






Metsäpolttoaineiden varastoitavuus runkoina ja hakkeena sekä lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus

Kirjoittajat: Jyrki Raitila, Matti Virkkunen ja Veli-Pekka Heiskanen

Luottamuksellisuus Julkinen

Raportin nimi	
Metsäpolttoaineiden varastoitavuus runkoina ja hakkeena sekä lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus	
Asiakkaan nimi, yhteystiedot	Asiakkaan viite
Suomen metsäkeskus Ari Nikkola PL 39, 40101 Jyväskylä ari.nikkola@metsakeskus.fi	
Projektin nimi	Projektin numero/lyhytnimi
Biolämpöliiketoiminnan laatu- ja kannattavuushanke	78266 Biolämpö
Raportin laatija(t)	Sivujen/liitesivujen lukumäärä
Jyrki Raitila, Matti Virkkunen & Veli-Pekka Heiskanen	3/11
Avainsanat	Raportin numero
Metsähake, kuivaus, lämpöyrittäjäyys, varastointi	VTT-R-04524-14
Tiivistelmä	
<p>Tutkimus oli osa Metsäkeskuksen hallinnoimaa hanketta, jonka päätavoitteena oli kehittää kiinteistökokoluokan ja lämpöyrittäjäkohteiden koko liiketoimintaketjun laatua, osaamista ja kannattavuutta. Tutkimuksen tavoitteina oli täydentää tietoa hakkeen raaka-aineen oikeasta varastoinnista, tutkia valmiin hakkeen säilymistä varastoituna sekä tarkastella lämmöntuotantoon integroidun kuivauksen edellytyksiä. Hakkeen kosteuden vaikutusta kattilan toimintaan tutkittiin polttokokein. Kuivauksen taselaskennan avuksi tehtiin Excel-pohjainen laskuri, jota hyödynnettiin puun kuivauksen kannattavuuslaskennassa.</p> <p>Haketta ei pitäisi varastoida pienissä (<200 i-m³) varastokasoissa taivasalla muuta kuin lyhytaikaisesti, sillä ne voivat kastua sateen vaikutuksesta läpikotaisin. Suhteellisen kuivaa (<30 %) haketta sen sijaan voi varastoida koko lämmityskaudeksi, mikäli se voidaan sijoittaa katettuun varastoon. Polttoaineen kosteuden lisääntyminen heikentää kattilan toimintaa ja sen käytettävyyttä sekä lisää merkittävästi lähes kaikkia päästöjä. Liian kostea polttoaine voi vähentää lämpölaitoksen tuloja merkittävästi, sillä kattilan tehon laskiessa sillä ei voi enää tuottaa tarvittavaa lämpöenergiaa, jolloin myynnistä saatavat tulot voivat pienentyä huomattavasti. Lisäksi kattilan hyötysuhde heikkenee merkittävästi, mikä taas lisää polttoainekuluja. Kosteaa polttoainetta aiheuttaa usein myös laitteiden toimintaongelmia.</p> <p>Koska lämpöyrittäjäkokoluokan (<5 MW) lämpölaitoksissa on runsaasti käyttämätöntä lämmöntuotantokapasiteettia, niiden yhteydessä voitaisiin kuivata merkittäviä määriä haketta tai pilkettä. Pilkettä kannattaisi kuivata myyntiin ja haketta omaan käyttöön. Kuivaamiseen kannattavuuteen vaikuttaa eniten käytettävän kuivauslämmön hinta, sillä kuivuri voidaan rakentaa varsin edullisesti. Tekniset ratkaisut vaikuttavat kuivauksen hyötysuhteeseen ja sitä kautta kokonaiskustannuksiin. Hakkeen kuivauksen kannattavuus riippuu myös oleellisesti puunhankinnan toimintamallista. Kuivauksen kannattavuus lisääntyy sitä mukaa, mitä useampi työvaihe hakkeen tuotantoketjussa hinnoitellaan tilavuuden tai painon mukaan.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
<p>Jyväskylä 20.11.2014</p> <p>Laatija  Tarkastaja  Hyväksyjä </p> <p>Jyrki Raitila Erikoistutkija</p> <p>Janne Kärki Tiimipäällikkö</p> <p>Jani Lehto Tutkimusalueen päällikkö</p>	
VTT:n yhteystiedot	
PL 1603, 40101 Jyväskylä	
Jakelu (asiakkaat ja VTT)	
Suomen metsäkeskus ja hankkeen ohjausryhmä	
<p>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</p>	

Alkusanat

Tämä tutkimus liittyy Maaseuturahaston pääosin rahoittamaan ja Suomen metsäkeskuksen hallinnoimaan Keski-Suomen maakunnalliseen hankkeeseen nimeltä 'Biolämpöliiketoiminnan laatu- ja kannattavuushanke'. Hanke toteutettiin 1.1.2012-31.12.2014 välisenä aikana. Suomen metsäkeskus tilasi projektiin kuuluvat tutkimustehtävät pääosin VTT:ltä, joka laati erillisen tutkimussuunnitelman omasta osuudestaan. Tässä raportissa on kuvattu kyseiset tehtävät ja niistä saadut tulokset. Tutkimuksen lisäksi VTT osallistui ohjausryhmätyöskentelyyn sekä metsähakkeen puupolttoaineen kuivurioppaan kirjoittamiseen.

Projektin keskeisenä tutkimustehtävänä oli selvittää metsäpolttoaineiden laadun muutoksia varastokasoissa sekä laatia laskentamalli, jonka avulla lämpö- tai polttopuuyrittäjät voisivat mitoittaa ja suunnitella lämminilmakuivureita. Hankkeessa haluttiin myös laajemmin kartoittaa niitä yrittäjiä, jotka ovat kiinnostuneita puupolttoaineiden laadun parantamisesta keinokuivaamalla ja miettiä siihen soveltuvia liiketoimintamalleja.

Hankkeen ohjausryhmän puheenjohtajina toimivat Miika Järvinen (OK-Yhtiöt) ja Pasi Sironen. Jäseninä olivat seuraavat henkilöt: Teemu Hietanen (Keuruun Sähkö Oy), Elias Laitinen (OK-Yhtiöt Oy), Risto Janhunen (ELY-keskus), Pekka Janhonen (POKE), Markku Paananen (JAMK), Hannariina Honkanen (JAMK), Jyrki Raitila (VTT), Ari Nikkola (Suomen metsäkeskus), Veli-Pekka Kauppinen (Suomen metsäkeskus, sihteeri).

Haluamme tässä yhteydessä kiittää lämpimästi työn tilaajaa, Suomen metsäkeskusta, ja kaikkia ohjausryhmän jäseniä arvokkaasta palautteesta tutkimuksen aikana. Lisäksi on syytä mainita POKE:n, JAMK:in, OK-Yhtiöiden ja Keuruun Sähkön verraton apu monissa koejärjestelyissä ja materiaalin toimittamisessa.

Jyväskylä 1.12.2014

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Sisällysluettelo.....	3
1. Johdanto.....	4
2. Tavoitteet.....	5
2.1 Hankkeen yleiset tavoitteet	5
2.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	5
3. Metsäpolttoaineen varastoitavuus runkoina ja hakkeena	7
3.1 Raaka-aineen korjuuketjujen kuvaus	7
3.1.1 Lämpörittäjäyys.....	7
3.1.2 Lämpörittäjyyden liiketoimintamallit	7
3.1.3 Polttoaineen hankinnan organisointi.....	8
3.1.4 Pienpuuhakkeen tai pilkeraaka-aineen hankintaketjut.....	11
3.2 Hakeraaka-ainevarastojen käyttäytyminen avoimilla paikoilla ja kuivumisen nopeuttaminen.....	18
3.2.1 Raaka-ainevarastojen perustaminen ja koejärjestelyt	18
3.2.2 Tutkimusalueella vallinnut säätötila.....	19
3.2.3 Varastoseurannan tulokset	19
3.3 Ranka- ja kokopuuhakkeen säilyminen varastossa.....	20
3.3.1 Hakevarastojen perustaminen ja koejärjestelyt	20
3.3.2 Tutkimusalueella vallinnut säätötila.....	24
3.3.3 Varastoseurannan tulokset	24
4. Lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus.....	29
4.1 Hake- ja pilkekuivureiden mallintaminen	29
4.2 Hakkeen kosteuden vaikutus kattilan toimintaan.....	30
4.3 Hakkeen kosteuden vaikutukset metsähakkeen hankintakustannuksiin lämmöntuotannossa	34
4.4 Hakkeen tai pilkkeen tuotanto ja kuivaus osana lämpörittäjäyttä	38
4.4.1 Yleistä.....	39
4.4.2 Kuivatun hakkeen myynti	41
4.4.3 Hakkeen kuivaaminen omaan käyttöön.....	41
5. Johtopäätökset	46
6. Yhteenveto.....	48
Lähdeviitteet.....	52

1. Johdanto

Merkittävä osuus Keski-Suomessa käytettävästä tuontipolttoaineesta, lämmitysöljystä, käytetään alue- ja kiinteistökohtaisissa lämmitysjärjestelmissä. Biometalli-hankkeessa tehdyn selvityksen mukaan Keski-Suomessa on noin 4000 kaukolämpöalueen ulkopuolella olevaa öljylämmitteistä suurkiinteistöä, joissa öljyn käyttö on yhteensä 2,1 TWh vuodessa. Tämä vastaa yhden miljoonan puukuutiometrin energiasisältöä. Hankkeessa tarkasteltujen esimerkkikohteiden öljylämmitys on mahdollista vaihtaa hake- tai pellettilämmitykseen (Järvi 2010).

