



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JASMINA LEPPÄNEN
KIERRÄTYSPUUN JALOSTAMINEN KIINTEÄKSI BIOPOLTTOAI-
NEEKSI
Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-
ton kokouksessa 13. elokuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

LEPPÄNEN, JASMINA: Kierrätyspuun jalostaminen kiinteäksi biopolttoaineeksi

Diplomityö, 108 sivua, 4 liitesivua

Lokakuu 2014

Pääaine: Voimalaitostekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: Puujäte, kierrätyspuu, käytöstä poistettu puu, kiinteä biopolttoaine, murske, puupelletti, paahtopelletti, musta pelletti, biohiili, torrefiointi, investointi

Puupolttoaineet ovat merkittävä osa Suomen energiantuotantoa. Puupolttoaineiden osuus energian loppukulutuksesta oli 23 % vuonna 2012 ja puun energiakäytön lisääminen on yksi tärkeimmistä keinoista saavuttaa uusiutuvan energian lisäystavoitteet. Se edellyttää investointeja muun muassa polttoainetuotantoon. Investointihanke on monivuotinen projekti, jossa etukäteissuunnittelu on merkittävässä osassa. Suunnittelukustannukset ovat yleensä 10 – 15 % koko hankkeen kustannuksista mutta suunnitteluvaiheessa lähes kaikki loput kustannukset sidotaan tiettyyn kohteeseen. Työssä tuotettiin asiakasyritykselle tietoa investointipäätöksen tekoa varten puupolttoainetuotannon teknisestä toteutuksesta sekä taloudellisesta kannattavuudesta.

Työ jakaantui kolmeen osaan: Kirjallisuustutkimukseen polttoainetuotannon lähtökohdista, alustavaan prosessisuunnitteluun sekä investointilaskelmiin. Tuotannon lähtökohtiin kuului selvitys raaka-aineen ja mahdollisten lopputuotteiden luokittelusta, standardeista ja polttoaineominaisuuksista sekä valmistustekniikoista. Polttoainevaihtoehdoiksi valikoituivat puumurske, puupelletti sekä paahtopelletti. Alustavassa prosessisuunnittelussa selvitettiin, miten kunkin polttoainevaihtoehdon tuotantoprosessi voitaisiin järjestää asiakasyrityksen tuotantoalueella. Lopuksi tutkittiin tuotantoprosessivaihtoehtojen kannattavuutta.

Biopolttoaineiden valmistus kierrätyspuusta näyttää olevan erittäin kannattavaa toimintaa. Pääsyy tähän on materiaalin edullinen tai jopa negatiivinen hinta. Sopivan polttoainetyypin valintaan vaikuttaa yrityksen olemassa oleva infrastruktuuri, etäisyys voimalaitoksista sekä niiden koko ja käytettävissä olevan raaka-aineen määrä. Asiakasyrityksen tapauksessa järkevintä näyttäisi olevan puu- tai paahtopelletin valmistus. Se tarjoaa tilaisuuden nostaa alueen energiatehokkuutta, kun kuivuri ja prosessijärjestelyt valitaan oikein. Puupelletin valmistus oli taloudellisen tarkastelun perusteella kannattavampaa mutta siinä investointisummat voivat jäädä niin pieniksi, ettei projektille voida myöntää investointitukea. Paahtopelletin tuotantoon saadaan todennäköisemmin ja korkeampaa investointitukea, joka tekisi siitä käytännössä yhtä kannattavaa kuin puupelletin tuottamisesta. Paahtopelletin markkinat ovat suuremmat ja vähemmän kilpailut mutta sen valmistukseen liittyy toisaalta runsaasti uuden teknologian epävarmuutta, johon kierrätyspuussa olevat kemialliset epäpuhtaudet tuovat vielä oman lisänsä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environment and Energy Technology

LEPPÄNEN, JASMINA: Production of solid biofuel from recovered wood

Master of Science Thesis, 108 pages, 4 Appendix pages

October 2014

Major: Power Plant Engineering

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: wood waste, recovered wood, used wood, solid biofuel, hog fuel, white pellet, top-pellet, black pellet, biocoal, torrefaction, investment

Woody biofuels play a vital part in Finland's energy production. The share of woody biofuels of total energy consumption in 2012 was 23 %. The goal to increase the share of renewable energy is to be reached mainly by increasing the use of wood as an energy source. This requires investments to woody biofuels production. An investment project is a multiyear venture, where planning plays a very important role. The planning expenditure typically makes 10 – 15 % of all of the project's expenditure yet in the planning phase almost all other expenditures are tied into a certain target. In this thesis information regarding the technical implementation and the financial profitability of production of solid biofuel was produced for a client firm to aid in the investment decision.

The thesis consist of three parts: a literature review about the basics of solid biofuel production, preliminary process design and investment calculations. The literature review covered topics like classification and standardization of the raw material and possible fuel products, fuel properties and production technologies. Hog fuel, white pellet and black pellet were chosen as possible fuel products to consider. In the preliminary process design, plans of how each production process could be arranged on the client's production area were made. Finally, each plan was evaluated in terms of its profitability.

The production of solid biofuel from recovered wood seems to be very profitable. Main reason for this is the raw material's low or even negative price. The existing infrastructure of the firm, the distance from power plants and the size of the plants, and also the amount of raw material needs to be considered when selecting a suitable biofuel to produce. In the client's case a more refined fuel such as white or black pellets appeared to be more suitable. They offer a way to increase the energy efficiency in the production area when the production process and dryer are chosen correctly. Production of white pellet was calculated to be more profitable but the capital expenditure involved in the project is likely to be so small that it wouldn't make the project eligible for financial support from the government. Black pellet production is much more likely to be eligible for this support, which would make it as profitable as white pellet production. The market of black pellet is much larger and there is less competition than with white pellet. Black pellet also involves more risks because the technology is rather new and the chemical impurities in recovered wood increase these risks.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Sweco Industry Oy:n Tampereen toimistolla maaliskuun ja syyskuun välisenä aikana. Harva työ syntyy tyhjiössä ja irrallaan muusta maailmasta ja sen vuoksi haluan osoittaa kiitokseni useille diplomityön tekemistä ja opintojeni etenemistä tukenneille henkilöille.

Haluan kiittää työni ohjaajaa Arto Hakolaa mielenkiintoisesta työn aiheesta, neuvoista ja hyödyllisistä keskusteluista. Lisäksi haluan kiittää muuta Sweco Industryn henkilökuntaa ja työkavereitani hyvästä seurasta sekä tuesta työn aikana. Asiakasyrityksen edustajia kiitän hyvästä yhteistyöstä, mielenkiintoisista keskusteluista ja avusta työn lähtötietojen hankinnassa.

Työni tarkastajaa Professori Risto Raikoa kiitän sekä diplomi- että kandidaatintyöni ohjauksesta ja mielenkiintoisesta matkaseurasta sekä työmatkalla että opintojen aikana. Haluan kiittää myös vaihtoyliopiston professoria Walter Schäferiä neuvoista verotukseen ja talouslaskelmiin liittyen.

Viimeisenä, joskaan ei vähäisimpänä, kiitän siskoani, avomiestäni ja muuta perhettäni sekä ystäviäni kaikesta tuesta opintojeni aikana. Ohi on!

18.9.2014

Jasmina Leppänen

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	viii
1 Johdanto	1
1.1 Työn tausta ja tavoitteet	1
1.2 Työn toteutus	2
2 Investointilaskelmien teoriaa	5
2.1 Yleisiä termejä	5
2.2 Kassavirtalaskenta	6
2.3 Rahatyypit	8
2.4 Nettonykyarvomenetelmä	9
2.5 Sisäisen korkokannan menetelmä	10
2.6 Takaisinmaksuaika	10
2.7 Herkkyysanalyysi	11
3 Raaka-aine	13
3.1 Määritelmät	13
3.2 Laatu	13
3.2.1 Epäpuhtaudet	13
3.2.2 Kosteus	14
3.3 Polttoainestandardin raaka-aineluokitus	15
3.4 VTT:n laatuluokitus	15
3.5 CO ₂ -neutraalius	17
3.6 EU:n kestävyyskriteerit uusiutuvalla energialle	17
4 Kiinteiden biopolttoaineiden valmistusmenetelmiä	19
4.1 Puubiomassan pienentäminen	19
4.1.1 Haketus	20
4.1.2 Murskaus	19
4.2 Pelletöinti	20
4.3 Paahtopelletin valmistus	23
4.3.1 Torrefiointi	23
4.3.2 Torrefioidun biomassan pelletöinti	28
4.4 Raaka-aineen soveltuvuus	29
4.4.1 Murskeeksi	29
4.4.2 Puupelletiksi	30
4.4.3 Paahtopelletiksi	30
5 Kuivurit	32
5.1 Viirakuivuri	33
5.2 Rumpukuivuri	34
5.3 Päästöt	34
5.4 Esikuivaus	35
6 Puupolttoaineiden ominaisuuksia	37

6.1	Tyypilliset ominaisuudet.....	37
6.2	Standardit	39
6.2.1	Puumurskeen laatuvaatimukset.....	39
6.2.2	Puupelletin laatuvaatimukset	40
6.2.3	Paahtopelletin laatuvaatimukset	40
6.3	Varastointi ja työturvallisuus	42
6.3.1	Hake ja murske	42
6.3.2	Puupelletti	43
6.3.3	Paahtopelletti	44
7	Prosessisuunnittelu.....	47
7.1	Laitetarjoukset.....	47
7.2	Aluelämmitysjärjestelmän lämpötase	47
7.3	Aluelämmitysjärjestelmän lisäpolttoainetarve.....	48
7.4	Polttoainetarve puupelletin valmistuksessa	49
7.5	Tukipolttoainetarve paahtopelletin valmistuksessa.....	51
8	Tuotantoprosessivaihtoehdot	55
8.1	VE 1.1 ja 1.2: Puumurske	55
8.2	VE 2: Puupelletti	56
8.2.1	VE 2.1 ja 2.2: Rajattomasti lämpöä	57
8.2.2	VE 2.3: Rumpukuivuri.....	58
8.2.3	VE2.4, 2.5 ja 2.6: Rajatusti lämpöä	58
8.3	VE3: Paahtopelletti	59
8.3.1	VE 3.1: Rumpukuivuri.....	60
8.3.2	VE 3.2 ja 3.3: Viirakuivuri	61
8.3.3	VE 3.4 ja 3.5: Tuotanto vain kesällä.....	63
8.3.4	VE 3.6: Suuri viirakuivuri, pieni tuotantolinja	63
9	Investointilaskelmien lähtötiedot	64
9.1	Tuotantomäärät	64
9.2	Lisälämmitys	66
9.2.1	Mitoitus	66
9.2.2	Syöttötariffit ja lämpöpreemiot.....	67
9.2.3	Lisäpolttoaine.....	68
9.3	Investointikustannukset.....	70
9.4	Investointituki	73
9.5	Käyttökustannukset	73
9.5.1	Puumurske	73
9.5.2	Sähkö	74
9.5.3	Työvoima.....	76
9.5.4	Muut.....	77
9.6	Tuotteesta saatava hinta	78
9.6.1	Polttoaineiden hinnat	78
9.6.2	Kuljetuskustannukset.....	80

9.7	Muut lähtötiedot.....	80
10	Tulokset.....	83
10.1	Kannattavuus.....	83
10.1.1	Puumurske.....	83
10.1.2	Puupelletti.....	84
10.1.3	Paahtopelletti.....	84
10.2	Hukkalämmön minimointi.....	85
10.3	Herkkyysanalyysi.....	87
10.3.1	Puumurske.....	87
10.3.2	Puupelletti.....	87
10.3.3	Paahtopelletti.....	89
11	Johtopäätökset.....	92
12	Yhteenveto.....	96
	Lähteet.....	98
	Liite 1: Paahtopelletin lisäpolttoaineen määrittäminen.....	109
	Liite 2: Polttoaineiden hintoja Suomessa.....	110
	Liite 3: Eräiden kustannustekijöiden vuosimuutoksia.....	111
	Liite 4: Puumurskeen Herkkyysanalyysi.....	112

TERMIT JA LYHENTEET

ALJ	Aluelämmitysjärjestelmä
EDM	Estimate day money, arviohetken raha. Hyödykkeiden ja palveluiden hinta sinä vuonna, kun arviot ja laskelmat tehdään.
MOD	Money of the day, nimellisraha. Hyödykkeiden tai palveluiden arvo tarkasteluvuonna, kun inflaatio on otettu huomioon.
NNA	Nettonykyarvo
NA	Nykyarvo, katso PV
PV	Present value, nykyarvo. Hyödykkeiden tai palveluiden arvo, kun on otettu huomioon inflaatio, eskalaattorit sekä laskentakorkokanta.
p-%	Painoprosentti, massaosuus.
ROI	Return on investment, pääoman tuottoaste.
RT	Real terms money, reaali-raha. Hyödykkeiden tai palveluiden arvo, kun eskalaattorit ja inflaatio on otettu huomioon.
SKK	Sisäinen korkokanta
TMA	Takaisinmaksuaika
VE	Vaihtoehto
VTT	Valtion tiede- ja tutkimuslaitos

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Puupolttoaineet ovat merkittävä osa Suomen energiantuotantoa. Puuenergian käyttö on ollut Suomessa hienoisessa nousussa viimeiset 20 vuotta ja se on tällä hetkellä toiseksi suurin energian lähde kokonaisenergiassa mitattuna heti öljyn jälkeen, johon luetaan myös liikennepolttoaineet. Puupolttoaineilla tuotettua energiaa käytettiin Suomessa vuonna 2012 noin 320 PJ, joka vastaa 23 % energian kokonaiskulutuksesta. Tästä energiasta kierrätyspuun osuus oli noin 2 %. (Tilastokeskus 2014, Energian kulutus Suomessa energialähteittäin 2012)

Tässä työssä tutkittiin kierrätyspuun hyödyntämisen tekniikkaa ja kannattavuutta. Kierrätyspuulla tarkoitetaan tässä yleisesti käytöstä poistettua puuta. Kaikki käytöstä poistettu puu ei kuitenkaan sovellu biopolttoaineeksi vaan osa jakeista rajataan raaka-ainepohjan ulkopuolelle. Tämän rajauksen tekeminen oli myös osa työn sisältöä. Osa työn sisällöstä on yleistettävissä myös muunlaisille puuraaka-aineille.

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen Sweco Industry Oy:n asiakasyritykselle, jolla on käytössään suuri määrä kierrätyspuuta ja risuja vuosittain. Puumateriaaleja ei tällä hetkellä aktiivisesti hyödynnetä, vaan ne myydään jatkokäyttöön käytännössä uloskan-tohintaan. Tavoitteena oli tutkia puille hyödyntämisvaihtoehtoja biopolttoaineena ja vastata esimerkiksi kysymyksiin, mitä biopolttoainetta kierrätyspuusta voitaisiin alkaa valmistamaan ja mitä valmistuksessa tulisi huomioida. Lisäksi selvitettiin eri tuotanto-vaihtoehtojen taloudellinen kannattavuus. Nestemäiset biopolttoaineet rajattiin työn ulkopuolelle. Myöskään kaasutusta ei käsitelty, sillä se oli jo aikaisemmassa selvityk-sessä todettu aivan liian kalliiksi toteuttaa.

Toinen huomioitava näkökulma oli, että tuotantoalueella on aluelämmitysjärjestelmä, jossa tällä hetkellä tuotetaan enemmän lämpöä kuin saadaan hyödynnettyä. Työssä tutkittiin mahdollisuuksia hyödyntää aluelämmitystä polttoainetuotannossa ja siten nostaa tuotantoalueen energiatehokkuutta.

Kolmas yleisempi tavoite työlle oli edistää resurssitehokkuuden ja uusiutuvan ener-gian lisäämisen tavoitteiden toteutumista tarjoamalla tietoa kierrätyspuun energiahyö-dyntämisestä ja puupolttoaineiden valmistuksesta. Kierrätyspuusta on mahdollista tarjota voimalaitoksille runsas ja luotettava biopolttoainelähde, jolla voidaan vähentää hiili-dioksidipäästöjä erityisesti korvaamalla kivihiiltä olemassa olevissa laitoksissa.

1.2 Työn toteutus

Työhön sisältyi kirjallisuusselvitys, prosessisuunnittelua, hintatietojen selvitystä, investointilaskelmien teko sekä tulosten raportointi. Kirjallisuudesta etsittiin tietoa kiinteistä biopolttoaineista ja niiden tuotantoprosesseista sekä kierrätyspuun ja biopolttoaineiden luokituksesta ja standardeista. Tässä vaiheessa valikoituivat potentiaalisimmat polttoainetyypit jatkotarkastelua varten.

Kirjallisuusselvityksen tulosten pohjalta suunniteltiin joukko alustavia tuotantoprosessivaihtoehtoja kustakin polttoainetyypistä. Prosessisuunnittelu kattoi lähinnä materiaalivirtojen määrittämisen ja laitteiden karkean mitoituksen. Prosessisuunnittelun yhteydessä laskettiin lisäksi muun muassa aluelämmitysjärjestelmän lämpötase, sen kehityminen vuosien mittaan, tukipolttoaineen tarve polttoaineen tuotannossa sekä arvioitiin torrefiointikaasun koostumus ja energiapitoisuus. Lisäksi suunniteltiin ja lähetettiin budjettitarjouspyynnöt laitevalmistajille. Saatuja tarjouksia hyödynnettiin prosessisuunnittelussa ja investointilaskelmien pohjana.

Tuotantoprosessivaihtoehdot nimettiin siten, että ne sisältävät viittauksen valmistettavaan polttoaineeseen. Murskeen valmistusta edustaa vaihtoehto 1, puupelletin valmistusta vaihtoehto 2 ja paahtopelletin vaihtoehto 3. Kussakin polttoainevaihtoehdossa on useampia alavaihtoehtoja prosessin järjestämiseen.

Työn taloudelliseen tarkasteluun kuuluivat investointilaskelmat sekä herkkyysanalyysi. Investointilaskelmien teko edellytti runsasta taustatiedon ja erityisesti hintatietojen hankkimista. Investointi- ja erityisesti herkkyysanalyysin laskelmia varten kirjoitettiin ohjelmakoodi taulukkolaskentaohjelmaan laskennan tehostamiseksi.

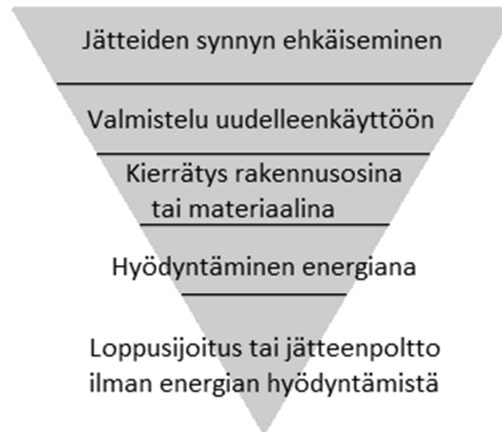
Työn yhteydessä selvitettiin myös raaka-aineen kemiallinen koostumus tärkeimpien epäpuhtauksien osalta ja perehdyttiin kiinteiden biopolttoaineiden laadunhallintaan. Asiakasyritykselle selvitettiin heidän toimipisteensä lähialueen voimallaitokset, kuinka suuria ne ovat ja mitä polttoaineita ne käyttävät. Näiden osien tarkempi sisältö jätettiin tämän raportin ulkopuolelle. Kaikkea työssä käsiteltyä ei ole esitelty tässä raportissa sellaisenaan tai lainkaan yrityssalaisuuteen vedoten.

1.3 Resurssitehokkuus

Resurssitehokkuus on yksi Euroopan unionin 2020-kasvustrategian lippulaivahankkeista. Sitä varten on laadittu ja julkaistu vuoden 2011 alussa etenemissuunnitelma, jossa määritellään keskipitkän ja pitkän aikavälin tavoitteet resurssitehokkuuden saavuttamiseksi sekä keinot saavuttaa mainitut tavoitteet.

Resurssitehokkuusohjelman eräs päätavoite on katkaista talouskasvun ja jätteen syntymisen välinen yhteys (Roadmap to a Resource Efficient Europe, 2011). Tätä on tavoiteltu jo vuoden 2008 jätedirektiivissä ja sen sisältö on huomioitu Suomen jätelainsäädännössä valtioneuvoston asetuksessa ja siihen liittyvissä säädöksissä (EY 19.11.2008/98; L 17.6.2011/646). Direktiivissä veloitetaan toimivaltaisia viranomaisia huolehtimaan jäsenvaltion jätehuoltosuunnitelmien ja jätteen ehkäisy-suunnitelmien laa-

dinnasta. Lisäksi otetaan käyttöön jätehuollon suunnittelua ohjaava jätehierarkia tai jätepyramidi, joka on esitetty kuvassa 1.1. Tämän työn aihepiiriä koskettavat jätehierarkian tasot ovat kolme alinta; Kierrätys rakennusosina tai materiaalina, hyödyntäminen energiana ja loppusijoitus. Työn tarkoitus on ennen kaikkea pureutua loppusijoituksen vähentämiseen ja energiana hyödyntämisen parantamiseen.



Kuva 1.1. Jätehierarkia.

Direktiivissä veloitetaan jäsenvaltioita tehostamaan jätteen kierrätystä. Rakennusjätteen osalta Suomen tavoitteena on hyödyntää vähintään 70 % materiaalina ja energiana vuoteen 2016 mennessä. (Ympäristöministeriö 2008) Tämä tavoite on kirjattu myös vuoden 2011 jätelakiin. (VNa 19.4.2012/179) Lisäksi jätelaki velvoittaa kierrättämään puupakkauksista vähintään 15 p-%. (VNp 23.10.1997/962)

Jätteenkäsittelykeskuksiin tulevasta kierrätyspuusta merkittävä osa on rakennus- tai purkupuuta ja siihen kohdistuu mainittu 70 % hyötykäytön tavoite. Kojo ja Lilja (2011) toteavat, että Suomessa syntyvästä rakennusjättemäärästä suurin osa, 41 %, on puupohjaista jätettä ja koko jättemäärästä mineraali- ja kivijätettä on 33 % ja metallijätettä 14 %. Loppu on muun muassa muovia, kipsiä ja muuta sekalaista jätettä. Jos kaikki metallijäte ja mineraali- ja kivijäte saataisiin täysimääräisesti hyödynnettyä ja oletetaan, ettei sekalaista jätettä ole kovin helppo hyödyntää edes energiana, tulisi 23/41 eli 56 % syntyvästä puupohjaisesta rakennusjätteestä kierrättää tai polttaa energiaksi, jotta 70 % hyötykäyttötavoite saavutettaisiin rakennusjätteissä. Tämä tarkoittaa, että materiaalina ja energiana hyödynnettävän puujätteen määrä tulee tulevaisuudessa vielä nousemaan merkittävästi nykyisestä. Jätelakiin liittyvä valtioneuvoston asetus edellyttää nykyään lajittelemaan rakennustyömaan jätteet tarkemmin, mikä helpottanee jättejakeiden hyödyntämistä (VNa 19.4.2012/179).

Puun kierrätys on Suomessa ja Pohjois-Euroopassa melko haastavaa uuden puun hyvän saatavuuden, energiakäyttöön soveltuvuuden ja alueen lämmitystarpeen vuoksi. Myös matalasta väestötiheydestä johtuva kuljetusmatkojen pidentyminen tekevät kierrätyksestä vähemmän houkuttelevaa. Pirhonen et al. (2011) tekemän Metlan raportin mu-

kaan kolme keskeisintä tekijää puun kierrätyksen ja uusiokäytön kannalta ovat väestömäärä ja –tiheys sekä lämmityksen tarve.

Lupaavimmat puun uusiokäyttökohteet ovat lastulevyn ja vanerin valmistus. Harvaan asutulla alueella keräys on liian kallista, mutta Etelä-Suomessa joitain kokeiluja on tehty. Ongelmaksi muodostuu puun sisältämä metalli, jonka vuoksi puhdistuslaitoksen investointikustannus nousee usein liian suureksi. Tämä yhdessä talven lämmitystarpeen kanssa tekevät lastulevynä hyödyntämisestä liian kallista Pohjois-Euroopassa. Myös vanerin valmistusta on tutkittu mutta kierrätyspuusta valmistettu vaneri on selvästi kalliimpaa ja heikkolaatuisempaa. Euroopassa on joitain sahoja, jotka sahaavat suurikoista kierrätyspuuta lattialankuiksi ja sisäverhouslaudoiksi sekä design-huonekalujen raaka-aineeksi. Tällaisen käytön lisäämisessä avainasemassa ovat kuluttajat, suunnittelijat ja arkkitehdit. Muita mahdollisia hyötykäyttökohteita ovat käyttö kompostoinnin tukiaineena, eläinten kuivikkeena tai maisemoinnin kateaineena. (Pirhonen et al. 2011)

Puujätteen kierrätyskäytännöissä on vielä paljon kehitettävää. Vaikka rakennusjätteen puu ja muu puujäte on pyrittävä ohjaamaan kierrätyskäyttöön, puutuotteen elinkaari väistämättä loppuu joskus. Käytöstä poistettavan puun jalostaminen polttoaineeksi mahdollistaa fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisen energiatuotannossa ja on ympäristö-, jäte-, ja resurssitehokkuuden tavoitteiden mukaista.

1.4 Uusiutuvan energian lisääminen

Vuonna 2012 uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta Suomessa oli Tilastokeskuksen mukaan 31,6 % (Energian kokonaiskulutus energialähteittäin, 2014). Suomen energia- ja ilmastostrategian mukaan Suomi on pääosin täyttämässä EU:n vuodelle 2020 asettamat tavoitteet, joihin kuuluu uusiutuvan energian lisäys 38 % energian loppukulutuksesta. Vuoteen 2050 mennessä suunnitellaan kuitenkin EU:n energiatietarkoituissa 80 % päästövähennystä unionin alueelle, mikä energia- ja ilmastostrategian mukaan edellyttää siirtymistä nykyisen kehityksen perusskenaariota kunnianhimoisemmille kehityspoluille. Biomassan kannalta toimenpiteet kohdistuvat kivihiilen voimalaitoskäytön vähentämiseen ja strategiaan on kirjattu tavoitteeksi, että pääosa kaupunkien lämmöntuotannon hiilenkäytöstä korvattaisiin biovoimalla. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013)

Kansallisen strategian lisäksi monet kunnat ja alueelliset toimijat ovat luoneet omat ilmastostrategiansa. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun ilmastostrategiaan on kirjattu 39 % hiilidioksidipäästötavoite vuoteen 2030 mennessä verrattuna 1990 tasoon ja Helsinki pyrkii energian tuotannossaan 100 % päästövähennykseen vuoteen 2050 mennessä (Helsinkiläinen ja ilmastonmuutos, 2010). Tampereen kaupunkiseudun ilmastostrategiassa tavoitteena on 40 % päästövähennys vuonna 2030 vuoden 1990 tasoon verrattuna asukasta kohden laskettuna (Tampereen seudun kuntayhtymä 2010).

2 INVESTOINTILASKELMIEN TEORIAA

Tässä kappaleessa tutustutaan investointikohteiden taloudellisen vertailun ja arvottamisen menetelmiin. Investointihanke on monivuotinen projekti, jossa etukäteissuunnittelu on merkittävässä osassa. Investointiprojekteissa suunnittelukustannukset ovat yleensä 10 – 15 % koko hankkeen kustannuksista mutta suunnitteluvaiheessa sidotaan lähes kaikki loput kustannukset tiettyyn kohteeseen. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

2.1 Yleisiä termejä

Investoinnit ovat monivuotisia projekteja ja pääoma sitoutuu niihin moniksi vuosiksi. Aikaperspektiivi on investointilaskelmien ydin. Tässä kappaleessa esitellään muutamia keskeisiä käsitteitä kuten pitoaika, diskonttaus, laskentakorkokanta ja inflaatio, joihin seuraavat kappaleet ja varsinaiset laskentamenetelmät perustuvat.

Neilikan ja Uusi-Rauvan (1999) mukaan investoinnin pitoajalla tarkoitetaan investointihyödykkeen teknistä tai teknistaloudellista käyttöikää. Toisin sanottuna sitä ajanjaksoa, jolloin hyödykettä aiotaan käyttää. Tekninen pitoaika viittaa investointihyödykkeen kestävyYTEEN eli siihen, miten kauan hyödykettä on mahdollista käyttää ilman merkittävää kulumista tai rikkoutumista tai tuotteen laadun heikkenemistä. Taloudellisella pitoajalla tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka jälkeen on odotettavissa, että uudet markkinoille tulevat vastaavat hyödykkeet ovat niin paljon parempia, että vanhaa hyödykettä ei enää kannata käyttää vaikka sillä olisi vielä teknistä käyttöikää jäljellä. Tekniseen käyttöikään perustuvaa pitoaikaa on mahdollista pidentää korjauksin ja laajennuksin käytännössä niin kauan kuin halutaan. Pitoaika-arvioissa suositellaan tukeuduttavan koneen tai laitteiston teknistaloudelliseen ikään. Pääoman pitoajalla tarkoitetaan aikaa, jonka ajan pääoma on sijoitettuna investointikohteeseen ja siten poissa muusta käytöstä. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

Neilimo ja Uusi-Rauva määrittelevät koron tarkoittavan yleisesti korvausta rahan käyttöön saamisesta. Sijoitetulle pääomalle kertyvä korko lasketaan yhtälöllä (2.1), jossa PO tarkoittaa pääomaa ja n on sijoitetun pääoman pitoaika.

$$PO_n = PO_{\text{tänään}} * (1 + \text{korko})^n \quad (2.1)$$

Koron laskemiselle käännteinen operaatio on diskonttaus, jolla voidaan laskea, minkä arvoinen n vuoden päästä saatava summa on tänään tai paljonko tänään tulee sijoittaa tunnetulla korolla, jotta n vuoden päästä ollaan halutussa summassa. Diskonttausoperaatio on esitetty yhtälössä (2.2), jonka merkinnät ovat yhtälön (2.1) mukaiset.

$$PO_{\text{tänään}} = PO_n * \frac{1}{(1+korko)^n} \quad (2.2)$$

Laskentakorkokanta on prosenttiluku tai kerroin, jolla saatetaan eri vuosina tapahtuvat maksusuoritteet vertailukelpoisiksi laskemalla niille korkoa tai diskonttaamalla ne. Laskentakorkokannaksi voidaan valita investointiprojektin minimituottovaatimus tai se voidaan muodostaa investointiin käytettävien pääomien painotetulla keskimääräiskustannuksella. Eri tyyppisille investoinneille asetetaan erilainen tuottovaatimus niihin liittyvään riskiin perustuen. Taulukossa 2.1. on esitetty Neilikan ja Uusi-Rauvan esittämät tuottovaatimukset eri tyyppisille investointiprojekteille. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

Taulukko 2.1. Erilaisten investointien tuottovaatimukset. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

Investoinnin tyyppi	Tuottovaatimus
Pakolliset investoinnit: Lakien tai määräysten perusteella tehtävät investoinnit esimerkiksi ympäristö- tai työsuojausinvestoinnit	0 %
Markkina-aseman turvaaminen investoinnein	6 %
Uusintainvestoinnit, koneiden ja laitteiden uusinta ja peruskorjaukset	12 %
Kustannusten alentaminen investointien avulla	15 %
Tuottojen lisääminen investoinneilla	20 %
Uusien alueiden valtaaminen tai uusien tuotteiden aikaansaaminen huomattavan riskinalaisin investoinnein	25 %

Rahan arvo muuttuu ajassa ja ostettujen ja myytävien palvelujen ja hyödykkeiden hinta muuttuu rahan arvon muuttuessa. Tätä kuvataan inflaatiolla, joka Schäferin (2013) mukaan on hyödykkeiden ja palveluiden yleinen hinnanmuutos ajan kuluessa. Inflaatio vaikuttaa siis rahan ostovoimaan ja se ilmoitetaan prosentteina esimerkiksi kuukaudelle tai vuodelle. Esimerkiksi 100 euroa tänään vastaa 2,5 % tasaisella inflaatiolla samaa ostovoimaa kuin 102,5 € ensi vuonna ja 128 € kymmenen vuoden päästä. Vastaavasti 100 € tänään vastaisi 10 vuotta sitten mainitulla tasaisella inflaatiolla 781 € summaa.

Kaikkien kustannustekijöiden, tuotteiden tai palveluiden hinnat eivät seuraa riittäväällä tarkkuudella yleistä inflaatiota. Jos laskelmiin sisältyy tällaisia kustannus- tai tuototekijöitä, niiden muutosta voidaan mallintaa eskalaattoreilla. Eskalaattori on inflaation kaltainen kerroin, jolla kustannus- tai tuototekijä kerrotaan ennen yleisen inflaation huomioimista.

2.2 Kassavirtalaskenta

Kassavirtalaskentaa käytetään investointien ja projektien suunnittelussa. Se on tapa tarkastella investoinnin kannattavuutta ja yrityksen rahavirtoja projektin kuluessa. Siinä taulukoidaan jokaiselle tarkastelujakson vuodelle menot ja tulot, esimerkiksi pääomakustannukset, poistot, korjauskulut, tulot, kulut, ja nettovoitto, riippuen siitä, mitä laskelmaan halutaan sisällyttää. Kulut eritellään usein ainakin kiinteisiin ja muuttuviin kuluihin, lisäksi voidaan huomioida esimerkiksi kuljetusmaksut, verot ja lisenssimaksut. Taulukossa 2.2. on esitetty esimerkki kassavirtalaskelmasta. (Schäfer 2013)

Taulukko 2.2. Esimerkki kassavirtalaskelmasta.

Vuosi	POK k€	Po k€	Tuo MWh	KKk k€	KKm k€	MT k€	Verot k€	Kassa k€	Net Profit k€
0	500	0	0	0	0	0	0	-500	0
1	0	100	5600	5	56	168	1,75	105,25	5,25
2	0	100	5300	5	53	159	0,25	100,75	0,75
3	0	100	6000	5	60	180	3,75	111,25	11,25
4	0	100	5600	5	56	168	1,75	105,25	5,25
5	0	100	5600	5	56	168	1,75	105,25	5,25
Yhteensä		500						27,75	27,75
Kiinteät käyttökustannukset: 5 k€/vuosi				Polttoaineen hinta: 30 €/MWh					
Muuttuvat käyttökustannukset: 10€/MWh				Veroprosentti: 25 %					

Taulukossa vuosi on suhteellinen vuosi projektin edetessä, vuotena 0 projekti aloitetaan ja viimeisenä, tässä viidentenä, vuotena tarkastelu loppuu ja projekti katsotaan päättyneeksi. Valittu ajanjakso on yleensä sama kuin laitteiden, investoinnin tai laitoksen pitoaika.

POK tarkoittaa pääomakustannuksia. Sen sarakkeeseen merkitään pääomakustannuksen, esimerkiksi investoinnin, tapahtumavuodelle koko investoinnin suuruus. Pääomakustannuksia ovat alkuinvestoinnin lisäksi erilaiset korjaukset ja laajennukset, joita ei laajuutensa vuoksi lueta juokseviin menoihin eli käyttökustannuksiin.

Po on lyhenne poistoista. Poistot ovat kirjanpidollinen käsite, joilla jaksotetaan pitkävaikutteisen hyödykkeen tai investoinnin kustannus niille vuosille, joiden aikana siitä katsotaan olevan hyötyä. Poistot merkitään kulun tapahtumavuotta seuraaville vuosille. Tässä ensimmäisenä vuonna tehty investointi on jaettu tasapoistoin käyttövuosille. Muuta poistojen jaksotustapoja ovat degressiivinen, progressiivinen tai käyttöön sidottu poisto. Esimerkiksi työkoneita voi olla mielekästä mallintaa käyttöön sidotuilla poistoilla, sillä niiden kuluminen on usein verrannollinen niiden käyttötunteihin. Degressiivisissä poistoissa ensimmäinen poisto on absoluuttisesti suurin ja poistoerät pienenevät vuosien mittaan, viimeisen erän ollessa pienin. Progressiiviset poistot lasketaan päinvastoin, ensimmäinen poisto on pienin, viimeinen suurin ja muut lasketaan lineaarisesti näiden välille. (Schäfer 2013, Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

Tuo on lyhenne tuotannosta ja tarkoittaa taulukossa prosessilla tai projektilla tuotettuja hyödykkeitä. Tässä esimerkissä on mitattu tuotantoa megawattitunneissa, mutta sitä voidaan mitata esimerkiksi tonneissa, kuutiometreissä, litroissa tai kappaleissa riippuen tuotteesta.

KKk ja KKm ovat lyhenteet käyttökustannuksista, viimeinen kirjain viittaa kiinteisiin tai muuttuviin kustannuksiin. Kiinteät käyttökustannukset edustavat tuotannon määrästä riippumattomia kuluja, esimerkiksi tilojen vuokrausta. Muuttuvia käyttökustannuksia ovat kaikki kustannukset, joiden määrä riippuu tuotannon määrästä, esimerkiksi raaka-aine, sähkö ja lämpö.

MT on lyhenne myyntituloista. Tässä laskelmassa se on sama kuin tuotanto kerrottuna polttoaineen eli tuotettavan tuotteen yksikköhinnalla. Jos tuloja tulee useasta eri lähteistä, ne kannattaa eritellä.

Verosarakkeeseen on laskettu kunkin vuoden projektiin liittyvät verot. Veroja maksetaan yhtiön tuottoihin perustuen niin, että myyntituloista vähennetään käyttökustannukset ja muut välittömät kustannukset kuten lisenssimaksut ja lisäksi vähennetään kyseisen vuoden poistot. Jäljelle jäävästä summasta maksetaan veroprosentin mukainen vero. Negatiivisesta summasta eli tappiosta veroja ei makseta. (Schäfer 2013)

Kassa viittaa konkreettisesti rahan tuloon ja menoon tapahtumahetkellä (Schäfer 2013). Kasaan ei merkitä kirjanpidollisia käsitteitä kuten poistoja vaan ainoastaan realisoituneet maksutapahtumat niiden tapahtumavuonna. Kuten Repo (2012) mallintaa luentomateriaalissaan, kassa on kuin kioskin käteiskassa. Kassa voi kuitenkin jäädä myös miinukselle, kuten esimerkin ensimmäisenä vuonna, jolloin tehdään investointi mutta tuloja ei ole vielä lainkaan.

NV tarkoittaa nettovoittoa, joka saadaan, kun tuotoista vähennetään kaikki menot. Pääomakustannukset lasketaan tähän summaan poistoina. Nettovoitto voi olla myös nettotappiota, jos jäädään miinukselle. Nettovoitto lasketaan tässä esimerkissä vähentämällä myyntituloista kaikki käyttökustannukset, poistot ja verot. (Schäfer 2013)

2.3 Rahatyypit

Schäfer (2013) käyttää rahan aikaulottuvuuden hahmottamiseksi neljää eri tyyppistä rahaa, jotka on esitetty taulukossa 2.3. Käännöksissä on käytetty apuna Neilikan ja Uusi-Rauvan (1999) kirjaa.

Arviohetken raha, EDM, viittaa siihen, mitä palvelut ja hyödykkeet maksavat sinä päivänä, kun arviota ja laskelmia kirjoitetaan. Jos esimerkiksi tänään kirjoitetaan investointilaskelma, jota varten käydään tarkastamassa Tilastokeskuksen sivuilta työvoimakustannukset ja metsätähdehakkkeen hinta, niiden arvo on arviohetken rahassa.

Nimellisrahan, MOD, arvo muodostetaan huomioimalla valitut eskalaattorit. Eskalaattoreilla mallinnetaan esimerkiksi työvoimakustannusten, öljyn hinnan ja pääomakustannusten nousua vuosien kuluessa jos niiden arvon muutos on selvästi yleisestä inflaatiosta poikkeavaa. Esimerkiksi öljyn hinnan muutoksia ei voida mallintaa yleisellä inflaatiolla. Schäfer (2013) käyttää yleisesti laskelmissaan pääomakustannuksille ja käyttökustannuksille eskalaattorina 2 % ja öljyn hinnalle 5 %, mitkä perustuvat hänen kokemukseensa öljy-, maakaasu- ja kivihiihialalta. Nimellisraha lasketaan kertomalla kyseinen hinta-arvio sitä vastaavalla eskalaattorilla yhtälön (2.3) mukaisesti.

$$MOD = EDM * \left(\frac{esc+100}{100} \right)^n \quad (2.3)$$

Yhtälössä esc on eskalaattori prosentteina ja n vuosien lukumäärä alkaen arviohetken vuodesta.

Taulukko 2.3. Rahatyypit rahan aika-arvon hahmottamiseksi. (Schäfer 2013)

Lyhenne	Nimi (eng.)	Nimi (suom.)	Merkitys
EDM	Estimate day money	Arviohetken raha	Hyödykkeiden ja palveluiden hinta sinä vuonna, kun arviot ja laskelmat tehdään.
MOD	Money of the day	Nimellisraha	Hyödykkeiden ja palveluiden hinta kuten se koetaan valittuna vuonna verrattuna EDM-hintoihin. Nostaa hintaa verrattuna arviointivuoteen.
RT	Real terms money	Reaaliraha	Lasketaan MOD:n pohjalta ja ottaa huomioon inflaation eli rahan arvon laskun vaikutuksen. Samalla rahamäärällä on tänään suurempi ostovoima kuin huomenna.
PV	Present value	Nykyarvo	Ottaa huomioon pääoman hinnan tai korkotavoitteen. Sama rahamäärä tänään saatuna on arvokkaampaa kuin sama rahamäärä kahden vuoden päästä.

Reaaliraha, RT, ottaa huomioon yleisen inflaation vaikutuksen. Reaaliraha lasketaan nimellisrahasta diskonttaamalla se valitulla inflaatioprosentilla yhtälön (2.4) mukaisesti.

$$RT_n = MOD_n * \left(\frac{1}{1 + \frac{inf+100}{100}} \right)^n \quad (2.4)$$

Yhtälössä RT_n on vuoden n reaaliraha, MOD_n vuoden n nimellisraha, inf on valittu inflaatioprosentti ja n laskettava vuosi siten, että arviontekovuosi on nolla.

Nykyarvo, PV, saadaan, kun reaalirahaan lisätään pääoman hinta. Pääoman hinta voidaan muodostaa projektiin sijoitetun pääoman koroista tai se voi olla projektiin sijoitetun pääoman tuottotavoite. Nykyarvo lasketaan diskonttaamalla reaaliraha valitulla korkokannalla yhtälön (2.5) mukaan

$$PV_n = RT_n * \left(\frac{1}{1 + \frac{i+100}{100}} \right)^n \quad (2.5)$$

, jossa i on pääoman hinnalle valittu korkokanta ja muut merkinnät vastaavat edellisissä yhtälöissä esitettyjä.

2.4 Nettonykyarvomenetelmä

Nettonykyarvomenetelmä perustuu kassavirtalaskelmaan ja siinä hyödynnetään erilaisia rahatyyppejä aikaperspektiivin huomioon ottamiseksi. Neilimo ja Uusi-Rauva (1999) määrittelevät, että nettonykyarvomenetelmässä lasketaan, ovatko investoinnista saatavat tuotot menojen jälkeen suuremmat kuin investoitu pääoma, kun aikaperspektiivi ja tuottotavoite on huomioitu. Schäfer (2013) laajentaa menetelmää niin, että kaikissa tuloissa ja menoissa huomioidaan lisäksi eskalaattorit ja inflaatio kultakin vuodelta. Investointivaihtoehto on kannattava jos nettotuottojen summa koko projektin ajalta on positiivinen. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

Nettonykyarvoa laskiessa etsitään ja arvioidaan ensin lähtötiedot mahdollisimman hyvin. Tarvittavia lähtötietoja ovat investointikustannus, tuotantokustannukset, tuotantomäärät, projektin kesto eli pitoaika, tuotteen hinta, eskalaattorit, inflaatio ja tuotto-odotus. Tarvittavat lähtötiedot myös vaihtelevat tapauskohtaisesti, muita tarvittavia lähtötietoja voivat olla esimerkiksi laajennukset ja korjaukset ja niiden hinta, kustannukset projektin lopetusvaiheessa tai lisenssimaksut. Lähtötiedot kerätään aina arviohetken rahassa (EDM).

Kun lähtötiedot on koottu, tehdään tarvittavat yksikkömuunnokset ja lasketaan koottujen tietojen perusteella poistot, kokonaistuotantokustannukset tuotantoon perustuen, tuotteesta saatavat tulot ja muut tulot ja menot. Nämä yhdistetään kunkin vuoden kassasummaksi ja nettotuotoksi. Kaikki paitsi poistot lasketaan ensin arviohetken rahassa. Poistot lasketaan vasta, kun pääomakustannukset on muutettu nimellisrahaksi, tosin usein ainoa pääomakustannus tapahtuu ensimmäisenä vuotena, jolloin arviohetken raha on saman arvoinen kuin nimellisraha. Kun laskelmat arviohetken rahassa on tehty, laskelmaan lasketaan vastaavat arvot nimellisrahassa (MOD) eskalaattoreiden avulla, sen jälkeen reaali rahassa (RT) valitulla inflaatioprosentilla ja lopuksi lasketaan nykyarvot (PV) valitulla laskentakorkokannalla. Lopuksi lasketaan nykyarvoon muutettujen vuosittaisten nettovoittojen summa, joka määrittää investoinnin arvon.

2.5 Sisäisen korkokannan menetelmä

Sisäisen korkokannan menetelmässä tehdään samanlainen kassavirtalaskelma, kuin nettonykyarvomenetelmässäkin. Nettonykyarvon sijaan menetelmässä etsitään kassavirtalaskelman avulla sisäinen korkokanta eli se korkokanta, jolla investointiprojektin nettonykyarvo on nolla eli kertyvien nettotuottojen nykyarvo on yhtä suuri kuin investoinnin hankintameno. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

Investointi kannattaa toteuttaa, jos sen sisäinen korkokanta on suurempi, kuin investointiprojektille asetettu tuottotavoite. Kun investointiprojekteja vertaillaan keskenään, tuottoisin on se, jonka sisäinen korkokanta on korkein. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

Yksinkertaistettu versio sisäisen korkokannan menetelmästä on pääoman tuottoaste eli ROI (Return on investment). ROI lasketaan jakamalla tyypillisen vuoden nettotuotto tyypillisen vuoden keskimääräisellä investoinnilla. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999) ROI-luvun laskennassa ei kuitenkaan voida ottaa aikaperspektiiviä tehokkaasti huomioon.

2.6 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuaika kertoo, kuinka kauan kestää, että investointiprojektista saatavat nettotuotot ylittävät investoinnin hankintamenon. Kassavirtalaskelman yhteydessä takaisinmaksuaika on helppo selvittää silmämääräisesti, jos sen yhteydessä nettotuotot on esitetty kumulatiivisesti omana pystyrivinä, kuten taulukossa 2.4. Kumulatiivisen

kassan sarakkeesta nähdään, että vuonna viisi päästään investointiprojektissa ”omilleen” eli tuotot ovat kattaneet ensimmäisenä vuonna tehdyn investoinnin. (Schäfer 2013)

Taulukko 2.4. Esimerkki takaisinmaksuajan selvittämisestä kassavirtalaskelman perusteella. Kassa, kum. tarkoittaa kumulatiivista kassaa, eli edellisen vuoden kassaan on aina lisätty kyseisen vuoden kassatulo.

Vuosi	POK k€	Po k€	Tuo MWh	KKk k€	KKm k€	MT k€	Vero k€	Kassa k€	Kassa, kum. k€
0	500	0	0	0	0	0	0	-500	-500
1	0	100	5600	5	56	168	1,75	105,25	-394,75
2	0	100	5300	5	53	159	0,25	100,75	-294
3	0	100	6000	5	60	180	3,75	111,25	-182,75
4	0	100	5600	5	56	168	1,75	105,25	-77,5
5	0	100	5600	5	56	168	1,75	105,25	27,75
Yhteensä		500						27,75	55,5
Kiinteät käyttökustannukset: 5 k€/vuosi				Polttoaineen hinta: 30 €/MWh					
Muuttuvat käyttökustannukset: 10€/MWh				Veroprosentti: 25 %					

Takaisinmaksuaika voidaan laskea yksinkertaistetusti ilman laskentakorkokantaa mallintamalla vuotuinen nettotuotto vakioksi ja jakamalla sitten hankintameno vuotuisella nettotuotolla. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999) Vuotuinen nettotuotto voidaan arvioida esimerkiksi laskemalla vuosituottojen keskiarvo tai valitsemalla tyypillisin vuosituotto eli moodi.

Takaisinmaksuaika riippuu siitä, millaisessa rahassa se lasketaan. Arviohetken raha, nimellisraha, reaali-raha ja nykyarvo kaikki antavat sille eri tuloksen, yleensä arviohetken raha lyhimmän ja nykyarvo pisimmän. Nykyarvo ja reaali-raha vastaavat kuitenkin parhaiten todellisuutta. (Schäfer 2013)

Takaisinmaksuajan perusteella on edullisinta tehdä ne investoinnit, joista pääoma kertyy nopeasti takaisin. Takaisinmaksuaika on tärkeä tieto rahoituksen kannalta ja voi olla jopa määräävä tekijä investointikohteen valinnassa tiukan rahatilanteen aikana. (Neilimo & Uusi-Rauva 1999)

2.7 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysissä tarkastellaan, miten investointiprojektin kannattavuus muuttuu, jos lähtöarvoa tai -arvoja muutetaan. Herkkyysanalyysillä tutkitaan siis projektiin liittyvää epävarmuutta ja muutosten vaikutuksia. Herkkyysanalyysillä pyritään vastaamaan seuraavan kaltaisiin kysymyksiin: Miten käy, jos parametrit eivät toteudukaan suunnitellusti? Miten käy jos tuotantokustannukset ovatkin 20 % suuremmat kuin ennakoitiin? Mitkä lähtöarvot ovat kaikkein vaikuttavimmat projektin kannattavuuden kannalta? (Neilimo & Uusi-Rauva 1999, Schäfer 2013)

Herkkyysanalyysi tehdään siten, että kutakin lähtötietoa muutetaan yksitellen ja lasketaan muutoksen jälkeen käytetyt laskelmat ja tunnusluvut uudelleen. Kun jokaiselle

lähtötiedolle tehdään herkkyysanalyysi erikseen, voidaan eritellä, mitkä osatekijät voimakkaimmin vaikuttavat projektin kannattavuuteen ja mitkä osatekijät vaikuttavat siihen vähiten. Ihalaisen ja Sikasen (2010) mukaan, kun muutetaan vain yhtä lähtötietoa, puhutaan yksisuuntaisesta herkkyysanalyysistä ja kahden muuttujan tapausta kutsutaan kaksisuuntaiseksi herkkyysanalyysiksi. Analyysin perusteella voidaan suunnata voimavarat lopputuloksen kannalta tärkeimpien asioiden hoitamiseen ja suunnitteluun.

