

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Puutekniikan koulutusohjelma

Miia Kiianmies

SAHAN SIVUTUOTTEIDEN JALOSTUSARVON LISÄÄMINEN KUIVAAMAL-  
LA

Opinnäytetyö 2014

# TIIVISTELMÄ

## KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

### Puutekniikka

KIIANMIES, MIIA

Insinööri

Työn ohjaajat

Toimeksiantajat

Huhtikuu 2014

Avainsanat

Sahan sivutuotteiden jalostusarvon lisääminen kuivaamalla

59 sivua

lehtori Jyri Mulari

Pölkky Oy

energiälaskelma, energiamittaus, polttoarvomittaus,  
kosteusmittaus

Työn tarkoituksena on tutkia Pölkky Oy:n toimeksiantona Taivalkosken Voima Oy:n biolämpölaitokseen tulevan puupolttoaineen, purun, kuoren, esikäsittelemättömän ja murskaamattoman puun jalostusarvon lisäämistä kuivaamalla puupolttoainetta ennen polttoon tuleamista.

Biolämpölaitos saa Ulea Oy:n sahalta tarvittavan puupolttoaineen, jota syntyy sahan prosessin eri vaiheissa. Polttoainejakeiden suhde on tätä nykyä kuorta 35 %, purua 55 % ja muuta energiapuuta 10 %. Laitos on sijoittunut sahan läheisyyteen, lämpölaitoksen viereen, polttoainelähteiden välittömään läheisyyteen. Puupolttoaineen yleinen kosteus on ollut liian korkea, eikä siitä ole saatu toivottua lämpötehoa irti.

Työn tavoitteena on selvittää energiatalous ja käytännön toteutusmalli Ulea Oy:n sivutuotteiden kuivaamiseksi Taivalkosken Voima Oy:llä. Keskeiset menetelmät tavoitteen saavuttamiseksi ovat energiälaskelmat, energiamittaukset, polttoarvomittaukset ja kosteusmittaukset.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Wood Technology

KIIANMIES, MIIA

Increasing of saw by-products value by drying

Bachelor thesis

59 pages

Supervisor

Jyri Mulari

Commissioned by

Pölkky Oy

April 2014

Keywords

energy calculations, energy measurements, fuel value,  
humidity measurement

The bachelor thesis was intended to explore the Pölkky Oy's Taivalkosken Voima Oy's bio-thermal facility of arriving energy wood, sawdust, and bark, untreated and non-crushed timber to increase the value of timber processing by drying the wood before burning.

Biomass heating plant will receive the necessary fuel from Ulea Oy's saw. Fuel is generated by sawmill at the various stages of the process. At present, the ratio of fuel fractions is currently 35 % bark, sawdust 55 % and other energy wood 10%. The plant is located in close proximity to sawmill, next to the thermal plant and in the immediate vicinity of the fuel sources. Fuel moisture in general has been too high, which has prevented the desired thermal performance coming out of it.

The aim of the research was to determine the energy economy and the practical implementation of the model for the drying of the by-products of Ulea Oy at Taivalkoski Voima Oy. The main methods to achieve this objective were the energy calculations, energy measurements and the value of the fuel in the energy measurements and fuel humidity measurements.

In this bachelor thesis I consider different drying methods and their operating principles for the sawmill by-products, in the order to mainly bark, wood chips and sawdust to get the highest heat of combustion. Results and the literature study were supported by each other, such as the results can already be directly read. Biofuel mixture drying with different drying methods makes the drying really profitable.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SYMBOLIT	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tausta	8
1.2 Työn tavoitteet ja menetelmät	8
1.3 Työn toteutus	9
2 YRITYSESITTELY	9
2.1 Pölkky Oy	9
2.2 Ulea Oy	9
2.3 Taivalkosken Voima Oy	10
3 SAHAN SIVUTUOTTEET	10
3.1 Sahan sivutuotteiden hyötyprosessi	11
3.2 Käytössä olevat puupolttoaineet	13
3.1.1 Puru	13
3.1.2 Kuori	14
3.1.3 Muu energiapuu	14
4 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET POLTON SUHTEEN	15
4.1 Polttoaineiden massavirrat	19
4.2 Polttoaineiden pölypäästöt	20
4.3 Polttoainesekoituksen energiamäärän laskenta	21
5 TAIVALKOSKELLA KAUKOLÄMMÖSSÄ KÄYTETTÄVÄ POLTTOKATTILA	22
5.1 Polttoaineen syöttölaitteet	24

5.2 Polttoarina	24
5.3 Kuumavesikattila	25
5.4 Luvo eli ilman esilämmitin	25
5.5 Savukaasulaitteet	26
<b>6 KUIVAAMISEN TEORIAA</b>	<b>26</b>
6.1 Sahatavaran kosteus ja sen mittaaminen	26
6.1.1 Puun kuivuminen	27
6.1.2 Puun tasapainokosteus	29
6.2 Puun kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä	30
6.2.1 Veden haihtuminen	30
6.2.2 Veden siirtyminen puun sisäosasta puun pinnalle	31
6.2.3 Ilman lämpötila	31
6.2.4 Kuivausvoima ja kuivumisnopeus	32
6.2.5 Ilman nopeus	32
6.2.6 Puun kosteus	32
6.2.7 Kuivaukseen vaikuttavat mitat	33
<b>7 KUIVAUSMENETELMÄT</b>	<b>34</b>
7.1 Rumpukuivuri	37
7.2 Hihnakuivuri	38
7.3 Virtauskuivuri	39
7.4 Kerroskuivaus	40
7.4.1 Petikerroskuivaus	41
7.4.2 Siilokuivaus	42
7.4.3 Aumakuivaus	43
7.4.4 Kenttäkuivaus	44
7.5 Kuivurin valinta	45
<b>8 ENERGIATASELASKELMA JA PROSESSIN KEHITTÄMINEN</b>	<b>47</b>
<b>9 TULOKSET JA POLTTOAINEEN KUIVAUKSEN ENERGIATASETARKASTELU</b>	<b>53</b>

10 JOHTOPÄÄTÖKSET	56
LÄHTEET	58

## SYMBOLIT

$Q_{net}$	Tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
$Q_{gr}$	Kalorimetrinen lämpöarvo	[MJ/kg]
$M$	Kuiva-aineen palaessa syntymä vesi	[%]
$M_{ar}$	Polttoaineen kokonaiskosteus saapumistilassa	[%]
$E_{ar}$	Polttoaineen energiatiheys	[MWh/irto-m <sup>3</sup> ]
$D_{ar}$	Irtotiheys (tilavuuspaino)	[kg/irto-m <sup>3</sup> ]
$m$	Massa	[tonni]
$M_{ad}$	Näytteen (ilmakuivan) analyysikosteus	[%]
$r$	Veden ominaishöyrystymislämpö	[KJ/kg]
$Q_m$	Polttoaineen massavirta	[W]
$C_p$	Ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
$T$	Lämpötila	[°C]

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Osana puutekniikan insinöörin koulutusta on työharjoittelujakso, joka tulee suorittaa oman alan tuotanto- tai kehityspuolella. Sain työsopimuksen tehtyä Pölkky Oy:n kanssa. 13.5.2013 suuntasin auton kohti Kuusamo, jossa yksi osa laajaa Pölkky-konsernia sijaitsee. 15.5 aloitin työt Pölkky Oy:n uudella liimapalkkitehtaan linjastolla. Tehtäviini kuului työskennellä liimapalkkilinjalla Minda Industrieanlagenilla eli nykyaikaisilla tuotantolinjoilla, jotka tulevat Saksasta. Minda on laaja kokonaisuus, sillä se sisältää kaksi erilaista höylälinjaa, pikkuhöylän ja ison höylän, liimalinjan, puristimen, sahan, käärimen ja latimen.

Työn ohessa sain ajatuksen kysyä Pölkky Oy:ltä tarjota minulle opinnäytetyön aiheita. Tuotantopäällikkö Arto Airisniemelle juteltuani hän sanoi vievänsä asiaa eteenpäin ja palaavansa asiaan, kun saa lisäinformaatiota mahdollisesta opinnäytetyön aiheesta. Koska suuntautumisvaihtoehtonani on bioenergia, Pölkky Oy:n edustajien mielestä oli hyvä ajatus tehdä matka Taivalkoskelle, jossa sijaitsee Ulea Oy ja Taivalkosken Voima Oy. He ehdottivat minulle opinnäytetyön aiheeksi sahan sivutuotteiden jalostusarvon lisäämistä kuivaamalla. 10.6.2013 allekirjoitin sopimuksen opinnäytetyöstäni.

## 1.2 Työn tavoitteet ja menetelmät

Opinnäytetyöni toimeksiantajan Pölkky Oy:n toivomuksen mukaisesti tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää käytännön toteutusmalli Ulea Oy:n sivutuotteiden kuivaamiseksi ja selvittää energiatalous.

Viime vuosina on teollisuuden puutähteiden energiamerkitys selvästi kasvanut. Yhteiskunnan toimenpiteiden tavoitteena on nostaa puun merkitystä uusiutuvana energialähteenä. Tämä on myös minun opinnäytetyöni tavoite.



Menetelminä tavoitteen saamiseksi käytetään energialaskelmia, energiamittauksia, polttoarvomittauksia ja kosteusmittauksia.

### 1.3 Työn toteutus

Työn alkuosassa kerron taustaa opinnäytetyölleni ja esittelen yrityksen, jolta sain opinnäytetyön aiheen (luvut 1-2). Merkittävimmät sahan sivutuotteet, joita hyödynnetään lämpövoimalaitoksessa, kaukolämmön tuotannossa sekä laitoksen nykyistä prosessi käsittelen luvussa 3. Polttoaineiden ominaisuuksia poltossa käyn läpi luvussa 4 ja laitoksen kokoonpanoa tarkemmin luvussa 5. Kuivaamisen teoriaa ja erilaisia kuivausmenetelmiä ja niihin vaikuttavia tekijöitä käsittelen luvussa 6 ja 7. Viimeisimmissä luvuissa käyn läpi energiataselaskelman (luku 8), sekä viimeisenä ovat tulokset ja niiden pohjalta tehdyt päätelmät (luku 9 ja 10).

## 2 YRITYSESITTELY

### 2.1 Pölkky Oy

Pölkky Oy:n perusti vuonna 1968 nykyisten pääomistajien Jouko ja Antti Virranniemen isä, Erkki Virranniemi. Yli neljän vuosikymmenen ajan Pölkky Oy on kehittynyt menestyväksi perheomistuksessa olevaksi puunjalostusyritykseksi.

Pölkky Oy on Pohjois-Suomen suurin yksityinen puunjalostaja. Pölkky-konsernin liikevaihto on yli 130 miljoonaa euroa vuodessa. Ja konsernin palveluksessa työskentelee noin 230 alan ammattilaista. Vuosittainen sahatavaratuotanto on 620 000 m<sup>3</sup>, josta jatkojalostetaan noin 40 prosenttia. Kuusamossa sijaitsevan päätoimipaikan lisäksi Pölkky Oy:llä on tuotantolaitokset Taivalkoskella, Oulussa, Pohjois-Kuusamon Kitkalla sekä Kajaanissa. (1.)

### 2.2 Ulea Oy

Ulea Oy on Pölkky Oy:n omistama tytäryhtiö Taivalkoskella. Taivalkosken saha on erikoistunut pieniläpimittaisten tukkien sahaukseen. Nykyaikaisella sahaustek-

niikalla tukit voidaan optimoida ja saavuttaa näin paras mahdollinen saanto. Tämä on merkittävä etu pientukkien sahausken kannattavuudessa. Linjalla voidaan sahaa tehokkaasti myös lyhempiä, minimissään 2,5 metriä pitkiä tukkeja muun muassa jatkojalostuksen tarpeisiin. Taivalkosken tuotantolaitoksen sahaustuotanto on 140 000 m<sup>3</sup>/vuosi, josta 80 % on mäntyä ja 20 % kuusta, kun taas jalostustuotanto on 15 000 m<sup>3</sup>/vuosi. (1.)

### 2.3 Taivalkosken Voima Oy

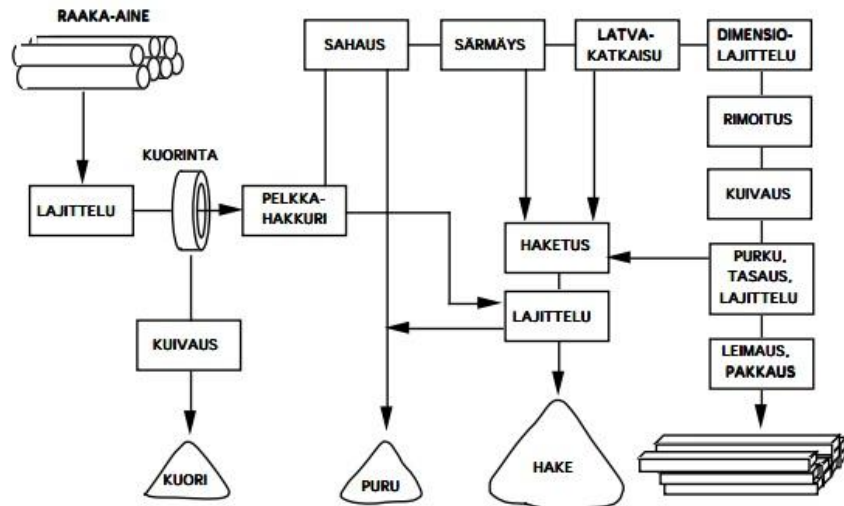
Taivalkosken Voima Oy otti vuoden 2012 joulukuussa käyttöön uuden biovoimalaitoksen, joka käyttää puupolttoainetta kaukolämmön tuotantoon. Laitoksen kokonaislämpöteho on 12 MW ja arinateho 15 MW. Lämpölaitos on liitetty kunnan kaukolämpöverkkoon ja Ulea Oy:n tehtaan aluelämpöverkkoon. (15.)

Kiinteän polttoaineen lämpölaitos käyttää polttoaineena puupolttoainetta tuoreesta sahatavarasta Ulea Oy:n sahalta sekä kuivaa puumursketta, mitä syntyy sahatavaran jatkojalostuksesta. Biolämpölaitos käyttää polttoaineena purua, kuorta ja muuta energiapuuta. Laitos käyttää myös välillä muualta ostettua metsähaketta ja turvetta. Turpeen ja metsähakkeen ostaminen on kuitenkin vähentynyt vuodesta 2008 merkittävästi, esimerkiksi vuoden 2012 vuoden lopussa on ostettu vain 111,7 MWh turvetta. (15.)

## 3 SAHAN SIVUTUOTTEET

Sahauksessa syntyy paljon sivutuotteita, jopa enemmän kuin itse päätavaraa eli sahatavaraa. Sivutuotteita ovat hake, puru ja kuori. Koska sivutuotteita syntyy sahausksessa niin paljon, onkin erityisen tärkeää kiinnittää huomiota niiden tehokkaaseen hyödyntämiseen sekä hyötykäytöstä aiheutuviin päästöihin. Kuvassa 1 on esitelty pelkistettynä sahatavaran tuotantoprosessin päävaiheet, joista syntyy sivutuotteita.

Keskimääräinen saanto sahatavaraa kuorellisesta tukista on 45–50 %, haketta 28–32 % (joka yleensä myydään sellu- ja paperitehtaille), purua 10–15 % ja kuorta 10–12 %. (2: 191–199.)



