

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Eriasteisesti jalostettujen puupolttoaineiden energia-  
hyötysuhteiden ja -talouden vertailu

Comparison of Efficiency and Economy for Wood Fuels  
of Different Extent of Processing

Työn tarkastaja: TkT Markku Nikku

Työn ohjaaja: TkT Markku Nikku

Lappeenranta 27.11.2017

Mika-Matti Raatikainen

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Mika-Matti Raatikainen

Kandidaatintyö 2017

Työn ohjaaja ja tarkastaja: TkT Markku Nikku

37 sivua, 13 kuvaa, 15 taulukkoa ja 2 liitettä

Hakusanat: hake, pelletti, kuivaus, torrefiointi, hyötysuhde

Tässä kandidaatintyössä lasketaan energiahyötysuhteet ja kustannusarviot kolmelle eriasteisesti jalostetulle puuperäiselle biopolttoaineelle. Työn tavoitteena on vertailla energiahyötysuhteiden ja tuotantokustannusten muuttumista jalostusvaiheiden välillä ja tällä tavoin selvittää jalostamisen energiataloudellista kannattavuutta. Työssä käytetään kirjallisuuslähteinä muun muassa bioenergia-alan tutkimusraportteja, kirjoja ja muita alan julkaisuja. Kustannuslaskennassa käytetään ensisijaisesti kotimaisia hintatietoja, mikäli sellaisia on saatavilla.

Vertailtavina polttoaineina työssä ovat kuivattu polttohake, puupelletti sekä torrefioidusta puusta valmistettu pelletti. Kaikki kolme ovat eriasteisesti jalostettuja biopolttoaineita, joita voidaan käyttää sähkön ja lämmön tuotantoon voimalaitoskäytössä. Samasta raaka-aineesta, tässä tapauksessa puusta, on mahdollista valmistaa erilaisia polttoaineita, joilla on toisistaan poikkeavia ominaisuuksia. Raaka-ainetta jalostamalla biomassan ominaisuuksia, kuten kosteuspitoisuutta tai lämpöarvoa, voidaan saada polttoainekäytön kannalta edullisemmiksi. On kuitenkin huomioitava, että jalostettaessa raaka-aineen sisältämästä massasta ja energiasta tapahtuu häviöitä ja että jalostusprosessi vaatii myös ulkopuolista energiaa. Pelkän energiahyötysuhteen avulla ei voida yksiselitteisesti määrittää, millaista polttoainetta puubiomassasta kannattaa valmistaa. Hyötysuhde kertoo prosessin energiatehokkuudesta, mutta raaka-ainetta jalostettaessa on otettava huomioon myös polttoaineelta vaadittavat ominaisuudet, sekä taloudellinen näkökulma.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Biopolttoaineen palaminen</b>	<b>7</b>
<b>3 Vertailtavat polttoaineet</b>	<b>9</b>
3.1 Polttohake.....	9
3.1.1 Hakkeen ominaisuudet.....	10
3.1.2 Hakkeen kuivaus.....	11
3.2 Puupelletti.....	12
3.2.1 Pelletin valmistaminen.....	12
3.2.2 Pelletin ominaisuudet.....	14
3.3 Torrefioitu pelletti.....	14
3.3.1 Torrefioidun pelletin valmistaminen.....	15
3.3.2 Torrefioidun pelletin ominaisuudet.....	16
<b>4 Energiahyötysuhteen laskenta</b>	<b>17</b>
4.1 Hakkeen kuivauksen energiahyötysuhde.....	17
4.2 Pelletin valmistamisen energiahyötysuhde.....	22
4.3 Torrefioidun pelletin valmistamisen energiahyötysuhde.....	22
4.4 Energiahyötysuhteiden vertailu.....	29
<b>5 Taloudellinen näkökulma</b>	<b>30</b>
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>33</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>35</b>
<b>Liite I</b>	Laskelmat hakkeen kuivauksen lämpöenergian tarpeesta
<b>Liite II</b>	Vertailtavien polttoaineiden tuotantokustannusten muodostuminen

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$E$	energia	MWh
$h$	ominaisentalpia	kJ/kg
$m$	massa	kg
$q_{des}$	desorptiolämpö	kWh/kg
$q_h$	höyrystymislämpö	MJ/kg
$q_p, \text{net, ar}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	MJ/kg
$q_p, \text{net, d}$	tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	MJ/kg
$Q$	polttoaineen energiasisältö	MWh
$T$	lämpötila	°C
$U$	kosteussuhde	
$x$	absoluuttinen kosteus	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>i</sub>
$X$	suhteellinen kosteus	

### Kreikkalaiset aakkoset

$\eta$	hyötysuhde	
$\Phi$	lämpöenergia	MWh

### Alaindeksit

ar	saapumistila
el	sähköenergia
H <sub>2</sub> O	vesi
hake	hake
i	ilma
ka	kuiva-aine
kostea	kostea hake
kuiva	kuiva hake
kuivaus	kuivausprosessi
pa	polttoaine
poisto	poistettava vesi
sisään	prosesiin sisään
th	terminen
tot	yhteensä

ulos prosessista ulos

### **Lyhenteet**

LHV tehollinen lämpöarvo

psk puun syiden kyllästymispiste

TOP torrefiointi ja pelletointi

## 1 JOHDANTO

Puuperäistä biomassaa käytetään polttoaineena sen helpon saatavuuden ja hiilidioksidineutraaliuden takia. Biomassaa hyödynnetään kuitenkin harvoin suoraan sellaisenaan, vaan se vaatii lähes aina jatkojalostusta. Yksinkertaisimmillaan se voi tarkoittaa puun pilkkomista polttokattilaan tai tulisijaan sopivaan kokoon. Jalostusta voidaan jatkaa aina biohiilen tuotantoon tai esimerkiksi pyrolyysiöljyn valmistamiseen. Jokainen jalostusvaihe aiheuttaa kuitenkin energiahäviöitä ja vaatii energiaa. Lisäksi biomassan jalostaminen vaatii enemmän taloudellisia resursseja, mitä pidemmälle jalostamista viedään.

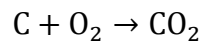
Biomassan jalostuksen tarkoituksena on muuntaa raaka-aineen ominaisuuksia polttoainekäytön kannalta edullisempaan suuntaan. Ominaisuuksia, joihin polttoainetta jalostettaessa halutaan kiinnittää huomiota, ovat esimerkiksi lämpöarvo, kosteus sekä varastointiominaisuudet. Raaka puubiomassa on käsittelemättömänä kosteaa ja harvoin tasalaatuista, joten poltto-ominaisuuksien kannalta jalostamisella voidaan saavuttaa hyötyä. Jalostamisella voidaan lisäksi saada polttoaineen energiasisältö pienempään tilavuuteen ja ehkäistä biologista hajoamista, jotka puolestaan helpottavat polttoaineen varastointia.

Tässä työssä keskitytään vertailemaan kolmea eri asteisesti jalostettua polttoaineena käytettävää puubiomassaa. Vähän jalostettua biomassaa edustaa metsähake. Pidemmälle jalostetuista puuperäisistä biopolttoaineesta vertailtavina ovat puupelletti ja torrefioidusta puusta valmistettu pelletti. Työn tavoitteena on vertailla valittujen polttoaineiden energiahyötysuhdetta sekä taloudellista kannattavuutta polttoaineen tuottajan näkökulmasta.

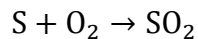
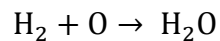
## 2 BIOPOLTTOAINEEN PALAMINEN

Palamisreaktiossa polttoaine reagoi palamisilman hapen kanssa tuottaen lämpöä. Puuperäiset biopolttoaineet koostuvat kuiva-aineesta sekä vedestä. Tuore puu sisältää vettä noin 50–60 %. Kuiva-aine pitää sisällään haihtuvat aineet, kiinteän hiilen sekä epäorgaanisen aineksen eli tuhkan. Kuiva-aine koostuu pääasiassa hiilestä, vedystä ja hapesta. Näiden kolmen alkuaineen osuus jalostamattoman puun kuiva-aineen massasta on noin 99 %. Lisäksi puu sisältää typpeä, jonka osuus on alle prosentin verran, sekä rikkiä (< 0,05 %) ja klooria (< 0,03 %). Hiilen osuus on tavallisesti noin puolet polttoaineen massasta. (Alakangas et al. 2016, 56.)

Palamisreaktiossa polttoaineen hiili reagoi hapen kanssa, jolloin lopputuotteeksi tulee hiilidioksidia.



Myös vety ja rikki reagoivat hapen kanssa muodostan vettä ja rikkidioksidia.



Käytännössä hiili ja happi eivät aina reagoi täydellisesti muodostaen hiilidioksidia, vaan palamisessa syntyy myös hiilimonoksidia eli häkää. Polttoaineen sisältämän hapen reagointi palamisreaktiossa ei eroa palamisilman hapesta, joten sen voidaan ajatella korvaavan osa laskennallisesta palamisilman tarpeesta. (Vakkilainen 2016, 37-38.) Teoreettisessa tarkastelussa polttoaineen ja palamisilman sisältämä typen ei oleteta reagoivan, mutta käytännössä osa tuestä reagoi hapen kanssa muodostaen typen oksideja. Typen oksidien muodostuminen on voimakasta erityisesti korkeissa polttolämpötiloissa.

Biopolttoaineen palaminen muodostuu neljästä palamisen vaiheesta. Vaiheet ovat polttoaineen kuivuminen, haihtuvien palaminen, hiiltojäännöksen palaminen ja tuhkaraktiot. Kuivumisvaiheessa vesi höyrystyy pois polttoainepartikkelista. Polttokattilan olosuhteissa kuivuminen on nopea tapahtuma. 2 mm kokoisen biomassakappaleen kuivuminen kestää 0,05–0,2 sekuntia. Kuivumisen jälkeen alkaa polttoaineen haihtuvien kaasujen vapautuminen. Lämpötilan noustessa biopolttoaineesta

vapautuu kevyitä kaasuja, kun pienimolekyyliset yhdisteet kaasuuntuvat ja hajoavat pienemmiksi yhdisteiksi. Puupolttoaineesta vapautuu muun muassa hiilidioksidia, hiilimonoksidia, metaania sekä erilaisia tervayhdisteitä. Kun vapautuneet palavat kaasut syttyvät, syntyy näkyvä liekki. (Vakkilainen 2016, 33–35.) Horttanaisen (1999, 7) mukaan puuperäisen polttoaineen kuiva-aineesta 80–95 % vapautuu haihtuvina kaasuina.

Haihtuvien palamisen jälkeen suurin osa biomassan hiilestä on palanut. Polttoaineen lämpötilan noustessa edelleen alkaa hiiltojäännöksen palaminen. Jäännöshiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. Hiili reagoi hitaasti hapen kanssa, ja tämä vaihe kestää yleensä kuivumista ja haihtuvien palamista kauemmin. (Vakkilainen 2016, 33–35). Käytännössä haihtuvien sekä jäännöshiilen palamista tapahtuu samassa kappaleessa myös päällekkäin (Horttanainen 1999, 7).

Kun polttoaineen sisältämä hiili on palanut, jäljelle jää palamatonta tuhkaa. Tuhkassa voi tapahtua kemiallisia reaktioita, kuten hapettumista, epäorgaanisten aineiden välillä (Vakkilainen 2016, 33).



### 3 VERTAILTAVAT POLTTOAINEET

Tässä työssä käytettävät polttoaineet valitaan edustamaan eriasteisesti jalostettuja puupolttoaineita. Rajaamalla tarkastelu puuperäisiin polttoaineisiin, on mahdollista vertailla samasta raaka-aineesta valmistettuja polttoaineita, joiden ominaisuudet kuitenkin poikkeavat toisistaan. Vertailtavat polttoaineet ovat polttohake, puupelletti ja torrefioidusta puusta valmistettu pelletti. Polttoaineiden valinnan kriteerinä oli myös se, että kaikkia niitä voidaan käyttää voimalaitoskäytössä sähkön tai lämmöntuotantoon.

Polttohake on vähän jalostettu vaihtoehto puuperäisen polttoaineen käyttöön. Vähäinen jalostus takaa sen, ettei polttoaineen raaka-aineen energiasisällöstä häviä merkittävää osaa ennen sen käyttöä. Lisäksi jalostusprosessin energiankulutus pysyy matalana. Hakkeen vähäinen esikäsittely tarkoittaa kuitenkin sitä, että sillä on myös selkeitä heikkouksia polttoainekäytössä esimerkiksi varastointiin ja tasalaatuisuuteen liittyen. Pelletti ja torrefioitu pelletti tarjoavat tasalaatuisemman vaihtoehdon ja usein käyttäjän kannalta helpomman vaihtoehdon puupolttoaineiden joukosta. Jalostuksella pystytään parantamaan niin käsittelyyn, kuin polttamiseen liittyviä ominaisuuksia.

Pienistä kappaleista muodostuvia polttoaineiden, kuten hakkeen tai pelletin, tilavuuksia käsiteltäessä on tärkeää huomioitava käytettävä tilavuuden yksikkö. Irtokuutiometri (i-m<sup>3</sup>) tarkoittaa kuutiota, jossa on huomioitu yksittäisten kappaleiden väliin jäävä tila. Kiintokuutiometri (k-m<sup>3</sup>) puolestaan huomioi pelkän kiinteän aineen ja ei siten ole riippuvainen partikkelien tiiviyydestä toisiinsa nähden.

#### 3.1 Polttohake

Polttohakkella tarkoitetaan puuaineksesta valmistettua polttoainetta, joka on pilkottu hakkurilla haluttuun palakokoon. Haketta voidaan valmistaa monenlaisesta puuaineksesta. Raaka-aineella on suuri vaikutus hakkeen ominaisuuksiin.

Hakkuutähteestä valmistettu hake on koostumukseltaan monimuotoista. Hakkuukohteesta riippuen hakkuutähteet sisältävät alle ainespuukokoisia latvoja ja oksia, mutta mahdollisesti myös hylkypölkkyjä. (Alakangas et al. 2016, 68.) Hakkuutähdehake

sisältää paljon neulasia tai lehtiä, joiden sisältämä viheraine lisää kattilan lämpöpintojen likaantumista ja kuumakorroosiota (Alakangas et al. 2016, 75).

