

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Tuula Tirronen

Hakkuutähdehakkeen aumavarastoinnissa tapahtuvat muutokset ja niiden vaikutukset hakkeen kuiva-ainetappioon

Opinnäytetyö
Helmikuu 2016



OPINNÄYTETYÖ
Helmikuu 2016
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
(013) 260 600

Tekijä(t)
Tuula Tirronen

Nimeke
Hakkuutähdehakkeessa tapahtuvat muutokset aumavarastoinnissa ja niiden vaikutukset kuiva-ainetappioon

Toimeksiantaja
Karelia-amk ja BEST-hanke

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin hakkuutähdehakkeen aumavarastoinnissa tapahtuvia muutoksia eri mittausmenetelmien avulla. Tulosten perusteella arvioitiin muutosten vaikutuksia hakkeen kuiva-ainetappioihin. Toimeksiantajan tavoitteena oli saada tulosten perusteella luotua selitysmalli ajallisille kuiva-ainetappioille yhdistämällä tiedot lämpötila- ja säädäntään.

Tutkimuksessa perustettiin varastokoeasetelma Tohmajärven Onkamoon kesällä 2015. Hakevaraston sisältä mitattiin koko tutkimusajan lämpötila useasta eri pisteestä. Lisäksi hakkeesta otettiin polttoainenäytteitä 5 kuukauden ajan, jolloin näytteistä tutkittiin hakkeen kosteus ja lämpöarvo.

Tutkimuksen avulla saatiin tietoa hakekasan lämpötilan sekä kosteuden muutoksesta. Kasan lämpötila nousi varastoinnin alussa korkealle mutta jo kuukauden kuluttua lämpötila lähti laskuun. Lämpötilan lasku oli seuraus hakekasan kuivumisesta, joka oli liian alhainen mikrobien toiminnalle. Lämpöarvossa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia tutkimuksen aikana.

Havaintojen perusteella hakekasan kuiva-ainetappio ei ole merkittävä. Koko varastointiajan kuiva-ainetappiot saadaan selville, kunhan hakekasa puretaan ja punnitaan. Kasan kuivumisen seurauksena selitysmallin laatiminen epäonnistui.

Kieli
suomi

Sivuja 51
Liitteet 3
Liitesivumäärä 3

Asiasanat
hake, varastointi, kuiva-aine, tappiot



THESIS
February 2016
Degree Programme in
Environmental Technology

Karjalankatu 3
FI 80200 JOENSUU FINLAND
013 260 600

Author(s)
Tuula Tirronen

Title
Changes in Logging Residue Chip in Stacks and Their Impact on Dry Matter Loss

Commissioned by
Karelia UAS and BEST project

Abstract

By using different measuring techniques, the changes, which happened when the logging residues chips were stored in stack, were studied in this thesis. According to the results of the changes the dry matter losses were evaluated. Commissioner's target was to create an explanation model for the temporal dry matter losses, and connect it to the temperature and weather data.

Storage trial was performed in Tohmajärvi in summer 2015. The temperature was measured inside the stack in different spots. The fuel samples were also taken almost every month during five months, and the moisture and the heating value of the chips were studied.

The study produced information about the changes in temperature and the moisture content. Temperature rose high at the beginning but after a month the temperature declined. The falling temperature was a consequence of the drying chip stack which was too low for the microbes. There were no changes in the heating value.

According to the perceptions, the dry matter losses are not significant. Dry matter losses during the whole storage period will be found when the stack is dismantled and chips are weighted. Because of the drying stack, the explanation model failed.

Language
Finnish

Pages 51
Appendices 3
Pages of Appendices 3

Keywords

chip, storage, dry-matter, losses

Sisällys

1	Johdanto	6
2	Keskeiset käsitteet ja hakkuutähdehakkeen varastointi	8
2.1	Keskeiset käsitteet	8
2.2	Hakkuutähdehakkeen tuotanto	10
2.3	Kuiva-aineen ja kuiva-ainetappion määritysmenetelmiä	12
2.4	Mikrobien aiheuttama puun kuiva-aineen hajoaminen	15
2.4.1	Kosteuden vaikutus mikrobitoimintaan	18
2.4.2	Palakoon ja kylmävarastoinnin vaikutus säilyvyyteen	19
2.5	Varastoinnin vaikutus lämpöarvoon	20
2.6	Muut tutkimukset	23
3	Tutkimuksen tarkoitus ja tavoitteet	26
4	Tutkimuksen toteuttaminen	28
4.1	Tutkimusasetelman rakentaminen	28
4.2	Lämpötilan mittaus	31
4.3	Kosteuden määrittäminen	32
4.4	Lämpöarvon määrittäminen pommikalorimetrillä	32
4.5	Arviointi kuiva-ainetappioista ja energiahäviöstä	35
5	Tulokset	36
5.1	Lämpötila	36
5.2	Kosteus	38
5.3	Lämpöarvo ja arvio kuiva-ainetappioista	39
5.4	Kasassa tapahtuneet muutokset	39
6	Pohdinta	41
6.1	Tulosten tarkastelu	41
6.2	Luotettavuus ja virhearviointi	42
6.3	Toimenpidesuosituksien ja jatkotutkimusaiheet	43
6.4	Oppimisprosessi ja kiitokset	44
	Lähteet	45

Kuvat

- Kuva 1. Varastointialue ennen hakkeen kasausta
- Kuva 2. Terminaalivaraston puoleiset näytteenottoputket oikealta vasemmalle: 1/1...2/3
- Kuva 3. Tien puoleiset näytteenottoputket oikealta vasemmalle: 1/5, 2/5...1/8
- Kuvat 4 ja 5. Hakkeen värin vaihtuminen vihreästä ruskeaan tapahtui kuukauden aikana.

Kuviot

- Kuvio 1. Biojätteen kompostointiprosessi
- Kuvio 2. Hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta
- Kuvio 3. Pisteiden lämpötilat laskettuna viikkokeskiarvoilla.
- Kuvio 4. Kasan keskimääräinen kosteus kuukausittain

Taulukot

- Taulukko 1. Puun eri osien teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa (MJ/kg) puolajieittain
- Taulukko 2. Muiden tutkimusten kuiva-ainetappioita kuukaudessa

Lyhenteet

ha	hehtaari
J	joule
MJ	megajoule
MWh	megawattitunti
t	tonni

1 Johdanto

Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa on lisääntynyt voimakkaasti 2000-luvulla. Lämpö- ja voimalaitokset käyttivät kiinteitä puupolttoaineita yhteensä 18,7 milj. m³ vuonna 2014. Metsähakkeen osuus tästä oli yhteensä 7,5 milj. m³, josta pienpuusta tehdyn hakkeen osuus oli 3,7 milj. m³ ja hakkuutähdehakkeen osuus oli 2,6 milj. m³. Kannoista tehtyä haketta käytettiin 0,8 milj. m³. (Luonnonvarakeskus 2015.) Kiinteiden puupolttoaineiden kokonaiskulutuksen osuus on tällä hetkellä suurin, kun verrataan kaikkiin käytettäviin energianlähteisiin. Seuraavaksi eniten käytetään öljyä. (Suomen virallinen tilasto 2015.)

EU on asettanut ns. ilmasto- ja energiapakettiin kuuluvalla RES-direktiivillään (2009/28/EY) Suomen lisäämään uusiutuvan energian osuutta kokonaiskulutuksesta 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Puusta tuotetun energian osuus lisäyksestä olisi yli puolet (Maa- ja metsätalousministeriö 2011, 18.) Sipilän hallitus asetti uudeksi tavoitteeksi 2020-luvulle, että uusiutuvien energialähteiden osuus olisi yli 50 % kaikista energianlähteistä. Tällä pyritään päästöttömään energian käyttöön sekä energian omavaraisuuden lisäämiseen. (Valtioneuvosto 2015, 23.) Ilmastotavoitteisiin pyritään myös energiatehokkuudella ja cleantech-ratkaisuilla eli käyttämällä tuotteita, palveluja ja prosesseja, jotka edistävät luonnonvarojen kestävästä käytöstä ja vähentävät päästöjä ympäristöön (Parlamentaarinen energia- ja ilmastokomitea 2014, 9).

Puun hiilidioksidipäästöt ovat poltettaessa suuremmat kuin monella fossiilisella polttoaineella (Tilastokeskus 2015). Poliittisen päätöksenteon seurauksena uusiutuvan puubiomassan päästökertoimeksi on asetettu nolla päästökaupassa ja kasvihuonekaasuinventaariossa, joten puubiomassan energiakäytön lisääminen on keskeinen keino hillitä kasvihuonekaasupäästöjä teoreettisesti. Jotta nollakertoimen käyttö on perusteltua, tulee puolueettoman tutkimustyön avulla varmistaa puun energiakäytön todelliset ympäristövaikutukset ja kasvihuonekaasupäästöt tuotannon eri vaiheissa.

Pitkäaikaisessa hakkeen varastoinnissa haitallisia ympäristövaikutuksia ovat mikrobien aiheuttamat kuiva-ainetappiot, joista seuraa kasvihuonekaasuja ja energiahäviötä. Jotta ympäristövaikutukset ja taloudelliset tappiot saataisiin pidettyä mahdollisimman pienenä, tulee selvittää, mitkä ovat hakkeen varastoinnin todelliset kuiva-ainetappiot ja millä ajalla ne muodostuvat.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan suurten lämpö- ja voimalaitosten polttoaineeksi tarkoitetun hakkuutähdehakkeen aumavarastointia kenttätyön avulla. Hakevaraston tutkimista varten perustettiin heinäkuussa 2015 Tohmajärven Onkamoon hakkuutähdehakeauma. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selittää varastointikokeen avulla hakkuutähdehakekasassa tapahtuvia muutoksia, sekä arvioida muutosten vaikutusta hakkeen kuiva-ainetappioihin ja energiasisältöön. Tutkimuksen aikana hakeaumasta mitattiin lämpötilaa termoelementtien avulla. Kuukauden välein aumasta otettiin polttoainenäytteitä, joista määriteltiin kosteus ja lämpöarvo. Tämä opinnäytetyö käsittelee tuloksia, joita on kerätty ensimmäiseltä viideltä kuukaudelta. Koko tutkimuksen tarkoitus on selvittää todelliset ja ajalliset kuiva-ainetappiot hakevarastossa ja yhdistää ne lämpötila- ja säädataan, jotta saadaan selitysmalli luotua.

Työn toimeksiantaja, Karelia-ammattikorkeakoulu, on mukana Tekesin rahoittamassa BEST-tulevaisuuden kestävä bioenergiaratkaisut tutkimusohjelmassa. Tutkimusohjelman tavoitteena on luoda uutta kestävä bioenergialiiketoimintaa niin Suomeen kuin maailmalle. Ohjelmassa on mukana metsä-, energia-, teknologia-, ja konsulttialan yrityksiä julkiselta ja yksityiseltä sektorilta. Ohjelma on alkanut vuonna 2013 ja kestää vuoden 2016 loppuun. (Cleen 2015). Karelia-ammattikorkeakoulu on mukana vuoden 2015 alusta vuoden 2016 loppuun (Karelia-ammattikorkeakoulu 2015). Opinnäytetyön toimeksiantajan edustajana toimii Simo Paukkunen ja opinnäytetyön ohjaajana Esa Etelätalo.

2 Keskeiset käsitteet ja hakkuutähdehakkeen varastointi

2.1 Keskeiset käsitteet

Ainespuu on mitta- ja laatuvaatimukset täyttävää puutavaraa, joka kelpaa jatkojalostukseen saha-, vaneri- ja selluteollisuudelle.

Hakkeen laadusta puhuttaessa tarkoitetaan tässä tutkimuksessa alhaista kosteutta, alhaista tuhkapitoisuutta, puhtautta, tasaista palakokoa ja korkeaa lämpöarvoa, näistä tärkeämpänä kosteutta.

Hakkeen varastoinnilla tai varastolla tarkoitetaan kattamatonta ulkovarastoa, jossa hake on kasattu aumoihin.

Kosteus on puun sisältämän veden prosentuaalinen osuus kokonaismassasta, joka määritellään tässä työssä:
$$\text{Kosteus \%} = \frac{\text{märkäpaino} - \text{kuivapaino}}{\text{märkäpaino}} \times 100$$

(Alakangas 2000, 12).

Metsähake on yleisnimitys metsästä saatavalle ja energiaksi päätyvälle hakkeelle riippumatta sen haketuspaikasta. Puuaines haketetaan koneellisesti pieniksi paloiksi lämpö- ja voimalaitosten tarpeita varten. Hakkuutähteestä hakeuttua haketta sanotaan hakkuutähdehakkeeksi. Hakkuusta jäävät latvat, oksat ja raivauspuu ovat hakkuutähdettä. Kannoista tai juurista tehtyä haketta ei laskea hakkuutähdehakkeeksi. Muita metsähakkeita ovat karsitusta puusta tehtyä rankahaketta tai kokopuusta tehtyä kokopuuhaketta. (Alakangas 2000, 49.)

Palakoko on polttoaineen palan koon suuruus, joka määritetään eri seulakokoja käytettäessä. Palakoko vaihtelee purumaisesta neulas- ja kuoriaineksesta puukapuloihin ja oksanpätkiin. Palakokoon vaikuttavat haketettava raaka-aine, hakuri, hakkurin terien kunto sekä käytettävä seulakoko. Yleisin hakkuutähdehakkeen palakoko on 13 - 30 mm. (Alakangas 2000, 54 - 55.) Käytettävien seulojen silmien läpimitat (\emptyset) ovat 3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm, 63 mm ja 100 mm (Puupolttoaineiden laatuohje 2013, 46).

Puun kuiva-aine on se osa puusta, jossa ei ole vettä. Puun kuiva-aineen keskimääräinen hiilipitoisuus on havupuilla 51 % ja lehtipuilla 49 %. Vetypitoisuus on vastaavasti 6,2 % ja 6,0 %. (Kollmann 1951, Hakkilan 2003 mukaan, 25.) Hiili, happi ja vety muodostavat puun rakennusaineiksi selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä sekä erilaisia uuteaineita. Männyssä, kuusessa ja koivussa selluloosan osuus puun kuiva-aineesta on noin 40–50 %. Hemiselluloosan osuus lehtipuilla on suurempi (30–40 %) kuin havupuilla (25–30 %), kun taas havupuiden ligniinin osuus (24–30 %) on lehtipuita suurempi (16–25 %). Pieni osuus (> 5 %) koostuu erilaisista muista aineista, kuten uuteaineista ja epäorgaanisista yhdisteistä. (Jääskeläinen & Sundqvist 2007, 16; Hakkila 2003, 25; Alakangas 2000, 35.)

Ravinneaineita puut tarvitsevat kasvuun ja elämiseen, kuten typpeä ja mineraaliaineista kalsiumia, kaliumia, fosforia ja magnesiumia. Lisäksi puuhun siirtyä maasta imeytyvien ravinneaineiden mukana raskasmetalleja. Nämä alkuaineet eivät ole lämpöä tuottavia aineksia, eivätkä ne typpeä lukuun ottamatta pala vaan muodostavat tuhkaa. (Hakkila 2003, 24–28.)

Tuhkapitoisuus vaihtelee puun eri osissa. Esimerkiksi kuusen rungossa ja oksien puuaineksessa on tuhkaa 0,30–0,63 % kuivamassasta. Kuorta sisältävän oksamassan tuhkapitoisuus on 1,88 % ja kuoren 3 %. Neulasten tuhkapitoisuus on tätäkin suuremmat. (Nurmi 1997, 16.) Kuusen latvusmassan puhtaan tuhkan määrä on 9 kg/m³ ilman neulasia ja neulasien kanssa 13 kg/m³. (Hakkila 1997, 9.) Poltossa tuhkaa syntyy kuitenkin enemmän, koska puupolttoaineen mukana on hiekkaa ja muita epäpuhtauksia. Joukkoon jää usein myös palamatonta hiiltä. (Hakkila 2003, 28.)