*Kuva 1. Sahatavaran tuotantoprosessin päävaiheet pelkistettynä (14.)*

### 3.1 Sahan sivutuotteiden hyötyprosessi

Ulea Oy:n sahalla syntyy puupolttoainetta tuoreesta sahatavaraista, kuivaa puumursketta syntyy kuivatun sahatavaran jatkojalostuksessa. Sahalla on tällä hetkellä polttoaine jakeiden suhde kuorta 35 %, purua 55 % ja muuta energiapuuta 10 %. Laitoksen takuupiste polttoaineen kosteudelle on 60 %. Laitos käyttää polttoainetta puru-kuorisuhteella 55 % -35 %. Uuden biovoimalaitoksen ansiosta ympäristöpäästöt ovat parantuneet oleellisesti. Taulukossa 1 esitetään tarkemmin Pölkyn eri sahojen tuotantomääriä. (15.)

Taulukko 1. Pölkyn sahojen tuotantomääriä (15.)

Laitos	Puulaji	Sahaus	KS	Tukkia 1000 m <sup>3</sup>	Haketta katon	Puraa MWh	Kuorta MWh	Kuiva- hake katon
<b>Kuusa- mo</b>	Mänty	120 420	2,10	252	25 288	85 980	53 310	1 204
	Kuusi	27 315	2,16	59	5900	20 060	12 438	273
<b>Kajaani</b>	Mänty	121 710	2,05	249	24 951	84 832	52 598	1 217
	Kuusi	50 000	2,10	105	10500	35 700	22 135	500
<b>Ulea</b>	Mänty	113 303	2,12	240	24 020	81 669	50 637	1 133
	Kuusi	36 036	2,22	80	8 000	27 200	16 865	360
<b>Kitka</b>	Mänty	127 110	2,22	282	28 218	95 943	59 487	1 271
	Kuusi	0		0	0	0	0	0
<b>Yht.</b>	Mänty	482 543	2,12	1 024	102 477	348 423	216 033	4 825
	Kuusi	113 351	2,15	244	24 400	82 960	51 438	1 134
<b>Total</b>		<b>595 894</b>	<b>2,13</b>	<b>1 268</b>	<b>126 877</b>	<b>431 383</b>	<b>267 471</b>	<b>5 959</b>

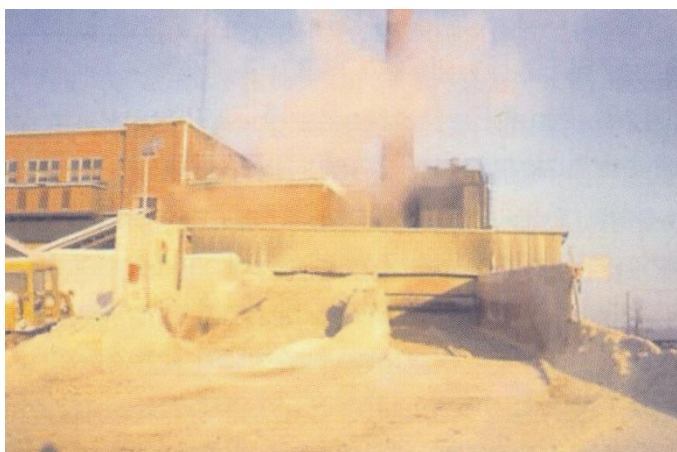
Pohjoismaisen havupuun kuorellisten tukkien sahauksessa saadaan sahatavaraa, josta on 45–50 % haketta, 28–32 % purua, 10–15 % ja kuorta 10–12 %. Raaka-aineen koko ja laatu sekä sahan kokoluokka, tuotantostrategia ja tekninen taso vaikuttavat sahan sahatavaran ja sivutuotteiden saantotuotteisiin. Käytettäessä pikkutukkeja syntyy runsaasti sivutuotteita. Mikäli sahauslaitteet ovat teknisesti kehittyneitä, saadaan raaka-aine tehokkaasti hyödynnettyä. (4: 42–43.)

Sahojen puutähteet ovat yleensä lähes tuoreita mikä alentaa niiden muuten korkeaa lämpöarvoa. Sahan sivutuotteista korkein lämpöarvo on purulla (2 360 kWh/tonni), hakkeella on aavistuksen alhaisempi lämpöarvo (2 310 kWh/tonni) ja kuorella on kaikkein alhaisin lämpöarvo (mänty 1830kWh/tonni ja kuusi 1 670 kWh/tonni). Tuoreen purun ja hakkeen kosteuden on oletettu olevan 50 % ja kuoren 60 %. (4: 42–43.)

Ennen polttoa kuori yleensä käsitellään erityisillä puristimilla ja murskataan, jotta laatu saadaan tasaiseksi ja käsittely, kuivuminen ja polttotilaan syöttö helpottuvat.

Energia-arvoltaan sahatavaran jatkojalostuksen sivutuotteista paras on höylänlastu, kun sen kosteus on 10 % (4 700 kWh/tonni). (4: 42–43.)

Kuvassa 2 on kuvattuna saha ja sen sivutuotteita.



*Kuva 2. Saha ja sen sivutuotteita (4: 43.)*

## 3.2 Käytössä olevat puupolttoaineet

### 3.1.1 Puru

Puraa syntyy sahauksessa, särmäyksessä, esitasauksessa, tasauksessa ja haketuksessa eli melkein kaikissa puun työstövaiheissa. Raekoko on ratkaisevassa asemassa purun laatuominaisuuksista, sillä teollisuus sallii vaihtelevasti alle 1 mm:n hienojaetta. Raekokoon vaikuttavat mm. käytettävä sahakone, terän paksuus, vuoden-aika ja puun kosteus. Kehäsahalta saatava puru on kooltaan suurinta, kun taas vanhesahan puru on pienintä. Kesällä syntynyt puru on raekooltaan suurempaa kuin talvella syntynyt puru, joka on hienojakoista. Myös kuivan puun puru on hienojakoisempaa kuin kostean puun. (2: 195.)

Purun kosteus on merkittävässä asemassa lämpöenergian kehittämisen kannalta. Jos märän purun joukkoon sekoitetaan kutterilastua, voidaan purun lämpöarvoa

parantaa huomattavasti. Energiantuotannossa on järkevintä käyttää tasaamosta tulevaa purua, koska puru on kuivaa ja sen lämpöarvo on korkea. (2: 195.)

### 3.1.2 Kuori

Kuori syntyy tukkeja kuorittaessa. Kuoren hinta polttoaineena riippuu sen kosteudesta, kuoren kosteus on taas riippuvainen olennaisesti tukkien kuljetus- ja varastointitavasta. Kuoren kosteus on polton kannalta tärkein tekijä ja kuoren kuiva-ainepitoisuuden on oltava vähintään 35 %, jotta polttaminen kannattaa. Jos kuoren kuiva-ainepitoisuus on alle 28 %, hyötylämpöä ei enää synny. Lämpöarvoa voidaan parantaa merkittävästi sekoittamalla sen joukkoon kuivaa kutterilastua. Kuoren määrään vaikuttaa oleellisesti tukkien kuljetus, varastointi ja käsittely, joiden aikana osa kuoresta katoaa. (2: 196.)

Kuoren käytön ongelmana on sen suuri kosteuspitoisuus. Se on noin 55–60 %. Männyn kuorimurskeen tehollinen lämpöarvo on noin 1 800 MJ/i-m<sup>3</sup>. Ennen polttoa kuori voidaan käsitellä erityisillä puristimilla kosteuden alentamiseksi. Joskus kuori voidaan myös murskata laadun tasaamiseksi sekä käsittelyn, kuivumisen ja automaattisen polttotilaan syötön helpottamiseksi. (4: 42–43.)

### 3.1.3 Muu energiapuu

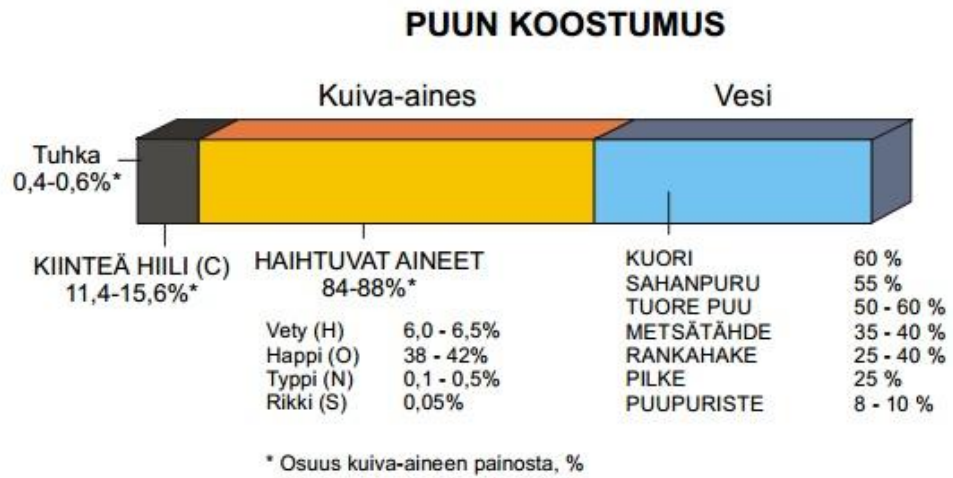
Haketta saadaan kahdessa osassa sahatavaran valmistusprosessissa. Märkää haketta saadaan puun pyörösieveennyksessä, sahauksessa ja särmäyksen yhteydessä. Kuivaa haketta taas saadaan, kun kuivauksen jälkeen vioittuneet ja rikkoutuneet kappaleet ja tasauspätkät haketetaan. Niiden kuljettaminen hakkeena on helpompaa. Hake ja muut sivutuotteet varastoidaan sahalla yleensä joko siiloissa tai maa-kasoissa. Suurin osa sahalla syntyvästä hakkeesta on märkähaketta ja vain pieni osa polttoaineena käytettävää kuivahaketta. Kuivahake sekoitetaan kuoren ja sahanpurun kanssa. Yli 90 % sahakkeesta käytetään sellu- ja paperiteollisuudessa. Sellutehtaat käyttävät sellunvalmistukseen tuorehaketta, jonka irtotiheys on keskimäärin 145–170 kg/m<sup>3</sup>. Jäljelle jäävä osuus toimitetaan yleensä kuitu- ja lastulevyteollisuuden käyttöön tai energiantuotantoon. Haketus tapahtuu yleensä jo sa-

halla, mikä mahdollistaa hakkeen helpomman kuljetuksen. Hakkeiden laatumääräykset perustuvat sen jatkokäyttökohteen asettamien vaatimusten mukaan. Vaatimuksia voivat olla esimerkiksi palakoko ja kuoripitoisuus. Hakkeessa ei saa myöskään olla epäpuhtauksia kuten muovia, hiekkaa tai kiviä. (2: 199.)

#### 4 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET POLTON SUHTEEN

Puu on pitkäliekkinen polttoaine ja vaatii suuren palotilan haihtuvien aineidensa takia (80–90 %). Puu koostuu pääasiassa hiilestä, vedystä ja hapesta, joiden osuus puun kuiva-aineesta on n. 99 %. (5.)

Puun sisältämä vety on hyvin palava aine, ja sen palamistuotteena syntyy vettä. Niinpä poltettaessa 1 kg täysin kuivaa puuta syntyy vähintään 0,54 kg vettä, olettaen että puun vetypitoisuus on 6 %. Veden höyrystämiseen tarvittava lämpöenergia otetaan puun kuiva-aineen lämpöarvosta. Tästä syystä puun *tehollinen* eli *alempi lämpöarvo* on jonkin verran pienempi. Kosteaa puuta voidaan näin ollen laskea seuraavasti;  $q_{\text{alempi}} = q_{\text{ylempi}} - 0,22 H$ , jossa  $H$  on puun vetypitoisuus prosentteina. Esimerkiksi jos  $q_{\text{ylempi}} = 20,0$  MJ/kg ka. (kuivan puun *kalorimetrinen* eli *ylempi lämpöarvo* on noin 19,0–20,5 MJ/kg ka.) ja vetypitoisuus 6 %, niin tällöin saadaan  $q_{\text{alempi}} = 20,0 - 0,22 \cdot 6 = 18,68$  MJ/kg ka. (5,19 kWh/kg ka.). Jos käytetään arvoa 20,5 MJ/kg ka., saadaan  $q_{\text{alempi}} = 19,18$  MJ/kg ka. (5,33 kWh/kg ka.). (6.)



*Kuva 3. Puun koostumus (5.)*

Polttoaineen lämpöarvo kertoo, kuinka paljon täydellisessä palamisessa kehittyvä lämpöä polttoaineen massaa kohti. Lämpöarvo ilmoitetaan kiinteillä ja nestemäisillä polttoaineilla tavallisesti megajouleina polttoainekiloa kohti, MJ/kg. (3.)

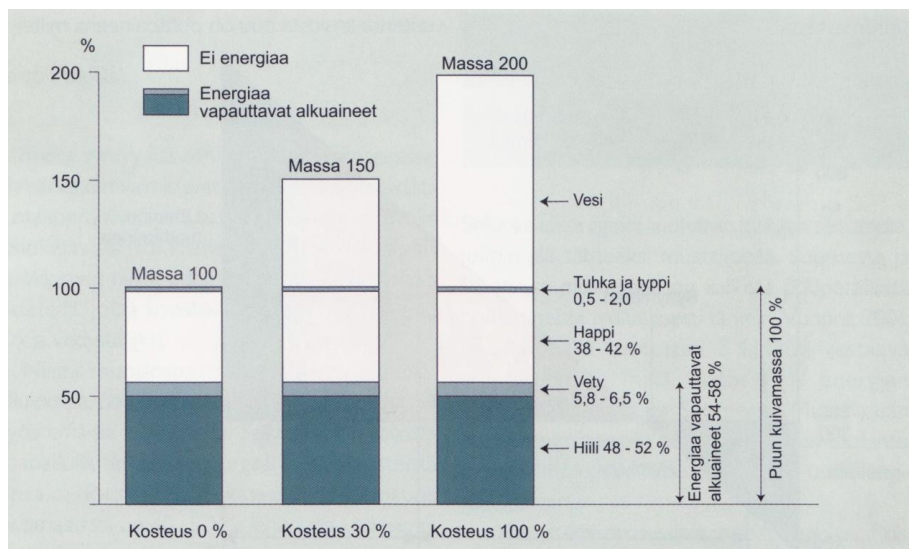
Taulukossa 2 on ilmoitettu kaukolämmön tuotannossa käytettävien polttoaineiden yleisiä lämpöarvoja.

*Taulukko 2. Polttoaineiden lämpöarvoja*

Lämpöarvo	Havupuun kuori	Hake	Sahanpuru	Kutterinlastu ja hiontapöly
<b>Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg</b>	5-9	6-15	6-10	16-18
<b>Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg</b>	18,5-20	18,5-20	19-19,2	19-19,2



Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan kuitenkin tavallisesti kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona, MJ/kg, jolloin mukaan ei lasketa savukaasujen mukana poistuvan – polttoaineen sisältämästä vedystä peräisin olevan – veden haihduttamiseen kuluva energiaa. 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 tehollinen lämpöarvo on sitä pienempi mitä enemmän polttoaine sisältää vettä. (3.)



