

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Juuso Himmanen

RANKAHAKKEEN LAADUNHALLINTA AUMAVARAS- TOINNISSA

Työn tarkastajat: Prof. TkT Tapio Ranta
MMM Olli-Jussi Korpinen

Työn ohjaaja: MMM Olli-Jussi Korpinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Juuso Himmanen

Rankahakkeen laadunhallinta aumavarastoinnissa

Diplomityö

2016

76 sivua, 31 kuvaa, 5 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Prof. TkT Tapio Ranta
MMM Olli-Jussi Korpinen

Hakusanat: metsähake, varastointi, puupolttoaine, bioenergia, hankintalogistiikka, lämpöarvo

Keywords: forest chips, storage, wood fuel, bioenergy, supply logistics, heat value

Diplomityössä selvitettiin rankahakeaumojen peittämisen vaikutuksia laatuun voimalaitoksen polttoaineena. Selvityksen kohteena olivat aumojen sisälämpötilat eri kohdissa aumoja sekä hakkeen kosteuden muutos ja kuiva-ainetappiot varastoinnin aikana.

Tutkimuksen kohteena olivat Etelä-Savon Energian polttoaineterminaaliin kootut hakeaumat. Aumojen sisäistä lämpötilaa asennettiin mittaamaan yhdeksän lämpötilasensoria kuhunkin aumaan.

Hakkeiden kokonaismassat tutkimuksen alussa laskettiin aumoihin purettujen kuormien massoista. Kuormista määritettiin kosteudet ja lämpöarvot standardien mukaisesti. Näytteiden käsittely tapahtui terminaalilla ja niiden kosteus selvitettiin uunikuivausmenetelmällä. Käyttöpaikalle kuljetuksen yhteydessä kuormat punnittiin ja kosteudet mitattiin uudestaan.

Tutkimuksen aikana havaittiin langattomien lämpötilasensorien lukemisen hakeaumojen sisältä olevan vaikeaa. Sensorit olivat kuitenkin pääsääntöisesti säilyneet toimintakuntoisina varastoinnin aikana ja niiden sisältämät lämpötilatiedot päästiin lukemaan aumojen purkamisen jälkeen.

Tutkimuksen perusteella hakeaumojen peittäminen on kannattavaa. Hake säilyi tutkimuksen ajankohtana peitettyssä aumassa kuivempana kuin peittämättömässä. Hake ei myöskään jäädy peitteen alla yhtä paljon kuin peittämättömänä, mikä parantaa hakkeen käsiteltävyyttä kuormaa tehdessä ja voimalaitoksella. Kuiva-ainetappioista ei voitu esittää luotettavia tuloksia kokeen keskeydyttyä sään takia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Energy Technology

Juuso Himmanen

Quality control of stemwood chips in stack storage

Master's Thesis

2016

76 pages, 31 figures, 5 tables and 4 appendices

Examiners: Prof. D. Sc. (Tech.) Tapio Ranta
M. Sc. (For.) Olli-Jussi Korpinen

Keywords: forest chips, storage, wood fuel, bioenergy, supply logistics, heat value

The aim of this thesis was to obtain information about quality changes of stemwood chips during storage in different stack storages. The other stack was covered with tarpaulin and the other one was left uncovered. The primary focus was on humidity and heat value differences between the stacks. Temperature sensors were installed inside the stacks in different locations. Dry matter losses were also to be studied.

The stacks were located in a forest fuel terminal in Mikkeli and were owned by Etelä-Savon Energia (ESE). There were nine wireless temperature sensors installed in each stack.

The weights of the truckloads of woodchips were measured before transportation to the fuel terminal. Samples were taken from each load, following the standards about sampling and sample preparation of solid biofuels. Samples were used to determine the moisture content of each batch of woodchips. This procedure was repeated when the stacks were opened and the woodchips came in the use as fuel in Pursiala power plant.

During the study it was noticed that it is very difficult to get temperature data from the wireless sensors under several meters of woodchips. However, the sensors were in good condition after they were recovered from the stacks and the data was possible to get at this point.

On the basis of the study, covering the stacks of stemwood chips is profitable. The woodchips lasted drier in the covered stack. Also, icing of the stack was lesser with the cover. Dry matter losses were impossible to calculate because of the interruption of the test caused by weather warmer than the average.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Mikkelin toimipisteessä LUT (Laboratory of Bioenergy). Tutkimusta rahoittivat Suur-Savon Energiasäätiö ja Etelä-Savon Energia Oy (ESE).

Tutkimusaineisto syntyi BEST-tutkimusohjelmaan kuuluvassa hankkeessa ”Emissions and dry matter losses from different storages”.

Kiitokset erityisesti Olli-Jussi Korpiselle työn hyvästä ohjauksesta ja tarkastamisesta. Kiitokset myös Tapio Rannalle työn tarkastamisesta. Haluan kiittää myös muuta LUT-Savon henkilökuntaa hyvistä vinkeistä työn tekemiseen.

Työn tekeminen olisi ollut huomattavasti vaikeampaa ilman hyvin toiminutta yhteistyötä Veljekset Häkkisen ja Etelä-Savon Energian kanssa, joten kiitokset tästä heille.

Kiitän myös vanhempiani tuesta ja kannustuksesta koko opintojeni aikana. Kiitokset kuuluvat ehdottomasti myös Tuulialle, joka on opintojeni viimeisten parin vuoden aikana ollut suuresti avuksi.

Mikkelissä 20.3.2016

Juuso Himmanen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn taustaa	8
1.2 Etelä-Savon Energia	9
1.2.1 Pursialan voimalaitos	10
1.2.2 Muut laitokset	14
1.3 Työn tavoitteet.....	15
1.4 Aikaisemmat tutkimukset.....	15
2 PUU ENERGIANTUOTANNOSSA	17
2.1 Yleistä puupolttoaineista	17
2.2 Metsäpolttoainetyypit	21
2.3 Puupolttoaineiden käytön tulevaisuus Suomessa	22
2.4 Puupolttoaineiden laatu	25
2.5 Puupolttoaineiden ominaisuuksia.....	27
2.5.1 Lämpöarvo ja kosteus	28
2.5.2 Puupolttoaineiden koostumus	31
2.5.3 Hakkeen ominaisuuksia polttoaineena.....	32
2.5.4 Rankahake	34
3 PUUPOLTTOAINEIDEN VARASTOINTI JA KÄSITTELY	35
3.1 Hakkeen tuotanto.....	35
3.2 Metsäpolttoaineiden varastointi	37
3.3 Polttoainerminaalit	39
3.4 Hankintaketjun eri vaiheiden vaikutus polttoaineen laatuun.....	41
3.5 Polttoaineen käsittely	41
4 TUTKIMUKSEN JÄRJESTELYT JA MITTAUKSET.....	42
4.1 Hakeaumojen rakentaminen ja purkaminen	42
4.2 Kosteusnäytteet	45
4.2.1 Näytteenoton tarkoitus	45
4.2.2 Biopolttoaineiden EN-standardit.....	46
4.2.3 Manuaalinen näytteenotto	47
4.2.4 Näytteenoton virheet	49

4.2.5	Näytteiden ottaminen terminaalilla	50
4.2.6	Näytteiden ottaminen voimalaitoksella.....	51
4.3	Kuormamassat	51
4.4	Lämpötilan seuranta aumoissa	51
5	TULOKSET	55
5.1	Olosuhteet aumavarastoinnin aikana.....	55
5.2	Aumojen kosteuspitoisuudet	57
5.3	Lämpötilat aumoissa.....	61
5.4	Kuiva-ainetappiot	64
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	65
6.1	Peittämisen kannattavuus	65
6.2	Muita havaintoja.....	69
7	YHTEENVETO.....	72
	LÄHTEET.....	73

LIITTEET

LIITE I: Sensire Tempnet -laitteiston ominaisuuksia

LIITE II: Terminaalille tuotujen kuormien tiedot

LIITE III: Terminaalilta vietyjen kuormien tiedot (auma 2)

LIITE IV: Terminaalilta vietyjen kuormien tiedot (auma 3)

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<i>CO</i>	Hiilidioksidi	[-]
<i>HC</i>	Hiilivedyt	[-]
<i>m</i>	Massa	[kg]
<i>M</i>	Kosteuspitoisuus	[%]
<i>Q</i>	Lämpöarvo	[MJ/kg]

Alaindeksit

ad	Ilmakuiva
ar	Saapumistila
gr	Kalorimetrinen (ylempi)
d	Kuiva
net	Tehollinen (alempi)

Lyhenteet

CHP	Lämmön ja sähkön yhteistuotanto
ESE	Etelä-Savon Energia
FLK	Pursialan voimalaitoksen varalämpökattila

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Metsähakkeen käyttö polttoaineena on ollut Suomessa voimakkaassa kasvussa 2000-luvulla (Tilastokeskus. 2015, 5). Puupolttoaineiden käytön kannattavuuteen vaikuttaa sekä energiapuun että vaihtoehtoisten polttoaineiden hinta, verotus ja mahdolliset tuet (TEM. 2015, 21–22). Viime aikoina on uutisoitu monista suurista tehdashankkeista, jotka toteutuessaan tulevat lisäävät puun käyttöä Suomessa entisestään (Yle. 2016). Etelä-Savossa, jossa tämä tutkimus on tehty, kilpailu puusta polttoaineena on vielä melko maltillista verrattuna esimerkiksi Etelä-Suomen tilanteeseen (Anttila. 2016, 11–13).

Pursialan voimalaitoksen toiseen kattilaan tehtiin vuonna 2013 uudistuksia, joilla mahdollistetaan turpeen ja puun sekapolton sijaan pelkän puuperäisen polttoaineen käyttö (Aluehallintovirasto. 2014, 4). Tämä on lisännyt voimalaitoksen puupolttoaineiden käyttöä aiemmasta siten, että vuonna 2014 ESE:n käyttämistä polttoaineista puun osuus oli jo yli 80 % (ESE. 2014c, 23).

Pursialan voimalaitoksen polttoainekentällä oleva tila on rajallinen, joten on tarpeen varastoida polttoainetta lähialueille, josta sitä on nopeasti saatavilla. Polttoainetta toimitetaan jatkuvasti suoraan voimalaitokselle, mutta mahdollisten toimitusketjun häiriöiden ja nopeasti kylmenneen sään takia polttoaineen riittävä varmuusvarastointi kohtuullisen matkan päähän voimalaitoksesta on tärkeää.

Polttoaineen tarve vaihtelee suuresti vuodenaikojen ja lämpötilojen mukaan, ja kulutuksen ennakointi on usein haastavaa. Terminaalilla varmuusvarastoidun polttoaineen oletettu käyttöajankohta ei välttämättä toteudukaan, vaan varastointia joudutaan mahdollisesti jatkamaan huomattavasti alkuperäistä suunnitelmaa kauemmin.

1.2 Etelä-Savon Energia

Etelä-Savon Energia (ESE) on Mikkelin kaupungin täysin omistama energiakonserni. Emoyhtiön toimintaan kuuluu energian tuotanto ja myynti, lämmönjakelu sekä lämmönjakeluun liittyvä rakennus- ja kunnossapitotoiminta (ESE. 2014b, 5). ESE-konserniin kuuluu emoyhtiön lisäksi kaksi tytäryhtiötä Suomessa: ESE-Verkko Oy ja ESE-Tekniikka Oy sekä kaksi Venäjällä: OOO ESE ja OOO Russkij Les.

ESE-Verkko Oy vastaa sähkönjakelusta omalla jakeluverkkoalueellaan. Yhtiön toimenkuvaan kuuluu jakeluverkon suunnittelu, kunnossapito ja rakennuttaminen, sähköenergian mittaustietojen käsittely sekä johtotietojen ylläpito sähköisessä karttatietojärjestelmässä. Sähkön varallaolon ylläpito ja vikapäivystys sekä sähköveron kerääminen ja tilittäminen kuuluvat myös ESE-Verkko Oy:n tehtäviin. ESE-Tekniikka Oy vastaa sähkön pien- ja keskijänniteverkkojen sekä kuluttajaliittymien, katualueiden ja liikuntapaikkojen valaistuksen rakentamisesta ja huollosta. OOO ESE ja OOO Russkij Les muodostavat Venäjällä toimivan polttoaineen hankintaorganisaation, josta hankitaan normaalitilanteessa alle 10 % yhtiön käyttämistä polttoaineista. OOO Russkij Les huolehtii metsänvuokrauksesta ja hakkuista. OOO ESE on haketus- ja logistiikkayhtiö, jonka vastuulla ovat metsäenergiapuun terminaalihaketuksen ja junanvaunulogistiikan järjestäminen. Venäjän toiminnoilla parannetaan polttoaineiden toimitusvarmuutta mahdollisissa markkinoiden häiriötilanteissa. (ESE. 2016; ESE. 2014c, 29–33)

ESE tuottaa energiaa pääasiassa Pursialan vastapainevoimalaitoksella lämmön ja sähkön yhteistuotantona (CHP). Pursialan lisäksi ESE tuottaa sähköä osakkuusyhtiöissään tuuli- ja vesivoimalla. Puuperäisten polttoaineiden osuus kaikista polttoaineista on saatu nostettua noin 85 % tasolle ja turpeen osuus on samalla laskenut, ollen nykyisin noin 15 % (ESE. 2016). Konsernin liikevaihto vuonna 2014 oli 52,1 miljoonaa euroa. Sähköä myytiin 290,0 GWh ja lämpöä 423,8 GWh. Luvut laskivat hieman parista edellisestä vuodesta (ESE. 2014b, 5). Pursialan voimalaitoksen osuus sähköntuotannosta oli 182,1 GWh (ESE. 2014c, 7). Konsernin palveluksessa oli 101 henkilöä. (ESE. 2014c, 14)

Taulukko 1. ESE:n käyttämät energiantuotannon polttoaineet vuonna 2014. (ESE. 2014b, 6)

Polttoaine	MWh	TJ	%
turve	163 778	590	18,18
teollisuuden sivutuotteet	192 007	691	21,32
metsähake	472 028	1 699	52,41
kantohake	66 300	239	7,36
kivihiili	0	0	0,00
raskas polttoöljy	6 351	23	0,71
kevyt polttoöljy	175	1	0,02
Yhteensä	900 640	3 242	100

1.2.1 Pursialan voimalaitos

Pursialan voimalaitos sijaitsee Mikkeliissä, Pursialan teollisuusalueella. Voimalaitos (kuva 1) koostuu kahdesta voimalaitosyksiköstä ja yhdestä lämpökattilasta. Laitos tuottaa sähköä valtakunnanverkkoon ja kaukolämpöä Mikkelin kaupungin kaukolämpöverkkoon. Laitoksen kaikkien yksiköiden yhteenlaskettu polttoaineteho on 223 MW. (Aluehallintovirasto. 2014, 1)



Kuva 1. Pursialan molemmat voimalaitosyksiköt käymässä täydellä teholla tammikuun 2016 kovimpien pakkasten aikana. Voimalaitoksen vasemmalla puolella näkyvä suurikokoinen säiliö on ESE:n uusi kauko-lämpöakku (ESE. 2014c, 13).

Pursialan voimalaitoksella tuotetaan lähes kaikki ESE:n tarvitsema sähkö ja lämmöstä yli 90 %. Sähköä laitos tuottaa pääasiassa vastapainetuotantona, mutta sähkön markkinahinnasta riippuen myös lauhdetuotantona. Lauhduttimien tarvitsema jäähdytysvesi otetaan putkistoa pitkin Saimaan Pappilanselältä. (Aluehallintovirasto. 2014, 3)

Voimalaitosyksiköt Pursiala 1 ja Pursiala 2 ovat normaalitilanteessa käytössä vuorotellen vähäisemmän lämmöntarpeen aikana touko-syyskuussa, ja lokakuusta alkaen molemmat yksiköt ovat samanaikaisesti ajossa. Vara- ja huipputehokattila FLK 2 otetaan käyttöön häiriötilanteissa sekä talvikaudella yhtiön muualla sijaitsevien lämpökeskusten kanssa samaan aikaan. (Aluehallintovirasto. 2014, 3)

Pursialan voimalaitoksen kaksi yksikköä ovat tuottaneet vuosien 2007–2011 aikana vuosittain keskimäärin 290 GWh sähköä, 400 GWh kaukolämpöä ja 21 GWh höyryä. Lämpökattila FLK 2:n keskimääräinen vuosituotanto on ollut 8 GWh lämpöä. (Aluehallintovirasto. 2014, 3)

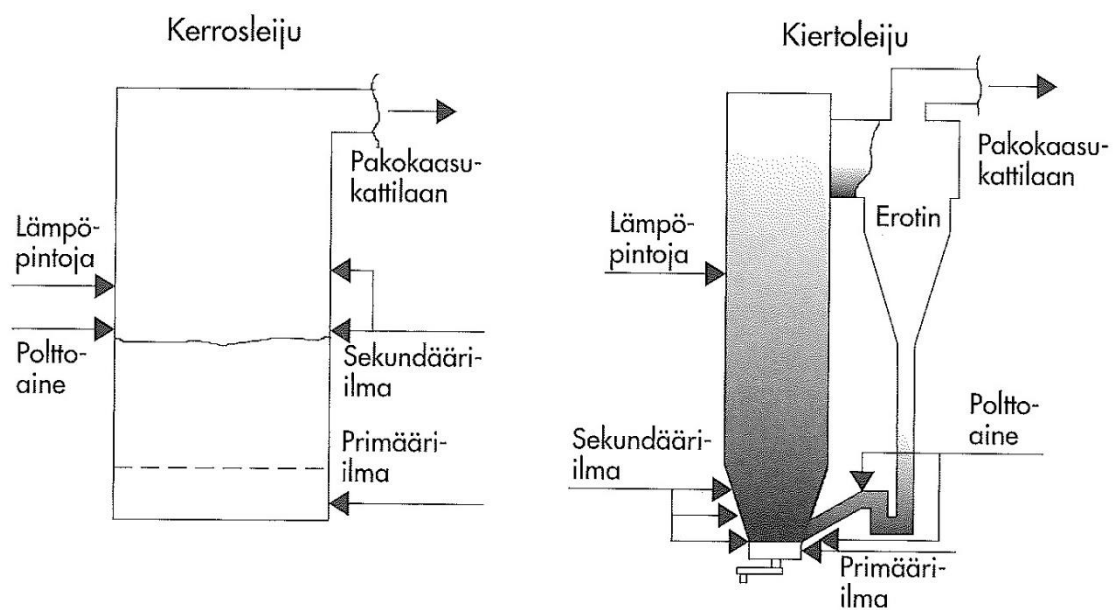
Pursiala 1 on voimalaitosyksiköistä vanhempi, vuonna 1990 valmistunut kiertopetikattila, polttoaineteholtaan 95 MW. Kattilan sähköntuotantoteho on 30 MW ja kaukolämpöteho 65 MW. Keskimääräinen kattilahyötysuhde on 90 %. Savukaasujen puhdistus tapahtuu kolmekenttäisellä sähkösuotimella, jolla saavutetaan 99,8 % erotusaste. Sähkösuotimen jälkeen savukaasut johdetaan 80 metriä korkeaan savupiippuun. (Aluehallintovirasto. 2014, 4)

Pursiala 2 on vuonna 2005 valmistunut leijukerroskattila, polttoaineteholtaan 98 MW. Kattilan sähköntuotantoteho on 32 MW ja kaukolämpöteho 60 MW. Keskimääräinen kattilahyötysuhde on 90 %. Savukaasujen puhdistus tapahtuu kaksikenttäisellä sähkösuotimella, erotusasteen ollessa 99,8 %. Sähkösuotimesta savukaasut johdetaan 70 metriä korkeaan savupiippuun. Vuonna 2013 kakkosyksikköön tehtiin muutoksia, joiden ansiosta kattilalla on voitu lisätä puuperäisten polttoaineiden osuutta (Aluehallintovirasto. 2014, 4). Pursiala 2:n uudistukseen sisältyi arinan suurennus sekä polttoaineen syöttöjärjestelmän ja tulistimien uusiminen. Turpeen ja puun sekapoltoista siirtyminen pelkän puun poltoon lisää tulistinten korroosiota, minkä takia tulistimien uusinta on tarpeellista. (ESE. 2014a, 2)

Lämpökattila FLK 2 on vuonna 1984 valmistunut leijukerroskattila, jota käytetään pelkästään lämmöntuotantoon. Kattilan polttoainetehto on 30 MW ja sillä voidaan tuottaa kaukolämpöä 27 MW teholla. Keskimääräinen kattilahyötysuhde on 90 %. Kattilan savukaasujen käsittely tapahtuu yksikön Pursiala 2 kanssa saman sähkösuotimen ja savupiipun kautta. (Aluehallintovirasto. 2014, 5)

Leijupoltto on tehokas tapa polttaa kiinteitä polttoaineita ympäristöystävällisesti. Leijupoltteknikka soveltuu erityisen hyvin huonolaatuisille ja laadultaan vaihteleville polttoaineille. Leijupolton etuihin kuuluvat myös mahdollisuus polttaa useita erityyppisiä polttoaineita, halpa rikinpoisto sekä vähäiset NO_x- ja palamattomien päästöt. Leijupoltto

ei vaadi juurikaan polttoaineen esikäsitteilyä. Leijupoltto on mahdollista toteuttaa kuplivassa leijukerroksessa (kerrosleiju) tai kiertoleijukerroksessa (kiertoleiju). Kerrosleijupoltossa tulipesässä olevat kiintoainehiukkaset pysyvät leijukerroksessa, kun taas kiertoleijupoltossa hiukkaset kulkeutuvat leijutuskaasun mukana pois tulipesästä, jonka jälkeen ne palautetaan takaisin. Leijupoltossa leijukerroksen lämpötila on normaalisti välillä 750–950 °C. Lämpötilan ylärajan tulee olla tuhkan pehmenemislämpötilan alapuolella. (Hyppänen & Raiko. 2002, 490)



Kuva 2. Kerrosleiju- ja kiertoleijukattilan toimintaperiaatteet. (Hyppänen & Raiko. 2002, 490)

Pursialan voimalaitoksen pääasiallinen polttoaine on puu. Laitoksella poltettaviin puu-polttoaineisiin sisältyy teollisuuden puutähde ja –murske, kutterinlastu ja hiontapöly sekä metsähake ja kierrätyspuu. Jätepuuta laitoksella ei polteta. Toisena polttoaineena voimalaitos käyttää turvetta. Turpeen osuus on kuitenkin ollut laskussa Pursiala 2:n tehtyjen muutosten johdosta. Kivihiiltä on myös kokeiltu polttoaineena huonojen turvetuotantovuosien aikana. Kattiloiden käynnistyspolttoaineena toimii raskas polttoöljy. Lisäksi lämpökattila FLK 2 käyttää tukipolttoaineena kevyttä polttoöljyä. (Aluehallintovirasto. 2014, 4–6)

Vuosina 2007–2011 Pursialan voimalaitoksen polttoaineiden käyttö on ollut keskimäärin 1150 GWh vuodessa. Polttoaineiden vuosikulutuksen arvioidaan kasvavan tulevaisuudessa tasolle 1500 GWh. Pääpolttoaineiden enimmäisosuudet polttoaineiden kokonaiskulutuksesta voivat vaihdella niin, että turpeella osuus on enintään 100 %, puulla 85 % ja kivihiilellä 50 %. (Aluehallintovirasto. 2014, 5)

Pursialan voimalaitoksen yhteyteen rakennettiin kaukolämpöakku vuoden 2015 aikana (kuva 1). Akun tarkoituksena on optimoida sähkön- ja lämmöntuotantoa (ESE. 2014c, 13). Akun tilavuus on 7 000 m³ ja siitä saatava suurin lämpöteho on 30 MW. Lämpöenergiaa akkuun voidaan varastoida noin 300 MWh. Akku mahdollistaa voimalaitosyksiköiden tasaisemman ajotavan Mikkelin kaupungin kaukolämpöverkon lämpökuorman vaihdellessa nopeasti vuorokaudenaikojen ja ulkolämpötilan mukaan, jolloin myös tarve kaukolämmön huippukuorman aikana käynnistettävien lämpökeskusten käytölle vähenee. Kaukolämpöakkua lataamalla voidaan kasvattaa vastapainesähkön tuotantoa, jolloin hyötysuhteeltaan heikompaa lauhdesähkön tuotantoa voidaan vähentää. Akun lämpöenergiaa voidaan myös hyödyntää mahdollisten häiriötilanteiden aikana. Näitä ovat esimerkiksi kaukolämpöverkon vuototilanteet ja voimalaitoksen kattiloiden suunnittelemattomat alasajot. (Koivuniemi. 2016)

1.2.2 Muut laitokset

ESE:llä on Pursialan voimalaitoksen lisäksi Mikkelin kaupungin kaukolämpöverkkoon liitettyjä lämpökeskuksia kattamaan huippukulutuksia ja toimimaan varalla mahdollisten häiriötilanteiden aikana. Näitä laitoksia on 7 kappaletta ja niiden yhteenlaskettu teho on 100 MW. Siirrettäviä, öljykäyttöisiä lämpökeskuksia oli 4 kpl vuonna 2014. Kaukolämpöverkosta erillään olevien kiinteistöjen lämmitykseen tarkoitettuja lämpökeskuksia ESE:llä on 10 kappaletta. Niiden polttoaineena toimii puu ja öljy. (ESE. 2014b, 6)

1.3 Työn tavoitteet

Diplomityön päätavoitteena oli selvittää, onko rankahakeaumojen peittäminen taloudellisesti kannattavaa. Kannattavuuteen vaikuttavia ja tässä tutkittuja asioita olivat mikrobitoiminnan aiheuttamat mahdolliset kuiva-ainetappiot sekä varastoinnin aikaiset muutokset aumojen kosteuspitoisuuksissa. Peittämisestä aiheutuva ylimääräinen työ ja mahdolliset ongelmat esimerkiksi peitteen kestävyudessa ja paloturvallisuudessa otettiin myös huomioon.