Kokopuuhake valmistetaan karsimattomista rangoista, eli siinä on mukana rungon lisäksi oksat, puun kuori ja neulaset tai lehdet. Kokopuuhakkeeseen käytetään yleensä runkohukkapuuta tai teollisuuskäyttöön sopimatonta pienpuuta. Hakkuutähdehakkeeseen verrattuna kokopuuhake on tasalaatuisempaa ja sisältää suhteessa vähemmän neulasia tai lehtiä ja enemmän runkopuuta. (Alakangas et al 2016, 75.)

Rankahakkeella tarkoitetaan karsitusta runkopuusta valmistettua haketta. Käytetty puu on normaalisti runkohukkapuuta, joka on jäänyt käyttämättömänä metsään korjuun tai metsänhoitotöiden yhteydessä. Rankahake ei sisällä metsätähde- ja kokopuuhakkeen tapaan lehtiä tai neulasia, mutta siinä on yleensä mukana puun kuorta. (Vapo Oy, 2017.)

### 3.1.1 Hakkeen ominaisuudet

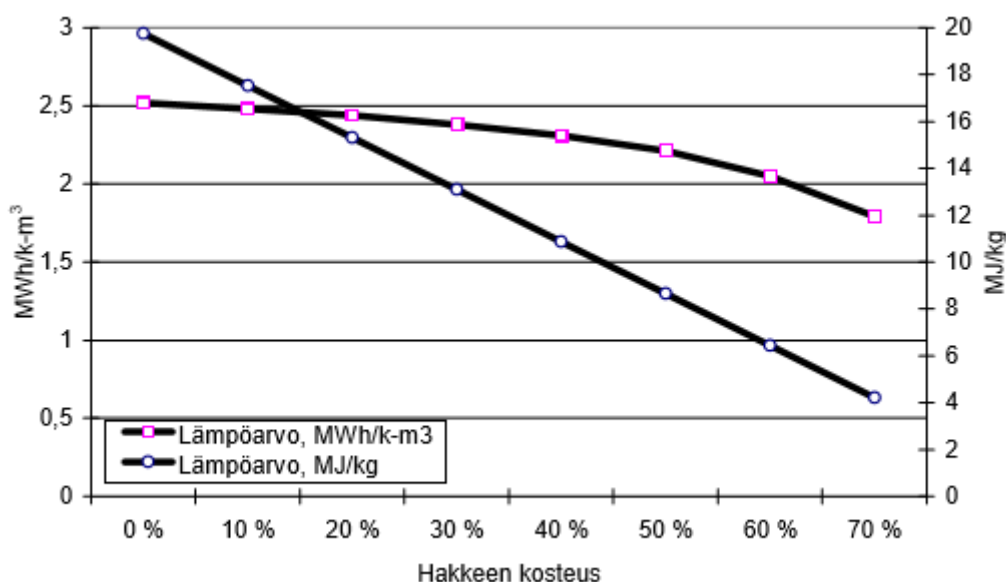
Kun haketta käytetään polttoaineena, sen merkittävin ominaisuus on lämpöarvo. Tärkein lämpöarvoon vaikuttava tekijä on kosteus. Kosteus vaihtelee merkittävästi käytettävän puumassan ja vuodenajan mukaan. Tavallisesti kosteus kaatotuoreella puulla on 50–60 %. Kosteuden lisäksi teholliseen lämpöarvoon vaikuttavat polttoaineen kemiallinen koostumus, tuhkapitoisuus, puuaineksen tiheys sekä neulasten osuus hakkeen seassa. (Hillebrand 2009, 12.)

Hakkeen palakoolla on merkitystä käytettävyyden kannalta. Yleistäen voidaan sanoa, että suurissa kattiloissa, kuten esimerkiksi leijupetikattiloissa, palakoon merkitys ei ole yhtä suuri kuin pienemmän kokoluokan polttokattiloissa. Suuret polttimet ja niiden syöttölaitteet pystyvät käyttämään karkeampaa haketta ja pienemmät laitteet vaativat pienemmän palakoon (Roitto 2014, 22). Palakoko voi vaikuttaa prosessin toimivuuteen kuljetuksen ja varastoinnin aikana. Hienoaines tai ylisuuret kappaleet saattavat tukkia polttoainekuljettimia ja täten aiheuttaa häiriöitä polttoaineen syötössä. (Etelätalo 2013, 14.) Roiton (2014, 22) mukaan puuta hakettaessa hakepalan keskipituudeksi valitaan tavallisesti 30–40 mm. Palakokoa on kuitenkin vaikea saada täysin tasaiseksi, ja sekaan muodostuu aina hieman haluttua pienempiä ja suurempia palasia.

Neulaspitoisuus on otettava huomioon, kun tarkastellaan havupuusta valmistetun hakkeen ominaisuuksia. Neulasia sisältävän hakkuutähdehakkeen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on hieman suurempi kuin vastaavan hakkeen lämpöarvo ilman neulasia. Ero on kuitenkin pieni, sillä männystä valmistetun hakkeen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on neulasten kanssa 20,5 MJ/kg ja ilman neulasia 20,4 MJ/kg. Jos hake valmistetaan kuusesta, lämpöarvo neulasineen on 19,8 MJ/kg ja ilman neulasia 19,7 MJ/kg. (Alakangas et al. 2016, 64.) Neulaset sisältävät klooria ja alkalimetalleja, jotka altistavat voimalaitoskattiloiden tulistinpinnoille korroosiolle. Tämän vuoksi korkea neulaspitoisuus polttohakkeessa ei ole yleisesti toivottu asia. (Hillebrand 2009, 7.)

### 3.1.2 Hakkeen kuivaus

Ennen hakkeen käyttöä polttoaineena, sen palamisominaisuuksiin vaikuttaminen on mahdollista. Veden höyrystyminen palaessa vaatii energiaa, joten hakkeen tehollista lämpöarvoa voidaan kasvattaa kuivaamalla haketta (Hillebrand 2009, 11). Kuvan 3.1 mukaan hakkeen, jonka kosteus on 50 %, tehollinen lämpöarvo on noin 8,5 MJ/kg. Kuivaamalla hakkeen kosteuspitoisuus 20 %:iin lämpöarvoksi saadaan noin 15 MJ/kg.



**Kuva 3.1.** Hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/k-m<sup>3</sup> tai MJ/kg) (Alakangas 2000, 53).

Kosteaa polttoainetta palaa epätäydellisemmin kuin kuiva ja sen palamislämpötila on matalampi, joten hakkeen kosteus vaikuttaa osaltaan palamisen hyötysuhteeseen. Lisäksi

poltettaessa syntyvät hiilimonoksidi, hiilivety ja hiukkaspäästöt lisääntyvät kosteuden myötä. Kosteus ei yleensä ole ongelma suuren kokoluokan polttolaitoksilla, mutta pienemille kattiloille suositellaan kuivaa polttoainetta polton ongelmattomuuden saavuttamiseksi. (Etelätalo 2013, 20.)

Hakkeen kuivaus voidaan suorittaa ympäristön lämpötilassa kylmäkuivauksena tai kuivauksessa voidaan käyttää ulkopuolelta tuotua lämpöenergiaa. Kylmäkuivauksessa voidaan hyödyntää auringon lämpöä. Useimmiten kuivaukseen käytetään puhaltimia, joiden avulla kuivausilma puhalletaan hakevaraston alle rakennetuista ilmanavista hakekerroksen läpi. Lämminilmakuivaukseen käytettäviä menetelmiä on rumpukuivaus, patjakuivaus, pneumaattinen kuivaus ja kaskadikuivaus. Lämminilmakuivaukselle tyypillinen ongelma on palovaara, minkä lisäksi kuivauksen energiankulutus voi olla suuri. Etuja on nopea kuivuminen sekä pienemmän kosteusprosentin saavuttaminen. (Etelätalo 2013, 27-33.)

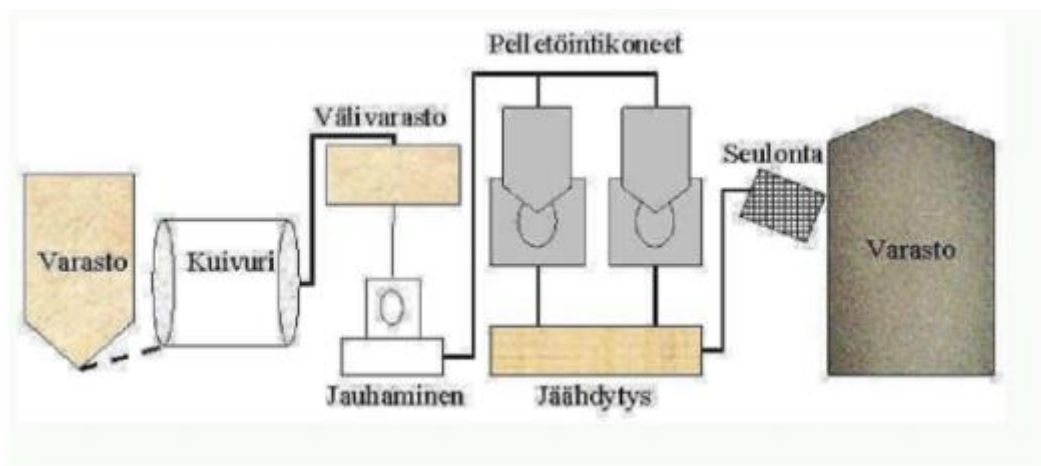
## **3.2 Puupelletti**

Puupelletit valmistetaan puristamalla raaka-aine tiiviiksi, yleensä lieriön muotoiseksi rakeeksi. Pelletin halkaisija on 8–12 mm ja pituus 10–30 mm. (Alakangas et al. 2016, 96). Pelletit sopivat omakotitalojen ja vastaavien pienien kiinteistöjen lämmitykseen, kuin myös sähkön ja lämmön tuotantoon teollisuusmittakaavassa. Vuonna 2014 Suomessa kulutettiin 240 000 tonnia pellettiä, joista yli 75 % käytettiin voimalaitoksissa tai vastaavissa suuren kokoluokan laitoksissa. (Energiateollisuus ry 2015.)

Pelletin raaka-aineena voidaan käyttää esimerkiksi haketta, sahanpurua tai peltobiomassaa. Valittu raaka-aine vaikuttaa pelletin ominaisuuksiin, kuten lämpöarvoon sekä tuhkapitoisuuteen. Raaka-aineen biomassan käyttöön verrattuna pelletöinnin etuja on korkeampi energiatiheys ja usein paremmat kuljetus- ja varastointiominaisuudet. (Ciolkosz 2017.)

### **3.2.1 Pelletin valmistaminen**

Pelletin valmistusprosessi jakautuu karkeasti kolmeen osaan, raaka-aineen käsittelyyn, pelletöintiin ja varastointiin. Kuvassa 3.2 esitetään pelletöinnin keskeisimmät vaiheet kaaviomuodossa.



**Kuva 3.2.** Pelletin valmistuksen vaiheet (Bioenergia ry, 2017).

Raaka-aineen kosteus pelletin valmistuksessa on oltava noin 10–15 %. Pelletöintilaitokselle tuotava raaka-aine on yleensä huomattavasti kosteampaa, joten se kuivataan sopivaan kosteuteen ns. esikuivurissa. Tyypillisesti käytetään rumpukuivainta. Kun raaka-aine on tarpeeksi kuivaa, se jauhetaan vasaramyllyssä tasalaatuisiksi pölyksi. Ennen puristusvaihetta pelletin raaka-aine syötetään pelletöintikoneen sekoituskammioon. Siellä sen joukkoon voidaan lisätä esimerkiksi sideaineita. Lisäaineiden osuus pelletin massasta on hyvin pieni, ja yleensä niillä ei ole merkittävää vaikutusta pelletin poltto-ominaisuuksiin. (Bioenergia ry 2017). Puuperäisen materiaalin luonnostaan sisältämä ligniini toimii puristettaessa sideaineena, joten puupelletit pysyvät helpommin kasassa ja vaativat vähemmän lisäaineita kuin esimerkiksi peltobiomassasta valmistetut pelletit (Ciolkosz, 2017). Puristus tapahtuu syöttämällä raaka-ainemassa pellettipuristimen matriisin läpi. Matriisi on teräksinen, yleensä rengasmainen tai tasolevyn muotoinen kappale, johon on porattu reikiä pelletin puristuskanaviksi. Kun pelletin raaka-ainetta työnnetään kanavaan, se lämpenee, jolloin puuaineksen ligniini pehmenee ja sitoo raaka-ainemateriaalin kasaan. Kun kokoon puristunut massa tulee ulos matriisin toiselta puolelta, se katkaistaan halutun mittaisiksi pelleteiksi. (Aalto 2014, 5). Pelletöintikoneesta poistuessaan pelletit jäähdytetään, jotta ne kovettuvat. Jäähdyneet ja kovettuneet pelletit seulotaan, jotta polttoaineesta saadaan tasakokoista. Hienoaineksen seulontaan käytetään yleisesti täryseulaa. (Bioenergia ry 2017.)

### 3.2.2 Pelletin ominaisuudet

Pelletin lämpöarvo vaihtelee siihen käytetyn raaka-ainepuulajin ja -osan mukaan. Hakkuutähdehakkeesta valmistetun pelletin tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on noin 18,5–19,5 MJ/kg. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on 14–17,5 MJ/kg. Kalorimetrinen lämpöarvo on hieman raaka-ainetta alhaisempi johtuen kuivauksessa haihtuvista palavista kaasuista. Pelletin kosteus on tyypillisesti noin 10 %. (Lehtikangas 2001, 356.)

Pellettipolttoaineen irtotiheys saapumistilassa on 640–690 kg/i-m<sup>3</sup> ja energiatiheys 3,0–3,3 MWh/i-m<sup>3</sup> (Alakangas et al. 2016, 96). Vastaavasti puuhakkeen tiheys on 250 – 400 kg/i-m<sup>3</sup> ja energiatiheys 0,7–0,9 MWh/i-m<sup>3</sup> (Alakangas et al. 2016, 205), joten pelletointi mahdollistaa saman energiamäärän tuottamiseen vaadittavan polttoaineen varastoinnin huomattavasti haketta pienempään tilaan.