3 RAAKA-AINE

3.1 Määritelmät

Työssä tarkasteltava pääraaka-aine on kierrätyspuu. Kierrätyspuulla tarkoitetaan tässä käytöstä poistettua puuta, joka kerätään jätehuoltoyritysten lajittelupisteissä esimerkiksi nimillä jättepuu, puujäte, käytöstä poistettu puu. Kierrätyspuuksi luetaan myös rakennus-, tie- ja vesihuollon rakenteiden tai muiden vastaavien työmailta tuleva purkupuuhu. Se oletetaan kuitenkin käsiteltävän erikseen ja päätyvän raaka-aineeksi vasta mahdollisen jätteenkäsittelykeskuksella tapahtuvan lisälajittelun tai raaka-ainemittausten kautta. Kyllästetty puu ei kuulu tarkastelualueeseen.

Toinen tarkasteltava raaka-aine on risut, jotka koostuvat ennen kaikkea yksittäisten ihmisten ja kuntien pihojen, puistojen ja tienvarsien siistimisessä syntyvästä puujätteestä. Risujakeeseen kuuluu ennen kaikkea oksia ja nuoria, hyvin ohutrunkoisia puita.

3.2 Laatu

3.2.1 Epäpuhtaudet

Kierrätyspuussa voi olla mekaanisia ja kemiallisia epäpuhtauksia. Mekaanisia epäpuhtauksia ovat esimerkiksi naulat, kivet, betonijäämät, kiinnikkeet ja narut. Mekaanisia epäpuhtauksia voidaan poistaa esimerkiksi puun murskauksen jälkeen magneettikeräimellä.

Kemiallisia epäpuhtauksia ovat esimerkiksi erilaiset liimat, laminaatit ja pinnoitteet. Tyypillisesti nämä aineet ovat urea-formaldehydi-, fenoli-formaldehydi- ja melamiini-urea-formaldehydi- sekä isosyanaattihartseja ja melamiinia. Lisäksi voi esiintyä titaania ja kerätyn puun typpi-, natrium- tai kaliumpitoisuudet voivat olla kohonneet. Nimikkeellä ”puujäte” kerättyssä aineksessa ei pitäisi esiintyä halogenoituja orgaanisia yhdisteitä, raskasmetalleja tai kyllästysaineita. Virheellinen lajittelu, vanhat raskasmetalleja sisältävät maalit ja puunsuoja-aineet sekä joidenkin vanereiden homesuoja-aineet muodostavat riskin, että näitä aineita silti esiintyy. (Alakangas & Wiik 2008) Tämän vuoksi säännölliset raaka-ainemittaukset ovat tärkeitä, jotta voidaan varmistaa, että raaka-aine on tarpeeksi puhdasta polttoaineentuotantoa varten. Taulukkoon 3.1. on kerätty eri aineiden tyypillisiä pitoisuuksia kierrätyspuussa.

Taulukko 3.1. Kierrätyspuun tyypillisiä ominaisuuksia. Koostettu lähteestä Alakangas & Wiik (2008).

Aine	Pitoisuus	Aine	Pitoisuus
Tuhka, p-%, d	1,8	Arseeni, As, mg/kg, d	9
Hiili, C, p-%, d	49,5	Kadmium, Cd, mg/kg, d	0,25
Vety, H, p-%, d	6,1	Kromi, Cr, mg/kg, d	24,5
Typpi, N, p-%, d	0,7	Kupari, Cu, mg/kg, d	24,1
Rikki, S, p-%, d	0,04	Elohopea, Hg, mg/kg, d	0,03
Kloori, Cl, p-%, d	0,05	Nikkeli, Ni, mg/kg, d	6,2
Alumiini, Al, mg/kg, d	346	Lyijy, Pb, mg/kg, d	37,7
Kalium, K, mg/kg, d	834	Vanadiini, V, mg/kg, d	1,1
Natrium, Na, mg/kg, d	381	Sinkki, Zn, mg/kg, d	171,2
Mangaani, Mn, mg/kg, d	82		

Taulukossa lyhenne d viittaa kuiva-aineeseen. Yksiköt ovat siis painoprosenttia kuiva-aineesta tai milligrammaa kilossa kuiva-ainetta. Taulukon tiedot on koostettu laskemalla pitoisuuksien keskiarvot Alakankaan ja Wiikin (2008) raportissa analysoiduista kierrätyspuunäytteistä. Valittujen kuuden kierrätyspuunäytteen kuvaukset vastaavat asiakasyrityksen kierrätyspuujaetta. Kirjallisuusvertailun perusteella kierrätyspuun kemialliset pitoisuudet ovat pääsääntöisesti luonnonpuuta vastaavissa rajoissa. Luonnonpuun korkeimpia vastaavia pitoisuuksia on kerätty taulukkoon 3.2.

Risut vastaavat ominaisuuksiltaan metsätähdehaketta mutta risuissa on tyypillisesti vähemmän havupuuta ja neulasia. Risuissa ei ole kemiallisia epäpuhtauksia mutta niiden joukossa voi olla jonkin verran hiekkaa, kiviä tai muita mekaanisia epäpuhtauksia. Suurin osa tällaisista epäpuhtauksista kuitenkin varisee pois raaka-aineen käsittelyssä ilman lisätoimia.

3.2.2 Kosteus

Alakankaan ja Wiikin (2008) mukaan osa käytöstä poistetusta puusta on hyvin kuivaa, jopa alle 20 %. Talvella lumi voi nostaa kosteuspitoisuutta jopa yli 30 %. Myös Alakankaan (2000, s. 153) toinen raportti vahvistaa nämä arviot, siinä kierrätyspuun kosteuspitoisuudeksi on arvioitu 15-35 %. Tässä työssä on käytetty kierrätyspuun alkukosteutena 20 %.

Risujen koostumus ja sitä kautta myös kosteus vastaa pitkälti metsätähdehaketta. Risujäte kerätään yleensä keväällä ja sen annetaan kuivua kasattuna ennen haketusta puolesta vuodesta vuoteen. Tällöin sen kosteuspitoisuus alenee tuoreen puun tyypillisestä 45 – 55 % kosteudesta jopa alle 35 %. Tässä työssä risujen kosteutena on käytetty pääosin 50 %.

3.3 Polttoainestandardin raaka-aineluokitus

Kiinteiden biopolttoaineiden standard SFS-EN 14961-1 sisältää raaka-aineluokituksen, jonka mukaan polttoaineen valmistuksen raaka-aine merkitään sen tuotetietoihin. Kierätyspuu kuuluu standardissa luokkaan 1.3, käytöstä poistettu puu tai puutuote, ja alaluokkaan 1.3.2, kemiallisesti käsitelty puu. Vaihtoehtoisesti voidaan katsoa puujätteen kuuluvan luokkaan 1.3.3, Sekoitus luokista 1.3.2 ja 1.3.1, sillä se sisältää sekä kemiallisesti käsiteltyä puuta että pieniä määriä käsittelemätöntä. Luokka 1.3.1 on kemiallisesti käsittelemätön, käytöstä poistettu puu tai puutuote. Standardin määritelmä kemiallisesti käsitelystä, käytöstä poistetusta puusta tai puutuotteesta on seuraava: ”Käytöstä poistetut puutuotteet ja –tähteet, käsittelemätön tai ainoastaan mekaanisesti käsitelty puu, joka hyvin vähäisessä määrin sisältää kemikaaleja, joita puhdas puu ei normaalisti sisällä. Käytöstä poistettu puu tai puutuote ei saa sisältää suoja-ainekäsittelystä tai pinnoituksesta peräisin olevia raskasmetalleja tai halogeenisia orgaanisia yhdisteitä.” (SFS-EN 14961-1)

Kerätyt risut kuuluvat samassa standardissa luokkaan 1.1, luonnon- ja istutusmetsän puubiomassa ja muu luonnonpuu ja alaluokkaan 1.1.7, puutarhoista, puistoista, tienvarsien kunnossapidosta, viiniviljelmiltä ja hedelmätarhoista korjattu sekalainen puu. Standardissa luokan kuvaus on seuraava: ”Luonnonmetsä- ja istutuspuu ja muu luonnon puu, jota on ainoastaan katkottu, kuorittu, kuivattu tai kostutettu. Tähän luokkaan kuuluva puu on peräisin metsistä, puistoista, puutarhoilta ja istutusmetsistä sekä lyhytkieroisista metsistä ja vesakoista.” (SFS-EN 14961-1)

Jos näitä kerättyjä jakeita sekoitetaan polttoainetuotannon raaka-aineeksi, tuloksena olevan polttoaineen raaka-aineeksi merkitään luokka 1.4 sekoitus. Sekoitus on tarkoituksellisesti sekoitettu kun taas seos on tahattomasti sekoittunut. Sekoituksen aineiksi merkitään edellä mainitut luokat 1.3.2, kemiallisesti käsitelty puu ja 1.1.7 puutarhoista ja vastaavista korjattu sekalainen puu. (SFS-EN 14961-1)

3.4 VTT:n laatuluokitus

VTT on julkaissut raportin käytöstä poistetun puun luokittelusta ja hyvien käytäntöjen kuvauksesta (Alakangas & Wiik 2008). Raportissa käytöstä poistettu puu luokitellaan neljään eri luokkaan, A, B, C ja D. Tässä työssä sovelletaan raportissa esitettyä luokittelua puuperäisten jätteiden luokitteluun niiden kemiallisten epäpuhtauksien mukaan. Raportissa on myös lajitteluohjeita ja kuvia tyypillisistä puujätetyypeistä luokitteluineen lajittelun helpottamiseksi.

Luokkaan A kuuluvassa puussa ei ole kemiallisia epäpuhtauksia eikä se saa sisältää muiden luokkien puuta. Mekaanisia epäpuhtauksia, kuten nauvoja tai muovisia kiinnikkeitä, sallitaan korkeintaan 2 p-%. Tähän luokkaan kuuluvat seuraavat standardin EN 14961-1 alkuperäluokat: Luonnon- ja istutusmetsän puubiomassa, kemiallisesti käsittelemätön teollisuuden puutähde, kemiallisesti käsittelemätön käytöstä poistettu puu tai

puutuote ja maisemanhoidosta peräisin oleva puubiomassa. Puhdasta puuta ovat esimerkiksi risut sekä monet teollisuuden puupakkaukset kuten kaapelikelat ja kuormalavat.

Luokkaan B kuuluva puu on kemiallisesti käsiteltyä mutta se ei saa sisältää puun suoja-ainekäsittelystä tai pinnoituksesta peräisin olevia orgaanisia halogenoituja yhdisteitä tai raskasmetalleja. Typpi-, rikki- ja klooripitoisuudet voivat olla koholla, minkä vuoksi niiden pitoisuus polttoaineessa on ilmoitettava. Alakangas ja Wiik (2008) ovat keränneet raportissaan luonnonpuun maksimiarvoja kemiallisten aineiden pitoisuuksille ja toteavat, että kemiallisesti käsitellyn käytöstä poistetun puun vastaavat arvot eivät saa ylittää näitä raja-arvoja. Raja-arvot on esitetty taulukossa 3.2. Muita kemiallisia epäpuhtauksia sallitaan korkeintaan 3 p-%. Mekaanisia epäpuhtauksia, kuten nauvoja ja betonia, sallitaan korkeintaan 2 p-%. (Alakangas & Wiik 2008)

Taulukko 3.2 Eräiden aineiden korkeimpia sallittuja pitoisuuksia luokan B puussa. (Alakangas & Wiik 2008)

		Aine		Raja-arvo*, kuiva-aineesta	
Suositusarvo	Rikki	S	≤ 0,2 p-%	≤ 2 000 mg/kg	
	Typpi	N	≤ 0,9 p-%	≤ 9 000 mg/kg	
	Kalium	K	≤ 0,5 p-%	≤ 5 000 mg/kg	
	Natrium	Na	≤ 0,2 p-%	≤ 2 000 mg/kg	
	Kloori	Cl	≤ 0,1 p-%	≤ 1000 mg/kg	
Raskasmetallit	Arseeni	As	≤ 0,0004 p-%	≤ 4 mg/kg	
	Kadmium	Cd	≤ 0,0001 p-%	≤ 1 mg/kg	
	Kromi	Cr	≤ 0,004 p-%	≤ 40 mg/kg	
	Kupari	Cu	≤ 0,003 p-%	≤ 30 mg/kg **	
	Elohopea	Hg	≤ 0,00001 p-%	≤ 0,1 mg/kg	
	Lyijy	Pb	≤ 0,005 p-%	≤ 50 mg/kg	
	Sinkki	Zn	≤ 0,02 p-%	≤ 200 mg/kg	
* raja-arvoja sovelletaan vain kloorille ja raskasmetalleille, muut ovat suositusarvoja.					
** puun kuparipitoisuus voi olla jopa 400 mg/kg					

Standardin EN 14961-1 alkuperäluokista tähän luokkaan luokitellaan kemiallisesti käsitelty puutähde, kuitutähde ja rakenneosat sekä kemiallisesti käsitelty puu tai puutuote. Tällaista puuta ovat kierrätyspisteiden puujätteessä muun muassa vaneri, lastulevy ja kaappien ovet.

Alakankaan ja Wiikin (2008) mukaan luokan B puujätettä voidaan käyttää polttoaineena kattilalaitoksissa, joissa polttotekniikan taso ja varustetaso on hyvä ja palamisen hyvyyttä voidaan tarkkailla. Kattilassa on oltava riittävä viipymäaika ja lämpötilataso ja palamiskaasujen hallinta ja savukaasujen puhdistus on oltava kunnossa. Suosituksena on, että luokan B puuta käytetään seospolttoaineena ja että kattilalaitoksen teho on vähintään 20 MW_{th}. Tämän vuoksi luokan B puu ja siitä valmistetut polttoainelasteet luokitellaan kiinteiden biopolttoaineiden standardin SFS-EN 14961 mukaan.

Puujäte, joka sisältää orgaanisia halogenoituja yhdisteitä ja raskasmetalleja, mutta ei sisällä puun kyllästysaineita kuuluu kierrätyspolttoaineisiin ja luokkaan C. Myös luokan B puujäte, jonka alkuperästä tai kemiallisten aineiden pitoisuuksista ollaan epävarmoja, kuuluu lähtökohtaisesti tähän luokkaan. Kestopuu, muun muassa painekyllästetty puu, ei kuulu tähän luokkaan. Luokka C on kierrätyspolttoainetta ja siihen sovelletaan kierrätyspolttoainestandardia SFS-EN 15357 ja jätteenpolttoasetusta.

Tähän luokkaan kuuluu kierrätyspisteide puujätteestä hyvin vanhoilla maaleilla tai lakooilla käsitelty puu. Erityisesti vanhoista rakennuksista peräisin oleva purkupuu kuuluu usein tähän luokkaan. Purkupuu ylipäättään luokitellaan lähtökohtaisesti luokkaan C ja se määritellään standardin 14961 mukaan seuraavasti: ”Purkupuu on käytöstä poistettu puu, jota syntyy purettaessa rakennuksia tai tie- ja vesirakennustyön rakennelmia”. Jos B-luokan puun epäillään sisältävän orgaanisia halogenoituja yhdisteitä tai raskasmetalleja, se siirretään luokkaan C. Kemialliset pitoisuudet mittaamalla voidaan todeta C-luokan puu tarpeeksi puhtaaksi B-luokkaan siirrettäväksi.

Luokka D on ongelmajätettä ja siihen kuuluu kyllästysaineilla käsitelty puu. Tämän luokan puujäte ei sovi normaalin voimalaitoksen eikä jätteenpolttolaitoksen polttoaineeksi eikä sitä käsitellä tässä sen tarkemmin.

3.5 CO₂-neutraalius

Tilastokeskuksen polttoaineluokituksessa 2014 kierrätyspuu on luokiteltu biopolttoaineeksi ja siten päästökauppaan kuulumattomaksi polttoaineeksi teollisuuden puutähtien ja pellettien ja brikettien kanssa. Tähän kierrätyspuuluokkaan kuuluu myös puhdas puutähte tai käytöstä poistettu puu tai puutuote, johon ei sisälly muovipinnoitteita tai halogenoituja orgaanisia yhdisteitä eikä raskasmetalleja eli luokkien A ja B puujakeet.

Luokkien C ja D puujakeita, purkupuuta ja kyllästettyä puuta, ei lasketa täysin hiilidioksidineutraaliksi vaan niiden sisältämien epäpuhtauksien nojalla niille on laskettu pieni päästökerroin. Vuoden 2014 polttoaineluokituksen mukaan se on purkupuulle 17,0 t/TJ ja kyllästetylle puulle 11,4 t/TJ. Vertailun vuoksi kierrätyspolttoaineelle, jolle on oletettu 60% bio-osuus, on määritetty hiilidioksidikertoimeksi 31,8 t/TJ ja kivihiilelle 93,3 t/TJ.

3.6 EU:n kestävyyskriteerit uusiutuvalla energialle

EU:ssa on tällä hetkellä suunnitteilla samankaltaiset kestävyyskriteerit kiinteille biopolttoaineille kuin on jo tehty nestemäisille biopolttoaineille. Kriteerit ovat vasta EU-komission suunnittelussa, joten ei voida varmasti sanoa, miten ne tulevat vaikuttamaan polttoainetuotantoon kierrätyspuusta. (Aho et al. 2013)

Konsulttitoimisto Gaia on tehnyt suunnitteilla olevista kestävyyskriteereistä selvityksen Energiateollisuudelle. Selvityksessä lähdetään oletuksesta, että kiinteiden biopolttoaineiden kestävyyskriteerit tulisivat olemaan samankaltaiset kuin nestemäisille biopolttoaineille. Näitä kriteerejä ovat kasvihuonekaasupäästövähennäminen, biologinen

monimuotoisuus, maankäytön muutos, turvemaiden kuivattaminen ja maatalouden vaatimusten noudattaminen. (Aho et al. 2013)

Kasvihuonekaasupäästövähennemä tarkoittaa, että kasvihuonekaasupäästöt todella vähenevät, esimerkiksi etteivät tuotannossa syntyneet päästöt ole suuremmat kuin biopolttoaineella korvattavasta fossiilisesta polttoaineesta aiheutuvat päästöt. Nestemäisten biopolttoaineiden kestävyyskriteereissä (HE 13/2013) vaaditaan, että tämä päästövähennys todella lasketaan ja että se alittaa tietyn raja-arvon, esimerkiksi -50 %. Biologinen monimuotoisuus viittaa siihen, ettei esimerkiksi raaka-ainepuu ole peräisin aarniometsästä tai luonnonsuojelualueelta. Maankäytön muutoksella tarkoitetaan ennen kaikkea sitä, että vuosittaiset hakkuut ja metsien kasvu ovat tasapainossa. Turvemaita ei saa kuivattaa tarpeettomasti eikä niin, että siitä vapautuu ilmaan paljon kasvihuonekaasupäästöjä. (Aho et al. 2013)

Nestemäisten biopolttoaineiden kestävyyskriteerit edellyttävät biopolttoaineita tuotavalta toiminnanharjoittajalta kestävyyskriteereitä koskevan järjestelmän perustamista ja ylläpitoa, jossa tarkkaillaan edellä mainittujen kriteerien toteutumista tuotannossa. Porkkanana tarjotaan valmisteveron alennusta, joka on -50 tai -100 %-yksikköä riippuen biopolttoaineen raaka-aineesta. Kiinteitä biopolttoaineita ei tällä hetkellä veroteta (Energian hinnat 2014), joten järjestelmään houkuttava toimenpide on toteutettava kiinteiden biopolttoaineiden osalta eri tavoin. (HE 13/2013)

Gaian selvityksessä keskitytään lähinnä puu- ja metsätähdepohjaisiin biopolttoaineisiin ja se ei siten suoraan tarjoa tietoa kriteerien vaikutuksista kierrätyspuusta valmistettuihin polttoaineisiin. Varmasti voitaneen sanoa vain, että dokumentointivaatimukset tulevat hieman kasvamaan. (Aho et al. 2013)

4 KIINTEIDEN BIOPOLTTOAINEIDEN VALMISTUSMENETELMIÄ

4.1 Puubiomassan pienentäminen

Haketus ja murskaus ovat tavallisesti käytettyjä matalamman jalostusasteen biopolttoaineen valmistusmenetelmiä. Niitä käytetään yleisesti hakkuiden yhteydessä energiapuun ja kantojen sekä puutarharisujen ja kierrätyspuun pienentämiseen. Toisaalta ne ovat muiden polttoaineenjalostusmenetelmien ensimmäinen vaihe. Haketta ja mursketta käytetään yleisesti monissa biovoimalaitoksissa sähkön- ja lämmöntuotantoon sekä jonkin verran kotitalouksien omassa lämmöntuotannossa.

4.1.1 Murskaus

Mursketta syntyy, kun kiinteää ainetta särjetään pienemmäksi tylpillä välineillä kuten vasaroilla tai teloilla. Murskeen palakoko ja –muoto vaihtelevat. Murske jaetaan pääfraktioon, karkeafraktioon ja hienoainekseen. Pääfraktio on hallitseva palakoko, noin 75 p-% materiaalista. Karkeafraktioon kuuluu tyypillisesti korkeintaan 10 p-% aineksesta ja sen kappaleet ovat pääfraktiota suurempia ja pidempiä. Hienoainekseen kuuluvat alle 3,15 mm kokoiset kappaleet. Murskain sietää huomattavasti enemmän mekaanisia epäpuhtauksia, kuten maa-ainesta ja kiviä, kuin hakkuri. Tämän vuoksi esimerkiksi kantoja käsitellään vain murskaimilla. (Alakangas 2014)

Murskaimet voidaan jakaa syöttötavan mukaan pysty- ja vaakasyöttöisiin sekä kierrosluvun perusteella hidaskäyntisiin ja nopeakäyntisiin. Hidaskäyntisissä murskaimissa kierrosluku on yleensä alle 100 rpm ja nopeakäyntisissä yli 600 rpm. Vaakasyöttöisissä murskaimissa on syöttökuljettimet roottorin ylä- ja alapuolella ja ne työntävät murskattavaa ainetta hallitulla nopeudella murskaimeen. Vaakasyöttöä voidaan ajaa myös takaisin päin esimerkiksi tukostilanteessa tai jos havaitaan, että murskaimeen on matkalla suuria kiviä tai muita epäpuhtauksia. Pystysyötön ongelmana on suurempien ja vaihtelevankokoisten aineiden kanssa holvautuminen, kun suuremmat kappaleet muodostavat syöttökanavaan holvikaaren, joka tukkii raaka-aineen syötön. Myöskään pitkät kappaleet kuten nuori energiapuu eivät yleensä sovi tälle syöttötavalle. Holvautumista voidaan jossain määrin välttää suurentamalla syöttökuilua tai käyttämällä kaukalomurskainta, jossa on vaakasyöttöistä murskainta muistuttava pyörivä kaukalo syöttöaukon reunalla. (Rinne 2010)

Tavallisesti murskaimissa on 1 - 2 roottoria ja vasarat ovat kiinteitä tai nivelöityjä. Nivelöidyt vasarat vaurioituvat vähemmän epäpuhtauksista ja irtoaineksesta mutta toisaalta saattavat antaa liikaa myöten suurempien puukappaleiden kohdalla. (Rinne 2010)

Murskaimiin on mahdollista saada magneetti raudan poistoa varten. Suurissa murskaimissa voi olla useampia murskainrumpuja, esimerkiksi hidaskierroksinen esimurskain ja nopeakierroksinen päämurskain ja metallimagneetit joka rummun jälkeen. Rumpuseulojen avulla varmistetaan, että palakoko ei vaihtelee liikaa (Göös, 2011, s. 31).

4.1.2 Haketus

Haketta tehdään puuraaka-aineesta pilkkomalla se pieniksi kappaleiksi terävillä terillä. Puuhakkeen palat ovat suorakaiteen muotoisia ja niiden paksuus on pieni verrattuna muihin mittoihin. Tyypillinen palapituus on 5 - 50 mm. Hakeaines luokitellaan palojen koon mukaan pääfraktioon, joka on hallitseva palakoko, karkeaan fraktioon, johon kuuluu hallitsevaa palakokoa selvästi suuremmat palat sekä hienoainekseen. (Alakangas, 2007)

Hake sisältää vähemmän käsittelyä ja kuljetusta haittaavia pitkiä tikkuja kuin murske. Erityisesti karsittua puuta hakettaessa tarvittava energia on pienempi kuin murskaamiseen tarvittava. (Rinne 2010)

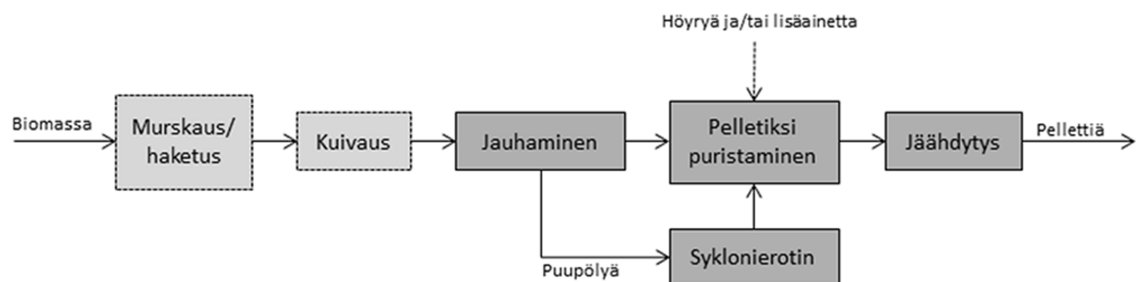
Hakkurit muistuttavat suuresti murskaimia ja ne luokitellaan samalla tavoin ylä- ja vaakasyöttöisiin ja nopea- ja hidaskäyntisiin. Hakkurit ovat murskaimia herkempiä mekaanisille epäpuhtauksille, sillä ohuet terät rikkoutuvat tukevia vasaroita herkemmin.

Rinteen (2010) mukaan Suomessa suosituin hakkurityyppi energiapuun haketuksessa on rumpuhakkuri. Se sietää paremmin epäpuhtauksia ja palakoko on melko tasaista. Siinä on lieriömäinen rumpu, jonka ulkokehällä on tavallisesti 2 - 6 terää. Rummun kehän suuntaisesti on seulaverkko, jonka läpi tarpeeksi pieneksi hakkeutuneet palat kulkeutuvat (Rinne 2010, MetsäVerkko).

4.2 Pelletöinti

Pelletti on jauhemaisesta raaka-aineesta puristamalla valmistettu, muodoltaan sylinterimäinen polttoaine, jota voidaan valmistaa lähes mistä tahansa biomassasta. Myös kierrätyspolttoaineita tiivistetään usein pelletöimällä. Jokaisella materiaalilla on erityispiirteensä pelletöintiprosessissa. Tässä kappaleessa keskitytään puumateriaalin pelletöintiin.

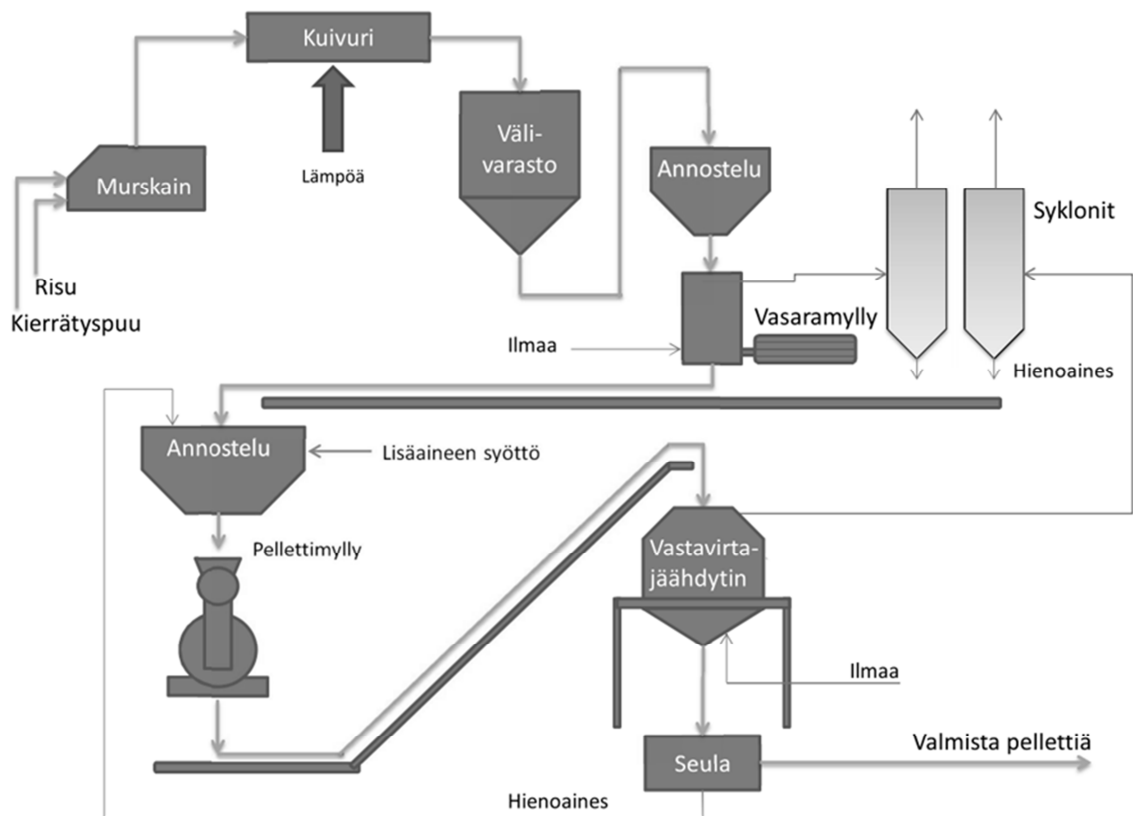
Pelletöintiprosessin kaaviokuva on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Pelletöintiprosessi.

Varsinaisen pelletöintiprosessin vaiheet ovat jauhaminen, pelletiksi puristus ja jäähditys. Mahdollisia esikäsittelevaiheita ovat pienennys murskaamalla tai hakettamalla sekä kuivaus. Puuta käytettäessä raaka-aineen alkukosteuden tulisi olla noin 10 - 15 % ennen pelletöintiä. Kosteampi raaka-aine on kuivattava. Kuivattaminen tehdään tavallisesti ennen raaka-aineen jauhamista. Joissain tapauksissa raaka-aine voi olla myös liian kuivaa ja vaatii kostuttamista, johon yleensä käytetään höyryä. (Bioenergia ry, 2013)

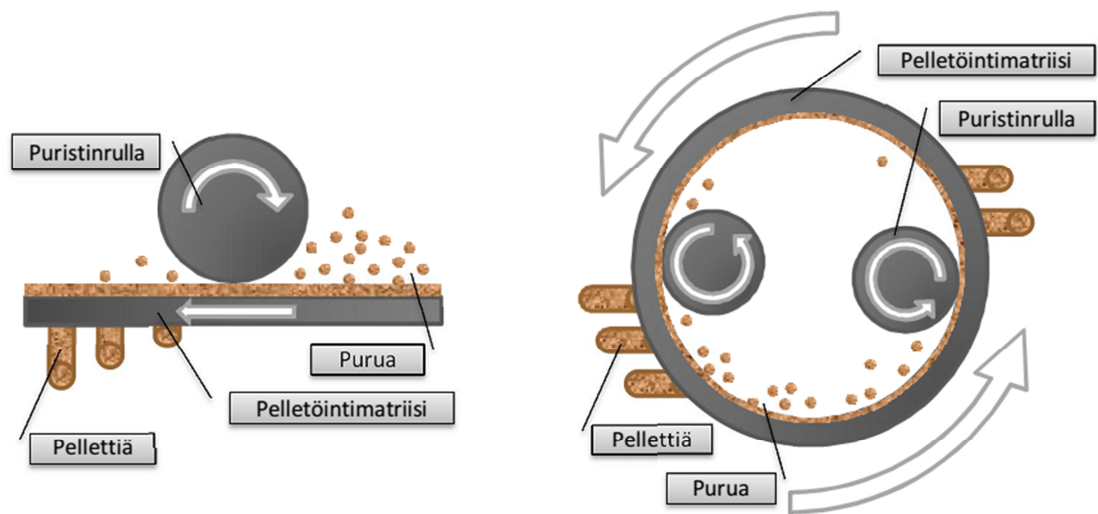
Pelletin tuotantoprosessi on esitetty tarkemmin laitteineen kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Puupelletin valmistuksen prosessikaavio.

Prosessin aluksi raaka-aineet murskataan kuivurille sopivaan palakokoon. Kuivurin jälkeen raaka-aine annostellaan jauhimelle. Yleensä jauhimena käytetään vasaramyllyä mutta myös kollerimyllyjä (pan grinder mill) käytetään. Jauhimesta syntyy pölyä, joka viedään myllyn poistoilman mukana sykloniin ja kerätään takaisin käyttöön. Jauhettu raaka-aine siirretään ruuvi- tai hihnakuljettimella puristukseen pellettimyllylle. Pellettimyllyn annostelijassa pellettimateriaaliin voidaan lisätä lisäaineita parantamaan pellettien laatua, puristustapahtumaa tai koneiden suorituskykyä. Yleensä puupellettien lisäaineena käytetään tärkkelystä, vettä tai höyryä. Sideaineiden määrä on korkeintaan noin prosentti lopputuotteesta. (Bioenergia ry, 2013)

Pellettimyllyssä puristinrulla pakottaa jauhetun materiaalin reikälevyn läpi ja reikälevyn toisella puolella olevat leikkuuterät katkaisevat puristeet sopivan mittaisiksi. Reikälevyä kutsutaan pelletöintimatriisiksi. Pelletöintikoneet voidaan jakaa tasomatriisia ja rengasmatriisia käyttäviin ja ne on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3. Pelletöintikonetyypit. Vasemmalla tasomatriisia, oikealla rengasmatriisia käyttävä mylly.

Tasomatriisimyllyssä raaka-aine tulee ylhäältä ja muodostaa raaka-ainematon vaakasuorassa olevan reikälevyn päälle. Puristinrullat puristavat raaka-aineen levyn läpi. Rengasmatriisimyllyissä sylinterin muotoinen reikälevy on tavallisesti pystyssä ja raaka-aine puristetaan sisältä ulos. Tavallisesti puristinrullia on kaksi mutta myös useampi-rullaisia myllyjä käytetään. Yleisin tapa on, että reikälevyä pyöritetään ja puristinrullat pysyvät paikoillaan. (Scott, 2014)

Puumateriaaleja pelletöidessä purun lämpötilä kohoaa 70 – 100 °C asteeseen puristuksen sekä partikkelien ja seinän kitkavoimien vuoksi, jolloin puussa olevat hartsit ja ligniini pehmenevät ja liimaavat puupartikkelit tiukasti kiinni toisiinsa. (Li et al. 2012) Puristusvaiheen lämpötilaan vaikuttaa erityisesti käytetyn matriisin kitkaan vaikuttavat ominaisuudet kuten reikien pituus ja halkaisija. Ylipäätään puristustapahtuman onnistumiseen vaikuttavat raaka-ainematon paksuus, matriisin ja puristinrullien materiaali sekä pyörimisnopeus. Pelletöinnin haasteena on eri puulajien ominaisuudet, minkä seurauksena matriisi tulee aina valita tapauskohtaisesti. (Bioenergia ry, 2013) Matriisia voidaan myös erikseen lämmittää paremman puristustuloksen saamiseksi. Yleensä lämmityksen tavoitelämpötila on noin 70 °C mutta lämpötilaa nostamalla voidaan pellettien puristuskestävyyttä nostaa entisestään. (Li et al. 2012).

Puristusprosessin jälkeen kuumat pelletit jäädytetään vastavirtajäähdyttimessä, jolloin ne saavuttavat lopullisen lujuutensa. Jäähdyttimen poistoilmasta erotetaan hienoaines syklonissa ennen ilman ulospuhallusta. Lopuksi pelleteistä seulotaan loppu hienoaines pois ennen varastointia. Valmiit pelletit siirretään varastosiilon ja hienoaines ohjataan takaisin prosessiin. (Bioenergia ry, 2013)

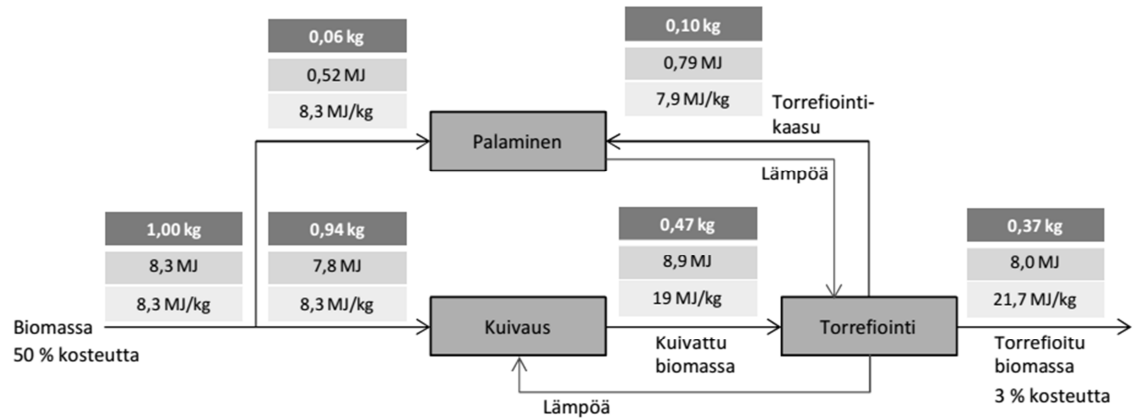
4.3 Paahtopelletin valmistus

4.3.1 Torrefiointi

Torrefioitujen polttoaineiden valmistusteknologiat ovat kaupallistamisen kynnyksellä ja suuria demolaitoksia sekä poltto- ja varastointikokeita voimalaitoksissa on jo tehty (Khodayari 2012; Koppejan et al. 2012; Hiilineutraali tulevaisuus, 2014). Torrefioinnista on tehty paljon tutkimusta erityisesti Alankomaissa ja paikallinen valtion tutkimuslaitos ECN on ollut siinä hyvin aktiivinen. EU-rahoitteinen SECTOR Project tutkii torrefioituja materiaaleja ja niiden varastointia ja käsittelyä vuosien 2012 - 2015 aikana (The SECTOR-project, 2014). Torrec Oy:llä on suunnitteilla Suomen ensimmäinen suuren luokan torrefiointilaitos Ristiinaan (Muinonen 2012; Pilottilaitos biohiilipellettien tuotantoon, 2013). Torrefioiduista polttoaineista toivotaan lisäpotkua biomassan lisäämiseen sen paremman energiatiheyden, säilyvyyden ja jauhautumisominaisuuksien vuoksi.

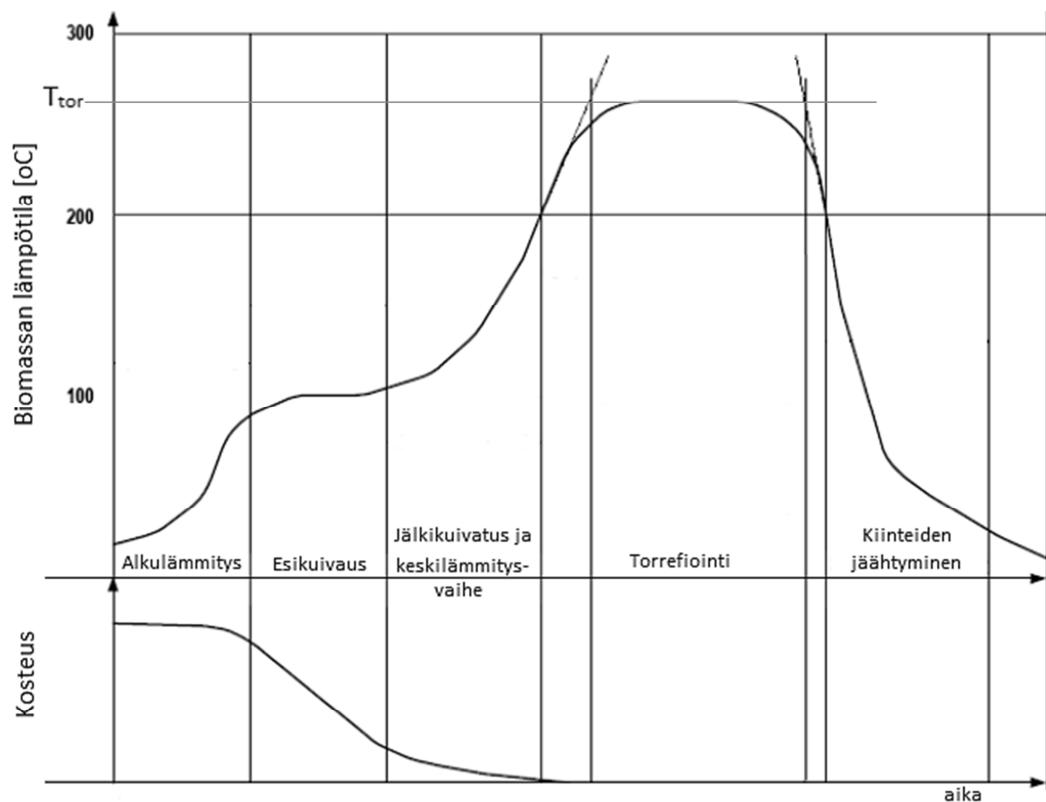
Torrefiointi on termokemiallinen käsittely, jossa puubiomassa lämmitetään 200 – 300 °C normaalipaineessa, hapettomissa olosuhteissa. Lämmitysnopeus on maltillinen ja reaktioajat ovat yleensä joitain kymmeniä minuutteja. Kuivasta puubiomassasta on tavallisesti 80 % haihtuvia yhdisteitä ja 20 % kiinteää hiiltä. Prosessin aikana biomassasta häviää lähes kaikki kosteus ja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). Prosessissa osa puun hemiselluloosasta ja pieni osa selluloosamolekyyleistä hajoaa tuhoten puun sitkeän rakenteen. Torrefiointiprosessissa puun hydroksyyli-ryhmät korvautuvat tyydyttymättömällä polaarittomilla ryhmillä, jolloin sen kyky adsorboida vettä vähenee radikaalisti ja materiaalista tulee hydrofobista. Lopputuotteesta tulee haurasta ja helposti jauhautuvaa. Saatua materiaalia kutsutaan torrefioiduksi biomassaksi, paahtetuksi biomassaksi tai biohiileksi. (Koppejan et al. 2012, Li et al. 2012, Stelte et al. 2011, Bergman 2005)

Biomassan kuivapainosta häviää prosessissa tyypillisesti 30% mutta energiasisältö laskee vain 10 %, mikä tarkoittaa energiatiheyden kasvua 30 %:lla. Lisäksi kosteuspiitoisuuden raju lasku vaikuttaa kokonaismassan muutokseen. (Bergman et al. 2005; Koppejan et al. 2012) Keipi et al. (2014) pitävät kuitenkin 30 % energiatiheyden kasvua turhan optimistisena omaan tutkimukseensa ja kirjallisuuteen vedoten ja mainitsevat omissa kokeissaan päässeensä vain 11 % energiatiheyden kasvuun. Prosessi ja raaka-aineen massan, energian ja energiatiheyden muuttuminen on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4. Torrefiointiprosessi ja massan, energian ja energiatiheyden muuttuminen, kun paahdetaan 1 kg biomassaa. (Koppejan et al. 2012, s. 5)

Torrefiointiprosessi voidaan Bergman et al. (2005) mukaan jakaa seuraaviin osavaiheisiin: Alkulämmitys, esikuivaus, jälkikuivaus ja keskilämmitysvaihe, torrefiointi ja jäähtyminen. Kuvassa 4.5 on esitetty biomassan lämpötila ja kosteus ajan suhteen prosessin eri vaiheissa.



Kuva 4.5. Biomassan lämpötila ja kosteus ajan suhteen. Pystyviivoin on eritelty torrefiointiprosessin eri vaiheet. Muokattu lähteestä (Bergman et al. 2005).

Alkulämmitysvaihe kestää vain siihen asti, että vesi alkaa haihtua. Esikuivausvaiheessa biomassan lämpötila pysyy vakiona veden haihtuessa. Biomassan kosteuspitoisuus laskee ensin lineaarisesti, kun pinnalla oleva vesi haihtuu ja sitten hidastuu, kun vettä on

enää jäljellä biomassan huokosissa. Esikuivausvaihe katsotaan loppuneeksi kun biomassan lämpötila alkaa jälleen nousta. Loppukuivaus ja keskitason lämmitysvaihe käsittää biomassan lämmityksen 200 °C asti. Tässä vaiheessa kaikki biomassaan fyysisesti sitoutunut vesi haihtuu pois ja ensimmäiset VOC-yhdisteet alkavat haihtua biomassasta. (Schorr 2012; Bergman et al. 2005)

Varsinainen torrefiointivaihe alkaa, kun biomassan lämpötila nousee yli 200 °C. Lämpötila nostetaan 250 - 300 °C, jossa se pidetään joitain kymmeniä minutteja. Tarkat prosessiarvot riippuvat raaka-aineesta ja halutusta lopputuloksesta. Tässä vaiheessa tapahtuu suurin osa massahäviöstä. Reaktiot ovat näissä olosuhteissa endotermisiä, mutta käytännössä jotkin osat biomassasta voivat lämmitä niin kuumiksi, että prosessit muuttuvat eksotermisiksi. Tästä johtuen, vaikka teoriassa torrefiointivaiheen katkaisun pitäisi olla ongelmaton, käytännössä tarvitaan lisjäähdytys pelkän lämmönlähteen poistamisen lisäksi. Määritelmän mukaisesti torrefiointivaihe loppuu, kun biomassan lämpötila laskee alle 200 celsiusasteen. Lopuksi biomassaa jäähdytetään haluttuun lämpötilaan. (Schorr et al. 2012)

Torrefiointissa biomassasta haihtuu pysyviä ja lauhtuvia kaasuja. Pysyvät kaasut ovat huoneenlämpötilassakin kaasuja, lauhtuvat kaasut esiintyvät huoneenlämmössä nestemäisenä. Yhdessä nämä jakeet muodostavat torrefiointikaasun. Torrefiointikaasusta suurin osa on yleensä vettä, seuraavaksi suurimmat jakeet ovat yleensä hiilidioksidi, hiilimonoksidi, etikkahappo (CH_3COOH), metanoli ja furfuraali ($\text{OC}_4\text{H}_3\text{CHO}$). Muita torrefiointikaasuissa mahdollisesti esiintyviä aineita ovat muun muassa formaldehydi (HCHO), muurahaihapo (HCOOH) sekä erilaiset ketonit, aldehydit ja fenolit. Tyypillisesti torrefiointikaasussa on 60 p-% palamattomia kaasuja, mutta tarkka koostumus riippuu käytetystä biomassasta ja prosessiparametreista. (Bergman et al. 2005; Nocquet et al. 2014)

Torrefiointissa biomassasta vapautuu torrefiointikaasuihin myös klooria ja rikkiä. Saleh et al. (2014) tutkimuksissa puubiomassaan sitoutuneesta kloorista 20 – 100 % vapautui torrefiointissa. Suurin kloorin luovutus oli kierrätyspuulla 350 celsiusasteessa. Muita tutkittuja puubiomassoja olivat kuusi, poppeli ja kuori. Aina kloorin luovutus ei välttämättä ole näin voimakasta, Björkmanin ja Strömbergin (1997) tutkimuksissa kloorin luovutus oli vain 0 – 10 % luokkaa. Keipi et al. (2014) saivat kloorin vapautumisasteeksi tutkimuksissaan 0 – 90 %, joten vaihtelu on melko rajua. Saleh et al. toteavat, että kloorin vapautuminen riippuu ainakin biomassan tyypistä ja sen kloori- ja kaliumpitoisuudesta ja käytetystä torrefiointilämpötilasta. Suuremmilla kloori- ja kaliumpitoisuuksilla klooria vapautuu vähemmän suhteessa lähtötasoon ja korkeammilla torrefiointilämpötiloilla kloorin vapautuminen voimistuu. Kloori esiintyi Saleh et al. tutkimuksessa torrefiointikaasussa yhdisteenä CH_3Cl . Useat tutkimukset viittaavat myös siihen, että kloori esiintyisi torrefiointikaasussa suolahappona (Keipi et al. 2014; Knudsen et al. 2004; Jensen et al. 2000).