1.4 Aikaisemmat tutkimukset

Hakkeen ominaisuuksien muutoksia varastoinnin aikana on tutkittu aiemminkin. Raitila (2014) on tutkinut hakkeen varastointia katoksessa sekä avoimella kentällä olleissa peitetyissä ja peittämättömissä kasoissa. Raitilan tutkimuksessa käsitellyt kasat (noin 200–300 i-m³) olivat kuitenkin huomattavasti tässä tutkimuksessa (noin 5 000 i-m³) käsiteltyjä aumoja pienempiä. Karelia-ammattikorkeakoulun LAAVA-hankkeessa (Juntunen et al. 2013) tutkittiin 440–500 i-m³ kokoisia hakeaumoja Fortumin Iiksenvaaran voimalaitoksen polttoainekentällä Joensuussa.

Juntunen et al. (2013, 3–4) tutkimuksessa 500 i-m³ kokoinen hakekasa koostui lehtipuurangasta, kasan kosteuden ollessa kokeen alussa, maaliskuun puolivälissä 45,3 %. Toinen hakekasa koostui havupuu-hakkuutähteestä ja oli kooltaan noin 440 i-m³. Hakeaumat koottiin maaliskuun pakkasten aikana, jolloin kasojen sisäiset lämpötilat olivat myös pakkasella. Kevään edetessä ja hakkeen sulaessa hakekasojen sisälämpötilat lähtivät nopeaan nousuun. (Juntunen et al. 2013, 7-9)

Anerudin (2015) tutkimuksessa havaittiin hakekasojen kosteuden keskittyvän kasojen yläosiin. Myös kuiva-ainetappiot olivat suurimpia kosteimman hakkeen alueilla. Peitetty hakekasat säilyvät keskimäärin peittämättömiä kuivempina.

Hakeaumoissa tapahtuu mikrobitoimintaa ja kemiallisia reaktioita, jotka nostavat aumojen lämpötilaa. Samalla puun kuiva-ainetta häviää ja hakkeen lämpöarvo heikkenee. Yli

20 °C lämpötila ja yli 30 % kosteus saavat aikaan mikrobitoiminnalle otolliset olosuhteet (Raitila. 2014, 18). Juntusen et al. (2013, 15) tutkimuksessa havaittiin puolen vuoden mittaisen varastoinnin aikana noin 20 % kuiva-ainetappiot.

Kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat hakkeen ominaisuudet sekä ympäristössä vallitsevat olosuhteet. Hakkeen ominaisuuksista alkukosteus, hakepalojen koko ja muoto, kuoren peittämisen ja halkaistun pinnan osuus sekä puulajikohtaiset ominaisuudet vaikuttavat kuivumisnopeuteen. Ympäristössä vallitsevista olosuhteista kuivumisen kannalta oleellisia tekijöitä ovat kuivauslämpötila, ilman suhteellinen kosteus, ilman virtausnopeus, sade ja auringon säteily. (Raitila. 2014, 3)

Keskimääräistä sateisemmalla ajanjaksolla Raitilan (2014, 14–17) tekemässä tutkimuksessa havaittiin ulkona varastoitujen, peittämättömien hakekasojen kastuvan läpikotaisin kesän aikana, mutta lämmittämättömässä varastohallissa varastoitujen kasojen havaittiin kuivuvan kesällä ja vielä lisää syksyllä. Ulkona olevien kasojen peittäminen esti pahimman kastumisen kesällä, mutta kasojen keskimääräinen kosteus oli silti seuraavana keväänä 50 % tai ylikin. Hakkeen alkukosteudella ei havaittu olevan suurta vaikutusta kosteuden muutokseen.

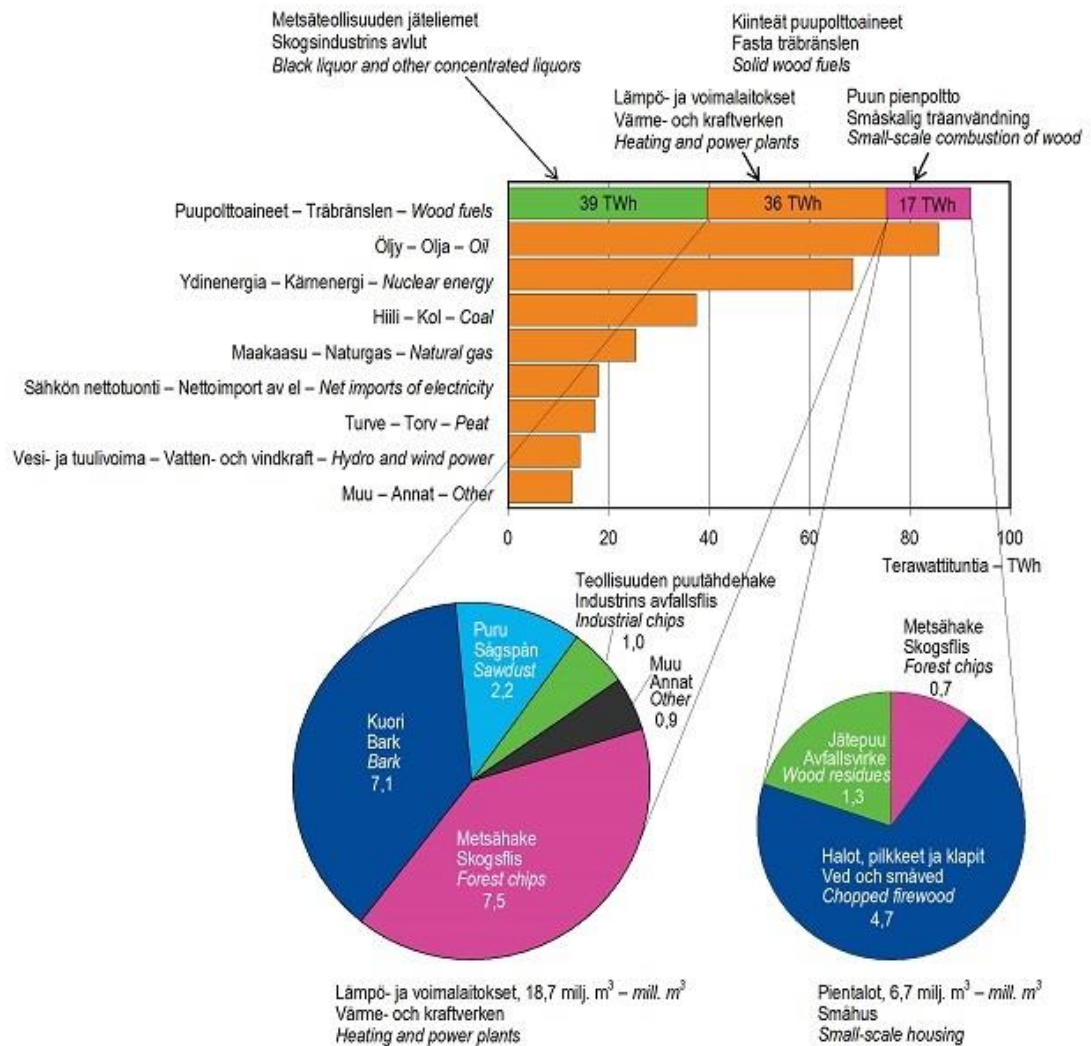
Aalto (2015) tutki diplomityössään varastoinnin keston vaikutuksia hakettamattoman rangan ja rankahakkeen laatuun. Kyseessä oli sama raaka-aine (venäläinen rankahake), kuin tässä tutkimuksessa. Tästä tutkimuksesta poiketen Aallon tutkimuksessa terminaali-varastoja oli useissa eri paikoissa. Tutkimuksen perusteella rankahakkeen varastointiaika tulisi pitää mahdollisimman lyhyenä, koska varastointiajan kasvaessa hakkeen sisältämä energia vähenee (Aalto. 2015, 59).

2 PUU ENERGIANTUOTANNOSSA

2.1 Yleistä puupolttoaineista

Puun energiakäytön etuina ovat uusiutuvuuden lisäksi puhtaus, kotimaisuus, paikallisuus, työllistävyys ja metsien hoidon edistäminen (Hakkila & Fredriksson 1996, 5). Toisaalta puun korjuusta, kuljetuksista ja poltosta aiheutuu pienhiukkaspäästöjä (Liski et al. 2011, 24–25). Varsinkin pientalojen puulämmityksestä aiheutuvilla hiukkaspäästöillä on merkittäviä terveydellisiä haittavaikutuksia koko Suomen mittakaavassa (Ahtoniemi et al. 2010, 43). Esimerkiksi hakkuutähteen korjuulla voi myös olla monimutkaisia vaikutuksia maaperän ravinnedynamiikkaan (Nurmi. 2008).

Metsistä saatavaa puuraaka-ainetta käsitellään yleisesti metsäteollisuuden käyttöön menevän ainespuun näkökulmasta. Energiantuotantoon käytettävä puu on siis ainespuun korjuusta jäljelle jäävää sivutuotetta. Kansantalouden kannalta on tarpeellista, että mahdollisimman suuri osa käytettävissä olevasta metsän kasvusta ohjautuu metsäteollisuuden ainespuuksi. Sahatavaraksi ja puumassaksi, tai varsinkin paperiksi tai kartongiksi jalostettuna puusta saadaan selvästi enemmän vientituloja, kuin mitä saman puumäärän rahallinen arvo energiapuuna on (Hakkila. 2004, 19). Hinnan ja kysynnän vaihteluiden seurauksena ainespuuksi kelpaavaa runkopuuta hankitaan kuitenkin toisinaan myös energiakäyttöön (Räisänen. 2011).



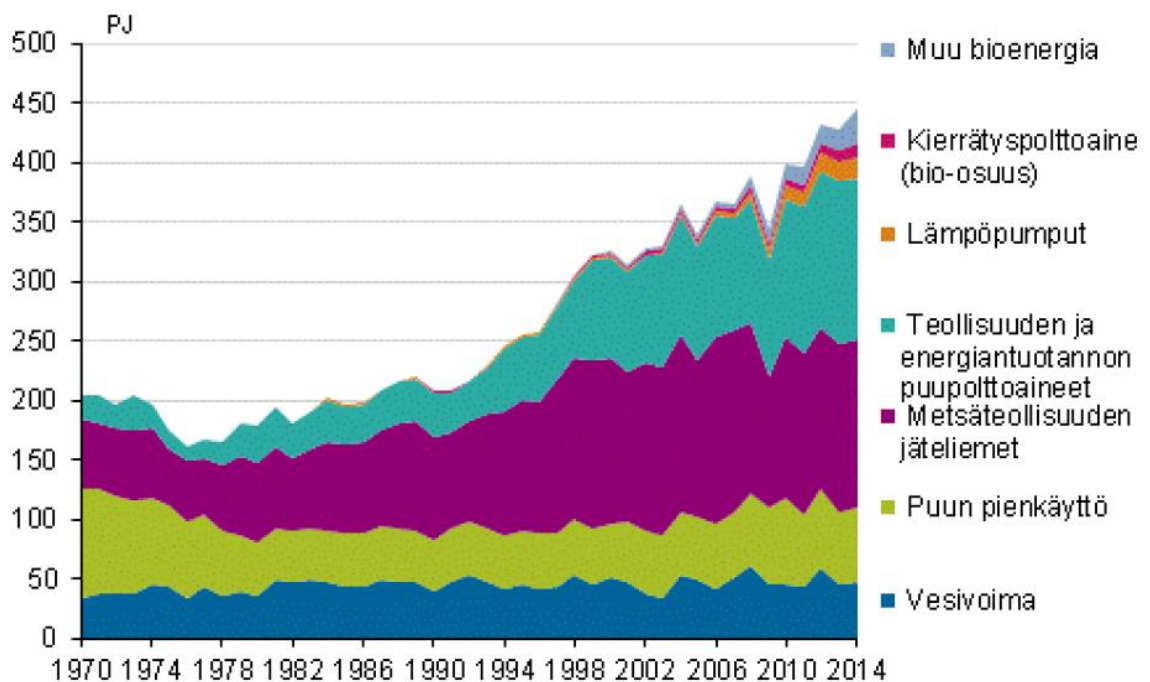
Kuva 3. Energian kulutus Suomessa energialähteittäin vuonna 2014. (Luonnonvarakeskus. 2015)

Lähes 80 % Suomessa käytettävästä uusiutuvasta energiasta on metsäperäisillä polttoaineilla tuotettua bioenergiaa. Vuonna 2012 puupolttoaineet ohittivat öljyn Suomen käytetyimpänä energialähteenä. Valtaosan puupolttoaineiden käytöstä muodostavat metsäteollisuuden sivuvirrat, kuten mustalipeä, kuoret ja sahanpuru. Metsähakkeen käyttö on lisääntynyt runsaasti viime vuosina sähkön ja lämmön tuotannossa. Puuta käytetään energiantuotannossa myös pelletteinä ja kotitalouksien lämmityksessä. (TEM. 2015, 16)

Metsähakkeen käytön lisääminen monipolttoainevoimaloissa on kustannustehokas keino biomassan käytön lisäämiselle sähkön ja lämmön tuotannossa. Suomessa biomassan energia saadaan käytettyä korkealla hyötysuhteella yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP) ansiosta. Biomassan käyttö pelkkään lämmöntuotantoon lämpökeskuksissa tai -laitoksissa on myös energiatehokasta. (TEM. 2014, 32)

Suomen tavoitteena on EU:n ilmastotavoitteiden osana nostaa uusiutuvan energian osuus tasolle 38 % energian loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä (TEM. 2014, 30). Tavoite ylitettiin jo vuonna 2014, ja vuonna 2015 osuuden arvioidaan edelleen kasvaneen, olleen lähes 40 % (Energiavirasto. 2016). Tämän tavoitteen saavuttamisessa biomassalla ja erityisesti metsähakkeella on ollut keskeinen osuus. Metsähakkeelle onkin asetettu merkittävin kasvutavoite, 25 TWh osuus sähkön- ja lämmöntuotannossa vuonna 2020. Metsähakkeen käytölle asetettavat määrälliset tavoitteet kiristyvät ilmastopolitiikan tavoitteiden kiristyessä. (TEM. 2014, 30)

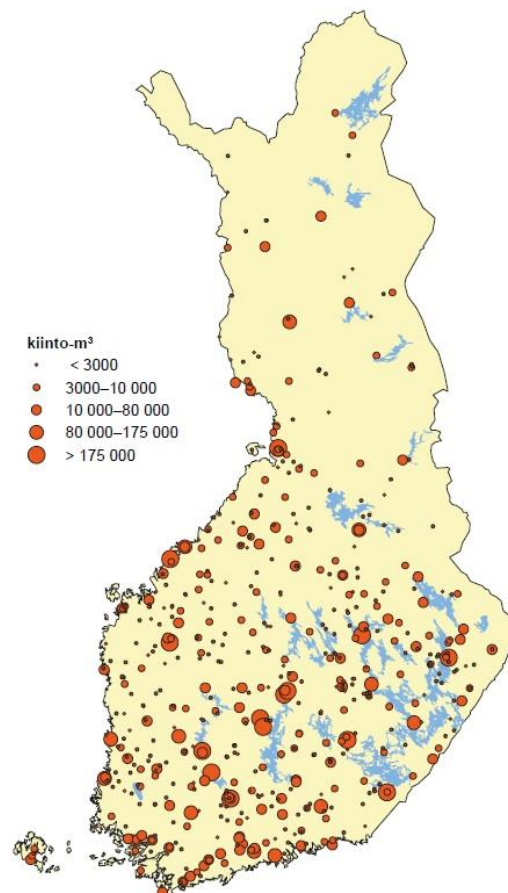
Puuperäisillä polttoaineilla tuotetun energian määrä riippuu oleellisesti metsäteollisuuden tuotannon aktiivisuudesta, sillä suurin osa puupolttoaineista on mustalipeää, kuorta, puuria ja muita puunjalostuksen sivutuotteita (TEM. 2015, 19).



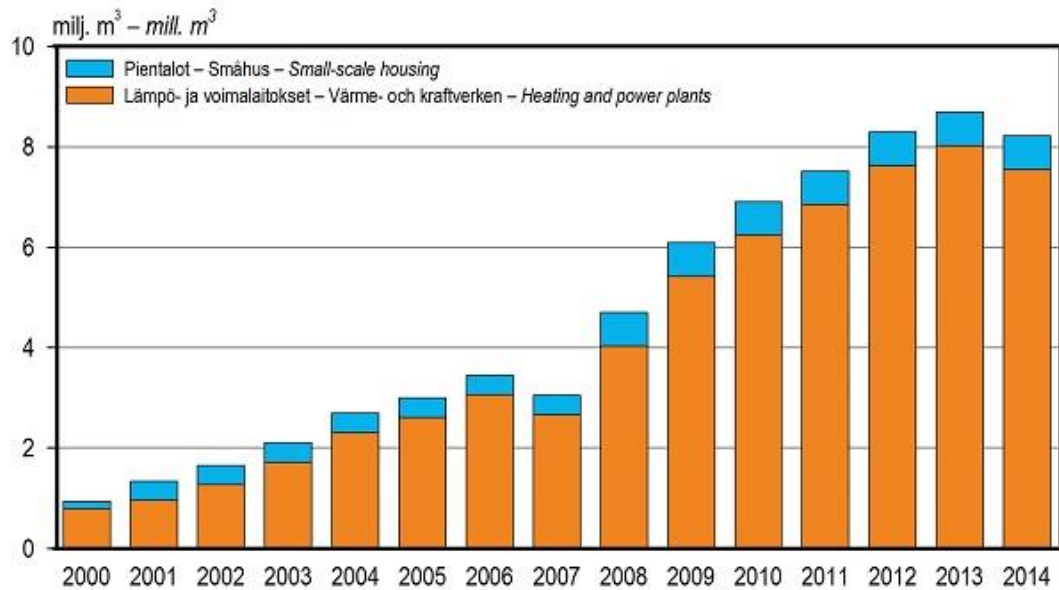
Kuva 4. Uusiutuvien energialähteiden käyttö vuosina 1970-2014. (Tilastokeskus. 2015, 5)

Useiden peräkkäisten kasvuvuosien jälkeen metsäenergian käyttö Suomessa laski vuonna 2014. Laskun syynä oli poikkeuksellisen lauha talvi ja kilpailun kiristymisen suhteessa korvaaviin laitospolttoaineisiin. Metsähakkeen kokonaiskäyttö polttoaineena vuonna 2014 väheni edellisvuodesta 5 % ollen yhteensä 8,2 miljoonaa kuutiometriä. Lämpö- ja voimalaitosten osuus tästä oli 7,5 miljoonaa kuutiometriä, missä on vähennystä edellisvuoteen 6 %. Vuonna 2014 metsähakkeen keskimääräinen laitos hinta oli 21,26 €/MWh. Metsähakkeen raaka-aineena käytettiin pienpuuta 49 %, järeää runkopuuta 6 %, hakkuutähteitä 34 % ja kantoja 11 %. (Routa & Ikonen. 2015, 19)

Korjuukelpoisen metsähakkeen vuotuiseksi korjuumääräksi Suomessa on arvioitu 12–21 miljoonaa kuutiometriä. Tämä sisältää hakkuutähteet, pienpuun ja kannot. Määrään vaikuttaa metsäteollisuuden puunkäyttö, energiapuun hakkuutapa ja myös se, paljonko kuitupuumittaista pienpuuta ohjautuu energiakäyttöön. (Asikainen et al. 2013, 10)



Kuva 5. Metsähaketta polttoaineenaan käyttäneet lämpö- ja voimalaitokset vuonna 2012 käyttömäärän mukaan luokiteltuna. (Anttila et al. 2014, 11)



Kuva 6. Metsähakkeen käyttö Suomessa vuosina 2000-2014. (Luonnonvarakeskus. 2015)

2.2 Metsäpolttoainetyypit

Puuperäisiä polttoaineita on useita eri tyyppisiä, joista tässä työssä käsitellään pääasiassa rankapuuhaketta. Seuraavassa on esiteltyä muutamia yleisimpiä puupolttoaineita ja niiden määritelmiä.

Hake tai *puuhake* on tietynkokoiseksi palasiksi leikkaavilla terillä mekaanisesti haketettua puubiomassaa. Palaset ovat suorakaiteen muotoisia, tyypillisesti 5–50 mm pitkiä ja palasten paksuus on pieni verrattuna muihin mittoihin.

Hakkuutähde on runkopuun hakkuun yhteydessä syntyvä ja metsään jäävä puuainne, joka koostuu pääasiassa oksista ja latvuksista. Myös hakkuualueille jäävä pienikokoinen puu luetaan hakkuutähdeksi.

Kokopuu on kaadettu puu kokonaisuudessaan, juuristo pois lukien. Kokopuu sisältää siis rungon lisäksi kuoren, oksat ja lehdet tai neulaset.

Metsähake on metsäpuubiomassasta valmistettua haketta. Termiä metsähake käytetään Suomessa yleisterminä tarkoittaen ranka- kokopuu- ja hakkuutähdehaketta.