Uuteaineet ovat orgaanisia yhdisteitä, jotka vaikuttavat puun väriin, tuoksuun sekä kestävyteen. Puulajin, puuyksilön ja yksilön välisissä osissa (runko, oksat, juuret ja kuori) uuteainepitoisuus vaihtelee hyvin paljon. Uuteaine tyyppejä on monenlaisia. Mm. havupuun pihka ja **terpeenit**, jotka ovat haihtuvia yhdisteitä ja antavat havupuulle sen ominaisen tuoksun. (Jääskeläinen ym. 2007, 98–104.)

2.2 Hakkuutähdehakkeen tuotanto

Hakkuutähdettä saadaan ainespuun jälkeisiltä uudistusaloilta, jonka yhteydessä voidaan kerätä kohteesta riippuen järeää lahopuuta, ainespuun korjuun yhteydessä jääneitä pöllejä, järeitä latvuksia ja tuulenskaatoja (Siitonen 2012, 59).

Kuusikko on yleisin hakkuutähdekohde sen suuren latvusmassan johdosta. Mäntyyn ja koivuun verrattuna hakkuutähdekertymä kasvaa suuremmaksi ja on kannattavampaa kerätä. Eteläisessä Suomessa kuusikon hakkuutähdekertymä on runsaat 100 m³/ha ja männiköissä noin 50 m³/ha tavanomaisella 200–300 m³/ha ainespuukertymällä. Uudistuskypsässä kuusikossa hakkuutähteen kuivamassasta 30 % koostuu neulasmassasta ja oksien osuus on 60 % ja hukkarunkopuun 10 %. Hakkuutähteen kokonaiskertymästä saadaan talteen 50–80 %, riippuen tuotantotekniikasta ja toiminnan ajoituksesta. (Vesisenaho 2003, 39–40.)

Hakkuutähde voidaan kerätä palstalta joko tuoreena tai kuivahtaneena. Kesäaikainen kuivattaminen tiputtaa neulasia, pieniä oksia ja hieman kuorta, jotka vähentävät hakkuutähteen kertymää (Alakangas 2000, 50). Talviaikana neulasten varisemista hakkuutähteestä ei tapahdu, mutta talviaikainen korjuu voi vähentää kertymää, mikäli jäiset oksat katkeilevat tai peittävä lumi on esteenä (Asikainen, Hämäläinen, Laitila & Ranta 2001, 20.) Hakkuutähdehakkeen laadun kannalta olisi ihanteellista antaa tähtöiden kuivua palstalla kesäjaksan loppuun, minkä jälkeen tähteet kuljetettaisiin välivarastoon odottamaan talvista haketusta. Syys- ja talvihakkuilta kerätyt tähteet eivät pääse kuivumaan kosteiden, lumisten ja jäisten olosuhteiden vuoksi, ja niiden energiatiheys¹ jää alhaiseksi. Laadun parantumisen lisäksi, kesäaikaista kuivaamista palstalla perustellaan maan ravinnepuutoksen ehkäisyllä, kun ravinnerikkaat neulaset jäävät palstalle. (Asikainen ym. 2001, 30; Fredriksson & Hakkila 1996, 20.) Vihreät neulaset saattavat aiheuttaa myös korroosiota polttoainekattiloihin suuren klooripitoisuuden vuoksi (Hakkila 2003, 28).

¹ Lämpösisältöä tilavuusyksikköä kohti kutsutaan polttoaineen energiatihedeksi (Alakangas 2000, 32).

Laki metsätuhojen torjunnasta (1087/2013) säättää ainespuuksi menevän kuusi- ja mäntypuun säilytyksen pituuden hakkuupaikalla ja välivarastossa. Tätä lakia ei muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta sovelleta energiapuupinoihin, jolloin tienvarsivarastoinnin enimmäispituutta ei ole säädelty. Tienvarsivarastointijakson pituus metsätähdehakkeella ennen kuljetusta vaihtelee parista viikosta yhteen vuoteen ja pitempäänkin. Hakkeen tuotantoketjusta riippuen haketus voidaan suorittaa palstalla, välivarastolla, haketerminaalissa tai käyttöpaikalla. Käyttöpaikkahaketuksessa materiaali tulee paikalle hakettamattomana, jolloin keruukohteen on kustannussyistä oltava lähellä. Kokonaisen hakkuutähteen tiiviys² on alhainen, jolloin on taloudellisempaa kuljettaa se haketetussa muodossa. (Asikainen, Hämäläinen, Laitila & Ranta 2001, 1 - 2.)

Haketuksen ajankohta olisi ihanteellista silloin, kun energiapuu on kuivimmillaan ja haketuskalustoa on helposti saatavilla. Tämä olisi luonnonkuivausjakson jälkehen kesällä. Tällöin hakkeelle ei ole lämpimistä olosuhteista riippuen suurta kysyntää ja haketettu hake joutuu todennäköisesti varastoon. Hakkeen kysyntä kasvaa talvella ja samalla saanti vaikeutuu. Hakekuljetusten ongelmana ovatkin niiden kausipiikit, toteavat Peltosen (2015) haastattelemat tutkijat Juha Laitila ja Jyrki Raitila. Kaluston kiireitä lisää myös ainespuun korjuun keskittyminen talvihakkuille. Lisäksi keliolosuhteet, kuten kelirikko tai kovat pakkaset, aiheuttavat ongelmia kaluston käytölle. Toisaalta taas pitenevät syksyt ja lämpimät alkutalvet vaikeuttavat raskaan ajoneuvon kulkemista pehmeässä maastossa. Puskurivarastot tuovat varmuutta ja pelivaraa lämpö- ja voimalaitoksille

Valmiin hakkeen varastointi voi tapahtua terminaalissa, josta hake toimitetaan alueen lämpö- ja voimalaitoksiin. Suurilla lämpö- ja voimalaitoksilla on myös omat valmiiden polttoaineiden varastot, jotta niiden saanti on turvattuna kaikissa olosuhteissa. Yleisesti polttoaine vaihtaa omistajaa lämpö- ja voimalaitoksen portilla, jonka yhteydessä polttoaineelle tehdään laadunmääritys³, jonka perusteella myös polttoaineesta maksettava hinta määräytyy. Jokaisella lämpö- ja

² Puun kiintotilavuus (m³) / puutavaran irto-tilavuudella (i-m³) (Alakangas 2000, 15).

³ Pakolliset laadunmääritykset ovat: alkuperä, kauppanimi, palakoko, kosteus ja tuhkapitoisuus. Vapaaehtoiset: Typpi, rikki, kloori, lämpöarvo, tiheys (kg/m³) ja tuhkansulamiskäyttäytyminen (SFS-EN ISO 17225-1 2014, 19-21).

voimalaitosyrittäjällä on omat polttoainelaatuvaatimukset, joista sovitaan toimittussopimusten laadinnan yhteydessä. (Impola & Tiihonen 2011, 5 – 21.)

Laadun määrittämisessä ja luokittelussa käytetään kiinteille biopolttoaineille luotuja ja eurooppalaisia standardeja, jotka ovat vahvistettu myös suomalaisiksi kansalliseksi standardiksi. Laatuohjeiden tavoitteena on luoda yksikäsitteiset ja selkeät luokitusperiaatteet, joiden avulla helpotetaan puupolttoainekauppaa. (SFS-EN ISO 17225-1 2014, v.)

2.3 Kuiva-aineen ja kuiva-ainetappion määrittäminen

Kuiva-ainetappiolla tarkoitetaan kuiva-aineen massan hävikkiä alkuperäisestä kuiva-aineen massasta. Kuiva-ainetappiot ilmoitetaan usein kokonaismassan prosentuaalisena häviönä koko varastointiajalle tai tiettyä ajanjaksoa kohden. Kuiva-ainetappioita voi tapahtua hakkeen tuotantoketjun jokaisessa vaiheessa, mutta tässä tutkimuksessa kuiva-ainetappioilla tarkoitetaan sitä hävikkiä mikä tapahtuu varastoinnissa kemiallisissa ja biokemiallisissa reaktioissa.

Kuiva-aineen määrä hakevarastossa voidaan määrittää punnitsemalla hakevarasto ja vähentämällä siitä kosteuden osuus. Määrää voidaan selvittää myös kuiva-tuoretiheyden tai irtotiheyden avulla, jolloin tulee tietää varaston tilavuus.

Puun kuiva-tuoretiheys (kg/m^3) osoittaa puun kuivamassan painoa tuoreessa tilassa mitattua tilavuutta kohti (Alakangas 2000, 14). Hakkeen tilavuus mitataan upotusmenetelmällä ja hakkeen kuivapaino punnitaan kuivauksen jälkeen (ks. Lindblad & Verkasalo 2001, 420). Keskimääräinen kuiva-tuoretiheys viheraineettomalla kuusihakkuutähteellä on 465 kg/m^3 ja viheraineen sisältävällä 425 kg/m^3 . (Hakkila 1985, Alakankaan 2000 mukaan, 54). Kuiva-tuoretiheyteen ei juurikaan voida vaikuttaa (Tekes 2004, 70).

Hakevaraston irtotiheys saapumistilassa (BDar) saadaan jakamalla hakekuorman massa sen tilavuudella (Alakangas 2000, 32). Tilavuuden määrittämisessä käytetään yleensä irtotilavuusmittoja, koska hakkeen kiintotilavuuden määrittä-

minen on vaikeaa. Kiintotilavuus saadaan laskettua irtotilavuusmitoista muunto-
kertoimen eli tiiviiden avulla. Hakkeen muuntolukuna käytetään yleisesti 0,40
(Tekes 2004, 70), eli yksi kiintokuutiometri haketta (m^3) vastaa 2,5 irtokuu-
tiometriä haketta ($i\text{-}m^3$). Hakkeen irtokuutiometrin kuiva-aine sisältö vaihtelee
huomattavasti. Siihen vaikuttavat puun kuivatuore-tiheys ja tiiviys. Tärkeimmät
tekijät, jotka vaikuttavat tiivyyteen, ovat palakoko, palan muoto, puulaji, oksat,
kosteus⁴, vuodenaika, kuormausmenetelmä ja painuminen (Hakkila 2003, 30).
Irtotiheys (BD) saadaan hakekuorman purkamisen jälkeen määritettyä sopivan
tilavalla astialla, kuten saavilla (ks. Puupolttoaineen laatuohje 2013, 52). Kuiva-
aineen irtotiheys lasketaan kaavalla 2.3.

$$BD_{ar} = (m_2 - m_1)/V$$

$$BD_d = BD_{ar} \times (100 - M_{ar})/100 \quad (2.3)$$

jossa

BD_{ar}	=	irtotiheys saapumistilassa, $kg/i\text{-}m^3$
BD_d	=	kuiva-aineen irtotiheys, $kg/i\text{-}m^3$
m_1	=	tyhjän säiliön paino, kg
m_2	=	täytetyn säiliön paino, kg
V	=	mittaussäiliön nettotilavuus, m^3
M_{ar}	=	kosteus saapumistilassa, %

(Puupolttoaineen laatuohje 2013).

Kuiva-ainetappioita on tutkittu myös käyttämällä verkkopusseja, jotka on täytetty
varastoitavalla materiaalilla. Ennen pussin sijoittamista kasan sisälle, sisältö
punnitaan ja tehdään kosteusmääritys, joka toistetaan, kun pussi otetaan ka-
sasta pois. (Eriksson 2011; Shield, Whittaker & Yates 2014.) Pussien käyttö ei
ole aivan ongelmaton. Pussien rei'istä voi tulla lisää haketta tai pussit häviää
kasaan (Anheller 2009).

Hakkeen kuiva-ainetappioita on pyritty selvittämään myös ajallisesti. Afzal, Be-
dane, Mahmood & Sokhansanj (2010) asettivat yhteen hake kasaan kolme

⁴ Puuaineksen ominaisuuksiin kuuluu, veden absorboiminen, jolloin se turpoaa. Vastaavasti
desorptiossa puuaines kutistuu. Tämä ominaisuus vaikuttaa merkittävästi myös puun tiivyyteen.
(Jääskeläinen ym. 2007, 120–123)

verkkonäytepussia, jotka jokainen painoivat yhden kilon. Yksi pusseista poistettiin kasasta kolmen kuukauden välein vuoden ajan. Näin he saivat arvioitua yhden vuosineljänneksen aikana tapahtuneen massahävikin. Nurmi (1990) käytti auman lohkomismenetelmää, eli jakoi auman osiin, jotka purettiin tietyn ajanjakson välein, ja loppuauma jäi vielä tutkimuskohteeksi. Puretuista lohkoista määritettiin kuiva-tuoretiheys, jonka perusteella arvioitiin syntyneet kuiva-ainetappiot.

Ajanko, Fagernäs, Impola & Rautiainen (2004) sekä Bartlett, Garstang, Poulter & Weekes (2002), tutkivat hakekasassa tapahtuvia kemiallisia ja rakenteellisia muutoksia suhteutettuna aikaan. Molemmat käyttivät näytteenotossa kauha-kuormaajan avulla tehtyjä aumaleikkauksia, joista näytteet otettiin tietyn ajanjakson välein. Ajankon ym. (2002) varastointikokeessa kosteus lisääntyi aumaleikkauksissa huomattavasti.

Näytteiden ottaminen puretusta ja varastoidusta kasasta vaatii näytteenottajalta huolellisuutta. Hakkuutähdehake koostuu erilaisista puun osista ja erikokoisista paloista. Tästä epähomogeenisuudesta johtuen, puupolttoaineesta on vaikeaa ottaa yksittäisnäytettä hyvän näytteenoton periaatteen mukaan, jossa jokaisella yksittäisellä osalla on yhtäläinen todennäköisyys tulla mukaan lopulliseen näytteeseen. Polttoaine on usein lajittunut kuorman purkauksessa. Hienoin aines jää kasan keskelle ja yläosaan, ja isommat palakoot kasan alareunoille. Tästä syystä näytteenotto tulee tapahtua myös korkeussuunnassa. Pohjalta, pinnalta ja reunoilta näytettä ei tule ottaa. (Puupolttoaineen laatuohje 2013, 29 -32.) Epähomogeenisuudesta, hakkeen lajittumisesta ja irtotilavuuteen vaikuttavista tekijöistä johtuen, voi kuiva-ainetappioiden selvittäminen johtaa virheellisiin kuiva-ainetappio tuloksiin.

Puun sisältämän kosteuden selvittäminen on kuiva-aineen määrittämisessä tärkeä vaihe. Määrittämisessä käytetään usein hakkeen kuivausmenetelmää 101 - 105 asteisessa uunissa 16 - 24 h ajan. Menetelmän heikkoutena on sen hitaus, ja puusta haihtuu kuivauksen aikana merkittävästi erilaisia orgaanisia yhdisteitä, jotka vaikuttaa kuiva-aineen määrään vähentävästi (Jirjis 1995, 186–187; Hartley & Marchant 1995, 5). Uunimäärittelyn on perusteltu olevan tarkempi kuin

käytössä olevat nopeat online-mittarit (Hartley & Marchant 1995, 5). Metsätehon (2012) tekemässä selvityksessä online-mittareiden tarkkuus todettiin kuitenkin hyväksi uunikuivauksen avulla verrattuna. Ongelmana menetelmissä on kuitenkin jäisen hakkeen mittaus (Holopainen, Lindblad & Melkas 2012, 18.) Muita menetelmiä kosteuden määrittämiseen on tarkaksi arvioitu Karl Fischer titraus (Hartley & Marchant 1995, 5) ja magneettisen resonanssin mittaukseen perustuva laite (Järvinen 2013).