Saleh et al. tutkivat myös rikin vapautumista torrefiointissa ja kertovat vapautumisasteen olevan puubiomassoille 20 – 70 % mutta selvää yhteyttä torrefiointilämpötilan tai biomassan rikkipitoisuuden ja vapautumismäärän välillä ei löydetty. Vapautu-

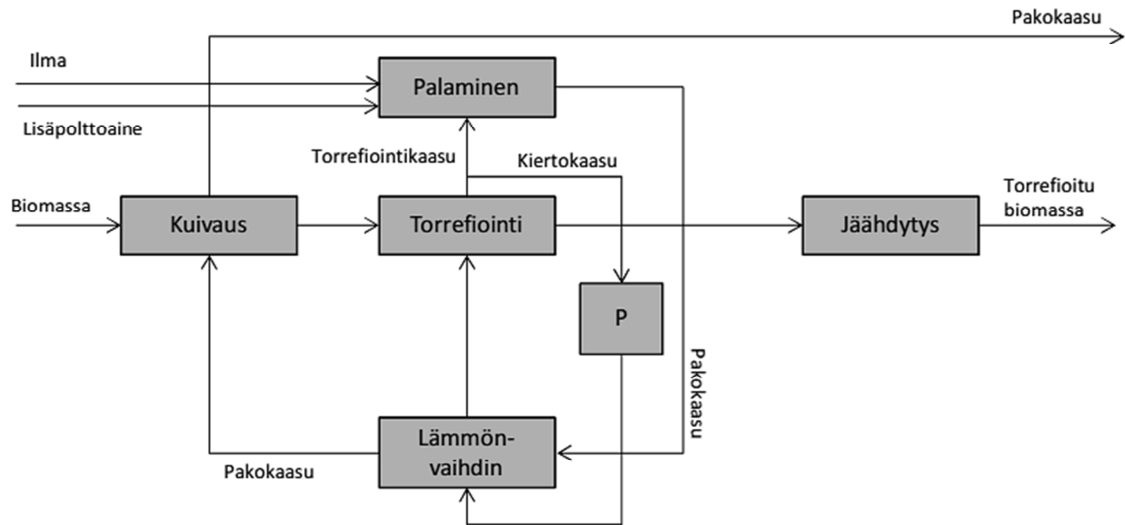
mismäärän uskotaan kuitenkin riippuvan orgaanisen ja epäorgaanisen rikin osuuksista biomassassa. Rikin esiintymisyhdisteeseen ei otettu kantaa. Selvää kuitenkin on, että torrefiointikaasuissa voi esiintyä jonkin verran rikkiä ja klooria, joista molemmat ovat korrodoivia aineita. Tuotetun polttoaineen kannalta rikin ja kloorin vapautuminen kannattaa maksimoida mutta laitteiston suunnittelussa on varauduttava riittävästi korroosioon.

Bergmanin (2005) mukaan lupaavin prosessikonsepti torrefiointiin on käyttää torrefiointikaasua torrefiointireaktion ja esikuivauksen lämmönlähteenä, kuten kuvan 4.4 prosessissa on esitetty. Saman raportin mukaan prosessissa voidaan saavuttaa 92 % nettoenergiahyötysuhde.

Bergmanin et al. (2005) mukaan, kun torrefiointikaasua käytetään polttoaineena, on tärkeää arvioida liekin adiabaattinen lämpötila ja arvioida, onko vakaa palamisprosessi saavutettavissa. Adiabaattisen lämpötilan on oltava tyypillisesti noin 400 °C korkeampi kuin polttoaineen vaikeimmin syttyvien komponenttien itsesyttymislämpötila. Tutkimusten mukaan torrefiointikaasun komponenteista hiilimonoksidilla ja fenolilla on korkeimmat itsesyttymislämpötilat, noin 600 °C. Tämä tarkoittaa, että adiabaattisen lämpötilan tulisi olla noin 1000 °C, jotta palaminen olisi vakaata. (Bergman et al. 2005, s. 26) 1000 °C saavutetaan, jos torrefiointikaasulla on tarpeeksi korkea lämpöarvo. Lämpöarvoa alentaa biomassan kosteuspitoisuus ja kasvattaa torrefiointiasteen kasvattaminen, eli torrefiointiajan pidentäminen tai lämpötilan kasvattaminen, jolloin massa-häviö torrefiointikaasuihin kasvaa. Bergman et al. (2005) tekemien tutkimusten perusteella, jos käytetyn biomassan kosteus kuivurin jälkeen on noin 10 %, liekin adiabaattinen lämpötila ylittää helposti 1000 °C, jolloin palamisen kanssa ei pitäisi tulla ongelmia. Kuitenkin matalammilla kuivurin jälkeisillä kosteuksilla palamisen kanssa voi tulla nopeastikin vaikeuksia kun torrefiointikaasun kosteuspitoisuus nousee liaksi.

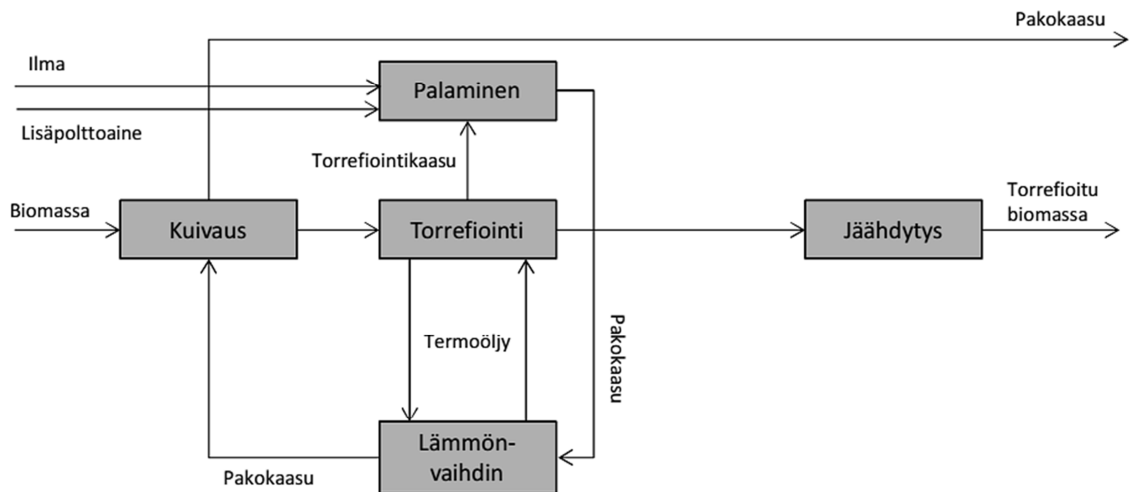
Ideaalitulassa torrefiointiprosessi on autotermisen. Autotermisessä torrefiointiprosessissa torrefiointikaasuista saatava energia on yhtä suuri kuin kuivaukseen, torrefiointiin ja lämpöhäviöihin kuuluva lämpömäärä ja prosessiin ei tarvitse tuoda lisäenergiaa. Jos prosessia ajetaan alle autotermisen pisteen, torrefiointikaasuissa ei ole tarpeeksi energiaa prosessiin ja lisälämpöä on tuotava esimerkiksi lisäpolttoainetta polttamalla. Autotermisen pisteen yläpuolella torrefiointikaasuissa on enemmän energiaa kuin prosessiin tarvitaan ja energiaa menee hukkaan. Tämä johtaa huonompaan prosessi-hyötysuhteeseen ja pienempään tuotteen saantoon, kun orgaanisten aineiden haihtuminen on ollut liian voimakasta. Autotermisen pisteen yläpuolella ajaminen voi kuitenkin olla tarpeellista vaadittavien ominaisuuksien saavuttamiseksi lopputuotteessa. (Bergman et al. 2005) Lämpötila ja reaktioaika ovat kriittisimmät parametrit termisen tasapainon säädössä (Bergman 2005, s. 15).

Torrefiointiprosessi voidaan toteuttaa joko suoralla tai epäsuoralla lämmityksellä. Suorassa lämmityksessä torrefiointikaasun palamisessa syntyvät savukaasut esilämmitävät biomassaa ja kierrätettyä osaa torrefiointikaasuista, jotka puolestaan johdetaan lämmittämään torrefiointivaihetta. Tämä järjestely on esitetty kuvassa 4.6.



Kuva 4.6. Torrefiointiprosessi suoralla lämmityksellä. $P =$ Paineen nosto. (Bergman et al. 2005, s. 28)

Koska palaminen tapahtuu yli-ilmalla, menetelmän haittana on, että happipitoiset savukaasut ovat suorassa kosketuksessa lämmitettävään biomassaan kuivurissa, jolloin hapetta voi kulkeutua liikaa prosessin hapettomana pidettäviin osiin ja massahäviö kasvaa, kun lämmin biomassaa reagoi hapen kanssa. Palamisprosessi toteutetaan yli-ilmalla, jotta polttoaine palaa mahdollisimman täydellisesti loppuun. Vaihtoehtoisesti prosessi voidaan toteuttaa epäsuoralla lämmityksellä, joka on esitetty kuvassa 4.7.



Kuva 4.7. Torrefiointiprosessi epäsuoralla lämmityksellä. (Bergman et al. 2005, s. 28)

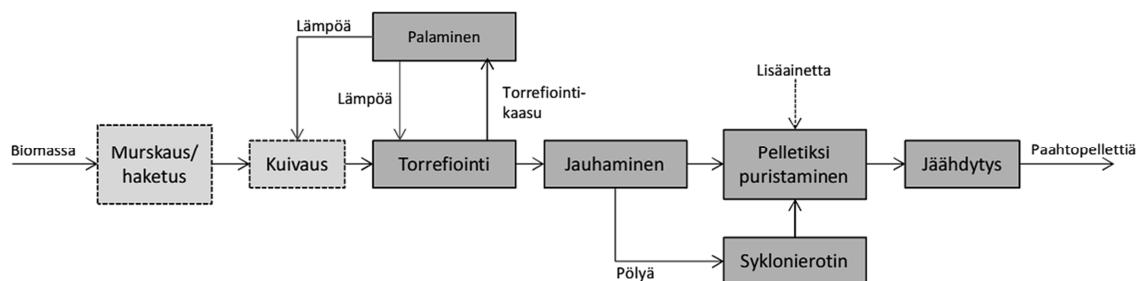
Kuvassa 4.7 lämmitykseen ja torrefiointiin tarvittava lämpöenergia tuodaan lämmönvaihtimen kautta. Tämä menetelmä on hiukan monimutkaisempi, mutta prosessi saadaan helpommin pidettyä hapettomana (Schorr, 2012).

4.3.2 Torrefioidun biomassan pelletöinti

Torrefioitu biomassa voidaan pelletetöidä, jolloin sille saadaan paremmat polttoaineminaisuuksut. Torrefioitudulle, pelletöidylle biomassalle on käytössä monta eri nimitystä ja sitä sanotaan torrefioiduksi pelletiksi, paahtopelletiksi, biohiilipelletiksi, paahtopelletiksi tai joskus myös mustaksi pelletiksi. Tässä työssä siihen viitataan paahtopellettinä.

Torrefiointi vähentää tehokkaasti biologisesta hajoamista ja tekee polttoaineesta hyvin vettä kestävä. Torrefiointi myös nostaa biomassan energiatiheyttä massan suhteen laskettuna, mutta biomassan tilavuus pysyy käsittelyssä jotakuinkin samana ja energiatiheys tilavuuden suhteen ei parane. Lisäksi torrefioitu biomassa on sellaisenaan voimakkaasti pölyävää ja sen mekaaninen kestävyys on huono. Jos torrefioitu biomassa pelletöidään, näistä huonoista puolista päästään eroon. (Bergman 2005)

Kuvassa 4.8 on esitetty yhdistetyn torrefioinnin ja pelletöinnin eli TOP-prosessin lohkokkaavio.



Kuva 4.8. Yhdistetty torrefiointi- ja pelletöintiprosessi eli TOP-prosessi. (Bergman 2005, s. 14)

Bergman (2005) esittää raportissaan, että vaikka aikaisemmissa tutkimuksissa on esitetty torrefioinnin ja massan tiivistämisen toteuttamista samanaikaisesti, on käytännössä parempi pitää nämä vaiheet erillisinä. Suurin syy on estää biomassan haihtumisprosessi tiivistämisen aikana. Lisäksi lämmöntuonti reaktoriin, jossa torrefiointi ja tiivistys tehdään samanaikaisesti, on monimutkaista ja haastavaa toteuttaa sekä säätää.

Polttoaineen laadun paranemisen lisäksi torrefioinnin ja pelletöinnin yhdistäminen tuo myös prosessitekniisiä hyötyjä. Torrefioinnin jälkeen biomassan pienentämisessä tarvittava sähköteho pienenee Bergmanin (2005) raportin yhteydessä tehdyissä kokeissa 70 – 90 % riippuen biomassan torrefiointiasteesta, laitteiston kapasiteetti paranee jopa 7 – 15 -kertaiseksi ja laitteiden kulumisen vähenee. Jauhimet voidaan jopa kokonaan jättää pois, jolloin jauhautuminen tapahtuu pelletöintikoneessa. Prosessitekniisiä hyötyjä ovat myös, että kuivaus järjestyy pääasiassa torrefiointikaasun avulla, kun pelkässä pelletöinnissä tarvitaan usein erillistä polttoainetta kuivurin lämmöntarpeen tuottamiseksi (Bergman 2005).

Paahtopellettien kestävyyydestä on esitetty kirjallisuudessa hieman ristiriitaista tietoa. Bergmanin (2005) mukaan saadut pelletit ovat tavallisia puupellettejä kestävämpiä, murskaustesteissä ne ovat kestäneet tyypillisesti 1,5 – 2 kertaa suuremman voiman kuin tavalliset puupelletit. Toisaalta uudemmissa tutkimusraporteissa (Larsson et al. 2013, Li

et al. 2012, Stelte et al. 2011) torrefioitujen pellettien todetaan olevan pääsääntöisesti mekaaniselta kestävyydeltään huonompia ja niiden tekeminen on ollut selvästi haastavampaa. Lisäksi hienoaineksen määrä on ajoittain ollut korkea. Korkean torrefiointias-teen sahanpurua on ollut Stelte et al. (2011) tutkimuksessa jopa mahdoton pelletöidä heidän käyttämillään laitteilla ja säädöillä. Li et al. (2012) tutkimuksessa käy kuitenkin selvästi ilmi, että pelletöintimatriisin lämpötila vaikuttaa merkittävästi pelletöintitulokseen ja paahtopelletin valmistuksessa on käytettävä korkeampia matriisilämpötiloja kuin puupelletin valmistuksessa. Kun Stelte et al. käyttivät tutkimuksessaan noin sadan celsiusasteen lämpötilaa pelletöintimatriisissa, Li et al. pelletöivät torrefioitua sahanpurua pääsääntöisesti 170 °C tienoilla. He tutkivat myös pellettien mekaanista kestävyyttä ja saivat tulokseksi, että Meyerin kovuustestissä paras kestävyys oli 170 °C matriisilämpötilassa valmistetulla puupelletillä, samassa lämpötilassa pelletöidyn paahtopelletin kestävyys oli hieman ennen mainittua huonompi. Kestävyys oli silti merkittävästi parempi, kuin 100 °C matriisilämpötilassa valmistetun puupelletin, joka on tyypillisempi matriisilämpötila puupelletin valmistuksessa. Li et al. päätyvät tutkimuksessaan samaan tulokseen kuin Stelte et al., että paahtopellettiä ei voida valmistaa alle 100 °C matriisilämpötilassa. Li et al. ja Stelte et al. mukaan ainakin osa pelletöinnin vaikeuksista selittyy sillä, että torrefioitua sahanpurua muodonmuutos ei ole täysin plastista eli puristumisen jälkeen tapahtuu niin sanottu jousiefekti, puristamisen jälkeen pelletti kasvaa hiukan pituutta. Tämä lisää myös energian kulutusta pelletöinnissä. Ylipäättään hemiseluloosan ja ligniinin hajoaminen torrefioinnissa helpottaa biomassan hajottamista mutta vaikeuttaa tiivistämistä.

Pelletöinnin onnistumiseen, laitteen sähkönkulutukseen ja paahtopelletin ominaisuuksiin vaikuttavat myös käytetyt pelletöinnin lisäaineet. Koppejan et al. (2012) mainitsevat mahdollisiksi lisäaineiksi muun muassa glyseriinin, parafiinin, melassin, ligniinin ja torrefiointikaasun lauhtuvat yhdisteet. Heidän mukaansa myös veden lisääminen torrefioitavaan materiaaliin ennen pelletöintiä parantaa sitoutumisominaisuuksia. Topell Energy on heidän mukaansa onnistunut laskemaan pelletöintiin kuluvan energian määrän torrefioimattoman sahanpurua pelletöinnin tasolle sopivien lisäaineiden avulla.

4.4 Raaka-aineen soveltuvuus

4.4.1 Murskeeksi

Käytettävissä olevat raaka-aineet ovat puutarhojen ja tienvarsien siistimisestä kerätyt risut ja oksat sekä mekaanisia ja kemiallisia epäpuhtauksia sisältävä puunkeräyksen kierrätyspuu. Risuja voidaan sekä hakettaa että murskata. Kierrätyspuulle sopivin pienentämismenetelmä on murskaus sen sisältämien mekaanisten epäpuhtauksien ja voimakkaasti vaihtelevan palakoon ja –muodon vuoksi. Mekaaniset epäpuhtaudet on kuitenkin poistettava mahdollisimman tehokkaasti laadukkaan murskeen tuottamiseksi.

Puumurske sisältää haketta enemmän pitkiä tikkuja sekä hienoainesta. Voimalaitosten kuljetinlaitteille tämä aiheuttaa ongelmia muun muassa holvautuvuuden ja linjojen

tukkeutumisen vuoksi. Myöskin, jos mainittua puumurskettä käytetään biopolttoaineen tuotantoon, esiintyy samanlaisia ongelmia kuljettimissa. Palakoon vaihtelut aiheuttavat ongelmia myös poltossa palamattoman aineksen lisääntymisenä. Voimalaitosten polttoaineena hake onkin kuljettimien ja poltinlaitteiden kannalta parempi polttoaine kuin murske. (Rinne 2010)

Puumurskeen kuivaukseen pienet tikut ja hienoaines eivät vaikuta negatiivisesti. Tikuissa on suuri pinta-ala suhteessa tilavuuteen ja vesi pääsee haihtumaan helposti pois. Hienoaines kuivuu suurempaa palakokoa nopeammin ja tehokkaammin. Kuivauksen osalta suurimman ongelman muodostavat mahdolliset suuret pallomaiset kappaleet murskeessa, jotka voivat kuivatessa jäädä tavoitekosteutta märemmiksi.

4.4.2 Puupelletiksi

Pelletöinnissä raaka-aineiden puulajien kirjo voi aiheuttaa ongelmia, sillä eri puulajeilla on hieman erilaiset pelletöintiominaisuudet (Bioenergia ry 2013). Koska eri puulajien jakauma tuskin pysyy vakiona raaka-aineessa, pelletöinnissä voi tulla ongelmia esimerkiksi sähkön kulutuksen kasvuna tai pelletin laadun heikkenemisenä. Myös risu- ja kierätyspuun yhdistäminen yhdeksi raaka-aineeksi tuo haasteita pelletöintimatriisiin valintaan. Lisäksi kierrätyspuun sisältämät kemialliset epäpuhtaudet, erityisesti liimat, vaikuttavat pelletöintiprosessiin, mutta tästä ei kirjallisuudesta löytynyt tietoa ja vaikutukset voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia.

Laitehankinnan yhteydessä on tehtävä sopivan pelletöintimatriisiin valintaa varten raaka-aineen pelletöintikokeita. Kokeiden avulla valitaan sopiva pelletöintimatriisi ja tarvittavat lisäaineet, joilla pelletöinti onnistuu laadukkaasti.

4.4.3 Paahtopelletiksi

Paahtopelletin valmistuksessa eri puulajien vaihtelevuus ei ole niin suuri ongelma kuin tavallisen puupelletin valmistuksessa, sillä torrefiointi sopii kaikille lignoselluloosaa sisältäville biomassoille ja ainakin teoriassa on mahdollista suunnitella torrefiointiprosessi niin, että laajasta valikoimasta eri tyyppisiä raaka-aineita on mahdollista tuottaa hyvin homogeenista lopputuotetta. Tulevaisuudessa laaja raaka-ainevalikoima voisi käsittää erilaisten puulajien lisäksi myös heinää, ruohoa ja muita maataloudessa syntyviä biomassoja. (Koppejan et al. 2012)

Kerätty kierrätyspuu luokitellaan pääosin B-luokan puuksi, joka sisältää kemiallisia epäpuhtauksia. Kierrätyspuussa alkalimetallien, kloorin, rikin ja typen pitoisuudet voivat olla koholla ja nämä aineet kulkeutuvat torrefiointiprosessissa ainakin osittain torrefiointikaasuun ja sitä kautta savukaasuun. B-luokan puun määrittely vaatii, että kemiallisten aineiden pitoisuuksien on oltava lähellä luonnonpuun vastaavia pitoisuuksia, joten päästöt eivät välttämättä muodostu ongelmaksi, vaikka Koppejan et al. (2012) mainitsevatkin, että kierrätyspuuta käytettäessä torrefiointiprosessiin on ehkä asennettava ylimääräisiä savukaasun puhdistuslaitteita. Kierrätyspuuta ei kuitenkaan määritellä kovin

tarkasti ja voi raportissa kattaa myös C-luokan puutavaran. Jos savukaasunpuhdistuslaitteet on kuitenkin asennettava, se voi nostaa merkittävästi investointikustannuksia.

Saleh et al. (2014) tutkimuksien mukaan torrefiointi vähentää biomassan kloori- ja rikkipitoisuutta ja vapautuneet aineet siirtyvät biomassasta torrefiointikaasuun. Girods et al. (2007) ovat tutkineet urea-formaldehydi- ja melamiini-formaldehydiresiinien pitoisuuksien muutosta torrefioidessa lastulevyä ja laminoitua lattialevyä. Näitä sekä vastaavia resiinejä esiintyy useissa kierrätyspuujakeen materiaaleissa. Tutkitut resiinit hajoavat alle 350 °C lämpötiloissa pääasiassa isosyanaattihapoksi (HCNO) ja ammoniakiksi (NH₃). 8-20 minuutin käsittelyajalla nämä yhdisteet kuitenkin hajoavat vähemmän haitallisiksi yhdisteiksi. Tämä nostaa savukaasujen NO_x-pitoisuutta. Torrefiointituotteessa typpipitoisuus kuitenkin vähenee jopa 58 %, joka parantaa polttoaineen laatua. (Girods et al. 2007)

Torrefioinnilla saadaan siis puhtaampaa polttoainetta muihin valmistusmenetelmiin verrattuna, kun rikki-, typpi- ja klooripitoisuudet laskevat. Toisaalta torrefiointiprosessin päästöt ja niitä koskevat rajoitukset on selvitettävä tarkemmin ennen tuotannon aloittamista tai aloittamisen yhteydessä. Sopivan pelletöintimatriisin ja sopivien lisäaineiden valintaa varten on tehtävä pelletöintikokeet.

5 KUIVURIT

Tässä kappaleessa käsitellään puu- ja paahtopelletin tuotantoon asiakasyrityksen alueella sopivia kuivurityyppejä ja niiden ominaisuuksia. Sopivan menetelmän valinta biomassan kuivaukseen riippuu muun muassa saatavilla olevasta lämmönlähteestä, menetelmän haihdutuskapasiteetista, halutusta loppukosteudesta ja kuivurille käytettävissä olevasta pinta-alasta. tuotantoa suunniteltaessa käytettävissä olevaa pinta-alaa oletettiin olevan niin paljon, ettei se ole kuivurin valinnassa rajoittava tekijä. Haluttu loppukosteus on puu- ja paahtopellettiprosessissa vajaa 10 %. Haihdutuskapasiteetti liittyy kuivurin mitoittamiseen ja sitä kautta tarvittavaan pinta-alaan ja investointikustannuksiin. Mahdollisia lämmönlähteitä ovat aluelämmitysjärjestelmä ja puuraaka-aineen poltto erillisessä lämmityslaitoksessa.

Kuivureiden yhteydessä käytetään paljon suuretta kuivurin ominaislämmön kulutus. Se kuvaa sitä, kuinka paljon lämpöä kuivuri tarvitsee tietyn vesimäärän haihduttamiseen kuivattavasta aineesta keskimäärin. Se on siten myös energiatehokkuuden mittari. Ominaisenergian kulutukseen vaikuttaa ulko- ja kuivausilman lämpötila, kuivattavan aineen lämpötila ja olomuoto, prosessikytkennät ja kuivausmenetelmä. Teoreettisesti yksivaiheisen kuivausprosessin ominaisenergian kulutus on luokkaa 2,7 – 2,9 MJ/kg H₂O. Suomen oloissa ominaisenergian kulutus on alle 100 °C kuivausilmaa käyttävillä kuivureilla noin 4 - 6 MJ/kg H₂O. Korkeampia lämpötiloja käytettäessä voidaan päästä 3 – 4 MJ/kg H₂O ja höyryä käyttävillä kuivureilla jopa 2 – 3 MJ/kg H₂O. (Alpua 2011)

Nummelin et al. (2014) ovat koonneet kirjallisuudesta suuren kokoluokan kuivaamiseen soveltuvia kuivurityyppejä ja niiden ominaisuuksia, jotka on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Suuren kokoluokan kuivurityyppien ominaisuuksia. (Nummelin et al. 2014)

Kuivurityyppi	Rumpukuivuri	Virtauskuivuri	Viirakuivuri	Kerroskuivuri
Kuivauksen väliaine	Savukaasu/höyry	Savukaasu/höyry	Ilma	Ilma
Kuivauslämpötila (°C)	200 - 600	150 - 200	30 - 120	30 - 80
Partikkelikoko (mm)	20 - 100	0,5 - 50	5 - 50	5 - 50
Loppukosteus (%)	2 - 10	15-20	> 5	20 - 30
Haihdutus-kapasiteetti (t/h H ₂ O)	5 - 75	10 - 30	5 - 40	0,1 - 20
Lämmönlähde	Höyry, savukaasu	Höyry, savukaasu	mp-höyry, savukaasu, kuumat vedet	savukaasu, kuumat vedet

Kuivureista viirakuivuri sopii parhaiten aluelämmitysjärjestelmää hyödyntävään kuivaukseen. Toinen soveltuva kuivurityyppi on kerroskuivuri, mutta sillä saavutettava loppukosteus ei sovellu pelletin tuotantoon, jossa raaka-aineen kosteus ennen pelletointia pitäisi olla alle 10 %.

Jos aluelämmitysjärjestelmää ei hyödynnetä kuivauksessa voidaan kuivausaineena käytetään savukaasuja. Savukaasuja käyttämällä päästään pienempään kuivurin ominaislämmönkulutukseen ja sitä kautta pienempään polttoainetarpeeseen lämmön tuotannossa. Soveltuva kuivurityyppi on tällöin rumpukuivuri, jolla päästään helposti toivotuun loppukosteuteen. Toinen savukaasuja käyttävä teknologialla virtauskuivurilla ei päästä tarpeeksi alhaiseen loppukosteuteen.

Seuraavaksi nämä kaksi tuotantoprosesseissa harkittavaa kuivurityyppiä on esitelty tarkemmin.

5.1 Viirakuivuri

Viirakuivuri on yleisin kuivurityyppi matalan lämpötilan kuivauksessa. Sen muita nimiä ovat hihnakuivuri ja joskus harhaanjohtavasti myös kerroskuivuri. Kuivauksessa ilmaa lämmitetään lämmönvaihtimissa kuumalla kaasulla, matalapainehöyryllä tai kuumalla vedellä. Viirakuivurissa kuivattava materiaali levitetään tasaisesti hitaasti liikkuvalla viiralle, ja kuivausilma johdetaan materiaalipatjan läpi joko sen ylä- tai alapuolelta. Materiaalipatjan paksuus on yleensä 0,1 – 0,2 m kuivattavasta materiaalista riippuen. Patjan paksuus ja materiaalin jakautuminen vaikuttavat painehäviöön patjan yli. Kun kuivausilma tuodaan materiaalin yläpuolelta, pölypäästöt ovat pienemmät mutta paine-ero on suurempi. Suuremmalla paine-erolla tarvittava puhallinenergia on suurempi. (Nummelin et al. 2014)

Viira valmistetaan yleensä polymeeristä kuten paperikoneissa, mutta korkeammissa lämpötiloissa voidaan käyttää myös metallikudosviiroja. Viira pidetään puhtaana automaattisella harjauksella tai ilmapuhelluksella. Jos kuivattava materiaali on kovin likavaa, voidaan käyttää vesipesuria. (Nummelin et al. 2014)

Viirakuivurin etuna on sen hyvä soveltuvuus eri polttoaineille, korkea käytettävyys, mahdollisuus hyödyntää sekundäärilämpöjä, helppo säädettävyys sekä kestävä ja yksinkertainen rakenne. Rumpukuivuriin verrattuna siinä on pienempi palovaarariski sekä pienemmät päästöt. Viirakuivurin huonoja puolia ovat suuremmat investointikustannukset, korkea käyttöteho, suuri pinta-ala ja suuret huoltokustannukset. Lisäksi kylmässä ilmastossa viirakuivuri vaatii rakennuksen jäätyksen estämiseksi kun lämpimämmillä alueilla pelkkä sateensuoja riittää. (Nummelin et al. 2014)

5.2 Rumpukuivuri

Rumpukuivurissa kuivattava biomassa syötetään suureen, hieman kallistettuun, hitaasti pyörivään rumpuun. Rummun sisällä on evämäisiä levyjä, jotka nostelevat ja tiputtavat kuivattavaa biomassaa rummussa. Näin saavutetaan tehokas lämmönsiirto kuivauskaasun ja kuivattavien partikkelien välillä. (Nummelin et al. 2014)

Kuivauskaasun syöttö voidaan tehdä joko myötä- tai vastavirtaan kuivattavan aineen syöttöön nähden. Biomassan kuivauksessa käytetään usein myötävirtasyöttöä, jolloin kostein biomassa on kosketuksissa kuumimman kuivauskaasun kanssa. Tällä välteään materiaalin liiallinen kuumeneminen. Toinen tärkeä huomio biomassan rumpukuivauksessa on, ettei kuivauslämpötila pääse laskemaan alle 100 °C. Orgaaniset yhdisteet lauhtuvat noin 100 °C, jolloin ne likaavat rummun ja huonontavat kuivausprosessia. (Nummelin et al. 2014)

Rumpukuivurin etuja ovat suuri kuivauskapasiteetti sekä joustavuus kuivattavan aineen palakoossa ja alkukosteudessa. Viirakuivureihin verrattuna niillä on matalampi ominaisenergian ja ominaissähkön kulutus sekä alhaisemmat huolto- ja kunnossapitokustannukset. Rumpukuivurit ovat rakenteeltaan kompakteja, yksinkertaisia ja kestäviä. (Nummelin et al. 2014)

Haittapuolia ovat kuivurin vaatima kuivauskaasun korkea lämpötila sekä VOC- haju- ja pölypäästöt. VOC- ja hajupäästöjä nostaa korkea lämpötila ja pölypäästöjä kasvattavat kuivattavan aineen sekoitus ja nostelu. Biomassan alkukosteuden vaihdellaessa materiaali voi ylikuumentua ja paloturvallisuusriski on otettava suunnittelussa ja käytössä huomioon. (Nummelin et al. 2014)

5.3 Päästöt

Biomassan kuivauksen päästöt ovat kiinteitä hiukkaspäästöjä sekä pöly-, VOC- ja hajupäästöjä. Biopolttoaineet sisältävät luonnostaan VOC-yhdisteitä (haihtuvat orgaaniset yhdisteet), joita ovat muun muassa heksanoli, pentanoli ja monoterpeeni. Niitä vapautuu luonnollisesti metsistä ja puun varastoinnin yhteydessä. (Nummelin et al. 2014)

VOC-päästöjen määrä kasvaa lämpötilan noustessa. Matalan lämpötilan kuivauksessa (alle 100 °C) ja varastoinnissa vapautuvat määrät ovat hyvin vähäisiä. VOC-päästöt muuttuvat merkittäviksi yli 175 °C ja kasvavat eksponentiaalisesti, kun lämpötila nousee yli 275 °C. Lämpötilan lisäksi päästöihin vaikuttaa kuivausaika, kuivausilman määrä sekä kuivauksen loppukosteuspitoisuus. (Nummelin et al. 2014)

Hiukkaspäästöt riippuvat enimmäkseen käytetystä kuivausmenetelmästä. Savukaasua käytettäessä kuivauksen hiukkaspäästöt voivat olla merkittävät. Kerroskuivausmenetelmillä, kuten viirakuivauksella, päästään mataliin päästötasoihin kun kuivausilma suunnataan oikein. (Nummelin et al. 2014)

Ympäristönsuojelulaki (L 4.2.2000/86), siihen liittyvän valtioneuvoston asetus alle 50 MW polttolaitoksista (VNa 24.10.2013/750) ja EU:n teollisuuden päästöjä koskeva direktiivi (EY 2010/75/EU) eivät aseta päästörajoituksia tässä työssä käsiteltäville tuotantolinjoille. Suunnitellut lisälämpölaitokset eivät ylitä 50 MW polttoainetehoa ja niiden palamistuotteita on tarkoitus käyttää valtioneuvoston asetuksen 750/2013 ensimmäisessä pykälässä mainittujen poikkeuksien kolmannen kohdan mukaisesti lämmitykseen, kuivaukseen tai aineiden käsittelyyn. EU:n päästädirektiivissä esitetyt velvoitteet koskevat vaarattoman jätteen esikäsitteilyä polttoa tai rinnakkaispolttoa varten, johon kierrätyspuun jalostaminenkin kuuluu, mutta siinä ei mainita erikseen tällaiseen toimintaan liittyviä päästörajoja. Direktiivi kuitenkin velvoittaa muun muassa ennakoiviin toimenpiteisiin päästöjen vähentämiseksi ja ylipäätään huolehtimaan, ettei toiminta aiheuta merkittävää saastumista. Toiminnassa on myös käytettävä parasta mahdollista tekniikkaa (BAT). (Industrial emissions 2011)

Kiinteiden biopolttoaineiden käsittelyyn ja biopohjaisen pelletin tuotantoon on laadittu oma BAT-asiakirjansa (Lindberg et al. 2012), jonka sisältö kattaa myös biopolttoaineen kuivauksen. Asiakirjassa korostetaan kuivurin ja sen energialähteen energiatehokkuutta ja pöly- ja VOC-päästöjen minimoimista. VOC-päästöjä voidaan vähentää optimoimalla kuivurin käyttölämpötilaa. Pölypäästöt on huomioitava laitehankinnoissa ja suosittava koteloituja ja muita pölynhallintaa parantavia ominaisuuksia omaavia laitteita. BAT-asiakirja asettaa murskauksen, viirakuivauksen, jauhamisen, pelletöinnin, jäädytyksen ja seulonnan pölypäästöjen rajaksi alle 20 - 50 mg/Nm³. Savukaasukuivauksen pölypäästörajaksi on asetettu alle 100 mg/Nm³.

Erityisiä puhdistuslaitteita todennäköisesti tarvitaan, kun kuivausaineena on savukaasu ja kuivauslämpötila ylittää 150 °C. Mahdollisia puhdistuslaitteita ovat muun muassa syklonit, kuitusuodattimet, sähkösuodattimet ja savukaasupesurit. Jos kuivauksen poistokaasua lauhdutetaan esimerkiksi lämmöntalteenotossa, lauhdevedet pitää käsitellä ja viemäroidä, sillä niissä on usein merkittävä määrä orgaanisia yhdisteitä. (Nummelin et al. 2014)

5.4 Esikuivaus

Kierrätyspuu on lähtökohtaisesti melko kuivaa, yleensä luokkaa 20 % kosteutta, mutta risujen lähtökosteus on voi olla jopa 60 %. Se on joillekin voimalaitoksille liian kosteaa

ja ylipäättään on parempi polttaa murske mahdollisen kuivana muun muassa voimalaitoksen paremman käytettävyyden, savukaasumäärän pienenemisen ja hyötysuhteen nousun vuoksi. (Alpua 2011, Nummelin et al. 2014) Myös kuljetuskustannukset laskevat hieman, kun vettä kuljetetaan vähemmän. Jatkojalostuksen kannalta on etu, jos raaka-aine on kuivempaa tai ainakin vähemmän vaihtelevaa.

Näistä syistä risujen kosteutta tulisi vähentää mahdollisuuksien mukaan kuivaamalla niitä kasassa mahdollisimman pitkään ennen haketusta tai murskausta. Risujen kosteus on suurimmillaan talvella ja alkukevästä, kuivimmillaan risut ovat tyypillisesti loppukesästä ennen syysateita. Kosteuspitoisuutta on mahdollista vähentää tällä tavoin noin 5 - 10 prosenttiyksikköä (Nummelin et al. 2014, s.21). Kasakuivauksen pituus tulisi maksimoida kosteuden haihtumisen kannalta mutta toisaalta minimoida biologisen hajoamisen aiheuttaman kuiva-ainetappioiden vuoksi. Ideaali kuivauskauden pituus on kevästä syksyyn.

Jo valmistettua haketta tai mursketta voidaan kuivata kenttäkuivausmenetelmällä. Siinä murske levitetään ohueksi kerrokseksi suurelle asfalttikentälle, jossa aurinko kuivaa sitä 1 - 4 päivää säästä riippuen. Kuivamista voidaan tehostaa kääntelemällä mursketta koneellisesti kuivauksen aikana. Koneeksi käy esimerkiksi siipiterillä modifioitu traktori tai kultivaattori. Kuivausmenetelmä soveltuu erityisesti hyvin kostealle murskeelle. Sopiva kuivausaika rajoittuu kuitenkin melko lyhyeksi, vain touko-kesäkuusta elokuuhun. (Nummelin et al. 2014, Föhr 2008)

Neljän päivän kuivausajalla saavutettiin Föhrin diplomityön ohessa tehdyissä tutkimuksissa jopa 25 % kosteuspitoisuus, kun alkukosteus oli 55 % ja kerrospaksuus 5 cm. Kerrospaksuus vaikuttaa paljon kuivumistulokseen ja 15 cm kerrospaksuudella samasta erästä otettu toinen kuivauserä kuivui samojen päivien aikana vain 40 % kosteuteen. Toisaalta ohuemmalla kerrospaksuudella sateet vaikuttavat voimakkaammin kuivumistulokseen. Murskeen kääntely vaikuttaa positiivisesti kuivumiseen, Föhrin tutkimuksissa saavutettiin noin 5 %-yksikköä kuivempi hake, kun sitä käännettiin kahtena neljästä kuivumisvuorokaudesta, jolloin päästiin jopa 20 % loppukosteuteen. (Föhr 2008)

Asfalttikentän alle voidaan johtaa myös lämmitysputket kuivauksen tehostamiseksi, mutta sen kannattavuus on kyseenalaista jos muita perusteita lämmitysputkille ei ole. Jos olemassaoleva infrastruktuuri on jo olemassa, kenttäkuivaus on kannattava kuivausmenetelmä myös ilman lämmitysputkia. Föhrin laskelman mukaan kuivaus on kannattavaa hehtaarin kokoisella kuivauskentällä on päästävää alle 50 % loppukosteuteen, kun kuivattavan hakkeen alkukosteus on 60 % ja kuivausaika neljä vuorokautta. (Nummelin et al. 2014, Föhr 2008)

6 PUUPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA

6.1 Tyypilliset ominaisuudet

Tähän kappaleeseen on kerätty tietoa kirjallisuudesta kaikista työssä tarkasteltavista polttoaineista polton ja käsiteltävyyden kannalta. Lopullisen valmistettavan polttoaineen ominaisuudet voivat hieman vaihdella muun muassa erilaisen raaka-aineen ja prosessi-parametrien vuoksi. Taulukossa 6.1. on esitetty tarkasteltavien polttoaineiden keskeisiä ominaisuuksia. Metsätähdehake edustaa risuhakkeen ja -murskeen tyypillisiä ominaisuuksia.

Taulukko 6.1. Polttoaineiden tyypillisiä ominaisuuksia polton ja käsittelyn kannalta. Koostettu lähteistä: (Bergman 2005, s.18; Koppejan 2012, s.9; Flyktman et al. 2011, s.30; Alakangas 2000, s. 152-157, Alakangas & Wiik 2008).

Ominaisuus	Metsätähdehake	Kierrätyspuu	Puupelletit	Torrefioitu biomassa	Paahtopelletit
Kosteus, p-%	50 - 60	15 - 35	7,0	3,0	1,0
Tuhka, p-% kuiva-aineesta	1 - 3	1 - 5	0,3 - 0,5	1,0	1,0
Tehollinen lämpöarvo, kostea (MJ/kg)	6 - 9	12 - 16	16,2	19,9	21,6
Tehollinen lämpöarvo, kuiva (MJ/kg)	18,5 - 20	18,7	17,7	20,4	22,7
Tiheys (kg/irto-m ³)	250 - 400	150 - 250	650	230	750-850
Energiatiheys (GJ/i-m ³)	2,52 - 3,24	2,16 - 2,88	10,5	4,6	14 - 18,5
Pölynmuodostus	vähäinen	vähäinen	vähäinen	suuri	vähäinen
Biologinen hajoaminen	kyllä	kyllä	kyllä	ei	ei
Jauhautuvuus	heikko	heikko	heikko	hyvä	hyvä
Hydroskooppiset ominaisuudet	hydrofiili	hydrofiili	hydrofiili	hydrofobi	hydrofobi
Laadun vaihtelu	korkea	korkea	vähäinen	vähäinen	vähäinen
Sään vaikutus laatuun	korkea	korkea	jonkin verran	vähäinen	vähäinen

Taulukossa puubiomassan jalostusaste kasvaa vasemmalta oikealle. Jalostusasteen kasvaessa kosteus ja laadun vaihtelu vähenevät ja tehollinen lämpöarvo, tiheys ja energiatiheys kasvavat. Tämä parantaa logistisia ominaisuuksia ja helpottaa varastointia, kun pienemmällä määrällä polttoainetta saadaan enemmän energiaa. Tuhkapitoisuus on

kaikilla polttoaineilla samaa suuruusluokkaa, kierrätyspuulle yleensä korkeampi kuin luonnonpuulle kuten risuille ja metsätähdehakkeelle. Torrefiointi parantaa polttoaineen varastointi- ja käsittelyominaisuuksia kuten biologista hajoamista ja hydroskooppisia ominaisuuksia eli vettymistäipumusta ja sitä kautta vähentää polttoaineen herkkyyttä sään vaihteluille varastoinnissa. Pelletöidyn, torrefioidun biomassan veden kestävyys on erittäin hyvä, upotustesteissä torrefioidut pelletit eivät hajonneet ja imivät itseensä vain vähän vettä, 7 – 20 % massastaan, kun tavalliset puupelletit hajoavat nopeasti puruksi joutuessaan veteen. (Bergman 2005) Kaikki biomassat pölyävät jonkin verran ja pölyräjähdysvaara on otettava varastoinnissa huomioon. Pelletöimätöntä, torrefioitua biomassaa käsiteltäessä pitää kiinnittää kuitenkin erityisen paljon huomiota pölyämiseen ja sen haittojen ja vaarojen minimoimiseen. (Svedberg & Knuttson 2011, Koppejan et al. 2012)

Kaikkia tutkittavia puupolttoaineita voidaan polttaa arinapoltolla ja leijupedissä. Kaikkia voidaan myös kaasuttaa, mutta käytetty raaka-aine ja erityisesti mahdolliset kemialliset epäpuhtaudet voivat rajoittaa kaasutuskäyttöä. (Koppejan et al. 2012; Hiltunen 2013). Kaikkia polttoaineita on myös mahdollista polttaa rinnan kivihiilen kanssa pölypolttolaitoksissa. Hake ja murske kuitenkin vaativat erillisen puulinjan rakentamisen, joka on melko suuri investointi ja ei siten ole taloudellisesti järkevä ratkaisu vanhemmille voimalaitoksille. Tyypillisesti nykyiset kivihililaitokset ovat melko vanhoja ja suuremmat investoinnit ovat kannattavia vain, jos laitoksen käyttöaikaa on riittävästi jäljellä. Taulukossa 6.2 on esitetty, paljonko kivihiltä voidaan parhaimmillaan korvata kullakin polttoainetyypillä rinnakkaispoltossa.

Taulukko 6.2. Eri polttoaineiden mahdolliset korvausosuudet sekä investointivaatimukset kivihiilen rinnakkaispoltossa. Koostettu lähteestä (Flyktman et al. 2011)

Korvaava polttoaine	Korkein korvausosuus	Investointi
Pelletti	15 %	vähäinen
Puulinja	30 %	merkittävä, n. 10 miljoonaa
Torr. biomassa tai paahtopelletti	50 %	vähäinen

Sahanpurun, puu- ja paahtopellettien ja torrefioituneen biomassan käyttö ei edellytä suuria investointeja laitoksiin, sillä ne voidaan jauhaa pölypolttoon sopivaksi olemassa olevilla hiilijauhimilla (Flyktman 2011). Taulukosta nähdään, että korkeimpiin korvausosuuksiin päästään torrefioituilla biomassoilla, mutta käytännössä niiden käyttöä rajoittaa tällä hetkellä heikko saatavuus. Puupelletit tarjoavat tällä hetkellä parhaan pohjan kivihiilen käytön vähentämiseen vanhoissa hiilivoimalaitoksissa, sillä pienillä investoinneilla, lähinnä siilot ja lisäkuljettimet, päästään jo merkittäviin korvausosuuksiin.

6.2 Standardit

Kiinteiden biopolttoaineiden laatuluokitus on tehty standardissa SFS-EN 14961. Standardi löytyy muun muassa SFS-käsikirjasta 34-1. Standardi tullaan korvaamaan standardilla SFS-EN 17225, joka julkaistiin tänä vuonna (2014) englanniksi. Uudessa standardissa ei hakkeen ja murskeen osalta ole merkittäviä muutoksia tiedossa. Tässä työssä tehty tarkastelu perustuu standardiin 14961.

Standardissa biopolttoaineeksi luokitellaan sellaiset puupolttoaineet, jotka on valmistettu luokan A tai B puusta eli joko puhtaasta puusta tai vain kevyesti kemiallisesti käsitellystä puusta, joka ei sisällä halogenoituja orgaanisia yhdisteitä tai raskasmetalleja luonnonpuussa esiintyviä pitoisuuksia suurempia määriä. Jos puuraaka-aine sisältää halogenoituja orgaanisia yhdisteitä tai kohonneita raskasmetallipitoisuuksia siitä valmistettu polttoaine on kierrätyspolttoainetta tai ongelmajätettä riippuen kemiallisten pitoisuuksien suuruudesta. Hyväksyttävään biopolttoaineen raaka-ainepohjaan ei lähtökotaisesti kuulu myöskään purkupuu, joka syntyy purettaessa rakennuksia tai tie- ja vesirakennustyön rakennelmia. Purkupuuta voidaan kuitenkin käyttää, jos raakaainemittauksin todetaan sen olevan kyllin puhdasta.

Teollisuuskäyttöön valmistetuista polttoaineista on ilmoitettava joukko ominaisuuksia, joiden on oltava tiettyjen suuruusluokkien rajoissa. Polttoaineiden ominaisuusluokkia ei ole niputettu yhteen yleisten laatuluokkien muodostamiseksi, kuten on tehty monien ei-teollisuuskäyttöön valmistettävien polttoaineiden kohdalla. Ilmoitettavat ominaisuudet jaetaan velvoittaviin eli pakollisiin tietoihin ja opastaviin eli vapaaehtoiisiin tietoihin. (14961-1)

6.2.1 Puumurskeen laatuvaatimukset

Velvoittavat eli pakolliset ilmoitettavat ominaisuudet ovat puumurskeelle raaka-aineen alkuperä, pääfraktion palakoko ja sitä vastaava karkean fraktion osuus sekä palakoko, hienoaineksen määrä, kosteus, tuhkapitoisuus ja tehollinen lämpöarvo tai energiasisältö. Kemiallisesti käsitellystä biomassasta valmistetulle murskeelle on ilmoitettava myös typpi- ja klooripitoisuus. Kemiallisesti käsittelemättömille biomassoille ne ovat opastavia tietoja. Muita opastavia tietoja ovat irtotiheys ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Irtotiheyden ilmoittamista suositellaan, jos polttoaine kaupataan tilavuusyksiköissä. (SFS-EN 14961) Standardi 17725 ei tuo merkittäviä muutoksia teollisuuskäyttöön valmistetun murskeen laatuvaatimukseen (Alakangas 2013b).

Pääfraktio on puumurskeesta se jae, jonka palakoko on yli 3,15 mm ja sen osuus koko murske-erästä on yli 75 p-%. Suurin palakokoluokka sille on 3,15 - 16 mm ja suurin 3,15 - 300 mm. Murske, josta yli 25-p% on yli 300 mm kappaleita, ei ole standardin 14961 mukaista. Pääfraktiota suuremmat kappaleet kuuluvat karkeaan fraktioon, jota on tyypillisesti noin 10 % murske-erästä. Pienimmälle pääfraktion luokalle on määritetty suurimmaksi sallituksi palakooksi 120 mm, seuraaville 350 mm ja kahdelle suurimmalle se ilmoitetaan ilman annettua luokitusta. Hienoaineksen määrä, joka tarkoittaa alle 3,15

mm kokoisia kappaleita, ei saa olla murske-erässä enempää kuin 25 p-%. (SFS-EN 14961)

Muut murskeen ominaisuusluokat ovat melko moniportaisia ja joustavia ja niissä ei ole tarkasti määrättyä ylärajaa. Esimerkiksi suurin kosteuspitoisuuden luokka on yli 55 %, jonka yhteydessä on ilmoitetaan suurin kosteuspitoisuuden arvo. (SFS-EN 14961)

6.2.2 Puupelletin laatuvaatimukset

Puupelletin velvoittavia ominaisuuksia ovat raaka-aineen alkuperä ja tyyppi, pelletin mitat (pituus ja halkaisija), kosteus, tuhkapitoisuus, mekaaninen kestävyys, hienoaineen määrä, käytetyt lisäaineet ja niiden massaosuus, irtotiheys sekä tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Kierrätyspuuta tai muuta kemiallisesti käsiteltyä raaka-ainetta käytettäessä velvoittavia ominaisuuksia ovat myös rikki-, typpi- ja klooripitoisuus. Tuhkan sulamiskäyttäytyminen on opastava ominaisuus kaikille raaka-aineille. (SFS-EN 14961)

Puupelletin mitoissa on vain viisi kokoluokkaa jotka kaikki ovat melko tarkasti määritellyt. Neljä pienintä kattavat pelletit, joiden halkaisija on 6-12 mm, kussakin 1 mm vaihteluväli on sallittu. Näissä luokissa pelletin sallittu pituus on 3,15 – 40 mm, suurimmassa noin 12 mm halkaisijan pelleteissä pituuden yläraja on 50 mm. Suurin, viides luokka kattaa pelletit, joiden halkaisija on 25 mm 10 mm vaihteluvälillä. Tällaisten pellettien pituuden on oltava välillä 10 – 50 mm.