Metsäpolttoaine on puuraaka-aineesta valmistettu polttoaine, jota ei ole aiemmin käytetty muuhun tarkoitukseen. Valmistetaan suoraan puusta mekaanisella prosessilla.

(Alakangas & Impola. 2014, 9–11)

Taulukko 2. Puuperäisten polttoaineiden kauppanimikkeiden luokittelu. (Alakangas & Impola. 2014, 16)

Polttoaineen nimi	Tyypillinen palakoko	Tyypillinen valmistusmenetelmä (SFS-EN ISO 17225-1, taulukko 2)
Kokopuu	Puun runko ja oksat	Katkaistu, karsimaton puu, joka sisältää myös latvan, mutta ei sisällä kantoa eikä juuria, ellei erikseen ole mainittu
Ranka/runkopuu	Puun runko	Karsittu ranka tai runkopuu
Hakkuutähde	Latvukset ja oksat	Latvus ja oksat, jotka on katkaistu runkopuusta sekä hakkuualueelle jäävä pienikokoinen puu
Kanto	Kanto	Kanto juurineen paloitetuna muutamaan osaan nostovaiheessa
Hake	16 ...100 mm	Paloittelu mekaanisesti teräväkulmaisilla, leikkaavilla terillä
Murske	Vaihteleva	Murskaus tylppäkulmaisilla terillä
Kuori	Vaihteleva	Puun kuorintatähde, joka voidaan haluttaessa repiä
Nippu, paali	Vaihteleva	Hakkuutähteen tai kokopuiden sidonta pitkänomaisiksi nipuksi (pituussuuntaan sidottu)
Jauhemainen, pölymäinen polttoaine	< 1 mm	Jauhatus
Sahanpuru	1 ... 5 mm	Sahauksessa syntyvä puru
Höylän lastut	1 ... 30 mm	Höyläys leikkaavilla terillä

2.3 Puupolttoaineiden käytön tulevaisuus Suomessa

Suomessa uusiutuvien energialähteiden ja varsinkin biomassan hyödyntäminen energiantuotannossa on maailman kärkitasoa. Vuonna 2014 uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta oli 33 %. Puuperäiset polttoaineet ovat tärkein uusiutuvan energian lähde Suomessa. Niiden osuus Suomen kokonaisenergiakulutuksesta vuonna 2014 oli 25 %. (Tilastokeskus. 2015, 1)

Suomi on sitoutunut nostamaan uusiutuvien energialähteiden osuutta energian loppukulutuksesta nykyisestä (28,5 % vuonna 2014) 38 %:n tasolle vuoteen 2020 mennessä. Puuperäisellä energialla, varsinkin metsähakkeella, on suuri rooli lähivuosien uusiutuvan energian käytön lisäämisellä. (Anttila et al. 2014, 5)

Metsähakkeen käytön lisääminen on tapahtunut Suomessa EU:n uusiutuvan energian lisäämisvelvoitteen mukaisesti. Tämä kehitys on edellyttänyt merkittäviä investointeja. Noin puolet Suomessa tarvittavasta uusiutuvan energian lisäyksestä vuoteen 2020 mennessä on tarkoitus saavuttaa lisäämällä metsähakkeen käyttöä sähkön ja lämmön tuotannossa. (TEM. 2015, 20)

Puupolttoaineiden käytön lisääminen on mahdollista lähinnä metsähakkeen käyttöä lisäämällä. Teollisuuden sivutuotteena syntyvät puupolttoaineet käytetään jo nykyisin täysimääräisesti hyödyksi ja niiden määrä riippuu metsäteollisuuden tuotantomääristä. (Energiateollisuus. 2015)

Suomen tavoitteena on nostaa metsähakkeen vuosittainen käyttö tasolle 25 TWh vuoteen 2020 mennessä. Vuonna 2014 metsähaketta käytettiin 15 TWh. Tavoitteeseen pääseminen siis edellyttää nykyisen nopean kasvuvauhdin jatkumista tulevina vuosinakin. Metsänkasvu Suomessa on nopeampaa kuin koskaan viimeisen sadan vuoden aikana ja lisäksi puuta on aiempaa enemmän (Energiateollisuus. 2015). Metsäenergian käytön kasvua ei siis rajoita raaka-aineen riittävyys, vaan puuta riittänee sekä metsäteollisuuden että energiantuotannon tarpeisiin jatkossakin. (Salminen. 2015, 3)

Metsäbiomassaa tullaan mahdollisesti käyttämään runsaasti myös liikenteen biopolttoaineiden valmistukseen. Liikenteen päästöjen vähentäminen on tarpeellista päästökaupan piiriin kuulumattoman sektorin päästöjen vähentämiseksi, joten liikenteen biopolttoaineiden osuutta on lisättävä. Suomella on tavoitteena nostaa biojalosteiden liikenteen energiakäytön osuudeksi 20 % vuonna 2020, jolloin biopolttoaineiden käyttö vuositasolla olisi nykyarvion mukaan lähes 6 TWh. (TEM 2015, 20)

Metsähakkeen korjuupotentiaalia arvioitaessa lähtökohtana on metsäbiomassan teoreettinen enimmäispotentiaali. Tähän sisältyvät esimerkiksi metsänhoidollisilta harvennuksilta

kertyvä puubiomassa ja ainespuun korjuun yhteydessä metsään jäävä hukkarunkopuu, latvusmassa sekä kanto- ja juuripuu. Teoreettiseen potentiaaliin voidaan sisällyttää myös hakkuusäästö eli metsän vuotuisen kasvun ja poistuman erotus. Koko teoreettista enimmäispotentiaalia ei kuitenkaan ole mahdollista saada käytön piiriin, vaan saatavuutta rajoittavat useat tekijät, joiden vaikutukset on arvioitava erikseen. Näitä rajoitteita ovat esimerkiksi materiaalin korjuutekninen saanto palstalla, varastointihävikki, raaka-aineen laatuvaatimukset, työmaan vähimmäiskoko ja hehtaarikertymä, metsänomistajien myyntihalukkuus, metsänhoito-ohjeet ja korjuusuositukset sekä metsähakkeen hintakilpailukyky muihin polttoaineisiin verrattuna. (Anttila et al. 2013, 6)

Taulukko 3. Tyypillinen hakkuukierro ainespuun ja biomassan tuotoksineen Etelä-Suomessa. (Hakkila, 2004, 20)

Käsittely	Metsikön ikä vuotta	Ainespuun kertymä, m ³ /ha	Biomassatähteet	
			m ³ /ha	toe/ha
Taimikon hoito	10–20	–	15–50	3–9
Ensiharvennus	25–40	30–80	30–50	6–9
Toinen harvennus	40–60	50–90	20–40	4–8
Kolmas harvennus	50–70	60–100	20–40	4–8
Päätehakkuu	70–100	220–330	70–130	13–24
Koko kiertoaika		360–600	155–310	30–58

Metsäenergian kannattavuus sähkön ja lämmön tuotannossa riippuu useista asioista. Näitä ovat esimerkiksi erilaiset tuotantotuet, vaihtoehtoisten polttoaineiden, kuten turpeen ja kivihiiilen hinnat, sekä verotus ja EU:n päästökauppajärjestelmä. Suomessa on tapahtunut muutoksia metsähakkeen tuotantotukiin ja kilpailevien polttoaineiden verotukseen vuoden 2010 jälkeen. (TEM. 2015, 21–22)

Metsähakkeen käyttöä pyritään edistämään maksamalla tuotantotukea metsähakkeella tuotetulle sähkölle. Tukijärjestelmä on otettu käyttöön keväällä 2011 ja sen piiriin kuuluu noin 50 metsähaketta käyttävää voimalaitosta, joiden yhteenlaskettu sähköteho on noin 3800 MW ja sähkön vuosituotanto noin 3850 GWh. Suurin osa näistä laitoksista tuottaa

myös lämpöä. Tukea maksetaan yksittäiselle laitokselle enintään 12 vuoden ajan. (TEM. 2015, 22)

Erilaisten polttoaineiden erilaiset ominaisuudet vaikuttavat monella tavalla polttolaitosten käytettävyyteen. Useat laitokset ovat alun perin rakennettu turvetta polttaviksi ja puupolttoaineiden käyttöönotto tai käytön lisääminen näissä laitoksissa on aiheuttanut ongelmia ja lisäkustannuksia. Mahdollisia ongelmia voivat olla häiriöt polttoaineen käsittelyjärjestelmissä, petihiekan vaihtovälin lyheneminen, kerrostumat kattilan lämpöpinnoilla, muuttuvat tuhkan ominaisuudet, omakäyttötehon muutokset ja heikentynyt kattilateho. Puupolttoaineet aiheuttavat lisäkustannuksia jo melko pienilläkin seossuhteilla ja puun osuuden kasvaessa kasvavat myös kustannukset. (Hakkila. 2004, 67)

2.4 Puupolttoaineiden laatu

Puun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vaihtelee välillä 18,3–20,0 MJ/kg. Latvojen, oksien ja pienikokoisen puun lämpöarvo on hieman kokopuun lämpöarvoa korkeampi. Puun lämpöarvo on muihin kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna varsin matala. Tämä aiheuttaa omat vaatimuksensa polttoaineen käsittelyssä ja poltossa käytettäville laitteistoille. Varastotilan tarve on myös suurempi kuin monilla muilla polttoaineilla. (Alakangas. 2000, 42)

Kosteus on puupolttoaineiden tärkein ominaisuus polttoaineenkaupassa. Kosteus vaikuttaa myös kuljetuksen yksikkökustannuksiin, polttolaitoksella tapahtuvaan polttoaineiden käsittelyyn sekä polton ja päästöjen hallintaan (Alakangas & Impola. 2014, 17). Kosteus vaikuttaa metsähakkeen käytettävyyteen usealla eri tavalla:

- **Kuljetuskustannukset.** Talvella kaatotuoreessa puussa on puulajista, sää- ja metsikköolosuhteita riippuen noin puolet vettä ja puolet kuiva-ainetta. Puussa oleva vesi nostaa kuljetuskustannuksia varsinkin pidemmällä kuljetusmatkoilla.

- **Tehollinen lämpöarvo.** Puupolttoaineessa olevan veden haihduttaminen vaatii poltossa lämpöenergiaa 0,7 kWh/kg. Talvella kaadetun havupuun kosteuden pudottaminen 55...40 % puolittaa alkuperäisen vesimäärän ja nostaa tehollista lämpöarvoa 8 %.
- **Polton hyötysuhde.** Puupolttoaineen korkea kosteuspitoisuus johtaa helposti epätäydelliseen palamiseen, jolloin osa lämpöarvosta jää hyödyntämättä. Tällöin voi olla tarpeellista suurentaa kattilaa, mikä taas lisää investointikustannuksia. Polttoaineen liiallinen kosteus on erityisen haitallista pienissä kattiloissa.
- **Polton päästöt.** Epätäydellinen palaminen kasvattaa poltossa syntyviä CO-, HC- ja hiukkaspäästöjä.
- **Polttoaineen säilyvyys.** Kosteus heikentää puupolttoaineen säilyvyyttä varsinkin, jos polttoaine varastoidaan hakkeena ja se sisältää viherainesta tai muuta aktiivista ja ravinnerikasta biomassaa. Kemialliset ja biokemialliset reaktiot aiheuttavat kuiva-ainetappioita ja homekasvustojen muodostumista. Reaktiot vähenevät oleellisesti kosteuden laskiessa alle 25 %:n, mutta tämän saavuttaminen on vaikeaa metsähakkeen suurimittaisessa tuotannossa. Tästä syystä hakkeen pitkäaikainen varastointi ei ole järkevästi mahdollista.
- **Käsittelyongelmat talvella.** Hakkeen kosteus saattaa aiheuttaa jäätymistä, jolloin purkupaikalla ja syöttölinjoilla seuraa ongelmia. Kuorman purkaminen hidastuu, polttoaineiden sekoittaminen vaikeutuu sekä kuljettimien, seulojen ja siilojen toimintaan tulee tukosten aiheuttamia häiriöitä. (Hakkila. 2004, 68)

Suurille laitoksille polttoaineen suhteellisen korkeakaan kosteus ei ole samanlainen ongelma kuin pienille laitoksille, sillä ne käyttävät kattiloissaan leijukerrospoltoa ja usein puu sekoitetaan tasalaatuisen turpeen kanssa. Korkea kosteus heikentää kuitenkin kaikkien laitosten energiatehokkuutta, ja tästä syystä myös suuret laitokset pyrkivät pitämään hakkeen kosteuden alhaisena ja sekoittamaan erilaatuisia polttoaine-eriä. (Hakkila. 2004, 68)

Metsäbiomassa kuivuu luonnonoloissa lähinnä vain kesäkaudella. Syksyllä ilman suhteellinen kosteus kohoaa, jonka seurauksena biomassan ja ilman välinen kosteustasapainotila nousee korkeammalle kosteustasolle. Kohonnut kosteus on erityisen haitallista

juuri talvikäytössä. Yleisesti hakkeen tavoitekosteutena pidetään talvellakin alle 50 % tasoa suurilla laitoksilla ja alle 40 % tasoa pienillä laitoksilla. (Hakkila. 2004, 68)

Puupolttoaineiden hyvä laatu on tärkeää polttolaitosten toiminnan kannalta. Huonolaatuiset polttoaineet lisäävät polttoainekustannuksia, aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia huoltojen, ylläpidon ja korjausten muodossa sekä tuotannonkeskeytyksiä. Muita negatiivisia vaikutuksia ovat ylimääräisen petihiekan ja prosessituhkan hävittämisestä aiheutuvat kustannukset, menetetyt sähkön ja lämmön myyntitulot ja kiinteän polttoaineen korvaaminen öljyllä. Öljyn polttamiseen tarvittavista päästöoikeuksista voi muodostua suurilla laitoksilla merkittäviä lisäkustannuksia. (Ikonen & Jahkonen. 2014, 9)

Metsähakkeen tuotantoketjussa ilmeneviä laatuongelmia aiheuttavat yleisimmin kiire korjuu- ja kuljetuslogistiikassa, kohteelle soveltumaton kalusto tai menetelmä, väärin tehty varasto tai väärä varastopaikka ja liian lyhyt varastointiaika. Tuotantoketjussa osallisina olevien henkilöiden asenteella voi myös olla vaikutusta laatuongelmiin. (Ikonen & Jahkonen. 2014, 13)

Korjuun ja varastoinnin aikaiset virheet vaikuttavat huomattavasti epäpuhtauksien määrään ja energiapuun kosteuteen. Korjuussa tehtyjä virheitä on vaikea korjata enää hakeuksen tai terminaalivarastoinnin aikana. (Ikonen & Jahkonen. 2014, 15)

2.5 Puupolttoaineiden ominaisuuksia

Kiinteän polttoaineen palamistapahtuma koostuu sarjasta peräkkäisiä reaktioita. Palamisen alkuvaiheessa polttoaine lämpenee ja vesi poistuu siitä. Tämän jälkeen polttoaineen sisältämät haihtuvat ainesosat kaasuuntuvat ja palavat liekin muodossa ulkopuolisen hapen avulla. Puupolttoaineet sisältävät runsaasti haihtuvia ainesosia ja tästä syystä ne palavat suurella liekillä ja vaativat suuren palamistilan. Haihtumattomista polttoaineen osista muodostuu vähähappisessa tilassa ensin puuhiiltä ja muita pyrolyysituotteita, jotka palavat vasta palamisprosessin viimeisessä vaiheessa. (Hakkila & Fredriksson. 1996, 8)

Puupolttoaineiden laatuun vaikuttavat monet ominaisuudet, joiden keskinäisiin painoarvoihin vaikuttavat polttolaitoksella käytettävät polttoaineen käsittelylaitteistot ja kattilatekniikka sekä seospolttoaineiden ominaisuudet. Suuren mittakaavan laitoksilla tärkeimpiä metsähakkeen laatutekijöitä ovat

- kosteus
- lämpöarvo
- energiatiheys
- hiilidioksidin ominaispäästö
- neulaspitoisuus
- puhtaus ja tuhkapitoisuus
- palakoko

Edellä mainituilla ominaisuuksilla on vaikutusta laitoksen toimintaan sekä keskiarvojen että vaihtelun kautta. Ennalta-arvaamaton laatuvaihtelu aiheuttaa usein ongelmia laitoksella. Laadun vaihtelua esiintyy kuormien sisällä, kuormien välillä ja vuodenaikojen vaihtelun mukaan. Laadunhallinnalla pyritään vaihtelun tasoittamiseen. (Hakkila. 2004, 67)

2.5.1 Lämpöarvo ja kosteus

Polttoaineen lämpöarvo määräytyy hiili- ja vetypitoisuuden mukaan, sillä puun sisältämistä alkuaineista vain näiden kahden palamisessa vapautuu lämpöenergiaa (Hakkila & Fredriksson. 1996, 8).

Polttoaineen lämpöarvo voidaan määrittää eri tavoilla. *Kalorimetrinen lämpöarvo* eli *ylempi lämpöarvo* huomioi palamisen yhteydessä muodostuvan höyryn vaatiman höyrystymisenergian. Ylemmän lämpöarvon määrittäminen tapahtuu punnitsemalla ensin ilma-kuivasta analyysinäytteestä noin 1 g, joka poltetaan nesteeseen upotetussa kalorimetripommissa happiatmosfäärissä. Tämän jälkeen palamisessa vapautunut lämpö mitataan. Myös analyysinäytteen kosteus mitataan samalla, jotta ilmakehän näytteen lämpöarvo saadaan vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Tuloksena ilmoitetaan

kahden rinnakkaismäärittelyn keskiarvona saatu ylempi lämpöarvo absoluuttisen kuivalle näytteelle. Laskenta tapahtuu yhtälön (1) mukaisesti. Rinnakkaismäärittelyjen välinen ero saa olla enintään 0,120 MJ/kg. Lämpöarvot ilmoitetaan tarkkuudella 0,01 MJ/kg.

$$Q_{gr,d} = Q_{gr,ad} * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (1)$$

missä

$Q_{gr,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]

$Q_{gr,ad}$ on ilmakeivan näytteen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]

M_{ad} on ilmakeivan näytteen analysikosteus [%]

Suomessa yleisesti käytetty tapa on ilmoittaa *tehollinen lämpöarvo* eli *alempi lämpöarvo*, joka voidaan laskea muunnoskaavan avulla ylemmästä lämpöarvosta, huomioimalla polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa syntyvän ja savukaasujen mukana poistuvan vesihöyryn haihduttamiseen kuluva lämpömäärä. Absoluuttisen kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo saadaan laskettua vastaavan kalorimetrinen lämpöarvon avulla käyttäen laskennassa yhtälöä (2):

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - 0,02441 * M \quad (2)$$

missä

$Q_{net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

$Q_{gr,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]

0,02441 on veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjaustekijä (+25 °C) [MJ/kg]

M on polttoaineen kuiva-aineen sisältämän vedyn palamisessa syntynyt vesimäärä [%]

Kolmas tapa ilmoittaa lämpöarvo on *tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa* eli *saapumistilassa*. Tämä lämpöarvo saadaan vähentämällä laskennassa energiamäärä, joka kuuluu polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa lasketaan käyttäen yhtälöä (3):

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02441 * M_{ar} \quad (3)$$

missä

$Q_{net,ar}$ on saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

$Q_{net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

M_{ar} on vastaavan polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa (%) painotettuna kostean polttoaineen massalla

0,02441 on veden höyrystämiseen kuluva lämpömäärä (+25 °C) [MJ/kg]

(Alakangas. 2000, 27–29)

Tuhkapitoisuus ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen ovat polttoteknisesti tärkeitä ominaisuuksia erityisesti kannoilla ja hakkuutähteillä. Tuhkapitoisuus on määritettävä aina kannon ja hakkuutähteen lämpöarvomäärityksen yhteydessä, elleivät polttoaineen toimittaja ja vastaanottaja ole sopineet toisin. (Alakangas & Impola. 2014, 25)

Myös muita polttoaineen ominaisuuksia voi olla tarpeen määrittää. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi kloori-, hiili- ja vetypitoisuus sekä pääalkuaineiden ja hivenaineiden pitoisuudet. Kloori (Cl), natrium (Na) ja kalium (K) vaikuttavat tuhkan sulamisominaisuuksiin ja sitä kautta kattilan likaantumiseen ja korroosioon. Tästä syystä näiden aineiden

pitoisuudet ovat suositeltavia määrittää toimituksen alkaessa ja suurista polttoaine-eristä. Mikäli polttoaineita käytetään korkeapaineisessa höyrykattilassa, on suositeltavaa määrittää edellä mainittujen aineiden pitoisuudet vähintään neljännesvuosittain kustakin polttoainelajista. (Alakangas & Impola. 2014, 25)

Kosteudella on oleellinen vaikutus puupolttoaineen laatuun. Märkä puupolttoaine on lämpöarvoltaan huonoa ja tällöin polttolaitoksen hyötysuhde laskee käytettäessä polttoainetta, jolla on suuri kosteuspitoisuus. Huonolaatuinen, kuten liian kostea tai epätasaista palakokoa oleva hake heikentää polttolaitosten kannattavuutta. Tämä ilmenee selkeimmin pienillä laitoksilla, mutta myös suuren mittakaavan laitoksille polttoaineen laadulla on suuri merkitys. (Lepistö. 2010, 7)

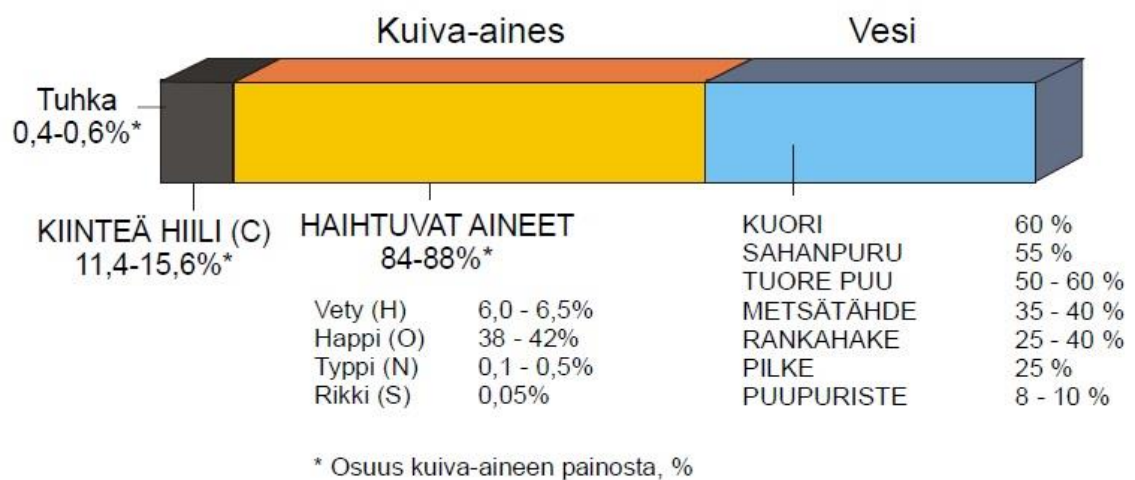
Pidempiaikaisessa varastoinnissa märkä hake voi alkaa mikrobitoiminnan vaikutuksesta hajota ja samalla lämmetä. Hajoamisen seurauksena hakkeesta häviää kuiva-ainetta ja hakkeen energiasisältö alentuu. Joissain tapauksissa hakekasa voi kuumenemisen seurauksena jopa syttyä palamaan. Homehtuminen on myös pidempiaikaisen varastoinnin ongelma. (Lepistö. 2010, 7)

2.5.2 Puupolttoaineiden koostumus

Puu koostuu pääasiassa kolmesta rakennusaineesta, joita ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Männyn, kuusen ja koivun selluloosapitoisuus on 40–45 % ja hemiselluloosapitoisuus 25–40 % kuiva-aineen painosta. Männyssä ja kuusessa hemiselluloosan osuus on pienempi kuin lehtipuissa (havupuut 25–28 % ja lehtipuut 37–40 %). Ligniini toimii puun kuitujen sidosaineena ja antaa puulle tarvittavan mekaanisen lujuuden. Ligniini myös sisältää paljon hiiltä ja vetyä. Edellä mainittujen aineiden lisäksi puu sisältää myös uuteaineita, eli sellaisia yhdisteitä, jotka voidaan uutaa puusta neutraaleilla orgaanisilla liuottimilla. Puussa uuteaineiden osuus on yleensä vajaat 5 %, mutta kuoressa uuteaineiden osuus voi olla huomattavasti suurempi. (Alakangas. 2000, 35)

Haihtuvien aineiden osuus puussa on suuri (80–90 %), jonka vuoksi se palaa pitkällä liekillä ja vaatii suuren palotilan. (Alakangas. 2000, 35)

Puun tuhkapitoisuus on yleensä matalampi kuin muilla kiinteillä polttoaineilla. Kuoretomalla runkopuulla tuhkapitoisuus on tavallisesti alle 0,5 % ja havupuun kuorella alle 2 % (Alakangas. 2000, 37). Todellisuudessa tuhkaa syntyy poltossa enemmän, sillä metsähake sisältää aina myös hiekkaa ja muita epäpuhtauksia. Tuhkaan voi myös päätyä palamatonta hiiltä (Hakkila. 2004, 72). Aallon (2015) diplomityössä käsiteltiin samaa rankahaketta, kuin tässä työssä. Tuhkapitoisuudeksi mitattiin keskimäärin 0,74 % (Aalto. 2015, 46).



