä, polttoaineesta ja kaasuttimen käyttöparametreista. (Leppälahti & Kurkela 1985, 9). Tervan ja vesihöyryn lisäksi raakakaasussa on yleensä vaihteleva määrä kiintoainesta. Kiintoainepöly on mahdollista poistaa tervaa erotettaessa, eikä siitä yleensä ole ongelmaa käytössä. (Leppälahti & Kurkela 1985, 14.)

Raakakaasun lähes ainoa käyttömuoto on suora poltto kaasuttimen läheisyydessä olevassa laitteessa. Osittain puhdistetun kaasun käyttömahdollisuuksia ovat poltto, moottorikäyttö ja lähijakelu. Erilaisia puhdistustekniikoita soveltaen on mahdollista valmistaa puhdasta ja kuivaa tuotekaasua, jonka käyttökohteita ovat kauko- ja lähijakelu. (Leppälahti & Kurkela 1985, 11.)

## 2.7 Polttoaineen lämpöarvo

Lämpöarvo kertoo kuinka paljon täydellisessä palamisessa kehittyy lämpöä polttoaineen massaa kohti. Lämpöarvo ilmoitetaan kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden kohdalla tavallisesti megajouleina polttoainekiloa kohti, MJ/kg. Kaasumaisilla polttoaineilla lämpöarvo ilmoitetaan yleensä megajouleina kuutiometriä kohti, jolloin yksikkö on MJ/Nm<sup>3</sup>. Sähköinen kirja: (Alakangas 2000.)

Polttoaineen lämpöarvo voidaan ilmaista kalorimetrinen lämpöarvona tai tehollisena lämpöarvona, joka saadaan muunnoskaavan avulla kalorimetrisestä lämpöarvosta. Kolmantena lämpöarvona voidaan ilmoittaa tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa eli saapumistilassa.

Kalorimetriseen lämpöarvoon (ns. ylempi lämpöarvo) lasketaan sekä puun sisältämän vedyn palamisenergia että vedystä ja hapesta syntyneen veden höyrystymisenergia. Koska veden höyrystymisenergia lasketaan mukaan, on kalorimetrinen lämpöarvo aina muita lämpöarvolukuja suurempi. Sähköinen kirja: (Alakangas 2000.)

Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan tavallisesti kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona, (ns. alempi lämpöarvo), MJ/kg, jolloin mukaan ei lasketa savukaasujen mukana poistuvan, polttoaineen sisältämästä vedystä peräisin olevan veden haihduttamiseen kuluva energiaa. Sähköinen kirja: (Alakangas 2000.)

Lämpöarvo voidaan ilmoittaa myös tehollisena lämpöarvona saapumistilassa eli toimituskosteana. Tämä lämpöarvo on alin, koska siinä lämpöarvoa laskettaessa vähennetään energiamäärä, joka kuluu polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihtumiseen. Toimituskostealle painolle laskettu teholl-

linen lämpöarvo on sitä pienempi mitä enemmän polttoaine sisältää vettä. Sähköinen kirja: (Alakangas 2000.)

TAULUKKO 4. Kaasumaisten polttoaineiden lämpöarvoja (Motiva 2011.)

Lämpöarvo	Maakaasu	Biokaasu	Koksaamokaasu
Tehollinen lämpöarvo MJ/Nm <sup>3</sup>	35,6	14,4- 21,6	21,5

Ilmakaasutuksella biomassasta valmistetun kuivan kaasun tehollinen lämpöarvo on yleensä 4,2- 6,6 MJ/ Nm<sup>3</sup>. (Leppälahti & Kurkela 1985, 9.)

Biomassasta kaasutetun tuotekaasun lämpöarvo on noin 13% maakaasun lämpöarvosta. Tehollisen lämpöarvon pienuus johtuu tuotekaasun palamattomien komponenttien suuresta määrästä. Kaasusta käytetään nimitystä pienlämpöarvoinen kaasu.

TAULUKKO 5. Hakkeen lämpöarvoja (Motiva 2011.)

Lämpöarvo	Metsätähkehake	Kokopuu-hake	Rankahake
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	18,5- 20	18,5- 20	18,5- 20
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	6-9	7-10	7-11

Käytännön tietämyksen mukaan voidaan karkeasti laskea yhdestä hakekilosta muodostuvan kaasuttamalla noin kolme normikuutiometriä tuotekaasua.

### 3 EK- KAASUTIN

Sieviläisen Eero Kangsojan kehittämän myötävirta kaasutus periaatteella toimivaan puukaasureaktoriin on haettu patentti vuonna 2007. Puukaasulaitteisto on ollut julkisesti nähtävillä ensimmäisen kerran Jyväskylän energiamesseilla syyskuussa 2007. Patentin pohjalta on alettu valmistaa teollisesti CHP (yhdistetty sähkön- ja lämmön tuotanto)- laitteistoa vuonna 2008. Laitteiston valmistamisesta, myynnistä ja kehityksestä vastaa GasEK Oy.

Eero Kangsojan kolmenkymmenen vuoden kehitystyön tuloksena olevalla tekniikalla toimii myös hänen omassa käytössään oleva auto. Puukaasun voimalla matkaa on taittunut yli 120 000 kilometriä. Täysin kylmästä tilasta käyttövalmiuteen laitteisto voidaan saada muutamassa minuutissa. Moottorikäytössä kaasutin reagoi nopeasti kuormituksen vaihteluihin ja kaasutin toimii tyhjäkäynnillä ongelmitta. Kuorman säädettävyys osakuormasta täyteen tehoon on erinomainen, moottorikäytössä voimakone pyörii myös tyhjäkäyntiä eikä sammu nopeissa kierrosten muutoksissa. Kaasuttimen tuottama tuotekaasu on hyvälaatuista myös pienellä kaasuttimen teholla.

#### 3.1 Kaasutin

Kaasutin pystyy käyttämään moitteettomasti kosteudeltaan 35% vettä sisältävää sekapuuhaketta hyvällä hyötysuhteella. On toivottavaa kaasun muodostuksen kannalta, että hake jota käytetään käyttövoimana, ei olisi liian kuivaa. Uudentyyppisten rakenneratkaisujen myötä laitteisto pystyy tuottamaan tuotekaasua, jolla on alhainen tervapitoisuus.



Täysin erilaiseen ajatusmalliin ideaalisesta palamistapahtumasta perustuva laitteistoratkaisu on monelta osin vastoin perinteisiä käsityksiä ja tutkimusraportteja myötävirtakaasutuksen periaatteesta. Kuitenkin laitteisto on osoittanut käytännön testitilanteissa toimivuutensa ja kehitysratkaisut oikeiksi. Vastoin yleistä käsitystä, polttoaineen kuivumisen ja pyrolyysin alkamisen siirtäminen mahdollisimman lähelle palamisvaihetta lisää kaasunmuodostusta ja parantaa tuotekaasun laatua. Osittain päällekkäiset kaasunmuodostusvyöhykkeet ja korkea lämpötila nopeuttavat kaasutusaikaa kaasuttimessa. Mitä suurempi osuus aineesta poistuu pyrolyysi vaiheessa, sitä lyhyempi on palamis- tai kaasutusaika. Nopea pyrolyysivaihe, korkeassa lämpötilassa tapahtuva palaminen - ja kaasutus vähentävät tervojen määrää tuotekaasussa ja ovat tyypillisiä ominaisuuksia tälle kaasuttimelle. Polttoaineen kosteuden avulla tapahtuvan vesi- hiilireaktion avulla saadaan tuotekaasuun lisää lämpöarvoa. Lisäksi hiilikerros pelkistää tervojen oksideja. Kaasutintyyppin ominaisuus käyttää kosteaa polttoainetta kaasutusraaka-aineena helpottaa polttoaineen hankintaa. Laitteiston rakenne ei aseta estettä ulkoilmakuivan biomassan käytölle. Laitteistolla valmistetun tuotekaasun ominaisuudet antavat kaasun käytölle laajat mahdollisuudet.

Kaasun kehitys korkeassa lämpötilassa suosii vedyn muodostumista. Tyypillistä kaasutinmallille on tuotekaasun korkea vetypitoisuus ja alhainen metaanipitoisuus. Yleisesti tällä kaasuttimella tuotetussa kaasussa vetypitoisuus on häkäpitoisuutta korkeampi. Parempi nimitys vanhalle termille "häkäpönttö", voisi olla käytettävällä laitteistolla nimi "vetypönttö". Uudenaikaisilla laitteistoratkaisuilla voitaisiin ehkä käyttää vielä paremmin nimitystä, terminen biomassakaasutin.

Kaasun puhtautta voi karkeasti arvioida polttoliekin väristä. Poltettaessa suuren vetypitoisuuden omaavaa puhdasta puukaasua, liekki on väritön tai sininen, kun taas tervapitoinen kaasu on väriltään keltainen.



KUVIO 3. EK- kaasutin

### 3.2 Kaasun puhdistus

Kaasunpuhdistusmenetelmänä kaasutinlaitteistossa on kolminkertainen vesipesu. Palamisreaktiossa tuleva tuhka poistuu reaktorista tuotekaasun mukana imuputkea pitkin kaasun puhdistusveteen. Kuuma jäännöshiili reagoi veden kanssa ja painuu vesipesukierrossa olevan keräilyastian pohjalle. Lämmönvaihtimen ja veden avulla tapahtuva tuotekaasun jäähtyminen mahdollistaa kaasusta lämpöenergian talteen ottamisen. Tuotekaasun alhainen lämpötila ja pieni kaasun vesihöyrypitoisuus sekä kaasun puhtaus ovat ominaisuuksia, jotka ovat omiaan vähentämään ongelmia tuotekaasun käytössä.



KUVIO 4. Kaasun vesipesulaitteisto

Käytössä olevasta kaasuttimesta saatujen tervapitoisuuksien määrittystulokset ovat todella alhaisia. Tuloksista voi päätellä, että tutkimuksen kohteena olevassa myötävirtakaasuttimessa tuotetussa kaasussa on alhainen tervapitoisuus. Sähköinen kirja: (Henry Saari 2010.)

Kokonaisuutena kaasutus – ja kaasunpuhdistuslaitteisto on rakenteeltaan yksinkertainen ja toiminnaltaan käyttövarma. Laitteiston huoltotarve on vähäinen ja laitteisto tuottaa puuhakkeesta puhdasta korkean lämpöarvon omaavaa tuotekaasua hyvällä hyötysuhteella. Laitteisto pystyy toimimaan laajalla tehoalueella toiminnan tai tuotekaasun laadun kärsimättä.

#### 4 YHDISTETTY SÄHKÖN- JA LÄMMÖNTUOTANTO (CHP)

Pienen kokoluokan sähkön- ja lämmöntuotannolla (pien- CHP) tarkoitetaan yleensä pienvoimalaa, jonka sähköntuotantoteho on 1- 2 MW. Lämpöteho on tällöin noin 3- 5 MW. Joskus pien- CHP- laitoksen ylimmäksi nimellistehoksi katsotaan 10 MW. Internet sivu: (Motiva 2011.)

Mikro- CHP laitoksen kokorajana voidaan pitää yksivaiheisen tuotannon liittymisrajaa 16 A, joka vastaa tuotantolaitoksen maksimitehoa 3,68 kW. Kolmivaiheisena liitetylle tuotannolle tämä tarkoittaa maksimitehoa 11 kW jännitetasolla 400 V. Mikrotuotantoa on tuotanto, joka liittyy maksimissaan 16 A per vaihe yksi tai kolmivaiheisena jännitetasolle 230/400 V ja toimii rinnan jakeluverkon kanssa. Mikrotuotantona voitaneen ajatella tuotantona, joka on tarkoitettu tuottamaan energiaa ensisijaisesti kulutuskohteen omaan käyttöön ja toissijaisesti verkkoon. Sähköinen kirja: (Lehto 2009.)

Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon etuna on korkea kokonaishyötysuhde. Sähköntuotannon osuus vaihtelee 30 % molemmiin puolin käytetystä tekniikasta riippuen.

Pien- CHP tuotetaan pääosin neljällä eri perustekniikalla. Polttomoottorit ja kaasuturbiinit, höyryturbiinit ja muut höyryvoimalaitteet, muut välittäjäaineisiin liittyvät tekniikat ja polttokennot. Näistä tekniikoista yhdessä erilaisten polttoaineiden kanssa syntyy suuri määrä erilaisia ja eri kehitysvaiheessa olevia voimalaitosratkaisuja. Osa niistä ovat hyvin toimivia ja toiset pitkän kehitystyön jälkeen juuri kaupallistamisvaiheen saavuttamassa. Lisäksi on lupaavia tekniikoita, jotka tarvitsevat vielä suuria kehityspanoksia ja uusia materiaaliratkaisuja. Internet sivu: (Motiva 2011.)

#### 4.1 Polttomoottorit ja kaasuturbiinit

Sähkön ja lämmön tuottaminen biokaasulla polttomoottorissa tai kaasuturbiinissa on ehkä tällä hetkellä toimivin pien- CHP- ratkaisu. Anaerobisesti biokaasureaktori- rissa tuotettu kaasu on helppo puhdistaa polttomoottori- tai kaasuturbiinikelpoiseksi. Näin toimivia erikokoisia biokaasuvoimalaitoksia on kauan ollut käytössä jätevedenpuhdistamojen lietebiokaasureaktorien yhteydessä. Suurimmissa jätevedenpuhdistamoissa ja kaatopaikoilla biokaasun tuotanto on tasaista, joten sähkön ja lämmön kaupallinen tai oma hyödyntäminen on ollut helppo ratkaista.

Maatilojen karjanlannalla ja peltobiomassoilla tuotettu kaasuenergia on melko yksinkertaisilla ratkaisuilla muunnettavissa sähköksi ja lämmöksi. Kaasun käyttö kesäkaudella on ongelma. Maatilan sesonkiluonteinen suuri sähkön ja lämmön kulutuksen vaihtelu vaikeuttaa biokaasulaitoksen järkevää suunnittelua. Maatilan CHP- laitoksen ongelma on lämmön hyödyntäminen. Etäisyys taajaman lämpöverkkoon on liian pitkä ja oma käyttö vähäistä. Yksi mahdollisuus voisi olla kaasun johtaminen lähitaajaman CHP- laitokseen, joka syöttäisi biokaasulla tuotetun sähkön ja lämmön omiin paikallisiin verkkoihinsa.

Kaasuturbiinilaitos mikroturbiineilla on uutta Suomessa kehitettyä teknologiaa, joka on tällä hetkellä laajemmassa käytössä Keski-Euroopassa.

Vastavirtakaasutukseen, kaasun tehokkaaseen puhdistamiseen ja sen moottori- käyttöön perustuu suuri 2-20 MW polttoainetehon Novel- CHP- laitos Kokemäellä. Uuden laitoksen koeajovaihe on päättynyt vuonna 2007.

Myötävirtakaasutukseen (häkäpönttö) perustuvia pieniä sähkön ja lämmön tuotantoyksiköitä on Suomessa kehitystyön alla useampia. Internet sivu: (Motiva 2011.)

## 4.2 Höyryvoimalaitokset

Höyryvoimalaitokset ovat yleisesti käytössä suuren kokoluokan energiantuotannossa. Myös pieniä höyryturbiini-, höyrykone- ja -moottorivoimaloita n. 1 MW, on otettu käyttöön viime vuosina. Uudenaikaisten höyrymoottorien kanssa on ollut teknisiä ongelmia. Tavallisesti näissä pien- CHP- laitoksissa lämpöenergia tuotetaan hakekattilalla. Internet sivu: (Motiva 2011.)

## 4.3 Välittäjäaineisiin liittyvät tekniikat

Eräitä mielenkiintoisimpia tekniikoita lämpöenergian muuttamiseksi sähköksi ja lämmöksi välittäjäaineen avulla ovat Stirling- moottori ja ORC-tekniikka. Stirling- moottori on vanha keksintö, mutta sen käyttöä CHP- laitoksissa tutkitaan ja kokeillaan vasta nyt. Tehdyt laitokset ovat kokoluokaltaan 10 - 100 kW. Lämmitämiseen voidaan käyttää kaikkia tarjolla olevia biopolttoaineita mutta myös aurinkon lämpöä. Internet sivu: (Motiva 2011.)