Toinen huomioonarvoinen luokka on kosteuspitoisuus. Siinä on kaksi luokkaa, alle 10 % kosteutta ja alle 15 % kosteutta. Luokat perustuvat pelletin fysikaalisille ominaisuuksille siinä mielessä, että kovin kuivat tai kovin kosteat pelletit eivät pysy koossa. Standardissa ei ole muiden ilmoitettavien ominaisuuksien osalta tiukkoja rajoituksia.

Uudemmassa standardissa 17225 polttoaineominaisuuksien luokitusarvot tulevat jonkin verran muuttumaan. Alakankaan (2013a) raportin perusteella mitattaviin ominaisuuksiin ei olisi tulossa muutosta eli edellä mainittujen arvojen ilmoittaminen ja määrittäminen on saman periaatteen mukaista riippumatta siitä, mitä standardia käytetään. Uudessa standardissa teollisuuspelleteille on määritelty kotitalouspellettien tapaan laatu- luokat, I1, I2 ja I3, joihin on kaikkiin sidottu tietyt raja-arvot. Kemiallisesti käsitellyistä biomassasta valmistetut puupelletit eivät kuitenkaan kuulu yhteenkään näistä laatu- luokista. (Alakangas 2013a)

6.2.3 Paahtopelletin laatuvaatimukset

Standardi SFS-EN 14961 ei sisällä lämpökäsiteltyjä biomassoja. Sen korvaavassa uudessa standardissa ISO EN 17225-1 on luokitus lämpökäsitellylle biomassalle, joka tarjoaa lähtökohdan paahtopelletin luokitteluun. Lämpökäsittely kattaa esimerkiksi torrefiointin, höyrykäsittelyn (esimerkiksi höyryräjäytys) ja hydrotermisen karbonoinnin. (Alakangas 2014a) Lähteessä Koppejan et al. (2012) on julkaistu alustava versio lämpökäsitellylle biomassalle ilmoitettavista laatu- luokista ja se on esitetty kuvassa 6.1. Kuvassa on esitetty myös standardit, joissa kunkin ominaisuuden mittaustavat on esitetty.

Kohtiin, joihin on merkitty ISO XXXXX, ei ole vielä kuvan julkaisuvaiheessa määritetty standardia.

Master table	
Origin: According to 6.1 and Table 1	Woody biomass (1); Herbaceous biomass (2); Fruit biomass (3); Aquatic biomass (4); Blends and mixtures (5).
Traded Form (see Table 2)	Thermally treated biomass
Dimensions (mm)	to be stated
Moisture, M (w-% as received) ISO XXXXX	
M3	≤ 3 %
M5	≤ 5 %
Ash, A (w-% of dry basis) ISO 18122	
A0.5	≤ 0,5 %
A0.7	≤ 0,7 %
A1.0	≤ 1,0 %
A1.5	≤ 1,5 %
A2.0	≤ 2,0 %
A3.0	≤ 3,0 %
A5.0	≤ 5,0 %
A7.0	≤ 7,0 %
A10.0	≤ 10,0 %
A10.0+	> 10,0 % (maximum value to be stated)
Bulk density (BD) as received (kg/m³) ISO 17828	
BD200	≥ 200
BD250	≥ 250
BD300	≥ 300
Net calorific value as received, Q (MJ/kg) ISO 18125	≥ 19 MJ/kg (minimum value to be stated)
Fixed carbon, C , ISO XXXXX	
C20	≥ 20
C25	≥ 25
C30	≥ 30
C35	≥ 35
C40	≥ 40
Volatiles, VM , w-% dry, ISO 18123	Maximum value to be stated

Kuva 6.1. Standardin 17225-1 lämpökäsittelyjen biomassojen alustava laatuluokitus. Osaan suureita on punaisella on merkitty standardit, joissa niiden mittaustavat määritetään. (Lähde: Koppejan et al. 2012)

Paahdetulle biomassalle ilmoitetaan samoja asioita kuin murskeelle ja puupelletillekin: dimensiot, kosteus- ja tuhkapitoisuus, irtotiheys ja lämpöarvo. Lisäksi ilmoitetaan kiinteän hiilen määrä massaprosentteina sekä haihtuvien aineiden osuus kuiva-aineesta. Nämä ominaisuudet kertovat lämpökäsittelyn asteesta sekä polttoaineen palamisominaisuuksista. (Alakangas 2014a)

Kuvasta nähdään, että ainakin kappaleen mitat ja tiheysluokkien lukumäärä vaatisivat laajennusta paahtopelletin tapauksessa. Paahtopelletin tiheys on luokkaa 750 – 850 kg/m³ ja esitetyn taulukon mitta ei anna kattavaa kuvaa. Dimension määrittelylle olisi mielekästä käyttää puupelletille nyt käytössä olevaa tapaa, jossa ilmoitetaan pelletin halkaisija, pituus, irtotiheys ja hienoaineksen määrä.

SECTOR-projekti kehittää vastaavaa laatuluokitusta lämpökäsitellyille tiivistetyille biopolttoaineille, kuten paahtopelleteille ja paahtobriketeille ja se on tarkoitus julkaista osana standardia 17725, osassa kahdeksan. Käytöstä poistettu puu näyttää jäävän kokonaan tämän standardin raaka-ainepohjan ulkopuolelle. Tämä voi johtua siitä, että kokemuksia käytöstä poistetun puun torrefioinnista ei juuri ole eikä siten myöskään mittausdataa, jonka pohjalta luoda ominaisuusluokitus standardiin. (Alakangas 2014a) Toinen syy voi olla parempi polttoaineen jäljitettävyyys tai raaka-aineen tuomat haasteet lämpökäsittelyprosessille. Ennen tällaisen kattavan standardin julkaisua asiakkaalle voitaneen luoda oma luokituspohja perustuen tässä esitettyyn lämpökäsitellyn biomassan luokitteluun sekä puupelletin laatuluokituspohjaan. Lisäksi on syytä ilmoittaa standardien 14961 ja 17225 velvoituksen mukaisesti kemiallisesti käsitellyn raaka-aineen käytön velvoittamat lisätiedot eli polttoaineen rikki- typpi- ja klooripitoisuus.

6.3 Varastointi ja työturvallisuus

6.3.1 Hake ja murske

Hake ja murske varastoidaan samalla tavoin ja niiden ominaisuudet ovat hyvin samantyyppiset. Tässä kappaleessa niihin molempiin viitataan vain hakkeena.

Hake varastoidaan kasattuna. Pitkäaikainen varastointi heikentää polttoaineen ominaisuuksia ja laatua ja siihen vaikuttavat muun muassa hakekasan muoto, ilmavuus, kosteuspitoisuus, lämpötila ja erän palakoko. Oikeanlainen varastointi vähentää massahäviöitä, energiasisällön heikkenemistä, homeen muodostusta ja vähentää kasapaloja ja kytemistä.

Varastoinnissa puussa tapahtuu biologista ja kemiallista hajoamista. Biologista hajoamista tapahtuu, kun kosteus on yli 30 % ja lämpötila 20 – 60 celsiusastetta. Biomassan kuivuminen alle 30 % kosteuteen vähentää voimakkaasti biologista hajoamista. Tyypillisessä ulkovarastoinnissa sääolosuhteet vaikuttavat voimakkaasti kosteuspitoisuuteen. (Muje 2010) Kosteuspitoisuuden nousu laskee polttoaineen lämpöarvoa ja nostaa homehtumisen riskiä, joka aiheuttaa myös massahäviöitä ja lämpöarvon heikkenemistä (Bayerische Staatsforsten 2012). Fagernäs et al. (2004) tekemissä tutkimuksissa kuukausia kestäneen aumavarastoinnin jälkeen kaikissa hake- ja purukasoissa oli homea.

Haikosen (2005, s.10) mukaan kemiallinen hajoaminen kiihtyy eksponentiaalisesti lämpötilan kasvaessa. Biologinen ja kemiallinen hajoaminen nostavat hakekasan lämpötilaa, mikä voi helposti johtaa polttoaineen kytemiseen ja jopa leimahtamiseen. Hakekasojen palamisesta uutisoidaankin usein (Turun Sanomat 2004, Yle uutiset 2009, Kouvolan Sanomat 2013). Polttoaineen palaminen aiheuttaa massahäviöitä ja lämpöarvon heikkenemistä.

Tapiola on laatinut syttyvien materiaalien varastointiohjeen vakuutusasiakkailleen palojen vähentämiseksi. Siinä ohjeistetaan panostamaan ensisammutusvälineistön saatavuuteen ja alueen valvontaan ilkeiden ja palojen aikaisen havaitsemisen vuoksi sekä

pelastustoimen liikkumisen parantamiseen varastointialueella. Kasojen tulisi olla korkeintaan 10 m korkeita ja kasa-alueella eri kasojen välin olisi oltava vähintään 10 m, jotta mahdollinen kasapalo ei leviä helposti toisiin kasoihin. (Tapiola 2009) Saksalainen metsänhoitoyritys Bayerische Staatsforsten (2012) suosittelee hakkeen varastointiohjeessaan kuitenkin korkeintaan 5 m kasoja, jotta itsesyttymisvaara ei kasvaisi tarpeettomasti ja ettei hakemassa estäisi ilman kiertoa kasan sisällä ja aiheuttaisi laadun heikkenemistä. Muje (2010) toteaa, että tiiviimmissä kasoissa on mitattu eniten kuiva-ainehäviöitä.

Paras varastopaikka on tasainen, aurinkoinen, tuulinen ja kuiva. Maanpinnan on oltava kiinteä tai katettu, erityisen hyvä on betonoitu tai asfaltoitu pinta. Ennen varastointialue tasoitetaan ja varmistetaan, ettei sinne jää suuria kiviä tai muuta irtoainesta. Tämä on tärkeää myöhemmän kuormauksen kannalta, jotta lastin sekaan joudu kiviä tai muuta irtoainesta. Varastoalue valitaan siten, että se on lähellä kulkuteitä, jotta polttoaineen kuormaaminen on helppoa. Suositeltu varastoalue on luokkaa 1 m² varastointialaa 2 i-m³ haketta kohden (Bayerische Staatsforsten 2012).

Hake on paras kasata pitkiin kasoihin, jotka ovat kattoprofiilin (kolmion) muotoon kasattuja. Hakekasoissa ei saa olla kuoppia, joihin voi kerääntyä vettä. Jos kasassa on kuoppia, vesi ei pääse valumaan niistä pois vaan imeytyy hakkeeseen. Yksittäisissä matalissa kasoissa on enemmän pinta-alaa, jolloin kasat ovat ilmavampia ja kuivuminen nopeutuu. (Bayerische Staatsforsten, 2012)

Talvella polttoaineen kosteus on suurimmillaan, jolloin myös polttoaineen lämpöarvo on heikompi ja samasta määrästä polttoainetta saadaan vähemmän energiaa. Kuitenkin samaan aikaan lämmitystarve on suurimmillaan. Lisäksi kostea polttoaine jäätyy pakkasilla, jolloin sitä on huomattavasti vaikeampi käsitellä (Jahkonen 2014). Bayerische Staatsforsten (2012) suosittelee, että hakekasat on peitetään talven ajaksi pressulla, jotta kosteuspitoisuus nousisi syksyn ja talven aikana vähemmän. Hakekasojen tulisi olla mahdollisimman jyrkkiä ja pitkiä, jotta peittäminen onnistuu paremmin. Optimaalisesti kasat peitetään kokonaan, eikä hakekasaa näy lainkaan pressun alta. Peittomateriaalin pitää olla vettä hylkivää, mutta ei täysin vedenpitävää vaan sellaista, joka myös päästää läpi kosteutta. Jos pressu ei hengitä, homehtuminen ja kuiva-ainehäviöt voimistuvat ja peitosta saatavat hyödyt jäävät pieniksi. Peittopressu levitetään kasojen päälle niin, ettei siihen muodostu kuoppia, joihin vesi voi kerääntyä ja pressun reunoille laitetaan painot, jotta se pysyy tiukasti paikoillaan. Kahden pressun reunat asetellaan niin, että tuuli ei puhalla sauman väliin, vaan toinen reuna on hieman toisen päällä tuulen suuntaisesti. (Bayerische Staatsforsten 2012)

6.3.2 Puupelletti

Puupellettiä varastoidaan suljetussa tilassa, kuten lattiavarastossa tai siiloissa, koska polttoaine on herkkää kosteudelle. Sateelta suojaamisen lisäksi on pidettävä huoli, että lämpötilan vaihtelusta johtuva veden tiivistyminen ei pääse vahingoittamaan polttoainetta. Pellettien kostuminen laskee niiden lämpöarvoa ja jos pelletit kastuvat tarpeeksi, niiden rakenne hajoaa ja ne muuttuvat käyttökelvottomiksi. Pellettiä voidaan varastoida

pienkäytössä olevassa ulkosiilossa noin vuoden, minkä jälkeen sen laatu heikkenee merkittävästi (Motiva 2014). Laadun heikkeneminen johtuu lähinnä biologisesta hajoamisesta. Kosteudelta suojaaminen edellyttää suljettua varastointitilaa, joihin kuitenkin liittyy työturvallisuusongelmia, jotka on otettava huomioon.

Pellettiä varastoitaessa se hapettuu biologisen hajoamisen myötä jolloin muodostuu hiilimonoksidia ja hiilidioksidia, jotka ovat myrkyllisiä ja syrjäyttävät hapetta. Pelleteissä muodostuu myös terveydelle haitallisia aldehydejä, kuten heksanaalia, kun rasvahapot hapettuvat. Heksanaalin muodostuminen on voimakkainta tuoreissa pelleteissä, 2 - 3 kuukauden varastoinnin jälkeen muodostuminen on vain vähäistä. Muodostuvien kaasujen määrä riippuu pellettien raaka-aineesta. (Svedberg & Knutsson 2011)

Lattiavarastoissa on huolehdittava riittävästä ilmanvaihdosta mutta siiloja ei kannata tuulettaa, sillä muodostunut hiilidioksidi ja -monoksidi ja alentunut happipitoisuus hidastavat biologista hajoamista ja laskevat tulipalon vaaraa. Pellettituotantolaitoksien työntekijöiden on suositeltavaa pitää mukanaan henkilökohtaista CO-mittaria ja kaasupitoisuuksia on muutenkin pidettävä silmällä onnettomuuksien välttämiseksi. Hengityssuoja suojaa pölyltä mutta ei hiilimonoksidilta tai happikadolta. (Svedberg & Knutsson 2011)

Pelletin varastoinnissa syntyy pölyä erityisesti koneellisessa siirrossa, säkityksessä, lastauksessa ja paineilmalla siivotessa. Ilmassa oleva pöly aiheuttaa akuutteja tai kroonisia silmä- hengitystie- tai iho-oireita ja kovapuulaatujen, kuten tammen ja pyökin, pöly nostaa syöpäriskiä. Pelleteissä muodostuu myös jonkin verran hartsihappoja, jotka voivat aiheuttaa astmaa ja kosketusdermatiittia. Jos pelletit ovat vanhoja ja kostuneita, myös mikrobialtistus voi nousta haitalliseksi (Svedberg & Knutsson 2011; Työterveyslaitos 2010). Työturvallisuuslaissa puupölyaltistuksen raja-arvoksi on asetettu 2 mg/m^3 kahdeksan tunnin altistuksena ja uusille tai uudistetuille tuotantolaitoksille vastaava raja-arvo on 1 mg/m^3 (STMa 1.4.2014/268/2014).

Pellettivarastossa voi syttyä tulipalo esimerkiksi sähkölaitteen kipinästä, puhaltimien tai siirtokoneiden kuumenemisestä tai tupakoinnista. Mahdollinen itsesytyminen pitää myös huomioida. Itsesytyminen tapahtuu, kun mikrobiologiset prosessit nostavat pellettien lämpötilaa ja kuivattavat niitä. Kemialliset hapettumisreaktiot nostavat lämpötilaa entisestään ja jos lämpötila nousee tarpeeksi korkeaksi, materiaali syttyy palamaan. Itsesytymsvaara on suurin isoissa varastoissa, lattiavarastoissa ja suursiiloissa. Riskejä voidaan hallita muun muassa pellettien riittävällä jäähdytyksellä puristuksen jälkeen ja varaston lämpötilan mittauksella. Varastotiloissa oleva pöly voi aiheuttaa primäärisen tai sekundäärisen pölyräjähdysten ja varastotilojen suunnittelussa ja käytössä on huomioitava räjähdysvaarallisten tilojen ATEX-säädökset. (Svedberg & Knutsson 2011).

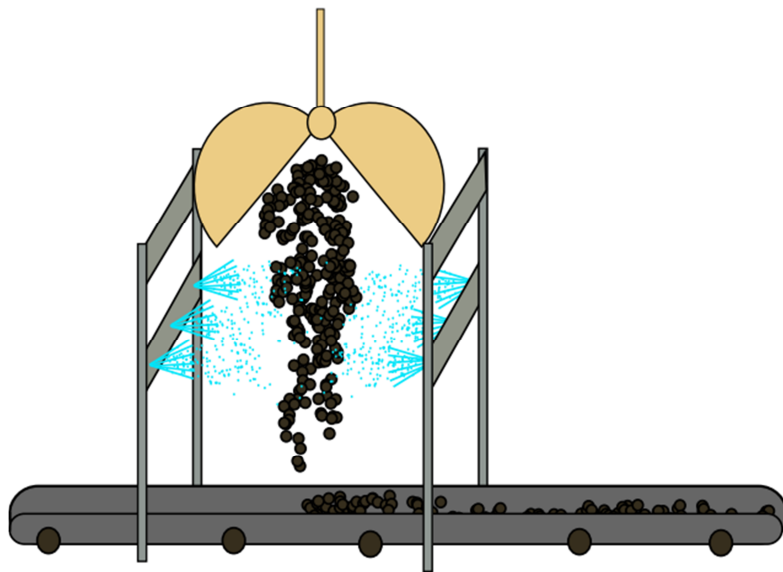
6.3.3 Paahtopelletti

Torrefioitu materiaali on hydrofobista ja siten melko säänkestävää. Hydrofobiset ominaisuudet kasvavat lineaarisesti torrefiointiasteen kasvaessa. Jäätymis- ja sulamissyklit voivat silti merkittävästi heikentää polttoaineen laatua. Verrattuna muihin kiinteisiin biomassoihin, torrefioidussa materiaalissa tapahtuu huomattavasti vähemmän biologista

hajoamista ja sitä kautta se myös lämpiää vähemmän. paahtopellettien mekaaninen kestävyys kuitenkin kärsii, jos ne altistuvat paljon kosteudelle (Koppejan et al. 2012). Khodayarin (2012) raportoimien Vattenfallin Saksassa suorittamien varastointikokeiden perusteella paahtopellettien varastointi hiilikentäntällä 3 kuukauden ajan ei tuottanut ongelmia. Valumavesien kemiallinen hapenkulutus (COD-pitoisuus) nousi kuitenkin korkeaksi, joten varastointialue on niiden osilta eristettävä ja valumavedet käsiteltävä asianmukaisesti.

Suurin turvallisuusriski torrefioidun materiaalin käsittelyssä on pölynmuodostus. Hauras materiaali pölyää helposti ja pölyräjähdysvaara on huomioitava kaikissa käsittelyn vaiheissa. Torrefioitu puupöly on pölyräjähdys- ja itsesyttymisominaisuuksiltaan puu- ja turvepölyn kaltaista. Kivihiilipölyyn verrattuna sen räjähdyspaine ja paineenousu nopeus ovat kuitenkin korkeampia, toisin sanoen se on ärhäkämpää kuin kivihiilipöly. Hieno torrefioitu puupöly syttyy jo hyvin alhaisissa pölykonsentraatioissa. Karkeampikin pöly aiheuttaa räjähtävän seoksen ilman kanssa, toisin kuin kivihiilipöly, jonka täytyy olla tarpeeksi hienoa, että näin käy (Wilén 2012).

Khodayarin (2012) mukaan polttoaineen purussa voimalaitosalueelle voidaan käyttää samoja laitteita kuin hiilelle. Pölyäminen tuotti alkuun ongelmia mutta ne saatiin hallintaan lisäämällä purkulaitteistoon kuvan 6.2 mukainen vesisuihkutusjärjestelmä. Liukuhihnasiirrot onnistuivat kuten kivihiilellä.



Kuva 6.2. Paahtopelletin purku kivihiilen käsittelylaitteistolla ja siihen asennettu vesisuihkujärjestelmä.

Alankomaissa Stramproy-Greenin torrefiointitehtaassa sattui tulipalo 2012. Tuotanto oli lopetettu keskiviikkona ja tulipalo havaittiin lauantaina. Tulipalon syttyminen liittyi hyvin todennäköisesti pölyn itsesyttymiseen. Tulipalo alkoi varastointisiilosta. (Kiel 2012; RTV Oost 2012) Tulipalosta voidaan oppia ainakin se, että lopputuote on jäähdytettävä riittävän tehokkaasti, siiloihin varastoidun polttoaineen lämpötilaa on tarkkailtava ja tiloihin pitää rakentaa hyvät sammutus- ja palonestojärjestelmät.

Koppejan et al. (2012) mukaan tiivistämättömän torrefioidun biomassan käyttö voi olla taloudellista, jos se valmistetaan sitä polttavalla voimalaitoksella tai sen lähellä. Sen ominaisuuksista varastoinnissa ei kuitenkaan ole paljon tietoa saatavilla. Muiden tietojen valossa voidaan olettaa, että myös sitä olisi mahdollista varastoida kuin kivihiltä ilman merkittävää kosteuden lisääntymistä. Sen voimakkaampi pölyntyminen voi kuitenkin aiheuttaa liian suuren turvallisuusvaaran. Lisäksi tiivistämätöntä torrefioitua biomassaa tarvitaan tilavuudeltaan suurempi määrä kuin puu- tai paahtopellettejä tai kivihiltä, joka johtaa suurempaan varastointialan tarpeeseen ja kuljettimien kuormittamiseen.

7 PROSESSISUUNNITTELU

Prosessisuunnittelun yhteydessä laskettiin tuotantolaitteilta vaadittava raaka-ainevirran käsittelykapasiteetti, selvitettiin, miten paljon lämpöä aluelämmitysjärjestelmästä voidaan saada biomassan kuivaukseen ja paljonko tukipolttainetta tarvitaan puu- ja paah-topellettituotannossa. Pelletöintilaitteista, viirakuivurista, torrefiointireaktorista ja biomassaa polttavasta lämmityskattilasta pyydettiin budjetroititarjoukset niitä valmistavilta tai toimittavilta yrityksiltä. Tarjousten tietoja hyödynnettiin ennen kaikkea investointilaskelmissa mutta myös lämmön- ja polttoainetarpeen määrittämisessä.

7.1 Laitetarjoukset

Pelletöintilaitteista pyydettiin ja saatiin budjetroitarjoukset kahdelta eri maahantuojalta. Tarjoukset kattoivat raaka-aineen pienennyksen ennen kuivuria, kuivurin, jauhamisen, kuljetinlaitteita, esikäsittelyn ennen pelletöintiä, pelletöinnin sekä jäähdytyksen. Toinen tarjouksista oli selvästi kattavampi kuin toinen ja se sisälsi tarkemmin muun muassa kuljetinlaitteet. Tarjouksiin kuului myös arvio suunnittelusta ja käyttöönotosta. Siilot, perustukset ja pelletöintilinjan hallirakennus eivät kuuluneet kumpaankaan tarjoukseen.

Kuivurin osuus tarjouksista oli hyvin tarkka molemmissa. Tarjouksiin sisältyi jonkin verran automatiikkaa mutta varsinaista myyntisopimusta varten olisi keskusteltava lisää yksityiskohdista. Tarjousten laajuus riitti kuitenkin hyvin työn tarkoituksiin, sillä kyseessä oli esiselvitys.

Torrefiointiyksiköstä pyydettiin ja saatiin yksi tarjous laitevalmistajalta. Torrefiointiyksikön toimituslaajuuteen kuului torrefiointireaktori, poltintyksikkö torrefiointikaasun polttoon ja lämmöntuottoon, torrefioidun biomassan jäähdytysjärjestelmä reaktorin jälkeen sekä niihin liittyvät lisälaitteet. Torrefioidun biomassan pelletöintiin tarvittavien laitteiden hinta ja sähkönkulutus arvioitiin puupellettin valmistuslaitteiden tarjouspyyntöjen ja kirjallisuuden perusteella.

Biopolttoainetuotannossa tarvittaisiin ainakin joissain tapauksissa tuottaa lämpöä prosessiin. Lämpö suunniteltiin tuotettavan joko raaka-ainemursketta tai valmista biopolttoainetta polttamalla. Tätä varten pyydettiin laitetarjous biopolttoainekattiloita valmistavalta yritykseltä pellettilämmityskattilasta. Sama yritys valmistaa myös hakekattiloita, joiden oletettiin olevan samaa hintaluokkaa kuin pellettilämmityskattiloidenkin.

7.2 Aluelämmitysjärjestelmän lämpötase

Prosessisuunnittelussa tarkasteltiin asiakasyrityksen tuotantoalueella olevan aluelämmitysjärjestelmän integroimista biopolttoainetuotantoon. Järjestelmässä on ollut viime

vuosina merkittävää ylikapasiteettia ja sen hyödyntäminen biopolttoaineen tuotannossa toisi merkittäviä etuja. Järjestelmän energiatehokkuutta olisi tarvetta nostaa ja samalla biopolttoaineen tuotannossa ei tarvitsisi tuottaa kaikkea prosessin lämpöä raaka-ainetta tai lopputuotetta polttamalla.

Biopolttoaineen tuotantovaihtoehtojen suunnittelun ja vertailun tueksi tehtiin arvio aluelämmitysjärjestelmän lämmöntuottokyvystä, hukkalämmön minimoimisesta ja mahdollisen lisälämmön tuottamisen tarpeesta sekä sopivista lisäpolttoaineista seuraavan 20 vuoden aikana. Biopolttoaineen tuotantovaihtoehtojen suunnittelussa oli tarpeen tietää aluelämmitysjärjestelmän lämmöntuottokyky ja nykyisen lämpökuorman suuruus, lisälämmön ja –polttoaineen tarve sekä edullisin lisäpolttoaine. Tuotantovaihtoehtojen vertailua varten haluttiin selvittää erilaisten lämpökuormien vaikutus aluelämpöjärjestelmän lämpötaseeseen, hukkalämmön määrään ja lämmöntuotannon lisäpolttoaineen tarpeeseen.

Aluelämmitysjärjestelmän lämmöntuotantokapasiteetti ei ole laitteista ja polttoaineista johtuvista syistä vakio, vaan tulee heikkenemään vuosien mittaan. Samaan aikaan järjestelmän lämpökuormaan on tulossa muutoksia lähivuosina. Nämä asiat huomioitiin laskelmissa.

Aluelämmitysjärjestelmän lämmöntuottokyky arvioitiin aikasempien raporttien tietoihin pohjautuen seuraavien 20 vuoden ajaksi. Sen lisäksi määritettiin nykyiset ja tulevat lämpökuormat. Näistä muodostettiin järjestelmän lämpötase, jonka perusteella arvioitiin, paljonko järjestelmässä on hyödyntämätöntä lämpöä ja kuinka kauan sitä riittää. Tase muodostettiin sekä huipputehojen että lämpömäärien mukaan ja erikseen talvelle ja kesälle, sillä lämpökuormat vaihtelevat suuresti vuodenajan mukaan.

Järjestelmässä todettiin olevan runsaasti ylimääräistä lämpöä joka kesä, mutta talvisin järjestelmässä on ylimääräistä kapasiteettia vain noin viiden vuoden ajan. Sen jälkeen lämmöntuotanto heikkenee niin, että talvia varten on hankittava lisää lämmityskapasiteettia, jos lämpökuorma pysyy arvioituna.

7.3 Aluelämmitysjärjestelmän lisäpolttoainetarve

Aluelämmitysjärjestelmässä todettiin tarvittavan lisäkapasiteettia lämmöntuotantoon erityisesti talviajalle. Lisälämmöntuotannon vaihtoehtoina käsiteltiin maakaasun, puupelletin ja puumurskeen polttoa. Kaikkien polttoainevaihtoehtojen käytölle oli tekniset edellytykset, joten vertailu perustui polttoainekuluihin.

Lisäpolttoainetarve määritettiin lämpötaseen negatiivisiin arvoihin pohjautuen. Tarvittava lisälämmön määrä kullekin puolelle vuodelle arvioitiin lämpötaseen perusteella. Tarvittava polttoainemäärä megawattitunteina määritettiin jakamalla lisälämmöntarve lämmöntuottojärjestelmän hyötysuhteella.

Polttoainevaihtoehtoina käsiteltiin maakaasua, puupellettiä ja puumursketta. Maakaasun käyttöön on alueella olemassa melko hyvä valmis infrastruktuuri ja sen käyttöönotosta ei arvioitu tulevan investointikustannuksia. Oletus ei ollut aivan realistinen ja se suosii hieman maakaasua muihin polttoaineisiin nähden. Puupelletin ja puumurskeen

yhteydessä oletettiin, että niitä varten hankitaan uusi, erillinen lisälämmityskattila. Lämmityskattila mitoitettiin kahdenkymmenen vuoden tarkasteluajan suurimman tarvittavan lämpötehon mukaan ja investointikustannus arvioitiin laitetarjouksiin perustuen.

Puupolttoaineiden lämmöntuotantokustannukset koostuivat kahdesta osasta, pääomakustannuksista ja polttoainekustannuksista. Pääoman poistot laskettiin tasapoistoina ja korkokustannus laskettiin yhtälön (7.1) mukaisesti.

$$korko_i = (inv. kustannus - poisto * i) * korkoprosentti \quad (7.1)$$

Yhtälössä i on suhteellinen vuosi, investointivuoden ollessa vuosi 0. Vuosittainen pääomakustannus laskettiin summaamalla vuosittainen poisto ja korko. Vuosittaiset polttoainekustannukset $K_{polttoaine}$ laskettiin yhtälöiden (7.2), (7.3) ja (7.4) mukaisesti.

$$K_{murske} = poisto_i + korko_i + Q_{LP,i} * H_{murske} \quad (7.2)$$

$$K_{pelletti} = poisto_i + korko_i + Q_{LP,i} * H_{pelletti} \quad (7.3)$$

$$K_{maakaasu} = Q_{LP,i} * (H_{maakaasu} + H_{päästöoikeus}) \quad (7.4)$$

Yhtälöissä $poisto_i$ on puulämmityslaitosinvestoinnin vuosittainen poisto, $korko_i$ investointia vastaava vuosittainen korko yhtälön (7.1) mukaan laskettuna, $Q_{LP,i}$ vuosittainen lisäpolttoaineen tarve megawattitunteina, $H_{polttoaine}$ kunkin polttoaineen myyntihinta ja $H_{päästöoikeus}$ päästöoikeuden hinta maakaasulle muodossa €/MWh. Polttoaineen myyntihintaa käytettäessä huomioidaan itse tuotetuissa polttoaineissa sekä tuotannon kustannukset että saamatta jääneet myyntitulot, kun polttoaine käytetään itse. Maakaasulle ei ole määritetty tässä investointikustannuksia, kuten jo mainittiin.

Tarkastelussa maakaasu oli edullisin polttoainevaihtoehto lyhyellä aikavälillä. Puumurske oli edullisin vaihtoehto jo kolmen vuoden tarkasteluvälillä. Puupelletti oli melko tasaväkinen kustannuksiltaan maakaasun kanssa mutta pitkällä aikavälillä sekin oli maakaasua edullisempi vaihtoehto, alkaen kahdeksannesta tarkasteluvuodesta.

Murskeen edullisuus selittyy sillä, että alueella on paljon tilaa sen varastointiin ja sitä on jo alueella, jolloin kuljetuksista ja varastoinnista ei tule kustannuksia. Kaikessa lämmöntuotossa oletettiin muun muassa tämän tarkastelun perusteella lisälämmöntuotannon polttoaineeksi puumurske.

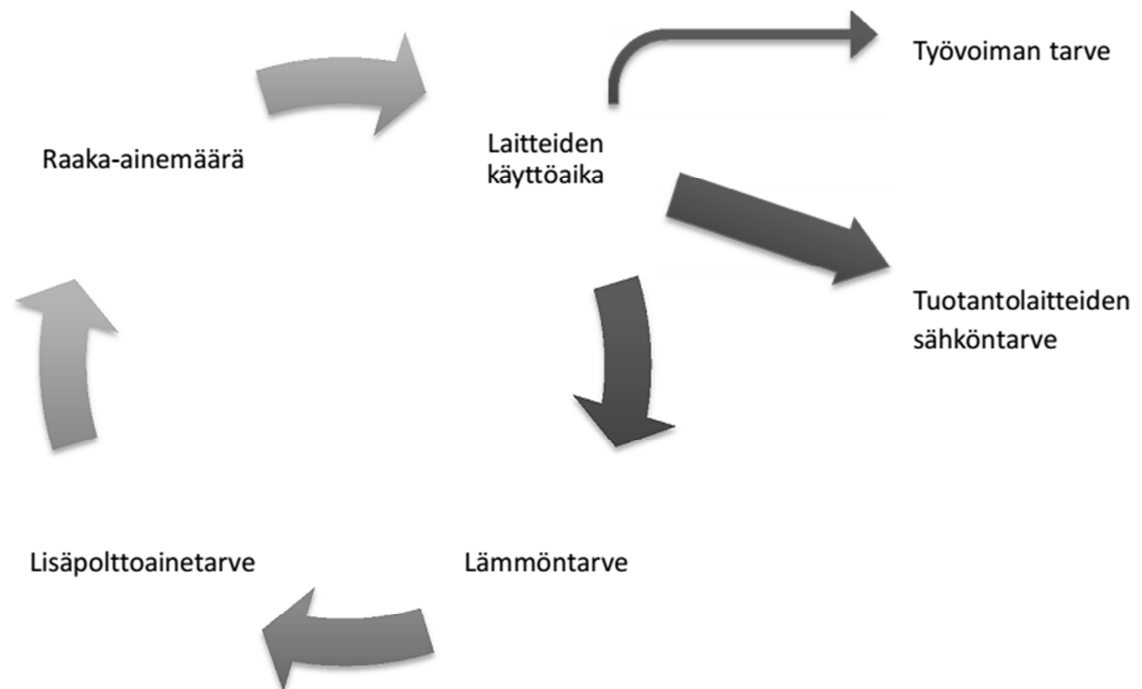
7.4 Polttoaineraive puupelletin valmistuksessa

Puupelletin tuotannossa tarvitaan lämpöä puubiomassan kuivaukseen. Kuivurivaihtoehtoina oli kolme eri kuivuria, joilla jokaisella oli erilainen lämmöntarve. Lämmöntarve perustuu ennen kaikkea kuivattavasta materiaalista haihdutettavan veden määrään, käytettävään tekniikkaan ja laitteen käyttöaikaan.

Puupellettituotannossa kuivurivaihtoehtoina käsiteltiin rumpukuivuria sekä isoa ja pientä viirakuivuria. Viirakuivurien oletettiin saavan osan lämmöstään aluelämmitysjärjestelmästä. Kaikissa tapauksissa varauduttiin kuitenkin myös siihen, ettei ainakaan

kaikkea lämpöä voidaan saada aluelämmitysjärjestelmästä vaan myös lisälämpöä on tuotettava. Lisälämpö suunniteltiin tuotettavan raaka-ainemursketta polttamalla. Lopputuotteen eli puupelletin polttamista harkittiin myös, mutta raaka-ainemurskeen poltto osoitautui kannattavammaksi.

Raaka-aineen käyttö polttoaineena aiheuttaa sen, että polttoainetarve on iteroitava. Kun osa raaka-aineesta käytetään prosessin lämmöntuotantoon, se laskee käytössä olevan raaka-aineen jalostamiseen menevää aikaa ja siten laitteiden käyttöaika. Käyttöajan muutos taas vaikuttaa laitteiden lämmöntarpeeseen ja sitä kautta polttoainetarpeeseen. Käyttöaika vaikuttaa myös laitteiden sähkön kulutukseen ja pienessä määrin myös työvoiman tarpeeseen. Nämä vuorovaikutussuhteet on esitetty kuvassa 7.1.



Kuva 7.1. Raaka-aineen käyttö polttoaineena vaikuttaa polttoaineen tarpeeseen.

Iteroinnin lähtöarvona käytettiin staattisella tilanteella laskettua lisälämmöntarvetta, jossa raaka-ainepohjan muutoksen vaikutusta laitteiden käyttöaikaan ei huomioitu. Saadusta lisälämmöntarpeesta laskettiin lisäpolttoaineen tarve, joka vähennettiin käytössä olevasta raaka-aineesta. Erotusta käytettiin seuraavan iteraatiokierroksen lähtöarvona.

Käyttötuntien vähetessä kuivurin käyttöä oletettiin vähennettävän talviajalta, jolloin alueen ja myös kuivurin lämmöntarve on suurimmillaan. Tällöin päästään matalampaan lisäpolttoaineen tarpeeseen. Pienen viirakuivurin lisälämmöntarve kesällä huipunkäyttöajan mukaan laskettuna $Q_{pieni, kesä}$ laskettiin yhtälön (7.5) mukaisesti.

$$Q_{pieni, kesä} = q_{kesä} * \frac{\left(\frac{RA}{\dot{m}} - \left(\frac{RA}{\dot{m}} - 2880 h\right)\right)}{\eta} - Q_{ylim, kesä} \quad (7.5)$$

Yhtälössä $q_{kesä}$ on kuivurin kesällä tarvitsema teho megawatteina, RA on edellisen iteraatiokierroksen perusteella käytössä oleva raaka-ainemäärä tonneina, \dot{m} on kuivurin

kapasiteetti yksikössä t/h, η lämmitysjärjestelmän hyötysuhde ja $Q_{ylim, kesä}$ aluelämmitys-järjestelmässä käytössä oleva ylimääräinen lämpöteho kesällä muiden toimintojen läm-mityksen jälkeen. Termillä 2880 h kohdistettiin käyttöajan väheneminen talvelle. Talven lisälämmöntarve huipunkäyttöajan mukaan $Q_{pieni, talvi}$ laskettiin yhtälön (7.6) mukaisesti.

$$Q_{pieni, talvi} = q_{talvi} * \frac{\left(\frac{RA}{m} - 2880 h\right)}{\eta} - Q_{ylim, talvi} \quad (7.6)$$

Yhtälön (7.6) merkinnät vastaavat yhtälön (7.5) merkintöjä talviajalle.

Isoa viirakuivuria oletettiin käytettävän vain kesäaikana ja sen lisäpolttoainetarve kesällä huipunkäyttöajalla suhteutettuna Q_{iso} laskettiin yhtälön (7.7) mukaisesti.

$$Q_{iso} = q_{kesä, i} * \frac{\left(\frac{RA}{m}\right)}{\eta} - Q_{ylim} \quad (7.7)$$

Yhtälössä $q_{kesä, i}$ on kuivurin teho kesällä ja muut merkinnät ovat yhtälön (7.5) merkintö-jä vastaavat isolle kuivurille.

Lisäpolttoainetarvetta iteroitiin siihen asti, että kahden iteraatiokierroksen käytössä olevien raaka-ainemäärien erotus oli alle tonnin. Rumpukuivurin lisäpolttoaineen tarve määritettiin samoin kuin viirakuivureille, mutta yhtälöistä jätettiin pois aluelämmitys-järjestelmän lämmön termit $Q_{ylim, kesä}$ ja $Q_{ylim, talvi}$.

Lisäpolttoaineen tarpeeksi saatiin pienelle viirakuivurille 3 - 28 % raaka-ainemassasta vuodessa, suurelle viirakuivurille 0 - 19 % raaka-ainemassasta vuodessa ja rumpukuivurille 9 - 10 % raaka-ainemassasta vuodessa. Viirakuivurien vuosittain tarvitsema lämpömäärä oli lähes sama, sillä suurta viirakuivuria suunniteltiin käytettä-vän vain noin puolet vuodesta. Syy lyhyemmälle käyttöajalle oli aluelämmitys-järjestel-män tehokkaampi hyödyntäminen, mikä näkyy polttoainetarpeen pienentymisenä. Hy-vinä lämmöntuottovuosina suuren viirakuivurin lisäpolttoainetarve on lähes nolla. Rumpukuivurin lämmöntarve oli hieman viirakuivureita alhaisempi, mikä näkyy myös polttoainetarpeessa.

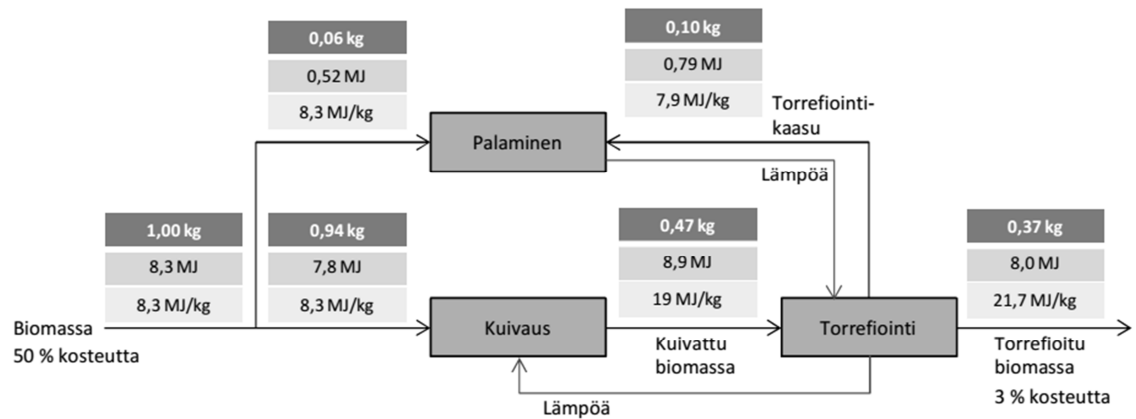
7.5 Tukipolttoainetarve paahtopelletin valmistuksessa

Paahtopelletin valmistuksessa tarvittavan tukipolttoaineen määrä riippuu ensisijaisesti raaka-aineen kosteudesta, kuivurin loppukosteudesta sekä torrefiointiasteesta eli kuinka kauan ja missä lämpötilassa biomassa on pidetty reaktorissa. Torrefiointiaste on tässä ilmaistu raaka-aineesta poistuvan massan osuutena, joka on tyypillisesti 10 - 30 %.

Tukipolttoaineen määrän selvittämiseen käytettävä metodi riippuu käytettävästä kuivurista, torrefiointikaasun energiasta ja siitä, käytetäänkö torrefiointikaasun energiaa myös kuivurin lämmön tuottamiseen. Jos kuivurin energiaa ei tuoteta torrefiointikaasul-la, tukipolttoaineen tarve kuivurin osalta laskettiin samoin, kuin puupelletin tuotannos-sa. Kuivurin tyyppi ja koko vaikuttavat sen lämmöntarpeeseen. Torrefiointikaasujen energia riippuu erityisesti kuivurin loppukosteudesta ja torrefiointiasteesta. Korkea lop-

pukosteus laskee torrefiointikaasun energiaa, koska kaasussa olevan vesihöyryn osuus nousee ja torrefiointiaste vaikuttaa kaasun koostumukseen ja määrään. Tässä torrefiointiaste huomioitiin vain kaasumäärän kasvuna, sillä tarkkaa tietoa torrefiointiasteen vaikutuksesta torrefiointikaasun lämpöarvoon ei ollut saatavilla.

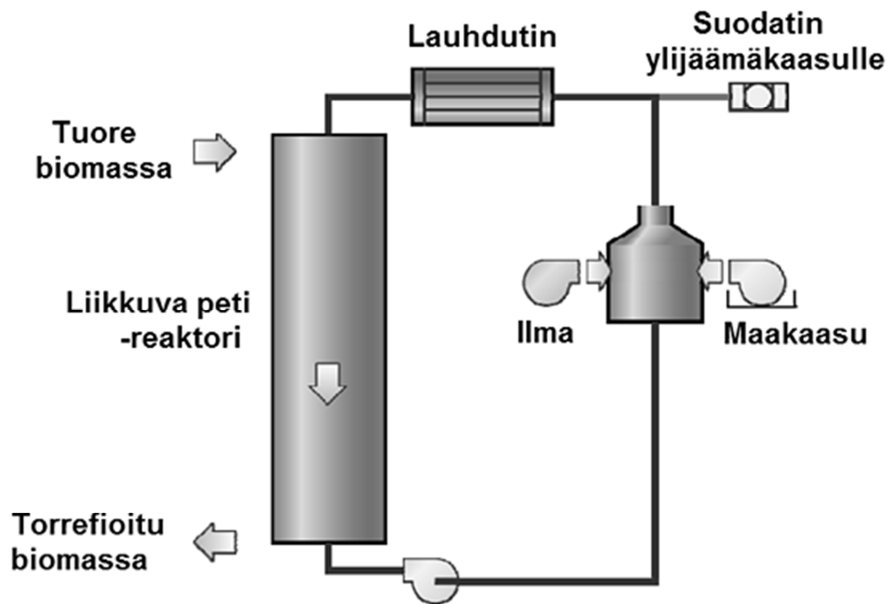
Lähtötietoina käytettiin Koppejan et al. (2012) raportissa esitettyä tapausta, jonka massa- ja energiataseet on esitetty kuvassa 7.2.



Kuva 7.2. Torrefiointin, kuivauksen ja polton massa- ja energiataseet Koppejan et al. (2012) mukaan.

Kuvassa esitetyssä tapauksessa raaka-aineena on 50 % kosteutta ja 0,5 % tuhkaa sisältävä puubiomassa. Raaka-ainevirrasta otetaan pieni osuus polttoon prosessilämmön tuottamiseksi. Raportissa on valittu kuivurin loppukosteudeksi 0 %, jolloin kuivurin veden haihdutuskapasiteetti on 0,47 kg/s, joka vastaa noin 1,7 t/h, kun raaka-ainevirta on 1 kg/s ja lisäpolttoainekäyttö 6 %. Koppejan et al. raportissa kuivurin lämmöntarpeeksi on arvioitu Topell Energyn tietoihin pohjautuen 2,9 MJ/kg haihdutettua vettä, kun kuivurina on suoralämmitteinen savukaasukuivuri. Matalan lämpötilan lämmönlähdettä hyödyntävällä viirakuivurilla vastaava luku on noin kolminkertainen, riippuen hieman käytetystä tekniikasta, kosteuksista ja kuivattavan aineen palakoosta. Raportissa esitellyssä tapauksessa täysin kuivan torrefiointikaasun kosteudeksi on arvioitu 7,9 MJ/kg. Torrefiointiasteena on käytetty 21 %. Raaka-aineen lämpöarvona on käytetty 8,3 MJ/kg, jolloin raaka-aineen kuivalämpöarvo on noin 18 MJ/kg (SFS-EN 15296).

Torrefiointiprosessin lämmöntarve arvioitiin Tumuluru et al. (2010) raportin tietojen perusteella. Siinä on laskettu prosessitietoja liikkuvan pedin periaatteella toimivalle torrefiointireaktorille, jossa on yhdistetty raaka-aineen kuivaus samaan reaktoriin. Prosessi on esitetty kuvassa 7.3.



Kuva 7.3. Tumuluru et al. raportissa analysoitu kuivaus- ja torrefiointireaktori. (Lähde: Tumuluru et al. 2010)

Kuten kuvasta nähdään, tuore biomassa syötetään reaktorin yläosasta sisään ja alhaalta saadaan valmista torrefioitua biomassaa. Lämmönlähteenä käytettävä savukaasu tulee reaktoriin alhaalta eli reaktori toimii vastavirtaperiaatteella. Prosessissa syntyvä torrefiointikaasu viedään yhdessä käytetyn savukaasun kautta lauhduttimeen, jossa siitä poistuu vettä ja lauhtuvia yhdisteitä. Kuivattu kaasu viedään poltinkyksikköön, jossa se poltetaan maakaasun kanssa.

Reaktorissa tapahtuvan torrefiointivaiheen tuloksia on taulukoitu taulukkoon 7.1.

Taulukko 7.1. Tumuluru et al. raportin prosessilaskennan tuloksia.

Raaka-ainevirta torrefiointiin	700 kg/h	1050 kg/h	1400 kg/h
Latentti lämpö haihtuvien poistamiseen	82 kW	123 kW	164 kW
Latentti lämpö veden haihdutukseen	217 kW	327 kW	436 kW

Laskelmissa on huomioitu 5 % lämpöhäviö. Lämmöntarve on jaettu haihtuvien yhdisteiden poistamiseen ja veden haihduttamisessa tarvittaviin lämpömääriin. Taulukossa esitetyistä luvuista muodostettiin sovitteet, joiden avulla määritettiin raaka-ainevirtaa vastaava torrefioinnin energiatarve. Haihtuvien poistamiseen tarvittava lämpömäärä laskettiin reaktoriin tulevan kuiva-ainevirran perusteella ja kuivurin loppukosteuden mukaisen veden massavirran perusteella laskettiin veden haihdutukseen tarvittava lämpö. Tuloksen oletettiin vastaavan riittävällä tarkkuudella myös muunlaisten torrefiointi-reaktorien energiatarvetta.