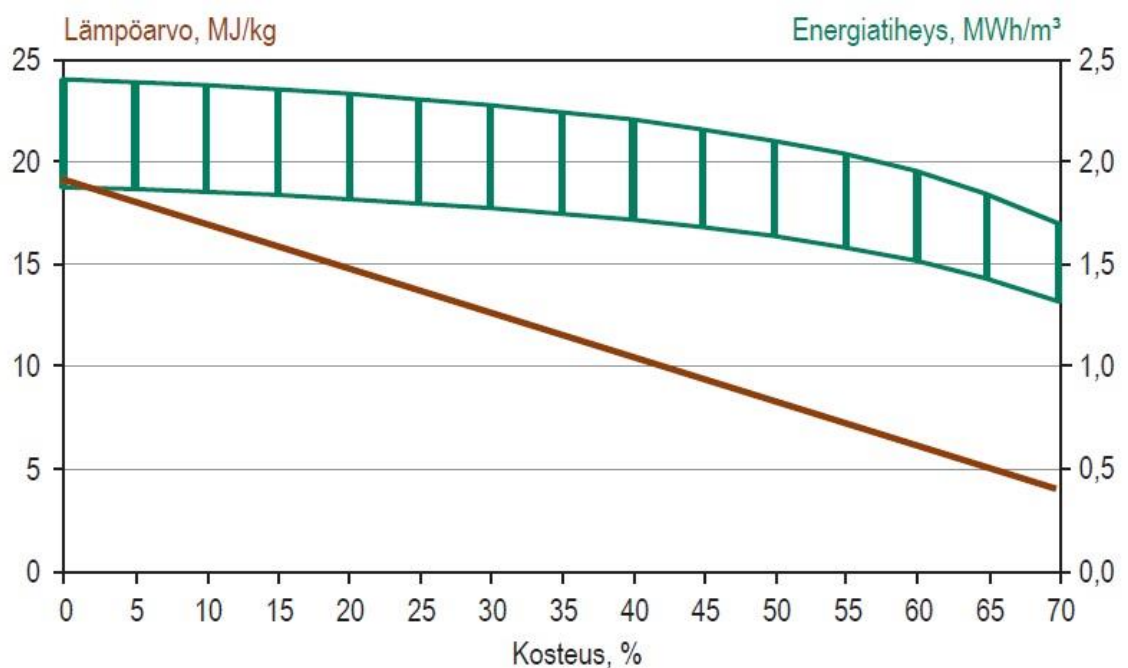
Kuva 7. Puun koostumus. (Alakangas. 2000, 35)

2.5.3 Hakkeen ominaisuuksia polttoaineena

Metsähakkeen toinen heikkous kosteuden ohella on alhainen energiatiheys. Energiatiheydellä tarkoitetaan polttoaineen tilavuusyksikön sisältämää energiamäärää. Yksikkönä on ajoneuvon kuormatilassa tai varastomuodostelmassa mitatun hakkeen irtokuutiometrin tehollinen lämpösisältö (MWh/i-m³). Alhaisella energiatiheydellä on negatiivinen vaikutus kuormakokoon, kuljetuskustannuksiin, hankinta-alueen laajuuteen, polttoainevarastojen tilantarpeeseen sekä laitoksen polttoaineenkäsittelyjärjestelmän kapasiteettiin. Puupolttoaineen energiatiheyteen vaikuttaa kuiva-tuoretiheys, tehollinen lämpöarvo ja tiiviys. Kuiva-tuoretiheys on tuoreessa, kutistumattomassa tilassa mitatun biomassan kiintokuutiometrin kuivamassa (kg/m³). Se vaihtelee suuresti puulajista ja biomassakom-

ponenteista riippuen välillä 270...500 kg/m³. Tehollinen lämpöarvo ilmoitetaan suhteutettuna polttoaineen kuivamassaan (kWh/kg). Käytännössä kuitenkin kosteudella on paljon suurempi vaikutus lämpöarvoon. (Hakkila. 2004, 70)

Kuvasta 8 on nähtävissä kosteuden vaikutus puun lämpöarvoon (MJ/kg) ja energiatiheyteen (MWh/m³). Energiatiheyden laskennassa on käytetty kuivatuoretiheyden vaihteluvälinä 350–450 kg/m³. (Lindblad et al. 2013, 176)



Kuva 8. Puun lämpöarvo ja energiatiheys kosteuden suhteen. (Lindblad et al. 2013, 176)

Tiivys on kosteuden jälkeen seuraavaksi merkittävin hakkeen laatuominaisuus. Tiivydellä tarkoitetaan kiintotilavuuden ja irtotilavuuden suhdetta. Tiivys riippuu palakoosta, palan muodosta, puulajista, oksista, kosteudesta, vuodenajasta, kuormausmenetelmästä ja painumisesta (Alakangas. 2000, 48). Esimerkiksi hakettamattoman hakkuutähteen tiivys on vain 0,15–0,20, mutta hakettuna tähteen tiivys on 0,36–0,40. Hakkuutähdettä ja karstimatonta pienpuuta paalaamalla saadaan tiivys haketta vastaavalle tasolle. (Hakkila. 2004, 70)

Hakkeelle on ominaista epäyhtenäinen palakoko, toisin sanoen tyypillisimmän palakoon seassa voi olla huomattavan suuriakin paloja ja toisaalta myös aivan pientä silppua. Pienimmät hakepalaset täyttävät suurempien palojen väliin jääviä tyhjiä tiloja kuormauksen ja kuljetuksen aikana. Esimerkiksi sahanpurun lisääminen hakkeen sekaan kasvattaa tiiviyttä huomattavasti. Hakepalasen pinnan lävistäjän suhde palan paksuuteen määrittää hakkeen tiiviyden; mitä suurempi edellä mainittu suhde on, sitä matalampi on hakkeen tiiviys. (Alakangas. 2000, 48)

2.5.4 Rankahake

Rankahakkeen raaka-aineena on karsittu runkopuu, yleensä runkohukkapuu. Runkohukkapuuhun sisältyy yleensä puunkorjuun ja metsänhoidon yhteydessä metsään käyttämättä jäävä runkopuu kuorineen. (Alakangas. 2000, 59)

Metsien hakkuussa kertyvä puu pyritään käyttämään mahdollisimman tarkasti ainespuuksi, mutta kaikki runkopuu ei ole siihen kelvollista. Se ei välttämättä täytä teollisuuden asettamia laatuvaatimuksia, sen hyödyntäminen ei ole mahdollista korjuuteknisistä syistä, tai poikkeustapauksissa tarjonta ylittää teollisuuden tarpeet. Ensiharvennuksissa syntyy suhteellisesti enemmän runkohukkapuuta kuin päätehakkuissa. (Hakkila. 2004, 27–28)

Aiemmassa tutkimuksessa on määritetty Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköiden kuivaksi tuoretiheydeksi kuorettomalle runkopuulle keskimäärin 395 kg/m^3 ja kuorelliselle runkopuulle 376 kg/m^3 . Kuoren kuiva tuoretiheys on saman tutkimuksen mukaan 266 kg/m^3 . (Alakangas. 2000, 62)

Runkopuuhakkeen kosteuspitoisuuden vuodenaikojen mukainen vaihtelu poikkeaa merkittävästi hakkuutähde- ja kokopuuhakkeesta. Runkopuusta tehdyn hakkeen kosteus ei juurikaan vaihtele vuodenaikojen mukaan. Runkopuun kosteus on riippuvainen lähinnä materiaalin varastoinnin tai kuivauksen kestosta ennen haketusta. Tuoreesta runkopuusta tehdyllä hakkeella kosteus on noin 50 % massasta vuodenaikojen riippumatta. (Järvinen. 2011, 21–22)

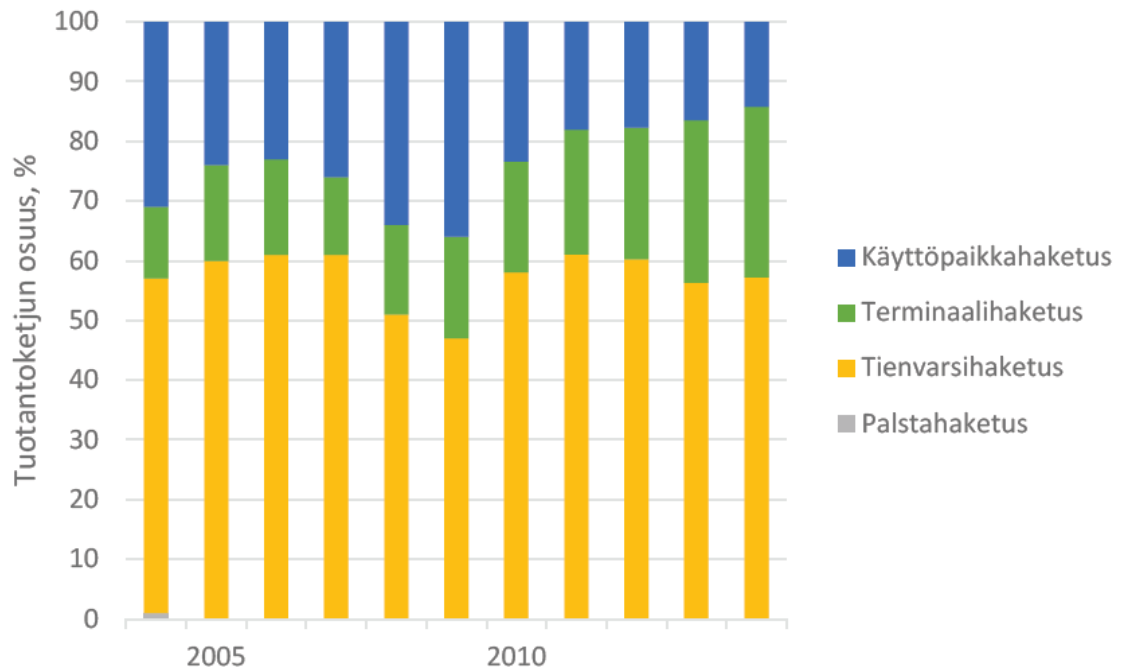
3 PUUPOLTTOAINEIDEN VARASTOINTI JA KÄSITTELY

3.1 Hakkeen tuotanto

Energiapuun haketus voidaan tehdä joko suoraan palstalla, energiapuuvaraston viereisellä tiellä, energiapuuterminaalilla tai hakkeen käyttöpaikalla. Seuraavassa on kuvattuna lyhyesti erilaiset metsähakkeen tuotantoketjut ja niiden osuudet Suomessa vuonna 2014. (Strandström. 2015, 9–18)

- **Tienvarsihaketus:** Haketus hakkurilla tai murskaimella tienvarressa. Hakkeen tai murskeen kaukokuljetus käyttöpaikalle. Tällä hetkellä merkittävin metsähakkeen tuotantoketju (osuus vaihdellut viime vuosina välillä 50...60 %).
- **Terminaalihaketus:** Hakkeen raaka-aine kuljetetaan terminaaliin, jossa haketus tai murskaus tapahtuu. Hake tai murske kuljetetaan terminaalista käyttöpaikalle hakeautolla, junalla tai laivalla. Terminaalihaketuksen osuus on ollut kasvussa ja se on toiseksi tärkein metsähakkeen tuotantoketjuista (osuus 29 % vuonna 2014).
- **Käyttöpaikkahaketus:** Hakkeen raaka-aine kuljetetaan hakkeen käyttöpaikalle, jossa haketus tai murskaus suoritetaan. Käyttöpaikkahaketuksen osuus on ollut jatkuvassa laskussa ja oli 14 % vuonna 2014.
- **Palstahaketus:** Haketus tehdään palstalla käyttäen palstahakkuria. Hakkeen kuljetus käyttöpaikalle hakeautolla. Ei enää suuressa mittakaavassa käytössä metsähakkeen tuotannossa Suomessa.

Erilaisilla tuotantoketjuilla on hyvät ja huonot puolensa. Sopivimman tuotantoketjun tiettyyn tilanteeseen määrittävät useat tekijät, kuten korjuuolot, tienvarsivarastotilat, kuljetusmatkat, polttolaitosten käyttömäärät ja varastotilat, saatavissa oleva tuotantokalusto, tuotettava metsähakejake (pienpuuhake, hakkuutähdehake, kantomurske, rannahake) sekä tuotantoketjun kustannukset. (Strandström. 2013, 23)



Kuva 9. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuosina 2004–2014. (Strandström. 2015, 19)

Metsähakkeen korjuumenetelmät voidaan jakaa haketuspaikan perusteella keskitetyn ja hajautetun haketuksen menetelmiin. Mikäli haketus keskitetään terminaaliin tai hakkeen käyttöpaikalle, saavutetaan suuret vuosituotokset, korkeat koneiden käyttöasteet sekä alemmat haketuskustannukset. Tällä menetelmällä tuotantoketjun eri työvaiheiden väliset odotusajat jäävät mahdollisimman pieniksi. Käyttöpaikka- ja terminaalihaketuksen huonona puolena on pieneksi jäävät kuormakoot kuljetettaessa biomassaa varastopaikalta hakettavaksi. Tämä lisää kuljetuskustannuksia etenkin pitkillä kuljetusmatkoilla. Kuormakokoa on pyritty kasvattamaan tiivistämällä latvusmassaa risutukeiksi, karsimalla ja määrämittaamalla katkomalla harvennuspuuta sekä pilkkomalla kanto- ja juuripuuta. (Laitila et al. 2010, 34)

Käyttöpaikkahaketus soveltuu suurien investointikustannusten vuoksi vain voimalaitoksille, joille hakettamatonta puupolttainetta toimitetaan suuria määriä. Terminaalit sopivat erikokoisten polttolaitosten hakevarastoiksi, ja ne toimivat hyvinä puskurivarastoina esimerkiksi kelirikon aikana, jolloin sivuteiden käyttö on rajoitettua raskaan liikenteen osalta. Hakkeen laadun valvonta on myös helppoa terminaalissa ja tarvittaessa erilaatuisia

hakkeita voidaan sekoittaa laadun tasaamiseksi. Hakkeen ja hakepuun käsittely terminaalilla sekä kuljetukset metsästä terminaalille ja terminaalilta polttolaitoksille lisäävät kustannuksia. (Laitila et al. 2010, 37)

Välivarastolla tai palstalla tehtävään haketukseen perustuvat korjuuketjut ovat hajautetun hakkeen tuotannon menetelmiä. Välivarastohaketuksessa puuaines haketetaan suoraan hakeauton kuormatilaan. Tässä tapauksessa hakkurin ja hakeauton toiminnot kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa, eikä tästä syystä haketusta ja kuljetusta voi limittää. Kuljetusmatkasta riippuen odotusaikoja tulee joko hakkurille tai hakeautolle. Hakkurin odotusaikoja voidaan vähentää käyttämällä useampia hakeautoja, mutta tällöin hakeautojen odotusajat saattavat kasvaa. Välivarastohaketuksen hyvänä puolena saadaan hakeauton kantavuus ja kuormakoko täysimääräisesti hyödynnettyä. Menetelmä on siis kuljetuksen kannalta tehokas myös pitkillä kuljetusmatkoilla. Välivarastohaketus soveltuu sekä pienille että suurille käyttöpaikoille. (Laitila et al. 2010, 37–38)

Palstahaketuksessa sama kone tekee yhden käyntikerran aikana haketuksen ja metsäkuljetuksen, joissain tapauksissa myös hakkuun. Metsätraktorin alustalle rakennettu hakkuri liikkuu ajouria pitkin energiapuukasalta toiselle, hakettaa kasat ja kuljettaa hakkeen tienvarteen. Kyseinen laite on normaalia metsäkonetta kalliimpi, painavampi ja vikaherkempi. Se vaatii kantavan ja tasaisen maapohjan ja lyhyet kuljetusmatkat metsässä. Näistä syistä johtuen tällä menetelmällä tuotettu metsähakkeen tuotantokustannukset ovat korkeat ja nykyään palstahaketuksen merkitys metsähakkeen tuotannossa onkin enää pieni. (Laitila et al. 2010, 38)

3.2 Metsäpolttoaineiden varastointi

Varastointitavoilla on todettu olevan suuri vaikutus metsäpolttoaineiden kuivumiseen. Tärkeimmät kuivumista edesauttavat tekijät ovat hyvä varastopaikka aluspuineen ja varastokasan peittäminen. Hyvä varastopaikka on muuta ympäristöä korkeampi, tuulinen ja aukea paikka, jossa on kuiva pohja. Varastopaikan tulisi olla eteläauringon suuntaan ja sitä ei saa tehdä sähkölinjojen alle. Varastopaikka on ennakkoraivattava pienpuustosta, jotta vältetään pienpuiden tarttuminen hakkurin kouraan juurineen. Varastossa olevan

energiapuun käsittelyssä käytettävälle kalustolle (hakkuri ja täysperävaunu samaan aikaan) vaadittava tilantarve tulee myös huomioida varaston suunnittelussa. (Lepistö. 2010, 19–20)

Tienvarsivarasto on varastopaikka, johon metsästä saatu polttoaineeksi tarkoitettu puu varastoidaan hakkuuiden jälkeen, ennen hakettamista tai kuljetusta haketuspaikalle. Varastopaikan sijainti on jo tässä vaiheessa tärkeää. Pinon sijoittamisessa on huomioitava, millainen maapohja paikalla on, vallitsevat sääolosuhteet sekä tilantarve. Pinon koko ja muoto ovat myös polttoaineen laadun kannalta oleellisia. (Ikonen & Jahkonen. 2014, 26–27)

Hyvän tienvarsivarastopinon vaatimuksia:

- Pino mahdollisimman korkea (4–5 metriä), ilmava ja muotonsa säilyttävä
- Pinon ylimmistä puista tehtävä lippa 0,5–1 m syvä ja vähintään 0,5 metriä paksu
- Puiden tyvipäät tielle päin ja mieluiten etelän suuntaan
- Pinon pohjalle aluspuut
- Ei ojien päälle eikä painanteisiin (veden kertymisen mahdollisuus)
- Pinon oltava kuormaimen ulottuvilla
- Kiviä ja kantoja ei saa olla pinon alla eikä esteenä
- Pinot riittävän kaukana sähkö- ja puhelinlinjoista
- Pinojen peittäminen

(Ikonen & Jahkonen. 2014, 26–27)

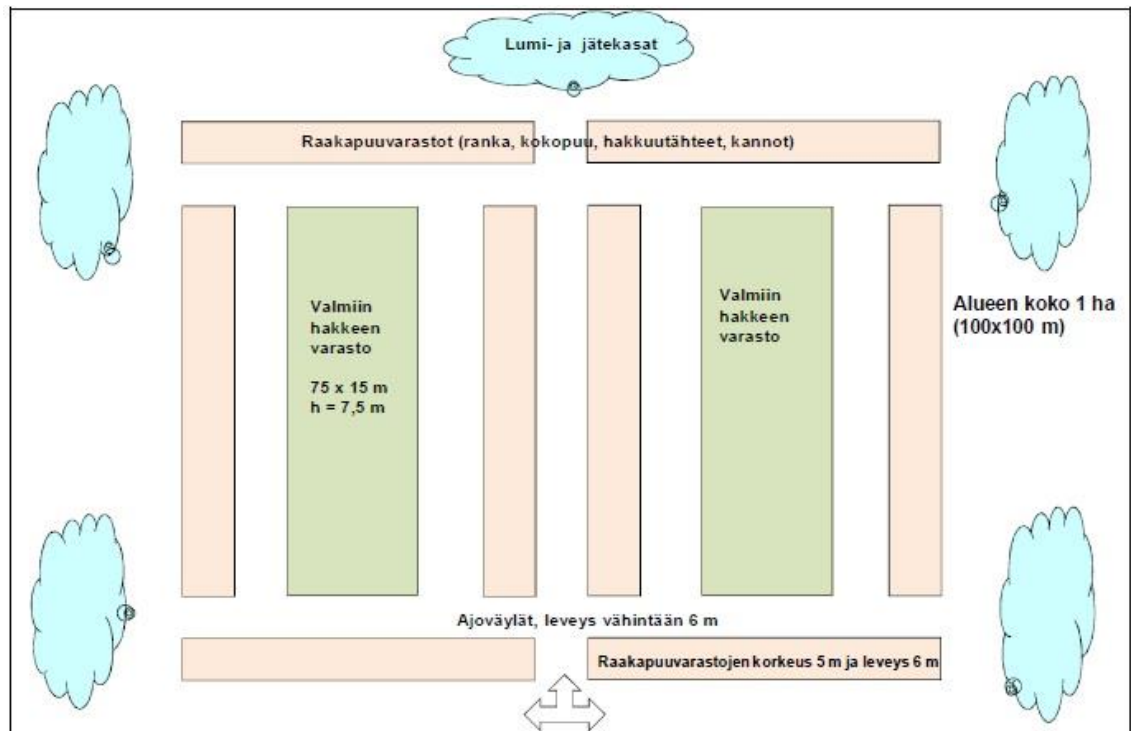
Rakentamalla varastopino mahdollisimman korkeaksi, saadaan pinon päällä oleva kasutuva ala mahdollisimman pieneksi. Pinon tien puoleiselle sivulle tehtävällä lipalla saadaan myös vähennettyä kastumista. Tyvipäiden sijoittamisella tielle ja etelään saadaan vesi valumaan latvojen suuntaan ja auringon säteily kohdistumaan tasaisesti koko varastopinoon. Aluspuilla estetään maakosteuden siirtyminen pinon alakerrokseen, saadaan pino tuulettumaan paremmin ja estetään pinon kallistuminen ja kaatuminen. Peittämisellä voidaan alentaa pinon kosteutta, mutta tuoreen kokopuupinon annetaan ensin kuivua en-

nen peittämistä, sillä peittäminen heikentää haihduntaa pinosta. Peittämisen jälkeen peitteen päälle nostellaan pinosta sen verran materiaalia, että peite ei lähde tuulen vaikutuksesta pois paikaltaan. (Äijälä et al. 2010, 27–28)