ORC- laitoksessa hyödynnetään orgaanisen välitysaineen muutosta nesteolomuodon ja kaasun välillä. Keski- ja Etelä-Euroopassa on rakennettu joitakin kokeilu- ja esimerkkikohteita. Laitoskoko vaihtelee välillä 500-1 500 kW. Internet sivu: (Motiva 2011.)

## 4.4 Polttokennot

Polttokennot ovat edelleen intensiivisen tutkimuksen ja kehittämisen kohteena varsinkin autojen energialähteeksi. Paikallisen sähkön ja lämmön tuottamiseen on olemassa laitoksia, joiden käyttöaineena on vety. Maa- ja biokaasun käyttöön kehi-

tetään laitoksia, joilla voidaan päästä jopa kiinteistökohtaisiin energiantuotantoyksiköihin. Polttokennoratkaisujen ongelmana on vielä laitosten korkea hinta.

Häkäkaasun pienimuotoiseen (hiilimonoksidi- CHP) tuottamiseen perustuvia sähkön ja lämmön tuotantoyksiköjä kehitetään myös. Mallina ovat häkäpönttöautoissa käytettävät myötävirtakaasuttimet. Myötävirtakaasutinta ei voida rakentaa suureksi tuotantoyksiköksi. Internet sivu: (Motiva 2011.)

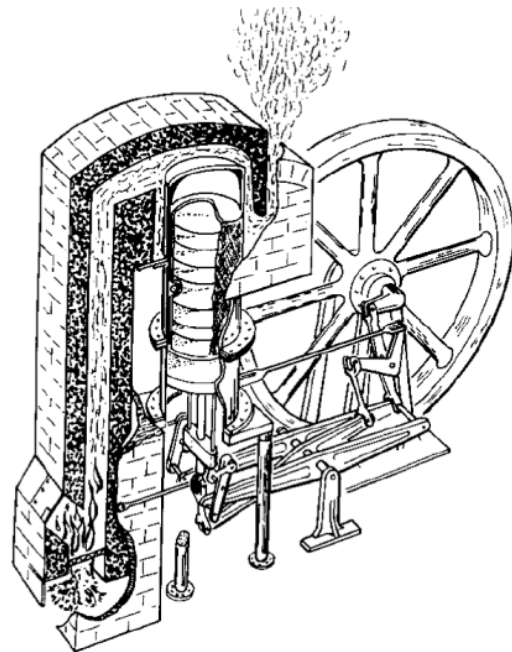
## 5. STIRLING- MOOTTORI

### 5.1 Historia

Moottorityypin keksi skotlantilainen pappi Robert Stirling vuonna 1816. Hän sai patentin keksinnölleen 1817. Ensimmäisessä kuumailmamoottorissa oli pystysuorasylinteri, jonka halkaisija oli 60 cm. Moottori tuotti 1,5 kW:n tehon. Kone kävi kaksi vuotta, ennen kuin kuumanpään sylinteri paloi loppuun. Sylintereiden kuluminen ja tiivistysongelmat jättivät stirling- moottorin muiden voimanlähteiden varjoon.



KUVIO 5. Robert Stirling 1790-1878  
(Wikipedia.)



KUVIO 6. Kuumailma moottori  
(rdm.cnrs.fr/IMG/pdf/26\_06\_07  
\_Dishstirling\_Guillot.pdf.)



## 5.2 Stirling- moottorin toiminta

Stirling- moottorin merkittävin ero otto- ja dieselmoottoriin on se, että palaminen tapahtuu sylinterin ulkopuolella. Toiminta perustuu työkaasun kuumentamiseen lämmönvaihtimessa, minkä seurauksena työkaasu laajenee. Vastaavasti kylmään sylinterissä työkaasun tilavuus pienenee jäähtymisen seurauksena. Nämä työkaasun tilavuusmuutokset muunnetaan sylintereiden, tiiviiden mäntien ja kampikoneiston avulla mekaaniseksi energiaksi. Työkaasuna käytetään yleensä heliumia tai vetyä. Ilman käytössä työkaasuna on ongelmana osien syöpyminen sekä ilman sisältämän hapen ja männänrenkaiden läpi päässeeseen öljyn räjähdysvaara.

Nykyaikaisissa tehokkaissa stirling- moottoreissa työkaasu on paineistettu. Paineistuksen ansiosta kiertoprosessissa kuumennettavan kaasun määrä ja kaasun siirtämä työ on suurempi. Tästä seuraa koneesta ulos saatava suurempi mekaaninen teho.

Moottorin toiminnasta voidaan erottaa neljä vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa kuumenpään sylinteriä lämmitetään, jolloin siellä olevan kaasun paine kasvaa. Kaasu työntää sylinterissä olevaa mäntää, jolloin kaasunpaine pienenee ja moottori tekee työtä. Seuraavassa vaiheessa kuumanpuolen mäntä liikkuu sylinterissä ylöspäin, mikä pakottaa vastaavasti kylmässä sylinterissä olevan männän painumaan alas. Mäntien liikkeen seurauksena kuumanpuolen sylinterissä oleva kaasu siirtyy kylmänpuolen sylinteriin jäähtyen regeneraattorissa sekä ulkoisen jäähtymisen seurauksena, jolloin työkaasun tilavuus pienenee. Kaasun paine pienenee, jolloin sitä on seuraavassa vaiheessa helpompi puristaa kasaan. Kylmän puolen mäntä puristaa kaasua, jolloin sen paine ja lämpötila kasvaa. Kehittynyt lämpö poistetaan kaasusta sylinterin jäähtymyksellä. Puristustyö jatkuu kylmässä sylinterissä, jolloin kuumanpuolen mäntä painuu alas. Kaasun siirtyessä kuumaan sylin-

teriin sitä lämmitetään nopeasti, jolloin sen paine kasvaa entisestään. Moottorista saadaan kaasun laajetessa jälleen työtä ja kierto alkaa uudelleen alusta.

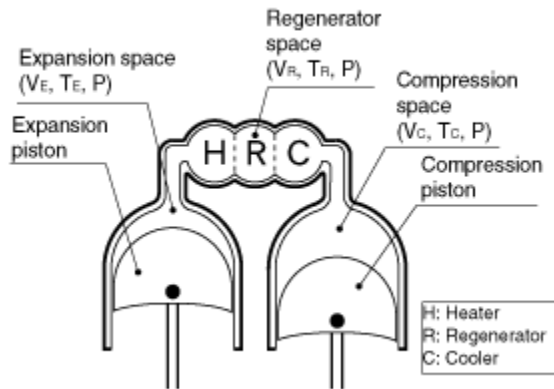
Regeneraattori on elementti, jolla voidaan parantaa moottorin hyötysuhdetta. Osa kuumalta puolelta kylmälle puolelle siirtyvän työkaasun lämpöenergiasta siirtyy regeneraattorin massaan. Samalla kaasun tilavuus pienenee. Kaasun virratessa kylmältä puolelta kuumalle puolelle regeneraattoriin varautunut lämpö esilämittää työkaasua ennen varsinaisessa lämmönvaihtimessa tapahtuvaa kuumentamista. Sähköinen kirja: (Esiselvitys hajautetun pienimuotoisen sähköntuotannon liiketoiminnallisista toimintaedellytyksistä Lapissa 2008.)

Stirling- moottori voi toimia hyvin pienellä lämpötilaerolla, mutta tällöin saatava teho on laitteen kokoon nähden hyvin pieni. Käytännössä Stirling-moottorissa tarvitaan yli 1000 °C lämpötila, jotta saataisiin mahdollisimman suuri sähköteho. Maakaasupoltolla suurin lämpötila on rajoitettu 950 °C. Mitä suurempi lämpötilaero on, sitä suurempi on tuotettu mekaaninen työ ja saatu hyötysuhde. Sähköinen kirja: (Selvitys koelaitteiston lämmönsiirtimen suoritusarvoista 2008.)

### **5.3 Schmidtin teoria**

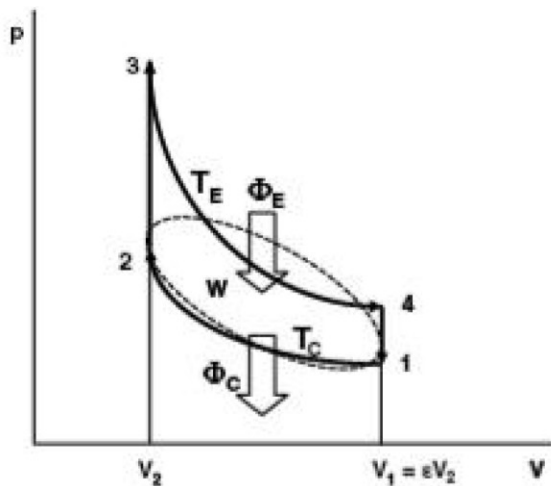
Schmidtin teoria on eräs Stirling- moottorin isoterminen laskentamenetelmä. Se on yksinkertaisin ja hyvin käytännöllinen menetelmä Stirling- moottorin kehittämisessä. Teoria perustuu isotermiseen ideaalikaasun laajenemiseen ja puristukseen. Stirling- moottorin kierto voidaan laskea P-V diagrammin avulla. Moottorin tilavuus voidaan laskea geometrian perusteella. Kun tilavuus, työaineen massa ja lämpötila ovat tiedossa, niin paine lasketaan käyttämällä ideaalikaasun tilayhtälöä. (Muilu 2011.)

Kuvio 7. näyttää Alpha-tyyppin Stirling moottorin laskentamallin.



KUVIO 7. Alpha-tyyppin Stirling- moottori (Muilu 2011.)

Kuviossa 8. on esitetty ideaalinen Stirling- kierto ja katkoviivalla todellinen Stirling-kierto.



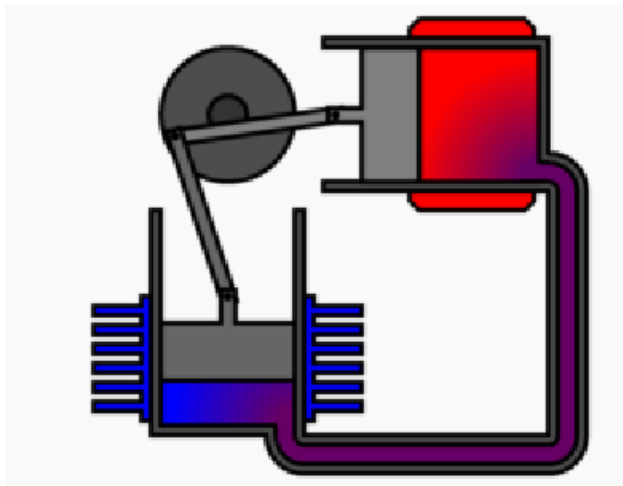
KUVIO 8. Stirling kierto (Sähköinen kirja: Selvitys koelaitteiston lämmönsiirtimen suoritusarvoista 2008.)

TAULUKKO 6. Ideaalisen Stirling- kierron ala prosessit (Sähköinen kirja: Selvitys koelaitteiston lämmönsiirtimeen suoritusarvoista 2008.)

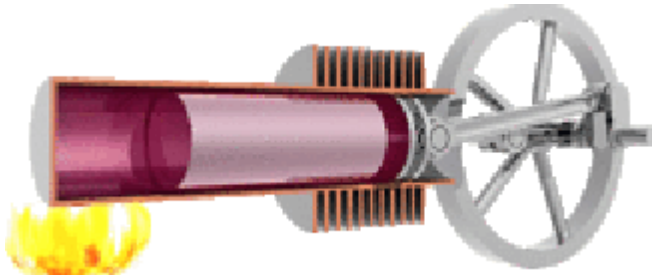
1- 2	kaasu puristetaan suurempaan paineeseen vakio lämpötilassa
2- 3	kaasu lämmitetään suurempaan lämpötilaan vakio tilavuudessa
3- 4	kaasu laajenee vakio lämpötilassa
4- 1	kaasu jäähdytetään pienempään lämpötilaan vakio tilavuudessa

#### 5.4 Moottorityypit

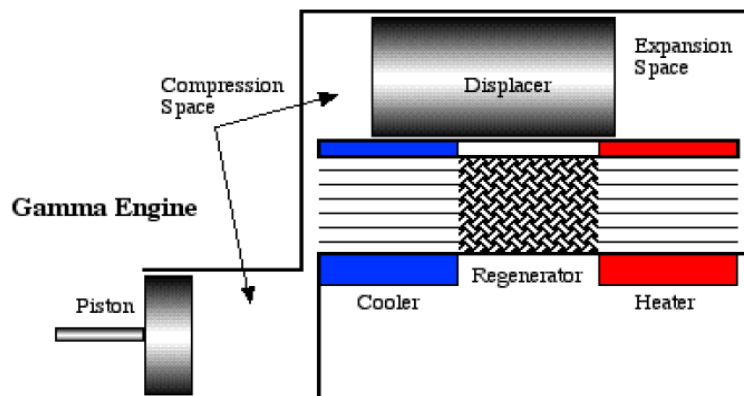
Stirling koneita on kolmea eri tyyppiä alfa, beta ja gamma. Alfa-tyypissä on useita eri lämpötiloissa olevia sylintereitä, joiden männät yhdistetään kaasun liikuttelusta varten. Beta- ja gammatyyppin koneessa on erillinen "syryttämäntä" siirtämässä kaasua vuoron perään kylmään ja kuumaan päähän saman sylinterin sisällä.



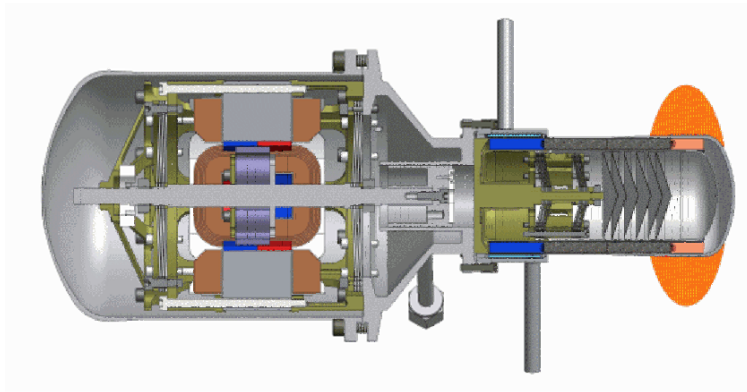
KUVIO 9. Alfa-tyypin Stirling- moottori (Wikipedia.)



KUVIO 10. Beta- tyypin Stirling moottori (wikipedia.)



KUVIO 11. Gamma- tyypin Stirling- moottori (Stirling energy.se.)



KUVIO 12. Vapaamäntä stirling- moottori ( Google kuvahaku.)

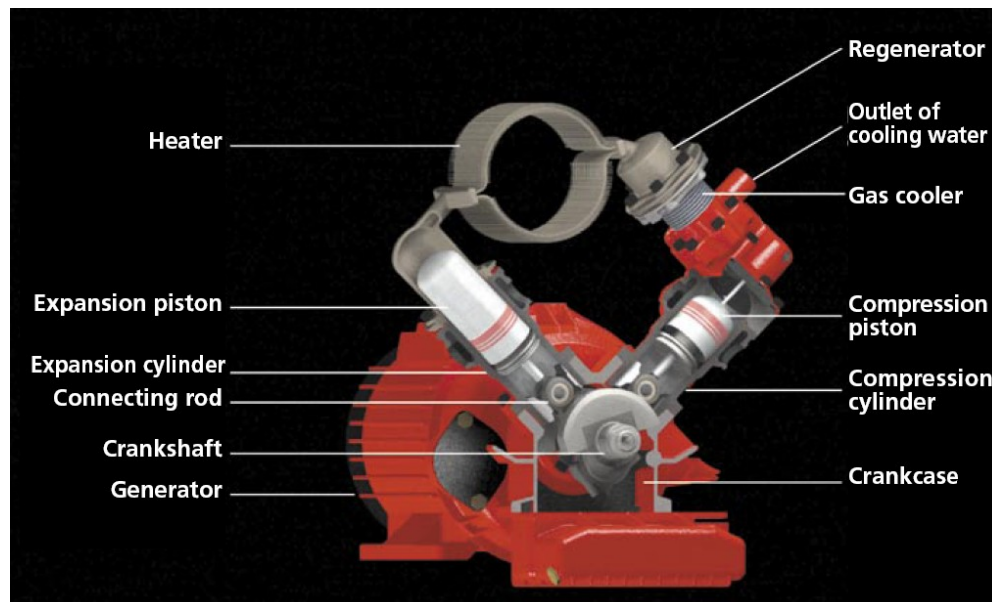
Vapaamäntä Stirling- moottorissa kaikki liikkuvat osat on kapseloitu yhtenäisen kuoren sisään, jonka paineistetussa tilassa oleva supistuva ja laajeneva kaasu on samalla kitkapintojen voiteluaine. Sen toimintatehoa voidaan vaihdella nopeasti. Moottori käynnistyy helposti, koska sen mekaaninen liike on edestakaista polttomoottorin pyörimisliikkeen sijasta. Pienikin pulssi sysää männän liikkeelle kun-

han jäädytetyn ja kuumennetun pään välillä on vain lämpötilaero. Alkusysäys saadaan aikaan generaattoriin syötetyllä sähköpulsilla, joka liikuttaa mäntään kytkettyjä magneetteja.