Suurkiinteistöjen öljylämmityksen korvaaminen hakkeella tuo uusia asiakkaita puupolttoaineiden toimittajille ja lämpöyrittäjille. Seinäjoen ammattikorkeakoulun tekemän selvityksen mukaan lämpöyrittäjien kannattavuudessa on suuria eroja (Sauvula-Seppälä 2010). Tämä viittaa siihen, että toiminnan talouteen vaikuttavia tekijöitä ei riittävästi tunneta. Yritysten toimintatavat ovat myös hyvin vaihtelevia. Myös metsäpolttoaineiden hankintaketjussa toiminnan kannattavuus on usein huonoa. Mitään yksittäistä selvää syytä taloudellisesta huonon tulokseen ei selvityksessä löytynyt.

Liiketoiminnan edellytyksiä voidaan edelleen parantaa, kun hyödynnetään tutkimustietoa ja kehitetään liiketoimintamalleja kiinteistöhakkeen tuotanto- ja käyttöketjuun ja eri lämmitysmuotojen yhdistelmiä. Kun lisäksi kehitetään laatustandardeja ja laadunhallintajärjestelmiä, voidaan uusien asiakkaiden luottamusta lisätä ja lämmitysjärjestelmän vaihdon kynnyksestä öljystä puupolttoaineisiin madaltaa.

Pienten ja keskisuurten biolämpölaitosten haasteena on usein hyvälaatuisen metsäpolttoaineen saanti. Metsähakkeen hankintaketjut on pääsääntöisesti rakennettu suurten voimalaitosten tarpeisiin, joiden vaatimukset polttoaineen laadulle eivät ole niin tiukat kuin pienemmissä laitoksissa.

Vaikka metsähakkeesta yleensä maksetaan lämpöarvon mukaan, ei hinnoittelu huomioi sitä, että hakkeen kuljetuskustannukset nousevat ja kattilan hyötysuhde laskee toimitettaessa märkää haketta laitokselle. Kosteusprosenttiin suhteutettu hinta (esimerkiksi progressiivisesti) kannustaisi kaikkia hakkeen hankintaketjuun osallistuvia tuottamaan kuivempaa haketta. Muut laatutekijät, kuten puhtaus, voitaisiin huomioida vastaavasti.

Hinnoittelun ja mittauksen ongelmat sekä tiedon puute ovat osaltaan estäneet hankintaketjujen kehittymisen pienten laitosten kannalta toivotulla tavalla. Laadukasta haketta voidaan käyttää seospoltossa myös suurissa laitoksissa vähentämään kattilan likaantumista ja korroosiota ja varmistamaan polttoaineelle sopiva kosteus. Samaa periaatetta voisi hyödyntää myös pienessä kokoluokassa esimerkiksi hakkeen ja turvepelletin yhteiskäytöllä.

Yksi metsähakkeen tuotannon ongelmista liittyy puuraaka-aineen varastointiin. Haluttuun kosteuteen kuivattaminen ja toisaalta riittävän raaka-ainevaraston ylläpitäminen vaativat yleensä pitkää varastointia, mikä sitoo pääomia ja muita resursseja. Kuljetus ja varastointi kiinteistökohteissa voi edellyttää myös hakkeen pakkaamista. Useissa varastotutkimuksissa on lisäksi havaittu, että kesällä hyvin kuivunut energiapuukasa yleensä kastuu syksyn ja talven aikana viidestä kymmeneen prosenttiyksikköä – väärin varastoituna jopa enemmän.

2. Tavoitteet

2.1 Hankkeen yleiset tavoitteet

Hankkeen päätavoitteena oli kehittää kiinteistökokoluokan ja lämpöyrityskohteiden koko liiketoimintaketjun laatua, osaamista ja kannattavuutta. Lisäksi pyrittiin edelleen parantamaan tähän toimintaketjuun nykyistä paremmin sopivia yrityspalveluita. Tavoitteena oli myös kehittää ja tiivistää metsäkeskuksen metsävaratiedon, tutkimustoiminnan, koulutus- ja valmennustoiminnan sekä yritysکوhtaisen neuvonnan yhteistyötä niin, että ne tukevat yritysten liiketoiminnan kasvua ja kannattavuutta.

Hankkeessa pyrittiin luomaan uuden tyyppisiä toimintatapoja pienten ja keskiuurten lämpölaitosten metsäpolttoaineiden tuotanto- ja käyttöketjuihin. Uusilla toimintatavoilla voidaan optimoida suuntaamaan metsäpolttoaineiden raaka-ainetta kannattavimpaan käyttöön, hyödyntää rakennettua lämmityskapasiteettia metsäpolttoaineiden kuivaamiseen, parantaa lämpölaitosten käytön hyötysuhdetta, lyhentää varastokasojen säilytysaikoja tienvarsilla sekä tuottaa korkealaatuista haketta ja polttopuuta kiinteistöille.

Tärkeänä yleisenä tavoitteena oli lisätä maaseutu-, lämpö- ja polttopuuyrittäjien liiketoimintaosaamista ja liiketoiminnan kehittämispalveluita. Neuvonnalla ja viestinnällä pyrittiin välittämään alan toimijoille ja metsänomistajille hankkeessa kertynyttä tietoa ja osaamista, välittää esimerkkejä tehokkaista toimintamalleista, parantaa toiminnan tuottavuutta ja laatua sekä alentaa kustannuksia ja lisätä uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

2.2 Tutkimuksen tavoitteet

Hankkeessa tehdyn tutkimustyön tavoitteet olivat seuraavat:

Metsäpolttoaineiden varastoitavuus runkona ja hakkeena:

Tavoitteena oli:

- Kuvata erilaisiin lämmityskohteisiin hankittavan polttopuuraaka-aineen (hake ja pilke) korjuuketjut ja arvioida niiden soveltuvuutta eri toimintaympäristöissä.
- Tutkia ja kuvata hakeraaka-ainevarastojen (kokopuirtokasat ja rankakasat) käyttäytymistä avoimilla varastopaikoilla sekä selvittää, kuinka kuivumista voidaan nopeuttaa.
- Tutkia myös rankahakkeen ja kokopuuhakkeen säilymistä avoimessa ja katetussa varastossa sekä säilymiseen vaikuttavista tekijöistä haketuskosteuden ja peittämisen vaikutusta hakkeen kuumenemiseen sekä varastoinnin kuiva-ainetappioihin.

Lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineiden kuivaus:

Tavoitteena oli:

- Mallintaa hake- ja pilkekuivureiden toiminta yrittäjien laitevalintojen tueksi ja metsäenergianeuvojien työkaluksi
- Tarkastella laskentamallin avulla metsähakkeen laatuhinnoittelua huomioiden, kuinka hakkeen priimaus vaikuttaa teknis-taloudellisesti lämpölaitoksen omaan ja

kaupalliseen käyttöön sekä kuinka huono ja hyvä hake vaikuttavat laitoksen käyttöön ja käyttökustannuksiin.

- Laatia yleiset suunnitteluohjeet maatala- ja lämpöyrittäjäkokoluokan pilke- ja hakekuivureille.

3. Metsäpolttoaineen varastoitavuus runkoina ja hakkeena

3.1 Raaka-aineen korjuuketjujen kuvaus

Raportissa keskitytään lämpöyrittäjätyyppiseen lämpöliiketoimintaan, joten kyseeseen tulevat tyyppilliset pienten ja keskisuurten lämpölaitosten (< 5 MW) hankintaketjut. Tämä tarkoittaa sitä, ettei hakkuutähteiden (latvusmassa ja kannot) korjuuta käsitellä tässä yhteydessä. Pienen kokoluokan polttoaineelle asettamat palakoko- ja tasalaatuisuusvaatimukset rajaavat myös murskainten käytön hakkeen tuotannossa tämän tarkastelun ulkopuolelle.

3.1.1 Lämpöyrittäjäyys

Lämpöyrittäjän liiketoiminta voidaan tiivistää seuraavasti:

- Yrittäjä myy tuottamaansa lämpöä asiakkaille
- Tyyppillinen kohde on kunnan tai teollisuusyrityksen kiinteistö tai lämmönjakoverkosto, missä hakkeella toimiva lämpölaitos on joko kiinteistön omistajan tai yrityksen investoima
- Yrittäjä voi osallistua polttoaineen hankintaan tai jopa hoitaa hankinnan kokonaan omatoimisesti
- Osuuskuntamallissa jäsenet yleensä osallistuvat polttoaineen hankintaan esimerkiksi korjaamalla energiapuuta omista metsistään. Vastuu lämpölaitoksen toiminnasta voidaan jakaa osuuskunnan jäsenten kesken.
- Kooltaan lämpölaitokset ovat kiinteistökokoluokasta (20-200 kW) kunnan aluelämpölaitokseen (< 5 MW)

Suomessa lämpöyrittäjäkohteita on jo yli 500, ja ne lisääntyvät kymmenillä vuosittain. Tällaiset lämmityskohteet käyttävät noin 1,4 miljoonaa irtokuutiometriä metsähaketta vuosittain (Vuorio 2013).