Kuiva-aineessa tapahtuvia muutoksia ja niistä seuraavia kuiva-ainetappioita voidaan tutkia myös erilaisin laboratoriokokein⁵. Esimerkiksi hemiselluloosan, selluloosan ja ligniinin suhteissa tapahtuvia muutoksia voidaan määrittää, jos tiedetään varastoinnin alussa oleva tilanne. Oletuksena on, että selluloosien osuus vähenee ja ligniinin suhteellinen osuus lisääntyy varastoinnissa. Myös tuhkapitoisuuden tulisi kasvaa, kun puubiomassa hajoaa. Ongelmaksi voi muodostua, kuten edellisissäkin menetelmissä, näytteenoton onnistuminen ja tarpeeksi edustavien näytteiden saanti. Esimerkiksi hakkuutähdehakkeen neulasten variseminen varastoinnin aikana voi vaikuttaa tuloksiin niin, että tuhkapitoisuus laskee, jos ensimmäisissä näytteissä on ollut neulaset vielä mukana.

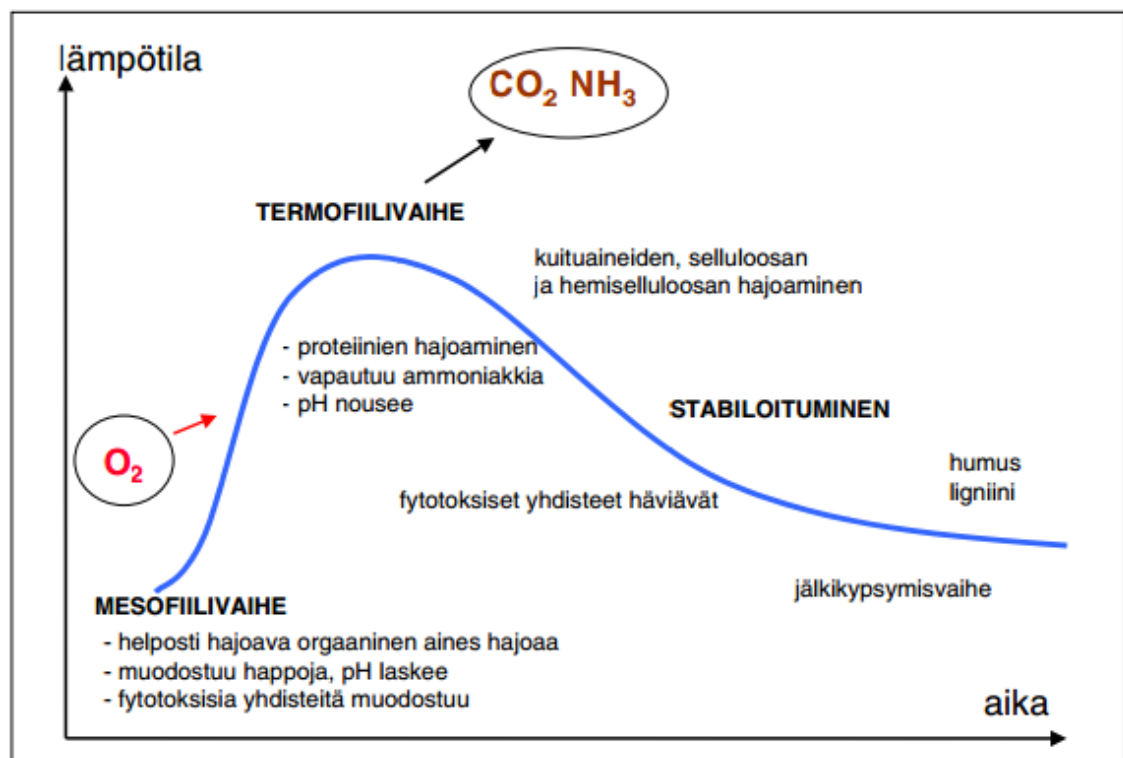
2.4 Mikrobin aiheuttama puun kuiva-aineen hajoaminen

Puuainesta voivat hajottaa erilaiset hyönteiset, sienet ja bakteerit. Puu on lisäksi alttiina eri ympäristötekijöille, kuten auringonvalolle, kosteudelle, lämpötilalle ja ilmansaasteille, jotka aiheuttavat kemiallista tuhoutumista. (Jääskeläinen & Sundqvist 2007, 112 - 119.) Pääasiassa puun hajoamisessa on kyse biologisesta prosessista, jossa toisenvaraiset eliöt saavat elintoimintoihinsa energiaa syömällä kuollutta kasvia tai kuolleita eläimiä. Hajoamisen seurauksena massaa häviää. (Kellomäki 2005, 252–255.)

Puubiomassan vilkkaampi hajoamisprosessi alkaa, kun materiaali haketetaan. Haketuksen aikana tylyppysolukkoon varastoituneet tärkkelys ja rasvat vapautuvat. (Eriksson 2011, 8.) Hajoamisprosessin alussa on tarjolla paljon ravinteita,

⁵ CHN-analyysi, IPC-analyysit, NIR-testit

joita mikrobit voivat hyödyntää energianlähteenään. Hakekasan kompostoitumisen kuvaamiseen voidaan osittain soveltaa biojätteen hajoamisprosessia (kuvio 1). Ensiksi syödään helposti hajoavat liukoiset yhdisteet ja lopuksi jäljelle jäävät vaikeammin hajotettavat yhdisteet, kuten selluloosa ja ligniini (Itävaara, Kapanen, Venelampi, Vikman & Vuorinen 2006, 7.) Hakkeen hajoaminen eroaa lähtömateriaalin lisäksi biojätteen kompostoitumisprosessista sen hitauden vuoksi. Alussa, jos mukana ovat typpipitoiset neulaset, on hajoaminen nopeaa, mutta pelkän hakkeen hajoaminen on hidasta, koska mukana ei ole juurikaan typpeä. Neulasten C/N⁶ suhde on 45/50, ja keskimäärin hakkeella se on 100/0 (Wiher- saari 2005, 444–447). Toimivan kompostin C/N suhde on 25–30/1, ja usein kompostiin joudutaan lisäämään hiilipitoista ainetta, ettei typen osuus kasva liian suureksi.



Kuvio 1. Biojätteen kompostointiprosessi (Itävaara ym. 2006, 7)

Yleisimmät mikro-organismit, joita varastoista löytyvät ovat sädesienet (aktinomykeettibakteerit), homeet ja sienet. Sienet ja homeet luovat itiöitä ja rihmastoa. Hakevarastoa käsiteltäessä itiöt voivat mennä hengitysteihin, aiheutta-

⁶ hiili/typpi

en allergiaa ja hengitystieongelmia. (NT Method 2008, 10.) Homeiden aiheuttamat kuiva-ainetappiot eivät ole merkityksellisiä niiden pinnallisen kasvuston takia. Lahottajat, kuten ruskolahottajat, vahingoittavat puuta syvemmältä hajottamalla selluloosaa ja hemiselluloosaa. Valkolahottajat hajottavat ensisijaisesti ligniiniä (Jirjis 1986, 18).

Alun vilkkaan mikrobitoiminnan seurauksena mikrobien elinympäristön lämpötila nousee ja ravinnon saannin vaikeutuessa toiminta ja niiden tuottama lämpöenergia vähenee, mikä näkyy lämpötilan laskuna. (Itävaara ym. 2006, 7.) Kasan lämpötila voi nousta varastoinnin alussa jopa 70 asteeseen (Ajanko ym. 2004). Jos hakekasan lämpötila nousee yli 60 asteeseen, on se usein liian korkea biologiselle toiminnalle. Lämpötilaa voi kuitenkin nostattaa edelleen erilaiset fyysiset ja kemialliset prosessit, jotka osaltaan aiheuttavat kuiva-ainetappioita. (NT Method 2008, 8.) Voimakkainta lämpeneminen on kasan keskellä ja yläosassa, jossa lämpötila myös pysyy korkeampana kuin pohjakerroksissa. (Heiskanen, Raitila & Virkkunen 2014, 27). Terpeenien haihtumisen on todettu olevan voimakkainta silloin, kun kasan yläpuolisen ilman lämpötila nousee kemiallisten ja biokemiallisten reaktioiden johdosta (Rupar & Sanati 2004).

Nopean hajoamisprosessin vuoksi voi syntyä merkitsevästi kasvihuonekaasuja, kuten hiilidioksidia, metaania ja typen oksideja. Esiintyvät kaasut riippuvat kassassa vallitsevista happiolosuhteista ja kasan lämpötilasta. Wihersaari (2005) arvioi metaania syntyvän silloin, kun kasan lämpötila on ulkoista lämpötilaa suurempi ja dityppioksidia muodostuvan silloin, kun kasan lämpötila laskee ja hajoamisprosessi hidastuu. Eräässä laboratoriokokeessa havaittiin, että syntyvät kaasut ovat vahvasti riippuvaisia polttoaineen fyysisistä ominaisuuksista, kuten palakoosta, partikkelin tiheydestä ja huokoisuudesta, jotka määrittävät kaasumäärän varastoon (Kuang, Lim, Melin, Sokhansanj Tumuluru, Xiaotao & Yazdanpanah 2015).

Laava-hankkeen varastointitutkimuksessa ei esiintynyt merkittäviä metaanipäästöjä. Hiilidioksidipäästöjä mitattiin havupuu-hakkuutähdekasasta yhteensä 3 900 kg eli 55 g hiilidioksidia kuiva-ainekilogrammaa kohden seitsemän kuukauden varastoinnin aikana. (Juntunen 2013, 38.) Varastoinnista aiheutui

melko suuret kuiva-ainetappiot, joten päästöjen oletettiin olevan isompia (Hirvonen, Juntunen & Paukkunen 2013, 18). VTT:n Puut 29 hankkeessa tultiin johtopäätökseen, ettei kuiva-ainetappioita voida käyttää syntyvien päästöjen laskeamiseen. Hajoamisprosessissa voi syntyä olosuhteista riippuen myös erittäin happamia ja orgaanisesti kuormittavia valumavesiä. (Ajanko ym. 2004, 162–163.)

2.4.1 Kosteuden vaikutus mikrobitoimintaan

Tuoreen hakkuutähteen kosteus on yli 50 %, ja kesäaikaisella kuivauksella hakkuutähteen kosteus voi laskea alle 30 %. Syksyllä ja talvella jo kuivahtaneenkin hakkuutähdekasan kosteus nousee ilmankosteuden ja sateiden vuoksi. (Nurmi 1999, 9.) Hakkuutähteestä tehdyn hakkeen kosteus vaihtelee olosuhteista riippuen 25–65 %:iin. Kosteuteen vaikuttaa mm. varastointi ja vuodenaika. (Alakangas 2000, 55.)

Kosteus on välttämätön bakteerien ja sienten aineenvaihdunnalle, joten se heikentää hakevaraston säilyvyyttä lisäämällä kemiallisten ja biokemiallisten reaktioiden määrää, varsinkin jos mukana on ravinnerikasta biomassaa tai viherainesta. Neulasissa ja kuorissa on runkoa enemmän liukoisia ravinteita ja suurempi typpipitoisuus, mikä tarjoaa paremman kasvualustan mikrobeille. Mikrobitoiminta lakkaa vain, jos kosteus alenee alle 25 %:n, joka on poikkeuksellista suurimittaisessa hakkeen tuotannossa ja käytössä. (Tekes 2004, 68; NT Method 2008, 8.) Aktiivisessa mikrobitoiminnassa muodostuu runsaan hiilidioksidin lisäksi vettä, joka lisää hakekasan alkuperäistä kosteutta entisestään varastointin aikana (Nurmi 1997, 14). Muita mikrobitoimintaa hidastavia tekijöitä ovat lämpötilan ja kosteuden lisäksi pH. Aerobiset mikrobit tarvitsevat lisäksi hapellisia ja anaerobiset mikrobit hapettomia olosuhteita.

Varastointitutkimuksissa on havaittu, että kasojen keskiosa on kuivempaa ja kosteus kerääntyy kasan pintaan ja varsinkin sen yläosaan (Nurmi 1990, 9; Juntunen 2013, 37; Afzal, Bedane, Mahmood & Sokhansanj 2010; Bartlett, Garsang, Poulter & Weekes 2002). Mikrobitoiminnasta aiheutuva lämpötilan nousu

saa aikaan kaasujen kiertoa, ja sen mukana siirtyy hakkeessa jo olevaa kosteutta ja hajottamistoiminnasta syntyvää kosteutta auman yläosiin. Osa kosteudesta kondensoituu kasan pinnalla olevaan hakkeeseen, ja osa haihtuu ilmaan, mikäli sille ei ole esteitä. (Eriksson 2011, 8; Nurmi 1990, 9.) Haikosen (2005) tekemässä hakkeen ja sahojen sivutuotteiden aumakokeessa erittäin kostean pintakerroksen paksuus oli 30–60 cm, 60–90 cm:n syvyydessä kasa oli hieman kostunut tulokosteuteen nähden ja 90 cm:n syvyydestä kasa oli kuivunut tai oli ainakin tulokosteudessa. Kosteusmääritykset tehtiin 2 kuukauden varastointijakson jälkeen.

Isossa hakeaumassa ilmankosteus, sademäärä ja tuuli vaikuttavat lähinnä ison kasan päällyskerrosten kosteuteen ja säilyvyyteen (Eriksson 2011, 33–34.) Hakkeen pitkäaikaisessa säilytyksessä kasojen peittämisen hyödyistä on vaihtelevia tutkimustuloksia (mm. Afzal, Bedane, Mahmood & Sokhansanj 2010; vrt. Heiskanen, Raitila & Virkkunen 2014). Raitilan mukaan pienten kasojen kostuminen on todennäköisempää kuin suurissa (> 100 m³) kasoissa, joissa hakkeen kosteus säilyy suunnilleen samana kuin alkukosteus (Peltonen 2015). Suurten kasojen peittäminen ei ole tarpeellista ja taloudellista (Leinonen 2015; Nurmi 1990). Kasojen muotoilu korkeiksi, jyrkiksi ja pinnaltaan tasaisiksi eliminoi saateen vaikutuksen (Leinonen 2015). Kasojen tekeminen liian suureksi ei ole kuitenkaan suositeltavaa, etteivät kasan lämpeneminen ja kuiva-ainetappiot kasva liian suuriksi (Nurmi 1990).

2.4.2 Palakoon ja kylmävarastoinnin vaikutus säilyvyyteen

Pienempi palakoko heikentää hakkeen säilyvyyttä. Suurempi palakoko kuivuesaan säilyttää alhaisemman kosteuspitoisuuden kuin vastaavasti pienempi palakoko. (Nurmi 1987; Jirjis 1995.) Lämpöä tuottava biologinen aktiivisuus tapahtuu hakkeen pinnalla, ja mitä pienempi palakoko on, sitä suurempi on sen pinta-alan suhde tilavuuteen, mikä johtaa korkeampaan biologiseen aktiivisuuteen ja korkeampiin lämpötiloihin (Wihersaari 2005, 446). Syttymistä ja palamista käsittelevässä tutkimuksessa on myös huomattu, että partikkelikoon pieneneminen lisää polttoaineen ja ympäröivän kaasun välistä lämmön- ja aineensiirtopinta-alaa, jos polttoaineen koko massa tai tilavuus pidetään vakiona ja näin partikke-

leiden lämmön- ja aineensiirtonopeus kasvaa (Horttanainen 1999, 24–28). Pienemmät partikkelit asettuvat tiiviimmin, eikä kasaan muodostu ilmakehänavia, joista lämpö voisi siirtyä pois (NT Method 2008, 8). Tiivistyminen voi estää myös kosteuden haihtumista, mikä lisää mikrobitoimintaa ja joka edesauttaa lämmönmuodostumista. Kasaan voi syntyä kuumia pisteitä, jotka voivat syttyä itsestään palamaan. Tämä on todennäköisempää, jos kasa on tiivistynyt epätaisisesti, esimerkiksi kuormauksen yhteydessä. (Nurmi 1990; Jirjis 2009.) Onnistuneessa tiivistämisessä voidaan kuitenkin vähentää mikrobitoimintaa, jolloin saadaan kasan lämpötilaa laskettua (Nurmi 1997).