Edellä mainittujen tietojen perusteella tehtiin taulukkolaskentapohja MS Excel-ohjelmalla lisäpolttoainetarpeen määrittämiseksi, joka on esitetty liitteessä 1. Valittavia laskuparametreja ovat raaka-aineen kosteus, kuivurin lämmöntarve, torrefiointiaste ja loppukosteus kuivurin jälkeen. Palamisen hyötysuhteeksi valittiin 90 % ja kuivauksen

lämpöhäviöiksi arvioitiin konservatiivisesti 20 % ja torrefioinnin lämpöhäviöiksi yhteensä 25 %, jossa on huomioitu Tumuluru et al. raportin laskelmissa huomioitu 5 %. Torrefiointikaasun kosteus huomioitiin sen lämpöarvossa yhtälön

$$LHV_{tod} = LHV_{kuiva} * (1 - M) \quad (7.8)$$

mukaisesti. Yhtälössä LHV_{tod} on käytetty todellinen lämpöarvo, LHV_{kuiva} Koppejan et al. raportissa esitetty torrefiointikaasun kuivalämpöarvo ja M torrefiointireaktoriin tuodun raaka-aineen kosteuspitoisuus. Kaiken veden oletetaan siis siirtyvän torrefiointikaasuun ja vesihöyryn käyttäytyvän inertin aineen tavoin. Prosessin massa- ja energiatase määritetään tasapainottamalla kuivurin ja torrefioinnin lämmöntarve palamisesta saatavan energian kanssa muuttamalla raaka-ainevirrasta otettavan tukipolttoaineen määrää.

Kuivurin lämmöntarpeeksi valittiin 2,9 MJ/kg haihdutettua vettä, kun haettiin lisäpolttoainetarvetta rumpukuivuria hyödyntävälle prosessille, 11 MJ/kg viirakuivuria hyödyntävälle prosessille, jossa viirakuivuria ei ollut kytketty aluelämmitysjärjestelmään ja 0 MJ/kg tapauksille, joissa kuivuri on kytketty aluelämmitysjärjestelmään. Tällöin saatiin tulokseksi vain torrefiointireaktorin lämmöntarpeeseen perustuva kulutus ja viirakuivurin tukipolttoainetarve määritettiin erikseen samoin periaattein kuin puupellettituotannossa.

8 TUOTANTOPROSESSIVAIHTOEHDOT

Tässä kappaleessa esitellään tuotantoprosessivaihtoehdot, joilla mallinetaan eri tapoja järjestää biopolttoaineen tuotanto asiakasyrityksen alueella. Ne eroavat toisistaan muun muassa laitemitoitukseltaan ja siten investointi- ja käyttökustannuksiltaan. Prosessivaihtoehtojen valitsemisessa ja hiomisessa on käytetty aikaisemmissa kappaleissa esiteltyä kirjallisuustietoa, huomioitu tuotantoympäristön erityispiirteitä sekä pyydetty laitetarjoksia muutamilta yrityksiltä sekä tehty näiden kaikkien perusteella laskelmia esimerkiksi energialähteiden riittävydestä, prosessien lämmöntarpeesta sekä massa- ja energiata-seesta.

Eräs suurimpia epätarkkuutta tuovia tekijöitä on aluelämmitysjärjestelmä ja sen lämmöntuoton riittävyys 10 - 20 vuoden päähän. Aluelämmitysjärjestelmää hyödyntävissä vaihtoehdoissa on investoitava lisälämmöntuotantoon lämmön riittävyyden varmistamiseksi. Polttoainetarve voi kuitenkin olla merkittävästi pienempi. Tarvittavan lisälämmön määrä vaihtelee valittavan prosessin mutta myös alueen lämmöntarpeen ja –tuoton sekä mahdollisten toiminnan muutosten mukaan. Eräissä tuotantolinjavaihtoehdossa polttoainetta tuotetaan hyödyntämättä lainkaan aluelämmitysjärjestelmää, jolloin myös sen tuomat edut jäävät saamatta.

Nollavaihtoehtona toimintaa jatketaan kuten tähänkin asti. Kierrätyspuu ja risut myydään jatkojalostukseen uloskantohintaan toimintakulujen kattamiseksi, jolloin merkittävää tuloa ei saada. Toisaalta toiminta ei myöskään ole tappiollista. Muiden tuotantovaihtoehtojen kannattavuutta verrataan sekä nollavaihtoehtoon että toisiinsa.

8.1 VE 1.1 ja 1.2: Puumurske

Murskeen valmistusta käsitellään vaihtoehdoissa 1.1 ja 1.2. Niissä molemmat raaka-aineet, puujäte ja risut, murskataan ja saadut murskeet myydään voimalaitoksille. Vaihtoehdossa 1.1 murskaus toteutetaan alihankintana ja vaihtoehdossa 1.2 omalla murskaimella. Mobiilimurskain sopii sekä käyttökapasiteetiltaan että liikuteltavuudeltaan kiinteää murskainta paremmin tarkasteltavaan toimintaympäristöön.

Kierrätyspuumursketta ei kuivateta, vaan se myydään sellaisenaan voimalaitoksille, sillä sen lähtökosteus ei ole kovin korkea. Risut pyritään kuivattamaan kesän tai kesän ja talven yli ennen haketusta kosteuspitoisuuden alentamiseksi. Talven yli kuivattaessa risukasat kannattaa peittää lumelta ja haketus tai mursketus tehdä mahdollisimman lähellä syksyä. Myös kenttäkuivausta voidaan käyttää, mutta sitä ei huomioida tässä tehtävässä investointilaskelmassa.

Murskeen tuotannossa lähdettiin liikkelle siitä, että sitä tuotetaan vain arkipäivisin ja päiväsaikaan. Alhaisen jalostusasteen tuotteen tuotantokustannuksia on turha nostaa

yö- tai muilla lisillä. Lisäksi murskauksesta aiheutuu melua ja koska työ on pääosin ulkotyötä, se on helpointa tehdä päiväsaikaan. Myös lumi voi haitata murskausta, erityisesti raaka-aineen jäätyminen on haitallista, jolloin puiden siirto murskaimeen on lähinnä repimistä eikä nostamista (Rinne 2010). Murskaus olisi paras hoitaa lumettomina, mieluusti pakkasettomina kuukausina. Jos toiminta-ajaksi otetaan 6 kk vuodessa, 5 päivää viikossa ja 8 tuntia päivässä, vuosittaiseksi käyttöajaksi saadaan 960 tuntia.

Mursketusvaihtoehdossa on vain yksi tuotantolaitte, joten pitoaika määräytyy sen mukaan. Rinne (2010, s.46) käyttää kustannuslaskelmissaan mobiilihakkureille ja –murskaimille noin 8000 tunnin käyttöikä. Jos mobiilimurskainta käytettäisiin esitetyn 960 tunnin verran vuodessa, käyttöikä olisi vain kahdeksan vuotta. Toisaalta tällä vuosittaisella käyttöajalla minimikapasiteetti olisi suurelle mobiilimurskaimelle melko pieni tässä käsitellyillä raaka-ainemäärillä. Jos murskain on suurempi, niin tarvittava vuosittainen käyttöaika jää puoleen. Rinteen mukaan mobiilimurskainten käyttöikä pitenee kun niiden vuosittainen käyttöaika lyhenee, jolloin suuremman, kaksinkertaisen kapasiteetin omaavan murskaimen käyttöikäksi saataisiin noin 16 vuotta. Tällöin pitoaika on myös lähempänä muissa vaihtoehdoissa käytettyä.

8.2 VE 2: Puupelletti

Pelletin tuotanto voidaan järjestää ja mitoittaa monella tapaa. Kappaleessa 4.2 esiteltyä tuotantoprosessia varioitiin muutamaksi erilaiseksi vaihtoehdoksi. Keskeisiä muuttujia prosessin varioinnissa olivat kuivurin tyyppi, käyttöaika ja kapasiteetin mitoitus sekä aluelämmitysjärjestelmän hyödyntäminen. Prosessia tutkittiin muutaman idealisoidun ja melko yksinkertaisen tapauksen kautta (VE 2.1, 2.2, 2.3) sekä laadittiin muutama yksityiskohtaisempi tuotantoprosessi, jossa otetaan paremmin tuotantoalueen aluelämmitysjärjestelmä huomioon (2.4, 2.5, 2.6). Lähtökohtana jokaisen tuotantoprosessin mitoituksessa oli, että vuosittainen raaka-ainemäärä saadaan jalostettua saman vuoden aikana. Kaikissa tuotantoprosessivaihtoehdoissa on oletettu, että tuotantolinja on käytössä viiteenä päivänä viikossa 24 tuntia vuorokaudessa eli töitä tehdään maanantaista perjantaihin kolmivuorossa. Pellettituotantolaitoksen pitoaikana käytettiin 20 vuotta. Sekä käyttötuntien valinta sekä pitoaika perustuvat Ihalaisen ja Sikasen (2010) raporttiin pelletin tuotannosta.

Viirakuivurit on mitoitettu laitetarjouksiin perustuen ja konservatiivisesti kosteiman raaka-aineen kosteuden mukaan 50 % lähtökosteuteen. Lämmöntarve riippuu ennen kaikkea raaka-aineen kosteudesta. Koska kierrätyspuun kosteus on tyyppillisesti noin 20 %, sitä kuivattaessa lämmöntarve tulee olemaan mitoitettua matalampi. Tämä tuo laskelmiin pientä ylimitoitusta lämmöntarpeen osalta.

Taulukossa 8.1 on esitetty tiivistelmä tässä kappaleessa esiteltävistä tuotantoprosessivaihtoehdoista. Taulukossa ja alakappaleissa ALJ on lyhenne aluelämmitysjärjestelmästä.

Taulukko 8.1. *Yhteenvedo pellettituotannon prosessivaihtoehdoista.*

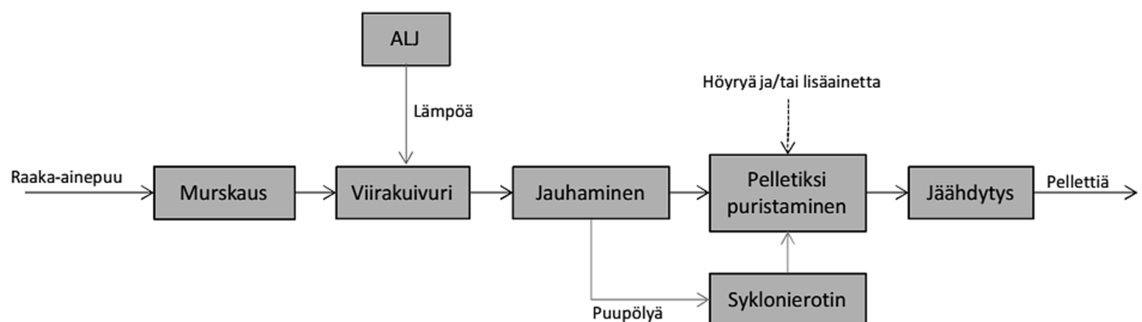
Tunnus	ALJ hyödyntäminen	Kuivurityyppi	Kuivurin käyttöaika	Tuotantolinjan käyttöaika
VE 2.1	Rajatta	Viira	11 kk/a	11 kk/a
VE 2.2	Rajatta	Viira	6 kk/a	6 kk/a
VE 2.3	Ei	Rumpu	11 kk/a	11 kk/a
VE 2.4	Kyllä	Viira	11 kk/a	11 kk/a
VE 2.5	Kyllä	Viira	6 kk/a	6 kk/a
VE 2.6	Kyllä	Viira	6 kk/a	11 kk/a

Taulukossa on luokiteltu tarkasteltavat tuotantovaihtoehdot aluelämmitysjärjestelmän hyödyntämisen, kuivurin tyyppin sekä laitteiden vuosittaisten käyttöaikojen mukaan. Tuotantovaihtoehdot on kuvattu tarkemmin seuraavissa alakappaleissa.

8.2.1 VE 2.1 ja 2.2: Rajattomasti lämpöä

Vaihtoehdon 2.1 ja 2.2 lähtöoletus oli, että aluelämmitysjärjestelmän lämpöä voidaan hyödyntää rajatta ympäri vuoden. Lämmön riittävyys järjestelmässä ratkaistaan tässä tarkasteltavan skenaarion ulkopuolella ja mahdolliseen lämpövajeeseen ei tässä oteta kantaa. Vaihtoehto edustaa tilannetta, jossa vastuuta eikä kuluja aluelämmitysjärjestelmästä ole kohdennettu pelletintuotantoon.

Kuivurina on molemmissa vaihtoehdoissa viirakuivuri, jonka lämmöntarve kesällä on pienempi kuin talvella. Tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 8.1.



Kuva 8.1. Puupelletin valmistus aluelämmitysjärjestelmään kytketyllä viirakuivurilla.

Kuten kuvasta nähdään, polttoainetuotannosta ei oteta lainkaan lisäpolttoainetta lämmöntuotantoon. Kuivurin kaikki lämpö saadaan aluelämmitysjärjestelmästä.

Vaihtoehdossa 2.1 laitteiden vuosittainen käyttöaika on 11 kk vuodessa, jolloin laitteiden mitoitus on pienempi mutta lämmöntarve aluelämmitysjärjestelmässä kasvaa talvisin melko korkeaksi. Vaihtoehdossa 2.2 on laitteissa on suurempi mitoitus ja sekä kuivuria että tuotantolinjaa käytetään vain 6 kk vuodesta painottuen kesäaikaan, jolloin kuivurin sekä alueen muu lämmönkulutus on alhaisempaa. Laitteiden suurempi mitoitus nostaa kuitenkin merkittävästi investointikustannuksia. Myös työvoiman palkkaaminen vain osaksi vuotta voi olla ongelmallista.

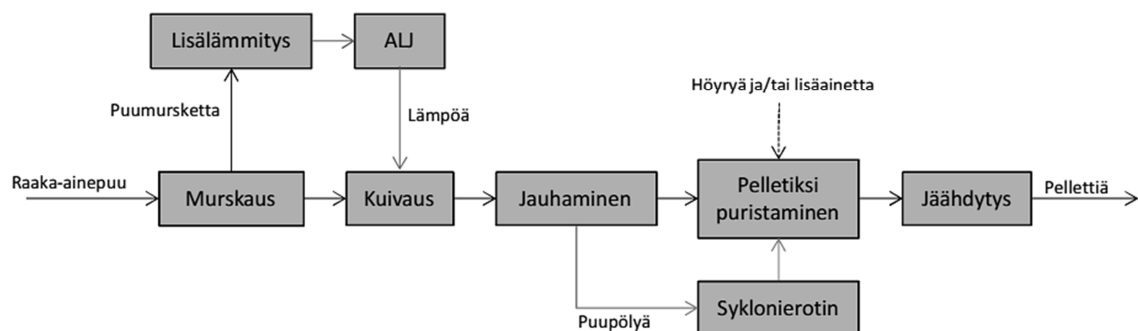
8.2.2 VE 2.3: Rumpukuivuri

Vaihtoehdossa 2.3 mallinetaan pelletintuotantolinjastoa, joka ei ole lainkaan riippuvainen aluelämmitysjärjestelmästä. Kuivurin lämpöenergia tuotetaan erillisellä, sitä varten hankitulla lämmitysyksiköllä. Kuivurina on suoralla lämmityksellä toimiva savukaasulämmitteinen rumpukuivuri sen viirakuivuria matalamman lämmöntarpeen vuoksi.

Rumpukuivurista ei pyydetty lainkaan laitetarjoustta joten sen lämmöntarve arvioitiin kirjallisuuslähteiden perusteella. Lähtökohtana käytettiin Koppejan et al. (2012) raportissa esitettyä arviota, että kuivurin lämmöntarve olisi 2,9 MJ jokaista haihdutettua vesikiloa kohden. Konservatiivisen arvion muodostamiseksi kaiken raaka-aineen oletettiin olevan kosteudeltaan 50 % ja raaka-aineen loppukosteuden kuivurin jälkeen noin 10 %. Saatu lämpöteho pyöristettiin hieman ylöspäin seuraavaan tasalukuun. Saatu lämpöteho on samaa luokkaa mutta hieman alhaisempi kuin laitetarjousten pienen partikkeliin viirakuivurissa. Tämän oletettiin olevan työn tarpeita varten tarpeeksi hyvä arvio, sillä se tuki myös Nummelin et al. (2010) raportin kuvauksia eri kuivurien lämmöntarpeesta. Rumpukuivurin kesän ja talven lämmöntarpeiden oletettiin olevan yhtä suuret, sillä korkeammilla kuivauslämpötiloilla ulkoilman lämpötila vaikuttaa suhteellisesti vähemmän.

8.2.3 VE2.4, 2.5 ja 2.6: Rajatusti lämpöä

Vaihtoehdoissa 2.4, 2.5 ja 2.6 tuotantolinjassa käytetään viirakuivuria, joka on kytketty aluelämmitysjärjestelmään mutta järjestelmän rajallinen lämmöntuotantokapasiteetti on huomioitu. Lisälämpöä tuottavaan laitokseen investoidaan heti pelletintuotantolinjan hankinnan yhteydessä. Polttoaineena käytetään pelletintuotannon raaka-ainetta, puumursketta. Tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 8.2.



Kuva 8.2. Pelletintuotantoprosessi lisälämmityksellä, kun kuivurin lämmönlähde on aluelämmitysjärjestelmä (ALJ).

Lisälämmitys mitoitetaan tässä vain pelletintuotantoa varten vaikka todellisuudessa investoinnissa kannattaa huomioida myös muut aluelämmitysjärjestelmään kytketyt lämpökuormat. Mitoitusvalinnalla kohdistetaan pelletin tuotantokustannuksiin vain sen lisälämmön tuottamisen kustannukset ja pyritään sulkemaan pois alueen muiden toimintojen lämmityskustannukset.

Vaihtoehdossa 2.4 on vastaava tuotantolinja kuin vaihtoehdossa 2.1. Pieni viirakuivuri ja tuotantolinja on käytössä 11 kk vuodessa. Viirakuivurin lämmöntarve kesäisin on hiukan pienempi kuin talvisin.

Vaihtoehdossa 2.5 on suuri viirakuivuri ja sekä kuivuri että tuotantolinja ovat toiminnassa vain noin 6 kk vuodesta painottuen kesäaikaan. Laitteet joudutaan mitoittamaan lähes kaksinkertaisiksi vaihtoehtoon 2.4 verrattuna, mikä nostaa merkittävästi investointikustannuksia. Lisäpolttoainetarve lämmöntuotannossa on kuitenkin pienempi. Lisälämmityslaitokseen investoidaan heti samana vuonna kun pelletintuotantolinjaankin. Laskelmien mukaan aluelämmitysjärjestelmän lämpömäärät riittäisivät kolmen vuoden ajan ilman lisälämmitystäkin, mutta koska lämpötehon kannalta aivan samaa oletusta ei voida tehdä, on parempi, että lisälämmitysmahdollisuus on olemassa heti alusta alkaen. Ensimmäisenä vuonna investoidaan suurehkoon lämmitysyksikköön, joka riittää tuotannon lämmöntarpeisiin 10 vuodeksi. 10 vuoden jälkeen tehdään lisäinvestointi lämmityslaitoksen laajentamiseksi ja lisätään huippulämpötehoon noin 40 % lisää. Lisäinvestoinnilla lämmityslaitoksen teho riittää pellettituotannon koko pitoajaksi.

Vaihtoehdossa 2.6 on pyritty yhdistämään vaihtoehtojen 2.4 ja 2.5 parhaat puolet. Kuivuriksi valitaan suuri viirakuivuri, joka saa lämpönsä aluelämmitysjärjestelmästä. Suuri kuivuri on käytössä 6 kk vuodesta mutta tuotantolinja mitoitetaan pienemmälle raaka-ainevirralle ja sitä käytetään 11 kk vuodesta. Tällöin kuivurin lämmöntarve ajoittuu voimakkaammin kesäaikaan ja lisäpolttoainetarve on matalampi kuin jos kuivuria käytettäisiin myös talvella. Toisaalta pelletintuotantokoneet voidaan mitoittaa pienemmiksi, mikä laskee niiden investointikustannuksia. Raaka-aineen kuivaus vain kesällä vaatii kuitenkin suuret varastot kuivatulle puumurskeelle, mikä toisaalta nostaa investointikustannusta hieman. Lisälämmitys on mitoitettu kuten vaihtoehdossa 2.5, jossa investoidaan 10. käyttövuonna lisälämpölaitoksen laajennukseen.

8.3 VE3: Paahtopelletti

Vaihtoehdossa 3 raaka-aineista valmistetaan paahtopellettiä. Prosessi on laajennus pelletöintiprosessiin ja kirjallisuudessa onkin teorisoitu tapausta, jossa olemassa oleva pellettitehdas laajennettaisiin paahtopellettitehtaaksi (Bagramov 2010). Taulukossa on luokiteltu tarkasteltavat tuotantovaihtoehdot aluelämmitysjärjestelmän hyödyntämisen, kuivurin tyyppin sekä laitteiden vuosittaisten käyttöaikojen mukaan. Tuotantovaihtoehdot on kuvattu tarkemmin seuraavissa alakappaleissa.

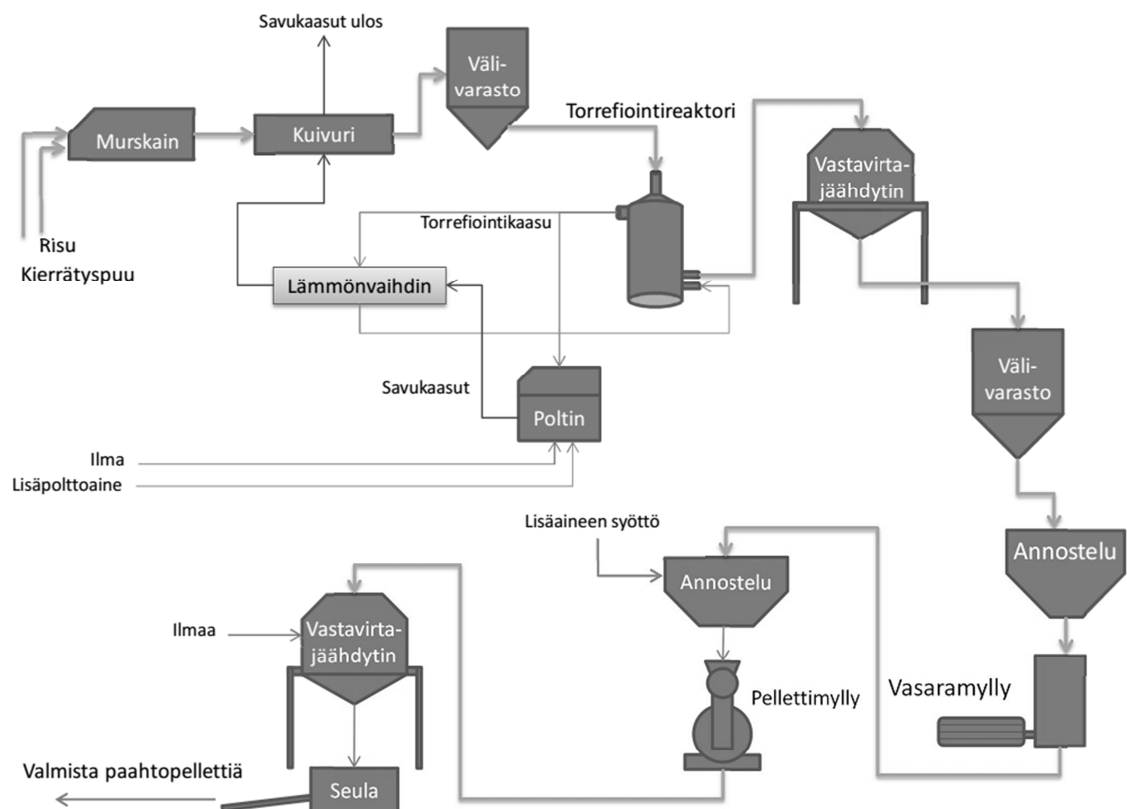
Taulukko 8.2. Paahtopelletin tuotannon prosessivaihtoehdot.

Tunnus	ALJ integrointi kuivuriin	Kuivuryyppi	Tuotannon käyttöaika
VE 3.1	Ei	Rumpu	11 kk/a
VE 3.2	Kyllä	Viira	11 kk/a
VE 3.3	Kyllä	Viira	11 kk/a
VE 3.4	Kyllä	Viira	6 kk/a
VE 3.5	Kyllä	Viira	6 kk/a
VE 3.6	Kyllä	Viira	11 kk/a, kuivuri 6 kk/a

Paahtopellettitehtaan pitoaikana käytettiin samaa kuin puupellettitehtaalle eli 20 vuotta. Kirjallisuudessa esitettiin paahtopellettitehtaalle pitoajaksi vaihtelevasti 15 tai 20 vuotta. Tässä tehdyllä valinnalla haluttiin saada eri tuotantovaihtoehdot paremmin vertailukelpoisiksi keskenään. Valintaa puoltaa myös se, että suuri määrä tuotantolaitteista on samoja paahto- ja puupellettituotannossa.

8.3.1 VE 3.1: Rumpukuivuri

Ensimmäisessä tarkasteltavassa tuotantovaihtoehdossa kuivaus toteutetaan savukaasu-kuivurilla. Torrefiointiin ja kuivaukseen saadaan lämpö polttamalla torrefiointikaasua ja puumursketta. Tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 8.3. Prosessikuvasta on yksinkertaisuuden vuoksi jätetty syklonit ja hienoaineksen keräys kuvaamatta.



Kuva 8.3. Tuotantovaihtoehdon 3.1. toteutus, jossa hyödynnetään rumpukuivuria.

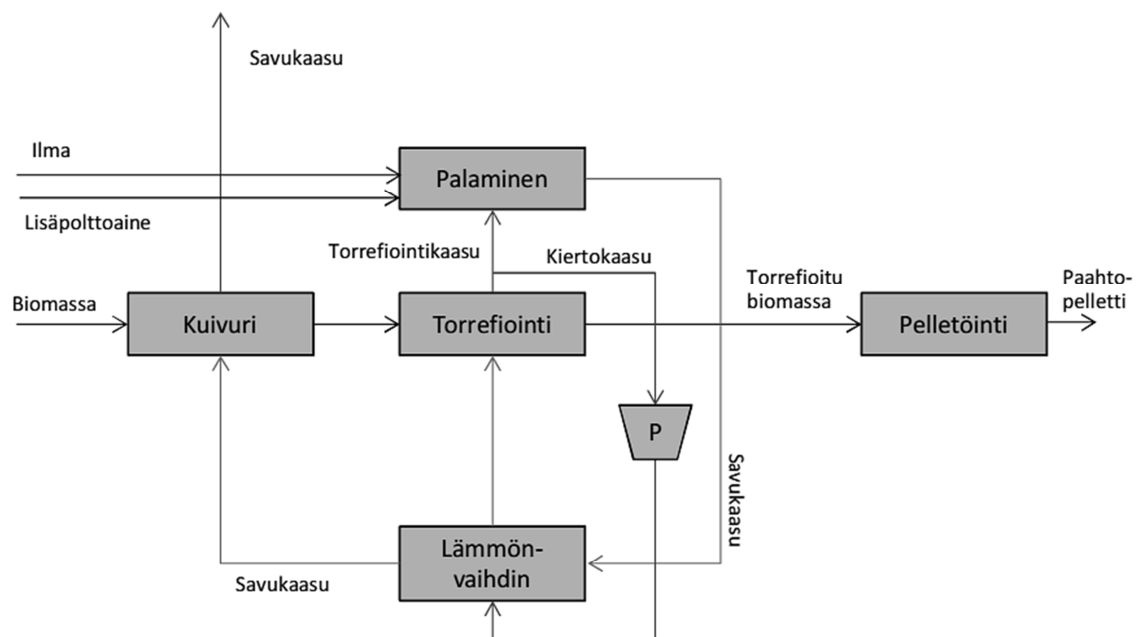
Torrefiointireaktoriin tuodaan lämpö kierrättämällä osa reaktorista tulevasta torrefiointikaasusta lämmönvaihtimessa ja ohjaamalla se sitten takaisin reaktoriin. Suurin osa torrefiointikaasusta viedään poltettavaksi. Polton savukaasuilla lämmitetään ensin torrefiointireaktoriin menevä kiertokaasu ja sen jälkeen savukaasut ohjataan kuivuriin. Kuivurista lähtevä savukaasu on mahdollisesti puhdistettava tai ohjattava poltintyöskön läpi ennen ulosvientiä päästöjen alentamiseksi.

Prosessissa vasaramyllyn tarvitsema energia on pienempi ja pellettimyllyn suurempi kuin lämpökäsittelmätöntä puuta pelletöidessä. Eräät lähteet (Koppejan et al. 2012, Bagramov 2010) jättävät jauhinlaitteet jopa kokonaan pois. Näiden mukaan hauras torrefioitu puumassa hajoaa tarpeeksi tehokkaasti pelkässä pellettimyllyssä. Pelletöinnin kohonnut energiantarve johtuu muun muassa materiaalin kuivuudesta ja hauraudesta. Erityisesti pellettimatriisia on lämmitettävä tavallista kuumemmaksi, jotta pelletöinti onnistuu. Muiden laitteiden sähkönkulutuksessa ei ole eroa.

8.3.2 VE 3.2 ja 3.3: Viirakuivuri

Vaihtoehdoissa 3.2 ja 3.3 raaka-aineen kuivaus tehdään aluelämmitysjärjestelmään yhdistetyllä viirakuivurilla. Molemmissa vaihtoehdoissa vuosittainen käyttöaika on 11 kk vuodessa. Vaihtoehdot eroavat toisistaan lisälämmityslaitoksen kytkentöjen osalta.

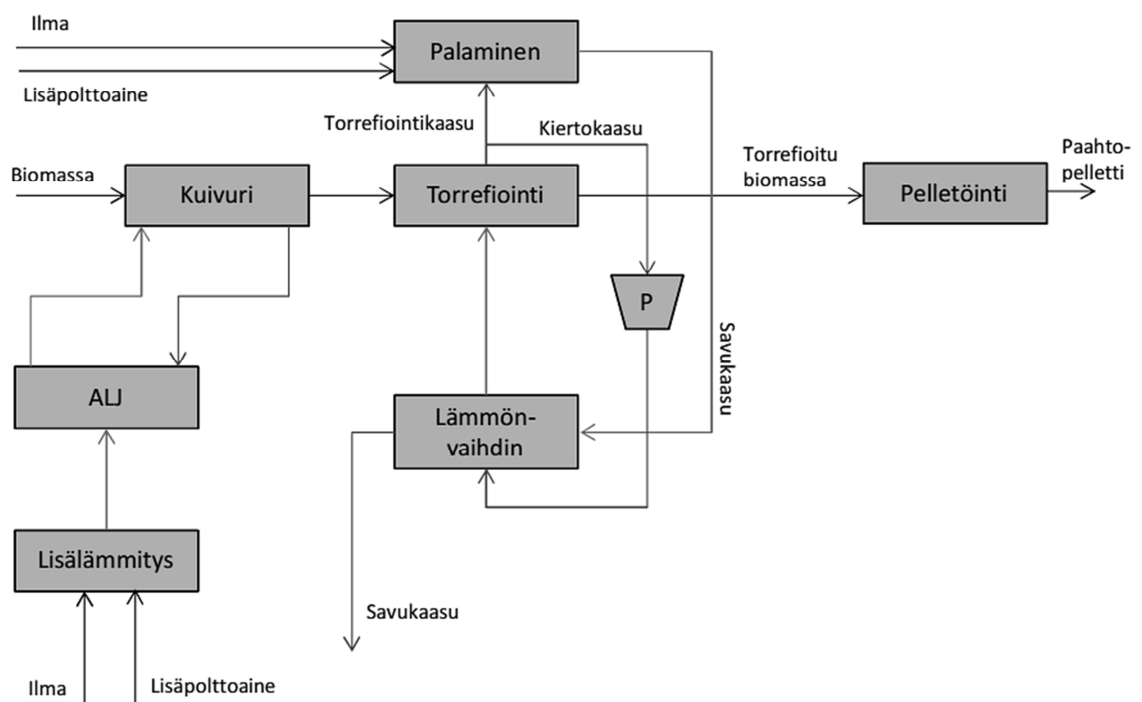
Vaihtoehdon 3.2 prosessi on esitetty kuvassa 8.2. Siinä torrefiointikaasun poltto ja lisälämmön tuottaminen aluelämmitysjärjestelmään ja viirakuivurille on järjestetty erillään toisistaan.



Kuva 8.4. Vaihtoehto 3.2, viirakuivuria hyödyntävä paahtopelletin valmistusprosessi, jossa erillinen lämmöntuotanto aluelämmitysjärjestelmän tukemiseen ja torrefiointireaktorin lämmittämiseen.

Vaihtoehdossa 3.3 on yhdistetty torrefiointikaasun polttoyksikkö ja aluelämmitys-järjestelmää tukeva lisälämmitysyksikkö. Tämä alentaa investointikustannusta mutta voi vaikeuttaa prosessin ja lämmitysjärjestelmän säätöä merkittävästikin. Prosessi on esitetty kuvassa 8.5.

Kuvaa 8.4 ja 8.5 vertailemalla nähdään selvästi prosessin yksinkertaistuminen. Toisaalta säätö monimutkaistuu, kun lisäpolttoaineen tarpeeseen vaikuttaa useampi muuttuja, vain kuivurin lämmöntarpeen tai vain torrefiointin lämmöntarpeen sijaan on huomioitava molemmat muuttujat samaan aikaan. Lisäksi aluelämmitysjärjestelmän muu lämpökuorma ja sen vaihtelut vaikuttavat säätöön. Varsinainen instrumentoinnin tarve ei välttämättä muutu.



Kuva 8.5. Vaihtoehdon 3.3 viirakuivuria hyödyntävä paahtopelletin valmistusprosessi, jossa torrefiointikaasun poltto ja aluelämmitysjärjestelmän lisälämmöntuotto on yhdistetty.

Yhdistetty lämmitysüksikkö takaa sen, että torrefiointikaasun energiaa ei mene hukkaan. Torrefiointikaasussa voi joillain prosessiparametreilla olla enemmän energiaa kuin torrefiointireaktion ylläpitämiseen tarvitaan. Näin voi olla useinkin, sillä kirjallisuudessa (muun muassa Bergman 2005, Bergman et al. 2005, Koppejan et al. 2011) esitetyissä prosesseissa sekä torrefiointin että kuivauksen lähes kaikki lämmöntarve katetaan torrefiointikaasua polttamalla. Toisaalta käytetty torrefiointiaste ja raaka-aineen kosteus torrefiointireaktoriin tullessa vaikuttavat torrefiointikaasun energiapitoisuuteen merkittävästi. Alhaisilla torrefiointiasteilla torrefiointikaasu sisältää vähemmän energiaa ja sitä myöten sitä menee vähemmän hukkaan vaihtoehtoa 3.2 vastaavassa järjestelyssä. Toisaalta, kun torrefiointikaasun poltto on yhdistetty

aluelämmitysjärjestelmän lisälämmön tuottoon, torrefiointikaasun energia tulee varmemmin hyödynnettyä.

8.3.3 VE 3.4 ja 3.5: Tuotanto vain kesällä

Tuotantovaihtoehtoissa 3.4 ja 3.5 tuotanto painottuu täysin kesäaikaan. 11 kuukauden sijaan käyttöaika on vain 6 kk vuodessa. Tuotantoprosessit vastaavat toteutukseltaan tuotantovaihtoehtoja 3.2 ja 3.3 mutta laitteiden kapasiteetti on huomattavasti suurempi.

Tuotantoprosessin rajaaminen vain kesäaikaan tuo hyötyjä aluelämmitysjärjestelmän hyödyntämisen osalta. Kesäisin järjestelmässä on vuosittain runsaasti ylimääräistä lämpöä ja lisälämmityksen tarve vähenee. Toisaalta investointikustannukset nousevat voimakkaasti. Rumpukuivuria hyödyntävässä vaihtoehdossa samanlaista etua tuotannon painottamisesta kesään ei saavuteta ja siksi siitä ei käsitellä vastaavaa variaatiota.

8.3.4 VE 3.6: Suuri viirakuivuri, pieni tuotantolinja

Tuotantovaihtoehdossa 3.6 pyritään yhdistämään käsiteltyjen viirakuivurillisten vaihtoehtojen parhaat puolet. Raaka-aine kuivataan kesäaikaan painottuen suurella viirakuivurilla. Kuivurin käyttöajaksi arvioidaan 6 kuukautta vuodesta ja se mitoitetaan noin kaksinkertaiseksi tuotantovaihtoehtojen 3.2 ja 3.3 viirakuivureihin verrattuna. Tuotanto toteutetaan ympärivuotisesti noin 11 kk vuodessa –käyttöajalla. Lisälämmitys toteutetaan torrefiointiyksikköön kuuluvassa polttimessa yhdessä torrefiointikaasun polton kanssa vaihtoehdon 3.3 mukaisesti.

Kuivausprosessin rajaaminen vain kesäaikaan tuo hyötyjä aluelämmitysjärjestelmän hyödyntämisen osalta. Kesäisin järjestelmässä on vuosittain runsaasti ylimääräistä lämpöä ja lisälämmityksen tarve vähenee. Tuotantoprosessin mitoittaminen pidemmälle käyttöajalle laskee merkittävästi investointikustannuksia erityisesti torrefiointiyksikön pienemmän mitoituksen vuoksi. Siilot mitoitetaan kolminkertaisiksi sillä tuotannossa tarvitaan huomattavasti suurempia välivarastoja.

9 INVESTOINTILASKELMIEN LÄHTÖTIEDOT

9.1 Tuotantomäärät

Polttoaineen tuotantomäärien arvioinnissa käytettiin lähtötietoina raaka-aineiden vuotuisia hankintamääriä. Yrityssalaisuuden vuoksi niitä ei kuitenkaan esitetä tässä. Taulukossa 9.1 on esitetty mielivaltaiset raaka-ainemäärät, joita tässä käytetään työlukuina esimerkin omaisesti. Kierrätyspuun ja risujen keskinäinen suhde vastaa työssä käytettyjä määriä. Lisäksi on esitetty niiden kosteuspitoisuudet ja keskimääräinen massa ja kuiva-aineen massa.

Taulukku 9.1. Esimerkkinä käytetyt työluvut tuotantomäärän laskemiseen.

Raaka-aine	Hankintamäärä (t/a)	Arvioitu kosteus	Kuiva-aineen massa (t/a)
Kierrätyspuu	36607	20 %	29286
Risut	13393	50 %	6696
Yhteensä	50000	38 % (keskiarvo)	35982

Lähtökohtana laskelmille olivat kosteusprosentti ja sen avulla laskettu kuiva-ainemassa. Kuiva-ainehäviöksi arvioitiin murskaamisessa ja pelletintuotannossa 1 % ja sen oletettiin koostuvan esimerkiksi raaka-aineen tippumisesta kuljettimilta ja hieno-aineksen pölyämisestä ja kulkeutumisesta ilmavirtojen mukana. Torrefioinnissa käytettiin 20 % kuiva-ainehäviötä (torrefiointiaste), joka on keskiarvo kirjallisuudessa esitetystä 10 - 30 % kuiva-ainehäviöstä prosessissa. Prosessin massasaanto laskettiin kullekin lopputuotteelle, murskeelle, puupelletille ja paahtopelletille yhtälön (9.1) mukaan.

$$m_{\text{lopputuote}} = \frac{m_{\text{ka}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{ka}}}{100}\right)}{1 - \frac{M}{100}} m_{\text{lopputuote}} = \frac{m_{\text{ka}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{ka}}}{100}\right)}{1 - \frac{M}{100}} \quad (9.1)$$

Yhtälössä $m_{\text{lopputuote}}$ tarkoittaa saadun lopputuotteen massaa, m_{ka} on raaka-aineen kuiva-ainemassa, h_{ka} on prosessin kuiva-ainehäviö prosentteina ja M on tuotteen loppukosteus massaprosentteina.

Raaka-aineen kuiva-ainemassana käytettiin murskeelle taulukossa 9.1 esitettyjä kierrätyspuun ja risujen kuiva-ainemassoja. Puu- ja paahtopelletin ensimmäinen prosessivaihe on raaka-aineen murskaus ja sen vuoksi niille on käytetty raaka-aineen kuiva-ainemassana valmiin murskeen kuiva-ainemassaa, jossa tulee huomioitua ensimmäisen prosessivaiheen hävikki, jonka suuruudeksi arvioitiin 1 %. Loppukosteudeksi arvioitiin puupelletille 7 % ja paahtopelletille 1 % kirjallisuuslähteisiin perustuen taulukon 6.1 mukaisesti. Risumurskeelle loppukosteutena käytettiin tyypillistä kosteutta syksyllä

puolen vuoden kasakuivauksen jälkeen mitattuna. Kierrätyspuumurskeelle oletettiin alkukosteus. Kullekin valmistusprosessille laskettiin massasaanto sekä hyötysuhde, joka laskettiin jakamalla yksinkertaisesti saadun lopputuotteen massa käytetyn raaka-aineen massalla. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 9.2.

Taulukko 9.2. Polttoaineiden tuotantoprosessien tuotantomääriä massana ilmoitettuna ja valmistusprosessien massaperusteinen hyötysuhde.

Polttoaine	Loppukosteus	Valmista polttoainetta (t)					Massasaanto
		Kierrätyspuusta		Risusta		Yhteensä	
		Kuivana	Kosteana	Kuivana	Kosteana	Kosteana	
Murske	20 % ja 35 %	28 993	36 241	6 629	10 199	46 440	93 %
Puupelletti	7 %	28 703	30 863	6 563	7 057	37 921	76 %
Paahtopelletti	1 %	23 194	23 429	5 304	5 357	28 786	58 %

50 000 tonnista kosteaa puuraaka-ainetta saadaan siis näillä tiedoilla ja oletuksilla 36 241 tonnia puumursketta, 30 863 tonnia puupellettiä tai 23 429 tonnia paahtopellettiä. Matala massahyötysuhde puu- ja paahtopellettien valmistuksessa selittyy kosteuspiitoisuuden voimakkaalla laskulla. Toisaalta massaan pohjautuvat hyötysuhteet ovat hieinan korkeammat kuin esimerkiksi kokopuuta tai metsähaketta käytettäessä, sillä kierrätyspuu on huomattavasti tuorepuuta kuivempaa.

Polttoaine myydään usein MWh-perusteisesti ja myös tuotantolaitosten ja laitteiden kapasiteeteista puhutaan joskus MWh-yksiköissä. Tuotettujen polttoaineiden määrät laskettiin siksi myös energiana kertomalla massatuotot kunkin polttoaineen kostealla tehollisella lämpöarvolla. Puu- ja paahtopelletille on käytetty suoraan kirjallisuudessa ilmoitettua kostean polttoaineen tehollista lämpöarvoa, 16,2 MJ/kg ja 21,6 MJ/kg, kuten taulukkoon 6.1 on merkitty. Murskeelle ja puupelletille lämpöarvo on laskettu standardin SFS-EN 15296 laskukaavan mukaisesti, joka on esitetty yhtälössä (9.2).

$$Q_m = Q_d * \frac{(100-M)}{100} - 24,43 \frac{J}{kg} * M \quad (9.2)$$

Yhtälössä Q_m on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, Q_d kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo ja M polttoaineen kosteusprosentti. Polttoaineiden kuivana lämpöarvona käytettiin kierrätyspuumurskeelle 18,7 MJ/kg (Alakangas & Wiik 2008) ja risumurskeelle standardissa SFS-EN 14961-1 esitettyä tyypillistä arvoa hakkuutähteille, keskiarvoa havupuun ja lehtipuun arvosta, joka on 18,9 MJ/kg. Taulukossa 9.3 on esitetty taulukkoa 9.2 vastaavat tiedot energiaperusteisesti.

Taulukko 9.3. Polttoaineiden tuotantomääriä energiana ilmoitettuna.

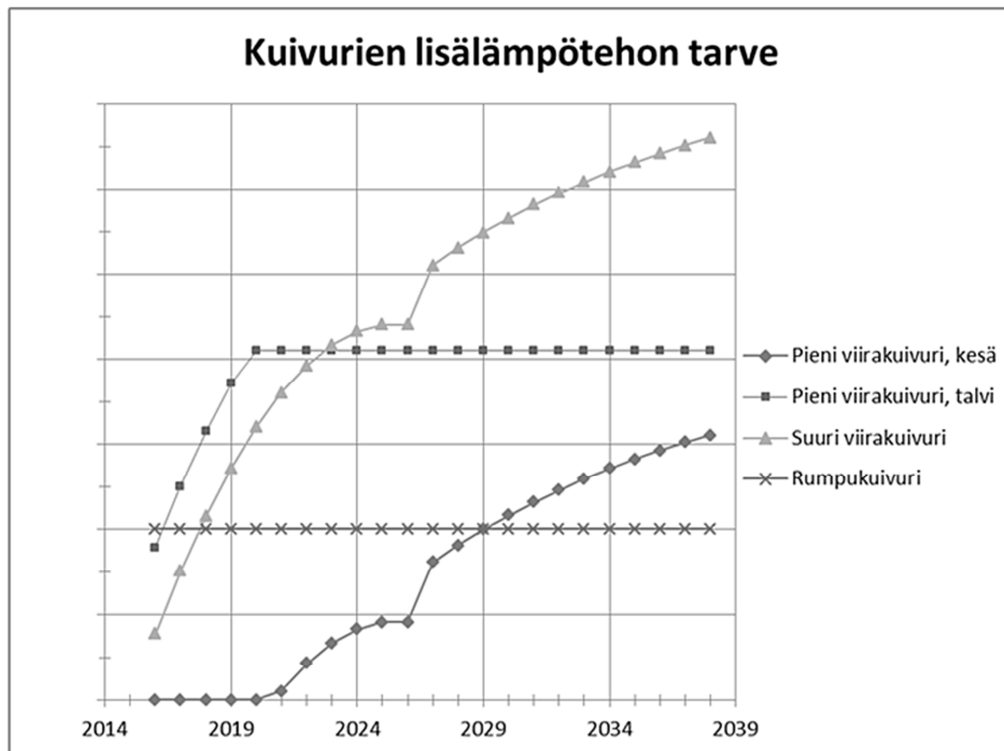
Polttoaine	Loppukosteus (%)	Valmista polttoainetta (MWh)		
		Kierrätyspuusta	Risusta	Yhteensä
Murske	20 ja 35	150 110	34 562	151 905
Puupelletti	7	138 885	31 757	170 642
Paahtopelletti	1	140 571	32 143	172 714

Taulukosta nähdään, että tuotettu polttoainemäärä on polttoainetyypistä riippuen noin 151 – 172 GWh. Määrä vastaa noin 3 % Suomessa puupolttoaineilla vuonna 2012 tuotetusta sähköstä ja noin 2 % puupolttoaineilla (ei metsäteollisuuden jäteliemiä) tuotetusta kaukolämmöstä (Sähkön ja lämmön tuotanto 2012).

9.2 Lisälämmitys

9.2.1 Mitoitus

Laskelmissa oletettiin, että aluelämmitysjärjestelmän lämpö käytetään ensisijaisesti nykyisen lämpökuorman lämmittämiseen ja siitä ylijäävä osuus voidaan hyödyntää puu- tai paahtopelletin tuotannon kuivurin lämmönlähteenä. Käytettävissä oleva lämpöteho ei kuitenkaan yksin riitä viirakuivurien lämmönlähteeksi vaan niiden yhteydessä on rakennettava myös lisälämmityslaitos. Kuvassa 9.1 on esitetty eri kuivurien lisälämpötehon tarve puu- tai paahtopellettitehtaan pitoaikana. Tarkkoja tehoja ei ole yrityssalaisuuden vuoksi esitetty.



Kuva 9.1. Kuivurien tarvitsema lisälämpöteho tarkasteluvälillä.

Rumpukuivuri ei hyödynnä lainkaan aluelämmitysjärjestelmää, jonka vuoksi sen tarvitsema lämpöteho on vakio. Rumpukuivuria käyttävässä tuotantovaihtoehdoissa hankitaan ensimmäisenä vuonna sopiva lisälämmityslaitos, joka mitoitetaan varmuuden vuoksi noin 40 % suuremmalle lämpöteholle. Suuremmalla mitoituksella varmistetaan, että lämpöä on mahdollista tuottaa tarpeeksi kylmimpinäkin aikoina ja vaikka lämpöhäviöt osoittautuisivat suuremmiksi kuin on arvioitu.

Pienen viirakuivurin tarvitsema teho on jaettu kuvassa kesä- ja talvitehoon. Kuivurin nimellisteho on kesällä noin 15 % pienempi kuin talvella. Talvitehon osalta aluelämmitysjärjestelmän tarjoama lämpö loppuu hyvin pian, jo vuonna 2020. Pientä viirakuivuria käyttävissä tuotantovaihtoehdoissa lisälämmityslaitos hankitaan samaan aikaan kuin muutkin tuotannontekijät sillä lisälämpötehoa tarvitaan jo ensimmäisenä talvena. Lisälämmityslaitoksen huipputeho valitaan 22 % kuivurin talvitehoa suuremmaksi ja se riittää koko puu- tai paahtopellettituotannon pitoajaksi.

Suurelle viirakuivurille on kuvassa 9.1 määritetty vain kesäteho, sillä sitä ei oleteta käytettävän lainkaan talviaikaan. Suurta viirakuivuria käyttävissä vaihtoehdoissa investoidaan myös heti ensimmäisenä vuonna lisälämmitykseen, sillä jo ensimmäisenä vuonna tarvitaan hieman lisälämpöä tuotantoon. Lisälämmöntarpeessa on vuonna 2025 paikkeilla pieni tasanne, jonka jälkeen lisälämpötehon tarve pomppaa korkeammalle. Hypäys johtuu aluelämmitysjärjestelmän lämpökuorman muutoksesta.