Pelletin varastoinnin ja kuljetuksen kannalta mekaaninen kestävyys on merkittävä ominaisuus. Pellettejä käsiteltäessä niihin kohdistuu puristavia ja taivuttavia voimia, jotka voivat vahingoittaa pellettiä. Rikkoontuessaan pelletistä irtoaa hienoainesta, joka voi aiheuttaa ongelmia käytön yhteydessä. Pölymäinen aines on myös terveysriski. Pelkästä hakkeesta valmistetun pelletin puristuslujuus on 700–800 N ja taivutuslujuus noin 5–10 N. Lujutta voidaan kasvattaa lisäämällä hakkeen joukkoon sidostavia ainesosia, esimerkiksi kaoliinia tai perunamäskiä. Riippuen sidostavan aineksen määrästä puristuslujuus ja taivutuslujuus kasvavat merkittävästi. (Jokinen et al. 2013, 7–8.) Puupelletti kestää huonosti kosteutta, sillä kostuessaan pelletti pehmenee ja sen rakenne hajoaa (Alakangas et al. 2016, 96).

### 3.3 Torrefioitu pelletti

Torrefiointi on termokemiallinen käsittely, jossa biomassaa kuumennetaan 250–300 °C lämpötilassa ja hapettomissa olosuhteissa. Käsittelyssä biomassasta haihtuu kosteutta sekä palavia kaasuja. Torrefionnin aikana biomassan massasta noin 30 % konvertoituu torrefiointikaasuiksi, mutta biomassan sisältämästä energiasta 90 % säilyy kiintoaineessa. Massan pienentyessä energiasisältöä enemmän torrefiointi parantaa biomassan energiatheyttä. (Bergman 2005, 12–13.)

Toisin kuin massa, tilavuus ei kuitenkaan merkittävästi pienene, joten energiasisältö tilavuusyksikköä kohtaan ei parane. Torrefioidun biomassan pelletöinnillä polttoaine saadaan tiheämpään muotoon. (Bergman 2005, 12–13.) Yhdistämällä torrefiointi ja pelletöinti (TOP-prosessi) molempien menetelmien edut saadaan yhdistettyä polttoaineeseen (Bergman & Kiel 2005, 3).

### 3.3.1 Torrefioidun pelletin valmistaminen

Torrefioidun pelletin valmistaminen alkaa poistamalla biomassasta, tässä tapauksessa puuhakkeesta, ylimääräinen kosteus. Kuivausvaiheessa puun lämpötila on 100–200 °C, eli torrefiointireaktio ei vielä ala. Laitteistosta riippuen kuivaus voi tapahtua samassa reaktorissa kuin torrefiointi, tai vaihtoehtoisesti se voidaan tehdä erillisellä laitteistolla. (Föhr et al. 2015, 10–13.) Kummennettaessa biomassaa 250–300 °C:n torrefiointilämpötilaan, puuaineksessa tapahtuu muutoksia sen kemiallisessa rakenteessa. Puun sisältämä hemiselluloosa reagoi voimakkaasti torrefiointilämpötilassa muodostaen palavia kaasuja. Suurin osa biomassan massan pienenemisestä selittyy hemiselluloosan hajoamisella. Hemiselluloosan hajoamista tapahtuu lämpötilan ollessa 130–260 °C, mutta palavien kaasujen vapautumista tapahtuu voimakkaimmin lämpötilan ollessa yli 180 °C. Muista puun polymeereistä selluloosan ligniinin hajoaminen alkaa korkeammissa lämpötiloissa, joten torrefioidussa se ei reagoi yhtä voimakkaasti kuin hemiselluloosa. (Tumuluru et al. 2012, 217; Bergman et al. 2005, 14.)

Pelletin valmistaminen torrefioidusta biomassasta ei eroa merkittävästi normaalista pelletöintiprosessista. Torrefioitu biomassaa ei vaadi erillistä kuivausta ennen pelletöintiä. Raaka-aineen hienontaminen vaatii vähemmän energiaa kuin tuoreella puulla, sillä torrefioitaessa osa puun sidosaineista on hajonnut. Torrefioinnin olosuhteista riippuen hienontamisen energiankulutus vähenee 70–90% (Bergman 2005, 16).

Hemiselluloosan hajoamisen takia puun ligniinipitoisuus on noin 10–15 % suurempi torrefioinnin jälkeen käsittelemättömään puuainekseen verrattuna (Bergman 2005, 18). Korkea ligniinipitoisuus helpottaa sidostenmuodostumista ja pellettien valmistuksessa ei välttämättä tarvita lisättyjä sidosaineita (Kiel 2013).

Torrefiointiprosessissa biomassasta erittyy kaasuja, joita voidaan mahdollisesti hyödyntää prosessissa polttamalla. Torrefiointikaasu sisältää vettä, hiilidioksidia, hiilimonoksidia sekä hiilivetyjä, kuten etaanihappoa. Kaasu sisältää myös pieniä määriä vetyä ja metaania. (Föhr et al. 2015, 8; Tumuluru et al. 2012, 219–220.)

### 3.3.2 Torrefioidun pelletin ominaisuudet

TOP-pelletissä yhdistyvät torrefioidun biomassan ja normaalin pelletin ominaisuudet. Torrefioidun pelletin palamisominaisuuksiin vaikuttavat käytetty raaka-aine sekä torrefiointiaste. Torrefiointi nostaa lopputuotteen lämpöarvoa. Torrefioidun pelletin tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on 19,9–21,6 MJ/kg ja kuiva-aineessa 20,4–22,7 MJ/kg. (Bergman 2005, 18.) Verrattuna käsittelemättömän puuhakkeen tai tavallisen pelletin lämpöarvoon, torrefioidun pelletin lämpöarvo on korkein. Torrefioidun pelletin kosteus on hyvin alhainen, noin 1–6 %. (Bergman et al. 2005, 20.)

Pelletöinnillä saavutetaan suurempi irtotiheys sekä energiatiheys verrattuna torrefioituun biomassaan ilman pelletöintiä. Torrefioidun pelletin irtotiheys on 750–850 kg/i-m<sup>3</sup>, kun ilman pelletöintiä se olisi noin 230 kg/i-m<sup>3</sup>. Vastaavasti energiatiheys nousee 300–400 % ollen 4,1–5,1 MWh/m<sup>3</sup>, kun ilman pelletöintiä se on noin 1,3 MWh/m<sup>3</sup>. (Bergman 2005, 18.) Pelletöinti vähentää polttoaineen tilantarvetta varastoinnin ja kuljetuksen aikana, mikä vaikuttaa niiden kustannuksiin pienentävästi. Myös pölyn muodostuminen vähenee huomattavasti. (Bergman 2005, 18.)

Torrefioidun pelletin mekaaninen puristuskestävyys on 1,5–2 kertainen verrattuna tavalliseen pellettiin. Puumateriaalin kuumetessa torrefiointikäsitelyssä sen polymeerien sidokset hajoavat ja heikkenevät, jolloin niiden rakenne muuttuu kuitumaisesta joustavammaksi. Kuumennus edesauttaa myös puun rasvahappoja toimimaan sidosaineena. Hyvä mekaaninen kestävyys ehkäisee niiden murtumista kuljetettaessa ja varastoitaessa. (Bergman 2005, 18.)



## 4 ENERGIAHYÖTYSUHTEEN LASKENTA

Polttoaineen jalostamisen energiahyötysuhdetta  $\eta$  laskiessa verrataan prosessista hyödyksi saatavaa energiamäärää prosessiin laitettavaan energiaan. Tavallisesti jalostusprosessiin viedään energiaa raaka-aineen energiasisällön muodossa  $Q_{\text{sisään}}$ , sekä prosessin vaatimana lämpö- tai sähköenergiana,  $\phi$  ja  $E_{\text{el}}$ . Hyödyksi saadaan jalostetun polttoaineen sisältämä energia  $Q_{\text{ulos}}$ . Jalostettaessa polttoaineen ominaisuuksia, kuten tehollista lämpöarvoa ja energiatiheyttä pyritään parantamaan. Prosessissa osa raaka-aineen energiasta ja massasta kuitenkin menetetään häviöinä.

$$\eta = \frac{Q_{\text{ulos}}}{Q_{\text{sisään}} + \phi + E_{\text{el}}} \quad (4.1)$$

Tämän luvun laskelmissa lasketaan jalostusprosesseille termiset hyötysuhteet, eli sähköenergian kulutus jätetään huomioimatta. Sähköenergian kulutus vaihtelee merkittävästi esimerkiksi prosessissa käytettävien laitteiden tyyppin mukaan, joten vertailukelpoisten tulosten saaminen on vaikeaa. Luvussa 4.4 esitetään suuntaa antavat energiahyötysuhteet, joissa sähkön kulutuksen osuus on mukana. Sähköenergian kulutuksen arviona käytetään eri kirjallisuuslähteiden antamien lukujen keskiarvoa.

### 4.1 Hakkeen kuivauksen energiahyötysuhde

Polttohakkeen kuivauksen energiahyötysuhteen laskenta tapahtuu laskemalla kostean hakkeen, eli prosessiin vietävän raaka-aineen, sekä kuivatun hakkeen, eli prosessista saatavan polttoaineen energiasisällöt. Näiden lisäksi tarvitaan kuivausprosessin vaatima energiamäärä. Hake-erän sisältämä energiamäärä  $Q$  megawattitunteina saadaan käyttämällä yhtälöä 4.2 (Alakangas et al. 2016, 31).

$$Q = \frac{q_{p,\text{net},\text{ar}}}{3600} m \quad (4.2)$$

Jossa	$q_{p,\text{net},\text{ar}}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	[MJ/kg]
	$m$	massa	[kg]

Kuivaamiseen kuluvan energiamäärän laskemiseen käytetään kosteussuhdetta  $U$ . Kosteussuhde kuvaa puussa olevan veden massan suhdetta kuiva-aineen massaan (Härkönen 2012, 9-10).

$$U = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{ka}}} \quad (4.3)$$

Kosteussuhteen ja kosteuden välillä on yhtälön 4.4 mukainen riippuvuus (Härkönen 2012, 9-10).

$$U = \frac{X}{1-X} \quad (4.4)$$

Härkösen (2012, 10) mukaan vesi voi olla sitoutunut puuhun joko puuonteloiden välisiin seinämiin ”sidottuna vetenä” tai ”vapaana vetenä” itse soluonteloissa. Sidotun veden poistaminen vaatii enemmän energiaa kuin vapaan veden poisto. Rajana, jolloin puun soluonteloiden seinämät ovat veden kyllästämät, mutta soluonteloissa ei vapaata vettä enää ole, käytetään kotimaiselle puulle usein kosteussuhdetta 0,30. Kun kosteussuhde laskee tämän rajan alle, saman vesimäärän poistaminen vaatii siis enemmän energiaa kuin kosteammasta puusta. Poistettavan veden määrän selvittämiseksi lasketaan ensin, kuinka paljon vettä täytyy poistaa puun syiden kyllästymispisteen (psk) kosteussuhteen saavuttamiseksi. Yhtälöitä 4.3 ja 4.4 hyödyntämällä poistettavan veden massalle saadaan yhtälö

$$m_{\text{poisto}} = X m_{\text{hake}} - U_{\text{psk}}(1 - X)m_{\text{hake}} \quad (4.5)$$

Ennen psk-rajakosteuden saavuttamista jokaisen vesikilon poistaminen puusta vaatii saman verran energiaa. Veden höyrystymislämpö  $q_h$  25 °C:n vertailulämpötilassa on 2,443 MJ/kg eli 0,68 kWh/kg. Tällöin tarvittava energiamäärä saadaan yhtälön 4.6 avulla.

$$\phi = q_h m_{\text{poisto}} \quad (4.6)$$

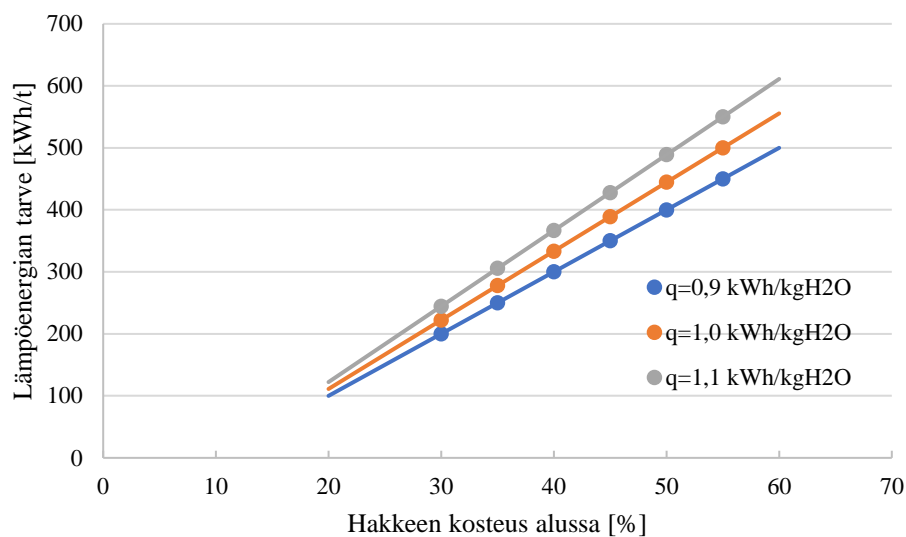
Kuivaaminen puun syiden kyllästymispisteen jälkeen vaatii energiaa huomattavasti enemmän kuin vapaan veden poisto. Härkönen (2012, 13) esittää veden haihduttamiseen psk-pisteen jälkeen noudattavan yhtälöä 4.7. Siinä oletetaan, että tarvittavan lämmön riippuvuus kosteussuhteesta on lineaarinen ja desorptiolämmön olevan kolminkertainen höyrystymislämpöön verrattuna kosteussuhteen ollessa nolla.

$$q_{\text{des}} = 2,036 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} - 4,524 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \bar{U} \quad (4.7)$$

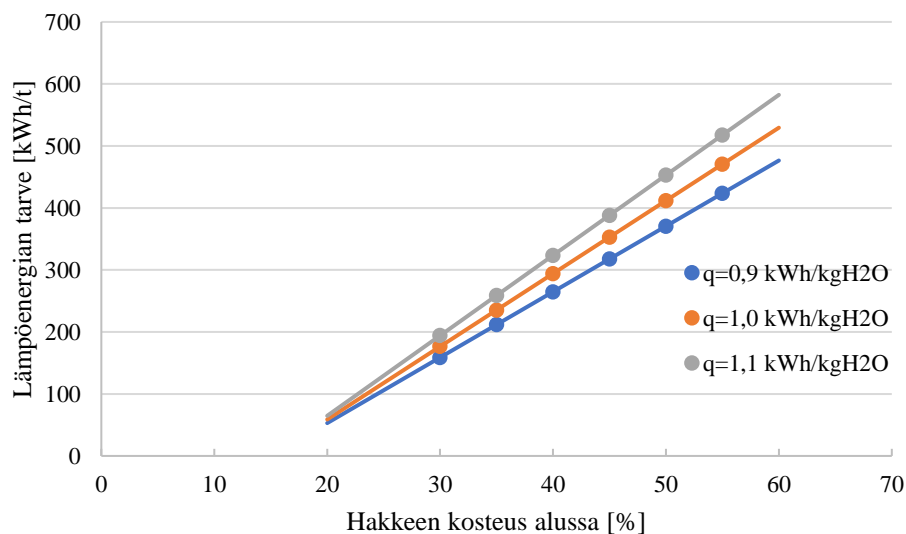
missä  $\bar{U}$  alku- ja lopputilan kosteussuhteiden keskiarvo [-]

Haihdutettavan veden massa saadaan yhtälöllä 4.5. Kosteussuhteena yhtälössä käytetään nyt lopputilan kosteussuhdetta. Laskennassa täytyy ottaa huomioon, että hakkeen massa on pienentynyt aikaisemmin haihdutetun veden massan verran. Poistettavan veden massan ollessa tiedossa, voidaan psk-pisteen jälkeisen kuivaamisen vaatima energiamäärä laskea yhtälöllä 4.6. Veden höyrystymislämmön paikalla käytetään nyt yhtälöstä 4.7 saatua desorptiolämpöä. Kuivatusta hakkeesta poltettaessa saatava energiamäärä lasketaan yhtälön 4.2 mukaan.