Pakkasjaksolla haketettu ja perustettu hakeaman säilyvyys on parempi, kuin vastaavasti lämpimään vuodenaikaan. Lämpötila ei tällöin ole riittävä biologisen hajotuksen alkamiselle, vaikka ilman suhteellinen kosteus voi talvella olla pitkiäkin aikoja yli 85 % (Puuinfo 2015). Eri tutkimuksissa on havaittu, että lämpötilan kasvu, kuiva-ainetappiot ja kosteuden lisääntyminen voivat jäädä merkitsevästi pienemmäksi pakkasella kuin lämpimämmän vuoden aikaan perustettu hakevarasto (Nilsson & Thörnqvist 2013; Juntunen 2013; vrt. Ajanko, Fagernäs, Impola & Rautiainen 2004.) Talvihaketuksessa tulisi huomioida, etteivät lumi ja jää pääse hakkeen sekaan sitä kastelemaan (Leinonen 2015).

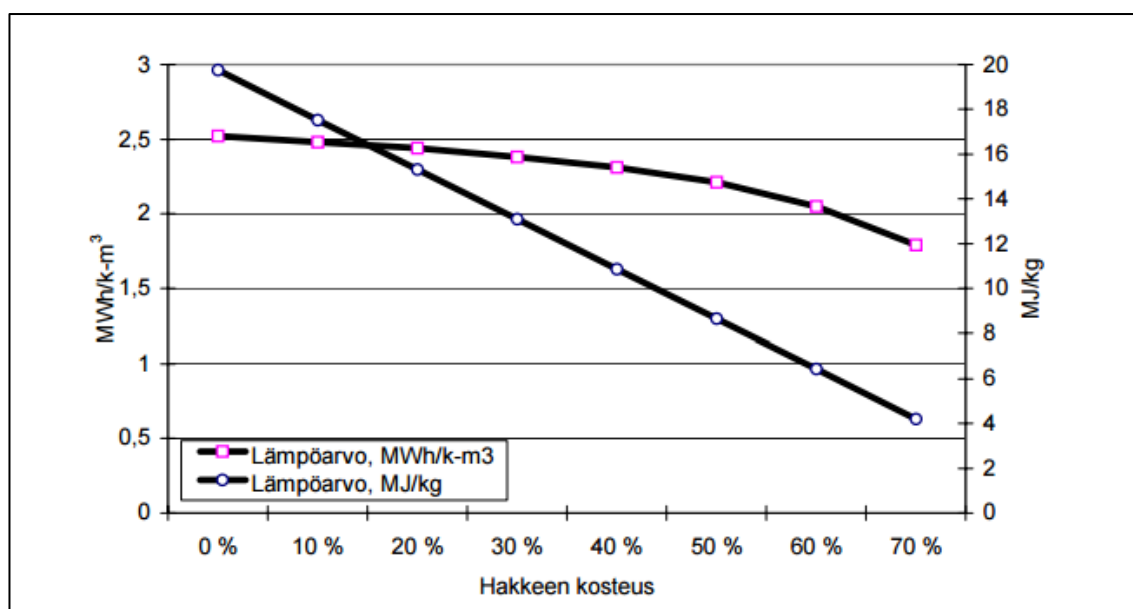
Polttoaineeksi menevää puuainesta tulisi säilyttää mahdollisimman pitkään hakettamattomana. Pidempiaikainen säilytys tulisi toteuttaa rankoina, hakkuutähdeksäsoissa tai vaikkapa risupaaleissa ja hakettaa vasta lähempänä polttamisajankohtaa (Jirjis 1995, 185). Kokonaisessa puussa happipitoisuus on niin alhainen, ettei soluhengitystä tapahdu, minkä vuoksi puun hajoaminen on hitaampaa (Eriksson 2011, 8).

2.5 Varastoinnin vaikutus lämpöarvoon

Täydellisessä palamisessa syntyvä lämmön määrä polttoaineen massaa kohti ilmaistaan lämpöarvolla. Lämpöarvon (Q) mittasuure on joko MJ/kg tai MWh/kg. Kalorimetrinen eli ns. ylempi lämpöarvo määritetään pommikalorimetrillä. Se on lämpömäärä, jossa otetaan palamisessa syntyvän lämmön määrän lisäksi huo-

mioon veden höyrystymiseen tarvittava höyrystymisenergia. Kalorimetrisestä lämpöarvosta johdetaan muunnoskaavalla alempi lämpöarvo eli ns. tehollinen lämpöarvo, jolla polttoaineen lämpöarvo Suomessa yleensä ilmoitetaan. Siinä huomioidaan polttoaineen vedyn palamisessa syntyvä vesihöyryn lämpömäärä ja sen haihduttamiseen kuluva lämpömäärä. Tämä vesihöyry oletetaan häipyvän savukaasujen mukana ilmaan. Kaikista alin lämpöarvo on tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa eli saapumistilassa. Siinä lämpöarvosta poistetaan se energia, joka kuluu polttoaineessa olevan ja palamisessa syntyvän kosteuden poistamiseen. (Alakangas 2000, 27 - 28.)

Lämpöarvo riippuu puun kemiallisesta koostumuksesta, ensisijaisesti hiilen ja vedyn suhteellisista osuuksista. Kuivaa massaa kohti laskettu lämpöarvo pysyy varastoinnin aikana lähes muuttumattomana, koska hiilen ja vedyn suhteelliset osuudet pysyvät samana. (Nurmi 1999, 20.) Varastoinnissa lisääntyvä kosteus vaikuttaa puun lämpöarvoon kostean puun massaa kohti, mutta kuivan puun massayksikköä kohti suhteellisen vähän (kuvio 2). Jos tehollinen lämpöarvo ilmoitetaan puun kosteaa massaa kohti, lämpöarvo heikkenee suoraviivaisesti kosteuden lisääntyessä. (Kärkkäinen 2003, 237.)



Kuvio 2. Hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/k-m³ tai MJ/kg) (Alakangas 2000, 53)

Lämpöarvon vaihtelu johtuu lähinnä puulajin ja puun eri osien kemiallisesta ja rakenteellisista vaihteluista (taulukko 1). Hajotustoiminnan seurauksena ligniinin

suhteellinen osuus kasvaa, jolloin lämpöarvo painoyksikköä kohden voi kasvaa, mutta kokonaisenergia vähenee kokonaismassan pienentyessä. Rasvojen, hartsien ja ligniinin lämpöarvo ovat selluloosaan verrattuna korkeammat niiden suuren hiilimäärän johdosta (Kärkkäinen 2003, 236; Nurmi 1999, 20). Havuissa ja varsinkin niiden oksissa on paljon ligniiniä. Ligniinissä on hiiltä 64,3 % ja vetyä 5,9 %. Vastaavasti selluloosassa on hiiltä 44,4 % ja vetyä 6,2 %. (Hakkila 2003, 24.) Uuteaineet sisältävät myös paljon hiiltä ja vetyä. (Alakangas & Alanen 2005, 26.) Uuteaineita on erityisesti puun kuoressa. Esimerkiksi uuteaineiden osuus kuoren kuiva-aineesta on 30–40 %, kun se runkokuualla on alle 5 %. (Jääskeläinen ym. 2007, 110.)

Taulukko 1. Puun eri osien teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa (MJ/kg) puulajeittain (Nurmi 1999, Puuenergian, 2003 mukaan, 34)

Puulaji (MJ/kg)	Rungon puuaine	Rungon kuori	Koko runko	Latvus	Lehdet	Kokopuu	Kannot
Mänty	19,3	19,5					
Pienpuu Varttunut puu			19,3 19,6	20,2 20,1	21,0 21,0	19,5 19,6	22,4
Kuusi	19,1	18,8					
Pienpuu Varttunut puu			19,0 19,2	19,8 19,4	19,2 19,2	19,3 19,2	19,2
Hieskoivu	18,6	22,8					
Pienpuu Varttunut puu			19,2 19,1	19,9 19,3	19,8 19,4	19,3 19,1	18,6
Rauduskoivu	18,6	22,5					
Pienpuu Varttunut puu			19,2 19,0	19,5 19,6	19,7 19,8	19,2 19,1	18,5
Harmaaleppä	18,7	21,6					
Pienpuu Varttunut puu			19,0 19,1	20,0 19,7	20,6 20,5	19,2 19,2	19,3
Haapa, pienpuu	18,7	18,6					

2.6 Muut tutkimukset

Nilssonin ja Thörnqvistin (2013) Ruotsin Växjössä tekemässä hakkuutähdehakkeen varastointikokeessa tutkittiin kahta erilaista 1 000 m³:n kokoista kasaa kolmen kuukauden aikana. Toinen kasoista oli haketettu talviaikaan ja sen toimituskosteus oli 41,5 % ja kolmannen kuukauden jälkeen kosteus oli 42,8 %. Kuiva-ainepaino oli kokeen alussa 213 tn ja kokeen loputtua 201 tn, jolloin kuiva-ainetappioksi saatiin 5,6 %. Tehollisessa lämpöarvossa ei tapahtunut merkittävää muutosta varastoinnin aikana.

Lämpöarvo oli kokeen alussa 17,3 MJ/kg ja kokeen lopussa 17,2 MJ/kg. Energiahäviöksi saatiin kuiva-ainepainon muutoksen ja lämpöarvon avulla 6,1 %. Kesäaikaan haketetun hakkeen toimituskosteus oli 32,2 % ja kolmen kuukauden varastoinnin jälkeen kosteus nousi 44,6 %:iin. Kuiva-ainepaino oli varastoinnin alussa 207 tn ja lopussa 186 tn, eli kuiva-ainetappioksi tuli 10,1 % ja energiahäviöksi 14,1 %. Tehollinen lämpöarvo oli alussa 17,9 MJ/kg (1031 MWh) ja lopussa 17,1 MJ/kg (881 MWh). Materiaalia oli varastoitu välivarastossa 9 kk – 2 vuotta ennen hakettamista, jolloin siinä on tapahtunut materiaalitappioita.

Laava-hankkeessa Joensuussa perustettiin kaksi varastointikasaa. Toisessa varastointiin lehtipuurankahaketta ja toisessa havupuuhakkuutähdehaketta. Kasat perustettiin pakkasten aikaan maaliskuussa ja koe purettiin syyskuun puolella välissä, jolloin koe kesti yhteensä puolisen vuotta. Lämpötila pysytteli molemmissa kasoissa toukokuun puolelle nollan alapuolella, minkä jälkeen lämpötilat alkoivat nousta. Havupuuhakkuutähdekasaa saavutti kokeen loppuun mennessä lähes 70 astetta ja lehtipuuhakekasasta mitattiin yli 60 asteen lämpötiloja. Havupuuhakkuutähdehakkeen toimituskosteus oli 51 % ja kokeen lopussa kosteus oli 61 %.

Lehtipuuhakekasaa toimituskosteus oli 45 % ja kokeen lopussa kosteus oli noussut 13 %:iin. Hakkeet kuljetettiin kokeen alussa ja lopussa vaa'an kautta, jonka perusteella saatiin laskettua varaston aikana tapahtunut massahävikki. Kuiva-ainepaino oli kokeen alussa havupuulla 72 tn ja lopussa 58 tn. Eli puolen

vuoden aikana kuiva-ainetappiota oli tullut 20 %. Lämpöarvot olivat alussa 19,9 MJ/kg ja lopussa 19,7 MJ/kg. Energiahäviötä kasassa oli tullut 28 % (349 MWh - 251 MWh). Lehtipuuhahekekan kuiva-ainepaino oli alussa 88 tn ja lopussa 70 t, eli puolen vuoden aikana kuiva-ainetappio oli myös 20 %. Energiahäviö oli 28 % (422 MWh – 303 MWh). Kuukausittaisen kuiva-ainetappion arvioitiin olevan 3,2 %, jos tarkastelussa on koko varastointijakso. Tutkimuksessa arvioitiin, ettei varastointitappioita syntynyt, kun kasa oli jäässä, jolloin kuiva-ainetappioksi tulisi neljän kuukauden ajalta yli 5 %/kk. (Hirvonen ym. 2013).

Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa varastoitiin koivusta tehtyä haketta kolmessa eri kasassa yhden vuoden ajan. Kasojen korkeus oli 3 metriä, leveyttä tai pituutta ei ilmoitettu. Yksi kasoista oli peitetty hengittävällä suojapeitteellä, yksi kasoista oli kasattu muovin päälle ja yksi oli peittämätön. Kokeissa seurattiin polttoaineessa tapahtuvia muutoksia kuten lämpötilaa, kosteussuhdetta⁷ ja CNS-pitoisuutta⁸, tuhkan sisältöä ja lämpöarvoa. Näytteitä otettiin kolmen kuukauden välein. Kosteussuhteessa tapahtui merkittävä muutos ensimmäisen ja toisen näytteenoton välisenä aikana. Suojapeitteen alla olevan kasan kosteussuhde tipahti 51 %:sta 26 %:in, ja kokeen päättyessä kosteussuhde oli 16,5 %. Muovin päällä olevan kasan kosteussuhde nousi alun 60 %:sta 146 %:in. Peittämättömän kasan kosteussuhde nousi alun 59 %:sta 160 %:in kokeen loppuun mennessä. Lämpöarvoissa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia missään varastointimuodossa. Tuhkapitoisuus oli varastoinnin alussa hakekasoissa 0,43 % / kuiva-ainetta. Kokeen lopussa tuhkapitoisuus oli noussut kasoissa 1,06 %, 1,09 % 1,12 %. Suurin nousu tapahtui muovin päällä olevassa kasassa ja pienin muutos oli hengittävän suojapeitteen alla. Kuiva-ainetappiot mitattiin kasaan sijoitettavilla yhden kilon näytepussien painonmuutoksilla kokeen alussa ja lopussa. Jokaiseen kasaan sijoitettiin kolme pussia, jotka otettiin pois kolmen kuukauden välein ja punnittiin. Pussia ei laitettu takaisin. Peitetyn kasan kuiva-ainetappiot olivat 8 % (0,6 %/kk), muovin päällä olevan 22 % (1,8 %/kk) ja peittämättömän kasan 27 % (2,3 %/kk). Hiilipitoisuus oli keskimäärin kaikissa kasoissa kokeen alussa 43,6 %, typen 0,6 % ja rikin 0,0 %. Hiilipitoisuus nousi kaikissa kasoissa yli 50 %:iin. Typen määrä laski 0,1 % ja rikin määrä nousi

⁷ Kosteussuhde U (Dry – basis ($d - \%$)): $\frac{m_{vesi}}{m_{ka puu}}$ (Hajautetut biojalostamot 2014).

⁸ Hiili-, typpi- ja rikkipitoisuus

keskimäärin 0,21 %:iin. Lämpötila ei noussut kasoissa koko varastoinnin aikana yli 30 asteeseen. (Afzal, Bedane, Mahmood & Sokhansanj, 2010)

Eriksson (2011) suoritti kuusi viikkoa (loka-marraskuu) kestävän varastointikokeen kierrätetylle jätetuuhakkeelle sekä kokopuuhakkeelle (sis. mänty, kuusi ja koivu) Ruotsissa Vattenfallin polttoainekentällä Nyköpingissä. Kokopuuhaketta oli keskimäärin 400–500 m³ haketta. Kasaan sijoitettiin 5 litran näytepusseja, jotka analysoitiin 1, 2, 3 ja 6 viikon välein. Kuiva-ainetappioiksi saatiin yhteensä kuuden viikon aika 1,7 %, ja suurimmat kuiva-ainetappiot koettiin kahden ensimmäisen viikon aikana (1,5 %).