**Kuva 4.** Palavien alkuaineiden osuus kuivassa ja tuoreessa puussa (4: 26.)

Yleisesti käytössä on myös kalorimetrinen lämpöarvo, joka määritetään ilma-kuivasta (tasapainokosteasta) analyysinäytteestä. Analyysinäyte on yleensä n. 1g, joka poltetaan nesteeseen upotetussa kalorimetripommassa happiatmosfäärissä ja vapautuva lämpö mitataan. Jotta ilma-kuivan näytteen lämpöarvo saadaan vastamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa, tulee samanaikaisesti määrittää myös analyysinäytteen kosteus. Tulokset ilmoitetaan kahden rinnakkaismäärityksen keskiarvona saatu kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo absoluuttisen kuivalle

näytteelle. Ero rinnakkaismääritysten välillä saa olla korkeintaan 0,120 MJ/kg ja ilmoitusarvomääritysten ilmoitustarkkuus on 0,01 MJ/kg. (3.)

Käytettävissä olevien polttoaineiden (polttoaineiden lämpöarvo (tehollinen kuiva)) lämpöarvo saadaan määriteltä kaavan 6 mukaisesti. Kuivien polttoaineiden koostumukset on esitetty taulukossa 4 ja polttoaineiden alkuainekoostumukset on taulukossa 3.

$$H_{u(kuiva)} = 34,8m_C + 93,8m_H + 10,5m_S + 6,3m_N - 10,8m_O \quad (6.)$$

*Taulukko 3. Puupolttoaineiden alkuainekoostumuksia (5.)*

<b>Polttoaine</b>	<b>C [%]</b>	<b>H [%]</b>	<b>S [%]</b>	<b>O [%]</b>	<b>N [%]</b>	<b>Cl [%]</b>
<b>Puu</b>	50,4	6,2	0,0	42,5	0,5	0,4
<b>Mä kuori</b>	53,3	5,8	0,03	38,7	0,4	0,0085
<b>Ku kuori</b>	50,3	5,9	0,03	40,9	0,4	0,0279
<b>Sahanpuru</b>	51	5,99	0	42,82	0,08	0,0050
<b>Hake</b>	51,8	6,1	0,01	41,19	0,3	0,0042

Esimerkiksi laskettuna puun lämpöarvo kuivana:

$$H_{u(kuiva)} = 34,8 \times 0,504 + 93,8 \times 0,062 + 10,5 \times 0,000 + 6,3 \times 0,005 - 10,8 \times 0,425 = 18,8 \left(\frac{MJ}{kg}\right)$$

*Taulukko 4. Polttoaineiden lämpöarvot (Kuiva ja kostea)*

<b>Polttoaine</b>	<b>Kosteus (%)</b>	<b>Lämpöarvo kuiva (MJ/kg)</b>	<b>Lämpöarvo kostea (MJ/kg)</b>
<b>Puu</b>	50	18,8	8,18
<b>Mänty kuori</b>	60	24,0	8,14
<b>Kuusi kuori</b>	60	23,1	7,76
<b>Sahanpuru</b>	50	23,4	10,46
<b>Hake</b>	50	23,8	10,66

Kostean polttoaineen lämpöarvon määrittäminen voidaan määrittää kaavan 7 avulla.

$$H_{u(kostea)} = H_{u(kuiva)} \times (1 - m_{H_2O}) - r_{25^\circ C} \times m_H \quad (7.)$$

r tarkoittaa veden ominaishöyrystymislämpöä 25°C lämpötilassa (2 443 KJ/kg)

Esimerkiksi laskettu männyn kuoren lämpöarvo 60 % kosteudessa:

$$H_{u(kostea)} = 24 \frac{MJ}{kg} \times (1 - 0,60) - 2,443 \frac{MJ}{kg} \times 0,60 = 8,14 MJ/kg$$

#### 4.1 Polttoaineiden massavirrat

Kattilan polttoaineiden massavirrat saadaan määritettyä kattilatehon ja polttoaineen lämpöarvon perusteella. Polttoaineiden massavirta saadaan laskettua kaavan 8 mukaisesti.

$$Q_{m,pa} = \frac{\phi}{H_{u(kostea)}} \quad (8.)$$

missä

$Q_{m,pa}$  on polttoaineen massavirta

$\phi$  on kattilan teho

$H_{u(kostea)}$  on polttoaineen lämpöarvo kosteana

Esimerkiksi puu 50 % kosteudessa:

$$Q_{m,pa} = \frac{\phi}{H_{u(kostea)}} = \frac{12MW}{8,18} = 1,5 \text{ kg/s}$$

$$tuhkapitoisuus = (1 - 0,50) \times 0,4 \% = 0,2 \%$$

Tuhkan massavirta voidaan laskea tuhkapitoisuuden mukaan.

$$q_{m,tuhka} = 0,002 \times 1,5 \frac{kg}{s} \times \frac{3600 s}{1 h} = 0,18 kg/h$$

Taulukossa 5 on esitetty tarkemmin lasketut polttoaineiden massavirrat ja niiden tuhkapitoisuudet.

*Taulukko 5. Polttoaineiden massavirrat ja tuhkapitoisuudet*

<b>Polttoaine</b>	<b>Polttoaineen massavirta (kg/s)</b>	<b>Tuhkapitoisuus polttokost. (%)</b>	<b>Tuhkan massavirta (kg/h)</b>
<b>Puu</b>	1,5	0,20	0,176
<b>Mänty Kuori</b>	1,5	0,00	0,003
<b>Kuusi Kuori</b>	1,5	0,01	0,010
<b>Sahanpuru</b>	1,1	0,00	0,002
<b>Hake</b>	1,1	0,00	0,001

#### 4.2 Polttoaineiden pölypäästöt

Polttoaineiden poltosta aiheutuu pölypäästöjä (mg/MJ), joista n. 30 % muodostuu tuhkasta, joka poistuu kattilasta pölynä.

Polttoaineen tarve 1 MJ:n energiamäärän tuottamiseen ja sen tuottaman pölyn määrä voidaan laskea esimerkin mukaisesti.

Esimerkiksi puu 50 % kosteudessa

$$polttoaineen\ tarve = \frac{q_{m,pa}}{\phi} = \frac{1,5\ kg/s}{12\ MW} = 0,125\ kg/MJ$$

Tällöin pölypäästöt voidaan laskea vaadittavalle polttoaineen määrälle oheisen kaavan mukaisesti.

$$\begin{aligned} \text{pölypäästö} &= \frac{0,002 \text{ kg}_{\text{tuhka}}}{1 \text{ kg}_{\text{pa}}} \times \frac{0,3 \text{ kg}_{\text{pölyä}}}{1 \text{ kg}_{\text{tuhka}}} \times \frac{0,125 \text{ kg}_{\text{pa}}}{1 \text{ MJ}} \times \frac{1\,000\,000 \text{ mg}_{\text{pölyä}}}{1 \text{ kg}_{\text{pölyä}}} \\ &= 75 \text{ mg}_{\text{pölyä}}/\text{MJ} \end{aligned}$$

Taulukossa 6 on lasketut polttoaineen tarpeet ja niiden pölypäästöt.

*Taulukko 6. Polttoaineen tarve ja pölypäästöt*

Polttoaine	Polttoaineen tarve [kg/MJ]	Pölypäästöt [mg/MJ]
<b>Puu</b>	0,12	75
<b>Männyn kuori</b>	0,12	1,224
<b>Kuusen kuori</b>	0,13	4,368
<b>Sahanpuru</b>	0,10	0,75
<b>Hake</b>	0,9	5,67

#### 4.3 Polttoainesekoituksen energiamäärän laskenta

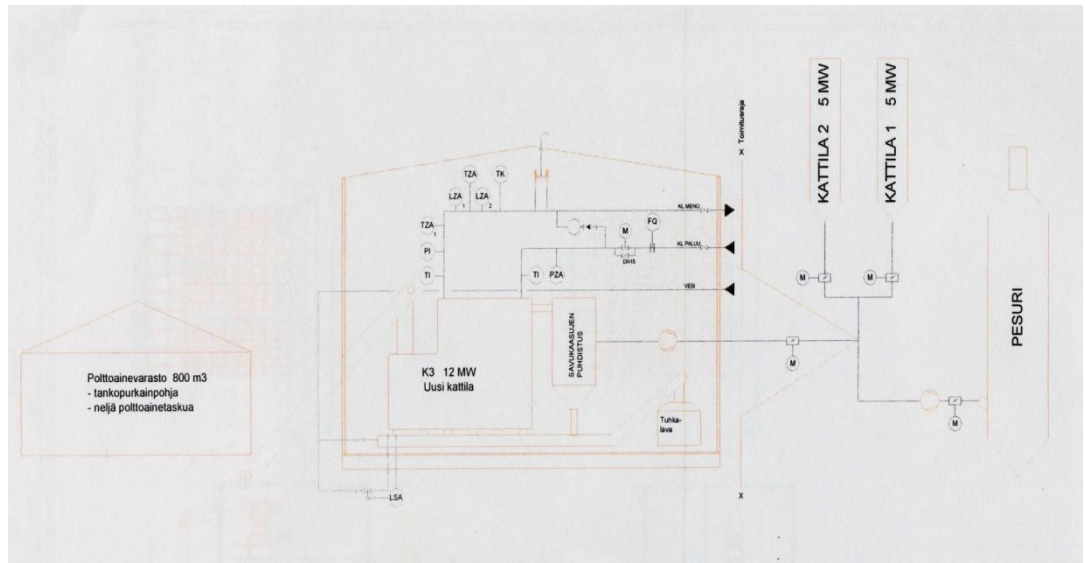
Polttoainesekoitus tehdään ennen välivarastointia, sekoittaen kutterinlastua, purua, kuorta ja haketta. Kerrokset tiivistyvät kun kuormataan lisää tavaraa päälle. Paino on laskettu keskimääräisiä irtotiheyksiä käyttäen ja sekoituksen määrä on laskettu käyttäen keskimääräistä kuormaajan kauhan kokoa, joka on n. 9m<sup>3</sup>. Sekoitus koostuu 35 til.- % kuorta (kosteus n.60 %), 55 til.- % sahanpurua (kosteus 50 %) ja 10 til.- % muuta energiapuuta (kosteus 10 %). Polttoaineen kuormauksessa välivarastoon on otettu huomioon niiden polttoainejakauma, näin ollen kuorta kuormataan 10 kauhaa, sahanpurua 15 ja muuta energiapuuta 3 kauhaa. Taulukossa 7 on esitelty sekoituksen määrät ja niiden sisältämät energiamäärät.

Taulukko 7. Sekoituksen energiamäärän laskenta

Polttoaine	Määrä, kauha koko m <sup>3</sup> x määrä m <sup>3</sup>	Määrä, m <sup>3</sup> x tiheys (kg/m <sup>3</sup> ), kg	Teh.lämpöarvo , saapumistilas- sa, MJ/kg	Energiamää- rä. MJ
<b>Kuori</b>	90	31 500	7	220 500
<b>Sahanpuru</b>	135	40 500	8	324 000
<b>Muut</b>	27	4 050	19,2	77 760
<b>Sekoitus yht.</b>	yht. 252	yht. 76 050 kesk. tiheys 285 kg/m <sup>3</sup>	ka. 11,4 kesk. kost. 42,5 %	622 260

## 5 TAIVALKOSKELLA KAUKOLÄMMÖSSÄ KÄYTETTÄVÄ POLTTOKATTILA

Taivalkosken Voima Oy hankki vuonna 2009 12 MW:n Urbas biomassakuumavesikattilalaitoksen, joka liitettiin jo olemassa olevaan lämpöverkkoon. Biolämpölaitos on liitetty kunnalliseen kaukolämpöverkkoon ja Ulea Oy:n sahan alue-lämpöverkkoon. Polttoaineena käytetään Ulea Oy:n sahalta tulevaa puupolttoainetta: purua, kuorta ja esikäsittelemätöntä ja murskaamatonta puuta, jota syntyy prosessin eri vaiheissa. Laitos on sijoitettu nykyisen sahan välittömään läheisyyteen, jotta polttoainelähteet ovat lähellä. Vanhan laitoksen keskimääräinen tehontarve oli 8,3 MW, joka vastaa tuotettua energiamäärää 69 600 MWh/vuosi. Jatkojalostusinvestoinnin jälkeen keskimääräinen tehontarve on 9,4 MW, joka vastaa taasen tuotettua energiamäärää 78 600 MWh/vuosi. Mikäli laitoksessa on pitkäaikainen häiriötilanne, käynnistetään vanhat öljykäyttöiset kattilalaitokset mutta niiden käyttö on tuolloin vain lyhytaikaista. Vuonna 2012 laitoksen tuotanto oli 79 437 MWh, josta savukaasupesurin osuus oli 9 405 MWh. Tuotetusta lämpöenergiasta myytiin Taivalkosken kunnalle 33 130 MWh ja Ulea Oy:lle 46 307 MWh ja laitoksen oma käyttö oli 888 MWh. (15.)



*Kuva 5. Laitoksen kokoonpanokuvaus (15.)*

Taulukossa 8 on ilmoitettu laitoksen päästöarvot ennen jatkojalostusinvestointia ja jatkojalostusinvestoinnin jälkeen.

*Taulukko 8. Laitoksen päästöarvoja ennen ja jälkeen jatkojalostusinvestoinnin(15.)*

	<b>Keskimääräinen kattilateho 8,3 MW, 8 400 h/a</b>	<b>Keskimääräinen kattilateho 9,4 MW, 8 400 h/a</b>
<b>Savukaasujen tilavuusvirta, kuiva savukaasu</b>	22 300 m <sup>3</sup> /h	25 300 m <sup>3</sup> /h
<b>Puhtaan kaasun pöly- pitoisuus</b>	13,28 mg /MJ 3,2 t/a	15,1 mg /MJ 3,6 t/a
<b>CO<sub>2</sub></b>	34 400 t/a 96,8 mg/MJ	38 900 t/a 109,7 mg/MJ
<b>SO<sub>2</sub></b>	-	-
<b>NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub></b>	28,9 t/a 83,7 mg/MJ	32,7 t/a 94,8 mg/MJ
<b>CO</b>	12,7 t/a	14,3 t/a

## 5.1 Polttoaineen syöttölaitteet

Polttoainelähde sijaitsee lämpölaitoksen läheisyydessä, josta polttoaine toimitetaan varastosiiloon, joka on pohjapurkaimella varustettu kolmilokeroinen laakasiilo. Laakasiilo on tilavuudeltaan n. 800 m<sup>3</sup>. Siilonpurkauspääkuljettimena toimii kolme tankopurkainsyöttöä, jotka syöttävät suorakulmaisista siiloista vuorotellen toimivien ja erikoiskauhoihin varustettujen tankopurkaimien avulla. Polttoaineen syöttölaite on mäntä, jota käytetään vahvalla hydraulisynterillä. Laite annostelee polttoainetta kattilaan polttoaineensyöttökartion avulla. Painepuolelle sijoitetut kaksi hydraulisynteriä taas käyttävät laitetta, joiden poiskytkentä tapahtuu asennetulla rajakytkimellä. Mikäli syöttökartiossa on liian korkea lämpötila, aktivoituu syöttölaitteeseen asennettu sprinkleri takapalonturvaamista varten. (15.)