## 5.5 Ominaisuudet

Stirling-moottorille ominainen ulkoinen palaminen sallii erilaisten polttoaineiden käytön. Käytännössä ensimmäisissä sovelluksissa polttoaineena on maakaasu, mutta myös nestemäiset ja kiinteät polttoaineet ovat mahdollisia. Yksi Suomen oloissa kiinnostava vaihtoehto on puupohjaisen biomassan hyödyntäminen polttoaineena. Sähköinen kirja: (Hajautettu energiantuotanto 2002.)

## Rakenne



KUVIO 13. Läpileikkaus Solo-stirling 161 moottorista (Cleanergyindustries.)

TAULUKKO 7. Stirling- moottorin edut ja haitat

Edut:
Pitkä huoltoväli (5000- 15000h)
Hiljainen käyntiääni
Pakokaasujen puhtaus
CHP- käytössä sähköä vaivattomasti lämmöntuotannon ohessa
Haitat:
Hidas kierrosnopeuden säätö
Kallis hinta
Vaatii tiiviit männät ja sylinterit
Pieni sähköhyötysuhde (22- 24%)

TAULUKKO 8. Solo Stirling 161 teknisiä tietoja (Sähköinen kirja: Technical Documentation SOLO STIRLING 161 micro CHP- Module.)

<b>Suorituskyky maakaasulla 50 °C jäähdytysvedelle.</b>
Sähköteho 2-9,5 kW
Lämpöteho 8 - 26 kW
Sähköhyötysuhde 22 - 24 %
Kokonaishyötysuhde 92 - 90 %
<b>Moottorin tiedot</b>
Tyyppi SOLO Stirling 161
Malli V 2- Stirling, (α- Tyyppi)
Sylinteri tilavuus 160 ccm
Työkaasu Helium

(jatkuu)

TAULUKKO 8. (jatkuu)

Maksimi työpaine 150 bar
Nimellinen moottorin kierrosnopeus 1500 rpm
<b>Helium järjestelmä</b>
Heliumin paine säiliössä, max. 220 bar Heliumkulutus käytössä 100-300 mlN/h Heliumkulutus pysähdyksissä 0-100 mlN/h
<b>Voitelu</b>
Paineistettu kierto voitelu
Tilavuus 1,7 l
Öljyn kulutus: Ei kuluta öljyä
Öljynvaihto väli 15.000 h

## 5.6. Generaattori

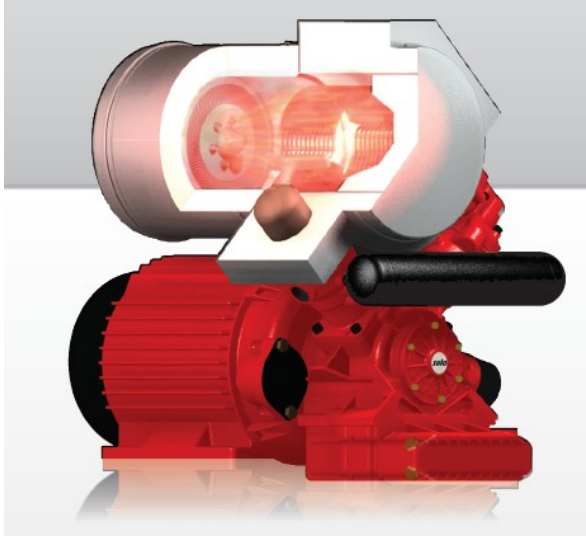
Solo-stirling 161:n generaattorina on verkkomagnetoitu epätahtikone. Generaattorikäytössä roottori pyörii epätahdissa magneettikentän kanssa, kuten moottorina-kin, mutta nopeammin kuin magneettikenttä. Epätahtigeneraattorit voidaan magnetoinnin perusteella jakaa kahteen ryhmään, verkko- ja kondensaattorimagnetoituihin (itse-magnetoituva) epätahtigeneraattoreihin.

Verkkomagnetoitujen epätahtigeneraattorit ottavat magnetointivirran sähköverkosta, joten ne eivät pysty syöttämään sähkötehoa muuhun kuin jännitteelliseen verkkoon. Tällaisia verkkomagnetoituja epätahtigeneraattoreita on käytetty esimerkiksi pienitehoisissa vesivoimalaitoksissa ja tuulivoimalaitoksissa. Sen sijaan kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori ottaa tarvitsemansa magnetoimisvirran koneen liittämiin kytketyistä magnetoimiskondensaattoreista, joten ne pysyvät toimimaan täysin itsenäisinä generaattoreina. Sähköinen kirja: (Korpinen.)



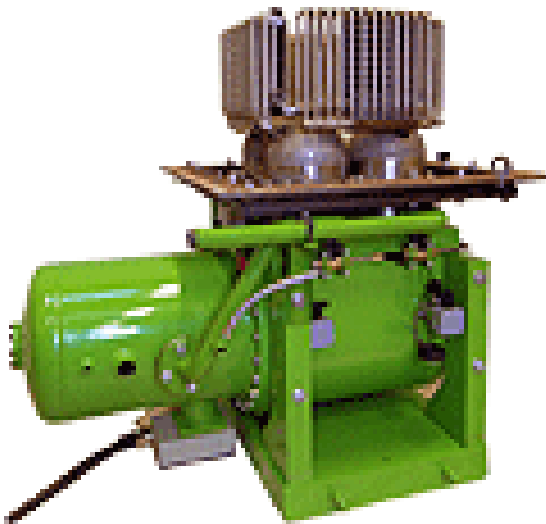
## 5.7 Stirling- moottorien valmistajia

### CLEANERGY

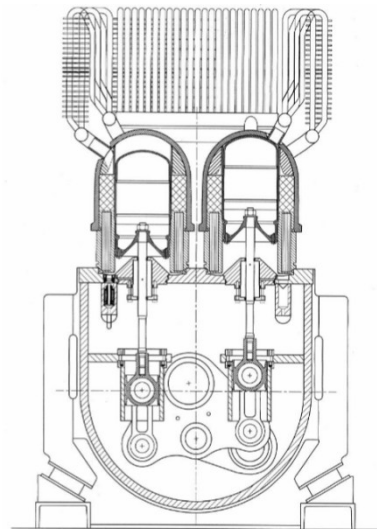


KUVIO 14. Stirling v.161 (Cleanergyindustries.)

### STIRLING DK.



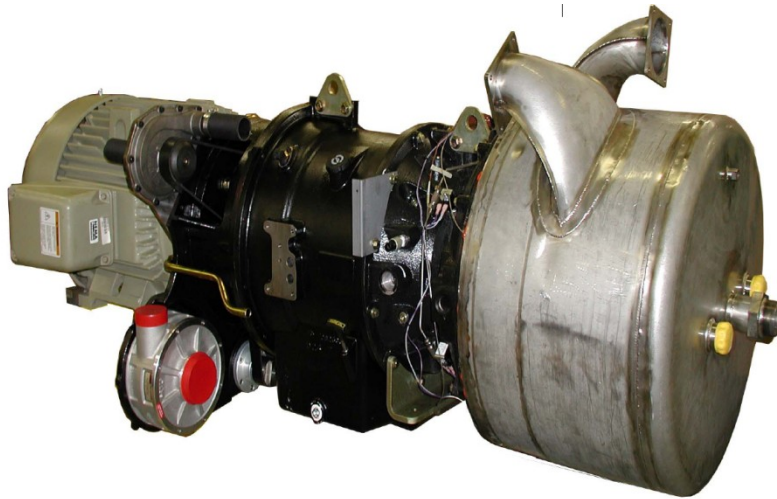
KUVIO 15. Stirling dk 35 kW  
(Sähköinen kirja: Stirling dk.)



KUVIO 16. Poikkileikkaus Stirling dk  
(Sähköinen kirja: Stirling dk.)

Pienimmässä Stirling DK moottorissa sähköteho on 35 kW. Suurimmilla moottoreilla voidaan päästä aina 140 kW sähkötehoon. Lämpöteho voi olla silloin jopa 140- 560 kW. Kuvion 1. Stirling- moottori on suunniteltu erityisesti biopolttoaine käyttöön. Sähköinen kirja: (Stirling dk.)

## STM POWER



KUVIO 17. STM 55 kW Power Unit (Sähköinen kirja: STM Power inc.)

STM 55 kW stirling yksikkö. Suunnittelu ja tuotanto STM Power (Michigan)  
Yhdistetty lämmön ja sähköntuotanto DTE Energy Technologies (Michigan)

TAULUKKO 9. STM 55 kW Stirling yksikön tekniset tiedot (Sähköinen kirja: STM Power inc.)

55 kW sähköteho; 125 kW lämpöteho; paino 1600 kg
Kokonaishyötysuhde: 84%
Sähköhyötysuhde: 30%
4 sylinterinen
Huoltoväli: 10,000 h
Polttoaineet: Kaasumaiset polttoaineet, kiinteät polttoaineet, kuuma ilma ja nestemäiset polttoaineet.

## 6 STIRLING-MOOTTORI PUUKAASUKÄYTÖSSÄ

### 6.1 Yleistä

Stirling- moottori on lupaava vaihtoehto pienen mittakaavan sähkön - ja lämmön tuotantoon. Moottori soveltuu erityisesti laitoksille, joiden sähköntuotanto on alle 150 kW. Poltto voi perustua jo olemassa olevaan biomassan polttotekniikkaan. Polttoaineen poltosta syntyvä lämpö siirretään työkaasuun korkeassa lämpötilassa lämmönvaihtimen kautta. Lämpö jota ei muuteta työksi, siirretään jäähdytysveiteen. Sähköinen kirja: (Sinkko 2009.)

Ulkoisen polton vuoksi monia biomassoja voidaan käyttää polttoaineena Stirling- moottorissa. Muita etuja ovat pitkät huoltovälit ja hiljainen käyntiääni. Stirling teknologiaa pidetäänkin yhtenä lupaavimmista teknologioista hajautettuun biomassaan pohjautuvaan CHP- tuotantoon. Stirling- moottoreiden kehitystyö on pilottivaiheessa ja niiden arvellaan pian saavuttavan kaupallisen kypsyyden. Stirling- moottoreiden ongelmana biomassan hyötykäytössä voidaan nähdä lämmön siirto savukaasuista työkaasuun. Lämpötilan tulee olla korkea, jotta saavutetaan riittävä sähköntuotannon hyötysuhde. Tämä voi kuitenkin aiheuttaa joillakin polttotavoilla likaantumisongelmia lämmönsiirtopinnoissa tai lämmönvaihtimessa. Sähköinen kirja: (Sinkko 2009.)

### 6.2 Biomassan käytön ongelmat

Stirling- moottoria käytettäessä aurinkoenergialla, aurinko kuumentaa työaineen 600 °C:een. Kylmää puolta jäähdytetään vesijäähdytyksellä, kuten auton mootto-

ria. Käytettäessä polttoaineena maakaasua tai öljyä poltin polttona, lämmityspintojen likaantuminen ei aiheuta merkittäviä käyttöongelmia tai hyötysuhteen alenemista.

Meillä Suomessa on tutkittu Stirling- moottorin käyttöä biomassalle tietävästi ainakin Jyväskylän yliopiston ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) toimesta sekä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Tutkimukset poikkeavat työstämme siten että, tutkimuksissa on käytetty Stirling- moottorin kuumentamiseen joko lämmönvaihtimen kautta tulevaa kuumennettua ilmaa tai Stirling- moottoria on kuumennettu suoraan biomassan palamiskaasuilla.

Maakaasua voi polttaa jopa 1 600 asteessa. Stirling- moottorissa lämpötilaeron pudottaminen jäähdytys- ja lämmityspuolen välillä alentaa hyötysuhdetta. Biopolttoaineella suorassa poltossa liian korkea savukaasujen lämpötila aiheuttaa lämmönsiirtopintojen likaantumista ja alentaa näin hyötysuhdetta. Lisäksi lämmitysilmän siirtäminen putkistoissa aiheuttaa lämpöhäviöitä ja korkeat lämpötilat esimerkiksi kattilassa, aiheuttavat ylimääräistä kulumista. Putkistojen eristeiden lämmönkestokyky asettaa rajoitteita lämmitysilmän siirrolle.

Kaasumaisia ja nestemäisiä polttoaineita poltettaessa suoraan liekkikosketuksella polttokammio on korvattu polttimella ja järjestelmä on käytöltään yksinkertaisempi.

### **6.3 Poltinpoltto**

Kaasumainen polttoaine voidaan polttaa tarkasti, kontrolloidusti ja hallitummin kuin kiinteä polttoaine, koska palamisilman ja polttoaineen sekoitus voidaan jär-

jestää halutuksi. Tämän vuoksi hyötysuhde saadaan korkeammaksi kuin kiinteillä polttoaineilla. (Leppälahti & Kurkela 1985, 7.)



KUVIO 18. Stirling- moottori puukaasukäytössä

### 6.3.1 Kaasun palamistekniset ominaisuudet

Pienlämpöarvoinen kaasu poikkeaa palamisteknisten ominaisuuksien osalta huomattavasti polttoöljystä ja maakaasusta. Palamisilman tarve on selvästi pienempi, mutta syntyvä savukaasumäärä suurempi kuin maakaasulla tai polttoöljyllä energiayksikköä kohti laskettuna. Kaasun teoreettinen palamislämpötila riippuu kaasun lämpöarvosta ja analyyseistä ja on laskettavissa kullekin kaasulle. Parhaimmillaan puukaasun teoreettinen palamislämpötila voi olla jopa 1907 °C,

kun taas kostean tervapitoisen kaasun adiabaattinen lämpötila voi olla laskennallisesti 1475 °C. (Leppälahti & Kurkela 1985, 15).

Maakaasun (metaanin) adiabaattinen palamislämpötila on 1918°C. Käytännössä kaasumolekyylien dissosiaatio ja lämpöhäviöt alentavat saavutettavaa lämpötilaa huomattavasti alle edellä ilmoitettujen arvojen. (Leppälahti & Kurkela 1985, 16).

Palamisnopeudeltaan vety on nopeimmin palava kaasu. Metaani ja maakaasu ovat sen sijaan hitaammin palavia kaasuja. Useimmissa kirjallisuustutkimuksissa mainitaan puukaasun palavan suurella nopeudella vetypitoisuuden palamisnopeutta nostavan vaikutuksen ansiosta. Palamisnopeus vaikuttaa liekin stabiilisuuteen polttimessa. Stabiilisuutta kuvataan yleisesti liekin taipumuksella ns. takaiskuihin ja toisaalta irtautumiseen polttimesta. Takaiskulla tarkoitetaan tässä liekin pakenemista polttimen sisälle suuttimeen, josta kaasu ja ilma syötetään. Tämä tapahtuu kun polttoaine- ilma seoksen syöttönopeus laskee palamisnopeutta pienemmäksi. Samoin liekki irtautuu polttimesta, jos syöttönopeus ylittää liiaksi palamisnopeuden. (Leppälahti & Kurkela 1985, 18.)