Käytännöllisintä on mitoittaa suurta viirakuivuria hyödyntäviin vaihtoehtoihin tuotannon alkuun reilun kokoinen lisälämmityslaitos, jota ei kuitenkaan mitoiteta pitoajan lopun huipputehon suhteen. Silloin laitoksen säädettävyyden on parempi eikä ensimmäisinä vuosina jouduta ajamaan kovin pienillä osatehoilla. Hyvin pienillä osatehoilla ajaminen huonontaa laitoksen hyötysuhdetta. Tässä on valittu suuren viirakuivurien vaihtoehtoihin aluksi lisälämmityslaitos, jonka teho on noin 70 % suuren viirakuivurin tehosta ja se riittää vuoteen 2026 asti eli ensimmäiset 10 vuotta. Sen jälkeen investoidaan pieneen laajennukseen, jolla lisälämmityksen huipputehoa nostetaan 30 %, jolloin lisälämmityksen teho on lähes sama, kuin suuren viirakuivurin. Laajennuksen myötä käytettävissä oleva lämpöteho riittää pitoajan loppuun.

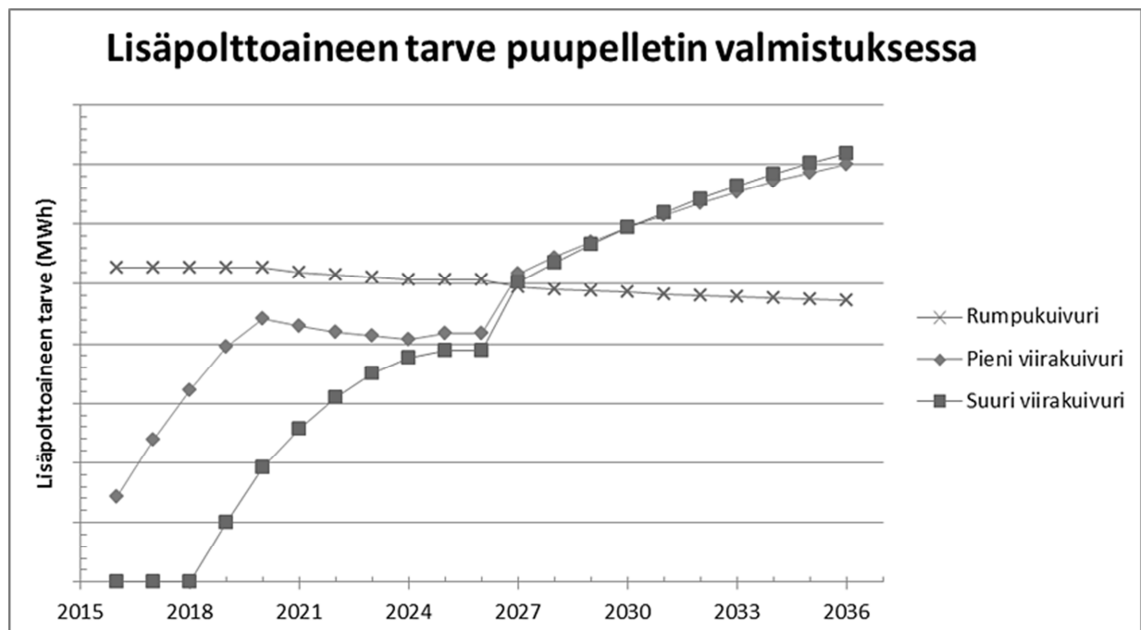
9.2.2 Syöttötariffit ja lämpöpreemiot

Syöttötariffit ja lämpöpreemiot ovat tietyt ehdot täyttävälle voimalaitoksille maksettavia sähkön- ja lämmöntuotantotukia. Niitä voidaan lain 1396/2010 nojalla maksaa voimalaitoksille, jotka tuottavat sähköä tai sähköä- ja lämpöä metsähakkeella tai puupolttoaineella. Laissa metsähakkeella tarkoitetaan polttohaketta tai –murskettä, jotka valmistetaan suoraan metsästä saatavasta puusta. Puupolttoaineella tarkoitetaan metsähaketta ja teollisuuden sivutuotepuuta, joka syntyy metsäteollisuuden puunjalostusprosessin sivu- tai jätetuotteena syntyvästä puuaineksesta. (L 30.12.2010/1396) Kierrätyspuu ei kuulu näiden raaka-aineiden määritelmään ja siitä valmistettu polttoaine ei siis kuulu tuotantotuen piiriin. Myöskään jalostetut puupolttoaineet kuten pelletit ja briketit eivät Energiaviraston (2014) ohjeen mukaan kuulu tuen piiriin.

Lisälämmityslaitokselle ei voida siis saada näitä tukia, vaikka se suunniteltaisiin tuottamaan myös sähköä. Tukea voidaan saada, jos polttoaineeksi ostetaan esimerkiksi metsätähdehaketta ja laitos suunnitellaan tuottamaan myös sähköä. Pelkkää lämpöä tuottaville laitoksille tukea ei myönnetä.

9.2.3 Lisäpolttoaine

Lämmöntuotantoon tarvittava polttoaine eri tuotantovaihtoehdoissa arvioitiin kappaleessa 7 esiteltyjen periaatteiden mukaisesti. Puupelletin tuotannossa tarvittava vuosittainen lisäpolttoainemäärä on esitetty megawattitunteina kuvassa 9.2 ja paahtopelletin kuvassa 9.3. Yksiköitä ei ole merkitty yrityssalaisuuden vuoksi.

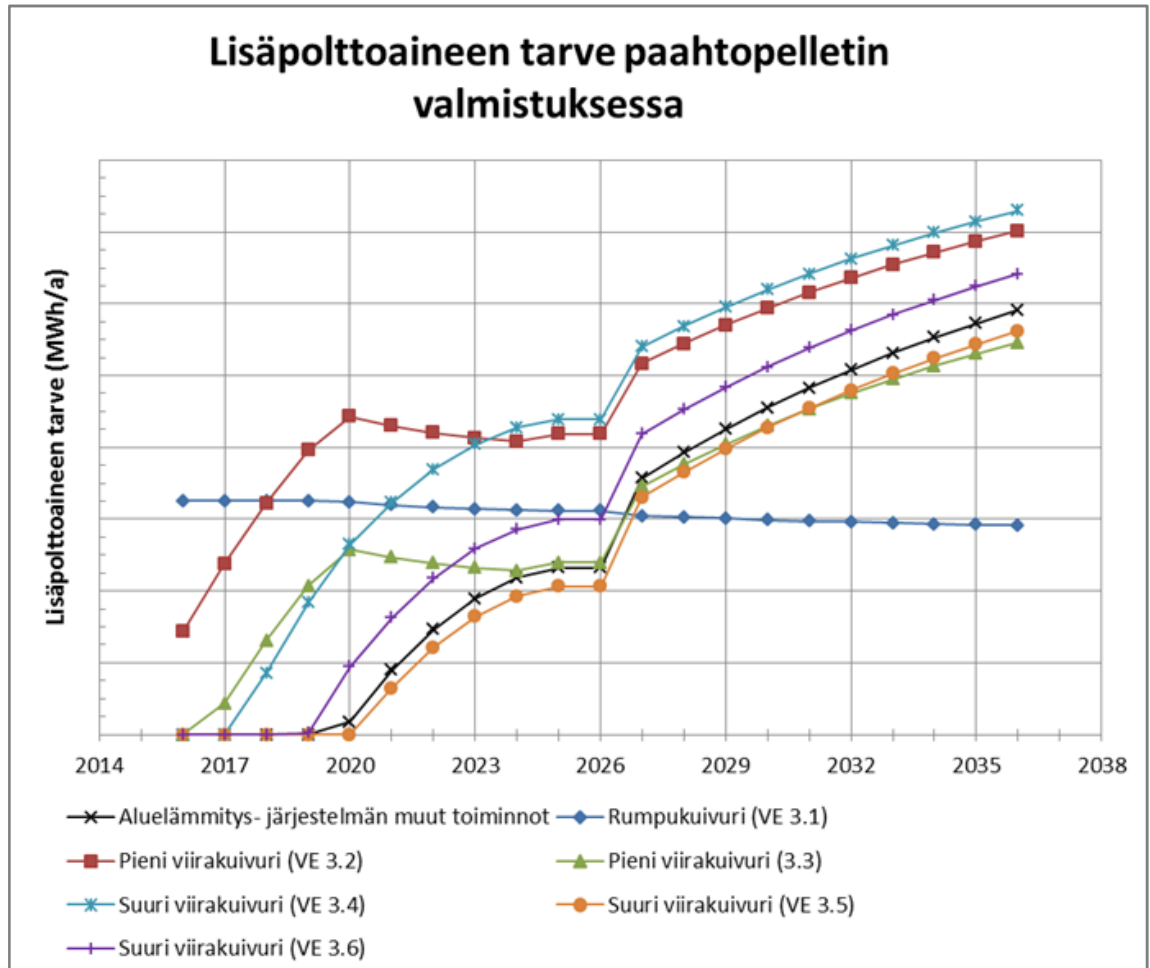


Kuva 9.2. Puupelletin tuotannon lisäpolttoaineen tarve eri kuivureilla.

Puupelletin tuotannossa lisäpolttoaineen tarve riippuu ennen kaikkea aluelämmitysjärjestelmän lämmöntuottokapasiteetista, kuivurin tehontarpeesta ja vuodenajasta. Kuvassa 9.2 esitetyt lämmöntarpeet ovat samat myös paahtopelletin tuotannon vaihtoehdoille 3.2 (pieni viirakuivuri) ja 3.4 (suuri viirakuivuri).

Kirjallisuudessa torrefioinnin polttoainetarve kattoi sekä torrefiointireaktorin että kuivurin lämmöntarpeen tuotannon ja oli 10 – 15 % raaka-aineesta 50 – 60 % kostealle raaka-aineelle ja noin 2 % raaka-aineesta 20 % kostealle raaka-aineelle. Tehdyissä laskelmissa torrefioinnin ja kuivurin lämmöntarpeet huomioitiin erikseen, jolloin aluelämmitysjärjestelmän lämmöntuotto oli helpompi huomioida. Laskelmien mukaan torrefiointikaasun polttamisesta saataisiin hieman yli kaksinkertainen torrefiointireaktion lämmöntarpeeseen nähden. Torrefiointikaasun käyttö lämmöntuotannossa laskee siis merkittävästi lisäpolttoainetarvetta niissä vaihtoehdoissa, joissa torrefiointikaasun poltto ja lisälämmöntuotto on yhdistetty.

Eri tuotantovaihtoehtojen lisäpolttoainemäärän tarve käytetyn kuivurin mukaan ja aluelämmitysjärjestelmän muiden toimintojen ylläpitoon tarvittava lisäpolttoainemäärä on esitetty kuvassa 9.3. Tarkkoja lukuja ei ole esitetty yrityssalaisuuden vuoksi. Lisäpolttoaineen tarve muodostuu torrefiointireaktion ylläpitoon ja raaka-aineen kuivaukseen tarvittavasta lisälämmöstä torrefiointikaasun polton jälkeen.



Kuva 9.3. Paahtopelletin tuotannon lisäpolttoaineen tarve eri kuivureilla.

Rumpukuivurin (VE 3.1) tarvitsema lämpömäärä riippuu tässä vain jalostettavan polttoaineen määrästä. Jos aluelämmitysjärjestelmän muiden toimintojen lämmittämiseksi ei tarvittaisi lainkaan puumursketta lisäpolttoaineeksi, rumpukuivurin lisäpolttoaineen tarve olisi vakio. Kuvassa nähdään hyvin raaka-ainemäärän vaikutus kuivurin tarvitsemaan lämpömäärään.

Kuvassa pientä viirakuivuria käyttävien vaihtoehtojen lisäpolttoaineen tarve kasvun sijaan vähenee vuosina 2020-2024. Tämä johtuu tarvittavan lämpötehon vakiintumisesta kesäaikaan talven lämpötehotarpeen jatkaessa kasvuaan. Jalostettava raaka-ainemäärä vähenee ja siitä johtuen lisälämmöntarve vähenee. Tasapaino saavutetaan vuonna 2025 jolloin lisälämmöntarve alkaa taas kasvaa. Ilmiö on helppo hahmottaa kuvan 9.1 avulla, jossa on esitetty eri kuivurien lämmöntarpeet paahtopellettituotannon aikana.

Koska käyrät eivät ole kovin hyvin mallinnettavissa sovitteella, lisäpolttoaineen kulutus huomioitiin investointilaskelmissa taulukoituina arvoina. Lisäpolttoaineen käytön kulut lisätään käyttökustannuksiin murskauskustannuksina ja huomioidaan käytettävissä olevassa raaka-ainemäärässä. Aluelämmitysjärjestelmän muiden lämpökuormien lisäpolttoaineen kulutus huomioidaan käytössä olevan raaka-ainemäärän pienenemisenä.

9.3 Investointikustannukset

Mursketuotannossa vain vaihtoehdossa 2.1 muodostuu investointikustannuksia. Kulut syntyvät mobiilimurskaimen hankinnasta. Murskaimen hinta on arvioitu Rinteen (2010) diplomityön pohjalta. Mobiilimurskaimen investointikustannukseksi arvioitiin 17,9 €/t vuosittaisen raaka-ainemäärän perusteella ja 4,70 €/MWh vuosittain tuotetun polttoainemäärän perusteella.

Puu- ja paahtopellettituotannon investointikustannusten arvio perustuu laitetoimittajilta saatuihin tarjouksiin sekä kirjallisuuslähteisiin, ennen kaikkea Koppejan et al. (2012) raporttiin. Koppejan et al. raportissa on vertailtu 255 000 t vuodessa tuottavaa puupelletti- ja paahtopellettilinjaa ja siinä esitettyjä tietoja on käytetty hahmottamaan projektin eri kustannusten suhteellista osuutta kokonaiskustannuksista. Suurempikapasiteettisissa linjoissa on oletettu, että vaikka tuotantokapasiteetti kaksinkertaistetaan, laitteistojen hinta ei kuitenkaan tuplaannu, kun ei rakenneta kahta rinnakkaista linjaa vaan valitaan vain suurempikapasiteettiset koneet. Kustannusten on oletettu tällöin nousevan 1,7-kertaisiksi kaksinkertaisen sijaan. Tästä on tehty poikkeus suunnittelukustannusten osalta, joiden oletetaan olevan samansuuruiset kaikissa tuotantolinjavaihtoehdoissa. Taulukossa 9.4 on esitetty puupelletin tuotantoprosessivaihtoehtojen investointikustannusten arviot ja muodostuminen. Kustannukset on suhteutettu vuosittain tuotettavaan polttoainemäärään ja esitetty yksikössä €/MWh.

Vaihtoehdon 2.3 rumpukuivurin hinnan arviona käytettiin erään laitetarjouksen pienemmän partikkelikoon viirakuivurin hintaa. Motivan raportin (Nummelin et al. 2014) mukaan rumpukuivurin yhteyteen mahdollisesti tarvittavat poistokaasun käsittelylaitteet nostavat investointikustannusta mutta toisaalta siinä mainitaan, että eräs viirakuivurin huono puoli rumpukuivuriin verrattuna on korkeampi investointikustannus. Ylipäättään kuivurin investointikustannuksen sanotaan riippuvan ennen kaikkea haihduttavasta vesimäärästä. Näiden tietojen perusteella arvioitiin, että riittävään tarkkuuteen päästään valitsemalla rumpukuivurille sama hinta kuin vastaavanlaiselle viirakuivurille.

Taulukko 9.4. Puupellettituotannon investointikustannusten arvio yksikössä €/tuotettu MWh polttoainetta.

Kustannus (€/MWh)	VE 2.1	VE 2.2	VE 2.3	VE 2.4	VE 2.5	VE 2.6
Lisälämmityslaitos			7,20	10,26	10,26	10,26
Lisälämmityksen laajennus					5,68	5,68
Raaka-aineen esikäsittele*	5,66	9,64	5,66	5,66	9,64	5,66

Kuivuri	6,06	10,29	4,73	6,06	10,29	10,29
Pelletointi	4,64	7,89	4,64	4,64	7,89	4,64
Siilot	2,57	4,36	2,57	2,57	4,36	7,69
Suunnittelu	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Rakennustyöt ja muut kulut	5,21	8,86	5,21	5,21	8,86	5,21
Yhteensä	25,10	41,99	30,96	41,03	57,92	50,40
* Kuljetuslaitteistot raaka-ainevarastolta, murskaus, jauhatus, mek. epäpuhtauksien poisto						

Vaihtoehdossa 2.6 kaikki raaka-aine kuivataan kesällä ja jalostetaan pelletiksi vuoden mittaan, joten siinä varastointitilan tarve on huomattavasti korkeampi, kuin muissa vaihtoehdoissa. Siilojen investointikustannukseksi oletettiin kolminkertainen hinta tassaisesti vuoden ympäri toimivaan tuotantolinjaan verrattuna.

Lisälämpölaitoksien investointikustannus on arvioitu perustuen laitetarjoukseen biomassalämpökattilasta. Eri lämpötehojen kattiloiden hinnan arvioinnissa oletettiin kustannuksista 30 % pysyvän samoina ja 70 % skaalautuvan lämpötehon muutoksen mukaisesti.

Paahtopelletin tuotantovaihtoehtojen investointikustannukset ja niiden muodostuminen on esitetty taulukossa 9.5. Kustannukset on esitetty suhteutettuna vuosittaiseen tuotettavaan polttoainemäärään ja esitetty yksikössä €/MWh.

Taulukko 9.5. Paahtopelletin tuotantovaihtoehtojen investointikustannusten arvio yksikössä €/tuotettu MWh polttoainetta.

Kustannus (€/MWh)	VE 3.1	VE 3.2	VE 3.3	VE 3.4	VE 3.5	VE 3.6
Lisälämmityslaitos		10,14		10,14		
Lisälämmityksen laajennus				5,61		
Raaka-aineen esikäsitely*	5,59	5,59	5,59	9,52	9,52	5,59
Kuivuri	4,67	5,99	5,99	10,17	10,17	10,17
Torrefiointi	48,72	48,72	48,72	82,82	82,82	48,72
Pelletointi	4,59	4,59	4,59	7,79	7,79	4,59
Siilot	1,27	1,27	1,27	2,54	2,54	3,81
Suunnittelu	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Rakennustyöt ja muut kulut	6,63	6,63	6,63	13,24	13,24	6,63
Yhteensä	72,41	83,86	73,72	142,78	127,03	80,44
* Kuljetuslaitteistot raaka-ainevarastolta, murskaus, mek. epäpuhtauksien poisto						

Pelletöinnin laitteiden hinnat arvioitiin samoin kuin puupelletin tuotannossa. Suunnittelukustannusten oletettiin pysyvän lähes saman suuruisina kuin puupelletin tuotannossa mutta tähän oletukseen liittyy hyvin paljon epävarmuutta. Lisälämmityslaitosten hinnat arvioitiin samoin kuin puupelletin tuotannossa.

Torrefiointiyksikön toimituslaajuuteen kuului torrefiointireaktori, torrefiointikaasua polttava kattila ja siitä lähtevät yhteydet torrefiointireaktoriin, lämmönsiirtolaitteet sekä

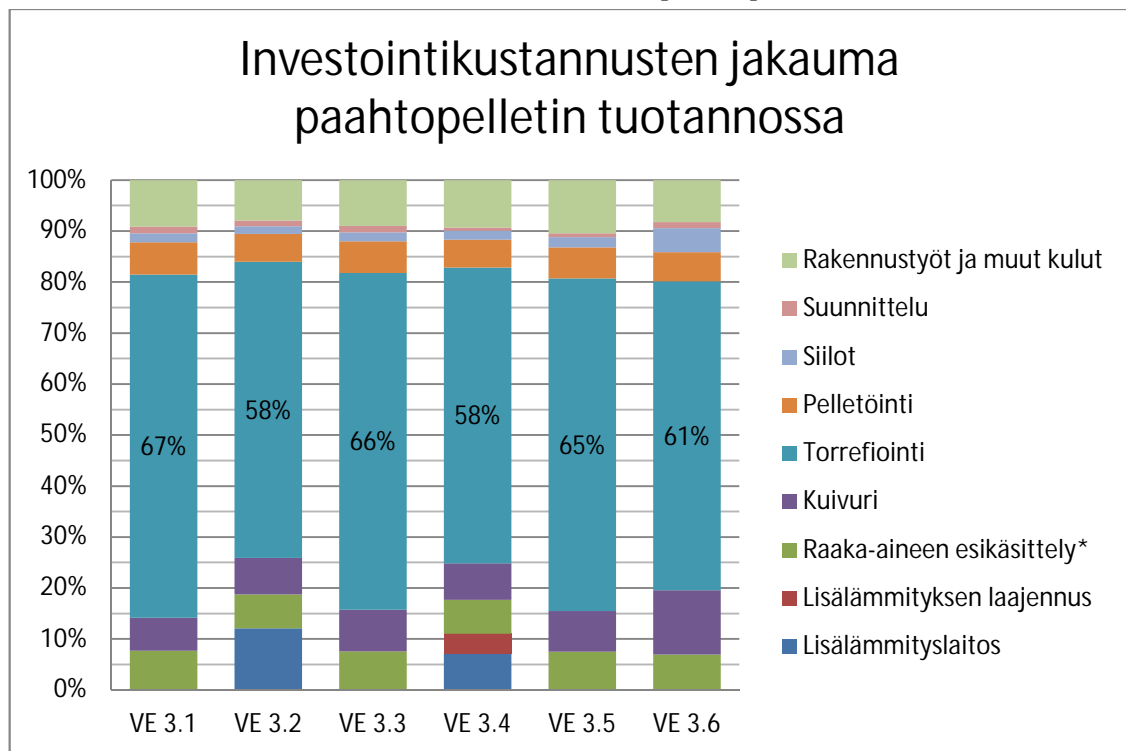
torrefioidun biomassan jäädytyslaitteet. Taulukosta nähdään, että torrefiointiyksikkö muodostaa selvästi suurimman osan investointikustannuksista.

Paahtopelletin varastoimiseen ei tarvita varastosiiloja, vaan lopputuote voidaan varastoida ulkona. Tuotantolinjaan on kuitenkin sisällytettävä puskuriksi muutama välivarasto, jotta tuotantoprosessi on sujuva eikä turhia keskeytyksiä tulisi. Paahtopelletin tuotannon välivarastojen hinnaksi arvioitiin noin puolet puupelletin tuotannossa tarvittavien siilojen hinnasta. Tuotantovaihtoehdossa 3.6 on käytetty kolminkertaista hintaa siiloille 11 kk vuodessa toimivaan linjastoon verrattuna.

Koppejan et al (2012) tekemässä talousarviossa paahtopellettilinjaston rakennuskustannukset ovat suuremmat kuin puupellettilinjaston. Oletus on järkevä, koska paahtopellettituotanto sisältää enemmän laitteita ja hieman monimutkaisemmat kytkennät. Koppejan et al. raportissa esitetyt kustannusosuudet skaalatiin vastaamaan tarjouksien hintatasoa ja samalla skaalauksella arvioitiin rakennuskustannukset.

Paahtopellettituotannon investointikustannusten kustannusjakauma eri vaihtoehdoissa on esitetty visuaalisesti kuvassa 9.4.

Kuva 9.4. Investointikustannusten muodostuminen paahtopelletin tuotannossa.



Kuvaan on merkitty torrefiointiyksikön osuus investointikustannuksista. Osuus on suuri, 58 – 67 % kaikista investointikustannuksista. Koppejan et al. (2012) raportissa torrefiointiyksikön osuus investointikustannuksista oli noin 45 % ja Bagramovin (2010) laskelemissa torrefiointilaitteiden osuus oli vain 35 %. Tämä voi kertoa joko siitä, että mainituissa lähteissä torrefiointilaitteiden hinta on arvioitu liian optimistisesti, tai siitä, että tässä työssä on muut kustannukset arvioitu liian optimistisesti. Lisäksi ainakin Koppejan

et al. raportissa käsiteltiin huomattavasti suurempaa paahtopelletin tuotantoa, mikä voi myös vaikuttaa investointikustannusten jakautumiseen.

9.4 Investointituki

Biopolttoainetta tuottavalle yksikölle voidaan hakea työ- ja elinkeinoministeriöltä energiatukea, jonka suuruus voi suurimmillaan olla 30 % investointikustannuksista. Investointitukea voidaan myöntää projektille, jonka hyväksyttävät kustannukset ylittävät 5 miljoonaa euroa ja tukea tulee hakea ennen hankkeen aloittamista. Tukea ei myönnetä metsähakkeen ja teollisuuden kierrätyspuuhakkeen tuotantokaluston tai kierrätyspolttoaineiden tuotantokoneille. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2014)

Mursketusta käsitteleviin vaihtoehtoihin ei voida saada investointitukea. Puupelletin tuotantoon investointuen saamisen mahdollisuudet ovat kuitenkin hyvät, jos hankkeen investointikustannukset ylittävät 5 miljoonaa euroa.

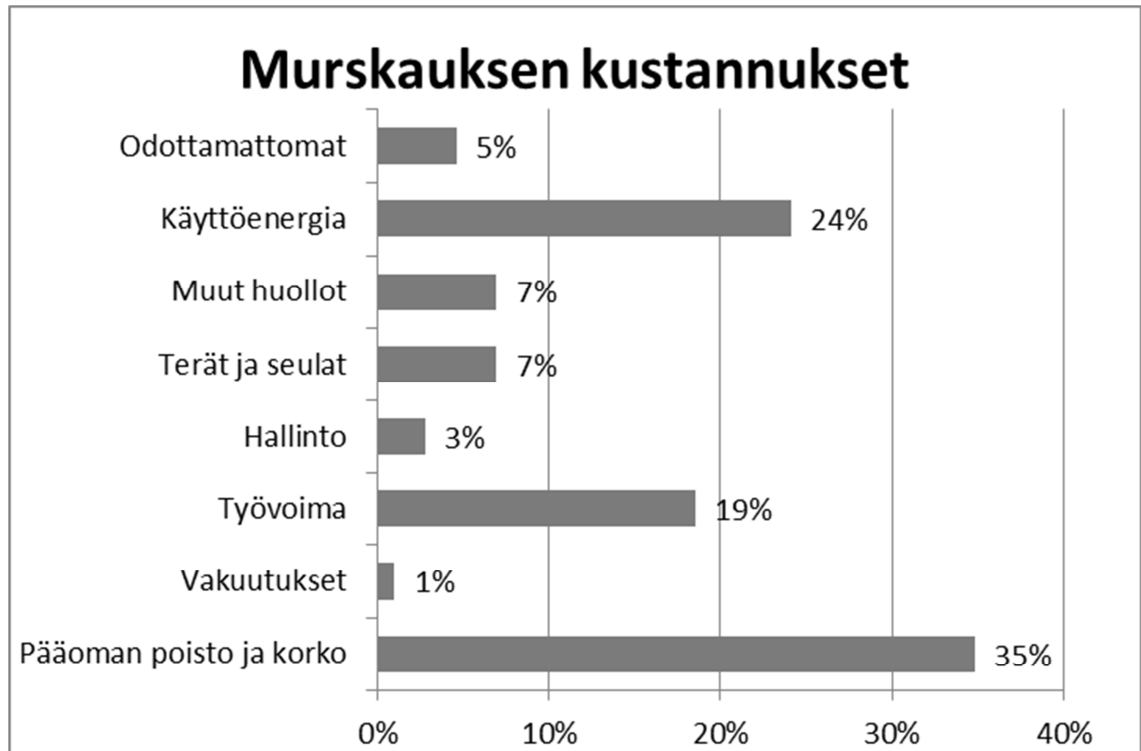
Työ- ja elinkeinoministeriön (2014) mukaan uuden teknologian hankkeiden osalta tuen suuruutta voidaan korottaa 10 %-yksikköä. Tällöin torrefiointia hyödyntävä paahtopelletin tuotantolinja voi saada investointitukea jopa 40 % investointikustannuksista. Myös vaadittu 5 miljoonan euron kustannusraja ylittyy paahtopelletin tuotannossa herkemmin kuin puupelletin tuotannossa torrefiointiyksikön korkean hinnan vuoksi.

9.5 Käyttökustannukset

Käyttökustannukset on arvioitu puumurskeen tuotannossa pitkälti Rinteen (2010) esittämien tietojen pohjalta. Puu- ja paahtopelletin tuotannon kustannukset on käsitelty hieman yksityiskohtaisemmin. Tästä syystä murskeen tuotannon käyttökustannukset esitetään omassa alakappaleessaan ja luvun muut alakappaleet käsittelevät puu- ja paahtopelletin tuotannon käyttökustannuksia.

9.5.1 Puumurske

Oman murskaimen käytöstä aiheutuvia kustannuksia on pohdittu Rinteen (2010) diplomityössä. Siinä pienpuun murskauskustannuksiksi saadaan työssä käsiteltyyn raaka-ainemäärään sopivalla, puoliperävaunullisella murskaimella terminaalissa 2,15 €/MWh. Lukuun on sisällytetty pääoman poisto sekä 10 % korko. Muita kulutyypppejä ovat vakuutukset, työvoima, hallinto, terien ja seulojen vaihto ja huolto, muut huollot, käyttöenergia ja odottamattomat kustannukset kuten vauriokorjaukset. Kustannuksien jakauma on esitetty kuvassa 9.5.



Kuva 9.5. Murskauksen kustannusten kulujakauma. (Rinne 2010)

Rinteen esittämät käyttökustannukset on laskettu vuotuiselle 210 GWh murskausmäärälle. Murskeen käyttökustannukset laskettiin näihin tietoihin perustuen ja skaalaten sopivalle vuosittaiselle murskemäärälle.

Alihankinnan kustannukset arvioitiin asiakasyrityksen lähteiden perusteella noin kolminkertaisiksi oman murskaimen käyttöön verrattuna, kun pääomakustannuksetkin huomioitiin. Tuotetun polttoaineen energiaan perustuva hinta olisi silloin noin 6,45 €/MWh.

9.5.2 Sähkö

Puu- ja paahtopellettituotantolaitoksessa sähköä kuluu tuotantokoneiden käyttöön ja mahdollisen lisälämmityslaitoksen toimintoihin. Tuotantokoneiden sähkönkulutuksen oletetaan olevan joka vuosi vakio. Lisälämmityslaitoksen sähkönkulutus oletetaan vakioksi vain vaihtoehdossa 3.1. Lisälämmityslaitoksen sähköntarve riippuu tuotettavasta lämpötehosta ja joka vaihtoehdossa 3.1 on riittävällä tarkkuudella vakio, kuten lisäpolttoaineen tarvetta esittävästä kuvasta 9.3 nähdään. Muissa vaihtoehdoissa lisälämmityksen lämpöteho ja sitä kautta sähkönkulutus riippuu myös aluelämmitysjärjestelmässä käytettävissä olevasta lämmöstä eikä siis ole joka vuosi vakio. Näissä vaihtoehdoissa lisälämmityslaitoksen sähkönkulutus on laskettu kullekin vuodelle erikseen vuosittaiseen lisälämpötehon tarpeeseen pohjautuen. Lämmityslaitoksen sähköntarve oletetaan alustavissa laskelmissa olevan 1,5 % tuotetusta lämpötehosta.

Pellettilaitostarjouksiin sisältyi arvio laitteiden sähkötehosta. Kun sähköteho kerrotaan vuosittaisilla käyttötunneilla, saatiin arvio laitteiden tarvitsemasta vuosittaisesta

sähköenergiasta. Tuotantovaihtoehtojen koneiden sähkötehon arviona käytettiin tarjouksissa ilmoitettujen arvojen keskiarvoa. Torrefiointiyksikön sähköteho on arvioitu Koppejan et al. (2012) raportin mukaan, jossa torrefioinnin vuosittaisen sähkön kulutuksen arvioitiin olevan 60 kWh tuotettua paahtopellettitonnin kohti.

Taulukossa 9.6 on esitetty puu- ja paahtopellettituotannon tuotantolaitteiden sähkötehon tarve sekä esitetty eri laitteiden osuus sähköntarpeesta. Sähköteho on yrityssalaisuuden vuoksi esitetty suhteutettuna vuoden aikana laitteilla tuotettuun polttoainemäärään., yksikössä W/MWh tuotettua polttoainetta.

Taulukko 9.6. *Puu- ja paahtopellettituotannon sähkötehon tarpeen arviot sekä tehontarpeen jakautuminen eri laitteille.*

Prosessilaitte	Sähkötehon tarve					
	VE2.1	VE2.2	VE2.3	VE2.4	VE2.5	VE2.6
Raaka-aineen esikäsitteily	24 %	24 %	23 %	24 %	24 %	20 %
Kuivuri	24 %	24 %	24 %	24 %	24 %	36 %
Varastolaitteet	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	3 %
Pelletöinti ja jäähditys	50 %	50 %	48 %	50 %	50 %	41 %
Lisälämmityslaitos			4 %			
Yhteensä (W/MWh)	7,6	13,6	7,9	7,6	13,6	9,2
Prosessilaitte	VE 3.1	VE 3.2	VE 3.3	VE 3.4	VE 3.5	VE 3.6
Raaka-aineen esikäsitteily ja hienonnus	14 %	15 %	15 %	15 %	15 %	23 %
Kuivuri	15 %	15 %	15 %	13 %	13 %	20 %
Torrefiointi*	28 %	28 %	28 %	29 %	29 %	22 %
Vasarajauhimet	4 %	4 %	4 %	4 %	4 %	3 %
Pellettimylly	32 %	33 %	33 %	34 %	34 %	26 %
Muut pelletöintilaitteet	4 %	5 %	5 %	5 %	5 %	4 %
Varastolaitteet	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %	2 %
Lisälämmityslaitos	2 %					
Yhteensä (W/MWh)	12,5	12,2	12,2	23,9	23,9	15,4
*sis. Torrefiointireaktorin, polttimen (energia torrefiointiin ja kuivuriin) ja välijäähdityksen						

Paahtopelletin tuotannossa pelletöintivaiheesta on eroteltu vasarajauhimet, pellettimylly ja muut pelletöinnin laitteet. Torrefioitua biomassaa pelletöidessä jauhien ja pelletöinnin sähkönkulutus muuttuu verrattuna puupurun pelletöintiin.

Torrefioitu biomassaa on niin haurasta, että se musertuu tarpeeksi pelkässä pellettimyllyssäkin ja Koppejan et al. (2012) mukaan vasarajauhimet voidaan jättää kokonaan tuotantolinjasta pois. Vaihtoehtoisesti vasarajauhimet voidaan korvata kevyemmällä laitteilla (Bergman 2005). Tässä vasarajauhimet on jätetty tuotantolinjaan. Sekä vasarajauhien että muiden jauhainlaitteiden sähkönkulutus olisi Bergmanin (2005) tutkimusten mukaan 50 – 90 % pienempi kuin tavallista puubiomassaa jauheessa. Phanphanich & Sudhagar (2011) raportoivat sähkönkulutuksen laskevan 70 – 90 %. Myös Kiel (2012) ja Kuittinen (2010) raportoivat jauhamisenergian vähentyvän merkittävästi. Tässä oletetaan jauhamisenergian pienenevän 60 %.

Pelletöintienergian osalta Larsson et al. (2013) esittää sähkökulutuksen tuplaantuvan tavalliseen puupelletin tekoon verrattuna, Li et al. (2012) esittävät kulutuksen kasvavan 1,5-kertaiseksi ja Koppejan et al. (2012) pitävät kolminkertaista sähköenergian kulutusta sopivana arviona. Toisaalta Koppejan et al. mainitsevat myös, että Topell Energy on saanut sopivilla lisäaineilla laskettua pelletöinnin energiankulutuksen jopa hieman puupelletin vastaavaa pienemmäksi. Kompromissina näistä tiedoista oletetaan sähkökulutuksen kaksinkertaistuvan sopivien lisäaineiden ansiosta. Osa kohonneesta sähkökulutuksesta selittyy korkeammalla pellettimatriisin lämpötilalla.

Sähkön hinta muodostuu useista hintakomponenteista, pääasiassa sähköenergian hinnasta sekä siirtomaksusta. Sähkön hinnan laskennassa käytetyt komponentit on esitetty taulukossa 9.7.

Taulukko 9.7. Sähkön hinnan muodostavat komponentit ja niiden arvot.

Hintakomponentti	Hinta
Sähkön spot-hinta, keskiarvo	44,144 €/MWh
Energiavero	6,9 €/MWh
Huoltovarmuus-maksu	0,13 €/MWh
Siirto, talvipäivä*	13,8 €/MWh
Siirto, muu	6,7 €/MWh
*Talvipäiväksi lasketaan klo 7-22, 1.11.-31.3.	

Sähkön spot-hinnan arvioksi on otettu Nord Poolin Elspot-hintojen (Elspot prices 2013) vuosikeskiarvojen viimeisen viiden vuoden (2009-2013) keskiarvo, joka on 44,144 €/MWh Suomessa myytävälle sähkölle. Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta (L 30.12.1996/1260) määrää, että teollisuudelle myytävästä sähköstä maksetaan taulukon 9.7 mukainen energiavero sekä huoltovarmuusmaksu. Arvonlisävero ei ole huomioitu. Siirtohinnot on otettu Espoon sähkönsiirtoverkon hinnastosta (Verkkopalveluhinnasto 2014) teollisuudelle ja muille suurille sähkökäyttäjille suunnatun 20 kV jännitteellä toimitettavan tehosiirto-sopimuksen mukaan.

9.5.3 Työvoima

Halonen et al. (2003) ovat tutkineet raportissaan puupellettitehtaan työllistämisaikavaihteluita. Tässä oletetaan, että paahtopellettituotanto vaatii yhtä paljon työntekijöitä kuin puupellettituotantokin. Halonen et al. mukaan 10 000 – 20 000 t/a –kapasiteettinen pellettitehdas tarvitsee yleensä 8 työntekijää kun tuotetaan pellettiä viisipäiväisesti kolmivuorotyössä. Suuremmissa, 20 000 – 100 000 t/a –kapasiteettisissa tehtaissa on yleensä 10 - 13 työntekijää, erityisesti jos töitä tehdään jatkuvassa kolmivuorossa.

Puu- ja paahtopellettituotantolinjat jakaantuvat henkilökunnan tarpeensa osalta kahteen ryhmään. Ensimmäisessä ryhmässä (vaihtoehdot 2.1, 2.3, 2.4 ja 2.6 sekä 3.1, 3.2, 3.3 ja 3.6) työntekijöitä tarvitaan hieman vähemmän mutta ympäri vuoden, toisessa ryhmässä (vaihtoehdot 2.2 ja 2.5 sekä 3.4 ja 3.5) työntekijöitä tarvitaan enemmän laitteiden suuremmasta mitoituksesta johtuen mutta heitä tarvitaan vain 6 kk vuodessa.

Taulukossa 9.8. on esitetty näiden ryhmien kokonaistyövoimakustannukset Ihalaisen ja Sikasen (2010) sekä Halonen et al. (2003) mukaan arvioituna. Työvoimakustannukset on suhteutettu tuotettavaan polttoainemäärään vuodessa.

Taulukko 9.8. Kokonaistyövoimakustannusten muodostuminen puu- ja paahtopelletti-tuotannossa.

Kustannus tai kustannustekijä	VE 2.2 ja 2.5	VE 2.1, 2.3, 2.4 ja 2.6	VE 3.1, 3.2, 3.3 ja 3.6	VE 3.4 ja 3.5
Työvoimakustannus (palkka ja sivukulut)	4,02 €/MWh	2,51 €/MWh	3,97 €/MWh	2,48 €/MWh
Muut henkilöstökulut	0,41 €/MWh	0,41 €/MWh	0,41 €/MWh	0,41 €/MWh
Kokonaistyövoimakustannukset	4,43 €/MWh	2,93 €/MWh	4,38 €/MWh	2,89 €/MWh

Ihalainen ja Sikanen (2010) ovat esittäneet raportissaan yhden työntekijän työvoimakustannukset sekä muut henkilöstökulut vuoden 2009 tiedoilla. Muut henkilöstökulut koostuvat muun muassa työnjohdon palkka-, käynti- ja matkakuluista. Tilastokeskuksen työvoimakustannusindeksin (2014) mukaan teollisuuden työvoimakustannukset ovat nousseet vuodesta 2009 noin 13,8 % vuosittaisen nousun ollessa luokkaa 1 – 5 %. Yhden työntekijän vuosittaisen työvoimakustannuksen sekä muiden henkilöstökulujen on oletettu nousseen mainitun 13,8 % verran Ihalaisen ja Sikasen arviosta. Koska osassa tuotantovaihtoehtoja tuotanto on käynnissä vain puolet vuodesta, arvioidaan, että myös vuosittaiset työvoimakustannukset puolittuvat, kun työntekijöitä tarvitaan vain puolet vuodesta. Muiden henkilöstökulujen oletetaan pysyvän samoina laitoksen käyttöajasta riippumatta.

9.5.4 Muut

Muut käyttökustannukset puu- ja paahtopelletin tuotannossa muodostuvat huolto- ja korjauskustannuksista, vakuutusmaksuista sekä muista luokittelemattomista tai odottamattomasti syntyvistä kustannuksista. Hinta-arvioissa hyödynnettiin puupellettitehtaista julkaistuja tietoja. Alakangas ja Flyktman (2001) arvioivat, että puupellettitehtaan vuotuiset huolto- ja korjauskustannukset olisivat noin 2 % investoinnin kokonaisummasta ja vakuutusmaksujen suuruudeksi vuodessa arvioidaan Turusen (2004) mukaan promille investointikustannuksista (katso Ihalainen ja Sikanen 2010). Muiden kiinteiden käyttökustannusten arvioidaan olevan 5 – 6 % kokonaiskäyttökustannuksista (Thek & Oberberg 2004, Ihalainen ja Sikanen 2010 mukaan). Näiden arvioiden perusteella on laskettu kokonaiskäyttökustannukset tuotantovaihtoehtoille ja tulokset on koottu taulukkaan 9.9.

Taulukko 9.9. Työssä käytetyt arviot puu- ja paahtopellettituotannon kustannuksista suhteessa tuotettuun polttoainemäärään vuodessa (€/MWh).

Kululaji (€/MWh)	VE 2.1	VE 2.2	VE 2.3	VE 2.4	VE 2.5	VE 2.6
Henkilöstökulut	4,43	2,93	4,43	4,43	2,93	4,43
Sähkölasku*	2,37	2,27	2,47	2,37	2,27	2,38

Huolto- ja korjauskustannukset	0,50	0,84	0,62	0,82	1,16	1,01
Vakuusmaksut	0,03	0,04	0,03	0,04	0,06	0,05
Muut	0,39	0,32	0,40	0,40	0,34	0,41
Yhteensä	7,72	6,39	7,95	8,07	6,74	8,29
Kululaji (€/MWh)	VE 3.1	VE 3.2	VE 3.3	VE 3.4	VE 3.5	VE 3.6
Henkilöstökulut	4,38	4,38	4,38	2,89	2,89	4,38
Sähkölasku*	3,94	3,84	3,84	3,98	3,98	3,85
Huolto- ja korjauskustannukset	1,45	1,68	1,47	2,86	2,54	1,61
Vakuusmaksut	0,07	0,08	0,07	0,14	0,13	0,08
Muut	0,52	0,53	0,51	0,52	0,50	0,52
Yhteensä	10,36	10,51	10,29	10,39	10,04	10,44
*Ei huomioitu lisälämmitystä						

Taulukossa ei ole huomioitu tuotantovaihtoehtojen muuttuvia käyttökustannuksia kuten lisäpolttoaineen käytöstä syntyviä tai lisälämmityslaitoksen sähkönkulutuksen kuluja. Taulukosta nähdään, puupellettituotannossa että 11 tai 6 kuukautta vuodessa toimivien tuotantolinjojen käyttökustannuksissa on selvä ero. Samoilla käyttökuukausilla toimivien vaihtoehtojen välillä ero taas ei ole merkittävä. Paahtopellettituotannossa ei näin ei ole, sillä 6 kk vuodesta käyttöaikaan liittyvässä suuremmassa mitoituksessa investointikustannukset nousevat niin paljon suuremmiksi, ja niihin sidotut huolto- ja korjauskustannukset sekä vakuusmaksut nousevat niin suuriksi, että työvoimakustannusten lasku jää merkityksettömäksi.

9.6 Tuotteesta saatava hinta

9.6.1 Polttoaineiden hinnat

Taulukkoon 9.10 on koottu tyypillisiä sekä korkeimpia realistisia hintoja puumurskeelle, puupelletille ja paahtopelletille. Korkeimmat hinnat perustuvat Raikon ja Honkasalon (2012) raportissaan esittämille rajoille sille, paljonko voimalaitoksien on vielä kannattava maksaa eri biopolttoaineista.

Kannattavuusraja on raportin mukaan hakkeelle ja murskeelle 18 €/MWh, puupelletille 35 €/MWh ja paahtopelletille 40 €/MWh. Tyypillisten hintojen muodostuminen perustuu useaan lähteeseen. Laajemmin voimalaitospolttoaineiden hintoja on koottu liitteeseen 2.

Taulukko 9.10. *Polttoaineiden hintoja, murskeet ilman kuljetuskustannuksia sekä voimalaitosten kannattavuusrajoja porttihinnoille (Raiko ja Honkasalo (2012)).*

€/MWh	Risumurske	Kierrätyspuumurske	Puupelletti	Paahtopelletti
Tyypillinen	18	18	30	35
Kannattavuusraja	18	18	35	40

Tilastokeskuksen tietojen (Energian hinnat 2014) mukaan metsähakkeen hinta sähköntuotannossa on ollut nousussa tilastoinnin alusta 2007 alkaen. Metsähakkeen hinta

on pysynyt vakaasti noin 20 €/MWh vuodesta 2012 vuoden 2014 alkuun asti. Metsähaketta polttavat voimalat kuuluvat usein lain 30.12.2010/1396 mukaisen syöttötariffin piiriin ja käytännössä näiden laitosten polttoainekustannus on jonkin verran alhaisempi. Kannattavuusraja on vedetty jo 18 €/MWh Raikon ja Honkasalon (2012) raportissa ja silti sitä on käytetty enenevässä määrin voimalaitoksilla. Kuitenkin 2013 käyttö on romahtanut juuri syöttötariffien hinnan laskun vuoksi (Puulauhteen tuotanto loppumassa, 2014; Puun käyttö lauhdetuotannossa vapaassa pudotuksessa, 2014; Hallitukselta odotetaan kotimaisen energian ratkaisuja 2014). Liitteen 2 taulukosta nähdään kuitenkin, että heikoillakin syöttötariffeilla metsähakkeen käyttö on kilpailukykyistä lämmöntuotannossa. Murskeen hintana on käytetty tässä työssä kannattavuusrajan arviota 18 €/MWh.

FOEX Indexes Oy julkaisee säännöllisesti pohjoismaisen teollisen puupelletin hintaindeksin PIX Pellet – Nordic Industrial. Indeksi on pohjoismaisissa satamissa kaupattujen teollisuuspellettien kuukausittainen toimitushintojen keskiarvo. Hintaindeksiä alettiin julkaista säännöllisesti 2009 ja taannehtivasti hintatiedot löytyvät vuoteen 2007 asti. (FOEX Indexes Oy, 2009) Vuosina 2012 ja 2013 teollisuuspelletin hinta oli noin 30 €/MWh. (FOEX Indexes Oy, 2014)

Myös Argus Biomass Markets (2014) raportoi teollisuuspellettien hintoja, viikottaisessa uutisjulkaisussa on ilmoitettu hinnat Baltiassa, Portugalissa sekä ARA-indeksi, eli keskimääräiset hinnat Amsterdamin, Rotterdamin ja Antwerpenin satamissa. ARA-indeksi oli teollisuuspelletille 2014 huhtikuun alussa 37,80 \$/MWh, RatesFX valuuttamuuntimen (2014) muuntokertoimella 0,731095 muutettuna 27,64 €/MWh eli samaa luokkaa kuin vastaava FOEX:n pohjoismaisen indeksi.

Paahtopelletille on käytetty hintaa 35€/MWh, jota Wilén et al. (2012) mukaan käytetään monissa Suomen olosuhteisiin sovelletuissa raporteissa ja selvityksissä. Myös Korpinen (2012) käyttää tätä hintaa diplomityössään Vantaan energialle. Wilén et al. arvioivat paahtopelletin tuotannon olevan kannattavaa, kun tuotteen hinta on 35-40€/MWh. Raportin skenaarioissa on kuitenkin oletettu raaka-aineeksi kokopuuhaake tai metsätähdehaake, jotka ovat kierrätyspuuta selvästi kalliimpia raaka-aineita.