Hakkeen kuivaaminen tapahtuu useimmiten puhallettavalla ilmalla. Tällöin kuivauksen energiankulutuksen suhteen avainasemassa on ilman kyky sitoa kosteutta. (Roitto 2014, 57.) Ilman kosteudensitomiskykyyn vaikuttavat kuivauksessa käytetyn ilman absoluuttinen kosteus sekä kuivauslämpötila. Nämä määrittävät sen, kuinka paljon ilma voi sitoa kosteutta hakkeesta, ennen kuin se saavuttaa 100 % suhteellisen kosteuden. Ulkoilman kosteudella onkin suuri merkitys kuivausprosessin energiankulutukseen. (Vigants et al. 2015, 320.) Roiton (2014, 59–60) mukaan kirjallisuudessa esitetään hakkeen kuivauksen ominaislämpöenergiankulutukseksi 0,85–1,61 kWh/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>. Vaihtelua aiheuttaa erilaiset kuivurityypit ja kuivaustavat. Yleisimmin lämmönkulutukseksi arvioidaan 1,0 kWh/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ± 10 %. Tätä arviota tukevat myös liitteessä I esitettävät laskelmat. Kuvissa 4.1 ja 4.2 on hakkeen kuivauksen lämpöenergian tarpeet, kun loppukosteus on kuvan 4.1 tapauksessa 10 % ja kuvan 4.2 tapauksessa 15 % ja raaka-ainetta on 1000 kg. Lämmön tarpeet on molemmissa tapauksissa laskettu kolmella eri ominaislämmönkulutuksen arviolla.



**Kuva 4.1.** Haketonnin kuivaamisen lämpöenergian tarve hakkeen kosteuden funktiona loppukosteuden ollessa 10 %. Viivat kuvaavat lämpöenergian kulutusta eri ominaislämmönkulutuksen arvoilla.

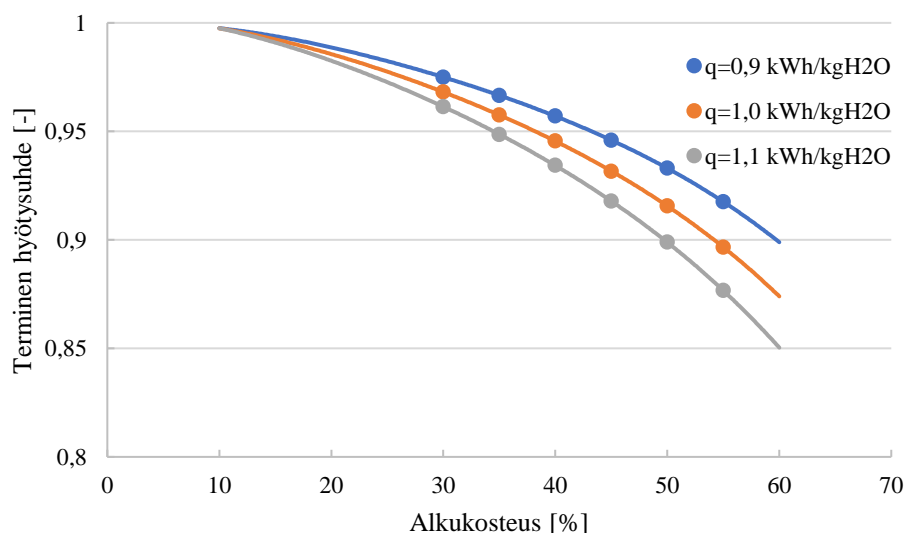


**Kuva 4.2.** Vastaavat lämpöenergiatarpeet, kun hakkeen loppukosteus on 15 %.

Kuvissa 4.1 ja 4.2 esitetyt lämpöenergiatarpeet kuvaavat sitä lämpömäärää, joka hakkeen kuivaamiseen teoreettisesti kuluu. Todellisuudessa kaikkea lämpöä ei saada kuitenkaan siirrettyä kuivausilmaan, joten lämmöntarve lisääntyy, kun huomioidaan kuivurin lämpöhyötysuhde. Oletetaan hyötysuhteeksi 0,8. Roitto (2014, 65) käyttää samaa hyötysuhdetta laskelmissaan. Hakkeen kuivauksen terminen energiahyötysuhde saadaan yhtälöstä

$$\eta_{th} = \frac{Q_{kuiva}}{Q_{kosteaa} + \frac{\phi_{kuivaus}}{\eta_{kuivaus}}} \quad (4.8)$$

Kuivauksen energiahyötysuhde hakkeen alkukosteuden funktiona esitetään kuvassa 4.3. Kuvassa esitetyssä tapauksessa loppukosteus kuivauksen jälkeen on 10 %. Energiahyötysuhde paranee sitä mukaa, mitä vähemmän kosteutta hake alun perin sisältää. Hyvin kostean, kaatotuoreesta puusta valmistetun hakkeen kosteus on noin 50–60 %. Tällaisen hakkeen kuivaamisen energiahyötysuhde on 0,85–0,93. Käyttämällä kuivausprosessissa seisotettua, luonnonkuivaamaa puuta, jonka kosteus on laskenut 30–35 %:in, koneellisen kuivauksen energiahyötysuhde nousee yli 0,95:n.

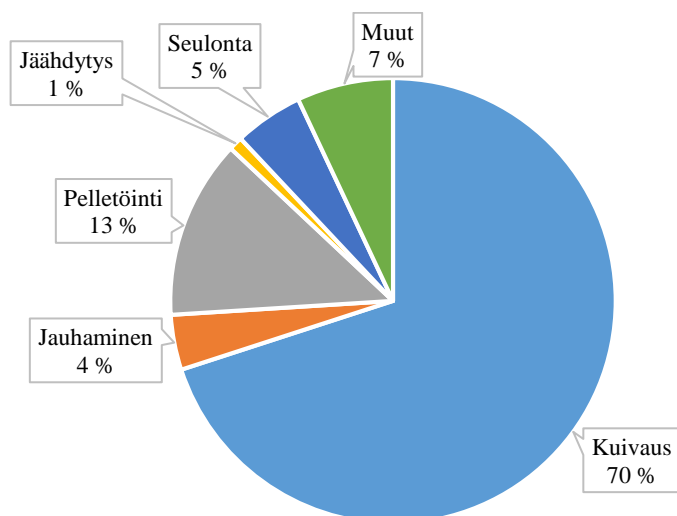


**Kuva 4.3.** Hakkeen kuivauksen energiahyötysuhde hakkeen alkukosteuden funktiona. Loppukosteus on 10 %.

Kun raaka-aineen kosteus on sama kuin haluttu loppukosteus (10 %), terminen hyötysuhde on 1,0, sillä kuivaukseen ei tarvita lämpöenergiaa. Prosessin kokonaishyötysuhde on kuitenkin matalampi, sillä prosessilaitteisto tarvitsee käydessään sähköä, tai muuta ulkopuolista energiaa. Kuivausprosessin sähkönkulutus riippuu käytettävästä kuivauslaitteistosta. Sähkönkulutuksen kannalta on mielekästä esittää energiankulutus haihdutettua vesikiloa kohden. Tällöin on mahdollista vertailla kulutusta riippumatta siitä, mitkä ovat hakkeen alku- ja loppukosteus. Pääkkösen (2017, 30) mukaan viirakuivureiden sähkönkulutuksen keskiarvo on 0,044 kWh/kgH<sub>2</sub>O ja konttikuivurien 0,077 kWh/kgH<sub>2</sub>O. Haikosen (2005, 40–42) laskelmien mukaan sähkönkulutukseksi tulee 0,030 kWh/kgH<sub>2</sub>O ja Roiton (2014, 60) 0,087 kWh/kgH<sub>2</sub>O.

## 4.2 Pelletin valmistamisen energiahyötysuhde

Pelletin valmistuksen suurin energiankulutuksen kohde on raaka-aineen kuivaus. Kuivauksen osuus prosessin kokonaisenergiankulutuksesta on noin 70 % (Tumuluru 2016, 95.) Kuivausenergiasta puolestaan noin 90 % on lämpöä ja 10 % sähköä (Ihalainen & Sikanen 2010, 12). Pelletöintiin käytettävän hakkeen kuivaus ei eroa luvussa 4.1 esitetystä tavallisesta kuivausprosessista. Raaka-aineen kosteus kuivauksen jälkeen on oltava 10–15 %. Kuvassa 4.4 on pelletöintiprosessin energiankulutuksen jakauma.



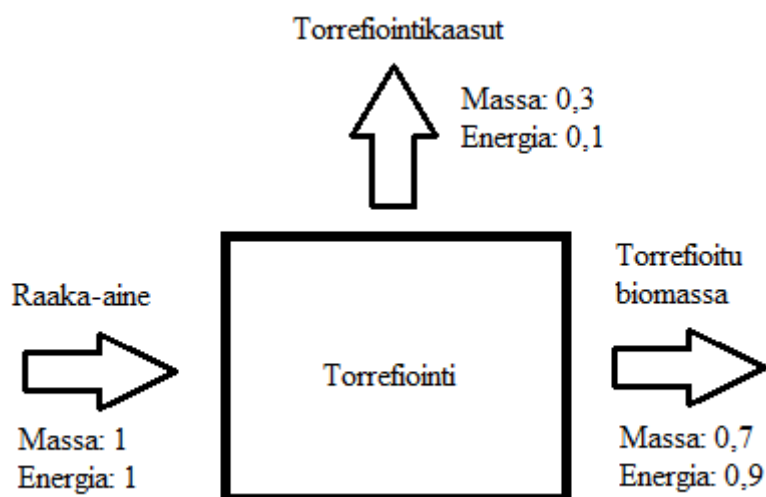
**Kuva 4.4.** Pelletöintiprosessin eri vaiheiden energiankulutuksen prosenttiosuudet (Pirraglia et al 2010. 2378).

Ihalaisen ja Sikasen (2010, 14) mukaan pelletintuotannon sähköenergiankulutus on keskimäärin 80–150 kWh/t. Risovic et al. (2008, 105) puolestaan esittää pelkän pelletin puristamisvaiheen, eli pelletöintikoneen, sähkön kulutukseksi noin 139 kWh/t. Kuljettimien ja muiden oheislaitteiden kulutus on 74 kWh/t. McNamee et al. (2016, 180) antavat sähköenergian kulutukseksi 151 kWh/t.

## 4.3 Torrefioidun pelletin valmistamisen energiahyötysuhde

Torrefioitu pelletti on vertailtavista polttoaineista pisimmälle jalostettu ja sen valmistus kuluttaa eniten energiaa. Raaka-aineen kuivauksen ja pelletöinnin väliin tulee yksi vaihe lisää, mikä luonnollisesti näkyy energiankulutuksessa. Torrefiointilämpötila on 250–300 °C, joten lämmöntuottamiseen tarvitaan energiaa. Lisäksi torrefiointiin käytettävät laitteet lisäävät myös sähköenergian kulutusta normaaliin pelletöintiprosessiin verrattuna.

Torrefioidun pelletin raaka-aineena käytettävä hake esikuivataan ennen torrefiointia. Hake kuivataan noin 10 % kosteuteen (Bergman et al. 2005, 22). Kuivauksen energiankulutusta käsitellään luvussa 4.1. Kuivaamisen osuus energiankulutuksesta on suuri. Håkanson et al. (2010) mukaan kuivaaminen vaatii noin kuusi kertaa enemmän energiaa kuin torrefiointi. Kuten yhtälö 4.4 osoittaa, hakkeen massa pienenee kuivausvaiheessa veden haihtumisen johdosta. Torrefiointiprosessissa biomassasta haihtuu niin sanottuja torrefiointikaasuja, sekä lisää vettä, joten biomassan massa pienenee myös tässä vaiheessa. Kuvassa 4.5 esitetään massan ja energian jakautuminen torrefiointikaasun ja kiinteään torrefioidun biomassan välillä. Torrefioitaessa raaka-aineen massasta noin 30 % menee torrefiointikaasuihin ja 70 % jää kiinteään ainekseen. Kiinteään torrefioituun biomassaan jää noin 90 % raaka-aineen energiasisällöstä ja 10 % siirtyy kaasuun. (Bergman 2005. 12.)

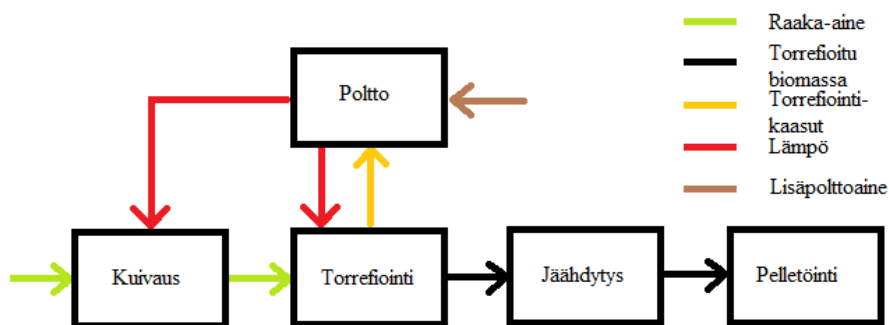


**Kuva 4.5.** Periaatekuva torrefiointiprosessin raaka-aineen massan ja energiasisällön jakautumisesta torrefioidun biomassan ja torrefiointikaasujen välillä (Bergman 2005. 12).