Englannissa tutkittiin kahta hakekasaa, joiden materiaalina oli ranka- ja kokopuuta. Kasat sijaitsivat eri paikoissa, ja toisen kasan varastointiaika oli 7 kk ja toisen 4 kk. Lämpötilat nousivat molemmissa kasoissa yli 60 asteen, minkä jälkeen lämpötilat laskivat 40 asteen kautta 20 - 30 asteeseen. 7 kuukauden kasan lähtökosteus oli 54 % laskien kokeen loppuun mennessä 31 %:iin. Kuiva-ainetappiot olivat yhteensä 18 %. 4 kuukauden kasan toimituskosteus oli 50 % ja kosteus laski 29 %:iin. Kuiva-ainetappioiksi saatiin näytepusseja menetelmällä 19 %. 4 kuukauden kasa punnittiin myös alussa ja lopussa, ja kuiva-ainetappioiksi saatiin 21 %. (Shield, Whittaker & Yates 2014.)

Nurmi (1990) tutki hieskoivusta tehtyä hakekasaa Sodankylässä. Koivut olivat olleet vuoden tienvarsivarastossa ennen haketusta. Hake varastoitiin kahdessa 3 000 i-m³ aumassa. Aumat jaettiin yhteensä kahdeksaan tutkimuslohkoon. Osa lohkoista peitettiin ja osan alle levitettiin muovialusta. Osa aumasta oli ilman alustaa ja ilman peittoa. Varastointiajat olivat 5,5, 14 ja 18 kuukautta. Puuaineen alkukosteus oli molemmissa kasoissa hieman yli 30 %. Kosteus ja lämpötilat vaihtelivat eri lohkoissa hyvin paljon. Yhtenäistä oli kosteimpien vyöhykkeiden kerääntyminen kasan pinnoille ja varsinkin sen yläosiin. Keskiosat olivat kaikissa muissa paitsi yhdessä lohossa kuivuneet alkukosteudesta. Kuiva-ainetappiot määriteltiin kuivatuoretiheyden avulla. Alussa mitatut kuivatuoretiheydet olivat ensimmäisessä kasassa keskiarvolla 442,25 kg/m³ ja toisessa kasassa 447,91 kg/m³. 5,5 kuukauden varastointikasoissa kuiva-ainetappiot olivat +3,9 ja -1,2 %. 14 kuukauden kasassa -4,3 % ja -2,0 %. 18 kuukauden

kasassa kuiva-ainetappiot olivat välillä 6,0–10,3 %. Kuiva-aineen lisääntyminen eräässä lohossa johtui ilmeisesti näytteiden väärästä käsittelystä.

3 Tutkimuksen tarkoitus ja tavoitteet

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kenttä- ja laboratoriotyön avulla selittää Best-hankkeen hakkuutähdehakekasassa tapahtuvia muutoksia sekä arvioida muutosten vaikutusta hakkeen kuiva-ainetappioihin ja energiasisältöön. Aiempien tutkimusten perusteella hakekasassa tapahtuvia muutoksia ovat mm. mikrobien ja kemiallisten reaktioiden aiheuttama kasan sisäisen lämpötilan nousu, kosteuden lisääntyminen/vähentyminen sekä kuiva-ainetappiot ja energiahäviöt. Näihin perustuen hakekasan lämpötilaa mitattiin, kosteus määritettiin ja lämpöarvon avulla selvitettiin hakekasan energiasisältö.

Toimeksiantaja käyttää saatuja tuloksia omiin tutkimuksiin. Yhtenä tavoitteena toimeksiantajalla on luoda selitysmalli, jossa ajalliset kuiva-ainetappiot yhdistetään lämpötila- ja säädataan. Todelliset kuiva-ainetappiot saadaan selville yleensä vasta polttoon mennessä, jolloin energiahäviö ja taloudellinen tappio ovat jo tapahtuneet. Aiemmissä tutkimuksissa kuiva-ainetappiot ovat perustuneet joko osan kasan tuloksiin tai koko tutkimusajan tuloksiin, jossa ajalliset kuiva-ainetappiot perustuvat vain arvioon. On tärkeää osata arvioida etukäteen, mitkä tulevat kuiva-ainetappiot ovat, jotta polttoaine osataan ohjata ajoissa polttoon.

Tutkimuksen todelliset kuiva-ainetappiot selvitetään ligniinissä, selluloosassa ja hemiselluloosassa tapahtuvissa muutoksissa Luonnonvarakeskuksen (Luken) laboratoriossa Vantaalla. Tulokset eivät ehdi tähän opinnäytetyöhön, minkä vuoksi tässä työssä kuiva-ainetappioiden arviointi perustuu tässä tutkimuksessa saatuihin tuloksiin, kuten lämpötilaan ja kosteuteen. Arvioinnissa käytetään lisäksi muiden tutkimusten kuiva-ainetappioiden tuloksia. Best-hankkeeseen kuuluvat muut tahot analysoivat hakekasasta omien mittausmenetelmien avulla

lämpötilaa ja kosteutta sekä kasassa eläviä mikrobeja, joiden tutkimustuloksia ei ole käytettävissä tässä opinnäytetyössä.

Saadut tulokset tilastoitiin Excel-taulukko-ohjelman avulla. Saatujen tulosten ymmärtämiseksi käytettiin apuna muiden tekemiä tutkimuksia sekä asiantuntijoiden laatimia kirjoituksia energiahakkeen ominaisuuksista, joista koostuu tämän opinnäytetyön tietoperusta. Digitaalisia julkaisuja ja tieteellisiä artikkeleita saatiin Internetin tieteellisten julkaisujen tietokannoista, joihin on ollut vapaa pääsy. Osa kirjallisuudesta, kuten kokoomateokset ja vanhemmat tieteelliset julkaisut lainattiin kirjastosta. Saatuja tuloksia verrattiin muiden käyttämiin tutkimusmenetelmiin ja tuloksiin. Koko hakevaraston tutkimuksen on tarkoitus kestää noin 18 kuukauden ajan, mutta tämä opinnäytetyö käsittelee tuloksia vain 5 kuukauden ajalta (1.7.–1.12.2015).

4 Tutkimuksen toteuttaminen

4.1 Tutkimusasetelman rakentaminen

Tutkimuksen kohteena oleva hakekasa perustettiin Tohmajärven Onkamoon, jossa toimii Kuljetus Swahne Oy:n omistama saha- ja energiahakkeen terminaalivearasto. Terminaalivearasto sijaitsee entisen metsätaimitarhan alueella. Hakevarasto kasattiin varastoalueen reunalle, ja alue rajoittui läheiseen tiehen (kuva 1). Varastoalueen pohja oli kovettunutta soraa. Alue oli avoin ja sinne pääsi tuulemaan hyvin.



Kuva 1. Varastointialue ennen hakkeen kasausta

Stora Enson kuormatietojen perusteella haketettava materiaali koostui 2. - 9.6.2015 hakattujen kuusikoiden hakkuutähteistä. Hakkuutähteiden annettiin kuivahtaa palstalla, ja 29. - 30.6.2015 ne haketettiin ja kuljetettiin suoraan terminaalivearastolle. Hakekuormat kävivät ennen purkua vaa'alla ja kuormien paino oli yhteensä 357 900 kg ja yhteistilavuus oli 1 454 i-m³. Irtotiheydeksi saatiin

kuorman painolla ja tilavuudella $246,1 \text{ kg/i-m}^3$. Saavimenetelmällä irtotiheydeksi saatiin 243 kg/i-m^3 . Toimituskosteudeksi määritettiin 36 %.

Hakekasa muotoiltiin puskutraktorilla noin 5 metrin korkuiseksi ja 15 metriä pitkäksi. Leveyttä kasalla oli noin 4 metriä⁹. Kasaan asetettiin kolmen metrin syvyyteen 15 kpl näytteenottoputkia. Putket olivat 110 mm:n halkaisijaltaan olevia viemäriputkia muhvilla ja niiden päässä oli tiiviit tulpat, ettei kasan normaali tilanne häiriinny mahdollisen tuuletuksen kautta. Putkien materiaali oli polypropeenaa, joka kestää hyvin kuumuutta. Putket saatiin työnnettyä kasaan samaan aikaan työntämällä ja kairaamalla haketta putken kautta pois. Kaira oli varustettu jatkovarrella, jonka päässä oli adapteri poraa varten. Työntämisen avuksi jatkovarreen asetettiin levy, joka näkyy kuvasta 2.

Putket asetettiin ympäri kasaa kahteen eri korkeuteen. Kasan pohjoinen pääty jätettiin käsittelemättä, sinne asetetun induktiosilmukan takia. Kaikki putket saatiin paikoilleen 3.7.2015. Putket numeroitiin kerroksen ja järjestysnumeron mukaan. Ensimmäisen kerroksen ensimmäinen putki oli 1/1 ja toinen putki 1/2 jne. Toisen kerroksen ensimmäinen putki oli 2/1 ja toinen putki 2/2 jne. Järjestysnumerointi aloitettiin terminaalivearaston puolelta kasan pohjoispäädystä. Terminaalivearaston puoleiset putket olivat 1/1 - 1/3 ja 2/1 - 2/3. 1/4 ja 2/4 sijaitsivat kasan eteläpäädystä ja loput putket 1/5 - 1/8 ja 2/5 - 2/7 sijaitsivat hakekasan tienpuoleisella puolella (kuvat 2 ja 3).

Ensimmäiseen kerrokseen tuli kahdeksan putkea noin metrin korkeuteen. Toisen kerroksen seitsemän putkea asennettiin noin kahden metrin korkeuteen. Asennettaessa putkia, putket eivät menneet kohtisuoraan kasaan vaan nousivat viistosti ylöspäin, eli näytteenotto pää sijaitsee korkeammalla kuin ulkona oleva putkenpää. Putkien väli oli noin kolme metriä. Putkien asennuskorkeuksilla pyrittiin huomioimaan kasan painuminen, etteivät putken päät tule missään vaiheessa liian lähelle kasan yläosaa tai pintaa. Näytteenotossa käytettiin apuna samaa jatkovarrellista kairaa, jota käytettiin putkien asettamista varten. Näytteenotto onnistui hyvin. Joulukuun näytteenotosta jäi yhdestä putkesta näyte

⁹ Perustuu täysin arvioihin, ei mitattuun tietoon.

saamatta. Putken pää oli ilmeisesti painunut, jolloin kaira ei mahtunut putken reiästä ottamaan näytettä.

Näytteenotto suoritettiin kerran kuussa heinä-joulukuun aikana, lukuun ottamatta marraskuuta. Jokaisesta putkesta otettiin näyteastian (3,5 l) verran haketta. Näyteastiat olivat lasisia ja kuumuutta kestäviä, joissa oli ilmatiiviit kannet kuljetusta varten. Näyteastiat puuttuivat ensimmäisessä näytteenotossa, jolloin hakkeet laitettiin ilmatiiviisiin pusseihin ja siirrettiin laboratoriossa uuninkestäviin astioihin. Näytteet punnittiin ja kuivattiin Karelia-ammattikorkeakoulun Sirkkalan laboratorion kiertoilmauunissa. Kuivatusta näytteistä määriteltiin pommikalorimetrillä lämpöarvo Fortumin lämpö- ja voimalaitoksen laboratoriossa Joensuun liksenvaarassa.



Kuva 2. Terminaalivaraston puoleiset näytteenottoputket oikealta vasemmalle: 1/1...2/3



Kuva 3. Tien puoleiset näytteenottoputket oikealta vasemmalle: 1/5, 2/5...1/8

4.2 Lämpötilan mittaus

Lämpötilojen mittaus suoritettiin käyttämällä termoelementtejä, joiden tiedot kerättiin minuutin välein Squirrel SQ2020 -merkkiseen lämpötilaloggeriin. Loggerin tiedot käytiin purkamassa 1-2 viikon välein kannettavaan tietokoneeseen tiedonsiirtokaapelin avulla. Lämpötilaloggeri sijaitsi terminaalivaraston puolella suurin piirtein kasan keskivaiheilla. Loggeri suojattiin katoksella ja lukittiin ulkoisia uhkia varten, kuten auringonpaisteelta ja ilkeillä tekijöiltä.

Aluksi lämpötiloja suunniteltiin mitattavan myös langattomasti, jossa tiedot olisivat välittyneet reaaliajassa tukiaseman kautta verkkopalveluun, jolloin lämpötilojen muutoksiin olisi voinut reagoida välittömästi. Nämä langattomat mittarit eivät lähettäneet kasasta lainkaan mittaustuloksia, jolloin päädyttiin käyttämään pelkästään termoelementtejä. Termoelementit asetettiin jokaisen näytteenottoputken päähän kolmen metrin syvyyteen ja yksi termoelementeistä mittasi ulkoista lämpötilaa loggerin läheisyydessä. Näytteenoton aikana elementit otettiin kasasta varovasti pois, eikä lämpötiloja silloin mitattu.

Heinäkuun alussa paikoilleen saatiin neljä termoelementtiä ja 21.7. kaikki termoelementit olivat paikoillaan mittaamassa lämpötilaa. Pääosin lämpötilojen mittaus onnistui moitteettomasti. Syyskuun alussa kaksi elementtiä eivät mitanneet lämpötilaa, ja lokakuun loppupuolella kahdesta elementistä tuli virheellisiä

mittaustuloksia. Syynä oli elementtien päiden hapettuminen tai likaantuminen ja vika saatiin korjattua puhdistuksen jälkeen.

4.3 Kosteuden määrittäminen

Näytteet punnittiin vaa'alla, jonka mittaustarkkuus oli 0,01 g. Ensimmäiset eli pusseihin laitettujen näytteiden paino vaihteli 502 g - 886 g. Näytteiden paino vaihteli 128 g - 214 g. Punnituksen jälkeen, näytteet siirrettiin välittömästi uuniin, jonka lämpötila oli asetettu 105 °C:een. Unissa oli tuuletusventtiilit, jonka kautta kosteus pääsi esteettömästi pois. Kuivausajaksi muodostui näytteenottokerasta riippuen 17 - 19 tuntia, jonka jälkeen näyte yksi kerrallaan otettiin pois uunista ja punnittiin välittömästi. Näytteiden sisältämä kosteus laskettiin kaavalla 4.3.

$$M_{\text{ar}} = \frac{(m_1 - na) - (m_2 - na)}{(m_1 - na)} \times 100 \quad (4.3)$$

jossa

M_{ar}	=	märkäpainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%)
m_1	=	määrän näytteen kokonaismassa (g)
m_2	=	kuivatun näytteen kokonaismassa (g)
na	=	näyteastian paino (g) (Alakangas 2000).

4.4 Lämpöarvon määrittäminen pommikalorimetrillä

Kuivatut näytteet vietiin Fortumin liksenvaaran laboratorioon, jossa lämpöarvot määritettiin pommikalorimetrillä. Fortumilla oli käytössä Leco AC 600-merkkinen laite, jonka tulokset tallentuivat laitteeseen liitetyn tietokoneen Windows-pohjaiseen ohjelmistoon automaattisesti (Leco 2015). Pommikalorimetri on laite,

jolla mitataan lämpö määrää, joka vapautuu, kun veteen upotetussa pommissa vakiotilavuudessa oleva polttoaine poltetaan happi-ilmakehässä. Laite mittaa pommia ympäröivän veden lämpötilan muutoksia, joka nousee, kun polttoaineen poltossa syntyvä lämpöenergia siirtyy veteen. Tarkkuuden varmistamiseksi täytyy kalorimetri kalibroida ennen polttoaineanalyysia, eli käyttämällä näytettä, jonka tarkka lämpöarvo tiedetään. (Kolppanen, Kuokkanen & Kuokkanen 2011, 1 - 2.) Fortumilla käytettiin bentsoehappoa.