Flyktman et al. (2011) raportin mukaan voi kuitenkin olla mahdollista, ettei 35€/MWh hintaan edes päästä ilman, että biomassalle sovitaan uusia tukia tai että ensisijaisesti korvattavan polttoaineen kivihiilen hintaa nostavat verot ja päästöoikeuden hinnat nousevat huomattavasti. Raportissa oli huomioitu IEA:n 2020 skenaario, jossa päästöoikeuden hinnaksi oli arvioitu 30€/t CO₂ ja tämä ei kirjoittajien mukaan vielä tekisi paahtopelletistä kilpailukykyistä kivihiileen nähden. Vertailun vuoksi vuonna 2011 päästöoikeuden hinta oli 15€/t CO₂. Wilén et al. (2012) raportin mukaan, kun kivihiilen hinta on noin 10€/MWh, päästöoikeiden hinnan tulisi olla noin 50€/t CO₂, jotta paahtopelletti voisi kilpailla sen kanssa ilman tukia. Kivihiilen hinta sähköntuotannossa Suomen rannikolla on Tilastokeskuksen (Energian hinnat 2014) mukaan on vaihdellut vuosina 2010-2014 8-13 €/MWh. Sartorin (2012) ja European Energy Exchangen (2014) tietojen mukaan päästöoikeuden hinta on laskenut voimakkaasti päästökaupan toisen vaiheen (2008-2012) alkuvuosien 20 - 30 €/t CO₂ hinnoista ja vuonna 2012 tammikuussa se oli vain 6,50€/t CO₂ ja 11.6.2014 vain 5,40€/t CO₂. Päästökaupan kolmas

vaihe on kuitenkin alkanut ja se tuo mukanaan selviä kiristyksiä päästökauppaan. Lisäksi Euroopan komissio on päättänyt jäädyttää osan kaupattavista päästöoikeuksista reaktiona taantuman aiheuttamaan ylitarjontaan. (The European Emissions Trading System 2014) Paahtopelletin hintana käytetään tässä 35€/MWh mutta sen saavutettavuuteen liittyy epävarmuutta ja myös alhaisempiin hintoihin on syytä varautua.

9.6.2 Kuljetuskustannukset

Tuotettavien polttoaineiden kuljetuskustannukset vaikuttavat siihen, paljonko polttoaineesta saadaan tuottoa. Laskelmissa oletetaan, että voimalaitos 120 km päässä on valmis maksamaan saman hinnan toimitetusta polttoaineesta, kuin voimalaitos 25 km päässä, jolloin kannattavampaa on toimittaa polttoaine mahdollisimman lähelle. Kuittinen (2010) on arvioinut hakkeen kuljetuksen kustannuksia yhdistelmäajoneuvolla, jonka perusteella on arvioitu vastaavat kuljetuskustannukset myös puu- ja paahtopelletille. Arviot on esitetty taulukossa 9.11. Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että kaikki kuljetukset tehdään 37 t tai 120 m³ –kapasiteetisella yhdistelmäajoneuvolla eikä esimerkiksi junalla vaikka raideyhteys olisi jollekin voimalaitoksille olemassa.

Taulukko 9.11. Polttoaineiden kuljetuskustannuksia 37t/120m³ –kapasiteetin yhdistelmäajoneuvolla kuljetettaessa.

Polttoaine		50 km	75 km	100 km	125 km	150 km
Murske	€/MWh	2,82	3,60	4,37	5,15	5,92
Puupelletti	€/MWh	1,32	1,69	2,05	2,41	2,77
Paahtopelletti	€/MWh	1,01	1,28	1,56	1,84	2,11

Taulukosta nähdään trendi, että puupelletin kuljetuskustannukset ovat vajaa puolet murskeen kuljetuskustannuksista ja paahtopelletin vain kolmasosa murskeen kuljetuskustannuksista. Myös taloudellisesti kannattava kuljetusetäisyys muuttuu samankaltaisesti.

9.7 Muut lähtötiedot

Tuotannon kannattavuuteen vaikuttavat myös yhteiskunnalliset sopimukset ja ilmiöt kuten verotus ja inflaatio. Lisäksi joidenkin tavaroiden ja hyödykkeiden hinta muuttuu hitaammin tai nopeammin kuin yleinen inflaatio.

Osakeyhtiöt ja muut yhteisöt maksavat yhteisön verotettavasta tulosta yhteisöveroa, joka Suomessa on tällä hetkellä 20 %. Yhteisön verotettava tulo on veronalaisten tulojen ja vähennyskelpoisten menojen erotus. (Valtionvarainministeriö 2014) Osasta polttoaineista maksetaan myös valmisteveroa, mutta puupolttoaineet eivät kuulu tämän verotuksen piiriin (L 30.12.1996/1260). Yhteisöveroa on merkittävin yritysten Suomessa maksama vero mutta ei ainoa. Saksan valtionvarainministeriö (2014) on koonnut kansainvälisen verovertailun, jossa kaikki eri maiden yrityksiin kohdistuvat verot on koottu yhdeksi indeksiksi. Luvut ovat vuoden 2013 lopun tietoihin perustuvia, jolloin Suomen

yhteisövero oli vielä 24,5% (Repo 2013). Saksan valtionvarainministeriön (2014) vertailun mukaan Suomen yrityksiin kohdistuva kokonaisverotus oli vuonna 2013 31% eli 6,5%-yksikköä yhteisöveroa enemmän. Kassavirtalaskelmia varten on tehty edellä mainittuihin tietoihin pohjautuen valistunut arvaus, että Suomen yrityksiin kohdistuva kokonaisverotus olisi vuonna 2014 ja sitä seuraavina vuosina 25 %.

Investointilaskelmissa aika on merkittävä tekijä, kun arvioidaan useiden vuosien päähän ulottuvia tuloja ja menoja. Tällöin on huomioitava myös inflaatio. Yleisesti käytetty inflaatioindeksi on kuluttajahintaindeksi, joka viime vuosien ajan on ollut melko matala taantumasta johtuen. Vuosina 2006-2013 kuluttajahintaindeksi on Tilastokeskuksen (Kuluttajahintaindeksin vuosimuutokset 2014) mukaan vaihdellut Suomessa vuoden 2008 4,06 prosentista jopa nolnaan vuonna 2009, keskiarvon ollessa 2 %. Suomen viime vuosien kuluttajahintaindeksejä on esitetty taulukossa 9.12.

Taulukko 9.12. Suomen kuluttajahintaindeksi vuosina 2006-2010 verrattuna vuoden 2005 tasoon. (Kuluttajahintaindeksin vuosimuutokset 2014)

Vuosi	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Vuosimuutos (%)	0,9	1,6	2,5	4,1	0	1,2	3,4	2,8	1,5

Tämän työn yhteydessä tehtävissä laskelmissa käytetään vakiona pysyvää inflaatiota. Inflaatioprosentiksi on valittu Suomen viime vuosien keskiarvoinflaatiota mukailleen 2 %.

Eskalaattoreilla huomioidaan tärkeimpien kulu- tai tuottotekijöiden muutoksia ajan kuluessa, jos ne muuttuvat heikommin tai voimakkaammin kuin yleinen inflaatio. Tärkeimpiä kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä kaikissa tuotantolinjavaihtoehdoissa ovat energian hinta, työvoimakustannukset ja tuotteesta saatava hinta. Murskauksen käyttöenergiana on usein dieselpolttoaine, kun taas pellettituotantolinjat kuluttavat merkittävän määrän sähköä. Taulukkoon 9.13 on koottu keskeisimpien kustannustekijöiden vuosimuutoksia lähteistä FOEX Indexes Oy 2009 ja Energian hinnat 2014. Lisäksi liitteeseen 3 on koottu vuosimuutosten kuvaajat työvoimakustannusten, dieselöljyn ja yritysten- ja yhteisöasiakkaiden sähkön hinnan osalta. Polttoaineiden hintakehitys on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 9.13. Eräiden kustannustekijöiden sekä inflaation keskimääräisiä vuosimuutoksia vuosina 2007-2013.

Muuttuja	Keskimääräinen vuosimuutos	Huomioitavaa
Teollisuuspelletti	1,2 %	Hinta pysynyt melko vakaana
Metsähake ja -murske	7,7 %	Kasvu vakiintunut
Työvoimakustannukset	2,6 %	Teollisuuden työpaikat
Dieselöljy	5 %	Vuoden 2009 hintaromahdus leikattu pois
Sähkö	4 %	Yritys- ja yhteisöasiakkaat 2 000 - 19 999 MWh/vuosi

Inflaatio on viime vuosina ollut melko matalaa johtuen heikosta taloustilanteesta. Tulevaisuudessa tämä voi kuitenkin muuttua. Teollisuuspelletin hinta ja työvoimakustannukien keskimääräiset vuosimuutokset ovat melko samalla tasolla kuin yleinen inflaatio. Metsähakkeen hinta on ollut viime vuosina voimakkaassa nousussa mutta pysytellyt useamman vuoden samoissa lukemissa. Voimalaitosten maksukyky hakkeesta ja murskeesta ei ole näillä näkymin nousemassa ja voidaan olettaa, ettei vastaanlaista voimakasta nousua ole odotettavissa.

Käyttöenergialle otetaan tämän työn laskelmissa pieni 1 % eskalaattori, sillä sekä sähkön että dieselöljyn hinnat ovat olleet selvästi yleistä inflaatiota voimakkaammassa tasaisessa nousussa. Dieselöljyn hinta romahti voimakkaasti vuonna 2009 ja tämä piikki on leikattu vuosimuutoksen keskiarvosta pois, sillä se vääristäisi lukemaa liikaa. Ennen ja jälkeen vuoden 2009 hinnan nousu on ollut tasaista. Yritysassiakkaiden käyttämän sähkön hinta on myös noussut melko tasaisesti koko tarkastelujakson ajan.

10 TULOKSET

10.1 Kannattavuus

Kannattavuuden määrittämiseksi tuotantovaihtoehdoille laskettiin nettonykyarvo, sisäinen korkokanta sekä takaisinmaksuaika. Kannattavana pidettiin lähtökohtaisesti hankkeita, joiden nettonykyarvo on positiivinen ja sisäinen korkokanta vähintään 10 %.

10.1.1 Puumurske

Vaihtoehtojen 1.1 ja 1.2 investointilaskelmien tulokset on esitetty taulukossa 10.1. Korkokantana laskelmille käytettiin 5 %:a. Vaihtoehtoon 1.1 ei liittynyt investointikustannuksia eikä sille siksi ole määritetty sisäistä korkokantaa eikä takaisinmaksuaikaa.

Taulukko 10.1. Murskeen tuotantovaihtoehtojen kannattavuuslaskelmien tulokset. SKK = sisäinen korkokanta, TM - NA = takaisinmaksuaika nykyarvoon diskontatulla kassavirralla.

	Nettonykyarvo	SKK	TM - NA 5 %
VE1.1	7 279 694 €	-	-
VE1.2	9 844 987 €	213 %	1,00

Molemmat vertailluista vaihtoehdoista olivat todella kannattavia. Oman murskaimen hankkiminen on selvästi kannattavampaa kuin murskettaminen alihankintana. Ero vaihtoehtojen nettonykyarvoissa on noin 2,5 miljoonaa euroa. Mursketuotantoon ei ole mahdollista saada valtion investointitukea, sillä sitä ei myönnetä metsähakkeen ja teollisuuden kierrätyspuuhakkeen tuotantokaluston tai kierrätyspolttoaineiden tuotantokoneille (Työ- ja elinkeinoministeriö 2014).

Vaihtoehdoille laskettiin puumurskeen omakustannehinta, jonka katsottiin muodostuvan investointikustannuksen vuosittaisista poistoista sekä käyttökustannuksista eli huomiotta jätettiin kuljetuskustannukset ja myynnistä vähennettävät verot. Puumurskeen lämpöarvona käytettiin 13,3 MJ/kg. Tällöin omalla murskaimella valmistettuna murskeen omakustannehinnaksi muodostui 2,03 €/MWh tai 7,32 €/t ja alihankintana valmistetun murskeen omakustannehinnaksi 5,62 €/MWh tai 20,30 €/t. Korkeampaa omakustannehintaa käytettiin muiden tuotantovaihtoehtojen mursketuskustannuksien arviona.

10.1.2 Puupelletti

Pelletintuotantovaihtoehtojen nettonykyarvot, sisäinen korkokanta (SKK) sekä takaisinmaksuaika rahan nykyarvolla (TMA - NA) on esitetty taulukossa 10.2. Tunnusluvut on laskettu ilman investointitukea sekä täydellä investointuella, joka puupellettituotantoon on 30 %.

Taulukko 10.2. Eri pelletintuotantovaihtoehtojen investointilaskelmien avainlukuja valtion myöntämällä investointituella ja ilman. SKK = sisäinen korkokanta, TM - NA = takaisinmaksuaika nykyarvoon diskontatulla kassavirralla.

	Ilman investointitukea			Investointituettuna, täysi tuki (30 %)		
	Nettonykyarvo	SKK	TM - NA	Nettonykyarvo	SKK	TM - NA
VE2.1	10 960 447 €	54 %	2,00	11 604 395 €	78 %	2,00
VE2.2	10 378 814 €	33 %	4,00	11 456 103 €	49 %	3,00
VE2.3	8 544 901 €	36 %	3,00	9 339 359 €	53 %	2,00
VE2.4	7 436 650 €	28 %	4,00	8 489 425 €	49 %	3,00
VE2.5	7 590 342 €	24 %	5,00	8 930 957 €	36 %	3,00
VE2.6	7 139 913 €	26 %	4,00	8 287 251 €	39 %	3,00

Taulukossa olevista vaihtoehdoista VE2.1 ja VE2.2 ovat keskenään vertailukelpoisia mutta niiden lähtöoletukset poikkeavat selvästi muista tuotantovaihtoehdoista, sillä ne eivät ota lainkaan huomioon lämmöntuoton kuluja. Vaihtoehdoissa 2.3, 2.4, 2.5 ja 2.6 on investoitu lisälämmityslaitokseen ja huomioitu lisäpolttoaineen käyttö tuotannossa. Kaikissa vaihtoehdoissa on huomioitu käytössä olevissa raaka-ainemäärissä alue- ja lämmitysjärjestelmän nykyisten lämpökuormien lämmittämiseen tarvittava lisäpolttoainetarve.

Sisäinen korkokanta oli hieman korkeampi vaihtoehdoissa, joissa kuivuri ja tuotanto ovat ympäri vuoden käytössä. Kaikissa tuotantovaihtoehdoissa päästöön melko pian omilleen, takaisinmaksuajat vaihtelevat välillä 2 - 5 vuotta.

Taulukon 10.2 lukujen perusteella nähdään, että vaihtoehto 2.1 on 2.2:ta kannattavampi. Lisälämmityksen kulut huomioivista vaihtoehdoista kannattavin on VE 2.3, jos investointitukea ei saada. Jos investointitukea saadaan, vaihtoehto 2.5 on melkein yhtä kannattava nettonykyarvon mukaan kuin VE 2.3, mutta sisäinen korkokanta on selvästi pienempi. Investointitukea ei kuitenkaan todennäköisesti saada projekteihin, joiden investointikustannus on alle 5 miljoonaa euroa (Työ- ja elinkeinoministeriö 2014), joka voi hyvinkin alittaa alle 100 000 tonnia vuodessa tuottavien pellettitehtaiden osalta.

10.1.3 Paahtopelletti

Paahtopelletin tuotantovaihtoehtojen nettonykyarvot, sisäinen korkokanta (SKK) ja takaisinmaksuaika rahan nykyarvolla (TMA - NA) on esitetty taulukossa 10.3. Kaikissa vaihtoehdoissa on huomioitu käytössä olevissa raaka-ainemäärissä alue- ja lämmitysjärjestelmän nykyisten lämpökuormien lämmittämiseen tarvittava lisäpolttoainetarve.

Taulukko 10.3. Eri paahtopelletintuotantovaihtoehtojen investointilaskelmien avainlukuja valtion myöntämällä investointituella ja ilman. SKK = sisäinen korkokanta, TMA - NA = takaisinmaksuaika nykyarvoon diskontatulla kassavirralla.

	Ilman investointitukea			Investointituettuna, täysi tuki (40 %)		
	Nettonykyarvo	SKK	TMA - NA	Nettonykyarvo	SKK	TMA - NA
VE 3.1	5 607 295 €	15 %	8,00	8 114 557 €	27 %	4,00
VE 3.2	3 994 530 €	11 %	9,00	6 898 582 €	22 %	5,00
VE 3.3	5 606 609 €	15 %	7,00	8 159 559 €	28 %	4,00
VE 3.4	-700 610 €	4 %	-	4 243 623 €	12 %	9,00
VE 3.5	1 621 098 €	7 %	15,00	6 019 876 €	15 %	7,00
VE 3.6	5 170 319 €	14 %	8,00	7 955 931 €	26 %	4,00

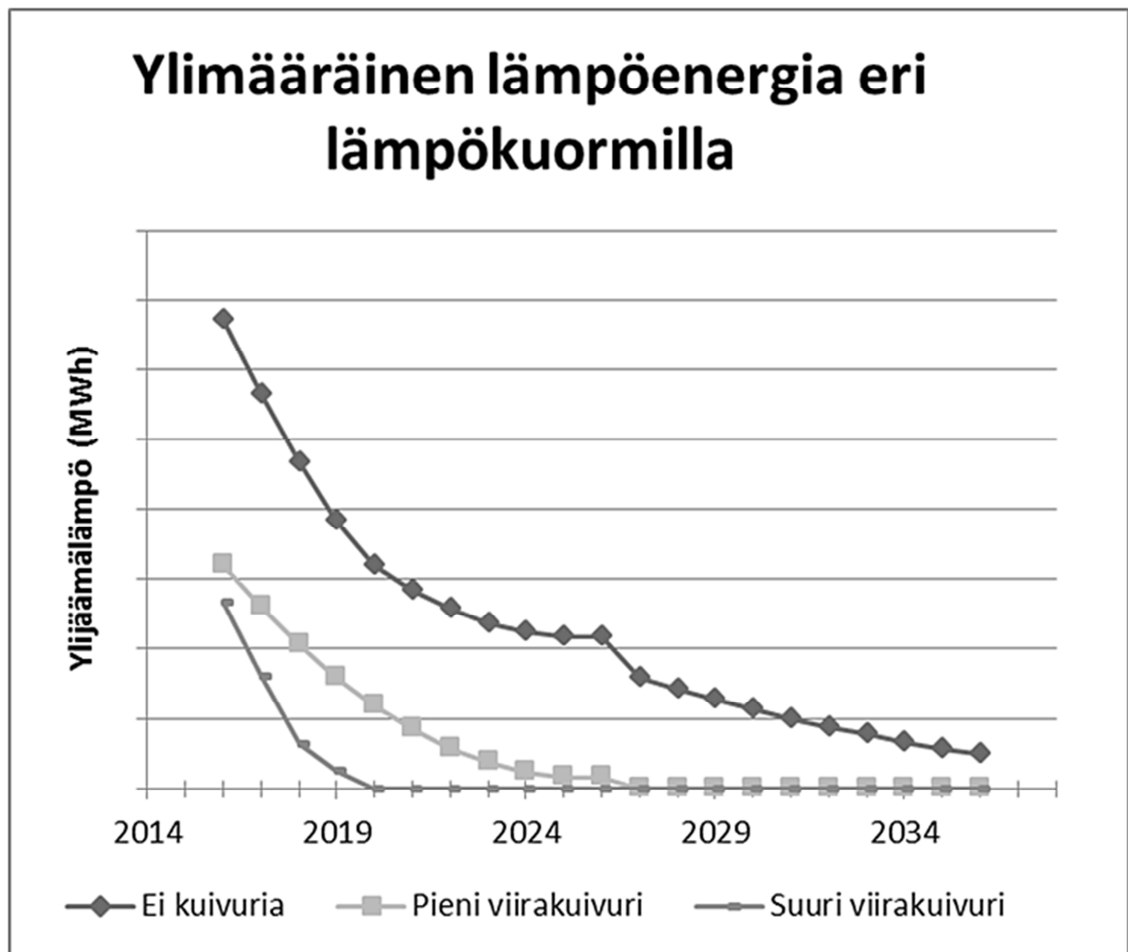
Kannattavimpia tuotantovaihtoehtoja olivat 3.1, 3.3 ja 3.6. Nämä kolme kannattavinta vaihtoehtoa edustivat hyvin erilaisia tapoja järjestää tuotanto. Huomion arvoisinta ehkä onkin tarkastella heikoimman tuottavuuden vaihtoehtoja. Erityisesti torrefiointiyksikön mitoittaminen suurelle materiaalivirralla ja sen käyttäminen vain 6 kk vuodesta osoittautui hyvin kalliiksi tavaksi toteuttaa tuotanto. Vaihtoehdon 3.4 nettonykyarvo painui jopa negatiiviseksi, kun investointitukea ei huomioitu. Torrefiointireaktori edustaa hyvin merkittävää osaa investointikustannuksista ja sen mitoituksen kaksinkertaistaminen tuo niihin huomattavan lisäyksen.

Paahtopelletin tuotantolaitosten investointikustannukset ovat torrefiointitekniikan vuoksi huomattavasti korkeammat kuin puupellettituotannon vastaavat ja paahtopelletti-investointille voidaan huomattavasti todennäköisemmin myöntää investointitukea. Koska torrefiointi on uutta tekniikkaa, investointituen maksimimäärä on 40 % investointikustannuksesta. Investointituen huomioiminen vaikutti voimakkaasti kaikkiin laskettuihin tunnuslukuihin. Tämä ei ole yllättävää, sillä kaikkien käsiteltyjen vaihtoehtojen investointikustannukset olivat melko korkeat ja investointituen maksimimäärä on melko suuri.

Kuivurin osuus investointikustannuksista on vähemmän merkittävä, mistä kertoo myös se, että tuotantovaihtoehtojen, joiden ainoa ero on kuivurin tyyppi, kannattavuudessa ei ole merkittävää eroa. Lisälämmityksen järjestäminen erillisessä lämmöntuottoyksikössä vaihtoehdoissa 3.2 ja 3.4 heikensi selvästi niiden kannattavuutta verrattuna vastaaviin vaihtoehtoihin 3.3 ja 3.5. Lämmöntuoton järjestäminen samassa yksikössä torrefiointikaasun polton kanssa voi kuitenkin edellyttää tässä huomioimattomia lisäyksiä rakennus- ja suunnittelukustannuksiin.

10.2 Hukkalämmön minimointi

Investointilaskelmalukujen lisäksi vaihtoehtojen vertailussa otettiin huomioon aluelämmitysjärjestelmän hukkalämmön hyödyntäminen. Järjestelmän ylimääräinen lämpöenergia eri vaihtoehtojen lämpökuormilla on esitetty kuvassa 10.1.



Kuva 10.1. Aluelämmitysjärjestelmän hukkalämpö eri kuivurivaihtoehdoilla.

Eri vaihtoehtojen erot ylijäämälämmön hyödyntämisessä johtuvat kuivurivalinnoista. Vaihtoehtojen 2.3 ja 3.1 savukaasulämmitteinen rumpukuivuri ei hyödynnä aluelämmitysjärjestelmää lainkaan. Muiden, viirakuivuria hyödyntävien vaihtoehtojen ero tulee ennen kaikkea siitä, että suurempi viirakuivuri on suuremmalla lämpötehollaan pienempää viirakuivuria tehokkaampi kesän hukkalämmön hyödyntäjä. Talvella hukkalämpöä ei juuri ole.

Aluelämmitysjärjestelmässä syntyvä lämpö saadaan kaikkein tehokkaimmin hyödynnettyä vaihtoehdoissa suurta viirakuivuria hyödyntävissä vaihtoehdoissa 2.2, 2.5 ja 2.6 sekä 3.4, 3.5 ja 3.6. Myös pientä viirakuivuria hyödyntävät vaihtoehdot 2.1 ja 2.4 sekä 3.2 ja 3.3 ovat hyviä vaihtoehtoja rumpukuivuria hyödyntäviin tai kuivurittomiin vaihtoehtoihin verrattuna, jotka vastaavat käytännössä nykytilannetta ja nollavaihtoehtoa, jolloin ei tehdä muutoksia lämpökuormaan. Jos kuivurin käyttöaika tehostetaan entisestään esimerkiksi ostamalla ylimääräistä raaka-ainetta puu- tai paahtopelletintuotantoon, saadaan ylijäämälämpö hyödynnettyä vieläkin paremmin. Pitkällä aikavälillä käänttöpuolena on joidenkin paremmin hukkalämpöä hyödyntävien vaihtoehtojen osalta korkeampi lisäpolttoaineen tarve, kuten on esitetty kuvissa 9.2 ja 9.3, kun aluelämmitysjärjestelmän oma lämmöntuottokyky heikkenee.

10.3 Herkkyysanalyysi

10.3.1 Puumurske

Herkkyysanalyysissä tutkittiin investoinnin pitoajan, käyttökustannusten, raaka-aineen määrän, polttoaineesta saatavan porttihinnan ja kuljetuskustannusten vaikutusta investoinnin nettonykyarvoon. Puumurskeen herkkyysanalyysin tulokset on esitetty kuvaajina liitteessä 4. Kumpikaan tarkastelluista investoinneista ei muuttunut kannattamattomaksi, kun valittuja muuttujien arvoja muutettiin 50 - 150 %.

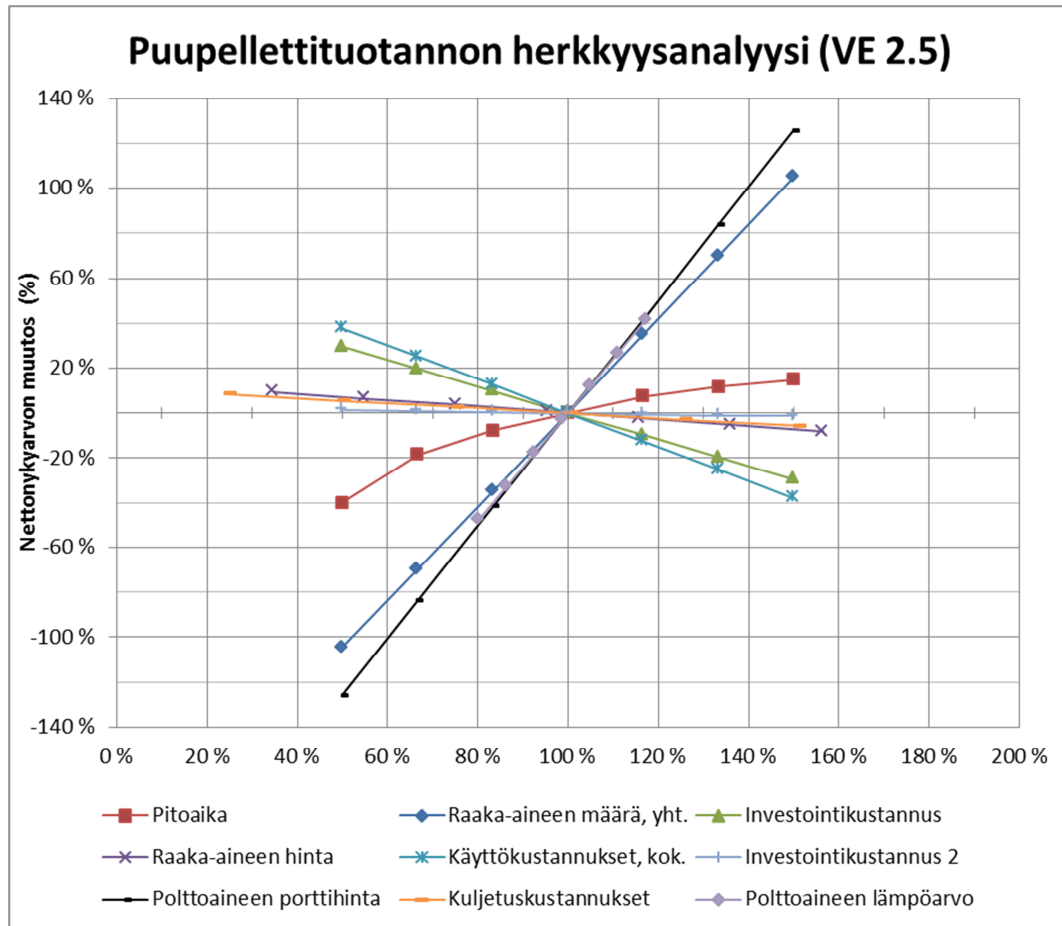
Vaihtoehdon 1.1 nettonykyarvo oli melkoisen herkkä kaikkien lähtöarvojen muutoksille, etenkin verrattuna vaihtoehtoon 1.2. Voimakkaimmin vaikuttivat polttoaineesta saatava porttihinta sekä raaka-aineen määrä. Vaihtoehdossa 1.2 merkittävän muutoksen investoinnin nettonykyarvoon tekivät raaka-ainemäärän ja polttoaineen lämpöarvon ja porttihinnan muutokset. Myös pitoaika vaikutti kannattavuuteen voimakkaasti. Käyttökustannusten, kuljetuskustannusten ja investointikustannusten muutos teki melko pienen muutoksen nettonykyarvoon.

Jopa hyvin lyhyellä, alle viiden vuoden pitoajalla oman murskaimen hankkiminen pysyi edullisempänä vaihtoehtona. Vasta alle 5 000 tonnin vuosittaisilla raaka-ainemäärillä murskettaminen alihankintana muuttui edullisemmaksi vaihtoehdoksi.

Herkkyysanalyysin tulosten perusteella raaka-ainepohjan laajentaminen on tehokas tapa nostaa mursketuotannon tuottoja. Kosteus vaikuttaa murskeen lämpöarvoon voimakkaasti ja sen minimoiminnalla voidaan myös vaikuttaa voimakkaasti tuotannon kannattavuuteen. Lämpöarvo liittyy olennaisesti myös polttoaineesta saatavaan porttihintaan voimallaisella, joka oli kolmas voimakkaimmin mursketuotannon kannattavuuteen vaikuttavista muuttujista.

10.3.2 Puupelletti

Puupellettituotannon herkkyysanalyysissä tutkittavia muuttujia olivat investoinnin pitoaika, käytettävissä olevan raaka-aineen määrä, investointikustannus, mahdollinen lisälämmityslaitoksen laajennuksen investointikustannus, raaka-aineesta maksettava hinta, käyttökustannukset, polttoaineesta saatava porttihinta voimallaisella, kuljetuskustannukset sekä polttoaineen lämpöarvo. Kaikkien tuotantovaihtoehtojen herkkyys eri muuttujille oli hyvin samanlainen. Kuvassa 10.2 on esitetty vaihtoehdon 2.5 herkkyysanalyysin tulokset, jotka ovat sovellettavissa riittävällä tarkkuudella myös muihin tarkasteltuihin puupelletintuotantovaihtoehtoihin. Kokonaisuudessaan vaihtoehdot 2.1 ja 2.2 olivat vähiten herkkiä lähtöarvojen muutoksille ja vaihtoehto 2.3 vähemmän herkkä kuin vaihtoehdot 2.4, 2.5 ja 2.6.



Kuva 10.2. Puupellettituotannon herkkyyksanalyysi, esimerkkinä vaihtoehto 2.5. Investointikustannus 2 kuvaa lisälämmityslaitoksen laajennuksen hintaa.

Merkittävimmän muutoksen investoinnin nettoarvoon toi kaikissa vaihtoehdoissa valmistettavan polttoaineen porttihinna. Vaikutuksen suuruus vaihteli eri prosessivaihtoehdoissa, suurimmillaan se oli vaihtoehdossa 2.6, jossa 10 % muutos polttoaineen porttihinnaan toi noin 30 % muutoksen investoinnin nettoarvoon. Pienimmillään vaikutus oli vaihtoehdoissa 2.1 ja 2.2 joissa 10 % muutos polttoaineen porttihinna toi noin 20 % muutoksen investoinnin nettoarvoon. Polttoaineen porttihinna vaikuttaa siis jokaisessa prosessivaihtoehdossa paljon, mutta sen hinta on ainakin historiallisesti ollut melko vakaa. Jos polttoaineen myyntihinnasta aletaan tinkiä tai sitä kuljetetaan pitkiä matkoja, on huomioitava, että kaikki tarkastellut investoinnit alkavat tulla kannattamattomiksi, kun polttoaineen myyntihinta voimalaitoksen portilla laskee 15 - 20 €/MWh. Tyypillisesti teollisuuspellettiä on myyty hintaan noin 30 €/MWh.

Melkein yhtä tärkeä tekijä oli polttoaineen lämpöarvo. Siinäkin ei kuitenkaan ole syytä olettaa tapahtuvan merkittävää muutosta tässä arvioidusta. Muutos 16 MJ/kg:sta 15 tai 17 MJ/kg:een voi vielä olla mahdollista, mutta suurempaa muutosta tuskin on odotettavissa, ellei käytetä esimerkiksi erityisen lahonnutta puuta raaka-aineena. Lämpöarvon muutosta ylöspäin rajoittaa raaka-aineiden kuivalämpöarvo, joka on 18 MJ/kg paikkeilla. Kosteutta sisältävän lopputuotteen lämpöarvo ei voi nousta tätä korkeammaksi.

Kolmanneksi merkittävin muuttuja oli raaka-aineen määrä. Lähes kaikki tarkastellut investointiprojektit tulivat kannattamattomiksi, kun raaka-aineen määrä väheni puoleen suunnitellusta. Kannattamattomaksi luokiteltiin projektit, joiden nettonykyarvo oli negatiivinen tai sisäinen korkokanta alle 10 %. Raaka-aineen määrään voidaan vaikuttaa raaka-ainetta ostamalla, mutta ostetulla raaka-aineella ei saada aivan yhtä suurta vaikutusta, sillä se nostaa kuluja. Kierrätyspuun hankinnan laajentaminen on kuitenkin polttoainetuotannon kannalta erittäin toivottavaa. Toisaalta hankintamäärien mahdolliset muutokset pitää huomioida laitteiden mitoituksessa. Ensiarvoisen tärkeää on laadunhallinta, jotta puujätteestä saataisiin polttoainetuotannossa hyödynnettäväksi mahdollisimman suuri osa.

Neljänneksi vaikuttavimmat muuttujat olivat laitoksen pitoaika ja kokonaiskäyttökustannukset. Pitoaika on ainoa tarkastelluista muuttujista, joka ei käyttyä lineaarisesti. Osassa vaihtoehtoja pitoaika oli merkittävämpi tekijä kuin vuosittaiset kokonaiskäyttökustannukset, osassa ei. Pitoajassa on kuitenkin vähemmän epävarmuutta kuin kokonaiskäyttökustannuksissa. Pellettitehtaalle arvioitu 20 vuoden pitoaika tuskin osoittautuu lyhyemmäksi kuin 15 vuotta jos laitteiden kuluminen on sen tärkein määräävä tekijä. Pitoajan lyheneminen 15 vuoteen on 25 % muutos käytettyyn lähtöarvoon. Käyttökustannukset koostuvat useasta eri tekijästä, sähkönkulutuksesta ja hinnasta, työvoimakustannuksista, vakuutuksista, korjauskustannuksista ja niin edelleen. Jokainen niistä voi muuttua paljonkin tässä työssä arvioidusta, erityisesti pitkällä aikavälillä, joten käyttökustannusten muutos sisältää ehkä suurimman riskin tässä arvioiduista tekijöistä.

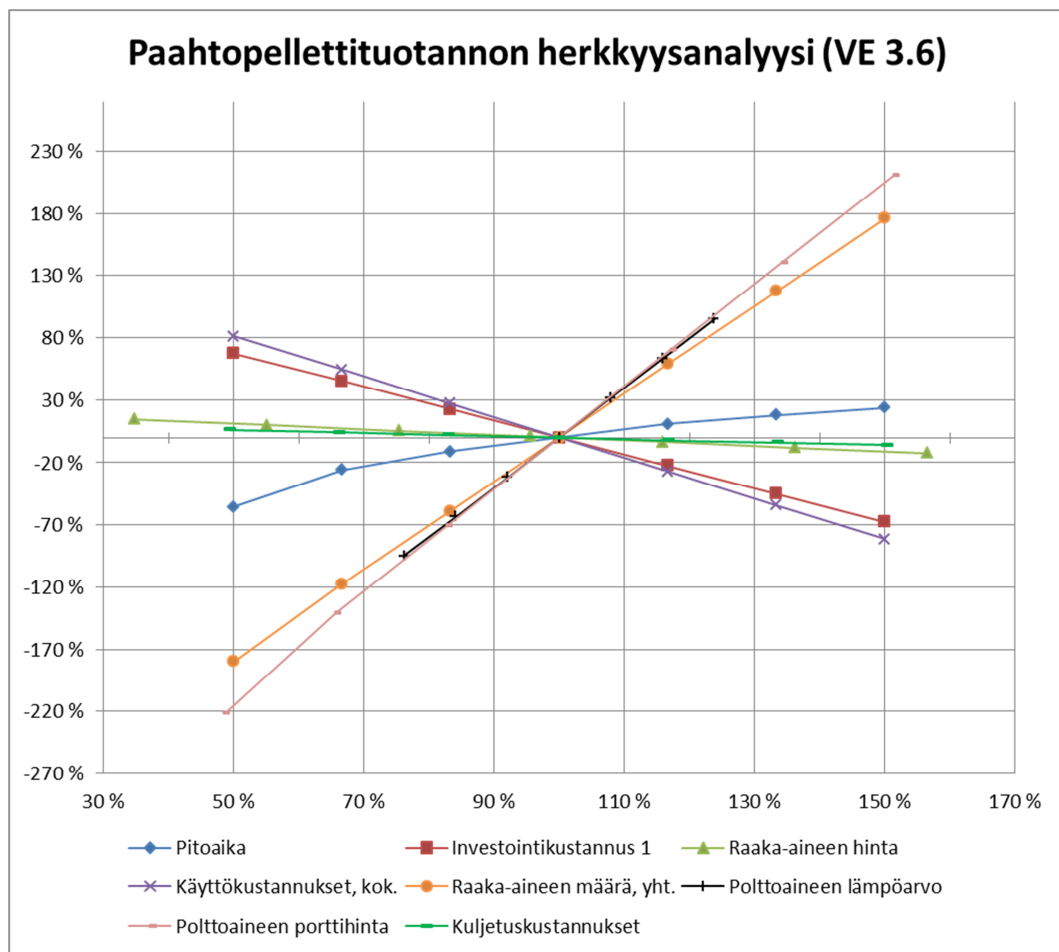
Investointikustannuksilla oli melko pieni merkitys kaikissa prosessivaihtoehdoissa. Muita muuttujia, joilla oli vähäisempi merkitys investoinnin nettonykyarvoon, olivat raaka-aineen hinta, kuljetuskustannukset sekä mahdollisen lisälämmityslaitoksen investointikustannukset, joka on herkkyyksianalyysin kuvaajissa nimellä investointikustannus 2. Näiden muuttujien pieni merkitys selittyy sillä, että niiden osuus kokonaiskustannuksista on pieni.

Investoinnin kannattavuuden parantamiseksi tärkeimmät toimenpiteet liittyvät paremman porttihinnan saamiseen polttoaineesta, polttoaineen lämpöarvon maksimointiin, raaka-ainemäärän nostoon sekä käyttökustannusten minimointiin. Polttoaineen lämpöarvoon vaikuttaa raaka-aineen lämpöarvo, joka voi heiketä varastoinnin yhteydessä esimerkiksi biologisen hajoamisen ja homehtumisen kautta. Myös lisäainevalinnoilla voidaan vaikuttaa lämpöarvoon. Koska raaka-aineen hinta ei ole voimakkaimmin investointiin vaikuttava tekijä, raaka-aineen osto olisi todennäköisesti kannattavaa, erityisesti ensimmäisinä vuosina, kun raaka-aineen kuivaus voidaan vielä pitkälti tehdä aluelämmitysjärjestelmän nykyisen lämmöntuottokapasiteetin turvin.

10.3.3 Paahtopelletti

Paahtopellettituotannon herkkyyksianalyysissä tutkittavia muuttujia olivat investoinnin pitoaika, käytettävissä olevan raaka-aineen määrä, investointikustannus, mahdollinen lisälämmityslaitoksen laajennuksen investointikustannus, raaka-aineesta maksettava

hinta, käyttökustannukset, polttoaineesta saatava porttihinta voimalaitoksella, kuljetuskustannukset sekä polttoaineen lämpöarvo. Kaikkien tuotantovaihtoehtojen herkkyys eri muuttujille oli hyvin samanlainen. Vaihtoehto 3.4 oli ainoa, jossa investointikustannus vaikutti kannattavuuteen hieman käyttökustannuksia enemmän. Kuvassa 10.3 on esitetty vaihtoehdon 3.6 herkkyysanalyysin tulokset, jotka ovat sovellettavissa riittävällä tarkkuudella myös muihin tarkasteltuihin puupelletintuotantovaihtoehtoihin. Herkkyysanalyysin perustapauksessa oletettiin investointituen olevan 0 %, mutta kannattavuutta tutkittiin myös täydellä investointituella (40 %). Kannattavuuden määritelmänä pidettiin, että nettonykyarvo on oltava positiivinen ja sisäisen korkokannan vähintään 10 %.



Kuva 10.3. Paahtopellettituotannon herkkyysanalyysi, esimerkkinä vaihtoehto 3.6. Investointikustannus 2 kuvaa lisälämmityslaitoksen laajennuksen hintaa.

Eniten nettonykyarvoon vaikuttivat polttoaineen porttihinta, lämpöarvo sekä raaka-aineen määrä. Toiseksi eniten vaikuttivat investointi- ja käyttökustannukset. Pitoajan, kuljetuskustannuksen ja raaka-aineen hinnan muutokset eivät tuoneet yhtä merkittävää muutosta vaihtoehtojen nettonykyarvoon.

Polttoaineen lämpöarvon ei ole fyysisesti mahdollista muuttua paljokaan 10 % enempää kumpaankaan suuntaan. Polttoaineen lämpöarvoon voidaan kuitenkin vaikuttaa hyvällä raaka-aineen varastoinnilla sekä torrefioinnin prosessiparametreilla.

Raaka-aineen määrän väheneminen yli 20 % lähtöarvosta painoi kaikkien kannattavimpienkin vaihtoehtojen nettonykyarvot pakkasen puolelle, monilla jo aikaisemmin. Myös investointituettuna raaka-aineen määrä oli hyvin merkittävä ja vastaava raja-arvo oli väheneminen noin 30 %:lla lähtöarvosta. Riittävän suuresta raaka-ainepohjasta onkin pidettävä hyvää huolta. Myös raaka-aineostot voivat olla kannattavia, erityisesti, jos kuivaukseen on hyödynnettävissä aluelämmitysjärjestelmän ylijäämälämpöä. Raaka-ainemäärän kasvattaminen nostaa voimakkaasti nettonykyarvoa kaikissa vaihtoehdoissa.

Polttoaineen porttihinnan painuminen alle 35 €/MWh laski kaikkien vaihtoehtojen investointituettomat nettonykyarvot negatiivisiksi, joillain tuotantovaihtoehdoilla jo aiemmin. Investointituettuna kaikkein kannattavimmissa vaihtoehdoissa voitiin jäädä voitolle vielä porttihinnalla 26 €/MWh. Näitä voidaan pitää paahtopelletin myynnin minimihintana tai –katteena kuljetuskustannusten jälkeen.

Käyttökustannukset vaikuttivat investointikustannuksia enemmän tuotantovaihtoehdon kannattavuuteen kaikissa muissa paitsi vaihtoehdoissa 3.4 ja 3.5, joissa investointikustannuksen muutos toi hieman suuremman muutoksen investoinnin nettonykyarvoon. Käyttökustannusten raju, noin 20 – 50 %, kasvu heikensi investointeja merkittävästi. Kaikkien vaihtoehtojen sisäinen korkokanta jäi alle 10 % kun käyttökustannukset nousivat 50 %, joidenkin jo huomattavasti aiemmin. Investointituen saaminen helpotti tätä huomattavasti, täydellä investointituella vain muutama vaihtoehto jäi kannattamattomaksi käyttökustannusten nousun takia ja vasta, kun ne nousivat noin 50 %.

11 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaikista tarkastelluista polttoaineista löytyi prosessijärjestelyjä, jotka olivat selvästi tarpeeksi kannattavia investointipäätöksen tekemiseen. Kannattavuus heikkeni tuotantoteknologian mutkistuessa. Kannattavinta oli murskeen, sitten puupelletin ja vähiten kannattavinta paahtopelletin valmistus. Kunkin polttoaineen kannattavimmat tuotantojärjestelyt ylsivät yli 5 miljoonan euron nettohyötyarvoon, 15 % sisäiseen korkokantaan ja korkeintaan 8 vuoden takaisinmaksuaikaan ilman investointitukea. Jos investointitukea myönnetään, luvut paranevat merkittävästi. Kaikkien polttoainevaihtoehtojen kannattavimmat järjestelyt ylittävät tällöin 8 miljoonaa euroa nettohyötyarvossa, 26 % sisäisessä korkokannassa ja takaisinmaksuaika on korkeintaan neljä vuotta. Kannattavuutta nosti kirjallisuudessa esiteltyihin tapauksiin verrattuna ennen kaikkea materiaalin hyvin alhainen hankintakustannus verrattuna neitseellisiin puupolttoaineiden raaka-aineisiin metsätähdehakeeseen tai runkopuuhun.

Näiden tulosten valossa vähintään puumurskeen valmistus ja myynti kannattaisi aloittaa heti kun mahdollista. Murskeen valmistus on välttämätön esivaihe sekä puu-että paahtopelletin valmistukselle, joten mitä polttoainetta aletaankin tuottaa, niin kaikkiin vaihtoehtoihin kuuluu murskaaminen. Puumurskeen valmistus oli kaikkein kannattavinta investointilaskelmien valossa, mutta energiatehokkuus ja markkinat huomioiden, se ei välttämättä ole paras ratkaisu.

Alueen energiatehokkuutta voidaan nostaa merkittävästi valitsemalla tuotantolinja, jossa on viirakuivuri. Se on mahdollista yhdistää aluelämmitysjärjestelmään, jolloin saadaan hyödynnettyä järjestelmän tällä hetkellä hyödyntämätöntä lämpöä. Tehokkainta tämä oli suurta viirakuivuria hyödyntävissä vaihtoehtoissa, joista kannattavin oli puupelletin valmistuksen vaihtoehto 2.5, mutta myös vaihtoehdot 2.4, 3.3 ja 3.6 olivat hyvin kannattavia. Prosessivaihtoehdot numeroitiin polttoainetyypin mukaan ja tarkastellut vaihtoehdot on esitelty vielä kerran tiivistetysti taulukossa 11.1.

Suurimmat riskit tuotantovaihtoehtoissa ovat polttoaineesta saatava hinta ja raaka-ainemäärä. Voimalaitosten puustamaksukyky murskeen osalta riippuu yleisesti pääasiassa syöttötariffien tasosta kun päästöoikeuksien hinta on ollut hyvin alhainen. Kierrätyspuumurske ei kuitenkaan kuulu syöttötariffin piiriin toisin kuin metsätähdehake ja risumurske. Kierrätyspuumurskeen etuna on tosin sen huomattava kuivuus, joka parantaa sen houkuttavuutta polttoaineena. Metsätähdehakeen poltto on viime vuosina vähentynyt voimakkaasti ja tämä vähennys voi vaikuttaa myös kierrätyspuumurskeen hankintamääriin. Ylipäätään ympäristö- ja ilmastopolitiikka tuo merkittävää epävarmuutta polttoaineiden hintoihin ja sitä kautta riskiä tuotettavan polttoaineen valintaan.

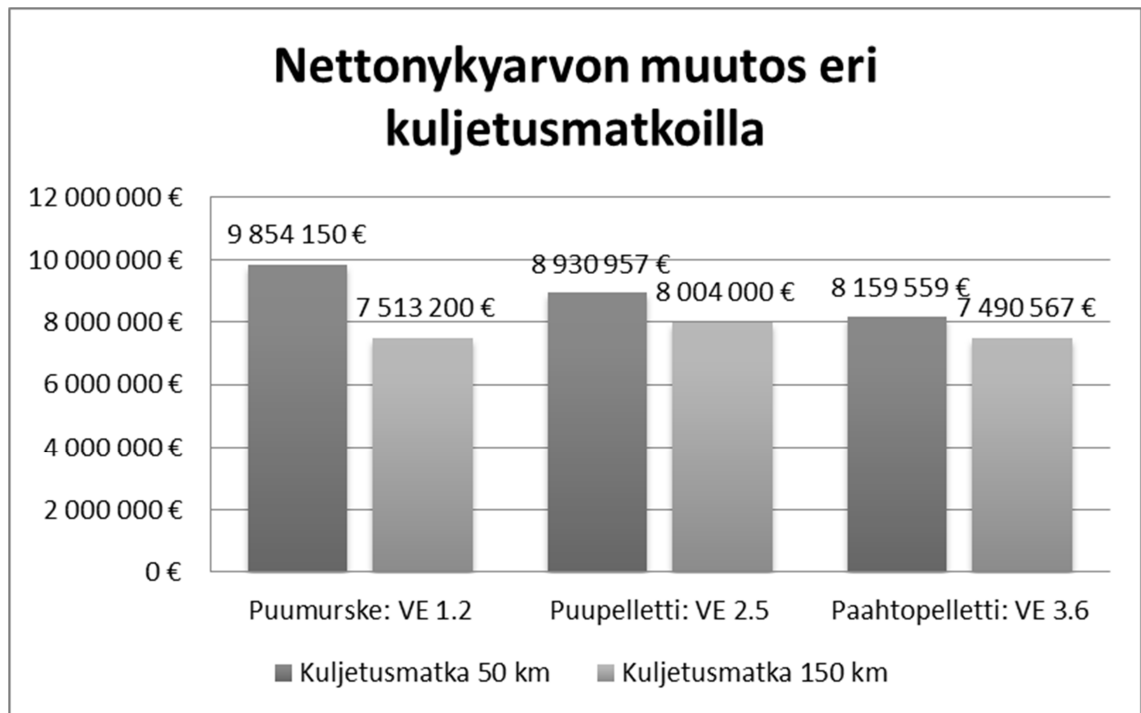
Taulukko 11.1. Tarkastellut tuotantoprosessivaihtoehdot, ALJ = Aluelämmitysjärjestelmä.