3.3 Polttoainerterminaalit

Biopolttoainerterminaali on osa voimalaitoksen polttoaineiden tuotanto- ja logistiikkaketjua. Terminaalia voidaan käyttää raaka-aineen tai valmiin polttoaineen varastointiin. Raaka-aineiden varastoterminaali toimii erilaisten metsästä tuotujen puuperäisten polttoaineiden varastopaikkana, josta polttoaineet kuljetetaan muualle tai suoraan voimalaitokselle haketettavaksi. Valmiin polttoaineen varastoterminaali toimii puskurivarastona yhdelle tai useammalle biopolttoainetta käyttävälle laitokselle. Polttoaineiden tuotantoterminaalissa erilaisia raaka-aineita haketetaan ja murskataan valmiiksi polttoaineiksi. (Impola & Tiihonen. 2011, 5)

Terminaalin perustamisesta aiheutuu mittavat investointikustannukset, minkä lisäksi polttoaineiden toimitus- ja logistiikkaketjuihin tulee yksi ylimääräinen vaihe, joka vaatii omat purku- ja lastaustoimintonsa. Lisäkustannusten vastapainona terminaaleissa voidaan vaikuttaa merkittävästi polttoaineiden laatuominaisuuksiin, millä taas voidaan saada kustannuksia laskettua. Parempilaatuisella polttoaineella kuljetuskustannukset ovat pienemmät ja lisäksi voimalaitoksen polttoaineiden käsittelyn ja polton käytettävyydet paranevat. Terminaaleissa polttoaineiden laatua voidaan parantaa polttoaineen kuivumisella, epäpuhtauksia poistamalla, partikkelikokoa hallitsemalla ja erilaisia polttoaineseoksia tekemällä. (Impola & Tiihonen. 2011, 6)



Kuva 10. Esimerkkikuva hakkeen ja raaka-aineen sijoittelusta ja tilantarpeesta terminaalilla. (Impola & Tiihonen. 2011, 9)

Biopolttoaineterminaalin maantieteellinen sijainti määräytyy terminaalien käyttötarkoituksen mukaan. Mikäli terminaalien toiminta ja polttoaineen valmistus riippuvat voimalaitoksen polttoainetarpeesta, tulee terminaalit tällöin sijoittaa laitoksen läheisyyteen. Terminaalit toimii tällöin lähinnä yhden voimalaitoksen puskurivarastona. Tämän tyyppinen terminaalit on toisinaan sijoitettu laitoksen piha-alueelle. Mikäli terminaalien toiminnasta vastaa polttoaineen toimittaja, perustetaan terminaalit alueelle, jossa on riittävästi hyödynnettävissä olevaa metsäenergiapotentiaalia. Terminaalien ympäristöstä on myös löydettävää käyttäjiä terminaalilla valmistetulle polttoaineelle. Käyttäjiä voivat olla yksi iso tai useampi pienempi polttolaitos. Terminaalien sijaintia valittaessa on myös huomioitava koko logistiikkaketju ja sen optimointi, eli kuljetuskustannukset, -etäisyydet ja -vaihtoehdot sekä raaka-aineelle että valmiille polttoaineelle. (Impola & Tiihonen. 2011, 7)

3.4 Hankintaketjun eri vaiheiden vaikutus polttoaineen laatuun

Koska hyvän polttohakkeen tärkein ominaisuus on riittävän alhainen kosteus, on tärkeää suunnitella hyvin hakkeen tuotannon jokainen vaihe, korjuun suunnittelusta lähtien. Energiapuun ensimmäinen kuivatusvaihe voidaan toteuttaa palstalla kourakasoissa, jolloin hyödynnetään kaadetussa puussa olevien neulasten tai lehtien haihduttavaa vaikutusta. Palstakuivatus toimii myös karsituille puille, joiden kuori on rikottu. Palstakuivatus tehdään kesällä ja sen kesto on yleensä 2–4 viikkoa. Oikein toteutettuna palstakuivatuksella saadaan tehokkaasti alennettua energiapuun kosteuspitoisuutta. Kesällä hakattu ja palstalla kuivattu puu voi saavuttaa normaalin kesän aikana riittävän kuivuuden, jolloin se voidaan heti pinoon ajamisen jälkeen hakettaa. (Lepistö. 2010, 17–18)

Energiapuuhun kertyy helposti erilaisia epäpuhtauksia varastoinnin aikana. Epäpuhtaudet haittaavat haketusta ja heikentävät valmiin hakkeen laatua. Haketus hidastuu, jos kouranippuja joudutaan käsittelemään epäpuhtauksien poistamiseksi, lisäksi hakkurin terät tylsyvät ja voivat katketa epäpuhtauksien vaikutuksesta. Polttolaitosten kattiloissa voi myös aiheutua ongelmia epäpuhtauksien takia. (Lepistö. 2010, 18)

3.5 Polttoaineen käsittely

Märkä hake voi jäätyä pakkasessa varastoinnin aikana, jolloin polttoaineen syötössä kuljettimilla voi aiheutua ongelmia. Märän hakkeen polttaminen myös lisää poltossa syntyvän tuhkan määrää. Polttolaitoksen polttoaineenkäsittelylaitteistoissa voi ilmaantua häiriöitä hakkeen syötössä useista eri syistä johtuen. Esimerkiksi pitkät tikut voivat aiheuttaa tukoksia hakevirrassa ja kosteus voi aiheuttaa optisiin antureihin häiriöitä. Laitteistot ovat suunniteltu tietynlaiselle hakkeen palakoolle, jolloin väärä palakoko voi myös aiheuttaa ongelmia. (Lepistö. 2010, 7)

4 TUTKIMUKSEN JÄRJESTELYT JA MITTAUKSET

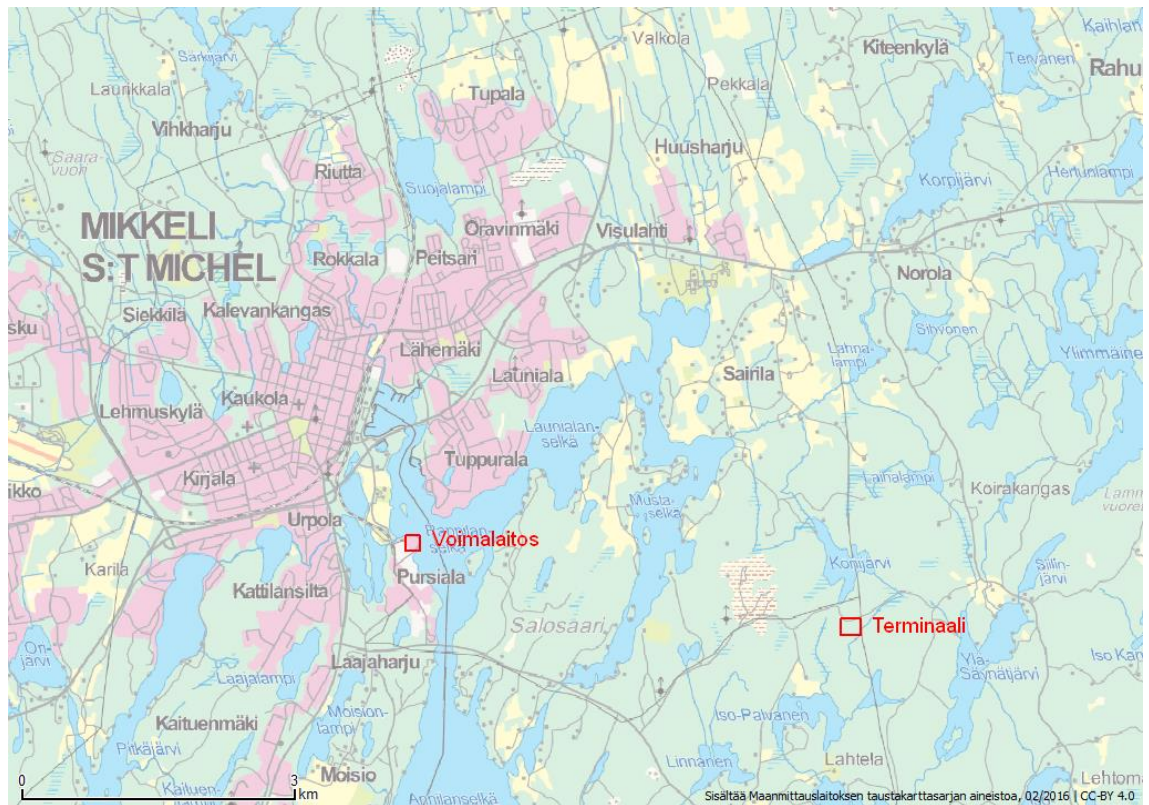
4.1 Hakeaumojen rakentaminen ja purkaminen

Työn aloitus sijoittui heinäkuulle 2015, jolloin terminaalille alettiin kuljettaa haketta. Kuormat punnittiin Imatralla hakerekkojen lastauksen jälkeen. Rekkoja saapui noin 8–10 kappaletta viikossa ja yhden rekan kuormana oli noin 140–150 irtokuutiometriä haketta. Terminaalilla hakeautot ohjattiin vuorotellen purkamaan kuormansa kolmeen eri kasaan. Täysien kuormien painot vaihtelivat välillä 30 060–44 360 kg. Ensimmäinen kuorma tuotiin Metsä-Sairilan terminaalille 6.7.2015 ja viimeinen 25.9.2015. Näistä kasoista rakennettiin pyöräkuormaajalla kolme aumaa. Valmiissa aumoissa oli haketta 32 rekkakuormallista, noin 5000 i-m³ kussakin, eli yhteensä 15000 i-m³.

Hakkeesta otettiin näytteet kuormien saapuessa, ja näistä mitattiin kosteuspitoisuudet ESE:n toimesta Pursialan voimalaitoksella. Mittausten perusteella aumoissa oli lähtötilanteessa lähes samat kosteuspitoisuudet. Aumat 1 ja 2 peitettiin lokakuun ensimmäisenä päivänä muovilla. Auma 3 jätettiin peittämättä.



Kuva 11. Hakeautoja tuomassa haketta Metsä-Sairilan terminaaliiin syyskuussa 2015.



Kuva 12. ESE:n Pursialan voimalaitoksen ja Metsä-Sairilan terminaalin sijainnit kartalla.

Syksyn aikana auringon kuivattava vaikutus on yleisesti hyvin vähäinen, mutta sateiden oletettiin kastelevan aumoja. Aumoissa oleva hake oli suunniteltu poltettavaksi talven ja pakkasten aikana, kun polttoaineen tarve Pursialan voimalaitoksella on suurta. Aumoissa varastoidun hakkeen lämpötila- ja kosteustietoja alettiin saada selville tammikuusta 2016 alkaen.

Auma 1:n peittämisen yhteydessä auma 2:sta otettiin haketta peitteen painoksi. Tästä syystä auma 2:ssa oli haketta noin 100 i-m³ vähemmän kuin alun perin. Auma 2:n peitteen painoksi saatiin tutkimusaumojen ulkopuolelta hakkuutähdehaketta.



Kuva 13. Auma 1:n peittäminen 1.10.2015.



Kuva 14. Auma 2:n peitteen poistoa tammikuussa 2016.

4.2 Kosteusnäytteet

4.2.1 Näytteenoton tarkoitus

Näytteenoton tarkoituksena on saada analysoitavaksi soveltuva erä näytettä erotetuksi suuremmasta kokonaisuudesta siten, että sekä näytteen että alkuperäisen suuremman kokonaisuuden halutut ominaisuudet ovat keskenään samanlaisia. Edustava näytteenotto tarkoittaa systemaattisen ja satunnaisen virheen pienentämistä. (Alakangas & Impola. 2014, 28)

Hyvän näytteenoton ja käsittelyn periaatteet:

- näytteenottopaikka mahdollisimman lähellä polttoaineen luovutusta
- näytteenotto vapaasta liikkeestä (esim. putoavasta virrasta kuorman purkamisen aikana)
- näytteenoton kohdistuttava koko polttoainevirtaan tai valtaosaan sitä
- polttoainevirrasta useampia pieniä yksittäisnäytteitä
- vältettävä jatkuvaa osavirrasta tapahtuvaa näytteenottoa
- näytteenkäsittely ja jakaminen eivät saa muuttaa tutkittavia ominaisuuksia

Näytteenoton tarkoituksena on siis saada edustava näyte koko polttoaine-erästä. Jokaisella erän tai osaerän partikkelilla tulisi olla yhtä suuri todennäköisyys päätyä mukaan näytteeseen. Näytteen käsittelyllä pienennetään näytteen kokoa, kuitenkin samalla sen edustavuus säilyttäen. Tämän varmistamiseksi tarvitaan näytteenottosuunnitelma. Näytteenottosuunnitelman liitteenä on suositeltavaa olla näytteenotto- ja käsittelykaaviot. (Alakangas & Impola. 2014, 28)

Näytteenotto on vaihe, joka aiheuttaa eniten epätarkkuutta määritysten tuloksiin. Tästä syystä näytteenottoon on kiinnitettävä erityistä huomiota ja se on tehtävä järjestelmällisesti ja huolellisesti. Paras tulos saavutetaan, mikäli voidaan käyttää koneellista näytteenottoa. Tämä on mahdollista jatkuvasta polttoainevirrasta tapahtuvassa näytteenotossa. (Alakangas & Impola. 2014, 29)

4.2.2 Biopolttoaineiden EN-standardit

Kiinteiden biopolttoaineiden standardeilla on tarkoitus helpottaa polttoainemarkkinoiden ja yleiseurooppalaisen polttoainekaupan avautumista. Standardien kehittäminen näytteenottoon, testaukseen ja polttoaineen laadunvarmistukseen edistää kiinteiden biopolttoaineiden markkinoiden kehittymistä. Tällä on positiivinen vaikutus ympäristö-, ilmasto- ja sosiaalisten tavoitteiden saavuttamisessa. (Järvinen & Impola. 2012, 5)

Näytteenottostandardissa SFS-EN 14778 kuvataan menetelmät näytteenottosuunnitelmien ja näytteenottotodistusten laatimiseksi sekä näytteiden ottamiseksi kiinteistä biopolttoaineista tuotantoketjun eri vaiheissa. Standardi sisältää sekä käsin tehtävät, että koneelliset näytteenottomenetelmät. (Järvinen & Impola. 2012, 5)

Näytekäsitteystandardi SFS-EN 14780 kuvaa menetelmiä kokoomanäytteiden pienentämiseksi laboratorio- ja analyysinäytteiksi sekä näytteiden sekoittamiseen ja jakamiseen soveltuvia laitteita ja menetelmiä. (Järvinen & Impola. 2012, 16)

Standardin SFS-EN 14774 osat 1–3 kuvaavat uunikuivausmenetelmässä käytettäviä toimintatapoja.

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad (4)$$

jossa

m_1	on tyhjän astian ja kannen massa grammoina
m_2	on astian, kannen ja näytteen massa ennen kuivausta
m_3	on astian, kannen ja näytteen massa kuivauksen jälkeen.

Yhtälön 4 mukaan lasketaan analyysinäytteen kosteuspitoisuus M_{ad} analyysitulassa. (SFS-EN 14774-3. 2010, 8)

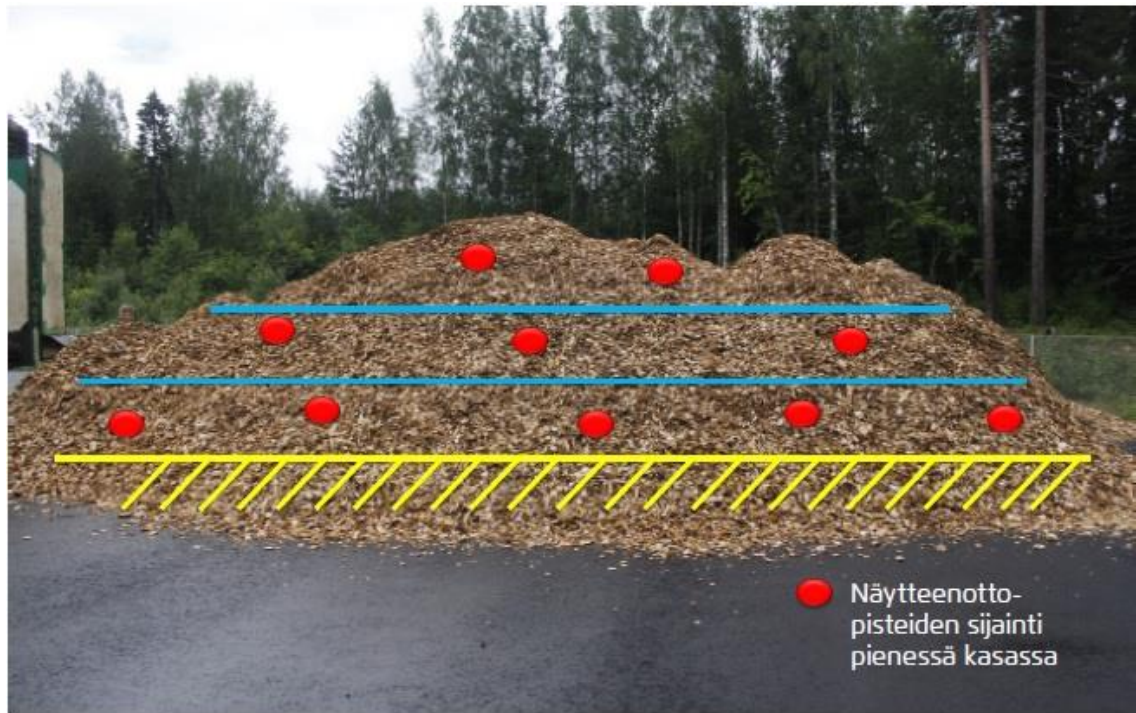
4.2.3 Manuaalinen näytteenotto

Nykyisin manuaalinen näytteenotto on edelleen eniten käytössä oleva näytteenottotapa. Yksittäisnäytteet otetaan tavallisesti joko kuorman purkamisen aikana autosta putoavasta polttoainevirrasta tai heti kuorman purkamisen jälkeen, esimerkiksi kuormakohtaisesta polttoainekasasta tai polttoainekentältä. Manuaalisen näytteenoton huonona puolena on näytteenoton työläys. Esimerkiksi hihnakuljettimelta näytettä otettaessa on kuljetin pysäytettävä näytteenoton ajaksi. (Alakangas & Impola. 2014, 31)

Oikeaoppisessa manuaalisessa näytteenotossa käytetään pitkävirtista näytteenottokauhaa, jonka suuaukon läpimitta on molemmissa suunnissa vähintään 2,5 kertaa nimellisesti suurin palakoko. Mikäli näytteet otetaan heti kuorman purkamisen aikana, on huolehdittava, että näytteitä otetaan tasaisesti eri osista kuormaa. Näytteitä on pyrittävä ottamaan polttoainevirran eri osista myös leveyssuunnassa. Näytteiden ottamista kuorman aivan ensimmäisistä ja aivan viimeisistä osista on vältettävä. Välillä ei ole mahdollista ottaa näytteitä heti putoavasta polttoainevirrasta, vaan näytteenotto tehdään vasta purkamisen jälkeen muodostuneesta kuormakohtaisesta kasasta. Tällöin käytetään myös näytteenottokauhaa ja näytteet otetaan tasaisesti eri puolilta kasaa. Näytteet otetaan kasasta myös eri korkeuksilta ja vältetään ottamista niitä aivan kasan pintakerroksesta, pohjasta tai reunoista. (Alakangas & Impola. 2014, 31–32)

Yksittäisnäyte on pienin määrä polttoainetta, joka otetaan kerrallaan kokoomanäytteen muodostamiseksi. *Kokoomanäyte* on yleisnimitys näytteelle, joka muodostuu yhdistämällä samasta polttoaine-erästä otetut yksittäisnäytteet. Kokoomanäyte voidaan muodostaa myös yhdistämällä homogenisoiduista yksittäisnäytteistä jakamalle erotetut osanäytteet yhdeksi näytteeksi. (Alakangas & Impola. 2014, 12–13)

Kuvassa 15 on merkittynä näytteenottokohdat, jolloin saadaan kasasta edustava otos polttoainekuormasta. Keltaisella merkitty alue kuvaa kasan pohjaa, josta näytteiden ottamista tulee välttää.



Kuva 15. Näytteenottokohdat pienessä hakekasassa. Kuva: Haklog Ky

Manuaalisessa näytteenotossa on huolehdittava, että näytteet edustavat tasaisesti koko kuormaa ja että lajittumista tai valikoitumista ei tapahdu näytteenoton aikana. Näytettä otettaessa ei saa tehdä valintaa esimerkiksi palakoon suhteen, vaan suurimmatkin näytteeseen tulevat kappaleet ja mahdolliset epäpuhtaudet on otettava mukaan kuormakohtaiseen kokoomanäytteeseen. (Alakangas & Impola. 2014, 33)

Mikäli näytteenotto tehdään polttoainekuormakohtaisesti, jatkuvassa polttoainetoimituksessa otetaan yksittäisnäytteitä vähintään 2 yksittäisnäytettä/50 irto-m³ polttoainetta.

Erikokoisten kuormatilojen yksittäisnäytteiden vähimmäismäärät:

-kuorma-auto ("nuppi")	vähintään 2 näytettä
-puoliperävaunu (< 100 m ³)	vähintään 4 näytettä
-ajoneuvoyhdistelmä (100-160 m ³)	vähintään 6 näytettä (2 "nupista" + 4 vaunusta)
-konttiyhdistelmät	vähintään 2 näytettä/kontti

Näillä näytemäärillä on mahdollista saavuttaa riittävä tarkkuusvaatimus kosteudessa. (Alakangas & Impola. 2014, 34)

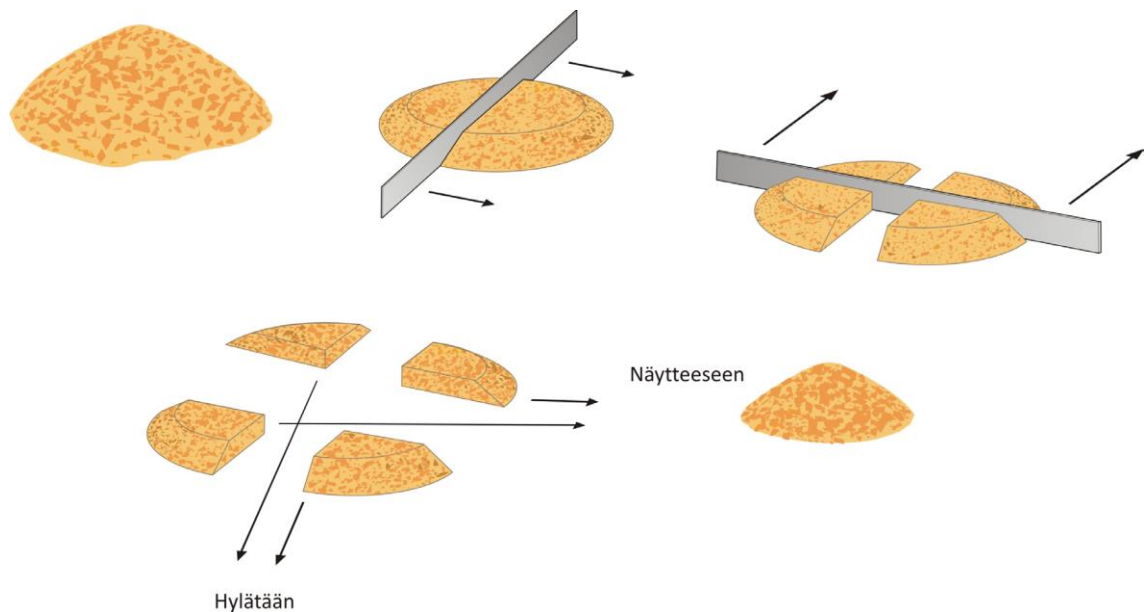


Kuva 16. Rankapuuhakkeesta koottuja aumoja Metsä-Sairilan terminaalissa syyskuussa 2015.