Polttoaineen käsittely-, kuljetin- ja syöttölaitteet on toteutettu siten, että ne pystyvät käsittelemään tarvittaessa myös kiinteitä puunkappaleita, jotka tarvittaessa murskataan. Murskaus suoritetaan polttoaineen syöttölaitteet yhteydessä hydraulisella murskainlaitteella. Murskaimella mahdollistetaan suurienkin kappaleiden polttaminen ilman erillistä murskainlaitetta, eikä näin ollen tarvita puujätteen esikäsittelyitä. Poltosta jäävä tuhka kerätään vaihtolava-alustaiseen konttiin, jolla se lopulta kuljetetaan tuhkan loppusijoituspaikkaan. (15.)

## 5.2 Polttoarina

Laitoksen lämpöteho 12 MW. Kattilassa on käytössä hydraulinen porrasarina, joka pitää sisällään kuivatus-, poltto- ja loppupolttovyöhykkeet. Polttolaite koostuu polttoarinasta ja sen yläpuolella olevasta kaasunpoistokammioista sekä perään kytketystä tulipesästä. Tulipesän alapuolella sijaitsee puhaltimet, joilla tuodaan kullekin arinavyöhykkeelle palamiseen tarvittava primääri-ilma. Polttoarinan arinavyöhykkeiltä 1-3 kulkeutuu tuhka ja tuhkan kierrätyksen kautta takaisin tulipesään, näin mahdollistetaan polttoaineen täydellinen palaminen myös raekoon ollessa pieni. (15.)



Kattilan tulipesä koostuu teräsvaipparakenteesta, jonka sisäpuoli on tulenkestäväksi muurattu holvirakenne. Koko tulipesän arinarunko on vesijäähdytteinen. Tulipesässä on myös kaasunpoistokammio konvektio-osalle, joka on ns. tulitorvi = tuliputkikattila tai integroitu kuumavesikattilarakenne. Kaasunpoistokammion kautta syntyvät, alhaisessa lämpötilassa olevat kaasut virtaavat tulipesän liikettä vastaan. Ensimmäisessä arinavyöhykkeessä polttoaineen ja alhaisessa lämpötilassa olevien kaasujen vastakkaiset virtaussuunnat tukevat esikuivatusta. Arinan kuorma muuttuu polttoaineen vesipitoisuuden ja lämpötehon tarpeesta riippuen jäännöshappisäätelyn avulla, ja siten myös alhaisessa lämpötilassa olevan kaasun kulkemismatka kaasunpoistokammion muuttuu. (15.)

Konvektio-osan rakennepaino on 9 bar ja rakennelämpötila 150 – 180 °C. Kattilassa on myös palamisilman esilämmitys eli LUVO, joka tapahtuu savukaasuista ristivirtausperiaatteella toimivalla ilma-ilma-lämmönsiirtimellä. (15.)

### 5.3 Kuumavesikattila

Kuumavesikattilan nimellisteho on 12 MW. Kattila on pystyyn asennettu kuumavesikattila. Kuumavesikattila on liitetty biomassanpoltoon, ja sen suurin korkein sallittu käyttölämpötila on 140 °C. Kattilan ensimmäinen veto muodostetaan tulitorvella. Tuhka poistetaan automaattisesti molemmista alemmista savuputkivetojen kääntökammioista. Kuumavesikattila pitää sisällään myös automaattisen savukaasuohituspellin savuputken ohitukseen osakuormalla, joka riippuu lämmönvaihtimesta tulevan savukaasun ulostulolämpötilasta. Kattilaan on integroitu putkierukka (hätäjäähdytin) jonka termien teho on 1 500 kW. (15.)

### 5.4 Luvo eli ilman esilämmitin

Kun polttoaine on äärimmäisen kostea, ilman esilämmitys parantaa esikuivatusta ja tulipesän lämpötilan nousua. Syöttöveden esilämmittimeen on liitetty pystymallinen kaksivetoinen savuputkilämmönvaihdin. Luvossa virtaava ilma virtaa ristivirtauksena kahdessa vedossa. Luvon jälkeen ulostulolämpötila savukaasulla on

160 °C. Silloin kun polttoaine on kuivaa, käytössä on säädelty raitisilmaläppä.  
(15.)

## 5.5 Savukaasulaitteet

Savukaasun puhdistuslaitteet täyttävät ympäristölupaan vaadittavat päästövaatimukset. Sisältää BAT-periaatteen mukaan arvioinnin parhaan käytettävissä olevan tekniikan vaatimusten täyttämistä. Savukaasun puhdistuksessa käytetään multisyklonia savukaasun esipölynpoistoon. Multisyklonin jälkeen tuleva savukaasu puhdistetaan lopullisesti sähkösuotimella, jonka jälkeen sen johdetaan savukaasupesuriin. Sähkösuotimen jälkeen ulostulevan kaasun pölypitoisuus on n.  $20\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$ . (15.)

## 6 KUIVAAMISEN TEORIAA

Sahatavaran kuivaamisella tarkoitetaan puun kosteustilan alentamista haluttuun, käyttötarkoituksen mukaiseen kosteuteen. Kuivaamalla sahatavara säilyy paremmin ja sen käytettävyys ja ominaisuudet paranevat. Alle 20 % kosteudessa olevassa puussa ei kasva mm. sinistäjiä eikä homesieniä, joten säilyvyys on parempi. Kosteus vaikuttaa merkittävästi puun lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin, sekä työstettävyyteen, liimattavuuteen, kyllästettävyyteen, pintakäsittelyominaisuuksiin ja sähkönjohtokykyyn. (2: 113.)

### 6.1 Sahatavaran kosteus ja sen mittaaminen

Sahatavaran kosteus ilmaistaan kosteussuhteena ja määritellään seuraavasti:

$$\text{Puun kosteussuhde} = \frac{\text{puussa olevan veden massa}}{\text{puun kuiva - aineen massa}} \times 100$$

Puun kosteutta voidaan mitata esimerkiksi punnitus-kuivausmenetelmällä tai kosteusmittarilla. Punnitus-kuivausmenetelmää käytettäessä puusta otetaan näytepala, joka punnitaan. Sen jälkeen näyte kuivataan absoluuttisen kuivaksi ja punnitaan uudelleen. (2: 113.)

Sahatavaran kosteussuhde lasketaan seuraavasti:

$$\text{Puun kosteussuhde} = \frac{\text{alkupaino} - \text{kuivapaino}}{\text{kuivapaino}} \times 100$$

Menetelmä on hidas mutta tarkka, ja sillä voidaan määrittää kosteus puun kaikissa kosteustiloissa. Yleisin kosteusmittari on vastusmittari, joka perustuu puun sähköisten ominaisuuksien ja kosteuden väliseen riippuvuuteen. Mittareita käytettäessä tiettyä sähkövastusta vastaa tietty puun kosteus. Tämä riippuvuus pätee kuitenkin vain puun kosteuden ollessa 7–28 %. (2: 113–114.)

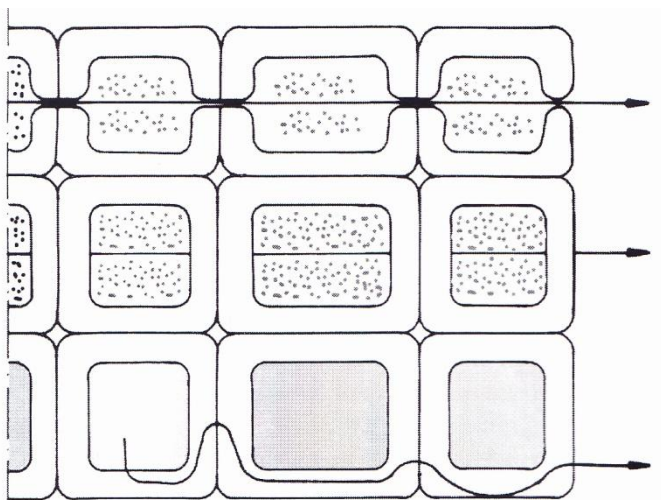
Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että sahatavaran kosteutta ja kosteussuhdetta ei määritetä samalla tavalla kuin biopolttoaineen (hake, kuori, muu energiapuu) kosteutta, eikä se ole verrannollinen siihen. Sahatavaran kosteussuhteen määrittämisessä käytetään kuivapainoa, kun taas biopolttoaineen kosteuden määrittämisessä käytetään sen märkäpainoa.

### 6.1.1 Puun kuivuminen

Puussa esiintyy vettä solujen soluonteloissa vapaana vetenä ja soluseinämiin sitoutuneena sidottuna vetenä. (2: 114–115.)

Kun puu kuivuu, siitä poistuu aluksi vapaa vesi. Vapaa vesi liikkuu nopeasti solusta toiseen kapillaarivoimien vaikutuksesta. Puun kosteustilaa (yleensä n. 28–32 %), jossa kaikki vapaa vesi on poistunut puusoluista mutta soluseinämiin on edelleen sitoutuneena maksimimäärä vettä, kutsutaan puun syiden kyllästymispisteeksi (PSK). Kun lämpötilaa nostetaan, niin PSK alenee. Pääasiallisesti sidottu vesi liikkuu PSK:n alapuolella diffuusion vaikutuksesta (kuva 6). Diffuusio tarkoittaa

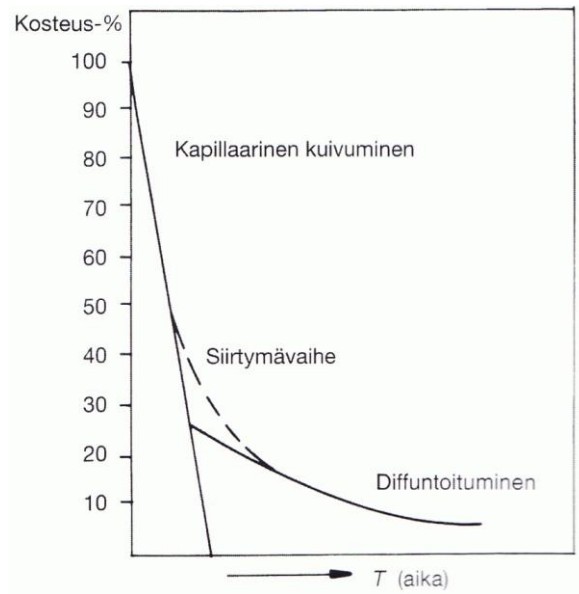
molekyylien lämpöliikkeestä johtuvaa, toistensa kanssa kosketuksissa olevien aineiden vähittäistä sekoittumista. (2: 114–115.)



**Kuva 6.** Sidotun veden tavat liikkua (4: 114.)

- 1) Vesi höyrystyy soluseinämästä soluonteloon ja kulkeutuu rengashuokosten kautta toiseen soluun
- 2) Vesi höyrystyy soluseinämästä soluonteloon, tiivistyy solun toiseen seinämään, jonka läpi se diffuntoituu
- 3) Vesi kulkeutuu kapillaarisesti soluseinämissä

Kuvassa 7 näkyy PSK:n yläpuolella tapahtuva nopea puun kapillaarinen kuivuminen, jossa vapaa vesi poistuu soluonteloista. Kapillaarinen kuivuminen muuttuu pääasiassa diffuntoitumiseksi PSK:n alapuolella, jolloin soluseinämistä poistuu hitaasti sidottu vesi. (2: 114–115.)



*Kuva 7. Kuivumisnopeuden riippuminen puun kosteudesta (4: 115)*

### 6.1.2 Puun tasapainokosteus

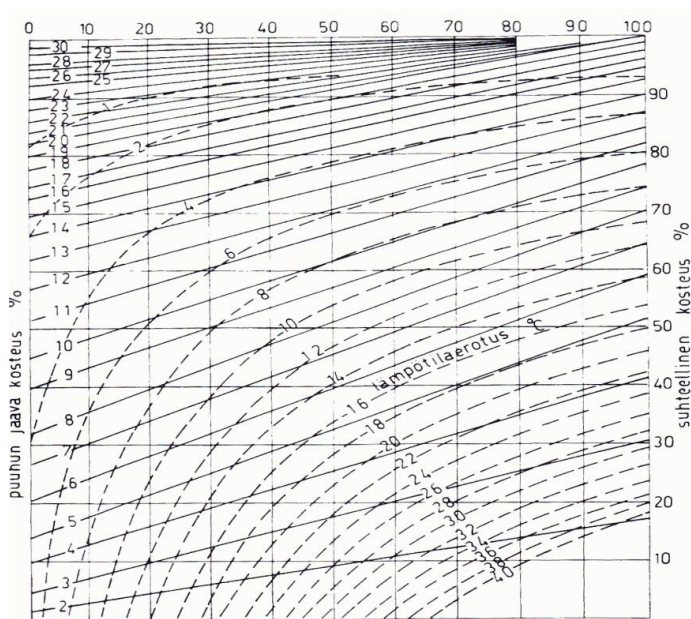
Puu pyrkii asettumaan tiettyyn tasapainokosteuteen ilman ja kosteuden mukaan, koska puu on hygroskooppinen aine. Tasaantumiseen tarvittava aika riippuu ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta sekä puun alkukosteudesta. (2: 117–118.)

Ilman suhteellinen kosteusprosentti lasketaan seuraavasti:

$$\text{ilman suht. kosteus \%} = \frac{\text{ilman sisältämä vesimäärä}}{\text{ilman suurin mahdollinen vesimäärä}} \times 100$$

Riippuen siitä onko lähtökosteus ollut suurempi vai pienempi kuin tasapainokosteus, tasapainokosteus on hieman erilainen. Jos puun lähtökosteus on korkeampi kuin tasapainokosteus eli puu kuivuu, on tasapainokosteus suurempi kuin päinvas-  
taisessa tapauksessa puun imiessä kosteutta. Jos kuivumista ja kostumista tapah-  
tuu useita kertoja, on tasapainokosteus ensimmäisellä kuivumiskerralla muita kor-

keampi. Kuvassa 8 esitetään keskimääräiset tasapainokosteudet eri oloissa. (2: 117–118.)



*Kuva 8. Puun tasapainokosteuskäyriä (4: 117.)*

## 6.2 Puun kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä

### 6.2.1 Veden haihtuminen

Veden haihtumista voidaan nopeuttaa nostamalla kuivausilman lämpötilaa tai alentamalla ilman suhteellista kosteutta. Lämpötilan kohotessa ilman kyky imeä vettä itseensä lisääntyy nopeasti. (2: 118.)

Kuivauksessa ongelmana ei yleensä ole se että saataisiin haihdutettua riittävä vesimäärä puun pinnalta, vaan se miten nopeasti vesi saadaan siirtymään puun sisäosista puun pinnalle. Haihtumisnopeuden ollessa suurempi kuin kosteuden siirtyminen puun pinnalle, pinta kuivuu ja kosteuden haihtuminen hidastuu tai estyy ja

syntyy kuivausvikoja. Tästä syystä haihtumisnopeuden tulisi olla yhtä suuri kuin veden liikenoisuus puun sisältä pintaa kohti. (2: 118.)