Pommikalorimetriä varten näytteet jauhettiin ensin 6 mm:n seulaa käyttäen ja lopuksi 0,5 mm:n seulaa käyttäen. Jauhetusta näytteestä otettiin noin 1,5 dl otos purkkiin, joka laitettiin kahdeksi tunniksi 105 °C:seen uuniin. Uunista näytteet siirrettiin välittömästi eksikaattoriin odottamaan. Näytteistä puristettiin 10 baarin paineella yksi kerrallaan 0,5 g:n pilleri, joka asetettiin upokkaaseen puuvillaisen sytytyslangan kera. Upokas laitettiin pommiin, jonka pohjalla oli 5 ml vettä, pommi täytettiin hapella ja asetettiin laitteeseen.

Näytteen poltossa syntyy hiilidioksidia ja vettä, sekä sivutuotteena typpihappoa, joka titrataan, jolloin saadaan tehtyä typpikorjaus lämpöarvon lukemaan. Menetelmänä käytetään happo-emästitrausta, jossa typpihappo on happo, jonka pitoisuutta määritetään ja natriumhydroksidi on emäs eli titrantti. Metyylioranssi on indikaattori, jolla saadaan titrauksen päätepistehavaintua, eli näytteen väri muuttuu punaisesta keltaiseksi. Näytteen hiilidioksidi poistetaan ennen titrausta lämmittämällä neste kiehumispisteeseen. (Keronen 2015.) Byretistä luetaan päätepisteen lukema, joka on millilitroja 0,05 ml:n tarkkuudella. Lukema kirjataan koneelle, josta ohjelma laskee typpikorjauksen jälkeen lämpöarvon automaattisesti. Typpikorjauksen kaava on liitteessä 1.

Ohjelma ilmoittaa arvon joulea/grammassa (J/g). Jokaisesta näytteestä otetaan rinnakkaisnäyte ja näytteiden välinen ero saa olla +/- 120 J/g. Tulos ilmoitetaan rinnakkaisnäytteiden keskiarvona. Pommikalorimetri ilmoittaa tuloksen kalorimetrisenä lämpöarvona, josta tehollinen lämpöarvo tulee laskea kaavalla 4.4.1

$$Q_{netd} = Q_{grad} - 0,02441 \times M \quad (4.4.1)$$

jossa

Q_{netd}	=	polttoaineen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg)
Q_{grd}	=	polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg)
0,02441	=	veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjaustekijä (+25 °C) (MJ/kg)
M	=	polttoaineen kuiva-aineen sisältämän vedyn palaessa syntynyt vesimäärä % (Alakangas 2000).

Lämpöarvo voidaan ilmoittaa myös tehollisena lämpöarvona saapumistilassa. Tämä lämpöarvo on alin, koska siinä huomioidaan polttoaineessa luontaisesti olevan veden ja poltossa syntyvän veden haihduttamiseen kuluva energia (Alakangas 2000, 28). Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa lasketaan kaavalla (4.4.2).

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} \times ((100 - M_{ar})/100) - 0,02441 \times M_{ar} \quad (4.4.2)$$

jossa

$Q_{net,ar}$ = saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{net,d}$ = kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (alempi lämpöarvo) (MJ/kg)

M_{ar} = kosteuspitoisuus saapumistilassa (%)

0,02441 (MJ/kg) veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjaustekijä (+25 °C) (Alakangas 2000).

4.5 Arviointi kuiva-ainetappioista ja energiahäviöstä

Eri tutkimuksissa on tullut esille, että varaston lämpenemisestä johtuvat kuiva-ainetappiot ovat suuremmat varastoinnin alussa noin 2 – 5 %, jonka jälkeen ne ovat noin 1 % kuukaudessa (Impola & Tiihonen 2011, 22). Todellisten mittaus-tulosten puuttuessa, kuiva-ainetappioiden arviointiin käytettiin muiden tutkimus-tuloksia (taulukko 2). Tässä tutkimuksessa arvioitiin ensimmäisen kuukau-den kuiva-ainetappion olevan 2 % häviötä kokonaiskuiva-aineen painosta ja seuraavien kuukausien kohdalla 1 %. Arviot perustuvat kasan kosteus- ja läm-pökäyttämiseen. Kuiva-ainetappion tuottama energiahäviö laskettiin koko varastolle. Lähtöarvoina oli varaston kokonaispaino, kasan kosteus ja tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa.

Taulukko 2. Muiden tutkimusten kuiva-ainetappioita kuukaudessa

Materiaali	Varastointiaika	Kuiva-ainetappio (kk)
Hakkuutähdehake (Ruotsi) ¹⁰	3 kk, 2 kasaa	1,9 % ja 3,4 %
Hakkuutähdehake (Suomi) ¹¹	6 kk	3,2 %
Koivuhake (Kanada) ¹²	1 vuosi, 3 kasaa	0,6 %, 1,8 % ja 2,3 %
Kokopuuhake (Ruotsi) ¹³	6 viikkoa	1,4 %
Ranka - ja kokopuuhake (Englanti) ¹⁴	7 kk ja 4 kk, 2 ka-saa	2,6 %, 4,8 % ja 5,3 %

¹⁰ Nilsson & Thörnqvist 2013

¹¹ Hirvonen ym. 2013

¹² Afzal ym. 2010

¹³ Eriksson 2011

¹⁴ Shield ym.2014

5 Tulokset

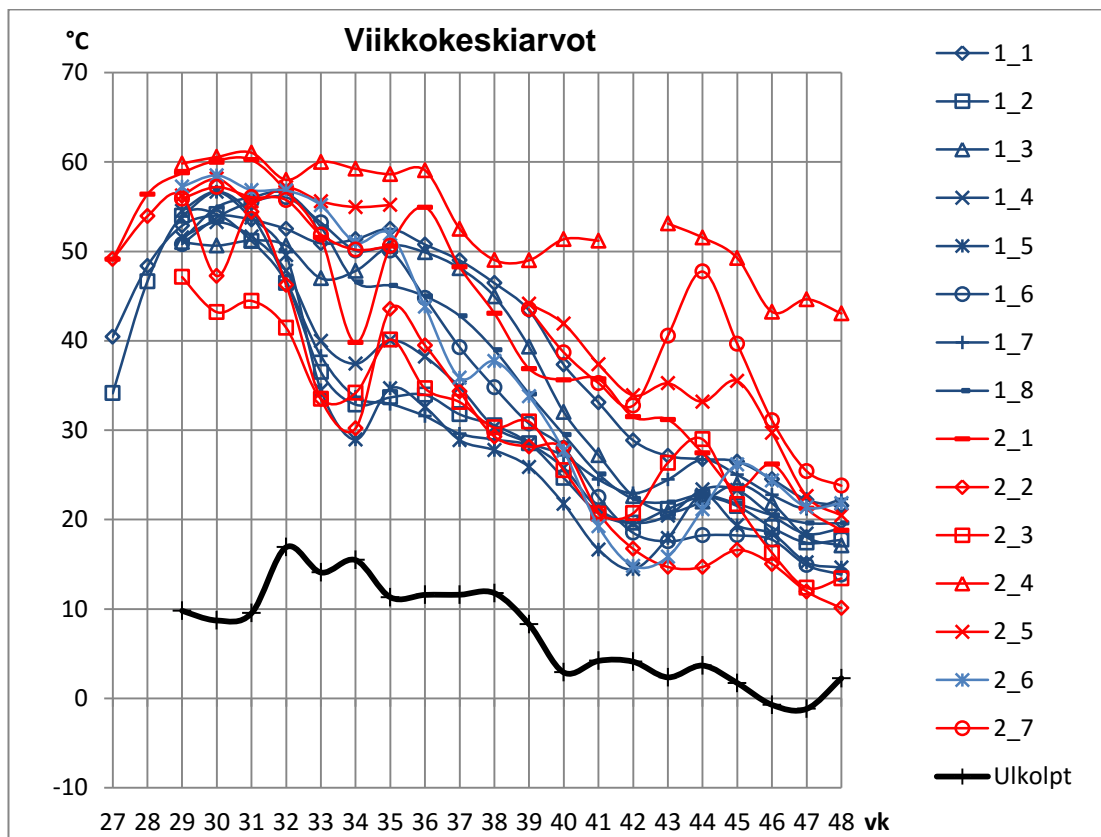
5.1 Lämpötila

Kasaan asennettiin 7.7.2015 neljä termoelementtiä (1/1 - 2/2) mittaamaan lämpötilaa. Mittauksen alussa näiden pisteiden lämpötilat olivat 36 - 46 asteen välillä. Jokaisen neljän pisteen lämpötila nousi 11 päivän aikana yli 50 asteeseen. Loput termoelementit (11 kpl) asennettiin paikoilleen 21.7. ja seuraavana päivänä lähes kaikista mittauspisteistä mitattiin 50 - 67 asteen lämpötiloja. Vain yhdestä pisteestä mitattiin alle 50 asteen lämpötiloja. Lämpötilat asettuivat 50 ja 60 asteen tuntumaan, jossa ne pysyivät elokuun alkupuolelle saakka, minkä jälkeen seitsemästä mittauspisteestä alkoi lämpötilan lasku. Kolmen viikon aikana lämpötilat laskivat näistä pisteistä yli 50 asteesta 30 asteen molemmin puolin, jääden kuitenkin alle 40 asteeseen. Suurin pudotus oli pisteessä 2/2, jossa lämpötila laski kolmen viikon aikana 31,3 astetta (58,5 °C - 27,2 °C).

Noin kuukauden kuluttua edellisten pisteiden laskusta laskivat muidenkin pisteiden lämpötilat, yhtä pistettä lukuun ottamatta. Lasku oli näissä edellisiä maltillisempaa ja kolmen viikon aikana lämpötilat laskivat yli viidenkymmenen asteen lukemista 32 - 45 asteen välille. Suurin lämpötilan lasku oli pisteessä 2/1, jossa laskua tapahtui kolmen viikon aikana 18 astetta (57,0 °C - 39,0 °C). Kahdesta pisteestä (2/5 ja 2/7) ei saatu mittaustuloksia koko syyskuun aikana. Ennen kuin pisteet menivät myräksi, mitattiin niistä 52 - 56 asteen lämpötilat. Termoelementtien puhdistuksen jälkeen niistä mitattiin noin 43 asteen lämpötilat, eli laskua oli kuukauden aikana tapahtunut 9 - 13 astetta.

Lämpötilojen lasku jatkui ja viikolla 40 oli kasan lämpötila tippunut keskimäärin 22 - 39 asteen välille. Yhdestä pisteestä mitattiin yli 40 astetta, mutta siitäkin lämpötila tippui seuraavalla viikolla alle 40 asteeseen. Kasaan eteläpäädyn piste (2/4) oli lämpimmin piste koko tutkimusjakson ajan eikä sen lämpötila tippunut koko aikana alle 40 asteen ja viikolla 40 siitä mitattiin yli 50 asteen lämpötiloja. Tutkimusjakson viimeisessä mittauksessa marraskuun lopulla, lämpötilat olivat 10 - 24 asteen välillä, lukuun ottamatta pistettä 2/4, josta edelleen mitattiin 43 asteen lämpötiloja.

Kasan lämpötiloissa ei ollut kerrosten välillä suuria eroja (kuvio 3). Alemman kerroksen lämpötilojen vaihtelu oli tasaisempaa ja korkeammasta kerroksesta mitattiin tutkimusjakson korkeimmat, että alimmat lämpötilat. Koko tutkimusjakson ajan kasan lämpötila oli ulkoista lämpötilaa suurempi. Tarkemmat lämpötilat näkyvät liitteessä 2.

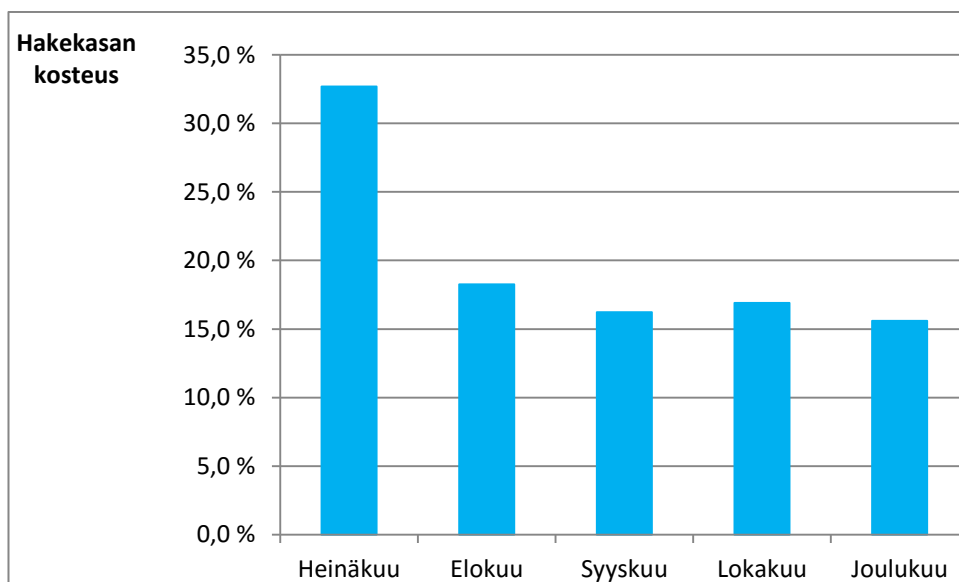


Kuvio 3. Pisteiden lämpötilat laskettuna viikkokeskiarvoilla. Punaisilla viivoilla ovat kasan toisen kerroksen pisteet ja sinisillä viivoilla ensimmäisen kerroksen pisteet. Musta viiva kuvaa ulkoista lämpötilaa.

Kasan ulkoista lämpötilaa alettiin mitata 21.7. Kesä 2015 oli kylmä, mikä näkyi mittaustuloksissa hyvin. Viikkokeskiarvot olivat alle 10 astetta heinäkuusta lähtien elokuun ensimmäisen viikon loppuun saakka. Kolme seuraavaa viikkoa olivat lämpimämpiä ja päiväkeskiarvot olivat keskimäärin 15 astetta. Syyskuussa lämpötilat olivat 10 asteen yläpuolella, kunnes lokakuussa laskivat 0 - 6 asteen välille, käyden välillä pakkasen puolella. Marraskuun kahdella ensimmäisellä viikolla lämpötilat pysyivät pääosin nollan yläpuolella, jonka jälkeen esiintyi pientä pakkasta useana päivänä. Marraskuun lopussa lämpötilat nousivat nollan yläpuolelle.

5.2 Kosteus

Ensimmäiset näytteenottosuunnitelman mukaiset kosteusmääritykset tehtiin 3.7.2015. Kaikkien pisteiden kosteuden keskiarvo oli 32,7 %. Elokuun näytteenotossa keskimääräinen kosteus oli 18,3 %. Jokaisen näytteenottopisteen kosteus oli laskenut alle 30 % ja vain neljästä pisteestä määriteltiin yli 20 % kosteudet. Seuraavissa kosteusmäärityksissä tulokset eivät merkitsevästi muuttuneet. Syys- ja lokakuun keskimääräinen kosteus oli 16,2 - 16,9 % ja viimeisessä näytteenotossa kosteus oli 15,6 %. Viimeisessä näytteenotossa puuttuu yhden näytteen kosteus, mutta sen puuttuminen ei vaikuta tulokseen merkitsevästi. Tarkemmat tulokset jokaisesta näytteenottopisteestä tutkimusjakson ajalta on nähtävissä liitteessä 3.



Kuvio 4. Kasan keskimääräinen kosteus kuukausittain

5.3 Lämpöarvo ja arvio kuiva-ainetappioista

Tehollinen lämpöarvo oli mittauspisteiden näytteissä koko tutkimusjakson ajan välillä 19,2 - 20,1 MJ/kg. Tutkimuksen alussa tehollisen lämpöarvon keskiarvo oli 19,6 MJ/kg ja tutkimuksen lopussa 19,8 MJ/kg. Saapumistilassa olevan polttoaineen tehollinen lämpöarvo oli tutkimuksen alussa keskimäärin koko kasassa 12,6 MJ/kg. Kosteuden lähtiessä laskuun nousi saapumistilainen lämpöarvo noin 16 MJ/kg ja pysyi siinä koko tutkimusjakson loppuun saakka.