Mikäli maakaasulle suunniteltua poltinta käytettäisiin puukaasulla, tulisi kaasun virtausnopeutta nostaa riittävästi, mikäli liekin paikan muutos tai takaisku halutaan välttää. (Leppälahti & Kurkela 1985, 19).

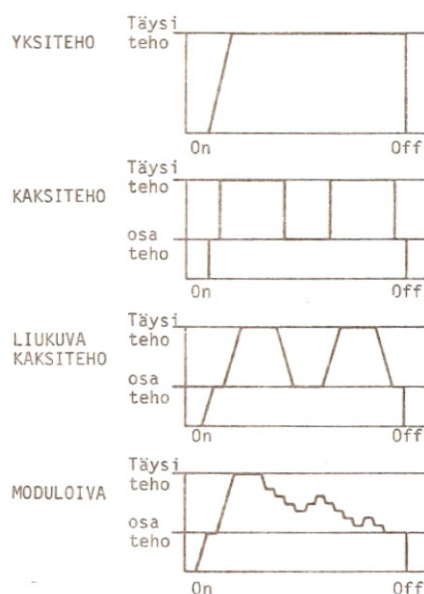
TAULUKKO 10. Kaasujen palamisnopeuksia ilmassa (Raikko ym. 2002, 157.)

Kaasu	Palamisnopeus cm/s
Metaani CH <sub>4</sub>	33,8
Vety H <sub>2</sub>	264,8
Hiilimonoksidi CO	39,0

Ero liekinpituudessa suhteessa maakaasuun samalla polttimella - ja teholla, eivät näyttäisi olevan suuria. (Leppälahti & Kurkela 1985, 21). Kun polttimen säädöt saadaan kohdalleen, ja vaikka kaasun lämpöarvo ja tulopaine vaihtelevat ei liekin stabiilisuden ja liekkihäiriöiden suhteen esiinny ongelmia. (Leppälahti & Kurkela 1985, 47).

### 6.3.2 Polttimen ohjaus ja säätö

Tavallisimmat kaasupolttimen tehon säätötavat ovat: yksiteho, kaksiteho, liukuva kaksiteho ja moduloiva. Yksinkertaisin tapa on magneettiventtiilin ohjaama on-off-säätö tehontarpeen mukaan. Magneettiventtiilin lisäksi kaasuarmatuuriin yleensä liitetään käsikäyttöinen sulkuventtiili, suodatin, vakiopaineventtiili ja painevahti. Vakiopaineventtiilin tehtävä on tasata kaasun paineen muutokset. (Leppälahti & Kurkela 1985, 26.)



KUVIO 19. Kaasupolttimen tehonsäätö käyrät (Leppälahti & Kurkela 1985, 28.)

Polttimen ohjaukseen kuuluu olennaisena osana liekin valvontalaitteisto. Sähköisessä liekinvalvonnassa liekkielektrodi tai valokenno lähettää liekistä viestin ohja-

uskeskukselle, joka ohjaa kaasulinjan sulkuventtiilejä, jotka voivat olla samalla polttimen tehonsäätöventtiilejä. Liekkihäiriön tapahtuessa, tai jonkin muun polttimen lukitusehdon täytyessä, on kaasun tulo polttimeen estettävä polttimen varmuusajan kuluessa, joka on yleensä vain muutamia sekunteja. (Leppälahti & Kurkela 1985, 29.)

Polttimelle asetettavia vaatimuksia ovat maakaasupolttimen automatiikka ja säädettävyys, normaali liekinvalvonta- ja turvallisuuslaitteisto sekä sähköinen sytytys. (Leppälahti & Kurkela 1985, 41.) Toiminnan kannalta on kaasun epäpuhtauksien määrä oltava niin pieni, että säätöön tarvittavat laitteet toimivat häiriöttä. (Leppälahti & Kurkela 1985, 29.)

### 6.3.3 Poltintyytit

Perinteisesti kaasupolttimet jaetaan ryhmiin polttoaine-ilmaseoksen muodostumistavan perusteella. Polttimissa voidaan erottaa tämän jaottelun mukaan diffuusiopolttimet, joissa kaasu ja palamisilma kohtaavat liekissä. Esisekoituspolttimissa kaasu ja ilma sekoitetaan ennen liekkiä. Yleensä lähes kaikki polttimet ovat edellisten välimuotoja, joissa osa palamisilmasta sekoittuu kaasuun ennen polttopäätä ja loput palamiseen tarvittavasta ilmasta ohjataan liekkirintamaan. Palamisilman syöttötavan mukaan polttimet voidaan edelleen jakaa atmosfääripolttimiin ja puhallinpolttimiin. Atmosfääripolttimissa palamisilma sekoitetaan kaasuun käyttäen hyväksi virtaavan kaasun kineettistä energiaa. Tällaisissa polttimissa kaasu imee palamisilman mukaansa virratessaan liekkiin. Tällaiset polttimet ovat yleisiä pienessä kokoluokassa. (Leppälahti & Kurkela 1985, 21.)

Yhteenvedon voidaan todeta, että pyrittäessä maakaasupolttimella polttamaan puukaasua laskematta polttimen tehoa, kasvaa kaasun tilavuusvirta lämpöarvon



suhteessa maakaasun tilavuusvirtaan. Ilman tilavuusvirta laskee hieman tai pysyy ennallaan. Tällöin virtausolot, ja ennen kaikkea kaasun virtausnopeus muuttuu olennaisesti. Mikäli palamisnopeus ylittyy, tapahtuu liekin irtautuminen polttimesta. Liekin irtautuminen voidaan välttää mitoittamalla polttimen suutin siten, että virtausnopeus ei kasva liian suureksi. Mitä suurempi on kaasun vetypitoisuus, sitä suurempia virtaus nopeuksia voidaan käyttää. (Leppälahti & Kurkela 1985, 38.)

## 7 TYÖN KULKU

Työn tavoitteena oli Solo Stirling- moottori/ generaattori yksikön saattaminen käyttökuntoon, jolloin olisi mahdollista käyttää maakaasukäyttöön suunniteltua laitteistoa puukaasukäytössä. Lisäksi, mikäli laitteisto saataisiin toimimaan moitteettomasti CHP- käytössä, suorittaisimme hyötysuhdemittauksia kyseisellä laitteella. Lämmönsiirtopintojen likaantumisen tutkiminen puukaasulla olisi myös osa työtä.

Noutaessamme Stirling- moottorin Jyväskylästä oli vielä epäselvää mitä laitteita moottorista puuttuisi ja mitä laitteistokokonaisuus sisältäisi. Moottoriyksikkö oli ollut jo testikäytössä ja ilmeisesti ainakin lämmönsiirtopintoihin oli suunniteltu muutoksia.

Laitteistokokonaisuus osoittautui hyväkuntoiseksi ja vähän käytetyksi. Moottori sisälsi alkuperäisen lämmöntalteenottokruunun, mutta laitteesta puuttui poltin maakaasulle sekä palamiskaasujen lämmön talteenottolämmönvaihdin. Toimitusrajat on esitetty kuviossa 27.

### 7.1 Laitteiston rakentaminen

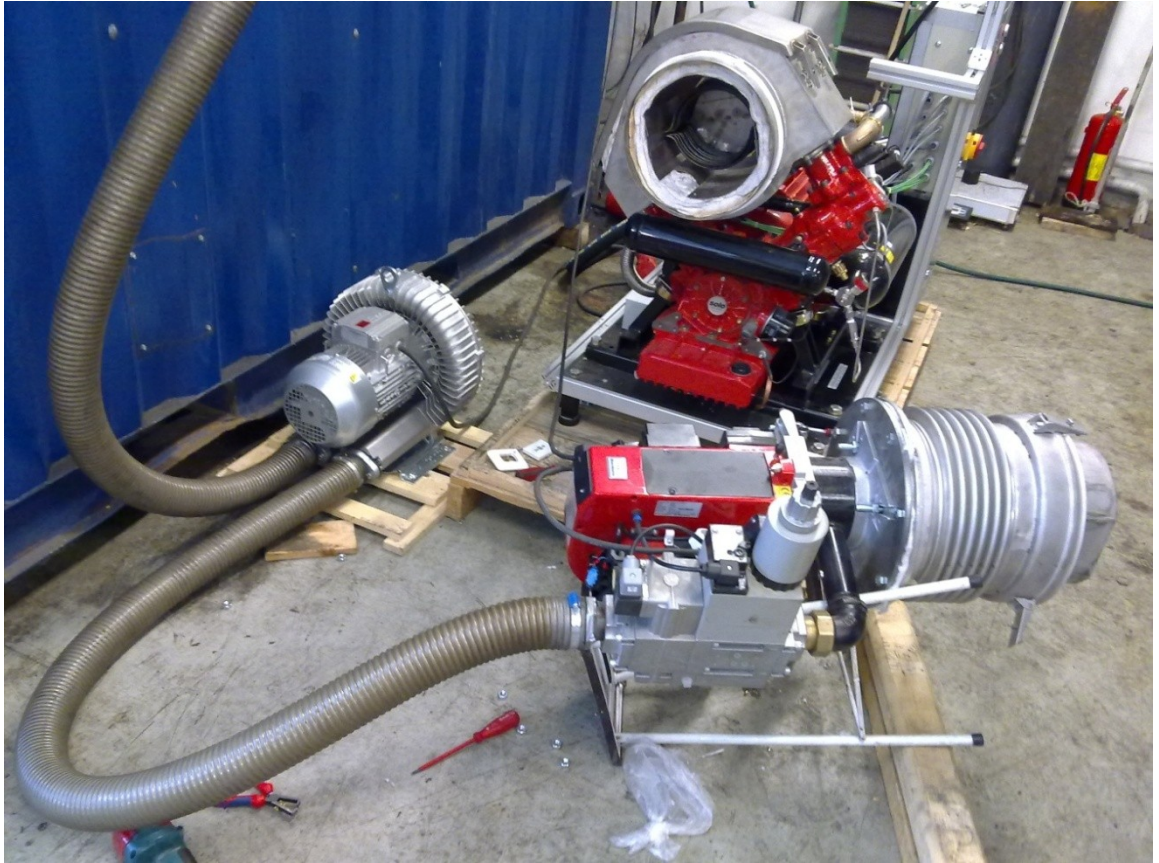
Puuttuvan poltinlaitteen korvaavaksi polttimeksi saimme hankittua käytetyn Bentone BG 300 maakaasupolttimen GasEK Oy:ltä. Kaasupoltin oli teholtaan 60- 190 kW ja polttimen automatiikka oli Siemensin valmistetta. Kaasupoltin tarvitsee

toimiakseen tuotekaasun ylipaineen, joka on 20 mbar. Paine voi olla kaasuputkessa enintään 100 mbar.

Kaasun virtausnopeutta tuli pystyä säätämään, koska ei ollut varmuutta millä tuotekaasun virtausnopeudella kaasupoltin saavuttaisi Stirlig- moottorin tarvitseman tehon. Oli myös epäselvää, miten liekki käyttäytyisi ja mikä olisi liekin sijainti palopäässä. Laitteiston testaus oli alussa pitkälti kokeiluihin pohjautuvaa.

Puukaasulaitteiston tuottama kaasu on paineistamatonta ja kaasuttimen rakenteesta johtuen tuotekaasu imetään reaktorista. Ottomoottorikäytössä moottori on itse hoitanut tuotekaasun siirtoon tarvittavan alipaineen muodostamisen. Tarvitimme puhaltimen imemään tuotekaasun reaktorilta ja paineistamaan sen polttimelle.

Tuotekaasun siirtoon saimme käyttöön Busch SB03 sivukanavapuhaltimen tehoaan 3,0 kW. Puhaltimen avulla saimme imettyä reaktorilta tuotekaasun ja paineistettua sen polttimen tarvitsemaan paineeseen. Sivukanavapuhaltimen kierrosnopeuden säätöön käytössämme oli ABB ACS550 taajuusmuunnin, joka oli tehoalueeltaan 0,75- 132 kW.



KUVIO 20. Sivukanavapuhallin, poltin ja Stirling- moottorin lämmönsiirto osa

Palamiskaasujen lämmön talteenottoon jouduimme soveltamaan olemassa olevaa putkilämmönvaihdinta. Suoraan palopään jatkeeksi sijoittamamme lämmönvaihdin siirtää palamiskaasun jäännöslämpöä jäähdytysveten. Lämmönvaihdin rakenteeltaan koostuu pilleistä, joiden läpi savukaasut virtaavat ja luovuttavat lämpöenergiaa jäähdytysveten. Rakenteeltaan tai teholtaan vaihdin ei ollut paras mahdollinen tähän tarkoitukseen.

## 7.2 Poltin

Bentone BG 300 maakaasupolttimen kattilatermostaatti korvattiin kytkimellä, joka kytkettynä käynnistää poltinautomatiikan. Esituuletusajan jälkeen sytytysvalokaari kytkeytyy suuttimen edessä olevan kipinäkärjen väliin, jonka jälkeen magneettiventtiilin avauduttua suuttimen kautta purkautuva kaasu syttyy. Valokaari kytkeytyy pois ja mikäli liekki ei jää palamaan säädetyn ajan kuluessa, pysähtyy poltin liekinvalvontalaitteiston pysäyttämänä. Poltin suorittaa kolme uudelleenkäynnistysyritystä mikäli poltin ei ole syttynyt, jonka jälkeen poltin jää häiriötilaan. Häiriötila kuitataan automatiikkakotelossa olevalla kuitauspainikkeella. Tällöin poltin on valmis uudelleenkäynnistymistä varten.

Käytössä oleva poltin on tyypiltään jälkisekoituspoltin. Kyseisessä polttimessa kaasu virtaa palamisvyöhykkeeseen suuttimessa olevien reikien läpi ja palamisilma virtaa puhaltimelta varsinaisen kaasuputken ulkopuolella ilmanjakolevyn läpi palamisvyöhykkeeseen.

Polttimen kaasunvirtauksen säätöön kuuluvat mekaanisesti säädettävä vakiopaineventtiili, tuotekaasuputken painevahti, joka valvoo säätöpyörästä asetettua tuotekaasun minimipainetta, sekä tuotekaasun virtauksen pysäyttävä magneettiventtiili. Tuotekaasun virtaus voidaan asettaa halutun tehon mukaiseksi vakiopaineventtiilin asettelulla. Palamisilman säätö suoritetaan mekaanisella kuristuksella. Palamisilman paineenylitystä valvova painevahti voidaan asettaa haluttuun arvoon säätöpyörästä.



KUVIO 21. Maakaasupoltin. Kuvassa oikealla sulku – ja painentasausventtiili, keskellä palamisilman säätö, vasemmalla puhaltimen moottori ja säätöautomaattikka.

### 7.3 Asennus ja koekäyttö

Koekäytössä ja yleensä testauksessa tuotekaasulla tuli huomioida kaasuseoksen räjähdysvaara. Lähinnä polttokammiossa oli mahdollista muodostua räjähdysvaarallinen kaasuseos. Kaasuseoksen tuulettaminen palamisilmapuhaltimella automatiikan toimesta on syttymistä edeltävä tapahtuma. Muutoksia tehtäessä tuli ottaa huomioon polttimen alkuperäinen toiminnallisuus ja turvallisuusvaatimukset.

Ensimmäinen koekäyttöyritys tuotekaasulla, jolloin poltin oli vielä irrallaan Stirling- moottorista, johti epäonnistumiseen. Kolmen käynnistysyrityksen jälkeen polttimen tulisi mennä häiriötilaan, joka voidaan poistaa kuittauspainikkeella. Poltin oli kuitenkin epäonnistuneiden yritysten jälkeen tilassa, jossa polttimen automatiikka ei ollut lainkaan toimintavalmiudessa eikä kuittausta voinut suorittaa. Vika ei ollut laitteen automatiikassa vaan perusteellinen vikojen etsintä paljasti tuotekaasun tuloputkesta kaasun painetta mittaavan anturin olevan jumittuneena. Anturin puhdistuksen jälkeen oli mahdollista jälleen yrittää polttimen käynnistymistä. Lukuisien käynnistysten saldo oli, että polttimeen syttyi liekki hetkellisesti, mutta sammui välittömästi. Johtopäätös tilanteesta oli, että polttimen kaasunsaannissa oli ongelma. Tuotekaasun virtausnopeuden tulisi olla 7- 8 kertaa maa-kaasuun virtausnopeus, jotta polttimen teho pysyisi samana. Lisäksi poltin sai palamisilmaa liikaa pienimmälläkin asetusarvolla. Irrotimme kaasun virtauksen säätölaitteisto/sulkuventtiiliyhdistelmän perusteellista puhdistusta tutkimusta varten.