### 6.2.2 Veden siirtyminen puun sisäosasta puun pinnalle

Puun kuivumiseen voimakkaimmin vaikuttaa veden siirtymisnopeus sisäosista puun pinnalle. Kosteusero on kuivauksen alussa varsin suuri puun pinnan ja sisäosan välillä, mutta tasoittuu loppua kohti hidastaen kuivausta. (2: 119)

Veden siirtymisnopeus riippuu pitkälti puulajista, veden olomuodosta puussa, veden siirtymissuunnasta ja puun tiheydestä ja lämpötilasta.

Vapaana oleva vesi siirtyy nopeasti ja PSK:n yläpuolella kosteus aleneekin lähes suoraviivaisesti ajan funktiona. Mitä alempaan kosteuteen mennään, sitä hitaammin sidottu vesi siirtyy. (2: 119)

Sahatavaran pituussuunnassa (syiden suuntaisesti) veden siirtymisnopeus on hyvä, huomattavasti parempi kuin poikkisyin. Tästä syystä lyhyet kappaleet kuivuvat nopeammin kuin pitkät. Tangentin suunnassa veden liikkuminen on hitaampaa kuin säteiden suuntaisesti, tangentin suunnassa veden liikettä toisaalta edistävät trakeidien säteensuuntaisilla pinnoilla olevat rengashuokokset ja toisaalta estävät ydinsäteet. (2: 119)

Mitä raskaampaa puu on, sitä hitaampaa sen kuivuminen on, koska veden diffuusio on paksumpien soluseinämien takia hitaampaa. Kun ilman suhteellinen kosteus on suuri ja puun lämpötila pidetään korkeana, edistetään veden siirtymistä puun pinnalle ja hidastetaan veden siirtymistä puun pinnalta, jolloin myös pinnan kosteus säilyy ja näin ehkäistään myös pintakovuuden syntymistä. (2: 119)

### 6.2.3 Ilman lämpötila

Lämpötilalla tarkoitetaan sitä lämpötilaa, joka on käytössä varsinaisessa kuivauksessa. Kun lämpötila on korkea, nopeutuu kuivuminen, koska korkeassa lämpötilassa ilma kykenee sitomaan suuremman määrän vettä ja suorittamaan suuremman kuivaustyön.

Lämpö synnyttää myös ilmankiertoa, koska ilma lämmitessään nousee ylös. (2: 118–119)

#### 6.2.4 Kuivausvoima ja kuivumisnopeus

Kuivausvoima kuvaa kuivauksen rajuutta ja sillä tarkoitetaan puun hetkellisen kosteuden suhdetta puun tasapainokosteuteen. Kuivuminen on voimakasta, kun kuivausilmaa vastaava tasapainokosteus on puun kosteuteen verrattuna alhainen, jolloin puu pyrkii automaattisesti tähän tasapainokosteuteen. Kuivausvirheitä syntyy helposti kun kuivausvoima on liian suuri, puun pintaosat kuivuvat huomattavasti nopeammin kuin sisäosat. Kuivausvoiman taas ollessa liian alhainen, kuivaus tapahtuu hitaasti ja nostaa kuivauskustannuksia. Sopiva kuivausvoima on riippuvainen puulajista, tavaran paksuudesta ja sen alkukosteudesta. (2: 120)

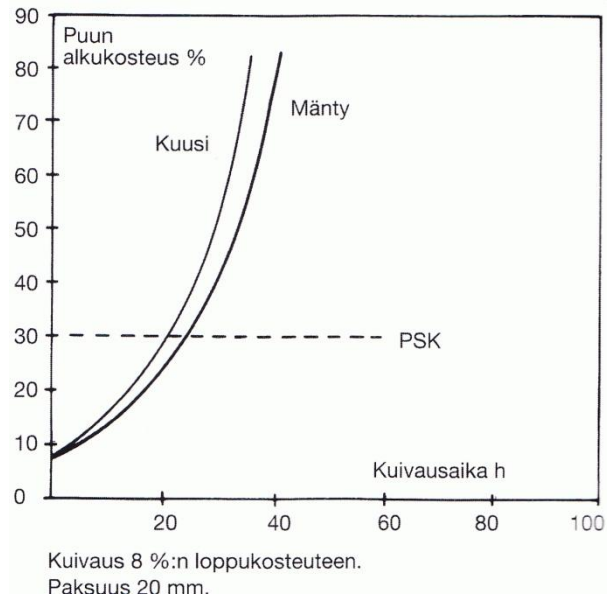
#### 6.2.5 Ilman nopeus

Jotta kuormaan saadaan riittävästi lämpöä ja kosteus siirrettyä pois ilman märkäpesäkkeiden syntymistä, tulee ilman nopeuden olla tasainen ja riittävän voimakas. Ilman nopeus vaikuttaa suurelta määrin kuivaamon energian kulutukseen, kuivaustuloksen tasaisuuteen, kuivausaikaan ja kuivumisnopeuteen. Ilman nopeudella on myös suuri merkitys erityisesti PSK:n yläpuolella, jolloin veden haihtuminen tapahtuu hyvin nopeasti. Suuri ilman nopeus auttaa veden pois kuljetukseen joka on ongelmallista. Suuri ilman nopeus on siten erittäin tärkeä mm. kosteiden pinta-lautojen kuivauksessa. (2: 120)

#### 6.2.6 Puun kosteus

Kuivausaika on sitä pidempi, mitä alhaisempaan loppukosteus suoritetaan ja mitä korkeampi on puun alkukosteus. Alkukosteudella on kuitenkin pienempi merkitys kuin loppukosteudella, koska kuivauksen alussa vapaan veden haihtuessa aikayksikössä haihtunut vesimäärä on paljon suurempi kuin kuivauksen lopussa sidotun veden haihtuessa. Yksinkertaisesti, mitä vähemmän puussa on vettä, sitä lujemmin se on siihen sitoutunut, eli mitä alhaisempaan loppukosteuteen mennään, sitä hitaampaa kuivuminen on (kuva 7). (2: 121–122)





**Kuva 9.** Kuivausajan riippuvuus puun alkukosteudesta (4: 121)

### 6.2.7 Kuivaukseen vaikuttavat mitat

Kuivumisen kannalta eniten sahatavaran mitoista vaikuttaa sen paksuus: mitä paksuampi kappale sitä pidempi kuivausaika. Esim. 50 mm paksun sahatavaran kuivausaika on kolminkertainen, jos perusaikana pidetään 25 mm paksun sahatavaran kuivausaikaa. Kosteuden siirtyminen hidastuu, koska siirtymismatka puun sisältä puun pinnalle kasvaa. Syiden suunnassa kosteus siirtyy hyvin joten sahatavaran pituudella ei siis ole nimeksikään vaikutusta kuivausaikaan. (2: 122)

## 7 KUIVAUSMENETELMÄT

Biopolttoaineiden kuivaaminen voidaan suorittaa antamalla kosteuden reagoida jonkin aineen kanssa, imeyttämällä kosteus toiseen aineeseen, jäädyttämällä, haihuttamalla lämpöä käyttäen tai mekaanisesti esim. puristamalla tai sentrifugoimalla. Kuivurit voivat olla joko jatkuvatoimisia tai epäperiaatteella toimivia. Tässä opinnäytetyössä on keskitytty tutkimaan kuitenkin vain termisiä kuivureita. (9: 126.)

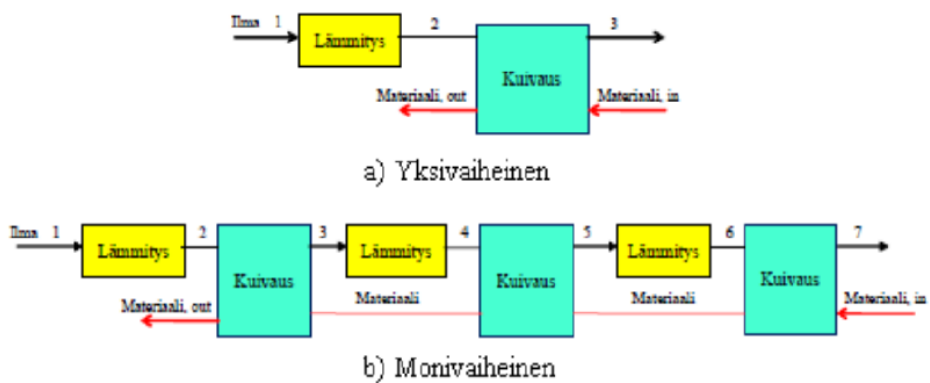
Termiset kuivurit jaetaan lämmönsiirtotavan mukaan joko suoriin tai epäsuoriin kuivureihin. Suoraa kuivausmenetelmää käytettäessä kuivauskaasu – ilma, savukaasu tai tulistettu höyry – on suorassa kosketuksessa kuivattavan materiaalin kanssa. Lämmönsiirto suorassa kuivauksessa tapahtuu konvektion avulla. Suorat kuivurit eivät kuitenkaan käy kaikille materiaaleille vaikka ovat yleensä tehokkaampia. (9: 126.)

Epäsuorassa kuivauksessa kuivauskaasun – yleensä tulistettu höyry tai kuuma vesi – ja kuivattavan materiaalin välillä on lämmönsiirtopinta. Lämmönsiirto epäsuorassa kuivauksessa tapahtuu johtumalla. Epäsuorat kuivurit ovat parempia erityisesti hienoille ja pölyisille materiaaleille. (9: 126.)

Biopolttoaineen kuivaus kuivurilla voidaan suunnitella toimimaan ilmakehän paineessa tai alipaineessa, polttoaineen kuivaaminen tyhjiössä alentaa veden kiehumispistettä ja näin ollen alentaa myös kuivaukseen tarvittavaa lämpötilaa. Alipaineistettu kuivuri lisää mahdollisuuksia käyttää hukkalämpöä laitoksissa. Pääomakustannukset alipaineistetuissa kuivureissa ovat tyypillisesti hyvin korkeat. Lämmön talteenotossa on enemmän käyttömahdollisuuksia, jos käytössä on tulistetulla höyryllä toimiva kuivuri (toimivat ylipaineessa korkeammalla lämpötilalla). (9: 126.)

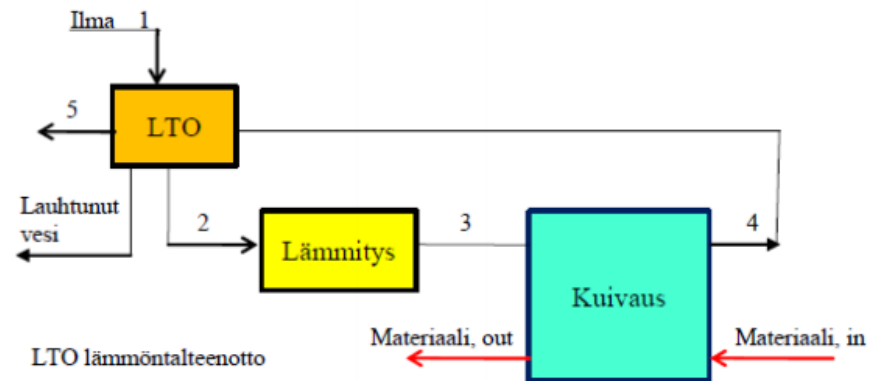
Kuivausprosessiin lämpö voidaan tuoda yksi- tai monivaiheisesti (kuva 8.). Kuivaus suoritetaan monivaihekuivauksessa useammassa eri vaiheessa. Kuivausvaiheiden välillä edellisten vaiheiden poistoilmat lämmitetään uudelleen. Tämä vä-

hentää lämmön kulutusta kuivauksessa, koska aina ennen seuraavaa kuivuria ilman sisäänmenolämpötila on korkeampi kuin edellisessä vaiheessa. Kosteuden sitoutumista ilmavirtaan saadaan jokaisen lämmityksen ansiosta nostettua, joka vähentää kuivausilman tarvetta. (9: 118–119.)



**Kuva 10.** a) Yksi- ja b) monivaiheinen kuivuriprosessi (9: 118.)

Yksivaiheisella kuivurilla päästään samaan ulostuloilmankosteuteen kuin monivaiheisella, jos käytetään korkeampaa kuivausilman lämpötilaa. Yksivaiheisen kuivurin energiatehokkuutta saadaan parannettua myös poistoilman talteenotolla, kuivauskaasun osittaisella takaisinkierätyksellä tai kuivauskaasun lämpötilaan nostamalla asteittain usealla eri lämpöisellä lämmönlähteellä. (9: 23,115.)



*Kuva 11. Poistoilman lämmön talteenotto (9: 115.)*

Koska poistoilman lämpötila on yleensä korkeampi kuin sisääntuloilman, lämmön talteenotolla on mahdollisuus esilämmittää sisääntuloilmaa poistoilmalla ja sen seurauksena pienentää kuivauksen lämmöntuontia. Osa poistoilmasta sekoitetaan kuivausilman sekaan ennen lämmönvaihdinta ilman osittaisessa takaisin kierrätyksessä. Kierrätyksen ansiosta kuivausilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta kasvaa. Tämän seurauksena kuivauksen lämmönkulutus pienenee. Kuivausilman massavirta kuitenkin kasvaa, koska kuivausilman kosteus nousee ennen kuivausta, joka johtaa yleensä puhaltimien sähkönkulutuksen lisääntymiseen. Lämpötilan nostaminen portaittain usealla eri lämpöisellä lämmönlähteellä vähentää korkealämpötilaisten lämmönlähteiden tarvetta, mutta ei pienennä kuivauksen lämmönkulutusta. (9:115–118, 123.)

Biopolttoaineiden kuivaamiseen käytettyjä kuivurityyppejä on useita; hihnakuivurit, rumpukuivurit ja erilaiset kerroskuivurit, myös ns. virtauskuivausmenelmiä käytetään kuten flash-, kaskadi-, leijukerros- ja höyrykuivureita. Sopivan kuivausmenetelmän valinta riippuu useista tekijöistä muun muassa saatavilla olevasta lämmönlähteestä, haihdutuskapasiteetista, halutusta loppukosteuspitoisuudesta ja pinta-alasta joka on käytettävissä kuivurille. (12: 19.)

Taulukossa 9 on esitetty kuivausmenetelmiä ja niille tyypillisiä ominaisuuksia.

*Taulukko 9. Kuivausmenetelmien tyypillisiä ominaisuuksia (12.)*

Kuivausteknologiat	Rumpukuivuri	Virtauskuivuri	Hihnakuivuri	Kerroskuivuri
Tyypillinen väliaine	Savukaasu/höyry	Savukaasu/höyry	Ilma	Ilma
Viipymäaika (min)	1-30	0,1-3	30-90	30-600
Kuivauslämpötila (°C)	200-600	150-200	30-120	30-80
Partikkelikoko (mm) <sup>4</sup>	200-100	0,5-50	5-50	5-50
Loppukosteus (%)	2-10	15-20	>5	20-30
Haihdutuskapasiteetti (t/h H <sub>2</sub> O)	5-75	10-30	5-40	0,1-20
Lämmönlähde	Höyry, savukaasu	Höyry, savukaasu	mp-höyry, savukaasu, kuumat vedet	Savukaasu, kuumat vedet

## 7.1 Rumpukuivuri

Rumpukuivuri on yleisin käytetty kuivuri biopolttoaineiden kuivauksessa. Rumpukuivureista on olemassa useita eri variaatioita, joita yleisin on jatkuvatoiminen rumpukuivuri (kuva 10). Rumpukuivuriin kuivattava materiaali syötetään hitaasti pyörivään rumpuun ja rummun seinämällä sijaitsevat listat nostavat materiaalin pohjalta ylös tiputtaen sen kuivauskaasuvirran läpi kuivattaen materiaalin. Kuivauskaasuna käytetään joko ilmaa tai savukaasuja. Kuivauskaasu kulkee vastatai myötävirtaan kuivattavaan materiaaliin nähden. Kuivauskaasun sisäänmenolämpötila on 200-600°C. Olennaisinta kuivauksessa on se, että kuivaus tapahtuu tarpeeksi korkeassa lämpötilassa, että ulostulolämpötila ei laske alle 100 °C. (11: 10, 12: 20.)