3.1.2 Lämpöyrittäjäyden liiketoimintamallit

Lämpöliiketoiminnassa käytettäviä yritysmuotoja ovat osuuskunnat, yksityisyrittäjät, yritysrenkaat ja osakeyhtiöt. Osakeyhtiö sopii yritysmuodoksi silloin, kun toiminta on laajaa ja sitä halutaan jatkossa laajentaa ja kehittää. Lämpöliiketoiminnassa osakeyhtiöiden toimintaan voi kuulua muutakin kuin lämmöntuotanto, kuten esimerkiksi haketuspalvelut, hakkeen toimitus ja lämpölaitosten rakentaminen. Toisaalta osakeyhtiö voi keskittyä ydinliiketoiminnan eli lämmitettävien kohteiden määrän kasvattamiseen ja ostaa haketuspalveluja aliurakoitsijoilta, mikäli haketus- ja kuljetuskalustoon ei ole investoitu aikaisemmin.

Osakeyhtiöiden kilpailukyky perustuu osaksi kykyyn tehdä laitosinvestointeja, mikäli asiakkaalla ei ole varaa tai halukkuutta investointien tekoon. Yhtiön osakkaiden määrää voidaan tarpeen tullen lisätä ja hankkia siten myös lisää pääomaa investointeihin. (Tuomi ja Solmio 2005)

Osakkaiden vetäytyminen osakeyhtiöstä onnistuu helpommin kuin esimerkiksi toiminimen lakkauttaminen, eikä osakkaan vaihtuminen vaikuta yhtiön olemassaoloon millään tavalla, mikä lisää lämmön toimitusvarmuutta. Osakeyhtiön osakkailla ei ole samanlaista henkilökohtaista velkavastuuta kuin toiminimen tai avoimen yhtiön perustajilla vaan osakkaan lainmukainen vastuu on rajoitettu yhtiöön sijoitettuun pääomapanokseen eli siihen rahamäärään, jonka osakas sijoittaa osakepääomaan. (Sutinen ja Viklund 2005)

Osuuskunta on usean, vähintään kolmen jäsenen muodostama yritysmuoto, jonka perustamiseen tarvitaan vähintään kolme jäsentä, mutta jäsenten määrä voi vaihdella kolmen tai jopa yli 50 välillä. Toimintaa johtaa osuuskunnan hallitus ja toimitusjohtaja tai puheenjohtaja. Jäsenistön kokous käyttää ylintä päätösvaltaa jäsen ja ääni -periaatteella, joten kaikki jäsenet ovat tasavertaisia. Jäsenet sijoittavat osuuskuntaan osuuspääomaa, josta on mahdollista saada korkoa, mikäli toiminnasta jää ylijäämää. Toiminta-ajatuksena ei ole tuottaa mahdollisimman paljon taloudellista voittoa, kuten osakeyhtiössä, vaan toiminnan pitää olla kustannustehokasta, jotta jäsenet hyötyisivät siitä mahdollisimman paljon. Jäsenet voivat osuuskunnassa toimimisen lisäksi myydä puuta tai haketta metsistään tai tehdä palkkatyötä esimerkiksi yrittäjänä. (Tuomi ja Solmio 2005)

Osuuskunnat hoitavat useimmiten aluelämpölaitoksia tai useita lämpölaitoksia, joiden polttoaineenkulutus on riittävän suuri takaamaan jäsenten tarjoaman puun menekin. Polttoaine hankitaan pääosin jäsenten omistamista metsistä, mutta joskus myös osuuskuntaan kuulumattomilta metsänomistajilta ja puunjalostusteollisuudelta. Osuuskuntaan kuuluvat lämpöyrittäjät hoitavat polttoaineen hankinnan ja lämmön tuottamisen asiakkaalle. (Tuomi & Solmio 2005)

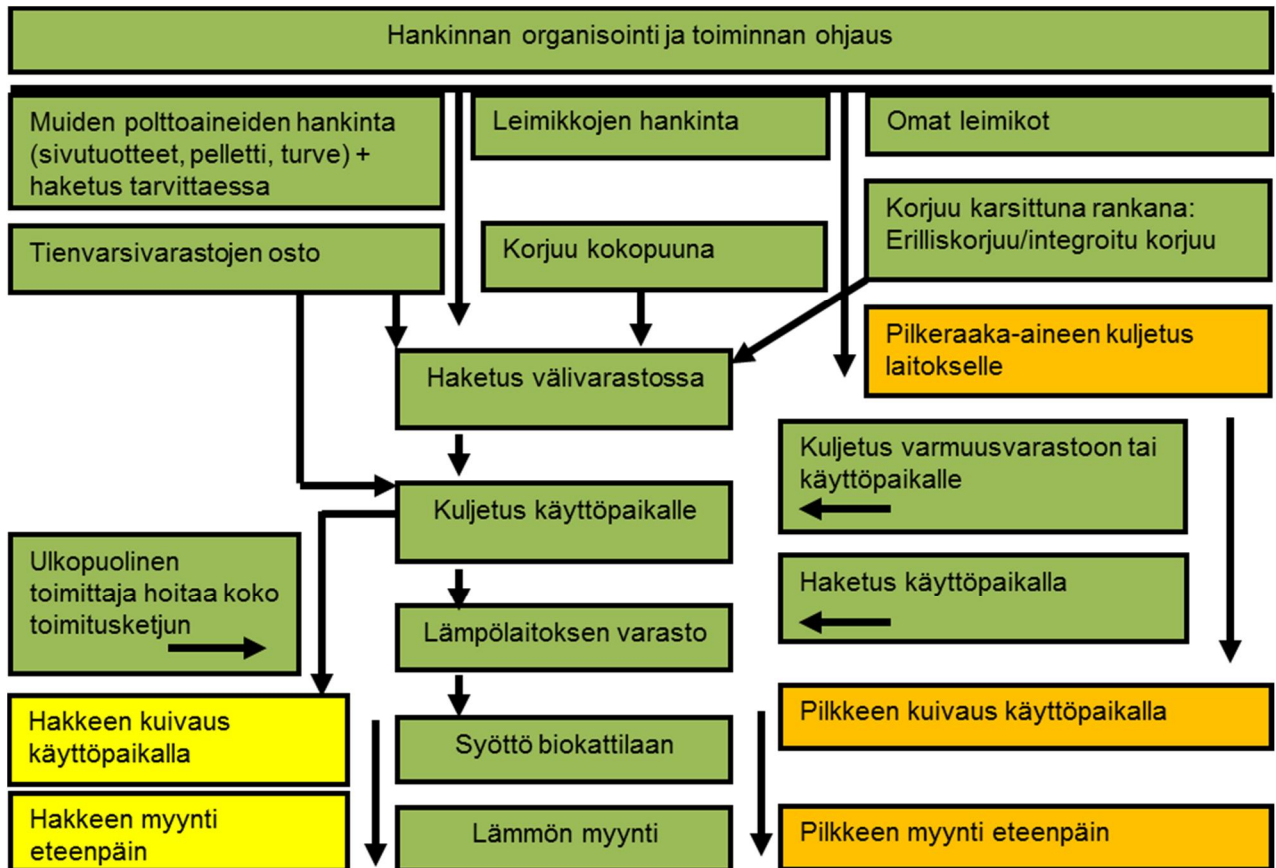
Yksittäiset yrittäjät ovat yksinkertaisin lämpöyrittämisen muoto. Lämpöyrittäjät ovat usein metsä- ja konealan yrittäjiä tai maanviljelijöitä, joilla on koneet ja yritys jo valmiina. Yksittäiset yrittäjät hoitavat yleensä koko lämmöntuotantoketjun eli polttoaineen hankinnan ja toimittamisen sekä lämpölaitoksen hoidon ja ylläpidon. (Tuomi & Solmio 2005) Yksittäisen yrittäjän yritysmuotona voi olla esimerkiksi toiminimi, joka on yritysmuodoista yksinkertaisin ja sen osakkaana voi olla vain yksi henkilö. Itsenäisyyden vuoksi päätöksenteko on nopeaa verrattuna muihin yritysmuotoihin. Toiminimi sopii pienehköille yrityksille, sillä yrittäjä kantaa yksin myös yritystoiminnan riskit. (Sutinen ja Viklund 2005) Toisaalta lämpöyrittäjäalalle on tyypillistä, että yksittäinen maatalousyrittäjä voi toimia yrittäjänä suurensakin lämpölaitoksessa (Lämpöyrittäjyyden selvityshanke, 2005).