4.2.4 Näytteenoton virheet

Näytteenotossa mahdollinen systemaattinen virhe esimerkiksi polttoaineen kosteuden suhteen on taloudellisesta tarkastelusta merkittävin näytteenottoon liittyvä ongelma. Näytteenotto on usein eniten epävarmuutta aiheuttava työvaihe myös laadunmääritysketjussa. Systemaattisen virheen syynä on yleensä väärin valittu näytteenottokohta tai -tapa. Yksittäisnäytteet on saatettu ottaa esimerkiksi lajittuneesta polttoainevirrasta tai -kasasta, jolloin näytteiden kosteudet ovat systemaattisesti liian matalia tai korkeita. Esimerkiksi 40 % kosteudessa jokainen 1 prosenttiyksikön systemaattinen virhe saa aikaan noin 2 % virheen saapumistilassa olevan polttoaineen lämpöarvossa. Alemmalla polttoaineen kosteudella systemaattinen virhe pienenee ja vastaavasti suuremmalla kosteudella virhe kas-

vaa. Suurien polttoainemäärien ollessa kyseessä systemaattisesta virheestä aiheutuu vuositasolla suuret rahalliset menetykset polttoainekaupan toiselle osapuolelle. (Järvinen & Impola. 2012, 4)



Kuva 17. Näytteen jakaminen neliöintimenetelmällä. (Alakangas & Impola. 2014, 38)

4.2.5 Näytteiden ottaminen terminaalilla

Tässä työssä näytteiden ottamisessa käytettiin ajoneuvoyhdistelmää koskevaa näytteenotto-ohjetta (Alakangas & Impola. 2014, 34). Hakekuorman saapuessa otettiin näytteet sekä auton että perävaunun lastista. Näytteiden ottaminen ja käsittely suoritettiin noudattaen kiinteiden biopolttoaineiden näytteenottoa ja näytteiden esikäsittelyä koskevia standardeja SFS-EN 14778 ja SFS-EN 14780. Näytteenotto tapahtui manuaalisesti, koska terminaalilla ei ollut mahdollisuutta koneelliseen näytteenottoon.

Kuljettajan saatua kuorma purettua, otettiin näytteenottolapiolla molemmista kuormatiloista puretusta hakkeesta (perävaunu ja auto) näytteet. Näytteet otettiin siten, että kasan molemmilta puolilta ja eri kohdista kasaa otettiin kolme lapiollista haketta. Näin saadut yhteensä kuusi lapiollista haketta laitettiin näytteenottosaaviin ja saavin sisältö kaadettiin pöydälle, jossa näytteen käsittely suoritettiin.

Hake jaettiin pöydällä pienempiin osiin ja sekoitettiin standardeiden mukaisesti. Seuraavaksi näyte (hieman alle 1 kg) kaadettiin näytepussiin, johon merkattiin näytteen tiedot. Näytepussi suljettiin ilmatiiviisti ja punnittiin. Lopuksi näyte vietiin terminaalissa sijaitsevaan rakennukseen, josta ESE toimitti näytteen analysoitavaksi Pursialan voimalaitokselle. Kosteusmääritys tapahtui noudattaen standardia SFS-EN 14774.

4.2.6 Näytteiden ottaminen voimalaitoksella

Kuormien massat punnittiin autovaa'alla hakeautojen saapuessa voimalaitokselle. Tämän jälkeen hakeautojen kuljettajat ottivat kuormien purkamisen yhteydessä standardien SFS-EN 14780 ja SFS-EN 14778 mukaiset näytteet manuaalisesti kustakin kuormatilasta. Näytteet jätettiin voimalaitokselle, jossa ESE:n henkilöstö määrittä niistä kosteuspitoisuudet kuivausuuneilla standardin SFS-EN 14774 mukaisesti.

4.3 Kuormamassat

Hakeautoihin lastatut kuormat punnittiin hakejunan purkamisen yhteydessä Imatralla. Kuormat punnittiin uudestaan Pursialan voimalaitoksella varastoinnin jälkeen. Tarkoituksena oli selvittää tutkimuksen aikana koeaumoissa tapahtuvat kuiva-ainetappiot hakkeiden alku- ja lopputilan massojen ja kosteusmittausten perusteella.

4.4 Lämpötilan seuranta aumoissa

Aumojen lämpötilamittauksissa käytettiin Sensire TempNet -laitteistoa. Laitteistoon kuuluivat aumoihin sijoitetut lämpötilasensorit (Kuva 18) sekä tukiasemayksikkö sensorien lukemiseen. Tukiaseman tarkoituksena oli välittää tiedot Sensiren palvelimelle GPRS-yhteydellä. Lämpötilatietojen seuraamiseen käytettiin internet-selaimella toimivaa käyttöliittymää. (Sensire. 2013, 4)



Kuva 18. Lämpötilasensori TS8-20.

Oletusasetuksilla sensori mittaa ympäristönsä lämpötilaa 15 minuutin välein sekä tallentaa lämpötilan ja mittausajan omaan muistiinsa. Mikäli sensori saa radioyhteyden tukiasemayksikköön, lähettää se keräämänsä lämpötiladatan tukiasemayksikölle ja tätä kautta järjestelmän tietokantaan. Jos sensori ei saa yhteyttä tukiasemaan, se lähettää datan tukiasemalle seuraavalla kerralla, kun yhteys on saavutettu. Vakioasetuksilla lämpötilasensorin muisti riittää noin 80 vuorokaudeksi. (Sensire. 2013, 5)

Tässä tutkimuksessa tallennusväli kuitenkin säädettiin 1 tunniksi tallennusmuistin sääntämiseksi ja virran riittävyyden takaamiseksi koko tutkimuksen ajalle. Lämpötilasensorien lukemiseksi tukiasemayksikköön liitettiin sensorien signaalin havaitseva antenni, sekä virtalähteeksi 12 voltin akku.



Kuva 19. Tukiasemayksikkö GW1-20.

Lämpötilasensorin virtalähteenä toimii paristo, jolle luvataan vähintään vuoden kesto (Sensire. 2013, 5). Mikäli alueella on hyvä GSM-verkon kuuluvuus, sensorien ja tukiaseman etäisyys voi olla vapaassa tilassa yli 100 metriä ja kiinteistöissä muutamia kymmeniä metrejä (Sensire. 2013, 10).

Lämpötilasensorit sijoitettiin aumoihin kuvan 20 mukaisesti. Aumojen reunoissa olevat sensorit sijaitsivat lähellä maanpintaa, noin 1,5–2 metrin korkeudella ja keskimmäiset noin 4 metrin korkeudella. Terminaalin portilta katsottuna taaimmaisessa linjassa (linja 1) olevat sensorit asetettiin paikoilleen jo heinäkuussa, keskimmäisen linjan (linja 2) sensorit elo- ja syyskuussa alussa sekä etummaisesta linjan (linja 3) sensorit syyskuun ja loka-kuun vaihteessa.

	Auma 1			Auma 2			Auma 3			
Linja 1	29.7. 69210	29.7. 69214	29.7. 69212	29.7. 69216	29.7. 69215	29.7. 69217	29.7. 69220	29.7. 69221	29.7. 69227	
Linja 2	19.8. 69218	8.9. 6921E	19.8. 69224	19.8. 69222	8.9. 6921F	19.8. 69228	19.8. 69229	8.9. 6922D	19.8. 6921A	60 m
Linja 3	30.9. 6921B	30.9. 6922A	30.9. 6921C	30.9. 6922C	1.10. 69230	1.10. 69231	1.10. 6922E	1.10. 69232	1.10. 6922F	
	20 m			20 m			20 m			

Portti

Kuva 20. Sensoreiden sijainti aumoissa ylhäältä katsottuna ja sensoreiden asennuspäivämäärät.

5 TULOKSET

5.1 Olosuhteet aumavarastoinnin aikana

Marras- ja joulukuu 2015 olivat keskimääräistä lämpimämpiä, joten Pursialan voimalaitoksen polttoaineen käyttö oli normaalia vähäisempää. Voimalaitoksen hakevarastot olivat täynnä, joten tässä työssä tutkittuja aumoja ei päästy purkamaan alkuperäisen aikataulun mukaisesti. Loppusyksy oli melko sateinen, joten ennen aumojen purkamista oletettiin kosteuseroja syntyneen peittämättömän ja peitetyjen aumojen välille. Sää jatkui selvästi keskimääräistä lämpimämpänä lähes vuoden 2015 loppuun. Vuoden 2016 alussa sää kylmeni huomattavasti.

Poikkeukselliset olosuhteet pakottivat samalla luopumaan suunnitelmasta purkaa kaikki kolme aumaa lyhyessä ajassa, ja auma 1:n purkaminen päätettiin aloittaa vasta loppuvuonna 2016. Vuodenvaihteessa tapahtuneen nopean suursäätötilan muutoksen seurauksena Pursialan voimalaitoksen hakkeen tarve kasvoi, jolloin aumoja 2 ja 3 päästiin purkamaan. Aumojen purkaminen aloitettiin perjantaina 15.1.2016 aumojen tuoreimmasta päästä alkaen.



Kuva 21. Koeaumat marraskuussa 2015.

Auma 2:n peittämisessä käytetyt peitteet ja varsinkin peitteiden painona käytetty hakkuutähdehake aiheuttivat käsittelyongelmia. Hakkuutähdehake oli jäänyt peitteen päälle kiinteäksi massaksi, minkä takia peitettä ei saatu auman päältä ehjänä, vaan pieniksi palasiksi repeytyneenä.

Kuvassa 22 näkyy peittämättömän auman paksu jäätyneen hakkeen kerros ja auman yläosaan keskittynyt erittäin kostean hakkeen alue. Pyöräkuormaaja siirtelee auman pintakerroksesta irronneita jäätyneitä hakepaakkuja.



Kuva 22. Auma 3 kuvattuna 19.1.2016.

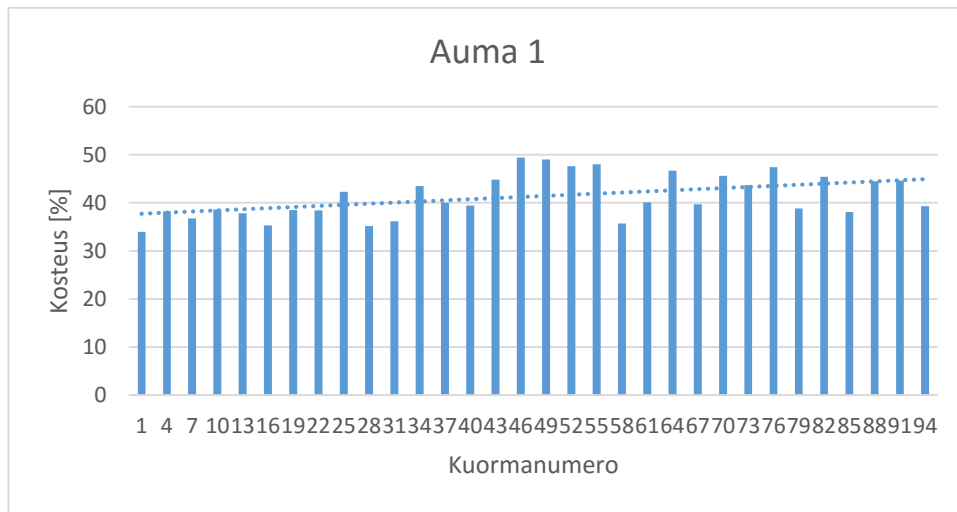
5.2 Aumojen kosteuspitoisuudet

Taulukossa 4 on esitetty terminaalille tuotujen ja aumoihin kasattujen hakekuormien kokonaismassat ja keskimääräiset kosteudet. Kussakin aumassa olleen hakkeen määrä ja kosteus olivat varsin lähellä toisiaan. Liitteessä II on terminaalille tuotujen kuormien tarkemmat tiedot.

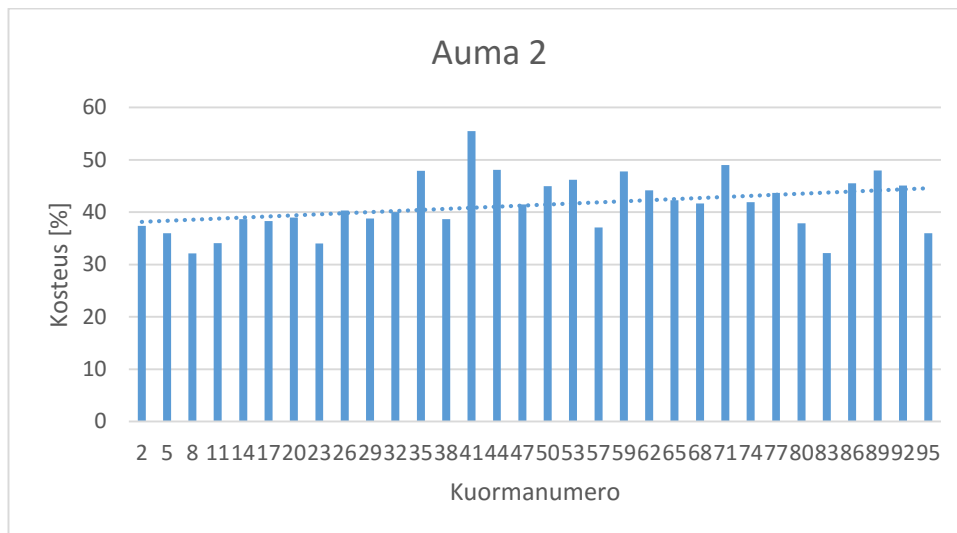
Taulukko 4. Aumoihin tuodun hakkeen massa ja kosteus saapumistilassa.

	Auma 1	Auma 2	Auma 3
Haketta [kg]	1 190 830	1 212 950	1 202 640
Kosteus [%]	41,3	41,4	41,6

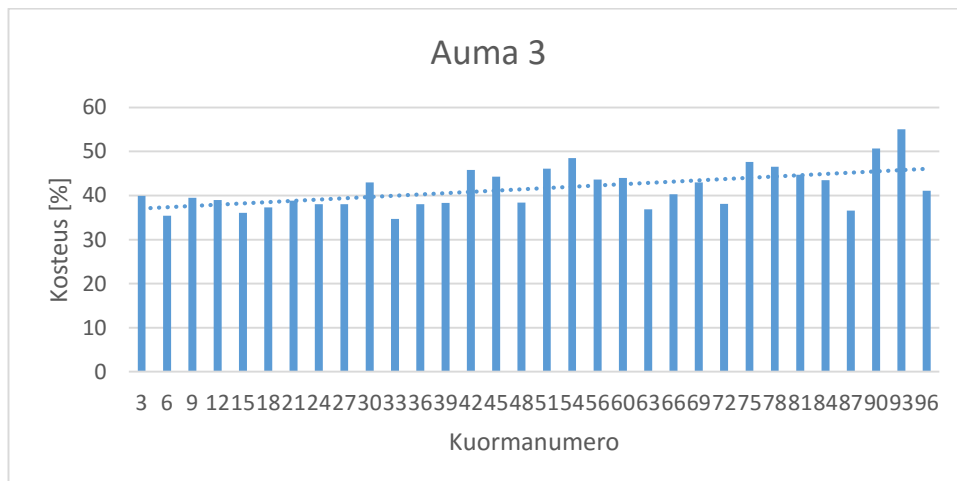
Kuvista 23–25 nähdään aumoihin tuotujen hakekuormien kosteudet saapumistilassa. Hake on ollut keskimäärin hyvin tasalaatuista kaikkien kolmen auman välillä. Kosteuspitoisuuden trendi on ollut hieman nousussa syksyn edetessä.



Kuva 23. Auma 1:n hakekuormien kosteudet ja kosteuksien trendi.



Kuva 24. Auma 2:n hakekuormien kosteudet ja kosteuksien trendi.



Kuva 25. Auma 3:n hakekuormien kosteudet ja kosteuksien trendi.

Taulukossa 5 on terminaalille tuotujen kuormien pienimmät ja suurimmat, sekä keskimääräiset kosteuspitoisuudet. Aumat 1 ja 2 peitettiin 1.10.2015.

Taulukko 5. Hakekuormien kosteudet (avg = keskimääräinen kosteus).

	min [%]	max [%]	avg [%]
Auma 1	34,0	49,4	41,33
Auma 2	32,1	55,5	41,38
Auma 3	34,7	55,0	41,58

Alkuvuoden 2016 kovat pakkaset loppuivat 23.1. kun lämpötila Mikkelissä lauhtui noin -5 °C tienoille. 26.1. lämpötila lauhtui nollan yläpuolelle. Lämpötilan nousun seurauksena koeaumoissa olevan hakkeen kuljetus Pursialan voimalaitokselle keskeytyi vähentyneen lämmöntarpeen takia. Aikavälillä 15.-21.1.2016 saatiin kuitenkin noin puolet aumoista 2 ja 3 kuljetettua Pursialaan. Tässä vaiheessa peitetyn auman (2) kuormien keskikosteus oli 45,4 % ja peittämättömän auman (3) keskikosteus oli 50,9 %. Molemmissa aumoissa oli siis tapahtunut kosteuspitoisuuden kasvua kuormien saapumistilaan verrattuna. Peitetty auma oli kuitenkin säilynyt keskimäärin selvästi peittämätöntä kuivempuna.

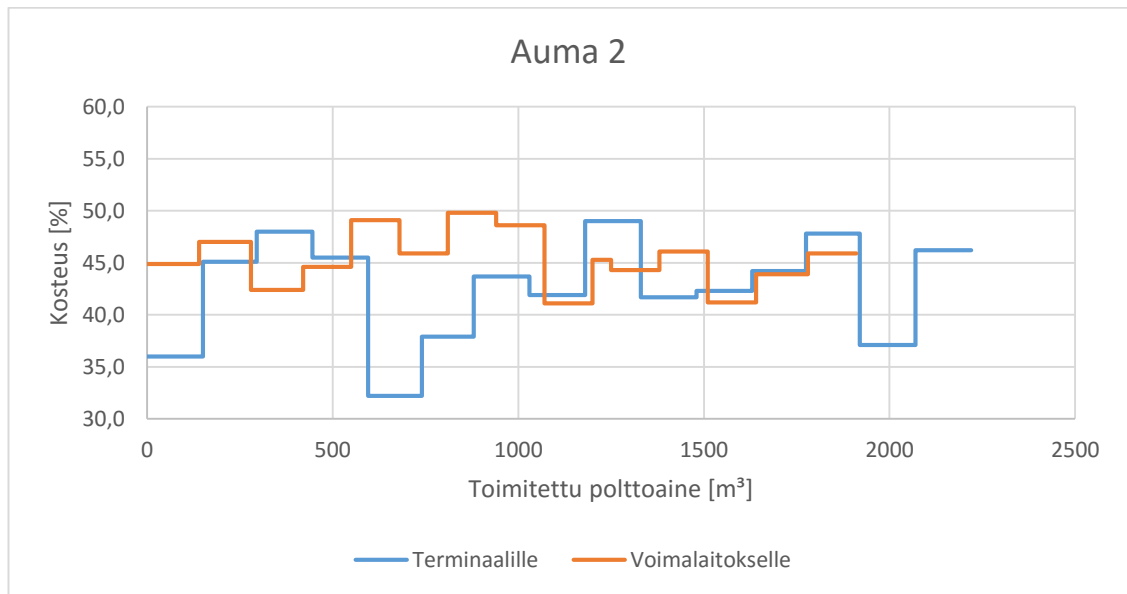
Hake oli molemmissa aumoissa enimmäkseen melko kuivaa, mutta molempien aumojen yläosaan oli muodostunut erittäin kostean hakkeen alue. Peitetyn auman kastunut alue oli peittämättömän auman vastaavaa selvästi pienempi.

Kuvassa 26 on näkyvillä melko ohut jäätynyt kerros peitettyssä aumassa. Erittäin kostean hakkeen alue on nähtävissä auman yläosassa.

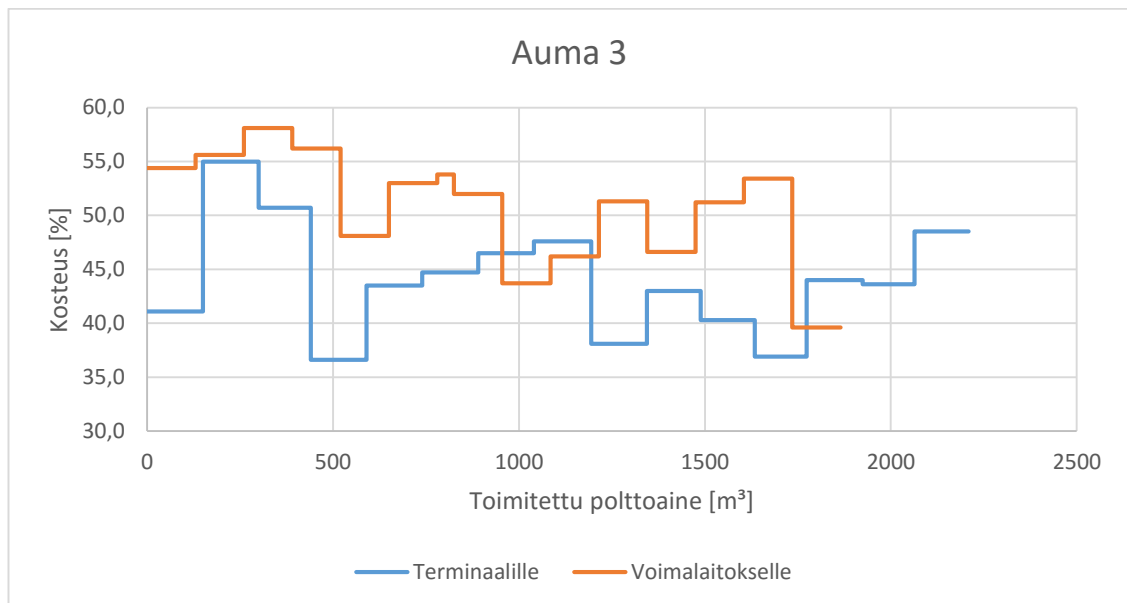


Kuva 26. Auma 2 kuvattuna 19.1.2016.

Kuvista 27 ja 28 voidaan vertailla terminaalille kesällä ja syksyllä 2015 tuotujen kuormien ja tammikuussa 2016 terminaalilta voimalaitokselle vietyjen kuormien kosteuksia. Voimalaitokselle toimitetut kuormat ovat kuvaajissa ensimmäisestä (15.1.2016) toimitetusta kuormasta alkaen viimeiseen (21.1.2016) toimitettuun kuormaan. Terminaalille toimitetut kuormat ovat viimeisimmästä (25.9.2015) alkaen, jatkuen 18.8.2015 toimitettuihin kuormiin. Varastointi on nostanut molempien hakeaumojen kosteuksia, mutta peite-tyssä aumassa hake on kastunut vähemmän. Terminaalille toimitetun hakkeen keskimääräinen kosteus on myös ollut lievässä nousussa syksyn edetessä.