Tunnus	Polttoaine	Kuivuri	Käyttöaika	Lisätiedot
VE 1.1	Murske	-	4-6 kk/a	Valmistus alihankintana
VE 1.2	Murske	-	4-6 kk/a	Valmistus omalla murskaimella
VE 2.1	Puupelletti	Viirakuivuri	11kk/a	Rajaton ALJ kapasiteetti
VE 2.2	Puupelletti	Viirakuivuri	6kk/a	Rajaton ALJ kapasiteetti
VE 2.3	Puupelletti	Rumpukuivuri	11kk/a	Rajattu ALJ kapasiteetti, lisälämmitys
VE 2.4	Puupelletti	Viirakuivuri	11kk/a	Rajattu ALJ kapasiteetti, lisälämmitys
VE 2.5	Puupelletti	Viirakuivuri	6kk/a	Rajattu ALJ kapasiteetti, lisälämmitys
VE 2.6	Puupelletti	Viirakuivuri	11kk/a + 6kk/a	Rajattu ALJ kapasiteetti, lisälämmitys
VE 3.1	Paahtopelletti	Rumpukuivuri	11kk/a	Ei ALJ-kytkentää
VE 3.2	Paahtopelletti	Viirakuivuri	11kk/a	ALJ-kytkentä, erillinen lisälämmityslaitos
VE 3.3	Paahtopelletti	Viirakuivuri	11kk/a	ALJ-kytkentä, integroitu lisälämmitys
VE 3.4	Paahtopelletti	Viirakuivuri	6kk/a	ALJ-kytkentä, erillinen lisälämmityslaitos
VE 3.5	Paahtopelletti	Viirakuivuri	6kk/a	ALJ-kytkentä, integroitu lisälämmitys
VE 3.6	Paahtopelletti	Viirakuivuri	11kk/a + 6kk/a	ALJ-kytkentä, integroitu lisälämmitys

Kotitalouspelletin hinta on vajosi vuoden 2011 tienoilla niin alas, että Vapon oli suljettava tehtaitaan (Etelä-Suomen sanomat 2011). Synä pidettiin muun muassa koti- maista ylituotantoa ja siihen johtanutta päästökaupan epäonnistumista (Kouvola sanomat 2012). 2014 uusia pellettilinjoja on perustettu (Yle uutiset 3/2014) ja vanhoja on avattu uudestaan (Yle uutiset 6/2014). Kaikki tarkastellut puupelletti-investoinnit alkavat tulla kannattamattomiksi, kun polttoaineen myyntihinta voimalaitoksen portilla laskee 15 - 20 €/MWh. Tyypillisesti teollisuuspellettiä on myyty hintaan noin 30 €/MWh.

Paahtopellettiä ei ole paljon markkinoilla mutta tuotanto voi muuttua kannattamattomaksi jo polttoainehinnan vajotessa alle 35 €/MWh. Investointituettuna kaikkein kannattavimmissa vaihtoehtoisissa voitiin jäädä voitolle vielä porttihinnalla 26 €/MWh. Tätä voitaneen pitää paahtopelletin myynnin minimihintana tai -katteena kuljetuskustannusten jälkeen. Paahtopelletin hintaan liittyy samoja poliittisia riskejä kuin muihinkin polttoaineisiin. Toisaalta paahtopellettivalmistajia on toistaiseksi niukasti, joten kilpailu on vielä vähäistä.

Polttoaineista saatavaan hintaan vaikuttavat myös kuljetuskustannukset. Pitkillä etäisyyksillä investointihankkeiden keskinäinen kannattavuus muuttuu hieman. Tätä on havainnollistettua kuvassa 11.1, jossa on esitetty kustakin polttoainetyypistä jokin kannattavimmista tuotantovaihtoehtoisista kahdella eri polttoaineen kuljetusmatkalla, 50 km tai 150 km.



Kuva 11.1. Polttoainevaihtoehtojen nettonykyarvo eri polttoaineen kuljetusmatkoilla.

Laskelmissa on oletettu, että porttihinta eri voimalaitoksilla on sama, jolloin kuljetusmatkan kasvu vähentää suoraan polttoaineesta saatavaa katetta. Kuvasta nähdään, että pitkällä kuljetusmatkalla murskeen kannattavuus laskee niukasti vaihtoehdoista heikoimmaksi. Kuljetusmatka vaikuttaa vähiten paahtopelletin kannattavuuteen. Taloudellinen kuljetusmatka on suorassa yhteydessä asiakasmarkkinoiden laajuuteen.

Toinen merkittävä tuotannon kannattavuuteen vaikuttava tekijä oli raaka-aineen määrä. Raaka-ainepohjaa voi olla kannattavaa laajentaa jopa metsätähdehaketta ostamalla ainakin pellettituotannoissa, riippuen hieman tuotantotilanteesta. Erityisen kannattavaa lisäraaka-aineen ostoa on, jos kuivaukseen on käytettävissä lämpöä aluelämmitysjärjestelmästä jolloin lisäpolttoainetarve ei kasva. Toisaalta raaka-ainepohjan riittävästä on pidettävä hyvää huolta ja ennen kaikkea laadunhallinta on ensiarvoisen tärkeää. Jos raaka-aineen sekaan joutuu esimerkiksi kyllästettyä puuta lajitteluvirheen takia, erityisesti raskasmetallipitoisuus suuressakin erässä nousee merkittävästi ja suurikin raaka-aine-erä voi olla käyttökelvotonta tai suuri määrä jo jalostettua polttoainetta on luokiteltava uudelleen kierrätyspolttoaineeksi jolloin siitä saatava hinta laskee merkittävästi.

Muita riskejä ovat pelletöintimatriisin valinta ja torrefiointitekniikka. Sekalainen, vaihteleva raaka-ainepohja voi tuottaa ongelmia puupelletin valmistuksessa sopivan matriisin ja prosessiparametrien määrittämisessä. Torrefiointitekniikassa esimerkiksi torrefiointikaasu voi olla hyvin korrodoivaa jos raaka-aineessa on paljon kemiallisia epäpuhtauksia. Ylipäätään uuden tekniikan hyödyntämisessä tulee todennäköisemmin ongelmia kuin vanhan ja koetellun.

Mahdolliset markkinat puupolttoaineille ovat todella suuret. Wilen et al. (2012) arvioivat, että jos koko Euroopan hiilivoimalaitoksista päätettäisiin vähentää hiilen kuluusta 5 % korvaamalla hiiltä puupelletillä, Euroopan pellettituotannon pitäisi kolminker-

taistua kulutuksen kattamiseksi. Kun otetaan huomioon, että paahtopelletillä on mahdollista korvata jopa 50 % hiilivoimalaitosten polttoainetarpeesta, eurooppalaiset ja pelkätään suomalaisetkin markkinat ovat valtavat jos hiilen vähentäminen otetaan voimakkaasti tavoitteeksi. Esimerkiksi Helsingin energia on jo ottanut tavoitteekseen hiilen käytön voimakkaan vähentämisen (Hiilineutraali tulevaisuus, 2014) ja investoinut aivan viime aikoina muun muassa suuriin pellettisiiloihin (Tekniikka ja talous 30.6.2014) ja tehnyt mittavia polttokokeita erilaisilla pelleillä (Grönroos 2013, Galkin-Aalto 2014).

12 YHTEENVETO

Puun kierrätys on Suomessa ja Pohjois-Euroopassa melko haastavaa uuden puun hyvän saatavuuden ja sen energiakäyttöön soveltuvuuden ja sekä alueen lämmitystarpeen vuoksi. Myös matalasta väestötiheydestä johtuva kuljetusmatkojen pidentyminen tekevät kierrätyksestä vähemmän houkuttelevaa. Vaikka rakennusjätteen puu ja muu puujäte on pyrittävä ohjaamaan kierrätyskäyttöön, puutuotteen elinkaari väistämättä loppuu joskus. (Pirhonen et al. 2011) Käytöstä poistettavan puun jalostaminen polttoaineeksi mahdollistaa fossiilisten polttoaineiden korvaamisen energiatuotannossa ja on ympäristö-, jäte-, ja resurssitehokkuuden tavoitteiden mukaista. Suomen energia- ja ilmastostrategiaan on kirjattu tavoitteeksi, että pääosa kaupunkien lämmöntuotannon hiilenkäytöstä korvattaisiin biovoimalla. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013)

Työssä tutkittiin Sweco Industry:n asiakasyrityksen puumateriaalin hyödyntämistä kiinteänä biopolttolainena. Puumateriaali koostui pääasiassa kierrätyspuusta sekä risujätteestä. Tavoitteena oli tutkia, mitä biopolttolainetta erityisesti kierrätyspuusta voitaisiin alkaa valmistamaan ja mitä valmistuksessa tulisi huomioida. Lisäksi selvitettiin eri tuotantovaihtoehtojen taloudellinen kannattavuus. Työssä tutkittiin myös mahdollisuuksia hyödyntää aluelämmitystä polttoainetuotannossa ja siten nostaa tuotantoalueen energia- tehokkuutta.

Kaikista tarkastelluista polttoainevaihtoehtoista löytyi hyvin kannattavia tapoja järjestää tuotanto. Tulosten perusteella investointi mihin tahansa tarkastelluista polttoainevaihtoehtoista, puumurskeesta (VE1), puupelletistä (VE2) tai paahtopelletistä (VE3) on tarpeeksi kannattavaa investointipäätöksen perustelemiseksi vaikka investointia pidettäisiin uusien tuotteiden tai uusien alueiden valtaamisena, jolta Neilimon ja Uusi-Rauvan (1999) mukaan tyypillisesti odotetaan jopa 25 % tuottovaatimusta. Erityisesti investointituetta monet vaihtoehtoista ylsivät yli 25 % sisäiseen korkokantaan, ilman investointitukea kannattavimpien vaihtoehtojen sisäinen korkokanta oli vähintään 15 %. Nettonykyarvot olivat vastaavasti parhaimmillaan yli 5 - 10 miljoonaa euroa ja investointituetta yli 8 - 10 miljoonaa euroa. Parhaimpien tuotantovaihtoehtojen takaisinmaksu aika vaihteli vuodesta neljään vuotta. Kannattavinta oli puumurskeen tuottaminen, sitten puupelletin ja vasta viimeisenä paahtopelletin. Investointituen myöntäminen, kuljetusmatka ja potentiaaliset asiakkaat vaikuttavat kuitenkin vaihtoehtojen taloudelliseen paremmuusjärjestykseen. Laskelmat tehtiin 50 km kuljetusmatkalla mutta kun polttolainetta kuljetetaan 150 km tuotantopaikalta voimalaitokselle, puumurskeen kannattavuus alkaa merkittävästi heiketä ja puu- ja paahtopelletin tuotanto tulee kannattavammaksi.

Herkkyysanalyysissa toinen kannattavuuteen merkittävästi vaikuttava tekijä oli polttoaineesta saatava hinta voimalaitoksilla. Polttoaineesta saatavaan hintaan vaikuttaa muun muassa ympäristö- ja ilmastopolitiikka, joka tuo merkittävää epävarmuutta polttoaineiden hintoihin ja sitä kautta riskiä tuotettavan polttoaineen valintaan. Kannattavuusraja puupelletin hinnalle oli 15 - 20 €/MWh ja paahtopelletille jo 35 €/MWh, investointituettuna 26 €/MWh. Puumursketta näytti olevan heikosti kannattavaa myydä jopa 9 €/MWh mutta raja on laskettu 50 km kuljetusmatkalla ja pidemmällä kuljetusmatkoilla raja on korkeampi.

Aluelämmitysjärjestelmän lämpöä voidaan parhaiten hyödyntää vaihtoehdoissa, joissa käytetään suurta viirakuivuria noin kuusi kuukautta vuodessa kesäaikaan painotuen. Kaikkein kannattavimpia suuren viirakuivurin vaihtoehtoja olivat 2.4, 2.5, 3.3 ja 3.6. Myös normaalilla ympärivuotisella viirakuivurin käytöllä päästään hyvään energiatehokkuuden nostoon. Kuivurin käyttö vaatii lisälämmön tuotantoa, joka on paras toteuttaa puumursketta polttamalla. Tämä kuitenkin kaventaa jalostettavan raaka-aineen määrää, joka oli herkkyysanalyysin perusteella yksi voimakkaimmin kannattavuuteen vaikuttavista tekijöistä. Lisäpolttoaineen tarve on sen vuoksi pyrittävä minimoimaan. Raaka-ainemäärän maksimoimiseksi myös hyvä laadunhallinta raaka-aineen keräyksessä ja käsittelyssä on ensiarvoisen tärkeää, kun käytetään raaka-aineena kierrätyspuuta.

Mahdolliset markkinat puupolttoaineille ovat todella suuret. Wilen et al. (2012) arvioivat, että jos koko Euroopan hiilivoimalaitoksista päätettäisiin vähentää hiilen kuluusta 5 % korvaamalla hiiltä puupelletillä, Euroopan pellettituotannon pitäisi kolminkertaistua kulutuksen kattamiseksi. Kun otetaan huomioon, että paahtopelletillä on mahdollista korvata jopa 50 % hiilivoimalaitosten polttoainetarpeesta, eurooppalaiset ja pelkästään suomalaisetkin markkinat ovat valtavat jos hiilen vähentäminen otetaan voimakkaasti tavoitteeksi.

LÄHTEET

Aho M., Pursula T., Karttunen V., Hakala L. & Bröckl M. Kiinteiden biopolttoaineiden kestävyuden osoittamisen ongelmia ja ratkaisumalleja [WWW]. Gaia Consulting. 30.8.2013 [viitattu 22.5.2014]. Saatavilla: http://energia.fi/sites/default/files/kiinteiden_biopolttoaineiden_kestavyuden_osoittamisen_ongelmia_ja_ratkaisumallej_raportti.pdf

Alakangas, E. 2014a. Graded thermally and densified biomass fuels – Development of the ISO 17225-8 standard. VTT, The SECTOR Project, Deliverable No D8.3. 17 p.

Alakangas, E. 2014b. Polttoaineiden laatuvaatimukset ja luokat – moniosainen standardi. [WWW]. VTT:n koulutusmateriaali. [Viitattu 8.5.2014]. 40 s. Saatavissa: http://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/05_Workshops_Training_Events/Taining_materials/finnish/D19_2_FI_Fuel_specification.pdf

Alakangas E. Towards international pellet standards [WWW]. European pellet council, 3.4.2013a [viitattu 22.5.2014]. Uutinen saatavilla: <http://www.pelletcouncil.eu/en/press/>, raportti saatavilla: http://www.pelletcouncil.eu/cms/wp-content/uploads/2011/12/Alakangas_Towards-international-pellet-standards.pdf

Alakangas E. 2013b. Kiinteiden biopolttoaineiden kansainväliset standardit – metsähake esimerkkinä. Metla, VTT, ForestEnergy 2020 seminaari 27.9.2013. 16 s.

Alakangas, E. 2007. Kiinteiden biopolttoaineiden tekniset spesifikaatiot. VTT tilannekatsaus. 19 s.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo, VTT tiedotteita 2045. 196 s.

Alakangas, E., Wiik, C. 2008. Käytöstä poistetun puun luokittelu ja hyvien käytäntöjen kuvaus. Jyväskylä, VTT, tutkimusraportti VTT-R-04989-08. 84 s.

Argus Biomass Markets. Weekly biomass markets news and analysis [WWW]. Issue 14-013. Argus Media Ltd. 2.4.2014 [viitattu 24.5.2014]. Saatavilla: <http://media.argusmedia.com/~media/Files/PDFs/Samples/Argus-Biomass.pdf>

Bayerische Staatsforsten. Grundsätze zur Lagerung von Waldhackschitzeln [WWW]. Bayerische Staatsforsten AöR, Merkblatt über Lagerung von Waldhackschnitzeln. 2012 [Viitattu 12.5.2014]. Saatavissa: http://www.baysf.de/uploads/media/Merkblatt_Lagerung_von_Hackschnitzeln_3.pdf

Bagramov, G. 2010. Economy of Converting Wood to Biocoal. Master's thesis. Lappeenranta. Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, Bioenergy Technology. 117 p.

Bergman P. 2005. Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process. ECN Biomass report, ECN-C-05-073. 29 p.

Bergman P., Boersma A., Zwart R., Kiel J. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. "Biocoal". ECN Biomass report, ECN-C-05-013. 71 p.

Bioenergia ry. Pelletin tuotanto [WWW]. Bioenergia ry:n Pellettienergia-sivusto, 2013 [Viitattu 8.5.2014]. Saatavissa: <http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20tuotanto>

Björkman, E. & Strömberg, B. 1997. Release of chlorine from biomass at pyrolysis and gasification conditions. *Energy & Fuels* 11 (5), pp. 1026-1032

Elsport prices [WWW]. Nord Pool Spot, 30.12.2013 [Viitattu 24.6.2014]. Saatavilla: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elsport/Area-Prices/ALL1/Hourly/>

Energian hinnat [WWW]. 1. vuosineljännes 2014. Tilastokeskus, 19.6.2014 [viitattu 7.7.2014]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2014/01/ehi_2014_01_2014-06-19_tie_001_fi.html

Energiavirasto. Seurantaohje: Uusiutuville energialähteillä tuotettavan sähkön tuotantotuen hakeminen ja seurantavelvoitteet [WWW]. Energiavirasto. 1.1.2014 [viitattu 28.5.2014]. Saatavilla: <http://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Seurantaohje+EV+1+1+2014+FI.pdf/f648bd2d-1936-4ff3-81da-8ed957a5d627>

Energian kulutus Suomessa energialähteittäin 2012. 2013. In: Metsätalastollinen vuosikirja 2013. Sastamala, Metsäntutkimuslaitos. Taulukko 9.1.

Energian kokonaiskulutus energialähteittäin [WWW]. Energiatilasto 2013, Tilastokeskus. Taulukko 1.2. [viitattu 17.9.2014]. Saatavilla: http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2013/start.htm

Etelä-Suomen sanomat. Pelletti kompastui ylituotantoon [WWW]. Etelä-Suomen sanomien verkkojulkaisu, 16.10.2011, 6.9.2013 [viitattu 15.9.2014]. Saatavilla: <http://www.ess.fi/uutiset/pajathame/2011/10/16/pelletti-kompastui-ylituotantoon>

European Energy Exchange. European Emission Allowances (EUA). Spot market data on emission allowances, European Energy Exchange (EEX). 11.6.2014 [Viitattu 11.6.2014]. Saatavilla: <https://www.eex.com/en/market-data/emission-allowances/spot-market/european-emission-allowances#!/2014/06/11>

EY 2010/75/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi teollisuuden päästöistä.

EY 19.11.2008/98/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta.

Fagernäs, L., Impola, R., Rautiainen, R. & Ajanko, S. 2004. Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa – PUUT29. Espoo, VTT, Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. 11 s.

Flyktman, M., Kärki, J., Hurskainen, M., Helynen, S. & Sipilä, K. 2011. Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa. Espoo, VTT tiedotteita 2595. 106 s.

FOEX Indexes oy. FOES Indexes Oy aloittaa voimalaitoskäyttöön menevien puupellettien pohjoismaisen hintaindeksin julkaisemisen [WWW]. Lehdistö tiedote. 11.11.2009 [viitattu 24.5.2014]. Saatavilla: <http://www.eubionet.net/GetItem.asp?item=digistorefile;141294;1087¶ms=open;gallery>

FOEX Indexes Oy. PIX Pellet Nordic CIF index quarterly graph [WWW]. FOEX Indexes Oy, 2014 [viitattu 24.5.2014]. Saatavilla: http://www.foex.fi/uploads/bioenergy/PIX_Nordic_Pellet_History.pdf

Föhr, J. 2008. Metsähakkeen jalostusarvon nostaminen eri kuivausmenetelmillä. Diplomityö. Valkeala. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto. 133 s.

Galkin-Aalto, M. Kattilasta ilmakehään [WWW]. Helsingin Energia, Uutta Voimaa – blogi, 26.3.2014 [viitattu 15.9.2014]. Saatavilla: <http://blogi.helen.fi/kattilasta-ilmakehaan/>

Girods, P., Dufour, A., Rogaume, Y., Rogaume, C. & Zoulalian, A. 2007. Pyrolysis of wood waste containing urea-formaldehyde and melamine-formaldehyde resins. Journal of analytical and applied pyrolysis, 81 (2008), pp. 113-120.

Grönroos, S. Pelletti on tullut – pysyäkseen [WWW]. Helsingin Energia, Uutta Voimaa –blogi, 22.5.2013 [viitattu 15.9.2014]. Saatavilla: <http://blogi.helen.fi/pelletti-on-tullut-pysyäkseen/>

Göös, J. 2011. Puujätteistä valmistettujen polttoaineiden laatuluokitusselvitys ja laadunhallintaohje Kuopion jätekeskukselle. Opinnäytetyö. Kuopio. Savonia-ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. 68 s.

Haikonen, T. 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Diplomityö. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, teollisuuden energiategniikan ja talouden osasto. 73 s.

Hallitukselta odotetaan kotimaisen energian ratkaisuja [WWW]. Bioenergiauutiset, Bioenergia ry, 25.3.2014 [viitattu 24.5.2014]. Saatavissa: <http://www.bioenergia.fi/default.asp?sivuId=30389>

Halonen P., Helynen, S., Flyktman, M., Kallio, M., Paappanen, T., Vesterinen, P. 2003. Bioenergian tuotannon ja käytön suorat työllisyysvaikutukset. Jyväskylä. VTT Tiedotteita 2219. 51 s.

HE 13/2013. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi biopolttoaineista ja bionesteistä ja eräksi siihen liittyviksi laeiksi.

Helsinkiläinen ja ilmastonmuutos [WWW]. Helsingin kaupungin ympäristökeskus, 9.4.2010 [viitattu 13.5.2014]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/hel2/ymk/julkaisut/oppaat/esitteet/Ilmastonmuutosesitys.pdf>

Hiltunen, I. Kaupalliset pienen kokoluokan kaasutus CHP laitokset. VTT, 13.6.2013, [Viitattu 12.5.2014]. Saatavilla: http://www.vtt.fi/files/news/2013/13062013/07_Kaupalliset_CHP_laitokset.pdf

Hiilineutraali tulevaisuus [WWW]. Helsingin energia [8.8.2014]. Saatavilla: <https://www.helen.fi/Kotitalouksille/Neuvoa-ja-tietoa/Energia-ja-ymparisto/Hiilineutraali-tulevaisuus/>

Ihalainen, T. & Sikanen, L. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset pelletintuotannon arvoketjuissa. Metsäntutkimuslaitos, Metlan työraportteja 181. 31 s.

Industrial emissions [WWW]. Summaries of EU legislation, Euroopan unioni, 10.3.2011 [viitattu 19.6.2014]. Saatavilla: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/soil_protection/ev0027_en.htm

Jahkonen, M. Metlan infokortti 7 - Suuri osa polttoaineen huonosta laadusta aiheutuviista ongelmista ilmenee ennen kattilaa [WWW]. Metla. [Viitattu 12.5.2014] Saatavissa: http://www.forestenergy.org/filedata/1382966331infokortti_7_laatuoputteet.pdf?PHPSESSID=f1fc4541e7b486164bddf0c662939ea9

- Jensen, P.A., Frandsen, F. J., Dam-Johansen, K. & Sander, B. 2000. Experimental investigation of the transformation and release to gas phase of potassium and chlorine during straw pyrolysis. *Energy & Fuels*, 14(6), pp. 1280-1285.
- Keipi, T., Tolvanen, H., Kokko, L. & Raiko, R. 2014. The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. *Biomass & Bioenergy*, 66, pp. 232-239
- Khodayari, R. Vattenfall strategy and experiences on co-firing of biomass and coal. Vattenfall Research and Development. Presentation at IEA Clean Coal Conference, 27.3.2012 [viitattu 9.5.2014]. Saatavilla: http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2012_Copenhagen/Khodayari.pdf
- Kiel, J. Torrefaction to improve biomass logistics (and end-use) [WWW]. TU Delft. Mini symposium Biomass development in ports, 4.12.2012 [viitattu 15.5.2014]. Saatavissa: http://www.3me.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/3mE/Over_de_faculteit/Afdelingen/Marine___Transport_Technology/Organisation/Staff/Persoonlijke_pagina_s/Wu/img/Torrefaction_to_improve_biomass_logistics_-_Kiel.pdf
- Knudsen, J. N., Jensen, P. A., Lin, W. & Dam-Johansen, K. 2005. Secondary capture of chloride and sulfur during thermal conversion of biomass. *Energy & Fuels*, 19(2), pp. 606-617
- Koppejan J., Sokhansaj S., Melin S. & Madrali S. Status overview of torrefaction technologies. Enschede, 2012, IEA Bioenergy Task 32 report. 61 p.
- Korpinen, T. 2012. Biopolttoaineen rinnakkaispolton kannattavuustarkastelu hiilipölypolttokattilassa Martinlaakso 2:ssa. Diplomityö. Vantaa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, ympäristötekniikan osasto. 177 s.
- Kouvolan Sanomat. Hyötypaperin hakekasa palaa Valkealassa [WWW]. Verkkolehti, kotimaa, 3.11.2013 [viitattu 18.9.2014]. Saatavilla: <http://www.kouvolansanomat.fi/Online/2013/11/03/Hy%C3%B6typaperin+hakekasa+palaa+Valkealassa/20132932/4>
- Kouvolan sanomat. Hiilidioksidin päästökaupalla keho menestys [WWW]. Kouvolan sanomien verkkojulkaisu, Näkökulma, 29.4.2012 [viitattu 15.9.2014]. Saatavilla: <http://www.kouvolansanomat.fi/Mielipide---Sana-on-va-paa/2012/04/29/Hiilidioksidin+p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6kaupalla+keho+menestys/2012213325668/69>

Kuittinen, S. 2013. Torrefioidun raaka-aineen pelletöinti. Opinnäytetyö. Joensuu. Karelia ammattikorkeakoulu, ympäristötekniikan koulutusohjelma. 63 s.

Kuluttajahintaindeksin vuosimuutokset [WWW]. Tilasto: Kuluttajahintaindeksi, toukokuu 2014, liitetaulukko 3. Tilastokeskus, 13.6.2014 [viitattu 14.6.2014]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/khi/2014/05/khi_2014_05_2014-06-13_tau_003_fi.html

L 17.6.2011/646. Jätelaki.

L 30.12.2010/1396. Laki uusiutuville energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta.

L 4.2.2000/86. Ympäristönsuojelulaki.

L 30.12.1996/1260. Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta.

Larsson, S. H., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I. & Samuelsson, R. 2013. Effects of moisture content, torrefaction temperature and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. *Applied Energy*, vol 102 (Feb 1, 2013), p. 827-832.

Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, J. C. & Sokhansanj, S. 2012. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *Applied Energy*, vol 93 (May 1 2012), p. 680-685.

Lindberg et al. 2012. Best available techniques (BAT) in solid biomass fuel processing, handling, storage and production of pellets from biomass. Nordic Council of Ministers, Working group for sustainable consumption and production.

MetsäVerkko. Hakkurit [WWW]. MetsäVerkon opetusmateriaali. [Viitattu 8.5.2014]. Saatavissa: http://virtuoosi.pkky.fi/metsaverkko/Energiapuu/Energiapuun_korjuu/haketus/hakkurit.htm

Motiva. Pellettien säilytys ja siirto [WWW]. Motivan kotisivut, 28.3.2014 [viitattu 14.5.2014]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/puulammitys_kiinteistoi_ssa/pelletit_ja_brikitit/pelletin_sailytys_ja_siirto

Muononen, M. Ristiinan biologistiikkakeskus ja biohiilipellettitehdas [WWW]. Espoo, VTT. 29.11.2012 [viitattu 26.5.2012]. Saatavilla: http://www.vtt.fi/files/projects/biohiili/mika_muononen.pdf

Muje, R. 2012. Rangan ja murskeen terminaalikuivaus. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. 36 s.

Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 1999. Johdon laskentatoimi. Toinen uudistettu painos. Helsinki, Oy Edita Ab. 338 s.

Nocquet, T., Dupont, C., Commandre, J. M., Gâteau, M., Thiery, S. & Salvador, S. 2014. Volatile species release during torrefaction of wood and its macromolecular constituents: Part 1 – Experimental study. Energy, in Press, available online 20.3.2014.

Nummelin, J., Hankalin, V. & Raiko, M. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, polttoaineen kuivaustekniikat. Helsinki, Motiva.

Phanphanich, M. & Sudhagar M. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. Bioresource Technology, vol 201, no. 2 (Jan 2011), p. 1246-1253.

Pilottilaitos biohiilipellettien tuotantoon: rakentaminen käynnistyi Mikkelissä [WWW]. Uusiutuva metsäteollisuus. 23.10.2013 [viitattu 26.5.2014]. Saatavilla: <http://www.oske.net/fifcluster/?x128366=939471>

Polttoaineluokitus 2014 [WWW]. Tilastokeskus, 5.2.2014 [viitattu 22.5.2014]. Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Puulauhteen tuotanto loppumassa [WWW]. Bioenergiauutiset, Bioenergia ry, 15.4.2014 [viitattu 24.5.2014]. Saatavissa: <http://www.bioenergia.fi/default.asp?sivuId=30408>

Puun käyttö lauhdetuotannossa vapaassa pudotuksessa [WWW]. Bioenergiauutiset, Bioenergia ry, 25.3.2014 [viitattu 24.5.2014]. Saatavissa: <http://www.bioenergia.fi/default.asp?sivuId=30383>

Raiko, M. & Honkasalo N. 2012. Biopolttoaineiden soveltuminen säätötehon tuotantoon. Espoo, VTT, Biohiiliseminaarin esityksiä. 23 s.

RatesFX valuuttamuunnin [WWW]. 23.5.2014 [viitattu 24.5.2014]. Saatavissa: <http://www.ratesfx.com/rates/rate-converter.fi.html>

Repo S. Teollisuustalouden perusteet. 2012. Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 562 s.

Repo S. Teollisuustalouden perusteet. 2013. Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 568 s.

Rinne, S. 2010. Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannukset. Diplomityö. Jyväskylä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. 107 s.

RTV Oost. Zeer grote brandbij Stramproy Green Steenwijk (Very large fire at Stramproy Green Steenwijk). RTV Oost –verkkolehti, 25.2.2012, 30.4.2014 [viitattu 15.5.2014]. Saatavissa: <http://www.rtvooost.nl/nieuws/default.aspx?nid=139948>

Saksan valtionvarainministeriö (Bundesministerium der Finanzen). Die wichtigsten Steuern im internationalen Vergleich 2013 [WWW]. Bundesministerium der Finanzen. 22.4.2014 [viitattu 6.6.2014]. Saatavilla: <http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Monatsberichte/2014/04/Inhalte/Kapitel-3-Analysen/3-2-wichtigsten-steuern-im-internationalen-vergleich-2013.html>

Saleh, S., Flensburg, J., Shoulaifar, T., Sárossy, Z., Hansen, B., Egsgaard, H., DeMartini, N., Jensen, P., Glarborg, P. & Dam-Johansen, K. 2014. Energy & Fuels, 2014, pp. 140606151257006

Sartor, O. The EU ETS carbon price: To intervene or not to intervene? [WWW]. CDC Climat research. Helmikuu 2012 [viitattu 11.6.2014]. Saatavissa: http://www.cdclimat.com/IMG/pdf/12-02_climate_brief_12_-_the_eu_ets_carbon_price_-_to_intervene_or_not_to_intervene.pdf

Schorr C., Muinonen M. & Nurminen F. 2012. Torrefaction of Biomass. Mikkeli, Miktech oy, julkaisu 1/2012. 55 s.

Schäfer W. Planning, Evaluation and Budgeting in the Petroleum Industry. 2013. Technische Universität Clausthal. Lecture material. 427 p.

Scott. C. A Beginner's Guide to Pellet Production [WWW]. Pelheat.com. [Viitattu 8.5.2014]. Saatavissa: http://www.pelheat.com/How_To_Buy_A_Quality_Pellet_Mill_PelHeat.pdf

SFS-EN 14961-1. 2010. Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja –luokat. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 103 s.

SFS-EN 15296. 2011. Kiinteät biopolttoaineet. Analyysitulosten muuntaminen eri ilmoittamisperustoille. 2011. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 25 s.

SFS käsikirja 35-1. 2012. Kiinteät biopolttoaineet. Osa 1: Terminologia, luokitusjärjestelmät ja laadunvarmistus sekä analyysitulosten muuntaminen eri ilmoittamisperustoille. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 497 s.

- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Ahrenfeldt, J., Shang, L. & Henriksen, U. B. 2011. Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass and Bioenergy*, vol 35, no. 11 (Nov 2011), p. 4690-4698.
- STMa 1.4.2014/268/2014. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetus haitallisiksi tunnetuista pitoisuuksista.
- Svedberg U. & Knutsson A. 2011. Faror och hälsorisker vid förvaring och transport av träpellets, träflis och timmer i slutna utrymmen. Ruotsin työympäristövirasto (Arbetsmiljöverket), rapport 2011:2. 48 s.
- Sähkön ja lämmön tuotanto [WWW]. Helsinki, Tilastokeskus. 5.11.2013 [Viitattu 27.6.2014]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2012/salatuo_2012_2013-11-05_kat_001_fi.html
- Tekniikka ja Talous. 2014. Uusiutuvaa hiilen sekaan: Helsingin Energia pystyttää 20-metrisiä pellettisiiloja Salmisaassa. 30.6.2014 [Viitattu 18.7.2014]. Saatavilla: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/uusiutuvaa+hiilen+sekaan+helsingin+energia+pystytaa+20metrisia+pellettisiiloja+salmisaassa/a995991>
- Tampereen kaupunkiseudun kuntayhtymä. 2010. Tampereen kaupunkiseudun ilmastostrategia 2030. 46 s.
- Tapiola. Suojeluohje D11, Syttyvien materiaalien säilytys kasoissa [WWW]. LähiTapiola, 2009 [viitattu 12.5.2014]. Saatavissa: <http://public.brandgate.fi/lahitapiola/lahitapiola/fi/tiedostot/120072/>
- The EU Emissions Trading System (EU ETS) [WWW]. Euroopan komissio. 11.6.2014 [Viitattu 11.6.2014]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm
- The SECTOR-project [WWW]. [viitattu 26.5.2014]. Saatavissa: <http://www.sector-project.eu/home.1.0.html>
- Thek, G. & Obernberger, I. 2004. Wood pellet production costs under Austrian and in comparison to Swedish framework conditions. *Biomass and Bioenergy* 27.
- Tilastokeskus. Energian hankinta ja kulutus 2012, 4. vuosineljännes [WWW]. PX-Web-tietokanta, 27.6.2014 [viitattu 17.9.2014]. Saatavilla: http://193.166.171.75/Dialog/varval.asp?ma=010_ehk_tau_101_fi&ti=Energian+kokonaiskulutus+energian%20hankinta+ja+CO2%20päästöt&path=../Database/StatFin/ene/ehk/&lang=3&multilang=fi

Turunen, P. 2004. Pienten biopolttoainevoimalaitosten markkinaselvitys. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan osasto. 116 s.

Turun Sanomat. Hakekasa alkoi kyteä Salossa [WWW]. Verkkolehti, kotimaa, 15.11.2004 [viitattu 18.9.2014]. Saatavilla: <http://www.ts.fi/uutiset/kotimaa/1074007212/Hakekasa+alkoikytea+Salossa>

Työ- ja elinkeinoministeriö. Energiatuki [WWW]. 28.1.2014 [viitattu 24.5.2014]. Saatavilla: <http://www.tem.fi/energia/energiatuki>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia: Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20. päivänä maaliskuuta 2013. Työ- ja elinkeinoministeriö, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 8/2013. 55 s.

Työterveyslaitos. Puupöly [WWW]. Työterveyslaitoksen sivut, 30.7.2010 [viitattu 14.5.2014]. Saatavissa: http://www.ttl.fi/fi/toimialat/rakennus/turvapakki/vaaralliset_aineet/polyt_mikrobit/puupoly/Sivut/default.aspx

Työvoimakustannusindeksi [WWW]. Tilastokeskus, 10.6.2014 [Viitattu 25.6.2014]. Saatavilla: <http://www.stat.fi/til/tvki/2014/01/>

Valtionvarainministeriö. Yhteisövero [WWW]. [viitattu 5.6.2014] Saatavilla: http://www.vm.fi/vm/fi/10_verotus/03_elinkeinoverotus/01_yhteisovero/index.jsp

Verkkopalveluhinnasto [WWW]. Caruna Espoo Oy, 1.4.2014 [Viitattu 24.6.2014]. Saatavilla: http://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Sahkon-siirto-ja-liittymat/Carunan%20hinnastot/WEB_Caruna_FED_Verkkopalveluhinnasto_2014_FI.pdf

VNa 24.10.2013/750. Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympärintönsuojeluvaatimuksista.

VNa 19.4.2012/179. Valtioneuvoston asetus jätteistä.

VNp 23.10.1997/962. Valtioneuvoston päätös pakkauksista ja pakkausjätteistä.

Wilén C. Torrefaction – taruja ja totuuksia BioRefine-ohjelman torrefaction-projektin valossa. VTT. Biohiiliseminaari Hanasaarella, 29.11.2012 [viitattu 15.5.2014]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/projects/biohiili/carl_wilen.pdf

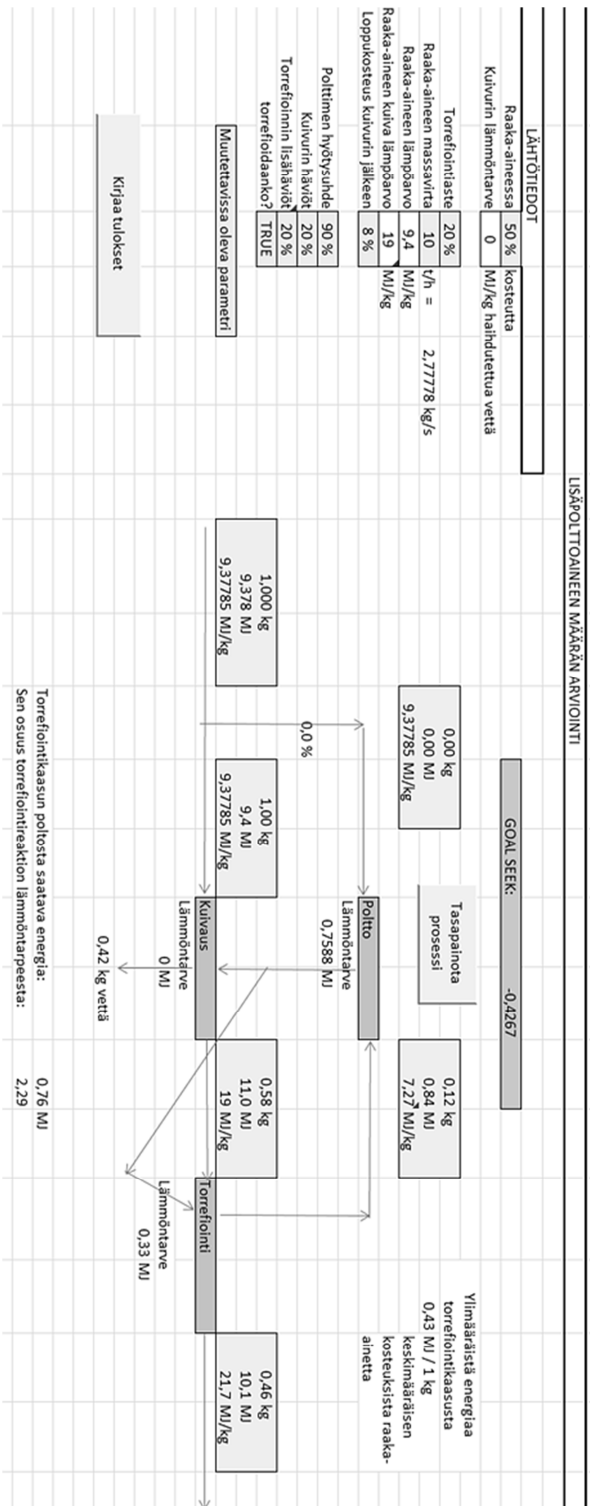
Yle uutiset. Pellettituotanto käynnistyy pian täysteholla Kiteellä [WWW]. Kotimaa, 25.3.2014 [viitattu 15.9.2014]. Saatavilla: http://yle.fi/uutiset/pellettituotanto_kaynnistyy_pian_taysteholla_kiteella/7149700?ref=1eiki-uu

Yle uutiset. Lakkautettu Vapon pellettitehdas herää yllättäen henkiin – kaukolämmön hinta nousee [WWW]. Kotimaa, 19.6.2014 [viitattu 15.9.2014]. Saatavilla: http://yle.fi/uutiset/lakkautettu_vapon_pellettitehdas_heraa_yllattaen_henkiin_kaukolammmon_hinta_nousee/7309424

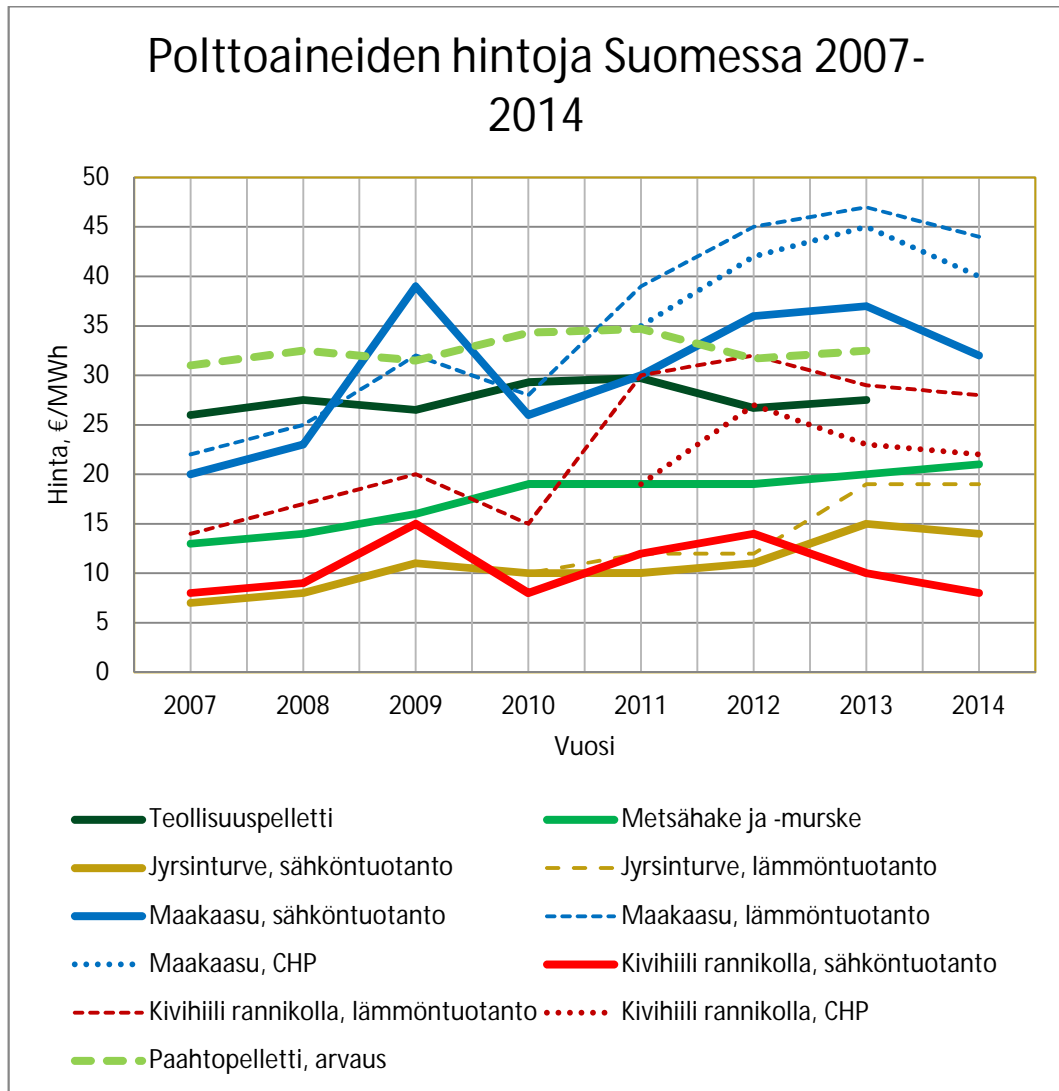
Yle uutiset. Keuruun hakekasa syttyi itsestään [WWW]. Verkkajulkaisu, kotimaa, 22.12.2009, 30.5.2012 [viitattu 18.9.2014]. Saatavilla: http://yle.fi/uutiset/keuruun_hakekasa_syttyi_itsestaan/6046559

Ympäristöministeriö. 2008. Kohti kierrätysyhteiskuntaa: Valtakunnallinen jätesuunnitelma 2016. Helsinki, Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto, Suomen ympäristö 32/2008. 58 s.

LIITE 1: PAAHTOPELLETIN LISÄPOLTTOAINEEN MÄÄRITYS

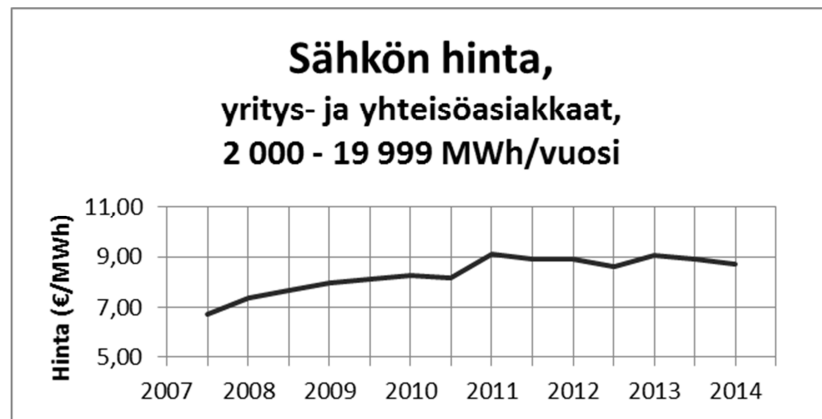


LIITE 2: POLTTOAINEIDEN HINTOJA SUOMESSA

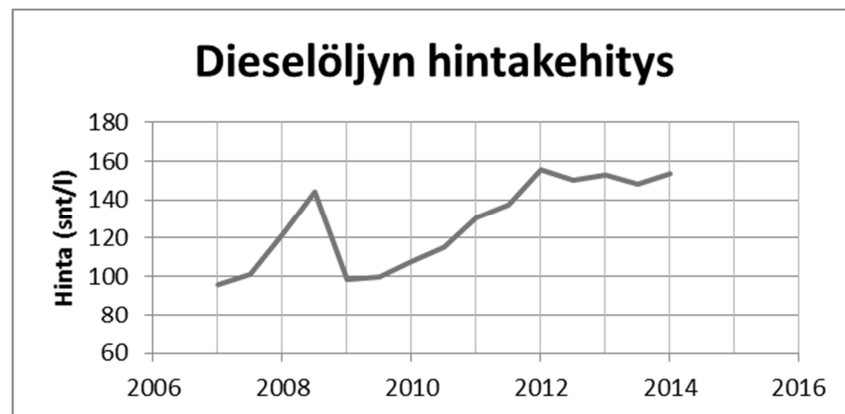


Koottu lähteistä Energian hinnat (2014) ja FOEX Indexes Oy (2014). Paahtopelletin hinnan on oletettu tässä seuraavan teollisuudessa käytettävän puupelletin hintaa niin, että se on aina 5 €/MWh kalliimpaa.

LIITE 3: ERÄIDEN KUSTANNUSTEKIJÖIDEN VUOSIMUUTOKSIA



Lähde: Energian hinnat 2014

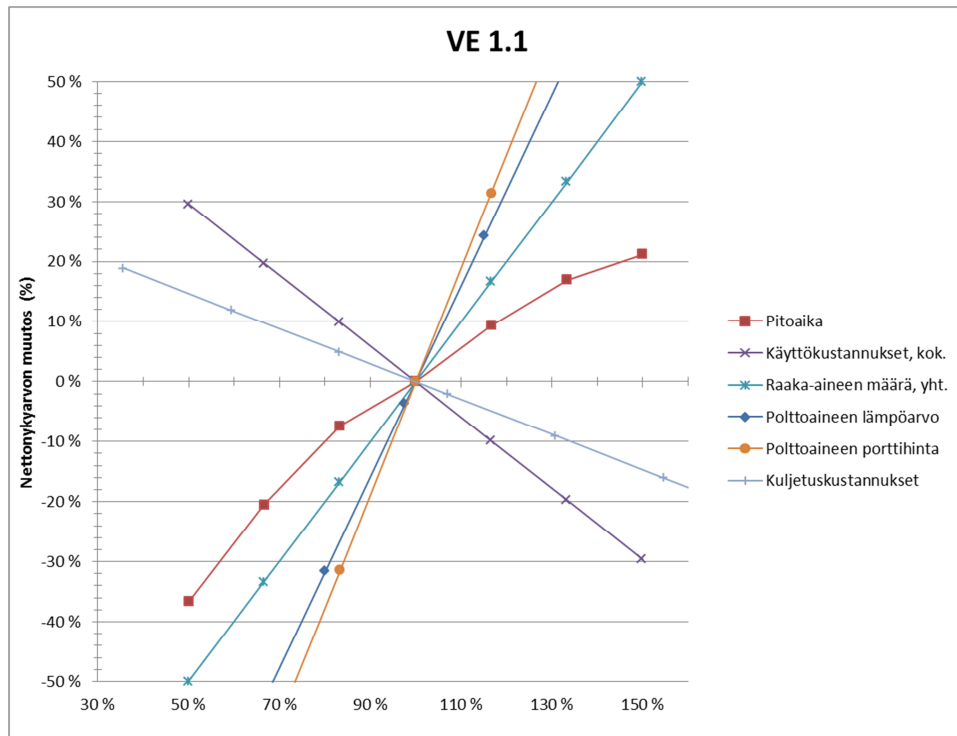


Lähde: Energian hinnat 2014



Lähde: Työvoimakustannusindeksi 2014. Teollisuus C kattaa kaikki teollisuuden alat lukuunottamatta kaivostoimintaa, sähkö- kaasu- ja lämpöhuoltoa, jäähdytysliiketoimintaa tai vesi-, viemäri- tai jätevesihuoltoa.

LIITE 4: PUUMURSKEEN HERKKYYSANALYYSI



<