Yrittäjärenkaat ovat usein yhtiömuotoisia, yleisesti yhtymiä tai avoimia yhtiöitä (Tuomi & Solmio 2005). Avoimen yhtiön perustamiseen tarvitaan kaksi henkilöä, jotka voivat olla esimerkiksi kommandiittiyhtiö ja luonnollinen henkilö (Sutinen ja Viklund 2005). Yrittäjärenkaan etuina ovat sivutoimisuuden mahdollisuus isommissakin laitoksissa, sillä yrittäjät voivat sopia osa-alueista, joita he hoitavat. Toiminta ei ole myöskään niin sitovaa kuin yhden yrittäjän hoitamisessa kohteissa, koska varamiesjärjestelyt voidaan hoitaa helpommin ja yrittäjärenkaat voivat käyttää myös omia metsiään polttoaineenhankintaan. Yksittäisten yrittäjien ja yrittäjärenkaiden tyypillisiä lämmityskohteita ovat pienehköt, kiinteistöjen omat lämpökeskukset. Lämmityskohteita voivat olla esimerkiksi koulut, teollisuuskiinteistöt tai vanhainkodit. Työn korvaus maksetaan yleensä tuotetun lämpömäärän perusteella. (Kokkonen ym. 2005)

3.1.3 Polttoaineen hankinnan organisointi

Kuviossa 1 on esitetty kaavion muodossa polttoaineen hankinnan organisointi lämpölaitokselle. Osaamisen ja käytettävissä olevan konekaluston mukaan yritys voi tehdä hankintaketjussa olevia vaiheita itse kokonaan, osittain tai ulkoistaa täysin. Ääritapauksissa koko polttoainehuolto voidaan ulkoistaa kolmannelle osapuolelle tai yrittäjä voi myös ostaa leimikot ja korjata, hakettaa ja kuljettaa energiapuun itse.

Perinteisen hakeraaka-aineen hankinnan yhteydessä voi lämpöyrittäjä hankkia myös pilkkeen raaka-ainetta ohjaamalla sopivan läpimitan rangan pilketuotantoon. Pilkkeen ja hakkeen kuivaus voi toimia lämpölaitoksen käyttöastetta ja kannattavuutta parantavana lisätoimena varsinaisen lämmityskauden ulkopuolella.



Kuva 1. Polttoaineen hankinnan organisointi lämpölaitokselle.

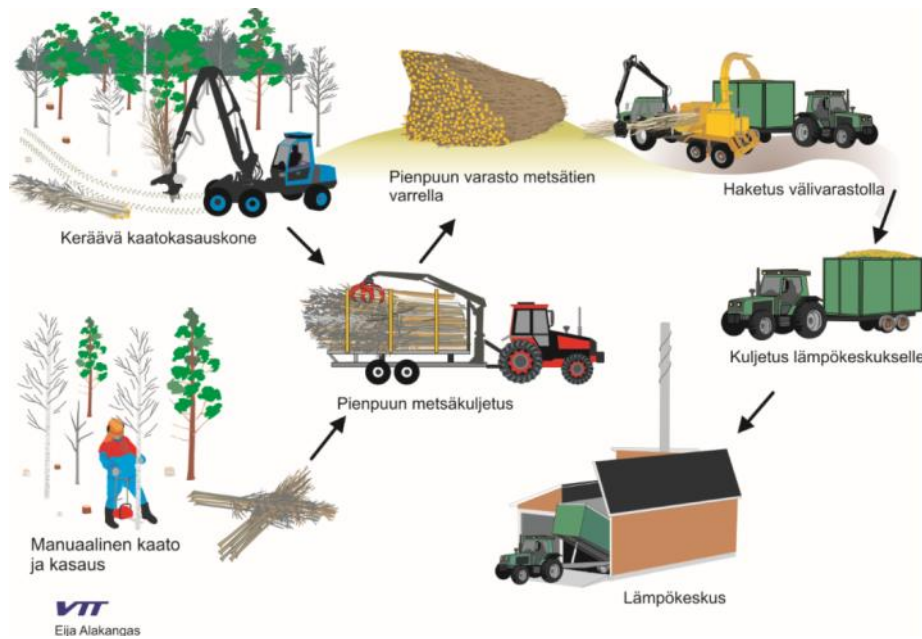
Kuvassa 2 on esitetty pienpuuhakkeen hankintaketjut. Pienpuuta voidaan hankkia kokopuuna tai karsittuna rankana, joko erillisenä energiapuuhakkuuna tai integroituna korjuuna. Integroidussa korjuussa metsäteollisuuden käyttämä ainespuu ja energiakäyttöön menevä puu prosessoidaan erilleen omiin kasoihinsa. Integroidun korjuun kertymiin vaikuttaa puuston ominaisuuksien lisäksi merkittävästi katkonnassa käytettävät asetukset eli kuitupuulle asetettu läpimittavaatimus ja haluttu ainespuupölkyn pituus.

Karsitun rangan eduksi luetaan helpompi kuljetettavuus, hakkeen parempi laatu sekä vähäisemmät ravinnetappiot korjuukohteella. Karsitun rangan korjuussa oksabiomassa puidaan ajouralle parantamaan maaperän kantavuutta. Kuitenkin on huomioitava, että rangan karsinta laskee hakkuun tuottavuutta, pienentää hakkuukertymää ja pidentää kuljetusmatkoja hankinnan ulottuessa yhä etäämmälle lämpölaitoksesta. Yleensä vähimmäiskertymä energiapuukohteella pitäisi olla 25 m³ energiapuuta/ha. (Laitila ym. 2010) Toisaalta karsittua rankaa voidaan korjata kokopuukohteita karummilta kasvupaikoilta. Tämä voi tuoda alueellisesti lisää korjuukohteita hankinnan piiriin. Koistisen ja Äijälän (2006) mukaan pienpuuta voidaan korjata eri leimikkotyypeiltä seuraavasti:

Karsittua rankaa voi korjata kaikilta metsätyypeiltä, mutta kokopuukorjuuta tulee välttää:

- Hoidetuissa kuusikoissa, joissa kuusen osuus runkoluvusta on yli 75 % ennen harvennusta
- Kasvuhäiriölle alttiilta kohteilta
- Kuivahkoilla kankailla, jolla ohut humuskerros metsäpalon tai kulotuksen seurauksena
- Kuivilta kankailta
- Puolukkaturvekankailla tai sitä karummilla turvekankailla

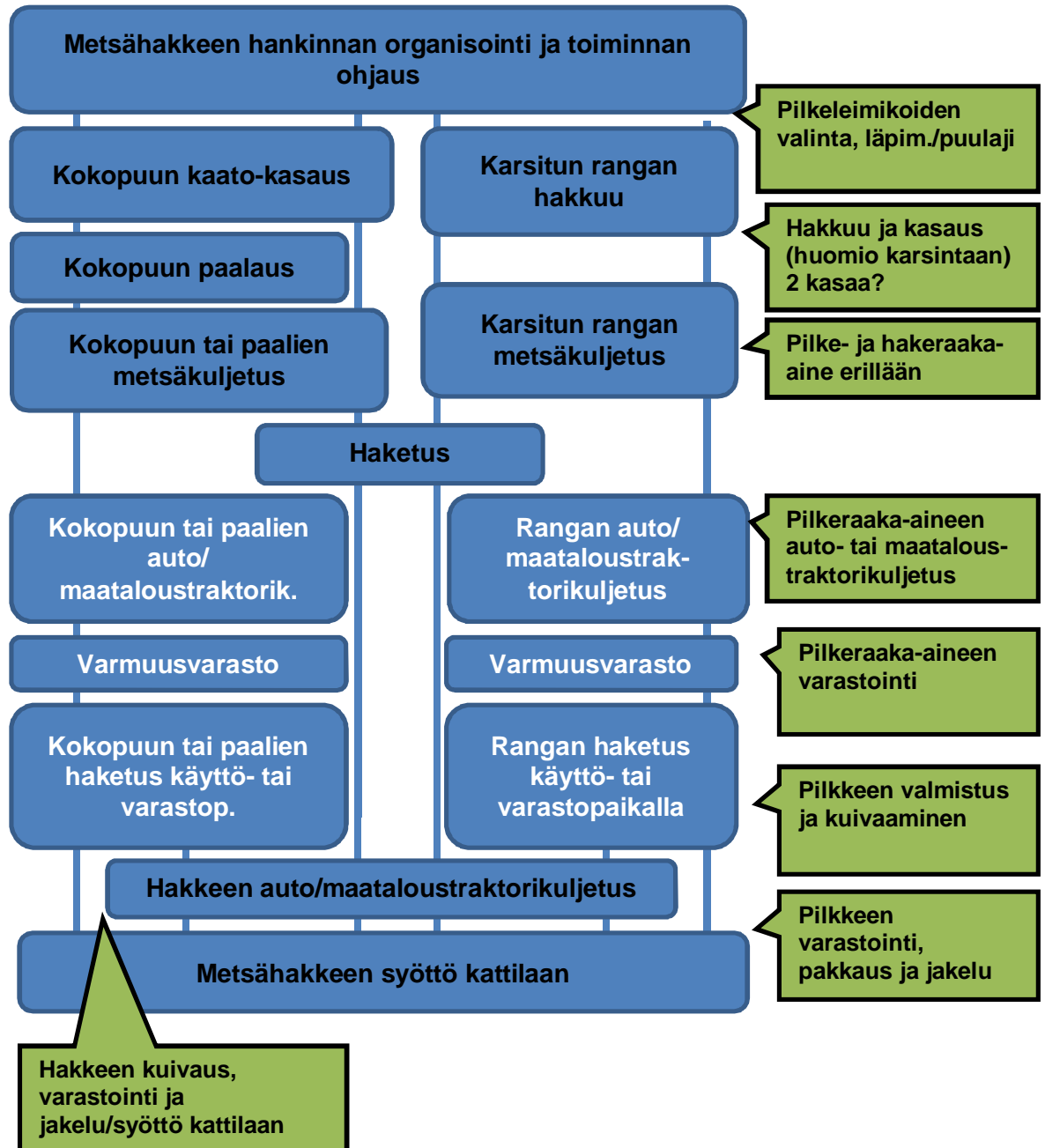
- Metsiköissä, joissa on korjattu latvusmassaa edellisessä uudistushakkuussa tai kokopuuta nykyisen puuston kasvuaikana



Kuva 2. Pienpuuhakkeen hankintaketjut. Kuvassa on esitetty kokopuuhakkeen hankintaketju, mutta käyttämällä keräävää ja karsivaa kouraa voidaan vastaavalla ketjulla hankkia myös karsittua rankaa (rankahaketta).