Varastokasan kokonaispaino oli tutkimuksen alussa 357 900 kg. Ensimmäisen näytteenoton tulosten perusteella kasan keskimääräinen kosteus oli 32,7 %, jolloin varaston kuiva-ainepaino oli varastoinnin alussa 240 891 kg. Kuiva-aineen energiasisältö oli koko kasassa 4 730 370 MJ (1314 MWh).

Kuiva-ainetappioksi arvioitiin heinä-elokuun aikana noin 2 %, ja seuraavien neljän kuukauden tappioiksi arvioitiin 1 % kuukaudessa. Koko varastointijakson energiatappio koko kasassa olisi näiden kuiva-ainetappioiden perusteella yhteensä 246 925 MJ eli noin 69 MWh.

5.4 Kasassa tapahtuneet muutokset

Neulasten värin muuttuminen vihreästä ruskeaan tapahtui nopeasti kesäisestä vuodenajasta johtuen. Varastoinnin alussa neulaset olivat vihreitä ja oksissa kiinni. Neljässä päivässä kasan väri oli jo lähestulkoon ruskeaa, ja kuukauden varastoinnin jälkeen aivan ruskea (kuvat 4 ja 5). Kasa tuoksui alussa voimakkaasti ja tuntui pinnasta lämpimältä ensimmäisen viikon aikana, mikä voi olla merkki orgaanisten yhdisteiden, kuten terpiinien haihtumisesta.

Kasassa tapahtui tiivistymistä. Kuormatietojen perusteella laskettu yhteistilavuus oli 1 454 i-m³, ja kuvaushelikopterin avulla tehty tilavuuden määrittäminen oli marraskuun alussa 1 024,69 m³. Tiivistymiseen vaikuttaa todennäköisesti kasan muokkaaminen kuormatraktorilla, kasan kuivuminen ja palojen asettuminen tiiviimmin maan vetovoiman johdosta.

Kuukausi varastoinnin alusta, kasalle ilmestyi suuri määrä pieniä hyönteisiä, jotka muistuttivat punkkeja tai pieniä hämähäkkejä. Näitä hyönteisiä parveili kasan pinnalla noin 2 kuukauden ajan, minkä jälkeen hävisivät. Tarkkaa lajimääritelmää ei saatu tehtyä. Syyskuun lopussa kasan pinnalla havaittiin limasieniä ja sen itiöitä (kuva 5). Limasieni ei nimestään huolimatta ole sieni, vaan elää laho puussa, jossa se ryömii ravinnon ja kosteuden luokse. Ravinnokseen se käyttää puussa eläviä bakteereita, sienien itiöitä ja muita eliöitä. (Suomen ympäristökeskus 2013.) Homekasvustoja tai muita sieniä ei kasasta havaittu.



Kuvat 4 ja 5. Hakkeen värin vaihtuminen vihreästä ruskeaan tapahtui kuukauden aikana.



Kuva 6. Limasienen itiöitä

6 Pohdinta

6.1 Tulosten tarkastelu

Muiden tutkimusten tavoin Best-hankkeen hakekasan lämpötila nousi yli 60 asteeseen varastointijakson alussa. Hakkeen kosteus oli tullessa moneen tutkimukseen verrattuna alhainen, mutta kuitenkin kosteus oli riittävä mikrobitoiminnalle. Hakemateriaali oli melko tuoretta ja siinä oli runsaasti ravinteikasta vihermassaa mukana, joka yhdessä kosteuden kanssa luo hyvät olosuhteet mikrobitoiminnalle (Tekes 2004, 68). Tämän vuoksi oletuksena oli, että kasa säilyttäisi korkean lämpötilan ja kasan kosteus ainakin osassa kasaa kasvaisi ja loisi hyvän elinympäristön hajottajamikrobeille. Toisin kuitenkin kävi. Kasa kuivui yhden kuukauden aikana yli 14 %, jolloin sen kosteus jäi reilusti alle 20 %, joka on liian alhainen mikrobitoiminnalle. Tästä johtuen noin kuukauden kuluessa varastoinnin alusta myös lämpötilat lähtivät kasassa laskuun. Kasa jatkoi kuivumista ja lämpötila laski tutkimuksen loppuun asti.

Hakekasan kuivuminen aumavarastossa on poikkeuksellista muihin tutkimuksiin verrattuna. Kasan keskeltä kosteus on todennäköisesti siirtynyt yläosiin, josta kosteuksia ei mitattu. Silmämääräisesti katsottuna ja haketta koskettaessa ei kasan ylä- ja pintaosat olleet kuitenkaan merkittävästi kostuneet, joka voi johtua tuulen kuivattavasta vaikutuksesta. Kasan pinnalta ei myöskään havaittu home- tai sienikasvustoa, joten myös pinta on ollut ilmeisesti liian kuiva näille eliöille, vaikkakin home ei kovin vaatelias olekaan kosteuden suhteen. Kirjallisuudesta ei löytynyt tietoa siihen, voiko limasienen läsnäolo vaikuttaa muiden lahottajasierien ja hajottajamikrobien vähyyteen. Tienvarsivarastoinnin puuttuminen ja lyhyt palstakuivatus voivat osaltaan vaikuttaa siihen, ettei materiaali ollut tullessaan jo lahottajasierien peittämää. Vilkkaamman hajotustoiminnan käynnistyminen kestäisi hetken, kunnes kosteusolot ovat suotuisat ja pinnalla olevat itiöt pääsevät kehittymään.

Tehollisessa kuiva-aineen lämpöarvossa ei oletetusti tapahtunut varastoinnin aikana merkittäviä muutoksia. Alhaisen kosteuden vuoksi myös tehollinen lämpöarvo saapumistilassa oli lähes muuttumaton. Kasassa syntyneet kuiva-

ainetappiot ja energiahäviöt ovat todennäköisesti olleet suurimmat varastoinnin alussa, jonka jälkeen syntyneet tappiot ovat olleet hyvin pienet oletetun mikrobi-toiminnan loppuessa. Toimeksiantajalla oli tarkoituksena tehdä hakekasasta kuiva-ainetappioiden selitysmalli, joka nyt epäonnistuu, koska kasa ei lähtenyt kompostoitumaan, niin kuin oli suunniteltu.

6.2 Luotettavuus ja virhearviointi

Paikallaan olevien näytteenottoputkien ansiosta, polttoainenäytteet saatiin otet-tua, joka näytteenottokerta samasta paikasta. Kiinteiden putkien ja tiiviiden kan-sien vuoksi, ei kasan normaalia tilaa häiritty. Näytteenottomenetelmä tuo tulok-siin luotettavuutta.

Lämpötilojen mittaukseen käytettiin menetelmää, jota on käytetty aiemmissakin tutkimuksissa ja todettu luotettavaksi menetelmäksi. Kasassa oli useita lämpöti-lan mittauspisteitä, eikä lämpötilan mittaus vaarantunut, vaikka osa termoele-menteistä vioittui. Kun termoelementit saatiin toimimaan, eivät mittauslämpötilat poikenneet merkittävästi muista, joten sammumisen aikana ei todennäköisesti ole tapahtunut mitään merkittävää. Mittausväli oli lyhyt (1 min), joten oli perustel-tua käyttää päiväkeskiarvoa tulosten tulkinnan helpottamiseksi, vaarantamatta kuitenkaan luotettavuutta.

Valitut mittauspisteet edustivat koko kasaa hyvin. Neitseellisestä kohdasta ote-tut kosteusnäytteet eri syvyyksistä, eivät poikenneet näytepisteiden tuloksista. Kosteuden ja lämpötilan mittauksia ei tehty kasan yläosasta, joka voi jonkin ver-ran vaikuttaa tuloksiin. Muiden tahojen tutkimustulokset samasta kasasta, näyt-tävät tulevaisuudessa onko pinnalta mitatuissa kosteuksissa ja lämpötiloissa, merkittävästi eroja tämän tutkimuksen kanssa.

Kosteuden määritelmä tehtiin standardoitua näytteenottoa soveltaen. Koska alkuperäinen standardi ei ollut saatavilla, ohjetta katsottiin Puupolttoaineen laa-tuohjeesta (2013), sekä Alakankaan (2000) teoksesta. Puupolttoaineen laatuoh-je käytti uudempaa standardia (SFS-EN 14774-2/SFS-EN ISO 18134-1). Sen

mukaan näytekoon tulee olla vähintään 300 g ja yksi näyte riittää. Vaa'an tarkkuuden tulee olla vähintään 0,1 g.

Alakangas on käyttänyt sen aikaista ISO 589-menetelmää, jossa näytekoko määräytyy käytettävän vaa'an mukaan ja rinnakkaisnäytteet on otettava. Vaa'an tarkkuuden ollessa 0,01 g riittää näytekooksi 30 - 100 g. Vaa'an punnitustarkkuuden ollessa 0,1 g näytekoon tulee olla 200 - 400 g. Kuivausaika ja uunin lämpötila ovat molemmissa menetelmissä samat. Tässä tutkimuksessa vaa'an tarkkuus oli 0,01 g ja näytekoko vaihteli 128 g - 214 g. Hakemäärä määräytyi käytettävissä olevien vuokien koon perusteella, eikä rinnakkaisnäytteitä otettu.

Lämpöarvon määrittäminen tapahtui Fortumin tehtaalla, jossa on standardin mukaiset välineet lämpöarvon määrittämistä varten. Best-hankkeen työntekijät suorittivat lämpöarvojen määrittämisen laboratoriohenkilökunnan opastuksella ja valvonnan alla. Rinnakkaisnäytteiden vastaavuus takasi tulosten virheettömyyden.

Tilavuuden perusteella kasan tilavuus olisi pienentynyt neljän kuukauden aikana noin 429 m³. Lukuun kannattaa suhtautua kuitenkin kriittisesti. Alkutilavuus ja marraskuun tilavuuden määrittely on tehty toisistaan poikkeavalla menetelmällä, joten siinä on todennäköisesti virhetuloksen riski.

Kuiva-ainetappiot perustuvat kirjallisuuteen, joissa kasojen käyttäytyminen on ollut erilaista kuin tässä tutkimuksessa. Näin ollen kuiva-ainetappioihin liittyy suuri tulkinnan vara ja myöhemmin tulevat kuiva-ainemääritykset antavat todellisen arvion mahdollisista tappioista.

6.3 Toimenpidesuosituksien ja jatkotutkimusaiheet

Hakkeen hajoaminen on väistämätöntä ja kuuluu normaaliin luonnonkiertokulkuun. Pitämällä varastointiajat lyhyinä ja kuivattamalla hakkuutähdettä palstalla saadaan kuiva-ainetappiot pidettyä kurissa. Varastointiajan kesto vaikuttaa kysynnän ja tarjonnan laki sekä kuljetuslogistiset haasteet. Luomalla malli todellisille kuiva-ainetappioille ajan funktiona, huomioiden koko varastointiajan pituus

kaadosta lähtien, voidaan tuoda työkaluja kuljetuslogistiikan ongelmien ratkaisuun.

Luotettavan mallin saamiseksi tarvitaan lisää tutkimuksia eri olosuhteissa ja eri tuotantomalleissa. Voisi miettiä, olisiko keinoja jalkauttaa tutkimus kenttäolosuhteisiin ja todellisiin tilanteisiin, jolloin varastointiajat ja olosuhteet olisivat realistiset, eikä tutkimusasetelman rakentamiseen kuluisi niin paljon taloudellista pääomaa. Mielenkiintoista olisi myös tutkia tienvarsivarastoinnin pituuden vaikutusta hakkeen kuiva-ainetappioihin.

6.4 Oppimisprosessi ja kiitokset

Opinnäytetyöaihe oli kirjoittajalle hyvin haastava eikä vähiten siksi, ettei aiempaa tietopohjaa asiasta juurikaan ollut. Koko opinnäytetyöprosessi kesti yli vuoden, joka mahdollisti syvällisen tutustumisen aiheeseen, joka osoittautui loppujen lopuksi erittäin mielenkiintoiseksi. Tutkimustyössä mukana olo auttoi ymmärtämään aihepiiriä paremmin ja helpotti kirjoitusprosessia. Paljon jäi vielä epäselvyyksiä, joihin ehkä jonain päivänä saadaan vastauksia.

Haluan esittää lämpimän kiitoksen Simo Paukkuselle ja Ville Kuittiselle, jotka eivät epäröineet ottaa kokematon opiskelijaa tutkimustyöhön mukaan. Kiitos kuuluu myös Markus Hirvoselle ja Anssi Kokkoselle, joiden kanssa oli iloa työkennellä niin myötä kuin vastoinkäymisissä. Fortumin laboratoriohenkilökunta auttoivat, opastivat ja luovuttivat laboratorion käyttöömme, eli kiitos Saara Keronen, Antti Kuosmanen ja Piia Räsänen. Kotijoukoille kuuluu erityiskiitos kaikesta avusta ja suuresta ymmärryksestä!

Lähteet

- Afzal, M., Bedane, A., Mahmood, W. & Sokhansanj, S. 2010. Storage of comminuted and uncomminuted forest biomass and its effect on fuel quality. *BioResources* 1/10: 55–69.
http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_05_1_0055_Afzal_BSM_Storage_Comminuted_Biomass/487. 9.11.2015.
- Ajanko, S., Fagernäs, L., Impola, R. & Rautiainen, R. 2004. Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa - PUUT29. Teoksessa Alakangas, E. & Holviala, N. (toim.) Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. Otamedia Oy: Espoo, 155–165.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2004/S231.pdf>. 20.11.2015
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Otamedia Oy. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/t2045.pdf>. 14.12.2015.
- Anheller, M. 2009. Biomass losses during short-term storage of bark and recovered wood. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Energy and Technology. Examensarbete.
http://stud.epsilon.slu.se/883/1/anheller_m_100225.pdf. 30.12.2015.
- Asikainen, A., Hämäläinen, J., Laitila, J. & Ranta, T. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Tiedonantoja 131. Joensuu: Metsätieteellinen tiedekunta.
- Bartlett, D., Garstang, J., Poulter, R. & Weekes, A. 2002. Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, nonventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices.
http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/BEC_TECH-NICAL/BEST%20PRACTICE/LOSSES%20IN%20CHIP%20STORAGE%20FILE14947.PDF. 10.11.2015.
- Cleen. 2015. BEST- Sustainable Bioenergy Solutions for Tomorrow.
<http://www.cleen.fi/fi/best>. 21.5.2015.
- Fredriksson, T. & Hakkila, P. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos & Puuenergia Ry.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY.
- Eriksson, A. 2011. Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and power plants. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Energy and Technology. Examensarbete.
http://stud.epsilon.slu.se/2566/1/eriksson_a_110510.pdf. 12.11.2015.
- Haikonen, T. 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Motiva. Hajautetut biojalostamot. 2014. Hakkeen kuivaus. [file:///C:/Users/Tuula/Downloads/Infokortti23_Hakkeen_kuivaus_2014_0311%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Tuula/Downloads/Infokortti23_Hakkeen_kuivaus_2014_0311%20(1).pdf). 4.2.2016.
- Hakkila, P. 2003. Puu polttoaineena. Teoksessa Knuuttila, K. (toim.) Puuenergia. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 24–30.
- Hakkila, P. 1997. Uudet energiapuun korjuumenetelmät. Teoksessa Hytönen, J., Nurmi, J. & Polet, K. (toim.) Energiapuusta puutuhkaksi. Kanus: Metsäntutkimuslaitos, 6 -11.