Kuva 27. Hakkeen kosteus tutkimuksen alussa ja lopussa aumassa 2.



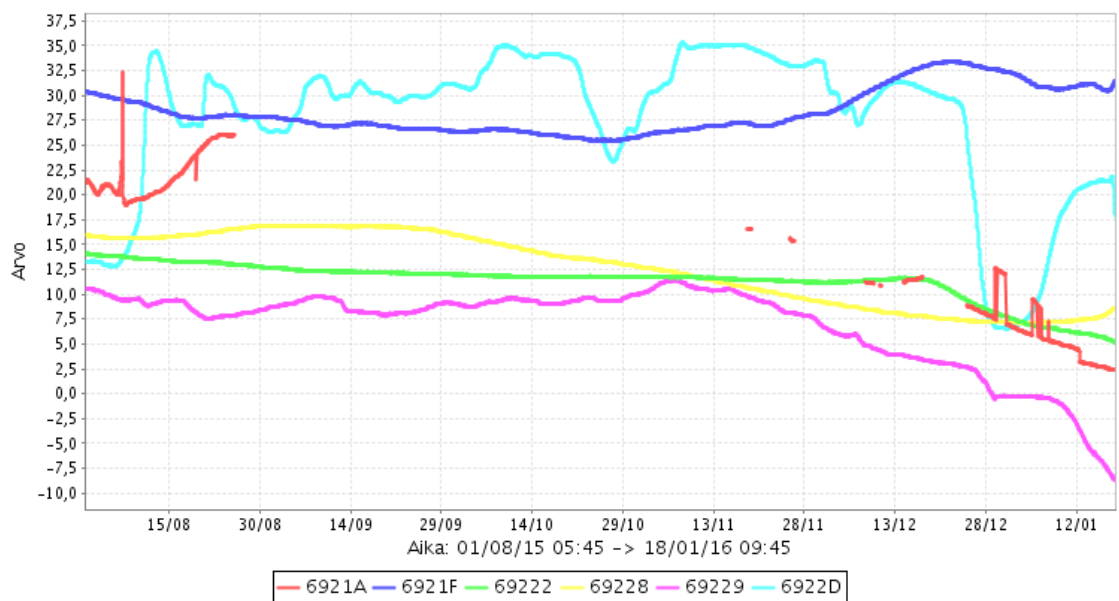
Kuva 28. Hakkeen kosteus tutkimuksen alussa ja lopussa Aumassa 3.

5.3 Lämpötilat aumoissa

Ensimmäiset lämpötilasensorit linjasta 3 saatiin yhtä, ilmeisesti pyöräkuormaajan kauhasessa hakeauton kuormatilaan päätynttä sensoria lukuun ottamatta talteen, mutta niistä ei saatu lämpötiladataa lainkaan.

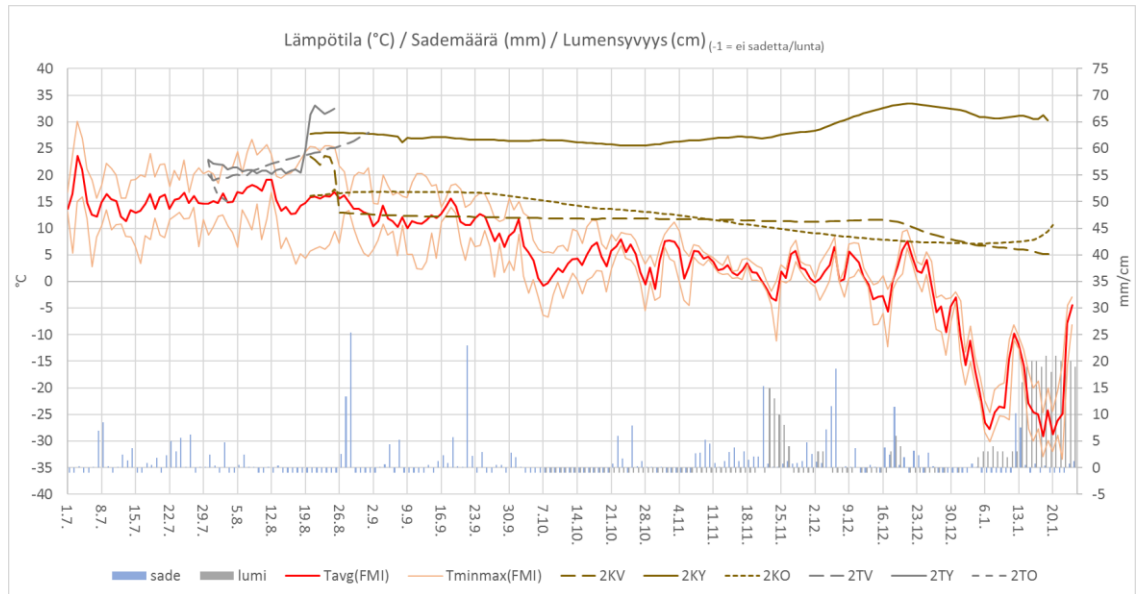
Aumojen keskimmaisessä linjassa olleet sensorit saatiin kaikki (6 kpl) ehjinä talteen. Sensoreista ainoastaan yhtä (6921A) saatiin satunnaisesti luettua auman sisältä. Aumojen puolivälissä olleiden sensoreiden aumoista poistamisen jälkeen saatiin niistä data talteen kokonaisuudessaan, lukuun ottamatta sensoria 6921A, jonka keräämästä datasta osa oli hävinnyt.

Kuvassa 29 on aumojen 2 ja 3 sisälämpötilat aumojen keskimmaisessä leikkauksessa olleista sensoreista. Aikavälin alussa aumojen kokoaminen oli vasta alussa, joten nopeat lämpötilamuutokset käyrissä ovat seurausta tästä. Tummansininen (6921F) käyrä on peittetyn auma 2:n lämpötila keskeltä ylhäältä. Vaaleansininen (6922D) käyrä kuvaa peittämättömän auma 3:n lämpötilaa vastaavasta kohdasta. Punainen (6921A) käyrä on peittämättömän auman keskimmäisen leikkauksen vasemmanpuoleinen sensori. Tämä oli ainoa sensori, jota saatiin luettua auman sisältä satunnaisesti varastoinnin aikana. Jostakin syystä dataa on kuitenkin hävinnyt aumakokeen aikana, eikä käyrä ole täydellinen. Lisäksi käyrässä on havaittavissa häiriöitä (piikit).

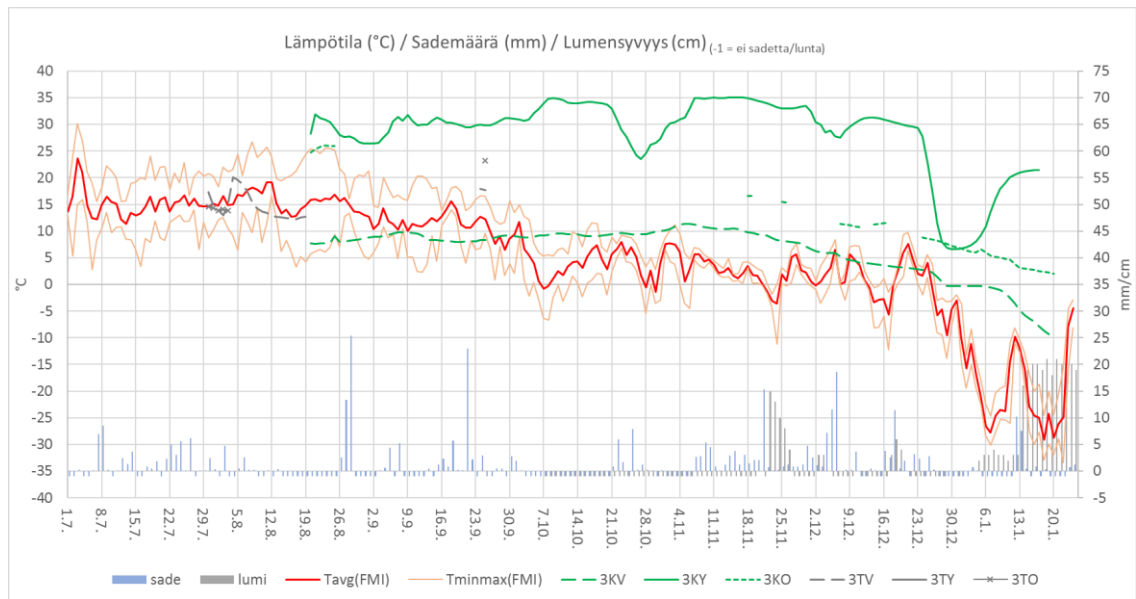


Kuva 29. Aumojen sisälämpötilat keskimmäisen leikkauksen kohdalta aikavälillä 1.8.2015-18.1.2016. (Sensire)

Kuvaajissa (kuvat 30 ja 31) on näkyvillä tutkimuksen aikaiset sademäärät, lämpötilatiedot sekä lämpötilasensorien mittaamat aumojen sisälämpötilat. Sää tiedot on haettu Ilmatieteen laitoksen (FMI) avoin data -palvelusta. Havaintopaikkana oli Mikkelin lentoasemalla sijaitseva sääasema.



Kuva 30. Auman 2 sensoreiden tallentamat lämpötilatiedot sekä tiedot mittausjakson aikana vallinneesta säästä (sisältää Ilmatieteen laitoksen avointa dataa). Tavg(FMI) = vuorokauden keskilämpötila, Tminmax(FMI) = vuorokauden ylin ja alin lämpötila. 2 = aumanumero. Sensoreiden paikat portilta katsottuna: K = keskimmaisessä linjassa (linja 2), T = taaimmaisessa linjassa (linja 1), V = vasemmassa reunassa, O = oikeassa reunassa, Y = keskellä ylhäällä).



Kuva 31. Auman 3 sensoreiden tallentamat lämpötilatiedot sekä tiedot mittausjakson aikana vallinneesta säästä (sisältää Ilmatieteen laitoksen avointa dataa). Tavg(FMI) = vuorokauden keskilämpötila, Tminmax(FMI) = vuorokauden ylin ja alin lämpötila. 3 = aumanumero. Sensoreiden paikat portilta katsottuna: K = keskimmaisessä linjassa (linja 2), T = taaimmaisessa linjassa (linja 1), V = vasemmassa reunassa, O = oikeassa reunassa, Y = keskellä ylhäällä).

5.4 Kuiva-ainetappiot

Kuiva-ainetappioiden selvittäminen viivästyí sääolosuhteiden takia. Tammikuun alun erittäin kylmä kausi päättyi ennen tammikuun viimeistä viikkoa, minkä seurauksena koe-ainojen käyttämiseksi polttoaineena ei ollut mahdollisuuksia. Tästä johtuen ei voitu myöskään punnita toistaiseksi käyttämättä jäänyttä haketta, joten kuiva-ainetappioita ei ollut mahdollista selvittää tämän tutkimuksen aikana.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Peittämisen kannattavuus

Pyöräkuormaajan ja hakeautojen kuljettajien mukaan peitetty auma oli huomattavasti helpommin käsiteltävissä. Peitetty auma oli pääosin kokonaan sula, joskin paikoitellen pinnassa oli 10–20 cm paksu jäätyneen hakkeen kerros. Peittämätön auma oli saanut alkuvuoden 2016 kovissa pakkasissa päälleen noin puoli metriä paksun jäisestä hakkeesta koostuvan kuoren, joka hankaloitti jonkin verran hakkeen käsittelyä. Jäiset osat piti erikseen murskata pyöräkuormaajan kauhalla, ennen kuin ne voitiin lastata rekkoihin. Jäisiä paakkuja päätyi tästä huolimatta kuormiin. Voimalaitoksella paakut voivat aiheuttaa ongelmia polttoaineenkäsittelyjärjestelmissä. Tavallisesti paakut jätetäänkin terminaalille, ja toimitetaan voimalaitokselle vasta niiden sulettua.

Aumojen purkamisessa säiden lauhtumisen takia pidetyn tauon aikana satoi lunta, räntää ja vettä useana päivänä. Sateella oli oletettavasti hieman vaikutusta aumojen kosteuksiin. Myös peitetty auma oli alttiina sateelle toisesta päästään, josta peitettä oli kuorittu pois auman purkamista varten.

Aumojen peittämisen kustannuslaskemassa käytettiin työn tuntihintana 100 €/henkilö sisältäen siirtymisen ja kaluston (traktori ja perävaunu) käytön. Yhden auman peittämiseen laskettiin käytettävän 1,5 tuntia ja peittämisessä oli mukana 4 henkilöä. Tällöin työn osuus yhden auman peittämiskustannuksista oli:

$$4 * 100 \frac{\text{€}}{h} * 1,5 h = 600 \text{ €}$$

Auman peitteen hinta laskettiin käyttäen Raisioagron Triosilo -aumakalvon tietoja. Aumakalvo myydään kappaletavarana rullissa, joissa kalvoa on 16 m (leveys) * 300 m (pituus) * 0,150 mm (paksuus). Yksi rulla maksaa 1521,48 €. (Raisioagro. 2016)

Aumakalvon neliöhinnaksi saatiin edellä mainitulla kalvolla:

$$\frac{1521,48 \text{ €}}{16 \text{ m} * 300 \text{ m}} \approx 0,32 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$$

Auman mitat olivat noin 60 m (pituus) * 20 m (leveys) * 5 m (korkeus), jolloin aumamuovia tarvittiin noin 25 m * 70 m. Tällöin yhden auman materiaalikustannukset olivat:

$$25 \text{ m} * 70 \text{ m} * 0,32 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 560 \text{ €}$$

Tällöin yhden auman peittämisen kustannukset olivat:

$$600 \text{ €} + 560 \text{ €} = 1160 \text{ €}$$

Puun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vaihtelee välillä 18,3–20,0 MJ/kg (Alakangas. 2000, 42). ESE on määrittänyt (liitteet III ja IV) kuiva-aineiden lämpöarvot aumoissa 2 ja 3 käyttöpaikalle kuljetuksen yhteydessä. Hakkeen lämpöarvot olivat 18,62 MJ/kg (auma 2) ja 18,57 MJ/kg (auma 3). Käytetään laskennassa arvoa 18,60 MJ/kg.

Energiasisältöjen laskennassa käytettiin molemmille aumoille massana 1 200 tonnia. Auman energiasisältö saatiin kertomalla auman massa lämpöarvolla. Kaavaa 3 käytettiin aumoissa olleen hakkeen lämpöarvojen laskentaan. Aumojen lämpöarvot ja energiasisällöt alkutilanteessa:

Auma 2 (kosteus 41,4 %) hakkeen lämpöarvo alussa:

$$Q_{net_ar} = 18,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * \frac{100 - 41,4}{100} - 0,02441 * 41,4 = 9,89 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Auma 2 energiasisältö alussa:

$$9,89 \frac{MJ}{kg} * 1\,200\,000\,kg * \frac{1\,MWh}{3600\,MJ} \approx 3296\,MWh$$

Auma 3 (kosteus 41,6 %) hakkeen lämpöarvo alussa:

$$Q_{net_ar} = 18,6 \frac{MJ}{kg} * \frac{100 - 41,6}{100} - 0,02441 * 41,6 \approx 9,85 \frac{MJ}{kg}$$

Auma 3 energiasisältö alussa:

$$9,85 \frac{MJ}{kg} * 1\,200\,000\,kg * \frac{1\,MWh}{3600\,MJ} \approx 3282\,MWh$$

Tutkimuksen aikana kosteudet päästiin mittaamaan varastoinnin jälkeen vain puolikkaista aumoista, mutta oletetaan kosteuksien olevan samat koko aumoissa. Tällöin aumojen 2 ja 3 lämpöarvot saadaan käyttämällä kaavaa (3):

Auma 2 (kosteus 45,4 %) hakkeen lämpöarvo lopussa:

$$Q_{net_ar} = 18,6 \frac{MJ}{kg} * \frac{100 - 45,4}{100} - 0,02441 * 45,4 \approx 9,05 \frac{MJ}{kg}$$

Auma 2 energiasisältö lopussa:

$$9,05 \frac{MJ}{kg} * 1\,200\,000\,kg * \frac{1\,MWh}{3600\,MJ} \approx 3016\,MWh$$

Auma 3 (kosteus 50,9 %) hakkeen lämpöarvo lopussa:

$$Q_{net_ar} = 18,6 \frac{MJ}{kg} * \frac{100 - 50,9}{100} - 0,02441 * 50,9 \approx 7,89 \frac{MJ}{kg}$$

Auma 3 energiasisältö lopussa:

$$7,89 \frac{MJ}{kg} * 1\,200\,000\,kg * \frac{1\,MWh}{3600\,MJ} \approx 2630\,MWh$$

Energiasisältöjen muutokset aumoissa:

Auma 2:

$$3296\,MWh - 3016\,MWh = 280\,MWh$$

Auma 3:

$$3282\,MWh - 2630\,MWh = 652\,MWh$$

Erotus aumojen välillä:

$$652\,MWh - 280\,MWh = 372\,MWh$$

Metsäpohjaisen energian hinta käyttöpaikalla oli vuoden 2016 alussa 18,88 €/MWh (Metsäkustannus. 2016). Samaa hintaa käytettiin oletuksena tässä tutkimuksessa käsiteltävälle hakkeelle koko tutkimuksen aikana. Energiapuun käytöstä maksettavaa valtiontukea ei huomioitu laskennassa.

Aumojen energiasisällön erotuksen rahallinen arvo:

$$372\,MWh * 18,88 \frac{€}{MWh} \approx 7023\,€$$

1160 euron kustannuksilla saavutettiin siis noin 372 megawattitunnin eli yli 7 000 euron säästöt hakkeen energiasisällön paremman säilymisen muodossa. Lisäksi hakkeen käsiteltävyys säilyi parempana selvästi vähäisemmän jäätyksen takia.

Tutkimuksen polttohakkeen hinta, jolla saavutettu hyöty olisi sama, kuin peittämiskustannukset:

$$\frac{1160 \text{ €}}{372 \text{ MWh}} \approx 3,12 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

Tämän kokoisella polttoainevarastolla polttohakkeen hinnan pitäisi pudota hyvin alas, jotta aumojen peittämisestä saatava rahallinen hyöty olisi nolla. Koska tutkimukseen käytetty aika oli suhteellisen lyhyt, ei rahan arvon muutosta (inflaatio) huomioida laskelmissa.

Sääolosuhteiden takia koskemattomaksi jätetty auma 1 ei vaikuttanut tutkimuksen toteuttavuuteen. Auman 1 purkamisen siirryttyä loppuvuoteen voidaan arvioida pidemmän varastointiajan vaikutusta peitetystä aumassa olevan polttoaineen laatuun ja edelleen peittämisen kannattavuuteen.

Peittämisen voidaan sanoa olevan taloudellisesti kannattavaa, kun huomioidaan peittämisen kustannukset ja peitetystä aumassa varastoidun hakkeen matalampi kosteus ja korkeampi lämpöarvo. Polttoaineen käsiteltävyyden paranemisen taloudellisten hyötyjen arviointi on vaikeampaa. Voidaan silti olettaa, että hakeauman peittämisen ansiosta tapahtuva vähäisempi jään muodostus hakkeeseen on hyödyllistä. Jäätyneen hakkeen aiheuttamat mahdolliset ongelmat voimalaitoksen polttoaineenkäsittelyjärjestelmässä voivat aiheuttaa taloudellisia tappioita, joiden suuruutta on hankala arvioida.

6.2 Muita havaintoja

Tutkimuksessa havaittiin, että muutaman metrin paksuinen hakekerros estää signaalinkulun ja siten sensorien lukemisen aumoista. Tästä syystä alkuperäinen tarkoitus seurata

aumojen sisäistä lämpötilaa varastoinnin aikana ei ollut mahdollista. Vaihtoehdoksi siis jäi odottaa aumojen purkamista ja sensorien keräämien lämpötilatietojen purkamista vasta tässä vaiheessa.

Mahdollisia tulevia aumakokeita varten tehtiin seuraavia huomioita: Mikäli lämpötilatietoja halutaan seurata kesken aumakokeen, tulisi käyttää langallisia sensoreita tai kehittää langattomien sensorien luettavuutta hakkeen läpi. Paksu hakekerros sensorien päällä estää tehokkaasti signaalin kulkemisen ja tekee sensorien lukemisesta langattomasti lähes mahdotonta. Sensoreiden löytämisen helpottamiseksi niihin kiinnitettyjen narujen tulisi myös olla vahvempia ja selvemmin näkyviä. Nyt narut katkesivat välillä pyöräkuorman kauhjan osuessa niihin. Narujen havaitseminen oli myös välillä melko vaikeaa. Mikäli hakeaumoja peitetään, olisi hakkuutähdehaketta parempi paino peitteille esimerkiksi kokonaiset rangat.

Kuiva-ainetappioiden selvittäminen ei ollut tämän tutkimuksen aikana mahdollista, johon tuen keskimääräistä lämpimämmän sään aiheuttamasta vähäisemmästä polttoainetarpeesta Pursialan voimalaitoksella. Kuiva-ainetappiot voidaan selvittää, kunhan Metsä-Sairilan terminaalin hakeaumat voidaan kokonaisuudessaan kuljettaa Pursialaan.

Tutkimuksen jäätyä osittain kesken, voidaan tulevana talvena mahdollisesti selvittää aumojen käyttäytymistä suunniteltua pidemmän varastoinnin aikana. Lämpötilasensorien jättäminen aumaan 1, sekä puolikkaisiin aumoihin 2 ja 3, saattaa johtaa sensorien paristojen tyhjenemiseen, ennen kuin ne saadaan aumoista esille. Mikäli näin tapahtuu, lämpötilatietoja ei ole enää mahdollista saada talteen. Tällöin selvitettäväksi jää kuiva-ainetappiot ja kosteuspitoisuudet jäljellä olevissa aumoissa.

Tutkimuksen aikaiset aumojen sisälämpötilat olivat lämpötilasensorien kohdalla korkeimmillaan noin 35 astetta. Tästä voidaan olettaa, että aumojen itsesyttymisriski oli tässä tapauksessa hyvin alhainen. Aumojen sisäiset lämpötilat käyttäytyivät molemmissa aumoissa samankaltaisesti koko tutkimuksen ajan. Ainoa selvä ero oli keskellä ylhäällä olevilla sensoreilla, joilla havaittiin peittämättömässä aumassa selkeästi isompia lämpötilanvaihteluita, kuin peitetystä aumasta.

Vaikka tässä tutkimuksessa aumojen sisälämpötilat eivät nousseetkaan kovin korkeiksi, eivät huomattavasti korkeammatkaan lämpötilat hakekasoissa ole epätavallisia. Lämpötilasensoreita käyttämällä voisi olla mahdollista vähentää itsesyttymisiä puuttamalla kasojen lämpenemiseen riittävän ajoissa, ennen kuin varsinainen syttyminen pääsee tapahtumaan.

7 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tutkittiin voimalaitoksen polttoaineen varastoterminaalissa varastoitujen hakeaumojen laadun muutoksia varastoinnin aikana. Aumoissa oli noin 5000 i-m³ haketta kussakin. Toinen aumoista peitettiin syksyllä ja toinen jätettiin peittämättä.