3.1.4 Pienpuuhakkeen tai pilkeraaka-aineen hankintaketjut

Alla olevaan kaaviokuvaan on koottu pienpuuhakkeen ja pilkkeen raaka-aineen yleisimmät hankintaketjut. Hankinnan eri vaiheet on kuvattu myöhemmin tekstissä.



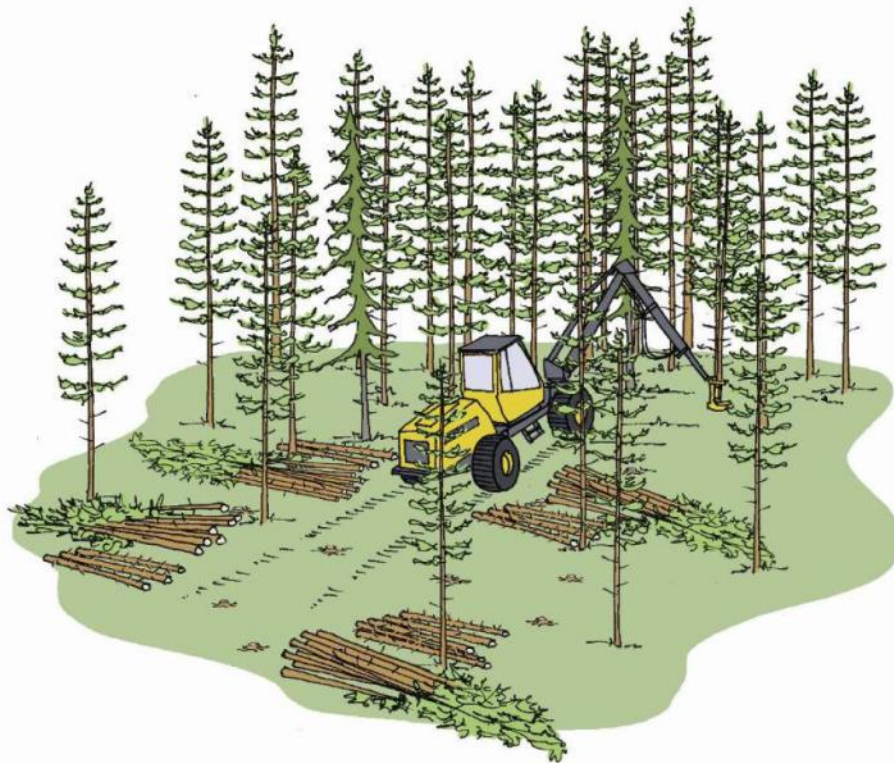
Kuva 3. Pienpuuhakkeen ja pilkkeen raaka-aineen hankinnan yleisimmät hankintaketjut.

Kaato-kasaus (karsinta)

Kaato-kasaus voidaan toteuttaa joko miestyönä tai koneellisesti. Koneelliset menetelmät ovat yleistyneet voimakkaasti ja ovatkin nykyään vallitseva menetelmä. Koneellisessa kaato-kasauksessa alustakoneena voi toimia maataloustraktori, hakkuukone tai korjuri, joka on yhdistelmäkone, jolla toteutetaan sekä hakkuu että lähikuljetus. Rungon koon jäädessä alle 20 litran (pituus 6-10 m, läpimitta $d_{1,3}$ 4-10cm) koneellinen korjuu ei yleensä kannata. Nämä kohteet on korjattava miestyönä. Miestyössä työmenetelmänä on siirtelykaato, jossa kaatuvan puun liike hyödynnetään rankojen kasauksessa kourakasoihin.

Yleensä pienpuuta korjataan joukkokäsittävillä hakkuupäillä, joilla voidaan prosessoida useita runkoja samanaikaisesti. Tällä käsittelymenetelmällä on saatu parannettua hakkuun tuottavuutta verrattuna perinteiseen yksinpuin käsittelyyn. Joukkokäsittely vähentää kouran liikkeitä ja vähentää puukohtaista käsittelyaikaa. Käytössä on sekä syöttörullilla varustettuja karsivia hakkuupäitä että pelkästään katkovia kouria. Katkaisumenetelmänä on joko giljotiinikatkaistu (viiltävä terä) tai ketjusahakatkaistu. Käytettävä hakkuupää määrittelee sen, tuotetaanko karsittua rankaa vai kokopuurankaa.

Integroitu korjuu edellyttää hakkuulaitteelta sekä puiden joukkokäsittely- että karsintaominaisuutta. Käytännössä kaikkiin markkinoilla oleviin kouruihin on saatavilla keräilytoiminto. Joukkokäsittelyn voi kytkeä pois, jolloin hakkuulaite toimii yksiotetarvesterin tapaan. Vastaavasti energiapuun korjuuseen suunnitellut laitteet voidaan varustaa syöttörullilla ja karsimaterillä. Integroituun korjuuseen on kehitetty myös erikoiskoneita kuten pienpuupaalain.



Kuva 4. Integroitu aines- ja energiapuun hakkuu kahden kasan menetelmällä. Piirros: Juha Varhi, © Metsäteho Oy.

Keskimääräinen rungon koko on tärkein hakkuun tuottavuuteen vaikuttava tekijä. Kannattavalle koneelliselle korjuulle asetettu puun minimikoko vaihtelee toimijoiden kesken. Vaihteluun vaikuttaa mm. konekaluston järeys. Esimerkiksi energiapuun korjuussa puun keskivilavuuden kasvu 15 litrasta 30 litraa laskee kokopuun tienvarsihintaa 25 %, jos oletetaan, että hakkuupoistuman hehtaarikertymä pysyy vakiona (Laitila 2008). Hakkuutyössä tuottavuus nousee puun vilavuuden kaksinkertaistumisen ansiosta 40 %.

Kesäkorjuukohteilta hakattu puu voidaan jättää kuivumaan kourakasoihin 2-4 viikoksi. Hyvänä kesänä tällä menettelyllä saadaan puuta oleellisesti kuivattua jo ennen varastointia.

Metsäkuljetus

Metsäkuljetus palstalta tienvarsivarastoon voidaan toteuttaa joko maataloustraktori-metsäperävaunu -yhdistelmällä tai metsätraktorilla. Maataloustraktorikaluston käyttö mahdollistaa jatkettun lähikuljetuksen, jolla pienpuu voidaan kuljettaa keskitettyyn varastoon esimerkiksi useammalta palstalta. Metsätraktorivaihtoehdossa pienpuu kuljetetaan lähimmän kaukokuljetusreitinvarteen. Metsäkuljetus vaikuttaa olennaisesti korjattavan polttoaineen laatuun; kuljettajan on pidettävä tarkasti huolta siitä, ettei maata, kiviä ym. hakkurille haitallisia epäpuhtauksia päädy polttoaineen joukkoon. Sekä puuerän puhtaus että tienvarsivaraston laatu ovat koneen kuljettajan vastuulla.

Varastointi

Tutkimusten mukaan vallitsevan säätilan jälkeen tärkein energiapuun kuivumiseen vaikuttava tekijä on varastopaikka aluspuineen. Peittäminen edistää kuivumista seuraavaksi eniten. Välipuiden avulla on voitu lisätä kuivumista hieman, mutta sen merkitys kuivumiselle on mainituista tekijöistä vähäisin. Hyvä varastopaikka on kuivapohjainen, aukea ja tuulinen sekä suunnattu etelään ja aurinkoon päin. Puukasaa ei saa tehdä sähkölinjan alle. Muuta ympäristöä korkeampi alue on erinomainen paikka varastolle. Hyvän varastokasan ominaisuuksia ovat seuraavat (Lepistö 2010):

- Korkeus 5-7 metriä
- Järeät aluspuut (mahd. myös välipuut)
- Lippa (0,5-1m) päällimmäisestä kerroksesta
- Peitepaperi suojana ja sen päällä riittävästi runkoja pitämään paperi paikoillaan

Varastoimalla pienpuuta kesän yli saadaan kosteus laskemaan kaatotuoreen pienpuun noin 55 %:sta 35 %:n tasolle. Kuivumisen edistämiseksi tienvarsivarastot peitetään. Peittämisen vaikutukseksi on tutkimuksissa saatu 5-7 %-yksikköä (esim. Hillebrand ym. 2009). Jatkamalla varastointia yli toisen kesän, on kosteus saatu laskemaan vielä 5 %-yksikköä, noin 30 % tasolle. Peitemateriaali on paperipohjainen peite, joka voidaan hakettaa puuaineksen mukana. Peittämisen ohella varastopaikan valinnalla on suuri merkitys varastoidun materiaalin kuivumiselle. Varjoisalle tai aukealle paikalle perustettujen varastojen kosteuseroksi on saatu 7-17 %-yksikön kosteuseroja (esim. Hillebrand ym. 2009). Peittämisen ja varastopaikan ohella kesän sääolot vaikuttavat merkittävästi kuivumiseen.