Torrefioinnin jälkeen biomassan kosteusprosentti on 1–5 % välillä. Torrefioitaessa biomassan tehollinen lämpöarvo sekä saapumistilassa, että kuiva-aineessa, kasvavat. Tämä johtuu hiilen suhteellisen osuuden suurenemisesta biomassassa, kun kaasuun siirtyy prosessissa suhteellisesti enemmän happea ja vetyä. (Föhr et al. 2015, 8). Käsittelemättömässä puussa hiilen osuus on 47,2–51,8 %. Torrefioitaessa osuus nousee 51,3–55,8 %:in riippuen käsittelyn kestosta ja lämpötilasta. (Alakangas et al. 2016, 56; van der Stelt et al. 2011, 3751.) Torrefioidun puun lämpöarvo kuiva-aineessa on 20,4–

22,7 MJ/kg (Bergman 2005, 18). Käsittelemättömällä hakkuutähdehakkeella vastaava arvo on 19,7–20,5 MJ/kg ja kokopuuhakkeelle 19,0–19,6 MJ/kg (Alakangas et al. 2016).

TOP-prosessissa ulkopuolisen energian tarvetta vähentää torrefiointikaasujen hyödyntäminen polttoaineena. Kaasua polttamalla voidaan optimaalisessa tilanteessa kattaa biomassan kuivaamisen, torrefioimisen ja lämpöhäviöiden aiheuttama energiantarve. (Bergman et al. 2005, 26.) Energian suhteen omavaraisen prosessin toteuttaminen on käytännön tasolla haastavaa, sillä prosessin energiantarve vaihtelee esimerkiksi raaka-aineen kosteuden mukaan. Agarin (2015, 28) mukaan tähän soveltuvaa tekniikkaa ei ole toistaiseksi saatu kehitettyä. Tämän vuoksi lämmön tuottamiseksi prosessiin on tuotava energiaa ulkopuolelta. Lämpöenergiaa saadaan polttamalla torrefiointikaasujen kanssa jotain muuta polttoainetta, kuten maakaasua. Myös raaka-aineen, tässä tapauksessa hakkeen, tai tuotetun torrefioidun pelletin käyttäminen on mahdollista. Kuvassa 4.6 on periaatekuva torrefiointiprosessista ja torrefiointikaasujen hyödyntämisestä prosessissa tarvittavan lämmön tuottamiseksi.

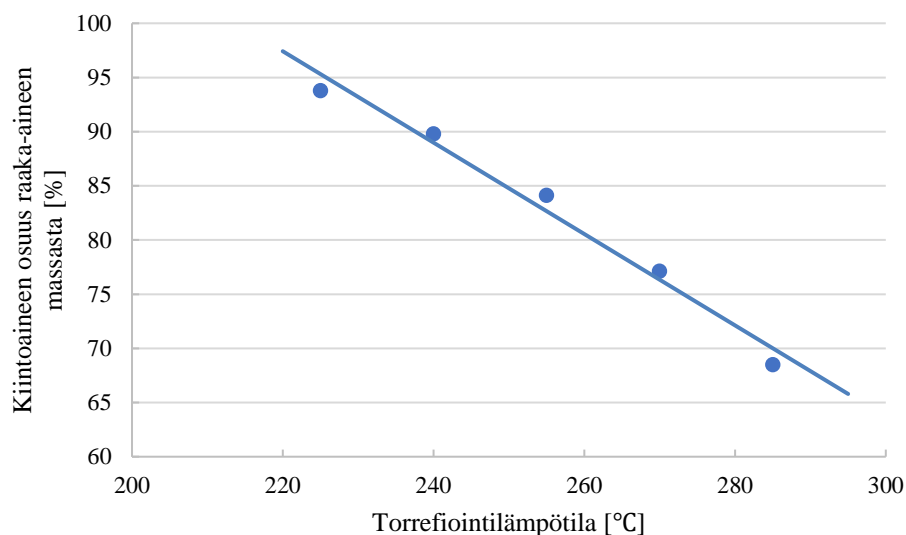


**Kuva 4.6.** Periaatekuva torrefiointikaasujen hyödyntämisestä esikuivauksessa ja torrefioinnissa (Bergman et al. 2005, 25).

Torrefioidun pelletin energiahyötysuhdetta laskettaessa tulee huomioida biomassan massan pieneneminen jalostusprosessin aikana. Esikuivauksen aikana tapahtuva, kosteuden haihtumisesta johtuva massan pieneneminen lasketaan luvussa 4.1 esitetyllä tavalla. Torrefiointivaiheen massan jakautumisen suhde kiintoaineksen ja kaasujen välille

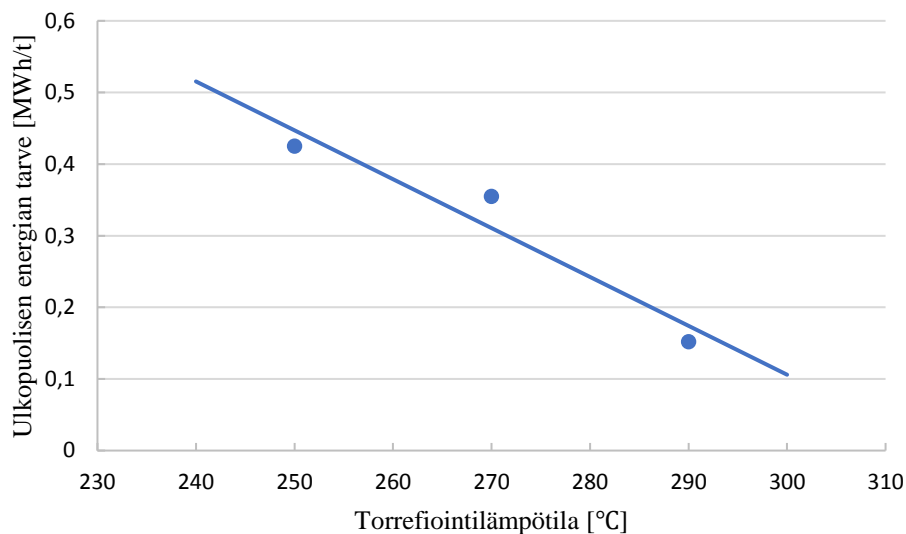


on riippuvainen torrefioinnin lämpötilasta ja kestosta. Kuva 4.7 esittää kiinteään biomassaan jäävän massan osuuden lämpötilan funktiona.



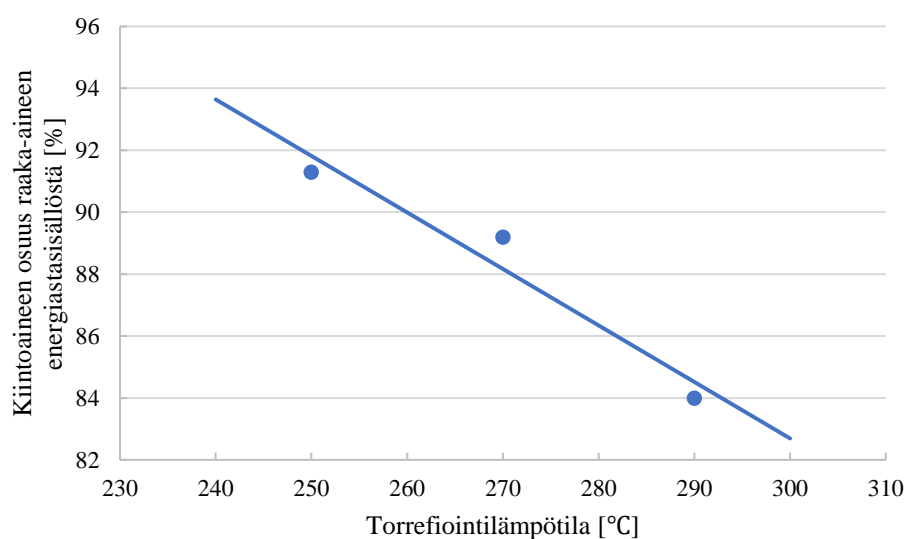
**Kuva 4.7.** Kuvassa on kiintoaineen massan osuus raaka-aineen massasta torrefiointiprosessin jälkeen eri käsittelylämpötiloissa. Käsittelyn kesto on 30 minuuttia ja raaka-aineena käytetään esikuivattua hakkuutähdehaketta. (Wilén et al. 2013, 28.)

Torrefiointiprosessin vaatima ylimääräinen energia vaikuttaa prosessin termiseen hyötysuhteeseen. McNamee et al. (2016, 180) mallien mukaan kuivauksen ja torrefioinnin tarvitsema ulkopuolisen energian määrä syötettyä raaka-ainetonna kohden on 0,11–0,43 MWh/t riippuen torrefioinnin kestosta ja lämpötilasta. Kuvassa 4.8 on mäntyhakkeen torrefiointiprosessin vaatima ulkopuolinen energia torrefiointilämpötilan funktiona. Kuvassa pystyakselilla olevat ulkopuolisen energian tarpeen arvot kattavat koko prosessin, eli ovat se energiamäärä, mikä tarvitaan hakkeen esikuivaukseen ja torrefiointiin torrefiointikaasujen sisältämän energian hyödyntämisen lisäksi.



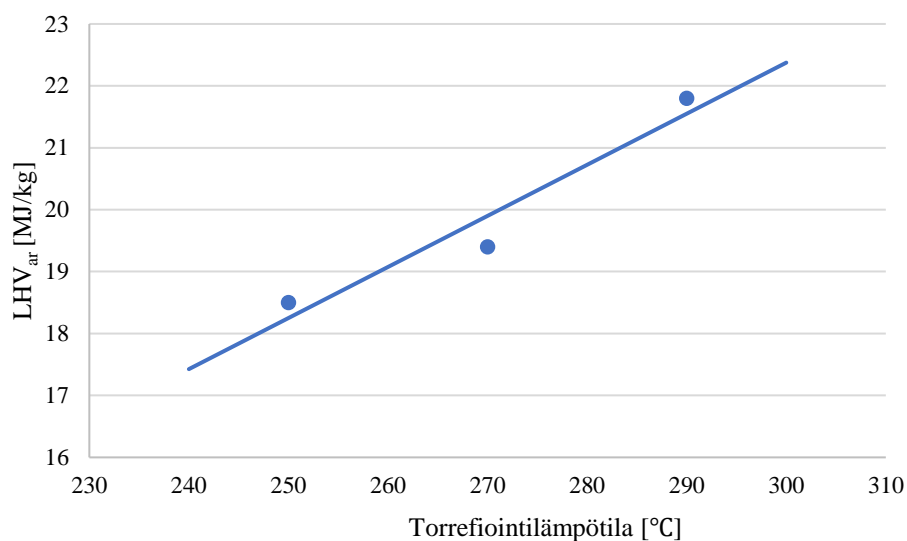
**Kuva 4.8.** Torrefiointiprosessin vaatima ulkopuolelta tuotu energiamäärä, kun torrefiointiaika on 30 minuuttia ja lämpötila vaihtelee. Raaka-aineena on mäntyhake, kosteus 35 %. (McNamee et al, 2016, 180.)

Kuvan 4.8 mukaan hakkeen esikuivauksen ja torrefiointin vaatima ulkopuolelta tuotavan energian määrä vähenee torrefiointilämpötilan kasvaessa. Kun lämpötila kasvaa, raaka-ainepuun sisältämästä energiasta torrefiointikaasuihin siirtyvä osuus suurenee. Kuvassa 4.9 esitetään, kuinka torrefioidun biomassan kiintoaineeseen jäävä osuus raaka-aineen energiasta pienenee lämpötilan kasvaessa.



**Kuva 4.9.** Kiinteän biomassan osuus raaka-aineen sisältämästä energiasta torrefiointilämpötilan funktiona. Kiinteän biomassan osuus energiasisällöstä pienenee lämpötilan kasvaessa. Kääntäen torrefiointikaasujen osuus energiasta kasvaa. (McNamee et al. 2016, 181.)

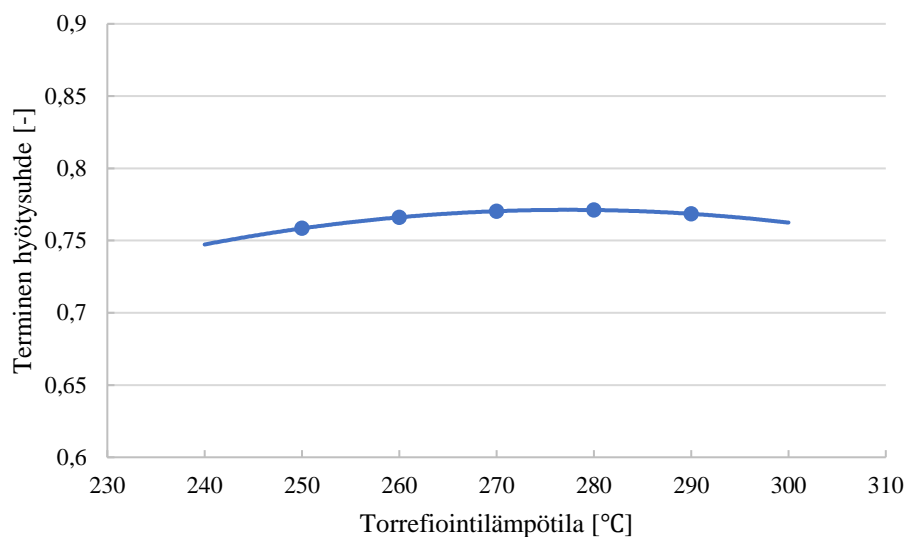
Vaikka torrefiointikaasujen sisältämä energiamäärä on pois prosessiin tuotavan energian tarpeesta, ei energian liiallinen siirtyminen kaasuihin ole optimaalista torrefioidun polttoaineen tuotannon kannalta (Håkansson et al. 2010). Tuotettuun polttoainetehoon vaikuttaa torrefioidun pelletin massavirta sekä lämpöarvo. Torrefioidun pelletin tehollinen lämpöarvo eri torrefiointilämpötiloissa näkyy kuvassa 4.10.