Tutkittavia asioita olivat aumojen sisäiset lämpötilat eri kohdissa aumoja varastoinnin aikana. Aumojen kosteuspitoisuuden muutos ja peittämisen vaikutus kosteuteen oli myös tutkittavana. Kuiva-ainetappiot oli tarkoitus selvittää aumoihin tuotujen ja aumoista läheneiden kuormien massojen erotuksesta, kosteuspitoisuuksien muutokset huomioiden.

Tutkimuksen perusteella aumojen sisälämpötiloissa ei ole oleellisia eroja peitetyn ja peittämättömän auman välillä. Aumoissa korkeimmat lämpötilat ovat keskellä ja suhteellisen lähellä auman yläosaa.

Kosteus oli lisääntynyt molemmissa aumoissa, mutta peittämättömässä huomattavasti enemmän. Peittämättömän auman pinta oli lisäksi jäänyt noin puolen metrin paksuudelta, mikä hankaloitti auman purkua ja rekkaan lastaamista, sekä mahdollisesti polttoaineen käsittelyä voimalaitoksella. Peitettyssä aumassa hake oli kuivempaa ja helpommin käsiteltävää huomattavasti vähäisemmän jäätyminen johdosta. Ongelmia aiheutti kuitenkin peittämisessä käytettyjen peitteiden poistaminen siististi. Peitteiden painona käytetty metsätähdehake jäättyi peitteiden pintaan ja hankaloitti peitteiden poistoa.

Kuiva-ainetappioiden selvittäminen ei ollut mahdollista, koska tammikuuta lukuun ottamatta keskimääräistä lämpimämpi sää esti koeaumojen käyttämisen polttoaineena suunnitellusti. Kuiva-ainetappiot on mahdollista selvittää, kunhan koeaumat saadaan kokonaisuudessaan kuljetettua poltettaviksi. Hakeaumojen peittäminen on tutkimuksen perusteella kannattavaa, sillä hakkeen kastumisesta seuraava energiasisällön väheneminen on peitettyssä aumassa vähäisempää.

LÄHTEET

Aalto, M. 2015. Rankapuun ja -hakkeen laadun vaihtelu terminaalivarastoinnissa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, energiatekniikan koulutusohjelma. 63 s.

Ahtoniemi, P., Tainio, M., Tuomisto, J., Karvosenoja, N., Kupiainen, K., Porvari, P., Karppinen, A., Kangas, L., Kukkonen, J. 2010. Health Risks from Nearby Sources of Fine Particulate Matter: Domestic Wood Combustion and Road Traffic (PILTTI). National Institute for Health and Welfare. Helsinki. 60 s. ISBN 978-952-245-224-5.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo. Ota-media Oy. 172 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5699-2.

Alakangas, E., Impola, R. 2014. Puupolttoaineiden laatuohje VTT-M-07608-13 – päivitys 2014. 64 s. ISBN 978-952-93-3223-6.

Aluehallintovirasto. 2014. Pursialan voimalaitoksen ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen. Päätös 8/2014/1. Mikkeli. 28 s.

Anerud, E. 2015. Storage of wood fuel. Swedish University of Agricultural Sciences. 25 s.

Anttila, P., Nivala, M., Laitila, J., Korhonen, K. 2013. Metsähakkeen alueellinen korjuupotentiaali ja käyttö. Metlan työraportteja. 24 s. ISBN 978-951-40-2420-7.

Anttila, P., Nivala, M., Laitila, J., Flyktman, M., Salminen, O., Nivala, J. 2014. Metsähakkeen alueellinen korjuupotentiaali ja käyttö vuonna 2020. Metlan työraportteja. 55 s. ISBN 978-951-40-2504-4.

Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Hynynen, J. 2013. Kappale 1, Bioenergiaa metsistä kestävästi ja kilpailukykyisesti, teoksessa: Bioenergiaa metsistä – Tutkimus- ja kehittämissuhteen keskeiset tulokset, toimittanut Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Muhonen, T. Metlan työraportteja. 223 s. ISBN 978-951-40-2468-9.

Energiateollisuus. 2015. Metsäenergia | Energiateollisuus. [Viitattu 16.9.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energiالاhteet/metsaenergia>

Energiavirasto. 2016. Uusiutuvan energian tavoite ylittyi etuajassa – Media – Energiavirasto. [Viitattu 10.2.2016]. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/-/uusiutuvan-energian-tavoite-ylittyi-etuajassa>

ESE. 2014a. Etelä-Savon Energia Oy. Vuosikatsaus 2013. Mikkeli. 8 s.

ESE. 2014b. Etelä-Savon Energia Oy. Ympäristöraportti. Mikkeli. 22 s.

ESE. 2014c. Etelä-Savon Energia Oy. Vuosikertomus 2014. Mikkeli. 68 s.

ESE. 2016. Etelä-Savon Energia Oy. Ese – Ese-konserni. [Viitattu 15.2.2016]. Saatavissa: <https://www.esefi.fi/ese-konserni/>

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999-2003. Metsähakkeen tuotantoteknologia. Loppuraportti. VTT Prosessit/Tekes. Helsinki. 135 s. ISBN 952-457-150-1.

Hakkila, P., Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s. ISBN 951-40-1531-2.

Hyppänen, T., Raiko, R. 2002. Kappale 18, Leijupoltto, teoksessa: Poltto ja palaminen, toimittanut Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M., Kurki-Suonio, I. Jyväskylä. 750 s. ISBN 951-666-604-3.

Ikonen, T., Jahkonen, M. 2014. Laadunhallinta energiapuun korjuussa & keskeiset metsähakkeen laatutekijät. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. LAATU-hankkeen kevätseminaari.

Ilmatieteen laitos. 2016. Avoin data – Ilmatieteen laitos. [Viitattu 18.2.2016]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>

Impola, R., Tiihonen, I. 2011. Biopolttoaineterminaalit: ohjeistus terminaalien perustamiselle ja käytölle. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. Terminaalikäsi- ja VTT-R-08634-11. 38 s.

Juntunen, R., Hirvonen, M., Paukkunen, S. 2013. LAAVA-hanke. Raportti Fortumin polttoainekentän hakeumakokeista 2013. Karelia-ammattikorkeakoulu, biotalouden keskus. 22 s.

Järvinen, T. 2011. Kiinteiden biopolttoaineiden CEN-näytteenottostandardin soveltaminen Suomen oloihin. Teknologian tutkimuskeskus VTT. VTT-R-01322-12. Jyväskylä. 55 s.

Järvinen, T., Impola, R. 2012. Näytteenottostandardin soveltamisohje. Näytteenotto- ja -näyttekäsittely-standardien (SFS-EN 14778: 2012 ja SFS-EN 14780: 2012) soveltamisohje metsäpolttoaineille Suomessa – Luonnos. Teknologian tutkimuskeskus VTT. VTT-R-03522-12. Jyväskylä. 21 s.

Koivuniemi, A. 2016. Energiatalousinsinööri/Pursialan voimalaitos. Etelä-Savon Energia Oy. Sähköpostikeskustelu 22.2.2016.

Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M., Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. 143 s. ISBN 978-951-38-7678-4.

Lepistö, T. 2010. Laatuhaakkeen tuotanto -opas. Etelä-Pohjanmaan metsäkeskus. 45 s. ISBN 978-951-98723-8-4.

Lindblad, J., Jahkonen, M., Laitila, J., Kilpeläinen, H., Sirkiä, S., Repola, J. Kappale 20, Metsäbiomassan määrän ja laadun mittaus, teoksessa: Bioenergiaa metsistä – Tutkimus- ja kehittämisohjelman keskeiset tulokset, toimittanut Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Muthonen, T. Metlan työraportteja. 223 s. ISBN 978-951-40-2468-9.

Liski, J., Repo, A., Känkänen, R., Vanhala, P., Seppälä, J., Antikainen, R., Grönroos, J., Karvosenoja, N., Lähtinen, K., Leskinen, P., Paunu, V-V., Tuovinen, J-P. 2011. Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa. Suomen ympäristökeskus SYKE. Helsinki. 43 s. ISBN 978-952-11-3840-9.

Luonnonvarakeskus. 2015. Puun energiakäyttö 2014. [Viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: <http://stat.luke.fi/puun-energiakaytto>

Metsäkustannus. 2016. Käyttöpaikkahinnat – Metsälehti. [Viitattu 1.3.2016]. Saatavissa: <http://www.metsalehti.fi/Metsaenergia/Kayttopaikkahinnat/>

Nurmi, J. 2008. Hakkuutähteen korjuu on osa metsätaloutta. Metla. [Viitattu 16.2.2016]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metla/esitteet/teemaesitteet/hakkuutahteet-nurmi.pdf>

Raisioagro. 2016. Verkkokauppa| Raisioagro Tuotteen lisätiedot. [Viitattu 23.2.2016]. Saatavissa: https://kauppa.raisioagro.com/raisio_b2c/init.do?scenario.xcm=raisio_b2c&shop=RAISIO_B2C&language=fi&areaID=0000000045&productID=00000000450000000027

Raitila, J. 2014. Energiapuun kuivuminen rankana ja hakkeena. Puun kuivauksen teemapäivä, Biolämpöhanke. VTT. Saarijärvi. 28 s.

Routa, J., Ikonen, T. 2015. Bioenergiamarkkinat (s. 19–20). Metsäsektorin suhdannetiedote 2015, toimittanut Viitanen, J., Hänninen, R. Luonnonvarakeskus. 20 s.

Räisänen, T. 2011. Milloin on kannattavaa siirtää kuitupuuta energiapuuksi kuusen ja männyn ensiharvennuksessa? Metla. [Viitattu 17.2.2016]. Saatavissa: http://www.forest-power.net/data/liitteet/15482=1014_milloin_kuitupuuta_energiapuuksi.pdf

Salminen, O. 2015. Suomen puuvarat, metsänkasvu sekä puunkäytön lisääntymisen vaikutukset. Luonnonvarakeskus. [Viitattu 17.2.2016] Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/531530>

Sensire. 2013. TempNet® - ohjekirja. 42 s.

SFS-EN 14774-1. 2010. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 1: Kokonaiskosteus. Vertailumenetelmä. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 13 s.

SFS-EN 14774-2. 2010. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 13 s.

SFS-EN 14774-3. 2010. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 3: Yleisen analyysinäytteen kosteus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 13 s.

SFS-EN 14778. 2011. Kiinteät biopolttoaineet. Näytteenotto. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 103 s.

SFS-EN 14780. 2011. Kiinteät biopolttoaineet. Näytteen esikäsittely. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 41 s.

Strandström, M. 2013. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2012. Metsätehon tulosalvosarja 4/2013. Metsäteho Oy. [Viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/Tulosalvosarja_2013_04_Mets%C3%A4hakkeen_tuotantoketjut_2012_ms.pdf

Strandström, M. 2015. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2014. Metsätehon tulosalvosarja 8/2015. Metsäteho Oy. [Viitattu 15.2.2016]. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2015_08_Metsahakkeen_tuotantoketjut_2014_ms.pdf

Tilastokeskus. 2015. Energian hankinta ja kulutus 2014. [Viitattu 15.2.2016]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehk/2014/ehk_2014_2015-12-14_fi.pdf

TEM. 2015. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja: Energia ja ilmasto 25/2015. Selvitys energiapolitiikan vaihtoehtoista. 54 s. ISBN 978-952-227-977-4.

TEM. 2014. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja: Energia ja ilmasto 31/2014. Energia- ja ilmastotiekartta 2050. 75 s. ISBN 978-952-227-882-1.

Yle. 2016. Metsänomistajille jättipotti – ”Tulevaisuus näyttää aivan uskomattoman hyvältä”. [Viitattu 3.3.2016]. Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/metsanomistajille_jattipotti_tulevaisuus_nayttaa_aivan_uskomattoman_hyvalta/8713743

Äijälä, O., Kuusinen, M., Koistinen, A. 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset energia-puun korjuuseen ja kasvatukseen. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 31 s. ISBN 978-952-5694-64-2.

LIITE I. Sensire TempNet -laitteiston ominaisuuksia (Sensire. 2013, 41)

TEKNINEN MÄÄRITTELY

Tukiasemayksikkö (2G)

Tekniset ominaisuudet

- Käyttöjännite 10-32 VDC
- Virrankulutus Max. 1A
- Kotelointi IP20
- Käyttölämpötila -30 - +65
- Säilytyslämpötila -40 - +85
- Muistin koko 4 MB (voi varastoida 10 sensorilla ja 5 minuutin mittausvälillä 30 päivää dataa ilman purkua)

Liityntäteknikat

- GSM/GPRS
- GPS (Optio)
- Relelähtö, 2 kpl
- 868MHz ISM band (56bit DES salaus)

Lämpötilasensori

Tekniset ominaisuudet

- Mittausväli 15 min.
- Paristo 3.6V lithium-paristo AA (ls-14500, valmistaja: Saft)
- Kotelointi IP65
- Muistin koko 32 KB (voi varastoida 3 kk lämpötilamittauksia 15 minuutin mittausvälillä ilman purkua)
- Käyttölämpötila: -30 - +75
- Säilytyslämpötila: -40 - +85
- Radiorajapinnassa 56 bit DES salaus

Liityntäteknikat

- 868MHz ISM band (56bit DES salaus)

LIITE II. Terminaalille tuotujen kuormien tiedot

Auma 1						Auma 2						Auma 3					
kuorma	auto	massa	kosteus	tilavuus		kuorma	auto	massa	kosteus	tilavuus		kuorma	auto	massa	kosteus	tilavuus	
1	YHV-185	36480	0,340	150		2	YHV-185	37340	0,374	150		3	YHV-185	38420	0,399	150	
4	YHV-185	38420	0,382	150		5	YHV-185	37880	0,360	150		6	YHV-185	36660	0,354	150	
7	YHV-185	37740	0,368	150		8	YHV-185	34420	0,321	150		9	VXA-915	31520	0,395	150	
10	VXA-915	36480	0,386	150		11	YHV-185	34680	0,341	150		12	VXA-915	34540	0,390	150	
13	YHV-185	35220	0,378	150		14	VXA-915	37320	0,387	150		15	YHV-185	36320	0,361	150	
16	VXA-915	23700	0,353	110		17	YHV-185	36420	0,383	150		18	VXA-914	37580	0,373	150	
19	YIL-214	36220	0,385	140		20	VXA-915	38300	0,390	150		21	VXA-914	37620	0,388	150	
22	YIL-214	36240	0,384	140		23	VXA-914	31720	0,340	150		24	YIL-214	20580	0,380	100	
25	YHV-185	38820	0,423	150		26	ZKB-687	33400	0,403	140		27	VXA-915	37780	0,380	150	
28	VXA-915	35800	0,352	150		29	FLE-379	36250	0,388	145		30	YHV-185	37420	0,430	150	
31	VXA-915	35060	0,362	150		32	YHV-185	36820	0,400	150		33	YHV-185	34780	0,347	150	
34	ZKB-687	36150	0,435	140		35	FLE-379	38900	0,479	145		36	YIL-214	35200	0,380	150	
37	ZKB-687	32640	0,400	140		38	FLE-379	36200	0,387	145		39	VXA-914	36680	0,383	150	
40	YIL-214	31360	0,394	150		41	VXA-914	42360	0,555	150		42	YHV-185	40580	0,458	150	
43	VXA-915	41540	0,448	150		44	VXA-914	41440	0,481	150		45	ZKB-687	35540	0,443	140	
46	YHV-185	41160	0,494	150		47	VXA-914	39740	0,415	150		48	YHV-185	38580	0,384	150	
49	FKM-180	43020	0,490	150		50	VXA-914	42100	0,450	150		51	FLE-379	39760	0,461	145	
52	ZKB-687	39880	0,476	140		53	FKM-180	40500	0,462	150		54	FLE-379	43400	0,485	145	
55	FKM-180	40120	0,480	150		57	FKM-180	34040	0,371	150		56	ZKB-687	33240	0,436	140	
58	ZKB-687	33320	0,357	140		59	FLE-379	40680	0,478	145		60	VXA-915	39440	0,440	150	
61	FKM-180	38840	0,401	150		62	FLE-379	40520	0,442	145		63	ZKB-687	33660	0,369	140	
64	FKM-180	39940	0,467	150		65	FKM-180	38560	0,423	150		66	FLE-378	35960	0,403	145	
67	ZKB-687	33240	0,397	140		68	FKM-180	37740	0,417	150		69	FLE-378	39860	0,430	145	
70	ZKB-687	38200	0,456	140		71	FKM-180	41480	0,490	150		72	VXA-915	36420	0,381	150	
73	ZKB-687	36660	0,437	140		74	VXA-914	38700	0,419	150		75	VUJ-181	43040	0,476	154	
76	ILL-722	42920	0,474	153		77	VXA-914	38900	0,437	150		78	FKM-180	41740	0,465	150	
79	FLE-379	36780	0,388	145		80	ZKB-687	30060	0,379	140		81	VXA-914	43740	0,447	150	
82	MMJ-357	39500	0,454	150		83	FLE-379	42140	0,322	145		84	YIL-214	41780	0,435	150	
85	VXA-915	40500	0,381	150		86	VXA-914	37860	0,455	150		87	MMJ-357	39360	0,366	150	
88	VXA-915	36860	0,445	150		89	MMJ-357	44360	0,480	150		90	ZKB-687	38900	0,507	140	
91	VXA-915	41460	0,446	150		92	FLE-379	38420	0,451	145		93	MMJ-357	43360	0,550	150	
94	MMJ-357	36560	0,393	150		95	MMJ-357	33700	0,360	150		96	VXA-914	39180	0,411	150	

LIITE III. Terminaalilta vietyjen kuormien tiedot (auma 2)

Energia raportti 1.1.2016 - 22.2.2016, Porsiala

Pvm	OTE	Aine	Lähtövarasto	Auma	Kosteus (%)	Qnet_d (MJ/kg)	Qnet_d (MWh/t)	Qnet_ar (MJ/kg)	Tilavuus (m ³)	Netto (kg)	Energia (MWh)
15.1.2016 9:40	7622276991	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		44,9	18,62	5,17	9,16	90	27450	69,87
15.1.2016 9:40	7622276991	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2	2	44,9	18,62	5,17	9,16	50	13500	34,36
15.1.2016 11:33	7622277015	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2	2	47	18,62	5,17	8,72	90	23000	55,71
15.1.2016 11:33	7622277015	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2	2	47	18,62	5,17	8,72	50	13500	32,7
15.1.2016 13:11	7622277030	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		42,4	18,62	5,17	9,69	140	36300	97,7
18.1.2016 9:02	7622277237	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		44,6	18,62	5,17	9,23	130	33150	84,96
18.1.2016 10:51	7622277250	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		49,1	18,62	5,17	8,28	130	36800	84,62
18.1.2016 12:55	7622277261	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		45,9	18,62	5,17	8,95	130	38400	95,49
18.1.2016 15:07	7622277275	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		49,8	18,62	5,17	8,13	130	37300	84,24
19.1.2016 11:26	7622277380	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		48,6	18,62	5,17	8,38	130	37600	87,56
19.1.2016 12:59	7622277390	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		41,1	18,62	5,17	9,96	90	25900	71,68
19.1.2016 12:59	7622277390	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		41,1	18,62	5,17	9,96	40	10800	29,89
20.1.2016 9:17	7622277505	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		45,3	18,62	5,17	9,08	50	11500	29
20.1.2016 13:57	7622277537	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		44,3	18,62	5,17	9,29	130	32750	84,51
20.1.2016 15:28	7622277554	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		46,1	18,62	5,17	8,91	130	35800	88,61
21.1.2016 8:36	7622277640	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		41,2	18,62	5,17	9,94	130	35100	96,93
21.1.2016 10:25	7622277654	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		43,9	18,62	5,17	9,37	50	12950	33,72
21.1.2016 10:25	7622277654	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		43,9	18,62	5,17	9,37	90	24300	63,27
21.1.2016 12:24	7622277673	Rankahake	Metsä-Sairilja/Auma 2		45,9	18,62	5,17	8,95	130	37500	93,25
Yhteensä				Lkm: 19	45,4	18,62	5,17	9,06	1910	523600	1318,07
Yhteensä				Lkm: 19	45,4	18,62	5,17	9,06	1910	523600	1318,07

Raportti yht.

Kuormien lukumäärä	19	45,4	18,62	5,17	9,06	1910	523600	1318,07
Netto (kg)						1910	523600	1318,07
Energia (MWh)						1910	523600	1318,07

LIITE IV. Terminaalilta vietyjen kuormien tiedot (auma 3)

Energia raportti 1.1.2016 - 22.2.2016, Porsiala

Pvm	OTE	Aine	Lähtövarasto	Auma	Kosteus (%)	Qnet_d (MJ/kg)	Qnet_d (MWh/t)	Qnet_ar (MJ/kg)	Tilavuus (m ³)	Netto (kg)	Energia (MWh)
15.1.2016 10:11	7622276999	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3	3	54,4	18,57	5,16	7,14	90	30600	60,68
15.1.2016 10:11	7622276999	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3	3	54,4	18,57	5,16	7,14	40	10800	21,42
15.1.2016 12:01	0	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3	3	55,6	18,57	5,16	6,89	90	29000	55,48
15.1.2016 12:01	0	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3	3	55,6	18,57	5,16	6,89	40	10800	20,66
15.1.2016 13:49	7622277035	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		58,1	18,57	5,16	6,36	130	43250	76,43
18.1.2016 9:39	7622277241	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		56,2	18,57	5,16	6,76	90	27750	52,11
18.1.2016 9:39	7622277241	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		56,2	18,57	5,16	6,76	40	10800	20,28
18.1.2016 12:00	7622277256	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		48,1	18,57	5,16	8,46	90	29050	68,29
18.1.2016 12:00	7622277256	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		48,1	18,57	5,16	8,46	40	10800	25,39
18.1.2016 13:30	7622277266	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		53	18,57	5,16	7,43	130	40050	82,69
19.1.2016 8:34	7622277356	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		53,8	18,57	5,16	7,27	45	15350	30,98
19.1.2016 11:02	7622277373	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		52	18,57	5,16	7,64	130	39200	83,23
19.1.2016 12:37	7622277386	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		43,7	18,57	5,16	9,39	130	39600	103,26
19.1.2016 14:40	7622277404	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		46,2	18,57	5,16	8,86	130	38300	94,28
20.1.2016 14:13	7622277541	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		51,3	18,57	5,16	7,79	40	14750	31,92
20.1.2016 14:13	7622277541	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		51,3	18,57	5,16	7,79	90	24300	52,58
20.1.2016 15:48	7622277556	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		46,6	18,57	5,16	8,78	90	27150	66,2
20.1.2016 15:48	7622277556	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		46,6	18,57	5,16	8,78	40	10800	26,33
21.1.2016 9:03	7622277642	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		51,2	18,57	5,16	7,81	130	38450	83,43
21.1.2016 10:52	7622277656	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		53,4	18,57	5,16	7,35	130	37550	76,66
21.1.2016 13:09	7622277679	Rankahake	Metsä-Sairila/Auma 3		39,6	18,57	5,16	10,25	130	35050	99,78
Yhteensä				Lkm: 21	50,9	18,57	5,16	7,87	1865	563400	1232,08
Yhteensä				Lkm: 21	50,9	18,57	5,16	7,87	1865	563400	1232,08

Raportti yht.

Kuormien lukumäärä	Kosteus (%)	Qnet_d (MJ/kg)	Qnet_d (MWh/t)	Qnet_ar (MJ/kg)	Tilavuus (m ³)	Netto (kg)	Energia (MWh)
21	50,9	18,57	5,16	7,87	1865	563400	1232,08