Kuva 5. Kunnollinen varastokasa on peitetty, siinä on kunnolliset aluspuut takaamassa pohjan ilmankiertoa, lippa estämässä sadeveden kulkeutumista kasaan etupuolelta ja riittävä 4-5 m korkeus. Kuva: Tanja Lepistö.

Varastoinnissa tulisi huomioida myös seuraavat seikat:

- Valitaan kuiva, tuulinen varastopaikka
- Varastopaikka raivataan ennakkoon
- Hakkurin tulee ylettyä varastokasaan
- Hakkurin ja hakeauton on mahdollista varastopaikalle rinnakkain
- Hyvä kääntöpaikka myös täysperävaunulle lähellä haketuspaikkaa

Haketus

Lämpöyrittäjäkokoluokan energiapuun hankintaketjussa haketus tapahtuu pääasiassa tienvarsivarastopaikoilla. Käytössä on usein maataloustraktorista voimansa saavaa laikka- tai rumpuhakkurikalustoa. Rumpuhakkuri on laikkahakkuria moniruokaisempi ja sietää epäpuhtauksia paremmin. Suuremmassa polttoaineen hankinnan mittakaavassa ja yleensä pitemmällä kuljetusmatkoilla käytetään raskaampaa kuorma-autoalustaista hakkuria, jonka tuottavuus on traktorikalustoa parempi. Lyhyillä kuljetusmatkoilla kuljetuksessa käytetään usein traktori-perävaunu -yhdistelmää. Koska hakerekat - ja traktori-perävaunu -yhdistelmät kuormataan suoraan rekan kuormatilaan hakettaen, lyhentää hakkurin suuri tuottavuus odotusaikoja ja parantaa hakkeen kuljetuksen tuottavuutta. Joka tapauksessa haketuksen ja kuljetuksen synkronointi on ensisijaisen tärkeää kalliin kaluston odotusaikojen minimoimiseksi.

Tylsillä terillä haketus on hidasta ja hakkeen laatu huonoa. Tylsät ja katkenneet terät ovat seurausta joko varaston epäpuhtauksista tai siitä, että hakkurin terien huollosta ei ole huolehdittu. Hyvälaatuista varastokasaa hakettaessa pystyy huolletulla hakkurilla hakettamaan päivän työn ilman terien huoltotaukoa. Puun aiheuttama terien vähäinen tylsyminen ja siitä aiheutuva pieni huolto voidaan tarvittaessa tehdä hakekärryn tyhjentämisen tuoman tauon aikana. Erityisesti pienkohteille myytävässä hakkeessa on tasaisella laadulla iso merkitys. Monet arvostavat lämmityksessä vaivattomuutta. Tylsillä terillä hakettu hake sisältää paljon pitkiä tikkuja, jotka voivat aiheuttaa käyttöpaikalla kuljettimen tukkeutumista ja sitä kautta polttoaineen syöttöhäiriöitä. (Lepistö 2010)

Varmuusvarastot ja terminaalit

Koska hakkeen kosteus saattaa aiheuttaa säilymisongelmia ja koska lämpö- tai voimalaitoksen varastointimahdollisuudet ovat rajalliset, varastoidaan pienpuu yleensä rankana tai kokopuuna. Polttoaineen ympärivuotisen saatavuuden varmistamiseksi tarvitaan varastoja, joista polttoaine voidaan toimittaa kelistä ja vuodenajasta riippumatta. Tienvarsivarastojen ohella saattaa varmuusvarastona toimia esimerkiksi voimalan läheisyydessä oleva muutaman viikon polttoainetarvetta vastaava ranka- tai kokopuupino. Pienillä laitoksilla ei yleensä ole omaa murskaus/käsittelykalustoa ja varmuusvaraston hyödyntäminen edellyttää mobiiliin haketus- ja käsittelykaluston käyttöä.

Laitoksen polttoainehuolto voi osittain perustua myös polttoaineterminaalien käyttöön. Terminaaleille puupolttoaineita kerätään varastoitavaksi ja käsiteltäväksi.

Polttoaineen laatu

Nyrkkisääntö on, että mitä pienempi puuta käyttävä laitos on, sitä korkeammat ovat sen polttoaineelle asettamat laatuvaatimukset. Laadukkain hake syntyy karsitusta rangasta, seuraavaksi paras laatu saadaan kokopuusta. Raaka-aineen laadun ohella haketta polttava laitos ja käytettävä hankintaketju asettavat muitakin vaatimuksia korjattavalle materiaalille. Kosteuden tulisi olla kiinteistö- ja maatalouskokoluokassa (20-200 kW) alle 25 % ja lämpölaitoskokoluokassa (200-1000 kW) alle 40 %. Suuremmat laitokset kuten kunnan aluelämpölaitoskokoluokassa (>1 MW) ovat vähemmän vaativia polttoaineen laadun suhteen. Kosteus saa olla yli 40 % ja syöttölaitteistot sietävät palakoon vaihteluita paremmin. Hakkeen palakoko tulee olla laitteistolle soveltuvaa, jotta kuljettimet toimivat. Perinteisesti raaka-aine kuivataan luonnonkuivauksena tienvarsivarastoissa.

Kosteus ja epätasaisuus hakkeen palakoossa (tikut yms.) heikentävät hakkeen laatua ja poltto-ominaisuuksia. Huonolaatuinen hake aiheuttaa mm. seuraavia haittoja (Lepistö 2010):

- Märkä hake alentaa polttoaineen lämpöarvoa, lisää laitoksen sähkönkulutusta ja alentaa lämpölaitoksen hyötysuhdetta.
- Pidempiaikaisessa varastoinnissa märkä hake voi alkaa hajota ja lämmetä, minkä seurauksena hakkeen energiasisältö alentuu ja ääritapauksessa hake voi syttyä itsestään palamaan. Myös homeongelmat voivat lisääntyä.
- Märkä hake voi jäätyä talvella varastossa, jolloin hakkeen syöttö kuljettimelle häiriintyy.
- Märkä hake lisää tuhkan määrää.
- Hakkeen syöttö kattilaan voi häiriintyä kuljettimella eri syistä. Tällaisia voi olla pitkien tikkujen aiheuttama hakkeen jumiutuminen tai kosteuden tuottama häiriö optisissa antureissa.

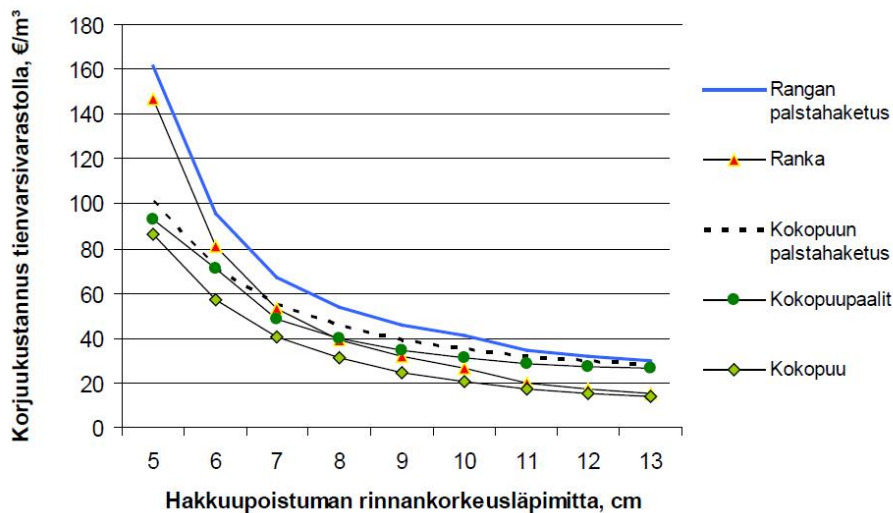
Lämpöyrittäjän kannattaisi luonnollisesti käyttää mahdollisimman korkealaatuista polttoainetta, joka toimii prosessissa erinomaisesti eikä aiheuta toimintahäiriöitä. Korkealaatuinen polttoaine on kuitenkin yleensä hinnaltaan kallista ja lämmöntuotannon kannattavuus kärsii. Yrittäjän ratkaistavaksi jää sopivan polttoaineen valinta ja sen tuomien etujen ja haittavaikutusten vertailu. Hyvälaatuisen ja siksi myös kalliimman polttoaineen käytöllä säästetään kuitenkin laitoksen huolto- ja ylläpitokuluissa verrattuna heikkolaatuisen hakkeeseen, joka aiheuttaa enemmän huoltotoimenpiteitä ja varajärjestelmän käyttöä.