- Hartley, J. & Marchant, J. 1995. Methods of determining the moisture content of wood. Australia: Research Division. State Forests of New South Wales.
http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0007/389689/Methods-of-Determining-the-Moisture-Content-of-Wood.pdf. 6.1.2015.
- Heiskanen, V.-P., Raitila, J. & Virkkunen, M. 2014. Metsäpolttoaineiden varastoitavuus runkoina ja hakkeena sekä lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus.
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04524-14.pdf>. 20.2.2016.
- Hirvonen, M., Juntunen, R. & Paukkunen, S. 2013. Raportti Fortumin polttoainekentän hakeaumakokeista 2013. Joensuu:Karelia-ammattikorkeakoulu.
- Holopainen, M., Lindblad, J. & Melkas, T. 2012. Energiapuun kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksen yhteydessä. Metsätehon tulosalvosarja 8/12. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/Tulosalvosarja_2012_08_Energiapuun-kosteuden-m%C3%A4%C3%A4ritt%C3%A4minen_mh-ji-tm.pdf. 6.1.2015.
- Horttanainen, M. 1999. Syttyminen ja palamisen eteneminen partikkelikerroksessa. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan osasto. Lisensiaatintutkimus.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31000/TMP.objres.351.pdf>. 15.11.2015.
- Impola, R. & Tiihonen, I. 2011. Biopolttoaineterminaalit. Terminaalikäsikirja:VTT-R-08634-11. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/VTT-R-08634-11.pdf>. 10.12.2015.
- Itävaara, M., Kapanen, A., Venelampi, O., Vikman, M. & Vuorinen, A. 2006. Kompostin kypsyystestit. VTT tiedotteita 2351. Helsinki: Valopaino Oy. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2351.pdf>. 5.11.2015.
- Jirjis, R. 1986. Preliminary results on microfungus presence in large scale season storage of forest fuel. Uppsala: The Swedish University of Agricultural Sciences.
- Jirjis, R. 1995. Storage and drying of wood fuel. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products.
- Jirjis, R. 2009. On-site biomass moisture management for transportation and boiler efficiency. Powerpoint-esitys. Uppsala: SLU.
<http://www.canbio.ca/upload/documents/sherbrooke09jirjis.pdf>. 21.12.2015.
- Juntunen, R. 2013. Hakevarastojen kasvihuonekaasupäästöjen arviointi- ja mitausmenetelmät. Karelia-ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
- Järvinen, T. 2013. Nopea ja tarkka biopolttoaineiden kosteuden määrittäminen magneettisen resonanssin mittaukseen perustuvaa laitetta. Espoo: VTT. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T90.pdf>. 20.1.2016.
- Jääskeläinen, A.-S. & Sundqvist, H. 2007. Puun rakenne ja kemia. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Karelia-ammattikorkeakoulu. 2015. BEST 2015-2016.
<http://www.karelia.fi/fi/tki-ja-palvelut/tutkimus-ja-kehitys/projektit>. 21.5.2015.

- Kellomäki, S. 2005. Metsäekologia. Joensuu: Joensuun Yliopistopaino.
- Keronen, S. 2016. Oppariin pieniä kysymyksiä. tuula.k.tirronen@edu.karelia.fi. 13.1.2016.
- Kolppanen, R., Kuokkanen, M. & Kuokkanen, T. 2011. Nesteiden ja kiinteiden aineiden lämpöarvojen määrittäminen. http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti_info_220611.pdf. 12.1.2016.
- Kuang, X., Lim, J., Melin, S., Sokhansanj, S., Tumuluru, J., Xiaotao T. & Yazdanpanah, F. 2015. Analysis on Storage Off-Gas Emissions from Woody, Herbaceous, and Torrefied Biomass. *Energies* vol8 issue 3/2015:1745-1759. <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/3/1745>. 20.11.2015.
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Karisto Oy.
- Laki metsätuhojen torjunnasta 1087/2013.
- Leco. 2015. AC600 Semi-Automatic Isoperibol Calorimeter. <http://www.leco.com/products/analytical-sciences/calorific-value/ac600-semi-automatic-isoperibol-calorimeter#highlights>. 12.1.2016.
- Leinonen, A. 2015. Technology for forest residues at fuel terminal. <http://infohouse.p2ric.org/ref/35/34026.pdf>. 12.11.2015.
- Lindblad, J. & Verkasalo, E. 2001. Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva- tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff01/ff013411.pdf>. 23.1.2016.
- Luonnonvarakeskus. 2015. Puun energiakäyttö 2014. <http://stat.luke.fi/puun-energiakaytto>. 3.12.2015
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2011. Kansallinen metsäohjelma 2015 (verkkopublication). <https://www.metsateollisuus.fi/mediabank/202.pdf>. 3.12.2015.
- Nilsson, D. & Thörnqvist, T. 2013. Lagring av flisad grot vid värmeverk. Linnæus University. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:626596/FULLTEXT01.pdf>. 9.11.2015.
- NT Method. 2008. Guidelines for storing and handling of solid biofuels. http://www.nordtest.info/images/documents/nt-meth-ods/environment/NT%20envir%20010_Guidelines%20for%20storing%20and%20handling%20of%20solid%20biofuels_Nordtest%20Method.pdf. 13.11.2015.
- Nurmi, J. 1990. Polttohakkeen varastointi suurissa aumoissa. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos.
- Nurmi, J. 1997. Hakkuutähteen polttopuu- ja ravinneominaisuudet. Teoksessa Hytönen, J., Nurmi, J. & Polet, K. (toim.) Energiapuusta puutuhkaksi. Kannus: Metsäntutkimuslaitos, 11–17.
- Nurmi, J. 1999. Hakkuutähteen ominaisuuksista. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 722. Kannus: Metsäntutkimuslaitos.
- Parlamentaarinen energia- ja ilmastokomitea. 2014. Energia- ja ilmastotiekartta 2050. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 31/14. http://www.tem.fi/files/42599/Energia-_ja_ilmastotiekartta_2050.pdf. 7.12.2015.
- Peltonen, J. 2015. Varastointi tasaa hakekuljetusten kausivaihteluja. *Raskassarja* 1/15: 33 - 35. http://issuu.com/raskassarja/docs/raskassarja-lehti_2015-1. 11.11.2015.

- Puuinfo. 2015. Kosteusteknisiä ominaisuuksia. <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>. 28.11.2015.
- Puupolttoaineen laatuohje. 2013. <https://www.metsateollisuus.fi/mediabank/918.pdf>. 1.1.2016.
- Rupar, K. & Sanati M. 2004. The release of terpenes during storage of biomass. Biomass and Bioenergy 28/05: 29–34. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:205088/FULLTEXT01.pdf>. 12.11.2015.
- SFS-EN ISO 17225-1. 2014. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- Shield, I., Whittaker, C. & Yates, N. 2014. Streamlining the supply chain: greenhouse gas emissions and dry matter losses from wood chip stacks. Rothamsted research. http://www.supergen-bioenergy.net/media/eps/supergen/presentations/assembly-2014/Biomass-Feedstock_Whittaker.pdf. 30.12.2015.
- Siitonen, J. 2012. Monimuotoisuus. Metlan työraportteja 240. http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240_2_2.6.pdf. 14.9.2015.
- Suomen virallinen tilasto (SVT). 2015. Energian hankinta ja kulutus (verkkójulkaisu). Helsinki: Tilastokeskus. http://www.stat.fi/til/ehk/2015/02/ehk_2015_02_2015-09-21_tie_001_fi.html. 3.12.2015.
- Suomen ympäristökeskus. Suomen ensimmäinen limasiementen määritysopas. Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Luonto/Lajit/Uhanalaiset_lajit/PUTTEtutkimusohjelma_20092016/PUTTEhankkeet/Lisatietoa_PUTTEhankkeista/Suomen_ensimmainen_limasiementen_maarityso\(16642\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Luonto/Lajit/Uhanalaiset_lajit/PUTTEtutkimusohjelma_20092016/PUTTEhankkeet/Lisatietoa_PUTTEhankkeista/Suomen_ensimmainen_limasiementen_maarityso(16642)). 25.1.2016.
- Tekes. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Sipoo: Paino-Center Oy.
- Tilastokeskus. 2015. Polttoaineluokitus 2015. https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html. 7.12.2015.
- Valtioneuvoston kanslia. 2015. Ratkaisujen Suomi. Pääministeri Juha Sipilän hallituksen strateginen ohjelma. Hallituksen julkaisusarja 10/15. http://valtioneuvosto.fi/documents/10184/1427398/Ratkaisujen+Suomi_FI_YHDISTETTY_netti.pdf/801f523e-5dfb-45a4-8b4b-. 4.12.2015.
- Vesisenaho, T. 2003. Metsähakkeet. Teoksessa Knuuttila, K. (toim.) Puuenergia. Jyväskylä:Gummerus Kirjapaino Oy, 37 – 40.
- Wihersaari, M. 2005. Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. Biomass and Bioenergy vol28 issue 5/2005: 444–453.
- VTT-M-07608-13. 2014. Puupolttoaineiden laatuohje. Helsinki: Valtion tekninen tutkimuslaitos. http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-07608-13_2014_%20update.pdf. 8.11.2015.

Standardin CEN/TS 14918:2005 (E) mukainen kaava, jolla pommikalorimetri laskee kalorimetrin lämpöarvon.

9.6 Calculation of effective heat capacity for the individual experiment

9.6.1 Constant mass-of-calorimeter-water basis

For systems where the quantity of water in the calorimeter vessel is kept the same in all experiments, ε is calculated as follows:

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{ba}} \times q_{V,\text{ba}} + Q_{\text{fuse}} + Q_{\text{ign}} + Q_{\text{N}}}{\theta}$$

where

m_{ba} is the mass, in grams, of benzoic acid (5.5);

$q_{V,\text{ba}}$ is the certified gross calorific value at constant volume, in joules per gram, for the benzoic acid (see 9.2.1);

Q_{fuse} is the contribution from combustion of the fuse, in joules;

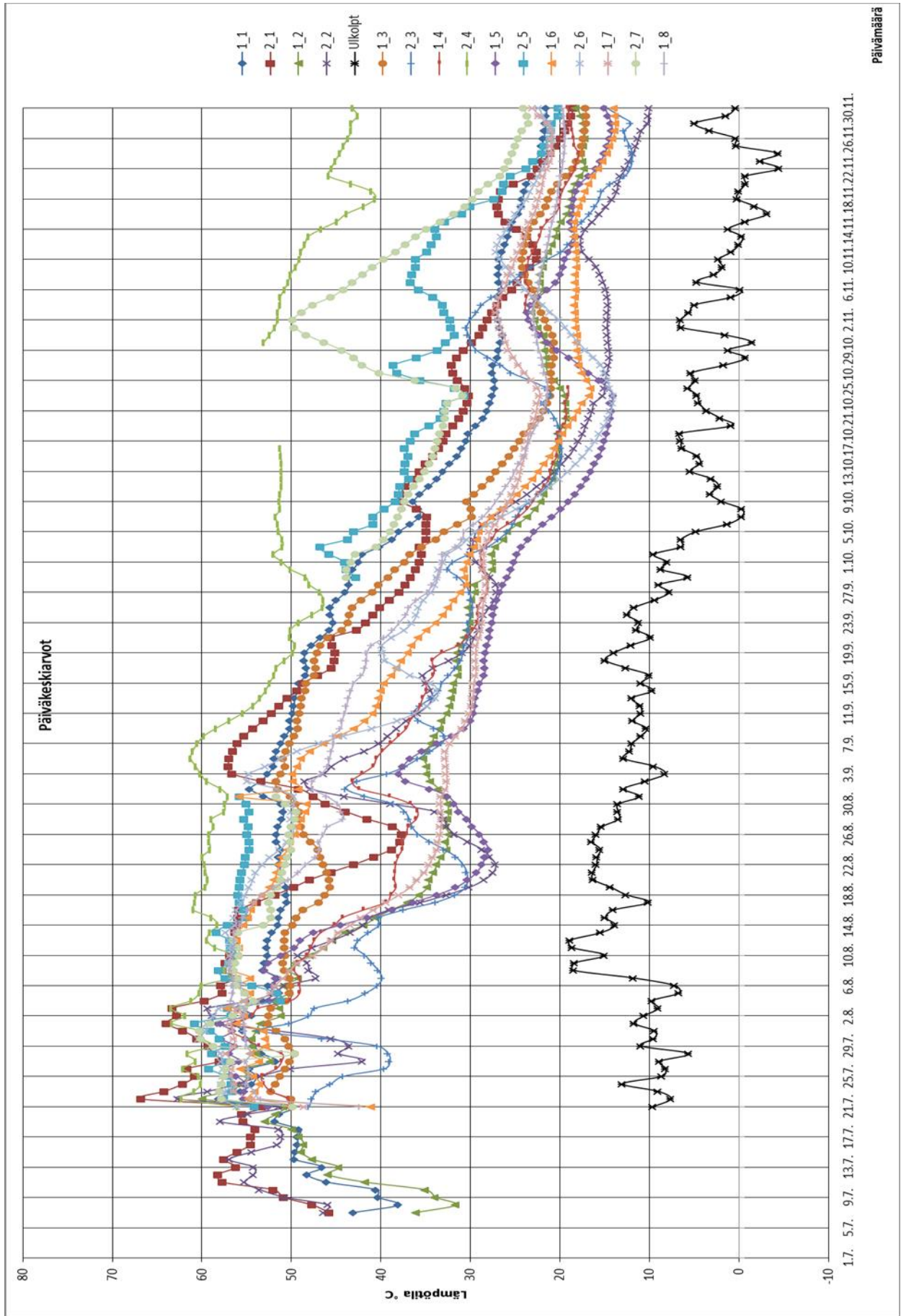
Q_{ign} is the contribution from oxidation of the ignition wire, in joules;

Q_{N} is the contribution from formation of nitric acid (from liquid water and gaseous nitrogen and oxygen, see 8.5 and 9.2.1), in joules;

θ is the corrected temperature rise, in kelvins or in an arbitrary unit (see 3.6 and 8.6).

NOTE ε is normally expressed in joules per kelvin. When θ is expressed in arbitrary units, ε , will, of course, be expressed in joules per this arbitrary unit, e.g. joules per ohm.

The contribution from combustion of a cotton fuse is 17 500 J/g and from a nickel-chromium wire 6 000 J/g. Platinum wire melts and resolidifies and gives no net contribution.



Lämpötilat päiväkeskiarvoilla

1.7. 5.7. 9.7. 13.7. 17.7. 21.7. 25.7. 29.7. 2.8. 6.8. 10.8. 14.8. 18.8. 22.8. 26.8. 30.8. 3.9. 7.9. 11.9. 15.9. 19.9. 23.9. 27.9. 1.10. 5.10. 9.10. 13.10.17.10.21.10.25.10.29.10.2.11. 6.11. 10.11.14.11.18.11.22.11.26.11.30.11.

Päivämäärä

Kosteudet kuukausittain jokaisesta putkesta

	1_1	1_2	1_3	1_4	1_5	1_6	1_7	1_8
Heinäkuu	37,2	29	29,2	26,5	20	34,7	27,5	38,8
Elokuu	25,3	26,5	16,9	25,9	15,6	18	23,4	11,3
Syyskuu	19,4	20,6	14,1	25,6	11,1	14	15,9	18,2
Lokakuu	24,4	24,2	22,9	24,5	12,3	13,8	16,5	16,7
Joulukuu	18,6		21,4	19	15,2	14,1	15,7	11,8
	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5	2_6	2_7	
Heinäkuu	29,5	23,1	26,9	47,7	33,4	31,8	36,7	
Elokuu	12,5	12,6	11,1	10,2	15,1	15,1	17	
Syyskuu	9,5	15,6	11	12,8	13,4	11,8	12,5	
Lokakuu	11,6	12,4	11,8	16,3	12,4	14,1	9,8	
Joulukuu	11,9	16,1	19,2	16,9	9,8	14,3	14,5	