Rumpukuivurin etuihin voidaan laskea sen suuri kapasiteetti, alhainen sähköteho ja alhaiset käyttö- ja huoltokustannukset sekä sen rakenteen kestävyys. Lisäksi se soveltuu polttoaineille, joissa on partikkelikoon vaihteluita. Heikkouksiin voidaan luetella pöly- ja hajuhaitat, suuret haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöt (VOC), materiaalin kosteuden vaikea hallittavuus sekä palovaara kuivaimen jälkeen ja alasajossa. (11: 10)

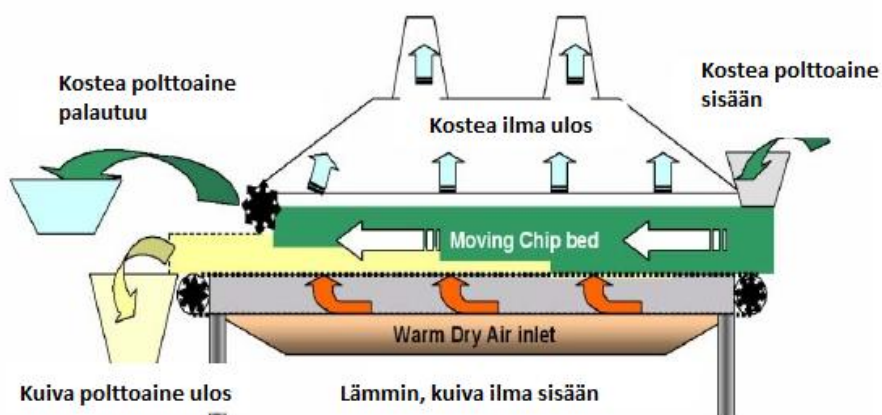


**Kuva 12.** Jatkuvatoimisen rumpukuivurin periaatekuva (10.)

## 7.2 Hihnakuivuri

Hihnakuivuri (yleisesti käytetään myös nimitystä viirakuivuri ja kerroskuivuri) on yleisin kuivurityyppi matalassa lämmössä tapahtuvalle kuivaukselle. Kuivurilla kuivatettava materiaali levitetään liikkuvalla hihnalle tasaiseksi kerrokseksi tasotusruuvien avulla ja kuivauskaasut johdetaan materiaalikerroksen läpi, joko ala- tai yläpuolelta. Kuivausilmaa puhalletaan 80–120 asteisena materiaalipatjan läpi, jolloin tapahtuu kuivumista. Kuivausyksikkö voi olla yhdessä tai useammassa tasossa. (10.)

Polttoaine kiertää kuivauksessa kunnes tavoiteltu kosteus on saavutettu. Lämmin ja kostea ilma voidaan palauttaa kuivauspatjan alkuun, jotta sillä voidaan esilämmittää polttoaineseosta ja saada kuivuminen alkamaan. (10.)



**Kuva 13.** Jatkuvatoimisen hihna kuivurin periaatekuva (10.)

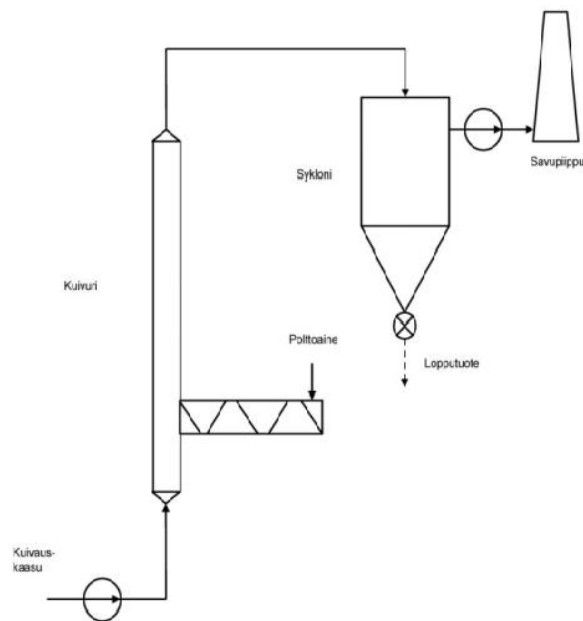
Hihna kuivurin etuja ovat sen soveltuvuus eri polttoaineille, korkea käytettävyys, sekundäärilämpöjen hyödyntäminen, kestävä ja yksinkertainen rakenne, helppo säädettävyys sekä pienet palovaarariski ja päästöt. Heikkouksiin voidaan luetella sen suuri investointikustannus, korkea käyttöteho, sen vaatima suuri pinta-ala ja suuret huoltokustannukset. (12: 24.)

### 7.3 Virtauskuivuri

Virtauskuivurin toimintaperiaate perustuu siihen, että polttoaine syötetään suurella nopeudella kuumaan kuivauskaasuun, joka voi olla savukaasua, ilmaa tai tulistettua höyryä. Virtauskuivureista käytetään myös nimitystä pneumaattiset kuivausmenetelmät. Menetelmät eroavat toisistaan lähinnä polttoaineen ja väliaineen virtauskanavien asettelun suhteen. Tyypillisiä virtauskuivausmenetelmiä ovat flash-, kaskadi, leijukerros- ja höyrykuivaus. (12: 22.)

Virtauskuivausmenetelmien haittoiksi voidaan luetella sen suuri omakäytösähkön kulutus, sekä sen vaatima polttoaineen esikäsitteily (murskaaminen tai jauhaminen), sekä varsin suuret lämpötilat kuivaavaan väliaineeseen, tyypillisesti yli 200 °C. Ja juuri näiden haittojen takia sitä ei voida suositella energiatehokkuuden parantamiseksi vaan lähinnä siinä tapauksessa jos tarkoituksena on tuottaa laaduk-

kaampia lopputuotteita esim. biomassan kaasutus- tai pyrolyysiprosesseihin. (12: 22.)



**Kuva 14.** Flash-kuivurin periaatekuva (12.)

#### 7.4 Kerroskuivaus

Kerroskuivaus on Euroopassa yleisimmin käytetty biomassakuivuri. Kerroskuivurin toimintaperiaate perustuu siihen, että kostea materiaali syötetään sisään kuivurin yläosasta ja kuivauskaasu taas tulee sisään kuivurin pohjasta ja osittain keskusputkesta. Keskusputken kautta sisään virtaava kaasu saa aikaan pyörreliikkeen. Kerroskuivaus voi olla liikkuva tai paikallaan oleva kuivaus. Jotta saavutettaisiin mahdollisimman homogeeninen polttoainejakauma, tulee ilman virtauksen olla mahdollisimman hyvin jakautunutta polttoainepedissä. (12: 24.)

Kerroskuivauslaitteisiin lasketaan mukaan petikerroskuivaus, siilokuivaus, aumakuivaus ja kenttäkuivaus. (12: 24.)



Liikkuva kuivaus tapahtuu liikkuvan tason kautta, jolloin prosessi on jatkuvatoiminen. Jotta painehäviöt saataisiin minimoitua, tulee kuivauskerroksen olla 0,5-2 m:a. Jos tasolle asetetaan korkeampia kerroksia, vaatii se tällöin suurempaa puhallintehoa. (12: 24.)

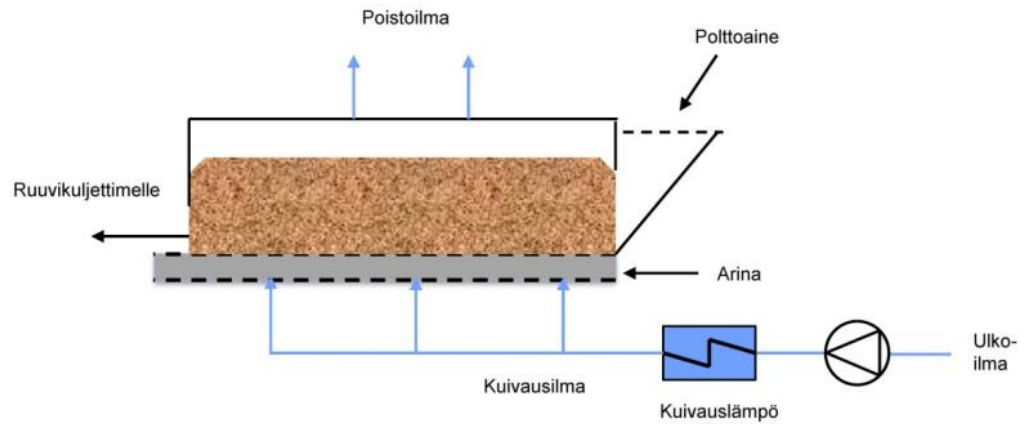
Paikallaan oleva kuivaus voidaan suorittaa esim. polttoaineen seisoessa varastoissa ulkona polttoainekentillä, siiloissa, konteissa tai muissa varastotiloissa. Tosin kuivausaika rajoittuu tällöin kevään, kesän ja syksyn aikaan. (12: 24.)

Kerroskuivauksen hyvinä puolina voidaan mainita sen erittäin yksinkertainen toimintaperiaate ja pieni kokoluokka verrattuna yleisimpiin menetelmiin. Kerroskuivurit ovat investointikustannuksiltaan melko alhaisia verrattuna viira- tai rumpukuivureihin, vaikkakin kuivaustehokkuus jää huomattavasti alhaisemmaksi. (12: 24.)

#### 7.4.1 Petikerroskuivaus

Petikerroskuivauksessa polttoaine kulkee ns. petimuodossa vaakasuoraan liikkuvalla arinatasolla kuivurin läpi josta se tippuu polttoainekuljettimille siirrettäväksi. Petikerroskuivauksessa kuivausilman syötetään arinatason kautta polttoainepetiin ja kuivausilman lämmitys suoritetaan lämmönsiirtimellä. Polttoaine täytyy kuitenkin tuoda erinäisellä kuljettimella tai kauhakuormaajalla syöttötaskun kautta. (12: 25.)

Menetelmän huonona puolena voidaan mainita sen todella pitkä viipymäaika kuivurissa, tosin riippuen siitä millainen loppukosteus halutaan polttoaineelle saada. Mitä kuivempi lopputulos halutaan, sitä pidempi on viipymäaika. Menetelmän eduiksi taas voidaan luetella sen yksinkertaisuus ja kestävä toimintaperiaate, sekä se soveltuu hyvin matalalämpöiselle ylijäämälämmölle. (12: 25.)



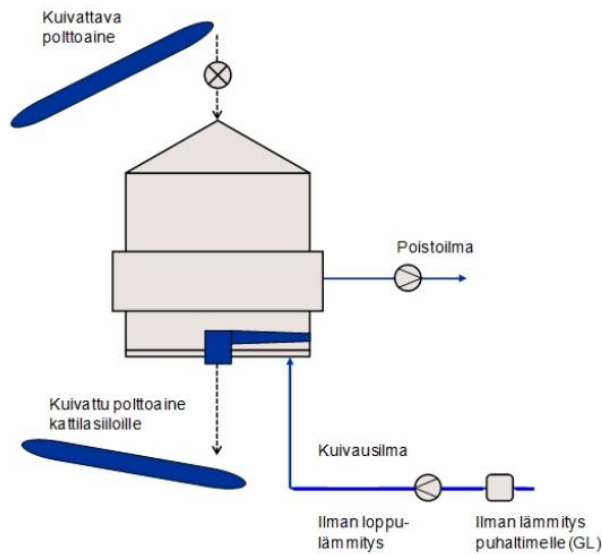
*Kuva 15. Petterroskuivurin periaatekuva (12.)*

#### 7.4.2 Siilokuivaus

Siilokuivauksessa voidaan hyödyntää jo olemassa olevia siilovarastoja tai rakentaa erityisesti kuivuriksi suunniteltu siilokuivuri. Tätä teknologiaa hyödynnetään yleisesti jo maataloudessa viljan kuivaamiseksi. Teollisuuden käytössä siilokuivureita ei juuri ole. Siilokuivurin yksinkertainen toimintaperiaate on se, että kuivuriin johdetaan polttoainekerroksen läpi lämmitettyä ulkoilmaa. Jos käytössä on varastointiin käytettävä siilo, ei kuivurin investointeihin kuulu muuta kuin lämmön hyödyntämiseen liittyvä järjestelmä, sekä ilman syöttö- ja poistojärjestelmä. (12: 26.)

Siilokuivurin hyväksi puoliksi voidaan mainita sen halpa investointi, mikäli käytössä on jo valmiiksi olemassa oleva siilo ja kuljetin. Kuivurissa voidaan hyödyntää myös erittäin matalia lämmönlähteitä (50–80 °C). (12: 27.)

Huonoja puolia ovat sen todella pitkä viipymäaika (annettu n. 10–20 h), polttoaineen epätasainen kuivuminen sekä polttoaineesta huonosti poistuva kosteus. Suurimmaksi ongelmaksi on yleisesti havaittu sen tarvitseman lämmön siirtäminen polttoainekerrokseen, koska ilman nopeutta ei voi kasvattaa liiaksi. (12: 27.)



**Kuva 16.** Siilokuivauksen periaatekuva (12.)

### 7.4.3 Aumakuivaus

Aumakuivauksessa polttoaineseos kasataan erinäiselle polttoainekentälle esim. kontin päälle. Kontit muodostavat pohjaan ilmanakanan, joiden avulla kuivatusilma on helposti johdettavissa aumaan. Kuivauksessa voidaan hyödyntää erittäin mataliakin lämpöjä. Aumat ovat yleensä kartion muotoisia tai teräväharjaisia ja avoimia kasoja. (12: 28.)



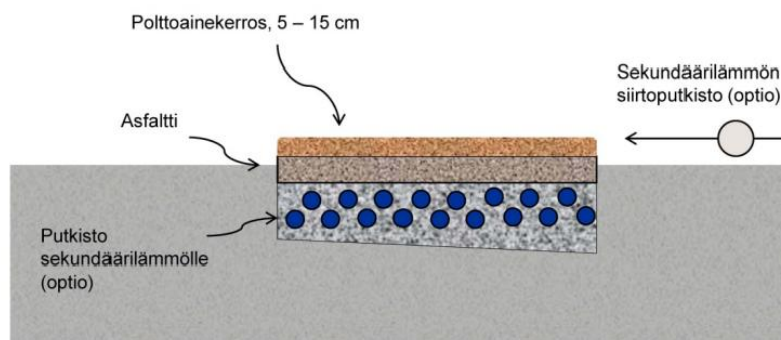
**Kuva 17.** Aumakuivauksen periaatekuva (12.)

Aumakuivurit ovat halpoja investointeja, koska laitteisto koostuu periaatteessa vain ilmankanavista, tuloilmapuhaltimista sekä ilma/vesi – lämmönvaihtimista. Aumakuivaus ei vaadi kovin korkeaa lämmitysilmää.