Lämpöyrittäjällä on mahdollisuus käyttää useita erilaisia polttoaineita lämpölaitoksella. Näiden polttoaineiden hankinta voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Polttoaine voidaan ostaa suoraan lämpölaitoksen varastoon toimitettuna tai toisaalta yritys voi huolehtia koko energiapuun hankintaketjusta tai haluamistaan osista itse. Erilaiset variaatiot hankintaketjuissa antavat mahdollisuuden yrittäjälle vaikuttaa liiketoiminnan kannattavuuteen (Ylä-Mattila 2011).

Hankintaketjun kustannukset

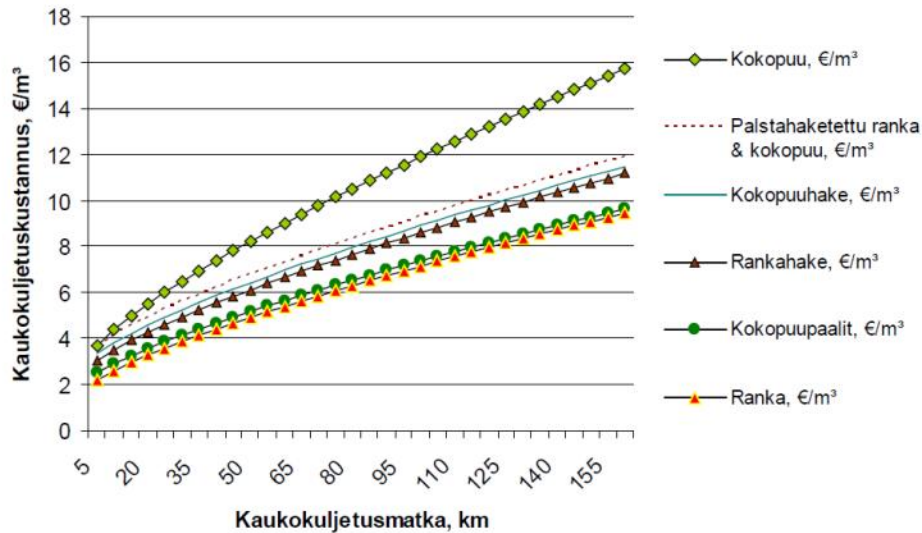
Hakkeen tuotantokustannuksiin vaikuttavat puun kantohinta, hakkuu, metsäkuljetus, haketus ja hakkeen kaukokuljetus. Energiapuun korjuun kallein kustannuserä on hakkuu. Sen kustannuksiin vaikuttavat erityisesti poistettavan puuston keskijäreys ja korjattavan energiapuun määrä. Erityisesti hoitamattomien metsien hakkuukustannukset ovat korkeat, koska poistettavan puuston keskijäreys on pieni ja puuston suuri tiheys hidastaa koneen tai metsurin työskentelyä.

Toiseksi suurimman kustannuserän muodostaa metsäkuljetus. Kokopuuna korjatun energiapuun metsäkuljetuskustannukset kiintokuutiota kohti ovat suuremmat kuin rankana korjatun energiapuun, koska rankana korjattu energiapuu mahtuu tiiviimmin kärryyn. Metsäkuljetuskustannuksia voidaan vähentää kasvattamalla kärryn tilavuutta esimerkiksi pidemmällä pankoilla. Metsäkuljetus on hieman kalliimpaa miestyönä korjatussa leimikossa kuin koneellisesti korjatussa, koska miestyön jäljiltä kourakat jäävät pienemmiksi ja ne ovat kauempana ajourasta. Pieniläpimittaisen harvennuspuun korjuukustannus tienvarsivarastolla (hakkuu + metsäkuljetus) on esitetty kuvassa 5 (Laitila 2012).



Kuva 6. Pieniläpimittaisen puun korjuukustannus tienvarsivarastolla. Korjuukustannus tienvarsivarastolla = Hakkuu + (palstahaketus) + metsäkuljetus. Laskelmassa hakkuupoistuma on 1500 runkoa hehtaarilta kaikilla d1.3 m läpimitoilla (Laitila 2012).

Kaukokuljetuksen kustannuksiin vaikuttavat matka, kuorman tiiviys ja kuljetettavan tavarán määrä. Harvennuspuun kaukokuljetuskustannukset eri korjuutavoilla on esitetty kuvassa 6 (Laitila 2012).



Kuva 7. Harvennuspuun autokuljetuskustannukset eri korjuutavoilla (Laitila 2012).

Polttoaineen hinta vaikuttaa kustannuksiin kaikissa korjuun ja kuljetuksen vaiheissa. Haketuksen kustannuksiin vaikuttavat muun muassa varastopaikan koko (koneiden siirrot), haketuksen tuottavuus (kuljetusauton odotusajat ja hakkurin tuottavuus), konekeskeytys- ja huoltoajat, hakkurin polttoaineenkulutus ja käyttöaste.

Koska kustannukset vaihtelevat alueellisesti ja kustannuksiin vaikuttava polttoaineen hinta ei ole vakaa, on tarkkoja kustannuksia vaikeata esittää. Alla olevassa taulukossa on esitetty lukuja keskimääräisen energiapuuharvennuksen ja haketuksen kustannukset sekä myynnistä ja tuista saatavat tulot (Lepistö 2010).

Energiapuun korjuutuki €/kiinto m ³	7			
Nuoren metsän hoidon tuki€/ha	252,6			
Hakkeen hinta laitokselle toimitettua €/MWh	17			
Hakkeen energiasisältö MWh/i-m ³	0,8 (vaihteluväli 0,7-0,9 MWh/i-m ³)			
Hakkuukertymä m ³ /ha	50			
Lähikuljetusmatka	100			
1 kiinto-m ³ = 2,5 irtto-m ³				
	€/MWh	€/irtto m ³	€/kiinto-m ³	€/hehtaari
Hakkeesta saatava hinta	17	13,6	34	1700
Energiapuun korjuutuki	3,5	2,8	7	350
NMH tuki (pinta-alatuki)	2,525	2,02	5,05	252,6
Tulot yht	23,025	18,42	46,05	2302,6
Hakkuukustannus	8,5	6,8	17	750
Metsäkuljetus	3,5	2,8	7	350
Haketus+kaukokuljetus	7,5	6	15	750
Hallinto + työnjohto	2	1,6	4	100
Menot yht	21,5	17,2	43	1950
Kate	1,525	1,22	3,05	352,6

Kuva 8. Energiapuuharvennuksen kustannukset ja tulot (Lepistö 2010 ja Laitila 2012).

Energiapuuerän rahallinen arvo nousee merkittävästi puun kuivuessa. Tuoreen havupuun kosteus on yli 50 prosenttia. Huolellisella palsta- ja varastokuivauksella energiapuu voidaan kuivattaa jopa 30 prosentin kosteuteen. Esimerkiksi sadan irtokuution ($100 \text{ i-m}^3 = \text{n. } 40 \text{ kiinto-m}^3$) hake-erän arvo nousee tällöin viime vuosien keskiarvohinnoilla laskettuna reilusti yli sata euroa. Kuivan hakkeen paremman käytettävyyden takia energiapuun laatu palvelee hakkeen käyttäjää. Energiapuun toimittaja taas hyöttyy laadusta saamansa paremman hinnan kautta, mikäli hakkeen käyttäjä maksaa polttoaineestaan energiasisällön mukaan kuten useimmiten tehdään.

3.2 Hakeraaka-aineen varastointi avoimilla paikoilla ja kuivumisen nopeuttaminen

3.2.1 Raaka-ainevarastojen perustaminen ja koejärjestelyt

Tässä tehtävässä tutkittiin erilaisten hakeraaka-ainevarastojen kuivumista ja raaka-aineen laatuun vaikuttavia tekijöitä avoimella varastopaikalla. Aikaisemmissa tutkimuksissa (mm. Nurmi & Hillebrand 2007) varastoja on yleensä seurattu tyypillisillä tienvarsivarastopaikoilla, jotka sijaitsevat enemmän tai vähemmän metsän varjossa. Varsin suppealla aineistolla vastaavaa avoimen paikan tutkimusta tehtiin myös Suomen metsäkeskuksen hankkeessa 'Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen' (Erkkilä et al. 2010), mihin haluttiin nyt täydennystä.

Tutkittavia kasoja tehtiin yhteensä seitsemän ja ne sijoitettiin vanhaan sorakuoppaan Saarijärven Kolkanlahteen. Kukin kasa oli n. 20 metriä leveä ja 3-4 metriä korkea. Kokopuuirtokasojä näistä oli kaksi, joista toinen oli mäntyvaltainen ja toinen puhdas lehtipuukasä. Karsitusta rangasta tehtiin viisi varastoa, joista neljä oli normaalisti tehty ilman mitään lisäkasittelyjä ja yksi, jossa rangat oli osittain aisattu. Tässä tapauksessa se tarkoitti kuoren rikkomista ajamalla rankaa muutaman kerran hakkuukoneen syöttörullien läpi. Puulajina aisatussa kasassa oli mänty, kahdessa muussa lehtipuu ja lopuissa pääasiassa havupuu. Yhtä lukuun ottamatta kaikki kasat peitettiin juhannuksen aikoihin tyypillisellä energiapuun suojapaperilla. Kokopuukasat peitettiin kahdella rinnakkaisella koko paperin levyisellä suikaleella, kun taas karsitut rungot katettiin vain yhdellä, neljä metriä leveällä soirolla. Vertailun vuoksi kasa, jossa oli karsittua mäntyrankaa 90 % ja lehtipuuta 10 %, jätettiin peittämättä (Kuva 10, vihreä käyrä).