Tutustuminen poltinlaitteeseen purkamalla venttiilipaketti puhdistusta varten osoitti, että poltin on tehonsäätömekanismiltaan liukuva kaksiteho-/tehonsäätöinen. Rakenteeseen kuuluu, että sytytysvaiheessa avautuu säätöventtiili hidastetusti osateholle, jonka jälkeen tietyn aikaviiveen jälkeen venttiili avautuu hidastetusti mekaanisesti säätöruuvista asetettuun tehoarvoon. Lähempi tarkastelu osoitti, että venttiili on toiminut aina ainoastaan osateholla, mutta venttiilin oli kunnossa ja kytkettävissä toimimaan myös täysiteho alueella.

Seuraavassa testitilanteessa palamisilman puhaltimen nopeudensäätöön asensimme säädettävän jännitelähteen. Jännitelähteen avulla saimme palamisilman määrän pienennettyä halutun suuruiseksi jännitteellä 95 voltia. Puhallin asennettiin toimimaan jatkuvasti, joten se toimi seisontaaikana tuulettaen polttokammiota. Poltin syttyi ja tuotekaasun virtausta saatiin nostettua, mutta vieläkin paineentasausventtiili toimi rajoittavana tekijänä polttimen tehoa nostettaessa. Yritettäessä



nostaa tuotekaasun virtausta nostamalla kaasun painetta, paineentasausventtiili toimi toimintaperiaatteensa mukaisesti, kuristamalla kaasun virtausta venttiilissä. Lopputuloksena oli kaasun paineesta riippumaton stabiili ja oikeassa kohtaa oleva liekki polttimessa. Stirling- moottori käynnistyi lämpöenergialla, mutta pysäytettiin kesken olevien asennusten vuoksi.



KUVIO 22. Etualalla sijaitsee maakaasupolttimen sulkuventtiili ja takana paineentasausventtiili. Kuvassa on käden kohdalla paineentasausventtiilin paineensäätökälvö.

Stirling- moottorin lämpöenergian talteenotto toteutettiin ohjaamalla lämpöenergia suuren lämmönvaihtimen kautta kiinteistön patteriverkoston paluupuolelle. Jäähdytysveden lämpötila verkostosta Stirling- moottorille oli noin 40 °C.





KUVIO 23. Lämmönvaihdin kiinteistön lämpöverkkoon

Oli vielä epäselvää, onko liekki riittävä Stirling- moottorin täyteen sähköntuotantotohoon. Kaasun virtausta pienentämällä liekki oli kuitenkin säädettävissä pienemmäksi.

Palamisilman tarve oli todella pieni. Kokeiltaessa poltinta irrallaan, palopäähän voitiin sytyttää liekki palamisilmapuhallin pysäytettynä, jolloin liekki jäi palaamaan polttimeen päähän hieman lepattaen. Puhaltimen pyörimisnopeuden säätö jännitettä rajoittamalla kuumensi puhaltimen moottoria, eikä olisi hyväksi moottorille pitempiaikaisessa käytössä.

Palamisilman tarvetta voidaan mallintaa ja laskea Wobbe indeksillä, jota ei työssä kuitenkaan tehty, vaan se suoritettiin kokeellisesti. (Pieniniemi 2009.)

Puhaltimen ohjaaminen jännitelähteellä ja palamisautomaatiikan yhtäaikainen toiminta osoittautui mahdolliseksi. Teimme yksinkertaisen ratkaisun palamisilman siipipyörään, teippaamalla siipipyörän pintaan kierros ilmastointiteippiä. Siipipyörästä jäi siipiä paljaaksi reunasta noin yhden senttimetrin verran eli noin 20 % kokonaisalasta. Teippaus ei vaikuttanut siipipyörän tasapainoon, palamisilman määrä saatiin sopivan suuruiseksi ja ilmamäärää voitiin hienosäätää kuristusventtiilistä.

Toimenpiteiden jälkeen poltin syttyi ja toimi tuotekaasulla moitteettomasti oman automaatiikkansa turvin. Pysäytettäessä poltin termostaattia kuvaavalla kytkimellä ja käynnistettäessä poltin uudelleen kytkimestä, käynnistyminen ja palaminen olivat häiriöttömiä. Polttimen liekki oli stabiili ja oikealla kohdalla palopäässä.

Seuraavassa koeajossa Stirling- moottori tuli saada tuottamaan sähköä polttimen liekistä saatavan energian avulla. Stirling- moottorin pyörimissuunnan tulee olla oikea, suhteessa sähkömoottori/generaattorin pyörimissuuntaan. Koekäytössä sähkömoottori pyrki pyörittämään Stirling- moottoria käynnistystilanteessa vastakkaiseen suuntaan. Tuloksena oli epäonnistunut käynnistysyritys ja verkon varokkeiden laukeaminen. Stirling- moottorille verkosta tulevan kahden vaihejohtimen paikkojen vaihtaminen korjasi tilanteen, eli pyörimissuunta oli oikea. Stirling- moottori käynnistyi moottorin avustamana lämmönvaihdkruunun saavutettua käynnistymiseen tarvittavan lämpötilan. Kun Stirling- moottori saavutti sähkömoottorin synkronisen nopeuden 1500 kierrosta minuutissa ja kierrosnopeuden vielä kohotessa tästä, sähkömoottori alkoi toimia generaattorina - ja tuottaa sähköä verkkoon. Kyseisellä periaatteella toimiva generaattori ei tarvitse verkkoon tahdistamista.

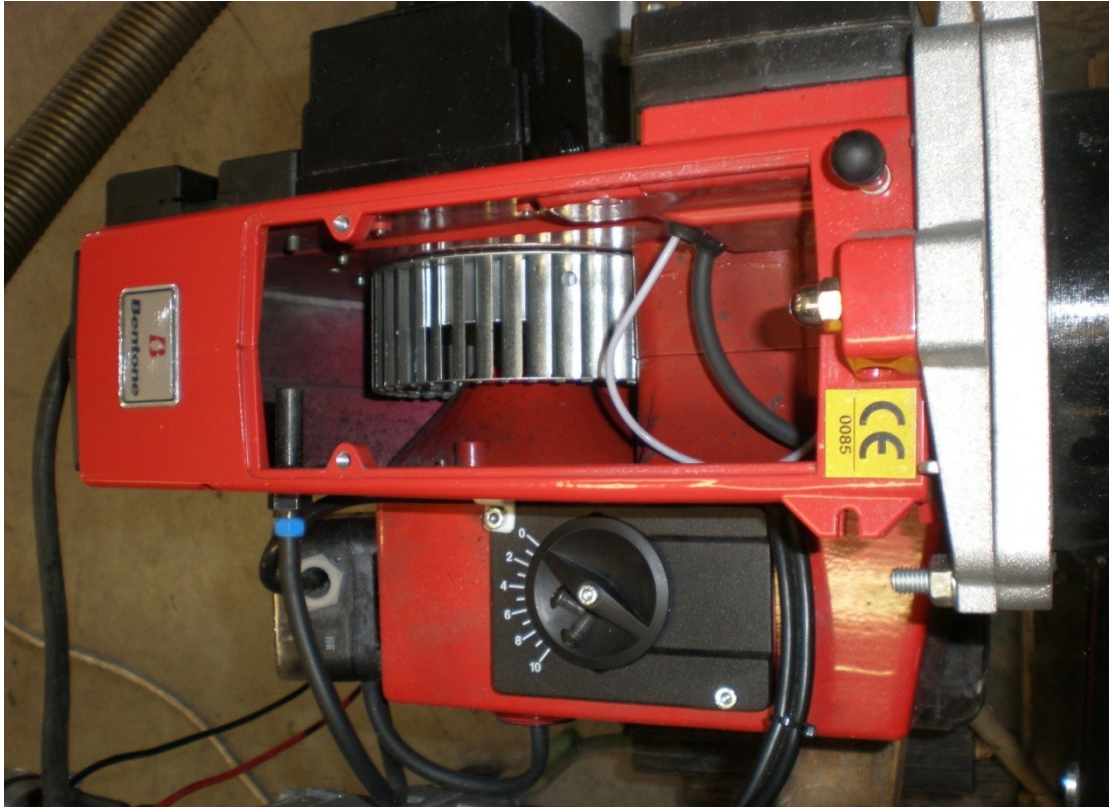
Lämmönvaihdin kruunun lämpötila oli asetettu automaatiikan asetuksista maksimi arvoonsa 736 °C, jossa lämpötilassa automaatiikka piti lämmönsiirtimen lämpötilan

työkaasun painetta muuttamalla. Polttimen teho ei ollut kuitenkaan riittävä tuotamaan sähköverkkoon täyttä generaattorin sähkötehoa. Generaattori toimi noin 60 % teholla maksimitehosta.

Polttimen tehoa tuli saada kohotettua ja säädettyä koe tilannetta varten tekemällä muutoksia paineentasausventtiiliin. Paineentasausventtiili ei enää kuristaisi kaasun virtausta polttimella kaasunpaineen kohotessa ja kaasun massavirtaa voitaisiin lisätä koetilanteita varten. Normaalisissa käytössä polttimen saattaisi toimia riittävällä teholla, riippuen kuinka alhainen jäähdytysveden lämpötila on. Polttimen liekki tulisi myös olla optimaalisella kohdalla lämmönsiirtopintaan nähden täyteen laitetehoon pääsemiseksi polttimen perusasetuksilla.

Muutostyön jälkeen tuotekaasun siirtopuhaltimen kierrosnopeutta säätämällä voitiin saada kaasupolttimelle haluttu paine ja nostettua polttimen teho halutuksi. Kaasumäärän säätöventtiili pidettiin auki asennossa ja kaasumäärän säätö suoritettiin kaasun painetta muuttamalla. Kaasun paine tuotekaasuputkessa pysyi muutoksen jälkeenkin varsin pienenä, alle 30 mbar:ssa.

Suurempi polttimen teho vaati enemmän palamisilmaa ja epävarmat teippaukset puhaltimen siipipyörästä tuli poistaa. Puhaltimen siipipyörän sisäpinnalle asetettiin ohut alumiinipellin suikale, pituudeltaan tarkasti sopiva. Siipipyörän pinta-alasta peittyi 50 %. Polttimen ilmansäätö toimi nyt säätöalueella. Polttimen palamisilma tuli säätää käsin aina polttimen kaasuvirtausta vastaavaksi. Polttimen sytytys kylmänä tuli tehdä edelleen säätöläppä suljettuna. Tehokas puhallin tuotti riittävän ilmamäärän sytytykseen pienellä polttimen teholla, vaikka ilmamäärän kuristin oli täysin kiinni. Polton aikana ilmamäärän asettelu 90% teholla oli 4,5 asteikolla yhdestä kymmeneen.



KUVIO 24. Palamisilmapuhaltimen siipipyörä

Stirling- moottori saatiin toimimaan täydellä sähköteholla. Lämpötila Stirling- moottorin lämmönsiirtopinnan jälkeen ennen lämmönvaihdinta, moottorin käydessä täydellä teholla, oli hieman yli tuhat astetta. Palamiskaasun lämpötilamittaus osoitti lämmönvaihtimen olevan kooltaan riittämätön. Palamiskaasujen, hiukan maakaasua nopeamman virtauksen ja lämmönvaihtimen pienuuden vuoksi lämpötila poistoputkessa oli noin 300 °C. Generaattorin käydessä 60 % osateholla palamiskaasujen lämpötila oli vajaat 200 °C.

Palamiskaasujen talteenottoa tehostimme jatkamalla Stirling- moottorin palamiskaasujen lämmönvaihtimen pituutta kaksinkertaiseksi alkuperäisestä. Jälkimmäiseen putkilämmönvaihtimeen lisäsimme myös konvektiokierukat lämmönsiirron tehostamiseksi. Palamiskaasujen lämpötila poistoputkessa saatiin pudotettua noin 100 °C:een. Tehokkaamman poistokaasujen lämmönvaihtimen vuoksi Stir-



ling- moottoria jäähdyttävän patteriverkosto veden lämpötila nousi hieman. Generaattorin teho ja hyötysuhde ovat suoraan riippuvaisia jäähdytysveden lämpötilasta. Jäähdytysveden lämpötilan kohoaminen alentaa suoraan sähkötehoa. Polttimen tehon suora kohotus ei lisää sähkötehoa, mikäli jäähdytysveden lämpötila ei ole tarpeeksi alhainen. Liiallinen kuumentaminen ja nopeat lämpötilan muutokset lisäävät pitkällä aikavälillä laitteiston kulumista. Lämmönsiirtopintoja tulisi pysyttyä kuumentamaan optimaalisella lämpötilalla suhteessa jäähdytysveden lämpötilaan. Modifioidun polttimen teho ylittää Stirling- yksikön tehontarpeen. Polttimen tehoa lisättäessä on käytettävä niin sanottua maalaisjärkeä, että laitteisto ei ylikuumene tai kuormitu.



KUVIO 25. Palamiskaasujen lämmönvaihdin

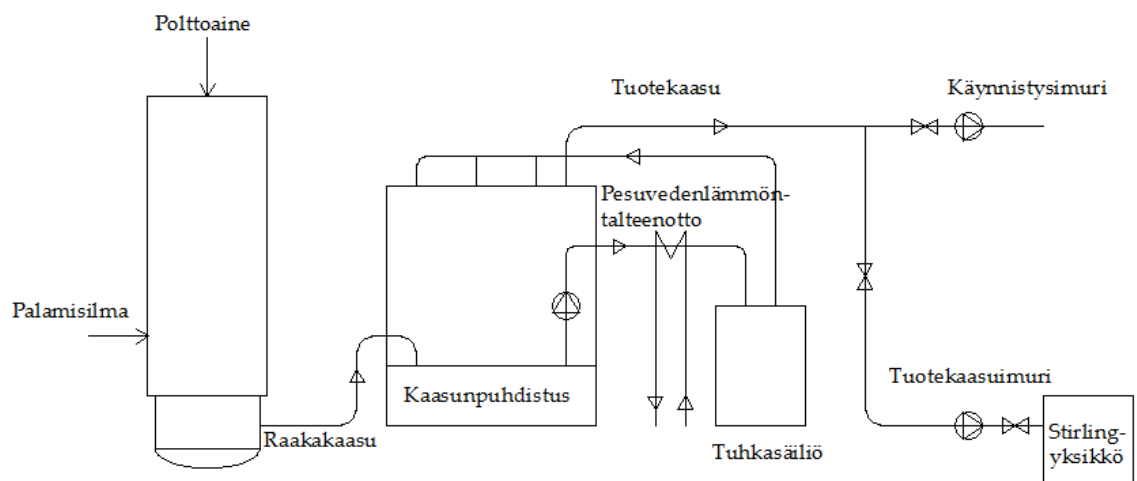
Asennuksen ja koekäytön jälkeen laitteiston liekinsäätöautomaatiikka ja poltin toimivat häiriöttömästi ja poltin oli vaivattomasti säädettävissä eri teholle. Stirling-laitteisto oli asennuksien puolesta valmis tarkempien mittausten tekemistä varten.