**Kuva 4.10.** Torrefioidun mäntyhakkeen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, kun torrefiointiaika on 30 minuuttia ja lämpötila vaihtelee (McNamee et al. 2016, 180).

Torrefioidun pelletin valmistamisprosessin terminen hyötysuhde määritellään yhtälön 4.9 mukaan. Sähköenergian kulutusta ei ole laskettu mukaan. Kuvassa 4.11 on hakkeesta valmistetun TOP-pelletin valmistamisprosessin hyötysuhde.

$$\eta_{\text{th}} = \frac{m_{\text{TOP}} \cdot q_{p,\text{net},\text{ar},\text{TOP}}}{m_{\text{hake}} \cdot q_{p,\text{net},\text{ar},\text{hake}} + \phi_{\text{tuotanto}}} \quad (4.9)$$



**Kuva 4.11.** TOP-prosessin energiahyötysuhde, kun torrefiointiaika on 30 minuuttia. Hakkeen kosteus alussa on 35 % ja esikuivauksen jälkeen 10 %. (McNamee et al. 2016, 180–181; Wilén et al. 2013, 28.)

Energiahyötysuhde pysyy välillä 0,75–0,78 torrefiointilämpötilan ollessa 250–300 °C. Hyötysuhdekäyrä on varsin tasainen ja on korkeimmillaan, kun torrefiointilämpötila on 270–280 °C. Kun lämpötila on tätä alhaisempi tai korkeampi, hyötysuhde laskee hitaasti. Kuvan 4.8 torrefioinnin energiankulutuksen sekä luvussa 4.1 esitetyn hakkeen kuivaamisen energiantarpeen perusteella voidaan päätellä, että hakkeen kosteudella on merkittävämpi vaikutus TOP-prosessin energiahyötysuhteeseen kuin torrefiointilämpötilalla. Bergman et al. (2005, 37) mukaan pelkän torrefiointiprosessin terminen hyötysuhde on 90–103 %, tyypillisesti 95 %. Korkean termisen hyötysuhteen taustalla on biomassan tehollisen lämpöarvon kasvaminen torrefioitaessa. Torrefiointivaiheen termistä hyötysuhdetta ei pidä sekoittaa koko TOP-prosessin hyötysuhteeseen, joka on huomattavasti alhaisempi.

Puubiomassan torrefiointi pienentää sähköenergian kulutusta biomassan pelletöinnissä. Puuaineksen sidosten hajoaminen torrefioitaessa helpottaa jauhamista. Torrefioinnin avulla sähköenergian kulutus biomassan hienontamisessa pienenee 70–90 %. (Bergman 2005, 16). McNamee et al. (2016, 180) mukaan TOP-pelletin tuotannon sähkökulutus on noin 98 kWh/t, joka on lähes 35 % vähemmän, kuin normaalin pelletin tuotannon sähkökulutus saman tutkimuksen mukaan.

#### 4.4 Energiahyötysuhteiden vertailu

Vertailtavien polttoaineiden jalostusprosessien energiahyötysuhteet ovat taulukossa 4.1. Sähköenergian kulutuksen sisältävät kokonaishyötysuhteet ovat varsin korkeita verrattuna kirjallisuuslähteiden arvoihin. Esimerkiksi Bergmanin (2005, 19) mukaan perinteisen pelletintuotannon kokonaishyötysuhde on 84 %.

**Taulukko 4.1.** Kuivatun hakkeen, pelletin ja TOP-pelletin termiset sekä kokonaishyötysuhteet. Raaka-aineen alkukosteus on 35 %.

	Hake 10 %	Pelletti	TOP-pelletti
$\eta_{th}$	0,96	0,96	0,77
$\eta$	0,95	0,93	0,75

Puupolttoaineen jalostamisen energiahyötysuhde näyttää heikkenevän, mitä enemmän raaka-ainetta, eli kosteaa haketta, jalostetaan. Jalostamisella saavutetaan kuitenkin hyötyä polttoaineen käyttö, kuljetus ja varastointiominaisuuksissa. Kuivatun hakkeen, pelletin ja TOP-pelletin ominaisuuksia on kootusti taulukossa 4.2.

**Taulukko 4.2.** Polttohakkeen, pelletin ja TOP-pelletin käytettävyyteen ja varastointiin vaikuttavia ominaisuuksia. (Alakangas et al. 2016, 205; Bergman 2005, 18–20; Etelätalo 2013, 31; Jahkonen et al. 2012, 5; Lehtikangas 2001, 356.)

		Polttohake	Puupelletti	TOP-pelletti
Kosteus	[%]	10 ... 15	7 ... 10	1 ... 6
Irtotiheys	[kg/i-m <sup>3</sup> ]	250 ... 400	650 ... 700	750 ... 850
Energiatiheys	[MWh/i-m <sup>3</sup> ]	0,7 ... 0,9	3,0 ... 3,3	4,1 ... 5,1
LHV <sub>ar</sub>	[MJ/kg]	16,0 ... 18	14,0 ... 17,5	19,9 ... 21,6
LHV <sub>ka</sub>	[MJ/kg]	19,7 ... 20,5	18,5 ... 19,5	20,4 ... 22,7
Biologinen hajoaminen		Tapahtuu	Tapahtuu	Ei tapahdu
Reagointi veden kanssa		Kostuu	Kostuu, turpoaa	Hylkii

## 5 TALOUDELLINEN NÄKÖKULMA

Polttoaineita vertailtaessa täytyy ottaa huomioon taloudellinen näkökulma. Usein pitkä jalostus tarkoittaa korkeita tuotantokustannuksia polttoaineelle. Korkealaatuisen polttoaineen tuottaminen vaatii taloudellisia resursseja ja polttoainetta valitessa on tehtävä kompromissi ominaisuuksien ja hinnan välillä. Puubiomassan tapauksessa kuivaus ja jalostus pelletiksi tai torrefioiduksi pelletiksi lisää tasalaatuisuutta ja kasvattaa energiatiheyttä sekä tehollista lämpöarvoa saapumistilassa. Kääntöpuolena polttoaineesta saatavan energian yksikköhinta nousee.

Polttoaineen energian hinnan vertailemiseksi tehdään kustannuslaskelmat tässä työssä vertailtujen polttoaineiden tuotantoprosessista. Saatavilla olevien lähdetietojen perusteella tehdään kuivatulle hakkeelle, pelletille ja TOP-pelletille laskelmat, joista selviää polttoaineen valmistamisen kustannukset yksikössä €/MWh.

Hakkeen kuivauksen laskelmat tehdään tuotantolaitokselle, joka tuottaa kuivattua haketta noin 29 000 tonnia vuodessa. Investointikustannus sekä laitoksen kiinteiden kustannusten arviot perustuvat Pääkkösen (2017, 31) käyttämiin arvoihin saman kokoluokan laitokselle. Hakkeen puuraaka-aineen hankinnan, kuljetuksen ja haketuksen kustannukset ovat Metsäntutkimuslaitoksen työraportista (Ihalainen & Niskanen 2010) ja sisältyvät taulukossa kohtaan ”raaka-aine ja muut muuttuvat kustannukset”. Kuivatun hakkeen hinnan muodostuminen esitetään taulukossa 5.1. Kustannusten tarkempi rakentuminen esitetään liitteessä II.

**Taulukko 5.1.** Kuivatun hakkeen tuotantokustannukset vuodessa ja polttoaineen energiasisällön kustannus yksikössä €/MWh. Laskettu 29 000 t/a tuottavalle laitokselle.

		Yksikköhinta	Kustannukset vuodessa	
Pääomakustannus vuodessa	[€/MWh]	1,83	[€/a]	259 009
Kiinteät kustannukset	-	-	[€/a]	371 000
Raaka-aine ja muut muuttuvat kustannukset	[€/i-m <sup>3</sup> ]	40,80	[€/a]	5 100 000
Sähkön kustannus	[€/MWh <sub>el</sub> ]	80,00	[€/a]	52 616
Lämmön kustannus	[€/MWh <sub>th</sub> ]	75,00	[€/a]	1 036 867
Kuivan hakkeen tuotantokustannukset yhteensä	[€/MWh]	48,24	[€/a]	6 819 492

Hakkeen kuivaaminen 10 % kosteuteen maksaa 48,24 € per tuotettu megawattitunti polttoaine-energiaa. Suurin osa tuotetun polttoaineen hinnasta muodostuu raaka-aineen hankinnasta ja siihen liittyvistä muista kustannuksista, kuten kuljetuksesta.

Pelletin tuotantolaitoksen investointikustannukset ovat hakkeen kuivaamaa suuremmat, sillä valmistusprosessiin tarvittavia laitteita tulee lisää. Suurimpia investointeja kuivauslaitteiston lisäksi ovat pelletöintikone ja vasaramylly (Uasuf & Becker 2011, 1361). Taulukon 5.2 pelletin tuotannon kustannuslaskelmien pääomakustannusten pohjana on Lamers et al. (2015, 211) ja Futuremetrics LLC:n (2012, 2) kustannusarviot, jotka on tehty noin 70 000 tonnin ja 50 000 tonnin vuosittaisen tuotannon laitoksille, sekä Bergmanin (2005, 22) esittämä 80 000 t/a tuottavan laitoksen kustannusarvio. Raaka-ainehakkeen hankintahinta pidetään samana. Kustannusten tarkempi rakentuminen näkyy liitteessä II.

**Taulukko 5.2.** Pelletin tuotantokustannukset vuodessa ja polttoaineen energiasisällön kustannus yksikössä €/MWh. Tuotantokapasiteetti 60 000 t/a.

		Yksikköhinta	Kustannukset vuodessa	
Pääomakustannus vuodessa	[€/MWh]	2,69	[€/a]	798 052
Kiinteät kustannukset	-	-	[€/a]	371 000
Raaka-aine ja muut muuttuvat kustannukset	[€/i-m <sup>3</sup> ]	40,27	[€/a]	10 571 562
Sähkön kustannus	[€/MWh <sub>el</sub> ]	80,00	[€/a]	993 242
Lämmön kustannus	[€/MWh <sub>th</sub> ]	75,00	[€/a]	2 177 420
Pelletin tuotanto-kustannukset yhteensä	[€/MWh]	50,61	[€/a]	14 981 277

Torrefioidun pelletin tuotannolla on vertailtavista polttoaineista suurimmat investointikustannukset. Vaikka torrefiointi pienentää esimerkiksi biomassan jauhamisen ja varastoinnin kustannuksia, torrefiointilaitteisto nostaa investointikustannukset tavallista pelletointiä suuremmaksi. (Bergman 2005, 22.) Bergman (2005, 22) esittää investointikustannuksiksi 7,4 milj. €, kun laitos tuottaa 56 000 tonnia vuodessa TOP-pellettiä. Föhr et al. (2015, 22) puolestaan käyttävät 50 000 tonnin vuosituotannon laitoksen investointikustannuksina 6,7 milj. € ja Heinimö & Hämäläinen (2006, 18) 5,5-7,5 milj. € 60 000 t/a tuotantokapasiteetilla. Oletetaan, että laitosta ei rakenneta lämmönlähteen, esimerkiksi voimalaitoksen, yhteyteen. Tällöin torrefiointiprosessin tarvitsema lämpöenergia täytyy tuottaa itse. Bergmanin (2005, 19) raportin pohjalta

arvioidaan lämmön tuottamiseen vaadittavan polttoaineen energiamäärän olevan noin 11,8 % tuotetusta TOP-pelletin energiasisällöstä. Torrefiointikaasujen hyödyntäminen on otettu huomioon. Lisäpolttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi maakaasua. Laskelmissa käytetään maakaasun hintana teollisuusasiakkaan vuonna 2017 maksamaa verollista keskihintaa. TOP-pelletin tuotantokustannukset esitetään taulukossa 5.3.

**Taulukko 5.3.** TOP-pelletin tuotantokustannukset vuodessa ja polttoaineen energiasisällön kustannus yksikössä €/MWh. Tuotantokapasiteetti 50 000 t/a.

		Yksikköhinta	Kustannukset vuodessa	
Pääomakustannus vuodessa	[€/MWh]	2,70	[€/a]	781 576
Kiinteät kustannukset	-	-	[€/a]	432 263
Raaka-aine ja muut muuttuvat kustannukset	[€/i-m <sup>3</sup> ]	40,12	[€/a]	19 159 376
Sähkön kustannus	[€/MWh <sub>el</sub> ]	80,00	[€/a]	1 806 755
Polttoaine kustannus	[€/MWh <sub>pa</sub> ]	60,24	[€/a]	2 048 828
Tuotantokustannukset yhteensä	[€/MWh]	83,01	[€/a]	24 228 797

Puubiomassaa jalostettaessa tuotetun polttoaineen kustannukset megawattituntia energiaa kohtaan kasvavat vaiheiden lisääntyessä. Taulukoista 5.2 ja 5.3 nähdään, perinteisen pelletin ja TOP-pelletin tuotannon investointikustannukset tuotettua energiamäärää kohden ovat hyvin lähellä toisiaan. Vaikka torrefiointi lisää tarvittavan laitteiston määrää, polttoaineen lämpöarvo kasvaa käsittelyssä ja se muuntuu helpommin pelletöitävään muotoon. Tämä pienentää esimerkiksi vasaramyllyjen tehontarvetta. Tarvittavan puuraaka-aineen määrä per tuotettu polttoainetonni on suurin TOP-pelletillä, koska torrefiointiprosessin aiheuttaman massahäviön johdosta.



## 6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli vertailla eriasteisesti jalostetun puupolttoaineen energiahyötysuhdetta sekä valmistuskustannuksia. Lisäksi työssä käsiteltiin jonkin verran myös muita polttoaineen ominaisuuksia, joita jalostuksella saavutetaan.

Vertailtavina polttoaineina olivat polttohake, puupelletti sekä torrefioidusta puusta valmistettu pelletti. Hake on vertailluista polttoaineista vähiten jalostettua. TOP-pelletti puolestaan käy läpi eniten vaiheita valmistusprosessissa. Energiahyötysuhteen vertailu tehtiin valitsemalla lähtökohdaksi tonnin hake-erä, jonka kosteus on 35 %. Työssä laskettiin jalostusprosessin tarvitsema energia ja tuotetun polttoaineen energiasisältö. Hyötysuhde voitiin laskea, kun edellä mainittujen arvojen lisäksi tiedettiin raaka-aineen energiasisältö. Laskennassa huomioitiin, että jalostettaessa polttoaineen massa pienenee veden haihtumisen ja torrefioitaessa torrefiointikaasujen muodostumisen seurauksena, joten valmista polttoainetta on vähemmän kuin raaka-aineena ollut 1000 kg.