Huonoja puolia ovat sen pitkä kuivausaika, pieni kuivauskapasiteetti ja auman kuivuminen huonosti pinnalta, sekä auman pinta on jatkuvasti altis sään muutoksille. Auman tuottama kuivaushyöty on yleensä hyvin alhainen. (12: 28.)

#### 7.4.4 Kenttäkuivaus

Kenttäkuivaus perustuu siihen, että polttoaine levitetään asfalttikentälle n. 5-15 cm paksuksi kerrokseksi hyödyntäen auringon säteilyenergiaa kuivaamisessa. Ja mikäli kentän alle on mahdollista asentaa putkia, missä virtaa lämmitettyä vettä voidaan näin ollen tehostaa polttoaineen kuivumista. Ja jos materiaalin kuivumista halutaan tehostaa vielä entisestään, voidaan polttoainetta käänellä esimerkiksi erinäisellä pyöräkuormaajalla. (12: 29.)



**Kuva 18.** Kenttäkuivauksen periaatekuva (12.)

Kenttäkuivauksen kentän alla kiertävän veden lämpö voidaan tuottaa aurinkolämpöpökeräimillä tai läheisyydestä saatavilla ylijäämälämpövirroilla. (12: 29.)

Kenttäkuivaus on lyhyt kestoista, sääolosuhteista riippuen 1-4 vrk. Hyödynnettäviksi lämmöiksi voidaan ottaa auringon lämmitysteho tai matalat lämmöt (20–30 °C). Jos kerroksen paksuus saadaan 5 cm paksuuteen, on mahdollista saavuttaa erittäin alhaisiakin loppukosteuksia (25 %). (12: 29.)

Huonoja puolia ovat sen suuri tilantarve ja sen vaatima kääntely, jotta aikaansaataisiin vaadittava kuivausteho sekä sääolosuhteiden suuri vaikutus. (12: 29.)

## 7.5 Kuivurin valinta

Kuivurin valintaan vaikuttaa olennaisesti kuivattavan materiaalin ominaisuudet ja palakoko, investoinnin käyttö- ja huoltovaatimukset, pääomakustannukset, päästöt ja energiatehokkuus. Aluksi kannattaa myös selvittää kuinka hyvin laite voidaan integroida nykyiseen jo voimassa olevaan prosessiin ja mitkä ovat käytettävissä olevat lämmönlähteet ja investoinnin vaatima tila sekä sen mahdollinen palovaara.

Tässä työssä on kuitenkin selvitetty energiataseen kautta kuivurin kannattavuus. Energiatase-laskelmien kautta voidaan selvittää tarvittavat kuivauskaasut ja lämmönlähteiden ainevirrat sekä lämmönvaihtimien lämpötehot. Riippumatta siitä mitä lämmönlähdettä kuivauksessa käytetään, vaikuttaa se prosessin eri osa-alueisiin. Jos kuivauksessa käytetään savukaasuja, sen käytön vaikutukset näkyvät poltto-prosessissa, koska polttoilman lämmittämiseen jää vähemmän savukaasuvirtaa. Ja vaikka savukaasun käyttäminen on lähes ilmaista, vaatii se aina puhdistuksen ja kierrätyksen takaisin kattilaan tai savukaasukanavaan.

Taulukko 10. Kuivausmenetelmien hyödyt ja haitat (12: 29.)

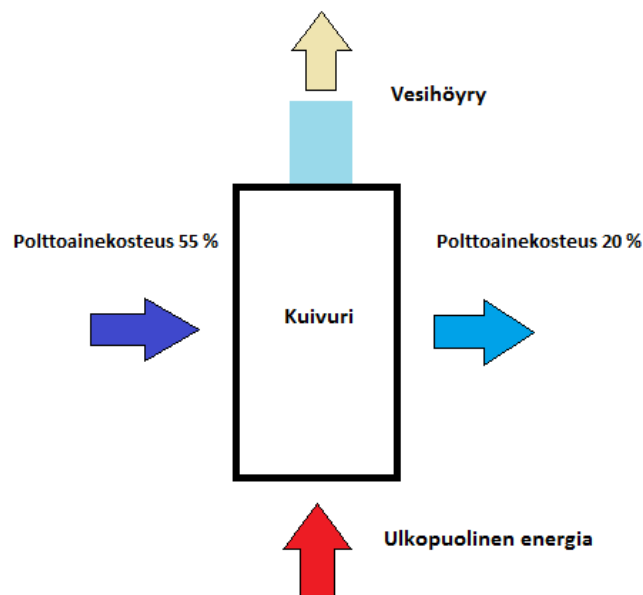
<b>Kuivuritekniologia</b>	<b>Hyödyt</b>	<b>Haitat</b>
<b>Rumpukuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Useita laiteomittajia</li> <li>- Joustavuus syöttömateriaalin suhteen</li> <li>- Energiatehokkuus</li> <li>- Suuri kuivauskapasiteetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Päästöjen käsittely: VOC-, haju- ja partikkelipäästöt</li> <li>- Paloturvallisuusriskit</li> <li>- Vaatii korkealämpötilaisen lämmönlähteen</li> </ul>
<b>Flash-kuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Useita laiteomittajia</li> <li>- Nopea kuivumisaika ja kompakti rakenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaatii korkealämpötilaisen lämmönlähteen</li> <li>- Päästöjen käsittely: VOC-, haju- ja partikkelipäästöt</li> <li>- Korroosio- ja eroosio-ongelmat</li> </ul>
<b>Viirakuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Useita laiteomittajia</li> <li>- Joustavuus syöttömateriaalin suhteen</li> <li>- Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>- Helppo säädettävyys ja hyvä käytettävyys</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tilan tarve</li> <li>- Omakäytösähkön kulutus</li> <li>- Investointi- ja huoltokustannukset</li> </ul>
<b>Petikerroskuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>- Yksinkertainen rakenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laitteomittajia vähäisesti</li> <li>- Matalat kosteuspitoisuudet epärealistisia</li> </ul>
<b>Aumakuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>- Yksinkertainen rakenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuivaus ulkoilmassa: kausirajoitteinen, epätasainen kuivuminen</li> <li>- Tilan tarve</li> <li>- Pölyäminen</li> <li>- Pitkä kuivumisaika</li> </ul>
<b>Kenttäkuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soveltuvuus ylijäämälämmölle (erityisesti matalille lämpötiloille)</li> <li>- Hyödyntää olemassa olevia rakenteita</li> <li>- Voidaan hyödyntää aurinkolämpöä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuivaus ulkoilmassa: kausirajoitteinen, sääolot</li> <li>- Tilan tarve</li> <li>- Polttoainekerroksen kääntelemisen</li> </ul>
<b>Siilokuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>- Hyödyntää olemassa olevia rakenteita</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kehitysriskit</li> <li>- Laitteomittajia vähäisesti</li> <li>- Matalat kosteuspitoisuudet epärealistisia</li> </ul>

## 8 ENERGIATASELASKELMA JA PROSESSIN KEHITTÄMINEN

Energiatase kuvaa primäärienergian muuntumista loppukulutukseksi, jossa on otettu huomioon primäärienergian hankinta, varastomuutokset, energian tuotanto ja muunto sekä energian loppukulutus ja raaka-ainekäyttö. (7.)

Energiatase-laskelmia käytetään yleensä, kun halutaan suunnitella energian talteenottoa tai sen hyödyntämistä. Energiatasetta voidaan myös hyödyntää prosessiturvallisuuden huomioinnissa, prosessien toiminnan selvittämisessä ja lämmönsiirtimien ja lämmönsiirtopintojen mitoituksessa. (8.)

Energiatase-laskelmassa on määritelty kuivauksen energiavirrat ja kannattavuus, jos polttoainetta kuivataan 55 %:n kosteudesta (kuoren ja sahanpurun kosteuden keskiarvo) 20 %:n kosteuteen. Kostean polttoaineen massavirta on 1 kg/s, lämpötila 20 °C ja kostean polttoaineen ka. lämpöarvo on 8,8 MJ/kg. Polttoaineen kuivutua haluttuun kosteuteen sen lämpötila on 100 °C ja ka. lämpöarvo 14,9 MJ/kg. Vesi poistuu 100 °C:ssa höyrynä (höyrystymislämpötila 2256 kJ/kg). Puun ominaislämpökapasiteetti on 1,5 kJ/kg°C ja veden 4,2 kJ/kg°C.



*Kuva 19. Kuivausjärjestelmä yksinkertaisesti*

Ensin määritetään kostean polttoaineen mukana tulevan veden massavirta, kuivatun polttoaineen mukana poistuva veden massavirta, vesihöyryn massavirta sekä kuivan puun massavirta.

Kostean polttoaineen mukana tuleva veden massavirta kosteuspitoisuuden 55 % mukaan;

$$q_{m,v1} = 0,55 \times 1 \text{ kg/s} = 0,55 \text{ kg/s}$$

Kostean polttoaineen mukana tuleva kuivan puun osuus:

$$q_{m,p} = (1 - 0,55) \text{ kg/s} = 0,45 \text{ kg/s}$$

Kuivan puun osuus säilyy kuivauksessa, joten kuivatun polttoaineseoksen kosteus-  
pitoisuuden 20 % mukaan voidaan määrittää kuivatun polttoaineen mukana  
poistuvan veden massavirta.

$$\text{kosteuspitoisuus} = \frac{\text{veden massavirta}}{\text{kokonaismassavirta}}$$

$$0,20 = \frac{q_{m,v2}}{q_{m,v2} + q_{m,p}}$$

$$q_{m,v2} = \frac{0,20q_{m,p}}{0,80} = \frac{0,20 \times 0,45 \text{ kg/s}}{0,80} = 0,11 \text{ kg/s}$$

Vesihöyryn massavirta:

$$q_{m,v3} = q_{m,v1} - q_{m,v2} = (0,45 - 0,11) \text{ kg/s} = 0,34 \text{ kg/s}$$

Kuivurin energiatase määritetään siten, että kuivuriin tulevat lämpötehot merkitään yhtä suuriksi kuin kuivurista poistuvat lämpötilat ja tästä ratkaistaan ulkopuolinen tehontarve.



$$\phi_{\text{kosteaa polttoainetta}} + \phi_{\text{ulkopuol.}} = \phi_{\text{kuivattu polttoaine}} + \phi_{\text{vesihöyry}}$$

Aineen olomuodon pysyessä muuttumattomana voidaan ratkaista lämpöteho seuraavasta yhtälöstä, vertailulämpötilaksi otetaan esimerkiksi 0 °C.

$$\phi = q_m c_p \Delta T$$

Veden höyrystymiselle tarvittava tehontarve:

$$\phi = q_m r$$

Kostean polttoaineen mukana tuleva teho (kuiva puu ja vesi):

$$\phi_{\text{kosteaa polttoainetta}} = q_{m,p} c_{p,p} \Delta T + q_{m,v1} c_{p,v} \Delta T$$

$$\begin{aligned} \phi_{\text{kost.polt.}} &= 0,45 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{°C} \times (20 - 0) \text{°C} + 0,55 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{°C} \times (20 - 0) \text{°C} \\ &= 59,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

Kuivatun polttoaineen mukana poistuva teho (kuiva puu ja vesi):

$$\phi_{\text{kuivattu polttoaine}} = q_{m,p} c_{p,p} \Delta T + q_{m,v2} c_{p,v} \Delta T$$

$$\begin{aligned} \phi_{\text{kuiv.polt.}} &= 0,45 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{°C} \times (100 - 0) \text{°C} + 0,11 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{°C} \times (100 - 0) \text{°C} \\ &= 113,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

Vesihöyryn mukana poistuva teho (veden lämmitys ja höyrystyminen):

$$\phi_{\text{vesihöyry}} = q_{m,v3} c_{p,v} \Delta T + q_{m,v3} r$$

$$\begin{aligned}\phi_{vesihöyry} &= 0,34 \frac{kg}{s} \times 4,2 \frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ C \times (100 - 0)^\circ C + 0,34 \frac{kg}{s} \times 2256 \frac{kJ}{kg} \\ &= 909,84 kW\end{aligned}$$

Ulkopuolinen tehontarve on tällöin:

$$\phi_{ulkopuolinen} = \phi_{kuiv.polttoaine} + \phi_{vesihöyry} - \phi_{kosteaa\ polttoaine}$$

$$\phi_{ulkopuolinen} = 113,7 kW + 909,84 kW - 59,7 kW = 963,84 kW$$

Lopuksi määritetään kuivuriin tulevan polttoaineen ja kuivurista ulos tulevan polttoaineen kemialliset energiavirrat (tehot). Kemiallinen teho (polttoaineen palamisessa vapautuva teho) voidaan määrittää polttoaineen massavirran ja lämpöarvon mukaisesti.

$$\phi = q_m H$$

$$\phi_{sisään} = 1 kg/s \times 8,8 MJ/kg = 8,8 MW = 8\,800 kW$$

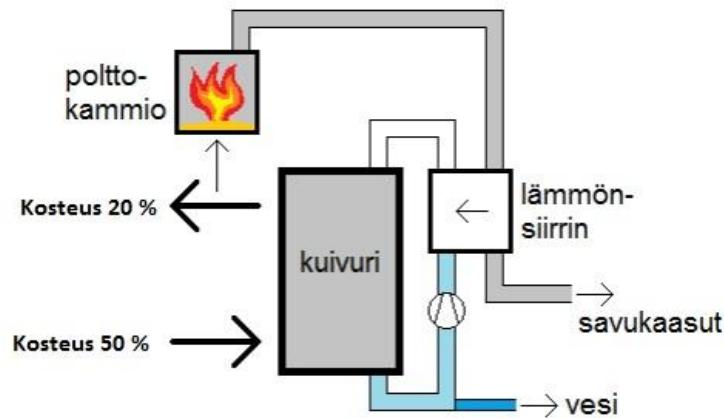
$$\phi_{ulos} = 0,73 kg/s \times 14,9 MJ/kg = 10,87 MW = 10\,877 kW$$

Jos ulkopuolisen tehon tarve on suurempi kuin ulos ja sisään tulevan kemiallisten tehojen erotus, kuivaus ei ole kannattavaa.

$$\phi_{ulos} - \phi_{sisään} = 10877 kW - 8800 kW = 2\,077 kW > 963,84 kW$$

Laskelmien mukaan kuivaus on kannattavaa. Kannattavuuteen ei ole kuitenkaan otettu huomioon eri laitteiden lämpöhäviöitä, sähköntarpeita yms.

Prosessia kehitetään siten, että lämpöä otetaan talteen vesihöyrystä joka syntyy polton yhteydessä. Toimintaperiaate on, että kostea polttoaine syötetään kuivuriin, jossa kuivausilma kiertää kuivurin ja lämmönsiirtimen välillä. Tällä menetelmällä polttoaineesta höyrystyy vettä pois ja höyry lauhtuu takaisin vedeksi ja lämmittää kosteata polttoainetta. Kuivurin toiminta perustuu vastavirtaperiaatteeseen, eli toisin sanoen vesi poistetaan kuivauskierrosta ja lämpöä tuotetaan kuivattua polttoainetta polttamalla.