## 8 KOETULOKSET

### 8.1 Koelaitteisto

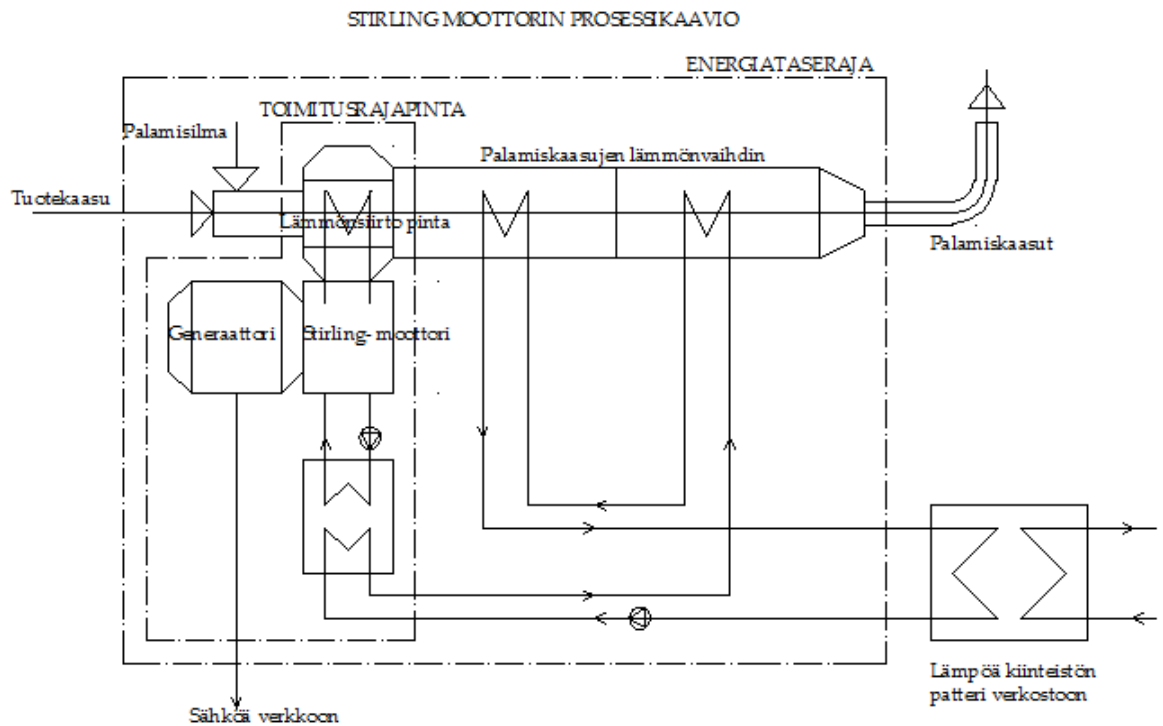
Kaasun kehitykseen käytettävä laitteisto oli laboratorion myötävirtakaasutukseen perustuva laitteisto, johon oli liitetty kaasun pesulaitteisto lämmön talteenotolla. Kaasuttimen toimintaperiaate on esitetty kuviossa 26.

#### Kaasutuksen prosessikaavio



KUVIO 26. Myötävirtakaasutin ja kaasunkäsittelylaitteisto

Polttimen jälkeen kytketystä Stirling- moottorista saatava lämpöenergia siirrettiin lämmönvaihtimella kiinteistön lämpöverkkoon ja sähkö syötettiin kiinteistön sähköverkkoon. Stirling- moottorin energiavirrat ja toimintaperiaate on esitetty kuviossa 27.



KUVUUIO 27. Stirling- moottorin sähkön- ja lämmön talteenoton toimintakaavio

Muuttuvalla poltinteholla sopivan kaasuvirtauksen aikaansaamiseksi kaasunpaine oli mittausten aikana välillä 5...25 mbar. Polttimen tehoa säädettiin kaasun painetta muuttamalla ja pienimmällä paineella lisäksi säätöventtiilillä, mentäessä alhaisille tehoille. Stirling- moottorin jäähdytysveden lämpötila oli kokeen aikana 38...45°C, Stirling- moottorin lämmönvaihdinkruunun lämpötila oli kokeen aikana asetettu arvoon 736°C. Poltin -ja kaasutuslaitteiston ominaisuudet eivät mahdollistaneet käyttää aivan pienimpiä Stirling- yksikön tehoja. Liekinvalvonta ja sytytys – ja säätölaitteisto toimi häiriöttä. Liekki oli stabiili, kaasun palamisilman säätö toimi mitattavalla tehoalueella ja oli asteltavissa polttimen omalla mekaanisella säädöllä optimaaliseksi.

Laitteistokokonaisuus käynnistyi nopeasti täysin kylmästä tilasta sähkön tuotantoon. Kaasuttimen sytytyksestä noin 3,5 minuutin kuluttua kaasupoltin syttyi ensimmäisellä kipinällä ja alle viiden minuutin kuluessa sytytyksestä laitteisto tuotti sähköä noin 6,5 kW teholla verkkoon.

## 8.2 Mittauslaitteisto

Koeajojen aikana keräsimme mittaustulokset ja kirjasimme määrääjoin manuaalisesti. Kokeissa käytetyt mittalaitteet ja mittaussuureet on esitetty seuraavassa taulukossa. (taulukko 11).

TAULUKKO 11. Mitatut suureet ja mittaustapa.

Mitattava suure	Mittaustapa
<b>KAASUTUS</b>	
kaasuanalyysi (Liite 1.)	Agilent 490 Micro GC kaasuanalysaattori
polttoaine analyysi (Liite 2.)	Metla- polttoaine analyysi.
kaasumäärä	ifm electronic SD 9000
kaasun tilavuusvirta	TSI Airflow TA 410
kaasun lämpötila	TSI Airflow TA 410
kaasun paine polttimella	Vesitäytteinen U- putki
kaasun paine polttimen jälkeen	Vesitäytteinen U- putki

(jatkuu)



TAULUKKO 11. (jatkuu)

<b>GENERAATTORI</b>	
tuotettu sähköteho verkkoon	Mekaaninen laskenta
jännite	Fluke 177 true RMS multimeter
virta	Fluke 177 true RMS multimeter Fluke 322 Clamp Meter

<b>LÄMMÖN VAIHDIN STIRLING-MOOTTORI</b>	
menovesi lämpötila	Kamstrup lämpöenergiamittari
paluuvesi lämpötila	Kamstrup lämpöenergiamittari
veden tilavuusvirta	Kamstrup lämpöenergiamittari
kokonaisteho	Kamstrup lämpöenergiamittari

<b>LÄMMÖNVAIHDIN KAASUN PESURI</b>	
menovesi lämpötila	Fluke 289 true RMS multimeter + termoelementti
paluuvesi lämpötila	Fluke 289 true RMS multimeter + termoelementti
Kaasun pesu vesi	Fluke 289 true RMS multimeter + termoelementti
veden tilavuusvirta	mekaaninen, mitta- astia

<b>PALAMISKAASUT</b>	
lämpötila	CA-Calk Tsi
tilavuusvirta	TSI Airflow TA 410
savukaasuanalyysi	CA-Calk Tsi, Gasmeter

### 8.3 Kokeiden suoritus

Stirling- moottorin asennuksen ja koekäytön onnistuminen, laitteiston moitteeton toiminta ja polttimen tehonsäädön onnistuminen mahdollistivat hyötysuhdemittaukset laitteistokokonaisuudella. Kokeiden tarkoituksena oli mitata kokonaishyötysuhdetta, sähkön -ja lämmöntuotannon hyötysuhdetta eri poltintehoilla sekä tutkia yleisestä toimivuutta ja lämmönsiirtopintojen likaantumista. Kiinnostusta työn edetessä herätti myös, millä poltinteholla sähkön osuus kokonaistehosta olisi suurin.

Stirling- moottorin generaattorin teoreettinen tehoalue oli 2 - 9 kW maakaasukäytössä. Kokeita suoritettiin viisi, eri generaattorin teholla ja yhdellä lämmönvaihdin kruunun asetuksella. Mittaukset tehtiin alkaen ylemmästä tehosta ja kirjattiin lukemat manuaalisesti osamittausten keskiarvoina lämpötilojen tasaantumisen jälkeen. Lämmönvaihdinkruunun lämpötila asetellulla 736 °C laitteisto toimi tehoalueella 6,1- 7,5 kW. Lämmönsiirtokruunun lämpötila laskiessa alle asetuksen, noin 350 °C, laitteisto pysähtyi.

Sähkökatkon vaikutusta Stirling- yksikön toimintaan testasimme katkaisemalla verkon hetkellisesti irti laitteesta lähes täydellä kuormalla sekä pitempiaikaisen katkon vaikutuksen toimintaan. Katkos kohotti kierroksia tehoa vastaavasti kuten kaava  $P = \omega T$  edellyttääkin. Kaavassa P on teho,  $\omega$  on kulmanopeus ja T on vääntömomentti. (Muilu 2010.)

Suoritettaessa koetta pienellä teholla palamiskaasujen lämpötilan ollessa alle 90 °C, palamiskaasujen lämmönvaihtimeen alkoi tiivistyä vettä, joka valui sitä varten poratusta reiästä ulos. Vesi ei aiheuta syöpymistä palamiskaasuputkistossa ja lämmönvaihtimessa, koska palamiskaasu sisältää vähän rikkiä.

Märällä hakkeella kosteuden tiivistyminen vedeksi tuotekaasuputkessa ja sivukanavapuhaltimessa aiheuttivat kaasunpaineen vaihtelua polttimella. Veden aiheuttamat paineenmuutokset aiheuttivat haittaa lähinnä kylmäkäynnistyksessä, mutta veden tyhjentäminen tuotekaasuputkesta kyseisellä hakeerällä poisti käyntiongelmia polttimella.

Kokonaishyötysuhde laskettuna polttoainetehosta kertoo osittain kuinka laitteiston rakenteet on eristetty lämpövuotoja ajatellen ja kuinka optimaalinen laitteiston energiaa kuluttavien laitteiden mitoitus on käyttötärpeeseen nähden. Laitteistoratkaisussa ei ole optimoitu esimerkiksi pumppujen ja puhaltimen moottoreita käyttötärvetta ajatellen. Kokonaishyötysuhde polttoainetehosta ilmaisee tämän prototyypilaitteiston hyötysuhteen tämänhetkiselä laitteistokokoonpanolla.

Kokonaishyötysuhde laskettuna tuotekaasun kemiallisesta energiasta, kertoo Stirling-laitteiston kokonaishyötysuhteen. Hyötysuhde kertoo ulostulevien tehokomponenttien suhteen tuotekaasun laskennalliseen tehokomponenttiin.

Käyttökokeen mittaustulokset kirjattiin pöytäkirjaan käsin neljä kertaa kokeen aikana. Koe oli kestoltaan yksi tunti. Kokeita suoritettiin viisi, alkaen suurimmasta poltintehosta. Laskenta suoritettiin Excel-laskentaohjelmalla. Tulosten ohjelmaan kirjauksen jälkeen mittaustuloksista laskettiin keskiarvo, jota käytettiin tehon ja hyötysuhteiden määrittäksessä. Mittauspöytäkirja Liite 3.

#### 8.4 Mittaustulokset

Kokeissa kaasutuksessa käytettiin raaka- aineena sekapuuhaketta. Tuotekaasun analyysitulokset on esitetty taulukossa 12. ja hakkeen analyysiraportti taulukossa 13.

Taulukon 12 arvoista on havaittavissa, että kaasutin ei toimi optimialueella.

TAULUKKO 12. Tuotekaasun koostumus. (Liite 1)

Aine:		%
Typpeä	N <sub>2</sub>	57,99
Vetyä	H <sub>2</sub>	14,20
Hiilimonoksidia	CO	11,19
Metaania	CH <sub>4</sub>	1,33

TAULUKKO 13. Analyysiraportti sekapuuhake (Liite 2)

Kaasutuksessa käytetyn sekapuuhakkeen ominaisuudet.	
Kosteus saapuessa %	23,82
Tuhkapitoisuus kuiva- aineessa %	0,51
Kalorimetrinen lämpöarvo MJ/ kg	20,33
Tehollinen lämpöarvo kuiva- aineessa MJ/ kg	18,93
Tehollinen lämpöarvo saapumiskosteudessa MJ/ kg	13,84

TAULUKKO 14. Mittaustulokset

Mitattava suure	Koeajo 2 1h	Koeajo 4 1h	Koeajo 3 1h	Koeajo 5 1h	Koeajo 1 1h
<b>SÄHKÖTEHO</b>					
laskettu teho kW	6.11	6.39	6.46	6.62	7.45
kWh mittarin lukema					
kWh mittarin lukema					
<b>LÄMPÖTEHO</b>					
Palamiskaasut					
energiamittari kW	14.95	27.80	32.55	38.83	44.46
<b>LÄMPÖTEHO</b>					
Kaasun pesuri					
laskettu kW	8.16	6.47	6.76	6.18	9.41
<b>POLTTOAINE</b>					
kulutus m <sup>3</sup>	0.0334	0.0550	0.0098	0.0905	-0.0314
Kulutus kg	7.01	11.55	2.06	19.00	-6.60
lisätty kg			13.51		28.35
kulutus yht. kg	7.01	11.55	15.57	19.00	21.75
tiheys kg/ m <sup>3</sup>	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00
lämpöarvo MJ/kg	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93
laskettu teho kW	36.88	60.73	81.88	99.91	114.38
<b>TUOTEKAASU</b>					
kulutus nm <sup>3</sup> /h	17.13	28.50	43.25	56.00	71.38
lämpöteho MJ/ nm <sup>3</sup>	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42
laskettu teho kW	16.27	27.08	41.09	53.20	67.81
<b>virtausnopeus m/s</b>					
putken halkaisija dm	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
kulutus 2 nm <sup>3</sup> /h	35.18	68.25	83.37	102.09	113.39
lämpöteho MJ/nm <sup>3</sup>	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42
laskettu teho kW	33.42	64.84	79.20	96.98	107.72
<b>Tuotekaasu laskennallinen kulu- tus</b>					
kaasun tuotto 3,282 nm <sup>3</sup> / kg					
kulutus nm <sup>3</sup> /h	23.02	37.91	51.11	62.36	71.39
lämpöteho MJ/ nm <sup>3</sup>	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42
laskettu teho kW	21.87	36.01	48.55	59.24	67.82

TAULUKKO 15. Hyötysuhteet

<b>Stirling- moottorin hyötysuhde</b>					
	Mittaus2	Mittaus4	Mittaus3	Mittaus5	Mittaus1
Sähköteho kW	6.11	6.39	6.46	6.62	7.45
Lämpöteho kW	14.95	27.80	32.55	38.83	44.46
Teho yhteensä kW	21.06	34.19	39.01	45.45	51.91
Palamiskaasut kW					
Tuotekaasu teho kW	21.87	36.01	48.55	59.24	67.82
Hyötysuhde %	96.31	94.95	80.34	76.72	76.54
<b>Kokonaishyötysuhde</b>					
Stirling- moottori kW	21.06	34.19	39.01	45.45	51.91
Kaasun pesuri kW	8.16	6.47	6.76	6.18	9.41
Vesi pumppu kW	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Kaasun siirto kW	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Teho yhteensä kW	27.57	39.02	44.12	49.98	59.68
Palamiskaasut kW					
Polttoaineteho kW	36.88	60.73	81.88	99.91	114.38
Kokonaishyötysuhde %	74.76	64.24	53.88	50.03	52.17

**Kokonaishyötysuhde (polttoainen tehollisesta lämpöarvosta saapumiskosteudessa).**

Teho yhteensä kW	27.57	39.02	44.12	49.98	59.68
kulutus yht. kg	7.01	11.55	15.57	19.00	21.75
lämpöarvo MJ/kg	13.84	13.84	13.84	13.84	13.84
Polttoaineteho kW	26.96	44.40	59.86	73.04	83.63
	102.25	87.87	73.70	68.43	71.36

## 9 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaasutinlaitteisto oli maksimiteholtaan noin 150 kW. Puukaasutin oli teholtaan ylisuuri tutkimuslaitteiston käyttämiseen. Tämä näkyy mm. taulukon 12 kaasuanalyysissä, jossa typen osuus on kohtalaisen suuri, eli kaasutusilmaa on liikaa. Kaasutin toimi alle 50% teholla Stirling- moottorin toimiessa täydellä teholla. Kaasuttimen toiminta ei ollut pienimmällä poltinteholla teknisesti paras mahdollinen ja saattoi vaikuttaa tuotekaasun laatuun. Lisäksi polttimen liian suuri palamisilman määrä polttimella, laskettaessa polttimen teho riittävän alas, aiheutti polttimen toimintahäiriön. Kokeessa poltinta käytettiin teholla, jolla saatiin suurin mahdollinen sähköteho, laskien polttimen teho toiminnallisesti pienimpään mahdolliseen tehoon. Kaasutinlaitteistolla ei ollut mahdollista päästä Stirling- yksikön matalimmille tehoalueille.