Hakkeen osalta jalostus rajoittuu tässä työssä kuivaukseen. Kuivaukselle voidaan laskea ominaislämpöenergiankulutus, joka tarvitaan yhden vesikilon haihduttamiseksi puusta. Tällä tavoin kuivauksen energiankulutusta on helppo tarkastella riippumatta hakkeen alku- ja loppukosteudesta. Ominaislämpöenergiankulutukseksi laskettiin noin 1,0 kWh/kg<sub>H2O</sub>, joka on samaa suuruusluokkaa kuin kirjallisuudessa esitetyt arvot.

Pelletin valmistusprosessissa raaka-aineen kuivaus aiheuttaa valtaosan energiankulutuksesta. Verrattuna pelkkään hakkeen kuivattamiseen, pelletöintilaitteisto lisää sähköenergiankulutusta. Raaka-aineen hienontaminen, puristaminen pelletiksi ja pellettien seulonta ovat suurimpia yksittäisiä sähkön kulutuskohteita.

Torrefioidun pelletin valmistamisprosessissa on energiankulutuksen suhteen paljon muuttuvia tekijöitä. Torrefiointilämpötila ja käsittelyn kesto vaikuttavat energiankulutukseen. Toisaalta osa kuivauksen ja torrefioinnin vaatimasta lämmöstä voidaan tuottaa vapautuvien torrefiointikaasujen poltolla.

Energiahyötysuhteiden vertailu osoitti, että TOP-prosessi on sekä termiseltä- että kokonaisyhyötysuhteeltaan heikoin vertailtavista vaihtoehdoista. Hakkeen kuivaus puolestaan voidaan toteuttaa korkeimmalla hyötysuhteella. Pelletöinnin

kokonaishyötysuhdetta heikentää suuri sähköenergian kulutus. Kokonaishyötysuhteita tarkastellessa täytyy ottaa huomioon, että sähkönkulutus vaihtelee käytettävissä olevan laitteiston mukaan.

Taloudellisen näkökulman tarkastelu tehtiin laskemalla jokaiselle vertailtavalle polttoaineelle kustannukset tuotettua megawattituntia kohden. Kuivatun hakkeen ja pelletin välinen ero tuotantokustannuksissa ei ole kovin suuri; kuivattu hake kustantaa noin 48,2 €/MWh ja pelletti 50,6 €/MWh. Torrefioidun pelletin kustannukset puolestaan on noin 83,0 €/MWh. Lähtötietoina käytettiin kirjallisuudesta löytyneitä arvioita tuotantolaitosten kustannuksista. Saatuihin tuloksiin on suhtauduttava varauksella, sillä esimerkiksi investointikustannukset voivat vaihdella merkittävästi laitoskohtaisesti. Myös käytössä olevat tekniset ratkaisut, kuten mahdollisuus käyttää hukkalämpöä lämmönlähteenä, vaikuttavat tuotantokustannuksiin. Taloudellisen tarkastelun pohjalta voidaan kuitenkin nähdä suuntaus, jossa puubiomassan jalostamisasteen kasvattaminen nostaa tuotantokustannuksia saatavaa polttoainetehoa kohden.

Energiahyötysuhteen ja tuotantokustannusten vertailu eivät sellaisenaan riitä määrittämään, millaista polttoainetta puubiomassasta kannattaa valmistaa. On otettava huomioon polttoaineelta vaadittavat ominaisuudet, käytettävissä olevan raaka-aineen ominaispiirteet sekä kunkin polttoaineen markkinanäkymät. Tuotantolaitosta suunniteltaessa hyötysuhteen ja tuotantokustannusten analysointi toimivat työkaluina investointipäätöksen tekoa varten.

## LÄHDELUETTELO

- Aalto Mikko 2012. Pelletöintiprosessi ja ohjeita pelletöintiin pienen mittakaavan laitteistolla. [Verkkajulkaisu]. EkoPelletti - T&K –hanke, Oulun Seudun ammattikorkeakoulu. Saatavissa:  
[http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/pellettien\\_valmistus\\_ja\\_ohjeistus\\_01-04-2014.pdf](http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/pellettien_valmistus_ja_ohjeistus_01-04-2014.pdf)
- Agar David 2015. The Feasibility of Torrefaction for the Co-Firing of Wood in Pulverised-Fuel Boiler. Åbo Akedemi University, Department of Chemical Engineering. Turku: Painosalama Oy. ISBN 978-952-12-3321-0.
- Alakangas Eija, Hurskainen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana & Korhonen Jaana 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 229 s. VTT Technology 258. ISBN 978-951-38-8419-2
- Alakangas Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 172 s. VTT Technology 258. ISBN 951-38-5740-9
- Bergman Patrick 2005. Combined torrefaction and pelletisation – The TOP process. [Verkkajulkaisu]. ECN Biomass. Saatavissa:  
<https://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf>
- Bergman P.C.A, Boersma A.R., Zwart R.W.R. & Kiel J.H.A. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. [Verkkajulkaisu]. ECN Biomass. Saatavissa: <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05013.pdf>
- Bioenergia ry 2017. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 7.9. 2017]. Saatavissa:  
<http://www.pellettienergia.fi/pelletin%20tuotanto>

Ciolkisz Daniel 2017. Manufacturing fuel pellets from biomass. [Artikkeli verkkolehdeissä]. [Viitattu 11.9.2017]. PennState Extension. The Pennsylvania State University. Saatavissa: <https://extension.psu.edu/manufacturing-fuel-pellets-from-biomass>

Energiateollisuus ry 2015. Pelletin voimalaitoskäyttö kasvussa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.9.2017]. Energia uutiset. Helsinki: Adato Energia Oy. Saatavissa: <http://www.energiauutiset.fi/uutiset/pelletin-voimalaitoskaytto-kasvussa.html>

Energiateollisuus ry 2016. Energiavuosi 2016 – Kaukolämpö. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 24.10.2017]. Saatavissa: [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi\\_2016\\_-\\_kaukolampo.html#material-view](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2016_-_kaukolampo.html#material-view)

Etelätalo Esa 2013. Erilaatuisten hakkeiden käyttökohdevaatimuksista ja tuotantokustannuksista. Joensuu: Hajautetut biojalostamot –hanke, Itä-Suomen yliopisto & Karelia-Ammattikorkeakoulu.

Futuremetrics 2012. An Overview of a Risk Analysis for a Wood Pellet Manufacturing Project. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 17.10.2017]. Saatavissa: <http://futuremetrics.info/wp-content/uploads/2013/07/FutureMetrics-Pellet-Plant-Risk-Analysis.pdf>

Föhr Jarno, Seppänen Tarja, Suikki Jemina, Soininen Hanne & Ranta Tapio 2015. Torrefioidun biohiilipelletin kirjallisuustutkimus ja koeajot pilottilaitoksessa. Lappeenranta: LUT Scientific and Expertise Publications Tutkimusraportit – Research Reports, 46, Lappeenrannan teknillinen yliopisto & Mikkelin ammattikorkeakoulu. ISBN 978-952-265-881-4 (PDF).

Haikonen Turo 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Opinnäytetyö. [Verkkajulkaisu]. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Motiva. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/7939/Tutkimus\\_biopolttoaineiden\\_aumakuivauksesta.pdf](https://www.motiva.fi/files/7939/Tutkimus_biopolttoaineiden_aumakuivauksesta.pdf)

Heinimö Jussi & Hämäläinen Essi 2006. Esiselvitys puupolttoaineen jalostamisen torrefiointitekniikalla. [Verkkojulkaisu]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 21 s. ISBN 952-214-224-1. Saatavissa:  
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31048/TMP.objres.459.pdf>

Hillebrand Kari 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi – yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. [Verkkojulkaisu]. Tutkimusraportti VTT-R-07261-09. Teknologian tutkimuskeskus VTT. 17 s. Saatavissa:  
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/VTT-R-07261-09.pdf>

Holmberg Henrik 2015. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa. [Verkkojulkaisu]. Luentomoniste. Aalto-yliopisto. Saatavissa:  
[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/118088/mod\\_resource/content/1/Ene59.4140%20moniste%202015.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/118088/mod_resource/content/1/Ene59.4140%20moniste%202015.pdf)

Horttanainen Mika 1999. Syttyminen ja palamisen eteneminen partikkelikerroksessa. Lisensiaatintutkimus. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto, Lämpö- ja ympäristötekniikan laitos. 120 s. UDK 536.46:622.61.

Håkansson Katarina, Nordin Anders, Nordwaeger Martin, Olofsson Ingemar & Svanberg Martin 2010. Process and system integration aspects of biomass torrefaction. Konferenssi paperi. [Verkkojulkaisu]. 18th European Biomass Conference and Exhibition: Lyon, 3-7. 5. 2010. *18th European Biomass Conference and Exhibition: Proceedings, 2010*. 1541 – 1543. ISBN 978-88-89407-56-1.

Härkönen Matti 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. [Verkkojulkaisu]. Kokkola: Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. ISBN:978-952-6602-34-9. Saatavissa:  
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41034/Puun%20polttoainekaytto.pdf?sequence=1>

Ihalainen Tanja & Niskanen Anssi 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjuissa. [Verkkajulkaisu]. Vantaa: metsäntutkimuslaitos. 47 s. Metlan työraportteja 166. ISBN 978-951-40-2245-6. Saatavissa:  
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp166.htm>

Ihalainen Tanja & Sikanen Lauri 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset pelletintuotannon arvoketjussa. [Verkkajulkaisu]. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos. 27 s. Metlan työraportteja 181. ISBN 978-951-40-2271-5. Saatavissa:  
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp181.htm>

Jahkonen Miina, Lindblad Jari Sirkiä Seija & Laurén Ari 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. [Verkkajulkaisu]. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos. 35 s. Metlan työraportteja 241. ISBN 978-951-40-2379-8. Saatavissa:  
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp241.htm>

Jokinen Henna, Kuokkanen Matti, Impola Ritva & Takalo-Kippola Heikki 2013. Pellettien sidostumisen perusmekanismien selvitys. [Verkkajulkaisu]. Oulu: Ekopelletti – T&K –hanke, Oulun yliopisto, Kuitu- ja partikkelitekniikan laboratorio. Saatavissa:  
<http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/EkoPelletti-Sidostumisraportti.pdf>

Kiel Jaap 2013. Torrefaction – Product quality optimisation in view of logistics and end-use. Seminaarikalvot. [Verkkajulkaisu]. World Biomass Power Markets, Amsterdam, 17. 5. 2013. Saatavissa: [https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/presentations/ppt\\_ECN\\_Torrefaction\\_product\\_quality\\_optimisation\\_final.pdf](https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/presentations/ppt_ECN_Torrefaction_product_quality_optimisation_final.pdf)

Lamer Patrick, Roni Mohammed S., Tumuluru Jaya S., Jacobson Jacob J., Cafferty Kara G., Hansen Jason K., Kenney Kevin, Teymouri Farzaneh & Bals Bryan 2015. Techno-economic analysis of decentralized biomass processing depots. [Verkkajulkaisu]. *Bioresource Technology*. Volume 194, 205 – 213. Elsevier B.V. 8 s. ISSN: 0960-8524.

Lehtikangas Päivi 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*. Volume 20(5), 351-360. Elsevier B.V. ISSN: 0961-9534.

McNamee P., Adams P.W.R., McManus M.C., Dooley B., Darvell L.I., Williams A. & Jones J.M. 2016. An assessment of the torrefaction of North American pine and life cycle greenhouse gas emissions. [Verkkójulkaisu]. *Energy Conversion and Management*. Volume 113, 177 – 188. Elsevier B.V. 11 s. ISSN: 0196-8904.

Pirraglia Adrian, Gonzalez Ronalds & Saloni Daniel 2010. Techno-economical analysis of wood pellets production for U.S. manufacturers. [Verkkójulkaisu]. *BioResources*. Volume 5 (4), 2374 – 2390. 26 s. ISSN 1930-2126.

Pääkkönen Pekka. Kuivuritekniikan selvitys. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 20.9.2017]. Micropolis. 35 s. Saatavissa: <http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/KUIVURITEKNIIKAN-SELVITYS-julkinen-v1.pdf>

Risovic Stjepan, Dukic Igor & Vuckovic Kresimir 2008. Energy Analysis of Pellets Made of Wood Residues. [Verkkójulkaisu]. *Croatian Journal of Foresting Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*. Volume 29(1). Zagreb: Croatian Journal of Forest Engineering. 13 s. ISSN 1845-5719. Saatavissa: <https://hrcak.srce.hr/28933>

Roitto Jani 2014. Puuhakkeen käsittely- ja poltto-ominaisuuksien parantaminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan koulutusohjelma. 117 s.

van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A. & Ptasinski K.J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*. Volume 35(9), 3748 – 3762. Elsevier B.V. ISSN: 0961-9534.

Tilastokeskus 2017a. Energian hinnat. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 24.10.2017]. 2. vuosineljännes 2017, Liitekuvio 5. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. Helsinki:

Tilastokeskus. ISSN=1799-7984. Saatavissa:

[http://www.stat.fi/til/ehi/2017/02/ehi\\_2017\\_02\\_2017-09-07\\_kuv\\_005\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2017/02/ehi_2017_02_2017-09-07_kuv_005_fi.html)

Tilastokeskus 2017b. Energian hinnat. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 25.10.2017]. Maakaasun hinta kuluttajatyypeittäin. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1799-7984. Saatavissa:

[http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ene\\_\\_ehi/statfin\\_ehi\\_pxt\\_006\\_fi.px/table/tableViewLayout1/?rxid=d0e11355-40ad-486e-be65-c3229c54b07d](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/statfin_ehi_pxt_006_fi.px/table/tableViewLayout1/?rxid=d0e11355-40ad-486e-be65-c3229c54b07d)

Tumuluru Jaya Shankar, Sokhansanj Shahab, Wright Christoper T. & Kremer Timothy 2012. GC Analysis of Volatiles and Other Products from Biomass Torrefaction Process, Advanced Gas Chromatography. *Progress in Agricultural, Biomedical and Industrial Applications*. Dr. Mustafa Ali Mohd (Ed.). InTech. ISBN: 978-953-51-0298-4. Saatavissa: <http://www.intechopen.com/books/advanced-gas-chromatography-progressin-agricultural-biomedical-and-industrial-applications/gc-analysis-of-volatiles-and-other-products-frombiomass-torrefaction-process>

Tumuluru Jaya Shankar 2016. Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mill. *Chemical Engineering Research and Design* Volume 110, 82 – 97. Elsevier B.V. ISSN: 0263-8762

Uasuf Augusto & Becker Gero 2011. Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. [Verkkójulkaisu]. *Biomass and Bioenergy*. Volume 35(3), 1357 – 1366. Elsevier B.V. ISSN: 0961-9534.