**Kuva 20.** Prosessin kehitys (13.)

Laskemalla selvitetään onko kuivaus kannattavaa tällä menetelmällä. Kuivurin arvioidut lämpöhäviöt tuodusta tehosta on 30 %, lämmönsiirtimen arvioidut lämpöhäviöt 10 % tuodusta tehosta ja polttokammin lämpöhäviöt tuodusta tehosta. Laitteiden yhteenlaskettu sähkönkulutus on 30 kW. Vesi poistuu 50 °C lämpötilassa, muut arvot ovat kuitenkin samat kuin energiataseen laskemisessa käytetyt arvot.

Ensin lasketaan kuivurin energiatase ja määritetään energiataseesta kuivuriin tarvittava ulkopuolinen teho ( $\phi_k$ ).

$$\phi_{\text{kosteaa polttoainetta}} + \phi_k = \phi_{\text{kuivattu polttoaine}} + \phi_{\text{vesi}} + \phi_{\text{häviöt,k}}$$

Arvioidut häviöt ovat 30 % tuotetusta tehosta  $\phi_k$ , joten yhtälö muuttuu seuraavanlaiseksi

$$\phi_{kosteaa\ polttoaine} + 0,70\phi_k = \phi_{kuivattu\ polttoaine} + \phi_{vesi}$$

Veden mukana siirtyvä teho;

$$\phi_{vesi} = 0,34 \frac{kg}{s} \times 4,2 \frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ C \times (50 - 0) \text{ } ^\circ C = 71,2 \text{ } kW$$

Kuivuriin tuleva ulkopuolinen teho;

$$\phi_k = \frac{\phi_{kuivattu\ polttoaine} + \phi_{vesi} - \phi_{kosteaa\ polttoaine}}{0,70}$$

$$\phi_k = \frac{113,7 \text{ } kW + 71,2 \text{ } kW - 59,7 \text{ } kW}{0,70} = 178,9 \text{ } kW$$

Seuraavaksi lasketaan lämmönsiirtimen energiatase ja määritetään energiataseesta lämmönsiirtimeen tarvittava ulkopuolinen teho ( $\phi_l$ ).

$$\phi_l = \phi_k + \phi_{häviöt,l}$$

Arvioidut häviöt olivat 10 % tuodusta tehosta  $\phi_l$ , joten yhtälö on seuraavanlainen;

$$0,90\phi_l = \phi_k$$

$$\phi_l = \frac{\phi_k}{0,90} = \frac{178,9 \text{ } kW}{0,90} = 198,8 \text{ } kW$$

Lopuksi lasketaan polttokammion energiatase ja määritetään energiataseesta polttokammioon tarvittava ulkopuolinen teho ( $\phi_p$ ).

$$\phi_p = \phi_l + \phi_{häviöt,p}$$

Koska häviöt ovat 20 % tuodusta tehosta  $\phi_p$ , joten yhtälö on seuraavanlainen

$$\phi_p = \frac{\phi_l}{0,80} = \frac{198,8 \text{ kW}}{0,80} = 248,5 \text{ kW}$$

Tämä teho tarvitaan polttokammioon polttoainetehona. Kuivattua polttoainetta käytetään prosessissa lämmön tuontiin, joten polttoaineseoksen lämpöarvon perusteella voidaan määrittää tarvittava polttoaineen massavirta.

$$q_{m,pa} = \frac{\phi_p}{H} = \frac{248,5 \text{ kW}}{14900 \text{ kJ/kg}} = 0,02 \text{ kg/s}$$

Jos tarkastellaan kokonaisuutena prosessiin tulevia ja poistuvia kemiallisia energiavirtoja ja verrataan näitä ulkopuoliseen tehontarpeeseen. Osa kuivatusta polttoaineesta tarvitaan kuitenkin polttokammioon polttoa varten.

$$\phi_{sisään} = 1 \text{ kg/s} \times 8,8 \text{ MJ/kg} = 8,8 \text{ MW} = 8\,800 \text{ kW}$$

$$\phi_{ulos} = (0,73 - 0,02) \text{ kg/s} \times 14,9 \text{ MJ/kg} = 10,58 \text{ MW} = 10\,579 \text{ kW}$$

Tehojen erotus on 1 779 kW, joten prosessi olisi näillä lähtötiedoilla kannattavaa, jos ulkopuolisena tehontarpeena on vain sähköteho 30 kW.

## 9 TULOKSET JA POLTTOAINEEN KUIVAUKSEN ENERGIATASETARKASTELU

Taulukoissa 11–16 on koottu yhteenveto energiatasetelaskelmasta saaduista arvoista, jotka havainnollistavat laskelmia paremmin. Laskelmissa on käytetty polttoaineseoksen jakauman keskiarvoja mm. lämpöarvoista, irtotiheyksistä ja kosteuksista. Esimerkiksi polttoainejakauman keskikosteus on laskettu havupuun kuoren (60 %), hakkeen (50 %), sahanpurun (50 %) ja kutterinlastun (10 %) kosteuksien mukaan, joten polttoaineseoksen keskikosteudeksi saadaan 42,5 %. Samaa prosessia käytettiin myös lämpöarvon ja kostean irtotiheyden sekä kuivan irtotiheyden mää-

rittämisessä. Oletuksena on tietenkin, että ne ovat vain viitteellisiä keskiarvoja, joilla saadaan määritettyä keskiarvot myös tuloksista.

*Taulukko 11. Kuivurin energiatase*

<b>Kuivurin energiatase</b>	
Massavirta sisään	0,55 kg/s
Teho sisään kost. poltt. (ilman lämpöarvoa)	59,7 kW
Kuiva-aineen massavirta ulos	0,55 kg/s
Kuivatun polttoaineen massavirta	0,73 kg/s
Teho ulos kuiv. poltt.(ilman lämpöarvoa)	113,7 kW
Poistuvan veden massavirta	0,27 kg/s
Teho ulos vedestä	56,7 kW
Kuivurin hyötytehon tarve	110,7 kW
Kuivurin kokonaistehon tarve	158,14 kW

*Taulukko 12. Lämmönsiirtimen energiatase*

<b>Lämmönsiirtimen energiatase</b>	
Lämmönsiirtimen hyötytehon tarve	158,14 kW
Lämmönsiirtimen kokonaistehon tarve	175,7 kW

*Taulukko 13. Polttoainekammion energiatase*

<b>Polttokammion energiatase</b>	
Polttokammion hyötytehon tarve	175,7 kW
Polttoaineen tarve	219,6 kW
Polttoaineen lämpöarvo (kuivattu)	14,9 MJ/kg
Polttoaineen massavirta	0,02 kg/s

*Taulukko 14. Prosessin kokonaisenergiatase*

<b>Prosessin kokonaisenergiatase</b>	
Kemiallinen teho sisään kost.poltt.(lämpöarvo)	8 800 kW
Teho sisään sähköstä	30 kW
Kokonaisteho sisään	8 830 kW
Kuivatun polttoaineen saanto	0,71 kg/s
Kemiallinen teho ulos kuiv.poltt.(lämpöarvo)	10 579 kW
Energiasisältö kasvaa	19,8 %

*Taulukko 15. Raaka-aineen ja tuotteen vertailu*

<b>Raaka-aineen ja tuotteen vertailu</b>	
Energiatiheys ennen käsittelyä(kost.polt.)	2,2 GJ/m <sup>3</sup>
Energiatiheys käsittelyn jälkeen(kuiv.polt.)	5,6 GJ/m <sup>3</sup>
Energiatiheys kasvaa	155 %

*Taulukko 16. Savukaasun loppulämpötilan tarkastelu*

<b>Savukaasun loppulämpötilan tarkastelu</b>	
Häviöteho	17,56 kW
Massavirta/pa.	5,8 kg/kg
Massavirta	0,12 kg/s
Lämpötila	122 °C

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkasteltiin sahan sivutuotteiden erilaisia kuivausmenetelmiä sekä niiden toimintaperiaatteita, jotta pääasiassa kuoresta, hakkeesta ja sahanpurusta saataisiin mahdollisimman korkea lämpöarvo. Sahanpurun kosteus riippuu paljolti siitä, mistä kohdasta sahan prosessia sahanpuru on saatu. Esimerkiksi kuivauksen jälkeen saatu puru on kosteudeltaan varsin alhaista.

Tulokset ja itse kirjallisuusosa tukivat toisiaan. Kuten tuloksista voidaan jo suoraan lukea, biopolttoainesekoituksen kuivaus erilaisilla kuivausmenetelmillä tulee todella kannattavaksi. Se, millä tavalla kuivaus järjestetään, on kuitenkin investointikysymys. Kuinka kallis investointi on, mikä on sen takaisinmaksuaika ja maksaako hankinta itsensä takaisin esim. 20 vuoden kuluessa? Silloin kun kyseessä on tämän kokoluokan investointi sekä uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä koskeva uudistus, Ely-keskukset myöntävät harkinnanvaraista energiatukea, eikä hankinnan kokonaisrahoitus jäisi yksinomaan Pölkky Oy:lle. Kuivurin investointia miettiessä tulee kuitenkin ensin kartoittaa kuitenkin käytettävissä olevat ylijäämä- lämpövirrat ja niiden lämpötilat. Ylijäämävirrat ja lämpötila asettavat kuivaukseen soveltuvien laitteistojen reunaehdot.

Erinäiset kuivausmenetelmät ovat itsessään jo erittäin suurikokoisia hankintoja, sekä kooltaan että hinnaltaan. Jos investoinnit eivät ole kannattavia esim. sisäistä korkokantalaskelmaa ja herkkyysanalyysyjä käyttäen voidaan yksinkertaisimmillaan kuorta ja haketta voidaan kuivata katetussa hallissa. Katetussa hallissa olisi lämmitetty kenttä ja sivuilla puhaltimet, jotka puhaltavat kostean ilman ulos hallista. Kesällä halliin ei välttämättä erinäistä lämmitystä edes kaivattaisi vaan aurin-gosta saatava energia voitaisiin hyödyntää kuivauksessa. Jos kesällä kuivattua polttoaineseosta voitaisiin varastoida pitempiaikaisesti, voitaisiin sitä käyttää talven aikana, näin polttoaineen lämpöarvosta ja tuottavuudesta saataisiin ympäri vuorokauden mahdollisimman homogeenistä, eikä talvella välttämättä edes tarvittaisi erillistä lämmitystä. Tällaisella pienempimuotoisella kuivauksella kuivurin käyttöenergia muodostuu lähinnä sen puhaltimien sähkön kulutuksesta ja sen kuivausilmaan käytetystä sekundäärilämmöstä.



Tämä on erittäin ajankohtainen ja tärkeä pohdinta, sillä uusiutuvien polttoaineiden määrää ollaan koko ajan lisäämässä sekä puupohjaisia sivutuotteita (mekaanisia ja kemiallisia) metsäteollisuudesta on erittäin laajasti saatavilla. Puupohjaisia biopolttoaineita polttamalla ja erityisesti kuivaa massaa polttamalla saataisiin myös laitoksen energiaomavaraisuus kasvamaan, energiantuotanto erittäin tehokkaaksi ja hukkaenergia minimoitua. Olennaisimpana vaikutuksena voidaan kuitenkin mainita polttoaineen energiatiheuden kasvaminen ja siitä suoraan sen vaikutus polttoainesäästöihin ja kattilan hyötysuhteen kasvamiseen.

Työn tekeminen oli erittäin mielenkiintoista ja todella opettavaista. Kesken kirjoituksen heräsin miettimään asiaa, että oikealla alalla ollaan, sillä saatoin tehdä työtä jopa kahdeksankin tuntia päivässä. Eri kuivausmenetelmien tutkinta oli kiinnostavaa ja niiden kattavampi vertailu olisi ollut erittäin mielenkiintoista.

## LÄHTEET

- (1) Yritys. Tunnusluvut, Tuotanto, Ympäristö. Saatavissa: [www.polkky.fi/fi/yritys.html](http://www.polkky.fi/fi/yritys.html) [Viitattu 13.1.2014]
- (2) Sipi, M. Sahatavaratuotanto Opetushallitus Helsinki 2006
- (3) Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Alakangas, E. 2000. Otamedia Oy, Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 2045. 158 s. Saatavissa: [www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/biopolttoaineiden\\_lampoarvoja](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biopolttoaineiden_lampoarvoja) [Viitattu 13.1.2014]
- (4) Knuuttila, K. Puuenergia, Gummerus kirjapaino Oy, Jyväskylä 2003
- (5) Eija Alakangas. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Saatavissa: [www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf) [Viitattu 28.2.2014]
- (6) Martti Härkönen. 19.9.2011. Kostean puun energiasisältö. Saatavissa: [www.forestpower.net/data/liitteet/112231=1018\\_kostean\\_puun\\_energiasisalto.pdf](http://www.forestpower.net/data/liitteet/112231=1018_kostean_puun_energiasisalto.pdf) [Viitattu 10.4.2014]
- (7) Energiatase. Saatavissa: [www.tilastokeskus.fi/meta/kas/energiatase.html](http://www.tilastokeskus.fi/meta/kas/energiatase.html) [Viitattu 10.4.2014]
- (8) Kurssimateriaalia. Hannu Sarvelainen. 2013. Ei saatavissa. [Users/asus/Downloads/luento\\_3\\_energiataseet%20\(1\).pdf](http://Users/asus/Downloads/luento_3_energiataseet%20(1).pdf) [Viitattu 10.4.2014]
- (9) Holmberg, H., Ahtila, P., Arhippainen, P. & Spetts J.-P. 2000. Sekundäärilämpöjen hyödyntäminen metsäteollisuuden käyttämien kiinteiden biopolttoaineiden kuivauksessa. Espoo, Teknillinen korkeakoulu.
- (10) Info- F110 Hakkeen pienimuotoinen jälkikuivaus. 2003–2007. Saatavissa: [www.scribd.com/doc/46399450/INFO-F110-Hakkeen-pienimuotoinen-jalkikuivaus](http://www.scribd.com/doc/46399450/INFO-F110-Hakkeen-pienimuotoinen-jalkikuivaus)
- (11) Holmberg, H. 2007. Biofuel Drying as a Concept to Improve the Energy Efficiency of an industrial CHP Plant. Espoo, Teknillinen korkeakoulu.

- (12) Motiva. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Polttoaineen kuivaustekniikat. Saatavissa:  
[www.motiva.fi/files/8499/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Polttoaineiden\\_kuivatut.pdf](http://www.motiva.fi/files/8499/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineiden_kuivatut.pdf) [Viitattu: 28.4.2014]
- (13) Kiinteiden biopolttoaineiden jalostus, kurssimateriaalia, Hannu Sarvelainen, marras-, joulukuussa 2013 (ei julkaistu)
- (14) Matti Pellinen. 26. huhtikuuta 1996. Mekaanisen metsäteollisuuden energianhankinnan vaihtoehdot. Saatavissa: [www.sll.fi/mpe/di/di.pdf](http://www.sll.fi/mpe/di/di.pdf) [Viitattu 28.4.2014]
- (15) Miettunen, sähköpostiliitteitä 08/2013 [Viitattu 13.1.2014, 28.2.2014 ja 28.4.2014]
- (16) Bioenergia Suomessa. 2000. Eri puupolttoaineiden ominaisuuksien vertailu. Saatavissa: [www.finbioenergy.fi/default.asp?SivuID=9210](http://www.finbioenergy.fi/default.asp?SivuID=9210) [Viitattu 28.4.2014]