Polttimen etäisyyttä lämmönsiirtopintaan nähden ei ollut mahdollista säätää teknisistä seikoista johtuen. Liekki tulisi olla optimaalisella kohdalla lämmönsiirtopintaan nähden, jotta lämmön siirtyminen olisi mahdollisimman tehokasta.

### 9.1 Hyötysuhde

Kattilan hyötysuhteen määrittämisessä käytetään polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian mittana DIN 1942- standardissa polttoaineen alempaa tehollista lämpöarvoa. Silloin ajatellaan, että savukaasuihin muodostuneen vesihöyryn lauh- tumislämpöä ei ole mahdollista saada lämmönvaihtimessa talteen. Stirling- moottorin hyötysuhtemäärittämisessä on käytetty suoraa menetelmää, joka perustuu kattilasta saatavan energiavirran määrittämiseen. Menetelmässä ei lasketa kattilan häviöitä ja määritetä hyötysuhdetta häviöiden kautta. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen 1994, 101.)

Savukaasujen pesuveden lämmöntalteenotossa pyrittiin pitämään jäähdytyspiirin lämpötila vakiona ja näin estämään lämmön varastoituminen jäähdytyspiirin veteen. Tuotekaasun pesu- ja jäähdytysveden lämpötilassa ei tapahtunut kokeen aikana lopputulokseen vaikuttavaa muutosta. Tuotekaasun pesuveden jäähdytyskiertovesipumpun mitattu teho on 1,1 kW ja tuotekaasun siirtopuhaltimen mitattu teho on 0,55 kW. Kiertovesipumpun- ja siirtopuhaltimen teho on huomioitu energiataselaskelmassa.

Kokonaishyötysuhde laskettuna polttoainetehosta antaa tulokseksi 75...52% käytettäessä polttoaineen tehollista lämpöarvoa. Kokonaishyötysuhde laskettuna polttoaineen tehollisesta lämpöarvosta saapumiskosteudessa antaa tulokseksi 102...71%. Mittaustulosta voidaan pitää luotettavana ja oikeana.

Stirling- moottorin hyötysuhteeseen vaikuttavat olennaisesti tuotekaasun virtausmäärä ja kaasun lämpöarvo. Tuotekaasun massavirtaa mittaavan mittarin virhe vaikuttaa suoraan hyötysuhteeseen. Mittalaitteen tarkastusmittauksessa havaittiin tuotekaasun massavirtaa mittaavien mittareiden näyttävän virheellistä mittaustulosta. Osasyynä virheelliseen tulokseen voi olla kaasuvirran mukana virtaava kiintoaines. Moottorin hyötysuhdemittaus tuotekaasusta ei anna luotettavaa kuvaa Stirling- moottorin hyötysuhteesta, koska mittalaitteilla ei päästy riittävään kaasunvirtaustarkkuuteen. Pienellä teholla pieni mittausrvirhe aiheuttaa suuren virheen hyötysuhteessa.

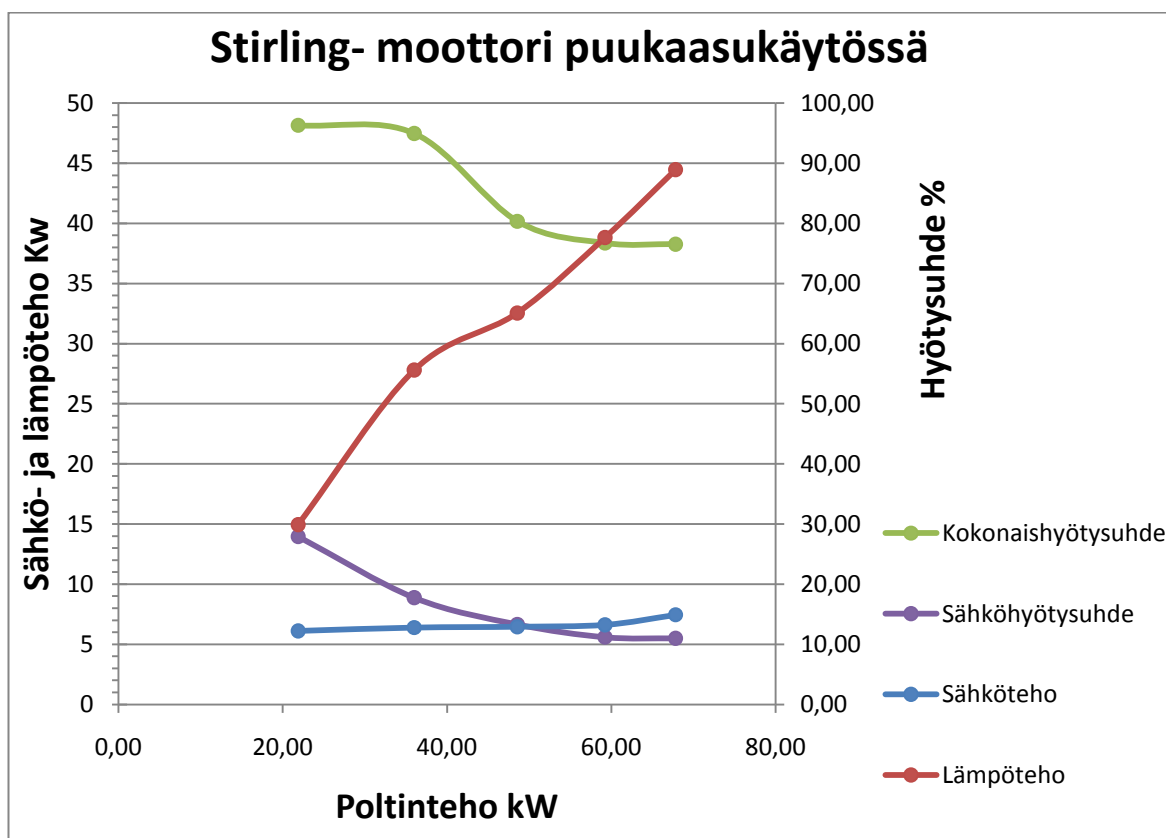
Stirling- moottorin hyötysuhteen laskennassa on käytetty ensimmäisen mittauksen tuotekaasun mittausrarvoa lähtökohtana. Mittarivirhe muilla poltintehoilla oli aina negatiivinen, joten mittaustulos suurimmalla poltinteholla ensimmäisessä mittauksessa näyttäisi olevan oikea. Tuotekaasun tuotto suurimmalla teholla oli 3,282 Nm<sup>3</sup>/ polttoaine kg, josta tuotekaasun kulutus Nm<sup>3</sup>/h on laskettu muille te-



hoille. Tämä vastaa aiempia mittauksia (HigBio info 25), sekä kirjallisuudessa esitettyjä arvoja, jotka on esitetty ko. infossa. Internet-sivu: (Muilu 2009.)

Stirling- yksikön hyötysuhteeksi tuotekaasun lasketusta kemiallisesta energiasta suhteessa ulostulevaan tehoon, saatiin maakaasupolttimen tehosta riippuen mittauksissa 96...77%. Sähköntuotannon osuus kokonaistehosta vaihteli poltintehon mukaan 28...11% välillä.

Stirling- yksikön sähkön- ja lämmöntuotannon suhde suhteessa polttimen tehoon vaihteli puukaasulla alla olevan käyrän mukaisesti ( kuvio 28). Polttimen teho on saatu tuotekaasun lasketun kemiallisen energian ja tuotekaasun massavirran tulona.



KUVIO 28. Sähkön- ja lämmöntuotantotehon suhde poltintehoon

Yhteenvedo mittauspöytäkirjasta, lasketuista tehoista ja hyötysuhteista on esitetty liitteessä 3.

## 9.2 Likaantuminen

Stirling- moottorin lämmönsiirtopintojen likaantuminen alentaa lämmön siirtymistä työkaasuun ja alentaa sitä kautta hyötysuhdetta. Työssä lämmönsiirtopintojen tarkastelu on rajattu silmämääräiseen tarkasteluun, koska työn tarkoitus ei ollut lähteä laajemmin tutkimaan siirtopintojen likaantumista ilmiönä. Työn aikana kuitenkin tarkkailtiin päästäänkö kokeen lopussa samaan sähköntuotannon tehoon samalla poltinteholla kuin kokeen alussa.

Kokeen kesto ja koekäyttö oli pituudeltaan noin 35 tuntia, jona aikana siirtopintoja ei puhdistettu eikä niihin koskettu. Ulkoinen tarkastelu osoitti kokeen päätyttyä pintojen olevan silmin nähden puhtaat. Kokeen lopussa oli mahdollista päästä samaan sähköntuotantotehoon kuin kokeen alussa lämmönsiirtopintoja puhdistamatta. Pyyhkimällä pinnat puhtaaksi, pinnoista ei irronnut merkittävää määrää palamisjäänteitä.

Lämmönsiirtopinnat ennen koetta ja käytön jälkeen voi nähdä kuviosta 29. ja 30.



KUVIO 29. Stirling- moottorin lämmönsiirtopinta ennen koetta



KUVIO 30. Stirling- moottorin lämmönsiirtopinta kokeen jälkeen

### 9.3 Palamiskaasut

Puupolttoaineessa ei ole käytännöllisesti katsoen lainkaan rikkiä. Polttoaineen palaessa pääosa rikistä reagoi hapen kanssa muodostaen rikin oksideja  $\text{SO}_2$  ja  $\text{SO}_3$ . Näistä rikkiatrioksidia on yleensä vain muutamia prosentteja. Rikkiatrioksidi reagoi savukaasuissa olevan veden kanssa muodostaen rikkihappoa. Mikäli rikkihappo pääsee tiivistymään lämmönsiirtopinnoille, seurauksena on niiden nopea syöpyminen. (Huhtinen ym. 1994, 45.)

Alhaisilla palamiskaasujen lämpötiloilla Stirling- moottorin palamisilmaputkistoon alkaa muodostua vettä, joka johdetaan pois lämmönvaihtimesta. Savukaasujen veden tiivistyminen lämmönsiirtopinnoille ei aiheuta syöpymistä rakenteissa koska palamiskaasuissa on alhainen rikinoksidien pitoisuus.

Palamiskaasujen analysointi osoitti, että kaasut eivät sisällä häkää (CO). Typenoksidien ( $\text{NO}_x$ ) määrä palamiskaasuissa oli noin 20 ppm jäännöshapen ollessa palamiskaasuissa 5,6 til-%. Palamiskaasujen sisältämien päästöjen määrä on niin pieni, että muilla polttotekniikoilla ei ole mahdollista päästä päästöjen suuruuden osalta yhtä puhtaisiin palamiskaasuihin ilman savukaasujen puhdistusmenetelmien käyttöä (taulukko 16 ja palamiskaasuanalyysi liite 4).

TAULUKKO 16. Palamiskaasujen pitoisuudet

$\text{H}_2\text{O}$	9,1 til%
$\text{CO}_2$	9,0 til%
CO	0,0 ppm
$\text{N}_2\text{O}$	4,0 ppm
NO	23,2 ppm

(jatkuu)

TAULUKKO 16. jatkuu

NO <sub>2</sub>	0,7 ppm
SO <sub>2</sub>	7,6 ppm

Hiukkaspäästöjen näytteet on otettu nokipumpulla normin ASTM: D2156-80, DIN 51402 mukaisesti.



KUVIO 31. Nokipumppu

Näyte 1. Palamiskaasu täysi teho. 2. Palamiskaasu pieni teho. 3. Tuotekaasu ennen pesuria. 4. Tuotekaasu pesurin jälkeen.



KUVIO 32. Näyteliuska ja vertailuasteikko

## 9.4 Yleinen toiminta

Sähköverkossa tapahtuvan sähkökatkon sattuessa Stirling- moottori ryntää yli- kierroksille. Kierrokset nousevat koska teho pysyy samana ja vääntömomentti laskee, silloin kierrosten täytyy nousta seuraavan kaavan mukaisesti:

$$P = 2\pi * n * t$$

Kaavassa P on teho (W), n on pyörimisnopeus (r/min) ja t on vääntömomentti (Nm). (Muilu 2010.)

Lyhyessä katkossa laitteisto pyrkii kytkemään laitteen ryntäyskierroksilta verkkoon. Suuren taajuuseron vuoksi laitteisto ei voi tahdistua verkkoon ja laite pysähtyy. Pitkässä sähkökatkossa moottori ryntää, jonka jälkeen lämmönvaihdkruunun jäähtyttyä laitteisto pysähtyy. Molemmissa tapauksissa laite käynnistetään katkon jälkeen normaalisti käsin.



## 10 YHTEENVETO

Biomassan kaasutus ja Stirling- moottorin käyttö puukaasulla antaa mahdollisuuden pienillä lämpöhäviöillä ja hyvällä hyötysuhteella tapahtuvaan toimintavarmaan paikalliseen CHP- käyttöön.

Polttimessa tapahtuva palaminen ei aiheuta puukaasulla hyötysuhdetta alentavaa lämmönsiirtopintojen merkittävää pilaantumista eikä aiheuta ylimääräistä puhdistustarvetta. Kokeissa potinlaitteiston sytytys-, säätö- ja liekinvalvontalaitteiston toiminnot olivat moitteettomia. Stirling- moottorin oma automatiikka oli helppokäyttöinen ja toimi moitteettomasti koko kokeen ajan. Automatiikan ansiosta Stirling- moottorille ei tarvinnut tehdä mitään säätötoimenpiteitä käytön aikana. Koko kokeen ajan Stirling- laitteisto oli käytöltään toimintavarma ja häiriötön. Ulkoisen verkossa tapahtuvan sähkökatkon jälkeen häiriö oli kuitattava ja käynnistettävä laitteisto manuaalisesti uudelleen. Laitteistokokonaisuus on automatisoitavissa toimimaan ilman jatkuvaa valvontaa.

Kaasuttamalla tuotetun tuotekaasun polttoon käytössä oleva poltin tuli modifioida maakaasupolttimesta. Ongelmana on tuotekaasun pieni lämpöarvo ja pieni palamisilman tarve. Kaasupoltin tuli valita riittävän kookkaaksi että paineentasa- us – ja suljinventtiili kykenevät läpäisemään riittävän kaasuvirtauksen tai paineentasa- us venttiiliä on muunneltava. Liekin irtautumista polttimesta ei tapahdu, joh- tuen vedyn nopeasta palamisesta, vaikka kaasun virtausnopeus on suuri. Pala- misilman tarve on puukaasulla pieni. Palamisilmapuhallin on saatava toimimaan heikommalla palamisilman virtauksella ja säädettävä palamistehon mukaiseksi.

Polttimen etäisyys tulisi pystyä säätämään oikealle kohdalle lämmönsiirtopintaan nähden, jotta lämmön siirtyminen työkaasuun olisi optimaalista. Puukaasulla polttimen liekin valvonta ja säätö on toteutettavissa Stirling- yksikön automatiikan



toimesta, kuten se on toteutettu laitteistoon suunnitellulla alkuperäisellä maakaasupolttimella.

Stirling- moottorin hyötysuhde poltintehosta laskettuna oli 77...96%. Hyötysuhde oli suurin pienimmällä poltinteholla. Stirling- moottorin sähköntuotannon hyötysuhde oli 11...28 % poltintehosta laskettuna. Sähkön osuus kokonaistuotannosta oli polttimen pienimmällä teholla suurin, 28 %. Laitteistokokonaisuuden kokonaishyötysuhde oli 52...75% polttoaineen tehollisesta lämpöarvosta laskettuna. Kokonaishyötysuhde polttoaineen tehollisesta lämpöarvosta saapumiskosteudessa laskettuna oli 71...102%.

Stirling- moottorin todellista suurinta mahdollista sähköntuotantotehoa ei voida saavuttaa poltintehoa lisäämällä, mikäli moottorin jäähdytysveden lämpötila ei ole riittävän alhainen. Poltintehon kohottaminen puukaasulla pienentää sähköntuotannon hyötysuhdetta, eli lämpö "karkaa" kruunun ohi. Paras kokonais- ja sähköntuotantohyötysuhde saavutetaan pienillä poltintehoilla rasittamatta Stirling-laitteistoa. Hyvänä puolena voidaan pitää Stirling- yksikön ominaisuutta, että sähkö saadaan laajalla kokonaistehoalueella niin sanotusti kivuttomasti lisätuotteena lämmöntuotannon ohella.