Vakkilainen Esa K. 2016. Steam generation from biomass. Elsevier B.V. ISBN: 978-0-12-804389-9

Vapo Oy 2017 [www-sivut]. [Viitattu 29.1.2017]. Saatavissa:

<http://www.vapo.fi/media/sanasto>



Vigants Edgars, Vigants Girts, Veidenbergs Ivars, Lauka Dace, Klavina Krista & Blumberga Dagnija 2015. Analysis of energy consumption for biomass drying process. Riga technical university, Institute of energy systems and environment. *Environment. Technology. Resources. Proceeding of the 11th International Scientific and Practical Conference*. Volume II, 317-322. 6 s. ISSN 1691-5402.

Wilén Carl, Jukola Perttu, Järvinen Timo, Sipilä Kai, Verhoeff Fred, Kiel Jaap 2013. Wood torrefaction – pilot tests and utilisation prospects. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 73 s. VTT Technology 122. ISBN 978-951-38-8047-7.

## LIITE I. LASKELMAT HAKKEEN KUIVAUKSEN LÄMPÖ-ENERGIAN TARPEESTA

Taulukoissa 1-3 esitetään kuivauksen tilapisteet viidessä eri kuivauslämpötilassa, kun ilman lämpötila ennen lämmitystä -5 °C, 5 °C ja 15 °C.

**Taulukko 1.** Kuivauksen tilapisteet, kun ilman lämpötila ennen lämmitystä on -5°C

Absoluuttinen kosteus ennen kuivausta $x_1=x_2$ [kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>i</sub> ]	Kuivaus lämpötila $T_2$ [°C]	Entalpia ennen lämmitystä $h_1$ [kJ/kg]	Entalpia lämmityksen jälkeen $h_2=h_3$ [kJ/kg]	Lämpötila kuivauksen jälkeen $T_3$ [°C]	Entalpia kuivauksen jälkeen $x_3$ [kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>i</sub> ]
0,002	50	0	56	20	0,014
0,002	65	0	71	24	0,019
0,002	75	0	82	27	0,024
0,002	100	0	112	34	0,032
0,002	150	0	156	38	0,045

**Taulukko 2.** Kuivauksen tilapisteet, kun ilman lämpötila ennen lämmitystä on 5°C

Absoluuttinen kosteus ennen kuivausta $x_1=x_2$ [kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>i</sub> ]	Kuivaus lämpötila $T_2$ [°C]	Entalpia ennen lämmitystä $h_1$ [kJ/kg]	Entalpia lämmityksen jälkeen $h_2=h_3$ [kJ/kg]	Lämpötila kuivauksen jälkeen $T_3$ [°C]	Entalpia kuivauksen jälkeen $x_3$ [kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>i</sub> ]
0,0045	50	16	62	22	0,016
0,0045	65	16	77	25	0,019

0,0045	75	16	88	28	0,023
0,0045	100	16	113	34	0,032
0,0045	150	16	164	41	0,05

**Taulukko 3.** Kuivauksen tilapisteeet, kun ilman lämpötila ennen lämmitystä on 15°C

Absoluuttinen kosteus ennen kuivausta	Kuivaus lämpötila	Entalpia ennen lämmitystä	Entalpia lämmityksen jälkeen	Lämpötila kuivauksen jälkeen	
$x_1=x_2$	$T_2$	$h_1$	$h_2=h_3$	$T_3$	$x_3$
[kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>i</sub> ]	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[°C]	[kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>i</sub> ]
0,0085	50	37	73	24	0,019
0,0085	65	37	88	27	0,023
0,0085	75	37	99	30	0,026
0,0085	100	37	125	35	0,035
0,0085	150	37	176	43	0,052

Kuivausilman tarve saadaan yhtälöllä (Holmberg 2015, 100)

$$m_{ki} = \frac{1}{x_3 - x_2} \quad (1)$$

Yhtälöstä 1 lasketun kuivausilman tarpeen sekä kuivausilman lämmityksen alku- ja loppuentalpioiden ollessa tiedossa voidaan laskea ominaislämpöenergiankulutus. Holmbergia (2015, 100) mukaillen käytetään yhtälöä

$$q_{om} = m_{ki} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2)$$

Yhtälöllä 2 saadaan ilman lämmityksen ominaislämpöenergiankulutus yksikössä kJ/kg<sub>H2O</sub>. Taulukoissa 4–6 on kuivaamiseen tarvittava ilmamäärä sekä ominaislämpöenergian kulutus kilojouleina ja kilowattitunneiksi muutettuna haihdutettua vesikiloa kohden.

**Taulukko 4.** Kuivausilman tarve ja ominaislämpöenergian kulutus, kun ilman lämpötila ennen lämmitystä on -5 °C.

Kuivausilman- tarve	Ominaisläm- pöenergian kulutus	Ominaisläm- pöenergian kulutus
$m_{ki}$	$q_{om}$	$q_{om}$
[kg <sub>ki</sub> /kg <sub>H2O</sub> ]	[kJ/kg <sub>H2O</sub> ]	[kWh/kg <sub>H2O</sub> ]
83,33	4666,67	1,296
	4176,47	1,160
45,45	3727,27	1,035
33,33	3733,33	1,037
23,26	3627,91	1,008

**Taulukko 5.** Kuivausilman tarve ja ominaislämpöenergian kulutus, kun ilman lämpötila ennen lämmitystä on 5 °C.

Kuivausilman- tarve	Ominaisläm- pöenergian kulutus	Ominaisläm- pöenergian kulutus
$m_{ki}$	$q_{om}$	$q_{om}$
[kg <sub>ki</sub> /kg <sub>H2O</sub> ]	[kJ/kg <sub>H2O</sub> ]	[kWh/kg <sub>H2O</sub> ]
86,96	4000,00	1,111
68,97	4206,90	1,169
54,05	3891,89	1,081
36,36	3527,27	0,980
21,98	3252,75	0,904

**Taulukko 6.** Kuivausilman tarve ja ominaislämpöenergian kulutus, kun ilman lämpötila ennen lämmitystä on 15 °C.

Kuivausilman- tarve	Ominaisläm- pöenergian kulutus	Ominaisläm- pöenergian kulutus
$m_{ki}$	$q_{om}$	$q_{om}$
[kg <sub>ki</sub> /kg <sub>H2O</sub> ]	[kJ/kg <sub>H2O</sub> ]	[kWh/kg <sub>H2O</sub> ]
95,24	3428,57	0,952
68,97	3517,24	0,977
57,14	3542,86	0,984
37,74	3320,75	0,922
22,99	3195,40	0,888

Ominaislämpöenergian kulutuksen perusteella voidaan laskea haketonnin kuivaamiseen kuluva energia. Taulukossa 7 on energiantarpeet kolmella eri ominaislämpöenergian arvolla. Poistettavan veden laskemiseen käytetään yhtälöä 4.4. Lämpöenergian tarve haketonnin kuivaamiseksi saadaan puolestaan yhtälöllä

$$Q = m_{H2O} \cdot q_{om} \quad (1)$$

**Taulukko 7.** Tarvittava lämpöenergia haketonnin kuivaamiseksi loppukosteuden ollessa 10 % ja 15 %. Tulokset on laskettu ominaislämmönkulutuksen arvoilla 0,9, 1,0 ja 1,1 kWh/kg<sub>H2O</sub>.

Loppukosteus 10 %		Ominaislämmönkulutus [kWh/kg <sub>H2O</sub> ]		
		0,9	1,0	1,1
Alku kosteus [%]	Veden poisto [kg]	Lämpöenergian tarve haketonnin kuivaamiseksi [kWh/t]		
30	222,2	199,98	222,20	244,42
35	277,8	250,02	277,80	305,58
40	333,3	299,97	333,30	366,63
45	388,9	350,01	388,90	427,79
50	444,4	399,96	444,40	488,84
55	500,0	450,00	500,00	550,00

Loppukosteus 15 %		Ominaislämmönkulutus [kWh/kg <sub>H2O</sub> ]		
		0,9	1,0	1,1
Alku kosteus [%]	Veden poisto [kg]	Lämpöenergian tarve haketonnin kuivaamiseksi [kWh/t]		
30	176,5	158,85	176,50	194,15
35	235,3	211,77	235,30	258,83
40	294,1	264,69	294,10	323,51
45	352,9	317,61	352,90	388,19
50	411,8	370,62	411,80	452,98
55	470,6	423,54	470,60	517,66

## LIITE II. VERTAILTAVIEN POLTTOAINEIDEN TUOTANTO- KUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN

**Taulukko 8.** Kuivatun hakkeen kustannusten muodostuminen. (Investointi ja kiinteät kustannukset: Pääkkönen s.31; Puun hankinta: Ihalainen & Niskanen 2010. 49; Sähkön hinta: Tilastokeskus 2017a; Lämmön hinta: Energiateollisuus 2016.)

Investointi	[€]	2000000
laskentakorko	[%]	5,0
Käyttöaika	[a]	10,0
<b>Pääomakustannus vuodessa</b>	[€/a]	259009
Työvoima	[€/a]	350000
Kunnossapito yms.	[€/a]	20000
Tonttivuokra	[€/a]	1000
<b>Kiinteät kustannukset</b>	[€/a]	371000
Puun käyttö	[k-m <sup>3</sup> /a]	50000
	[i-m <sup>3</sup> /a]	125000
Hävikki	[%]	2,0
Puun hinta	[€/k-m <sup>3</sup> ]	5,00
Korjuukustannus	[€/k-m <sup>3</sup> ]	25,00
Kuljetuskustannus	[€/k-m <sup>3</sup> ]	7,00
Haketuskustannus	[€/i-m <sup>3</sup> ]	3,00
Sähkön hinta	[€/MWh]	80,00
Lämmön hinta	[€/MWh]	75,00
Varastointikulut	[€/i-m <sup>3</sup> ]	0,80
<b>Raakahakkeen tuotantokustannukset</b>	[€/i-m <sup>3</sup> ]	40,8
	[€/a]	5100000
<b>Sähkön kustannus</b>	[€/a]	52616,2
<b>Lämmön kustannus</b>	[€/a]	1036867
<b>Tuotantokustannukset yhteensä</b>	[€/a]	6819492
	[€/MWh]	48,24

**Taulukko 9.** Pelletin kustannusten muodostuminen. (Pääomakustannukset; Lamers et al. 2015, 211 ja Futuremetrics 2012, 2; Puun hankinta: Ihalainen & Niskanen 2010, 49; Sähkön hinta: Tilastokeskus 2017a; Lämmön hinta: Energiateollisuus 2016.)

Investointi	[€]	6 162 348
laskentakorko	[%]	5
Käyttöaika	[a]	10
<b>Pääomakustannus vuodessa</b>	[€/a]	798 052
Työvoima	[€/a]	400 000
Kunnossapito yms.	[€/a]	40 000
Tonttivuokra	[€/a]	1 000
<b>Kiinteät kustannukset</b>	[€/a]	441 000
Puun käyttö	[k-m <sup>3</sup> /a]	105 000
	[i-m <sup>3</sup> /a]	262 500
Hävikki	[%]	2
Puun hinta	[€/k-m <sup>3</sup> ]	5,00
Korjuukustannus	[€/k-m <sup>3</sup> ]	25,00
Kuljetuskustannus	[€/k-m <sup>3</sup> ]	7,00
Haketuskustannus	[€/i-m <sup>3</sup> ]	3,00
Sähkön hinta	[€/MWh]	80,00
Lämmön hinta	[€/MWh]	75,00
Varastointikulut	[€/i-m <sup>3</sup> ]	0,8
<b>Raakahakkeen tuotantokustannukset</b>	[€/i-m <sup>3</sup> ]	40,27
	[€/a]	10 571 562
<b>Sähkön kustannus</b>	[€/a]	993 242
<b>Lämmön kustannus</b>	[€/a]	2 177 420
<b>Tuotantokustannukset yhteensä</b>	[€/a]	14 981 277
	[€/MWh]	50,46



**Taulukko 10.** Torrefioidun pelletin kustannusten muodostuminen. (Pääomakustannukset: Föhr et al. 2015, 22; Bergman 2005, 22; Heinimö & Hämäläinen 2006, 18; Kiinteät kustannukset: Föhr et al. 2015, 22; Puun hankinta: Ihalainen & Niskanen 2010, 49; Sähkön ja maakaasun hinta: Tilastokeskus 2017.)

Investointi	[€]	6 035 119
laskentakorko	[%]	5
Käyttöaika	[a]	10
<b>Pääomakustannus vuodessa</b>	[€/a]	781 576
Työvoima	[€/a]	400 000
Kunnossapito yms.	[€/a]	31 263
Tonttivuokra	[€/a]	1 000
<b>Kiinteät kustannukset</b>	[€/a]	432 263
Puun käyttö	[k-m <sup>3</sup> /a]	191 000
	[i-m <sup>3</sup> /a]	477 500
Hävikki	[%]	2,00
Puun hinta	[€/k-m <sup>3</sup> ]	5,00
Korjuukustannus	[€/k-m <sup>3</sup> ]	25,00
Kuljetuskustannus	[€/k-m <sup>3</sup> ]	7,00
Haketuskustannus	[€/i-m <sup>3</sup> ]	3,00
Sähkön hinta	[€/MWh]	80,00
Maakaasun hinta	[€/MWh]	60,24
Varastointikulut	[€/i-m <sup>3</sup> ]	0,8
<b>Raaka-aineen hankintakustannukset</b>	[€/i-m <sup>3</sup> ]	40,12
	[€/a]	19 159 376
<b>Sähkön kustannus</b>	[€/a]	1 806 755
<b>Polttoaine kustannus</b>	[€/a]	2 048 828
<b>Tuotantokustannukset yhteensä</b>	[€/a]	24 228 797
	[€/MWh]	83,70