Kyseinen CHP laitteistoratkaisu ei ole sinällään valmis laitteistoratkaisu vaan tarvitsee lisätutkimusta ja tuotekehitystä erityisesti polttimen osalta. Erityisesti tarvittaisiin polttinratkaisu, joka on suunniteltu pienlämpöarvoisen puukaasun polttoon. Puukaasupoltin tulisi suunnitella moottorin valmistajan toimesta kyseisen moottorin lämmönsiirtopintaa ja rakennetta varten.

## 11 LÄHTEET

### Kirjat

File'n, H & Janatuinen, M & Salo, K. 1984. Kotimaisten polttoaineiden kaasutus. Osa 1. Vastavirtakaasutus. Espoo: VTT Offsetpaino.

Huhtinen, M & Kettunen, A & Nurminen, P & Pakkanen, H. 1994. Höyrykattilatekniikka. 5., uusittu painos. ISBN 951-37-3360-2. Helsinki: Oy Edita Ab.

Janatuinen, M & Asplund, D. 1981. Kotimaisten polttoaineiden kiinteäkerroskaasutus. Kaasun ominaisuudet ja käyttö dieselmootoreissa. Espoo: VTT Offsetpaino.

Köhler Stuart. 2007. Puukaasun aika. Tallinna: Alfamer Oy.

Leppälahti, J & Kurkela, E & Salo, K. 1984. Kotimaisten polttoaineiden kaasutus Osa 2. Kaasukäyttöinen lämpökeskus. Espoo: VTT Offsetpaino.

Leppälahti, J & Kurkela, E. 1985. Kotimaisten polttoaineiden kaasutus. Osa 4. Pienlämpöarvoisen kaasun poltettavuus. Espoo: VTT Offsetpaino.

Nylund, N- O. & Kurkela, E. 1986. Kotimaisten polttoaineiden kaasutus. Osa 5. Pienlämpöarvoisen kaasun käyttö paikallismootoreissa. Espoo: VTT Offsetpaino.

Raikko, R & Saastamoinen, J & Huppa, M & Kurki- Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

## Sähköiset julkaisut

Cleanergyindustries. Stirling v 161 Combined Heat and Power Unit.

[http://www.cleanergyindustries.com/produktbeskrivningar/Cleanergy\\_Combined\\_Heat\\_and\\_Power\\_Unit.pdf](http://www.cleanergyindustries.com/produktbeskrivningar/Cleanergy_Combined_Heat_and_Power_Unit.pdf) Luettu 26.4.2011

Gaia. Loppuraportti 2002. Hajautettu energiantuotanto Vartiainen E & Luoma P & Hiltunen J & Vanhanen J.

[http://www.gaia.fi/files/106/Hajautettu\\_energiantuotanto\\_loppuraportti.pdf](http://www.gaia.fi/files/106/Hajautettu_energiantuotanto_loppuraportti.pdf)

Luettu 26.4.2011

Google kuvahaku. Free piston Stirling- engine.

[http://www.google.fi/imgres?imgurl=http://www.photology.fr/stirling/strlinear/infi-  
nia\\_linear.gif&imgrefurl=http://www.photology.fr/stirling/stirlinglinear.html&h=307&w=569&sz=489&tbnid=mM7q125UaWt0JM:&tbnh=72&tbnw=134&prev=/search%3Fq%3Dfree%2Bpiston%2Bstirling%26tbm%3Disch%26tbo%3Du&zoom=1&q=free+piston+stirling&hl=fi&usq=\\_vguyCoRvYs4Xj4\\_NW97z1QbhLI=&sa=X&ei=df6-Tc6zEM-USwaX9KT3BQ&ved=0CCYQ9QEwAw](http://www.google.fi/imgres?imgurl=http://www.photology.fr/stirling/strlinear/infi-<br/>nia_linear.gif&imgrefurl=http://www.photology.fr/stirling/stirlinglinear.html&h=307&w=569&sz=489&tbnid=mM7q125UaWt0JM:&tbnh=72&tbnw=134&prev=/search%3Fq%3Dfree%2Bpiston%2Bstirling%26tbm%3Disch%26tbo%3Du&zoom=1&q=free+piston+stirling&hl=fi&usq=_vguyCoRvYs4Xj4_NW97z1QbhLI=&sa=X&ei=df6-Tc6zEM-USwaX9KT3BQ&ved=0CCYQ9QEwAw) Luettu 26.4.2011

Kokkola yliopistokeskus Cydenius. Projekti- info. Info no. 25. Hakkeen kulutus poltinkäytössä. Yrjö Muilu.

[https://ciweb.chydenius.fi/project\\_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20HighBio%20F25.pdf](https://ciweb.chydenius.fi/project_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20HighBio%20F25.pdf) Luettu 20.04.2011

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Diplomityö. Pienen mittakaavan CHP- laitokset osana hiilineutraalia maaseutuyhteiskuntaa. Sinkko Taija.

<http://www.doria.fi/handle/10024/44579> Luettu 10.03.2011

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Tutkimushanke 2008. Selvitys koelaitteiston lämmönsiirtimen suoritusarvoista ja mahdollisesta likaantumisesta. M. Paavola.

<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/42807/nbnfi-fe200811052050.pdf?sequence=4> Luettu 26.4.2011

Motiva. Yhdistetty sähkön ja lämmöntuotanto.

[http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/lampo-ja\\_voimalaitokset/yhdistetty\\_sahkon-ja\\_lammontuotanto](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampo-ja_voimalaitokset/yhdistetty_sahkon-ja_lammontuotanto) Luettu 28.02.2011

Pohjois- Karjalan Ammattikorkeakoulu. Julkaisut, B- sarja. B:17. Uusiutuvan liikenne- energian tiekartta. Ari Lampinen.

[http://www.ncp.fi/index.php?option=com\\_content&view=article&catid=109%3Aylaiset&id=261%3Ajulkaisut-b-sarja&Itemid=228](http://www.ncp.fi/index.php?option=com_content&view=article&catid=109%3Aylaiset&id=261%3Ajulkaisut-b-sarja&Itemid=228) Luettu 28.02.2011

Rovaniemen Ammattikorkeakoulu ja Lapin yliopisto. Esiselvitys 2008.

Esiselvitys hajautetun pienimuotoisen sähköntuotannon liiketoiminnallisista toimintaedellytyksistä lapissa. Pertti Kuisma & Janne Kurtakko

[http://www3.lappia.fi/AO/tiedostot/luontoala/bioenergiahanke/projektin\\_raportit/hajautettu\\_sahkontuotanto.pdf](http://www3.lappia.fi/AO/tiedostot/luontoala/bioenergiahanke/projektin_raportit/hajautettu_sahkontuotanto.pdf) Luettu 27.03.2011

Stirling dk. Stirling- motor.

[http://www.stirling.dk/page\\_content.php?menu\\_id=28&type=submenu](http://www.stirling.dk/page_content.php?menu_id=28&type=submenu)

Luettu 19.04.2011

Stirling- engine. Alfa type Stirling- engine, beta type Stirling engine.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine) Luettu 26.4.2011

Stirling energy.se. Gamma type Stirling- engine.

<http://www.exergy.se/goran/hig/re/07/stirling.pdf>. Luettu 26.4.2011

STM Power. inc. Stirling- motor.

<http://www.airmaticcompressor.com/STM%20Power%20New%20Brochure.pdf>

<http://www.stirlingbiopower.com/STIRLING/BASSE.swf> Luettu 18.4.2011

Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö 2009. Mikro tuotannon liittäminen sähköverkkoon. Iina Lehto

[http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/liitteet%20opinn%c3%a4ytteet/mikrotuotannon%20liitt%c3%a4minen%20verkkoon\\_diplomity%c3%b6%202009\\_tkk\\_lehto.df.pdf?SectionUri=%2ffi%2fjulkaisut](http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/liitteet%20opinn%c3%a4ytteet/mikrotuotannon%20liitt%c3%a4minen%20verkkoon_diplomity%c3%b6%202009_tkk_lehto.df.pdf?SectionUri=%2ffi%2fjulkaisut) Luettu 15.04.2011

Valtion tekninen tutkimuskeskus. VTT tiedotteita 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Eija Alakangas

<http://www.motiva.fi/files/685/t2045.pdf> Luettu 27.03.2011

## **Oppimateriaali**

Kari Pieniniemi. Poltto ja palaminen. 2009. Luentomateriaali. Luettu 20.05.2011

Leena Korpinen. Sähkökoneet osa 1. oppimateriaali pdf.

[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)

Luettu 20.4.2011

Yrjö Muilu. Puukaasutekniikkaa. 2010. Oppimateriaali pdf. Luettu 10.3.2011

Yrjö Muilu. Schmidt theory for Stirling engines. 2011. Oppimateriaali pdf. Luettu 12.5.2011

## 12 LIITTEET

### Liite 1. Puukaasu analysi sivu 1.

Kaasuanalyysi Agilent 490 Micro GC

11.5.2011

Stirling- moottorin tuotekaasu sekapuuhakeesta

	Hiilimonoksidi	Vety	Metaani
Analyysi 1	12,8	13,44	1,29
Analyysi 2	12,86	13,88	1,13
Analyysi 3	10,08	14,34	1,41
Analyysi 4	10,1	14,69	1,41
Analyysi 5	10,1	14,65	1,41
Keskiarvo	11,188	14,2	1,33

Tehollinen lämpöarvo lasketaan kaavalla

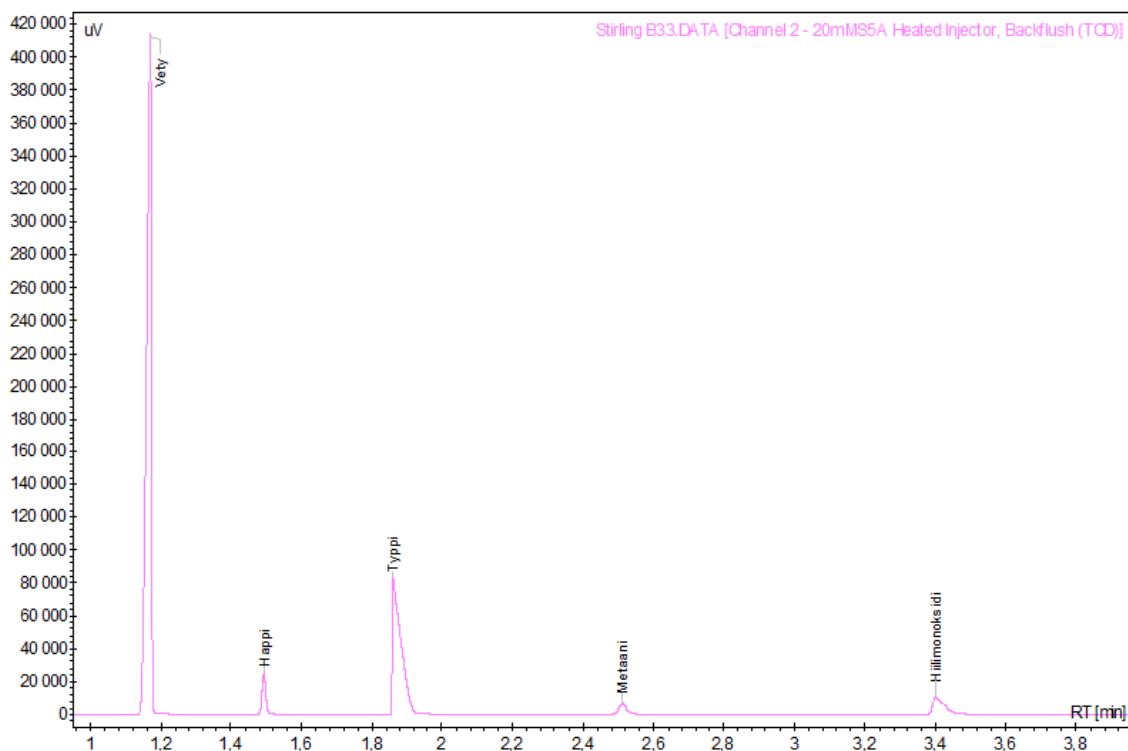
$$H_u = X_{CO} * 12,62 + X_{H_2} * 10,78 + X_{CH_4} * 35,88 \left[ \frac{MJ}{m_n^3} \right] \quad (\text{Muilu 2011.})$$

### MITATUSTA ARVOISTA LASKETTU LÄMPÖARVO

Hiilimonoksidi	11,19 %
vety	14,20 %
metaani	1,33 %

Tuotekaasun lämpöarvo  $3,42 \frac{MJ}{m_n^3}$

Liite 1. Puukaasu analysi sivu 2.



Analyysi 5. Agilent 490 Micro GC 11.5.2011

Name	Time [Min]	Quantity [%]	Height [uV]	Area [uV.Min]	Area % [%]
1Vety	1,17	14,65	414660,9	6739,8	67,097
2Happi	1,49	6,33	24450,8	322,7	3,212
3Typpi	1,86	58,04	82633,6	2414,8	24,040
4Metaani	2,51	1,41	6038,3	167,1	1,664
5Hiilimonoksidi	3,40	10,10	10110,3	400,5	3,987
Total		90,53	537893,9	10044,9	100,000

## Liite 2. Polttoaineanalyysi

### ANALYYSIRAPORTTI

Tilaja: Centria  
Merkki: Snellman  
Näytteet: 1: koivu -oksa  
2: Stirling –sekapuu  
Saapumispvm. 6.05.2011  
Analysointipvm. 9.05.2011

### TULOKSET

	1:	2:
Kosteus saapussa, %	15.16	23.82
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, %	0.93	0.51
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	20.57	20.33
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	19.17	18.93
Tehollinen lämpöarvo saapumiskosteudessa, MJ/kg	15.90	13.84

Reetta Kolppanen  
laboratoriomestari





### LIITE 3. Hyötysuhde. Mittauspöytäkirja yhteenveto

Mittaustulokset ovat neljän mittausarvon keskiarvoja.

Mitattava suure	Koeajo 2	Koeajo 4	Koeajo 3	Koeajo 5	Koeajo 1
<b>SÄHKÖTEHO</b>					
Jännite V	403.75	404.75	405.25	403.25	404.75
Virta A	8.74	9.12	9.20	9.48	10.63
<b>LÄMPÖTEHO</b>					
Palamiskaasut					
t1 °C					
t2 °C					
lämpötila ero. °C					
Massavirta l/h					
Teho kW	14.95	27.80	32.55	38.83	44.46
<b>LÄMPÖTEHO</b>					
Kaasun pesuri					
t1 °C	6.13	4.05	4.23	1.23	4.48
t2 °C	29.50	21.88	22.85	15.98	28.55
Pesuvesi °C	34.95	28.93	28.03	23.50	34.85
Massavirta l/min	5.00	5.20	5.20	6.00	5.60
<b>POLTTOAINE</b>					
aloituskorkeus cm					
lopetuskorkeus cm					
Lisätty kg					
<b>TUOTEKAASU</b>					
kulutus nm <sup>3</sup> /h	17.13	28.50	43.25	56.00	71.38
virtausnopeus m/s	4.98	9.66	11.80	14.45	16.05
putken halkaisija					
kaasun lämpötila °C	21.55	18.15	19.08	13.75	26.13
Taajuus Hz	15.00	20.25	22.00	25.13	26.00
kaasun paine mbar	5.75	7.13	11.00	20.13	23.68
polttimen jälkeen					
Ilma	0.00	1.50	3.50	4.50	6.00
Helium paine bar	22.25	33.00	32.50	48.00	60.00
<b>Palamiskaasut</b>					
Palokaasut °C	48.00	63.00	78.75	89.50	108.25
Palokaasut m/s	1,1		3.25		
Putken halkaisija	10.00		10.00		10.00

LIITE 4. Stirling- moottorin palamiskaasuanalyysi Gasmät

STIRLING MOOTTORIN PÄÄSTÖMITTAUS