Kuva 9. Koko- ja rankapuun varastokasat ennen peittämistä. Kuva: Ismo Tiuhonen.

Ensimmäiset neljä varastokasaa tehtiin huhtikuussa ja loput kolme toukokuussa 2013. Kosteusnäytteitä otettiin kaikkiaan kuudesti lokakuun loppuun mennessä. Ne otettiin purkamalla varastokasaa puutavarakuormaimen kouralla ja valitsemalla edustavat näytteet (2 kpl/kasa/näytekertä) kasan profiilista. Seuraavat näytteet otettiin aina edellisen näytteenottokerran vierestä aiemmin purkamattomasta kohdasta. Näytteet hakettiin niistä määritettiin kosteus laboratorioissa. Kuivuminen kiinnitettiin vallitsevaan säähän hankkimalla paikalliset säätiedot Ilmatieteen laitokselta. Näin raaka-aineiden kuivuminen kyseisenä vuonna voitiin suhteuttaa pitkän aikavälin säätietoihin. Tutkimuksen toteutuksessa ja tulosten arvioinnissa hyödynnettiin lisäksi aikaisemmin VTT:ssä tehtyjen varastointitutkimusten tuloksia (Hillebrand & Nurmi, 2004; Nurmi & Hillebrand, 2007; Erkkilä ym.; 2010; Röser ym., 2010, 2011).

3.2.2 Tutkimusalueella vallinnut säätila

Liitteessä 1 on esitetty Saarijärven Kolkanlahden varastoalueella tutkimuksen aikana vallinnut säätila ja sitä on verrattu keskimääräisiin pitkän ajan keskiarvoihin.

Kumulatiivinen sadesumma oli hieman keskimääräistä pienempi kesän aikana, mutta elosyyskuussa se oli selvästi normaalia vähäisempi jääden keskiarvosta noin 50 mm kahden kuukauden jaksolla. Samaan aikaan myös haihdunta oli hieman tavanomaista suurempi. Tämä tarkoittaa sitä, että kesällä kuivausolosuhteet olivat jonkin verran tavallista paremmat, mutta syksyllä varastojen kuivana säilymisen suhteen jopa erinomaiset.

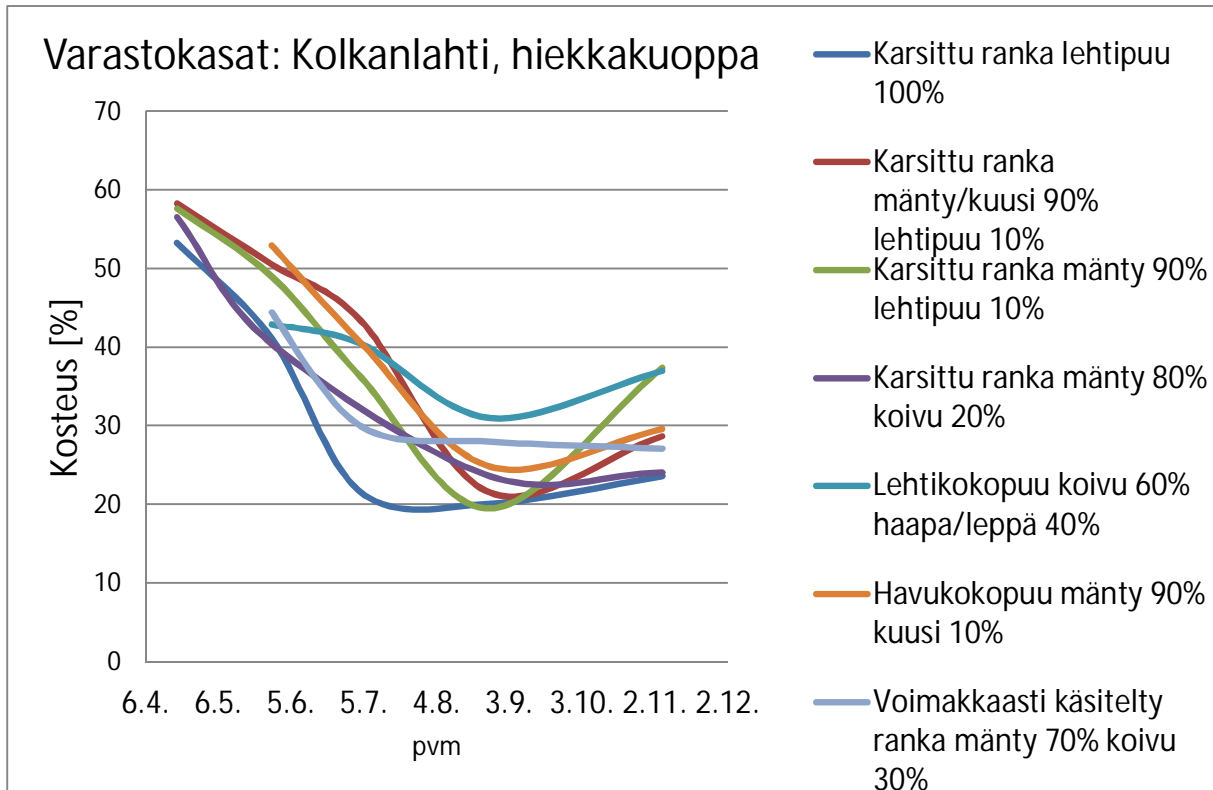
3.2.3 Varastoseurannan tulokset

Kuivatusaikana vallitsevien säiden lisäksi varastopaikan valinnalla on erittäin suuri merkitys energiapuun kuivumiseen kattamattomassa ulkovarastossa. Hyvien tuloksien saamiseksi energiapuu tulisi varastoida aurinkoiselle ja tuuliselle paikalle, jotta veden haihtuminen olisi mahdollisimman suurta. Käytännön logistisista syistä pinot yleensä sijoitetaan metsäteiden varteen, jotka eivät aina ole optimaalisia kuivauspaikkoja varjoisuuden, maakosteuden tai pienilmaston takia.

Aiemmissa varastotutkimuksissa on yleensä seurattu metsäteiden varsille perustettuja energiapuuvarastoja. Tietoja haluttiin täydentää aukean varastopaikan kuivumistuloksilla. Olettamuksena oli, että aukealle sijoitetut rangat ja kokopuut kuivuvat nopeammin kuin metsässä varastoidut. Toisaalta haluttiin saada lisätietoa, kastuvatko aukealle varastoidut puut nopeammin kuin esimerkiksi metsätien varteen sijoitetut.

Oletuksen mukaisesti aukealla puut kuivuivat erittäin hyvin. Kaikki varastokasat saavuttivat n. 30 % tai sitä pienemmän kosteustason. Karsittu ranka kuivui selvästi nopeammin ja paremmin kuin kokopuu, sillä karsinnan yhteydessä puun kuori rikkoontuu. Voimakkaasti käsitelty mäntyranka kuivui paremmin kuin normaalisti karsittu, mutta kuitenkin heikommin kuin puhdas lehtipuuranka. Karsitun lehtipuun lähtökosteus oli alempi kuin havupuun ja se kuivui myös nopeammin. Sen sijaan lehtikokopuu jäi alemmasta lähtökosteudesta huolimatta lähes 10 prosenttiyksikköä kosteammaksi kuin havupuu. Tämä johtuu siitä, että karsinnasta johtuva kuoren rikkominen nopeuttaa lehtipuun kuivumista enemmän kuin havupuun.

Kuvaan 10 on koottu kaikki seurannassa olleiden kasojen kosteuskäyrät. Siitä näkyy myös peittämissä vaikutus. Ainoa kasa, jota ei peitetty, oli karsittu mäntyrankakasa (kuvasa vihreä käyrä; kasassa mäntyä 90 % ja lehtipuuta 10 %). Peittämissä vaikutus oli tässä tapauksessa vajaa 10 prosenttiyksikköä loppukosteudessa.



Kuva 10. Saarijärvellä sijainneiden koko- ja rankapuun varastokasojen keskimääräisten kosteuksien muutokset.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu (esim. Erkkilä ym. 2010 ja Hillebrand 2004), että kesän kuivumisjakson jälkeen ulkona varastoitu energiapuu alkaa kostua uudelleen melko nopeasti elo-syyskuusta alkaen riippuen paikallisesta säätilasta. Ennen pakkaskautta varastoidun puun kosteus voi hyvinkin nousta 5-10 % ja jopa enemmän, mikäli varastopaikka on valittu huonosti. Tällöin esimerkiksi maakosteus ja/tai valumavedet voivat entisestään lisätä pinon kastumista.

Saarijärven varastointitutkimus tukee hyvin aikaisempia tutkimuksia hyvän ja nopean kuivumisen suhteen aukealla ja tuulisella varastoalueella. Kyseiset aukealla paikalla varastoidut energiapuukasat eivät näyttäneet myöskään kastuvan enemmän tai nopeammin kuin tyypillisessä metsätievarastossa keskimäärin. Toisaalta on huomioitava, että alkusyksy oli keskimääräistä vähäsateisempi.

3.3 Ranka- ja kokopuuhakkeen säilyminen varastossa

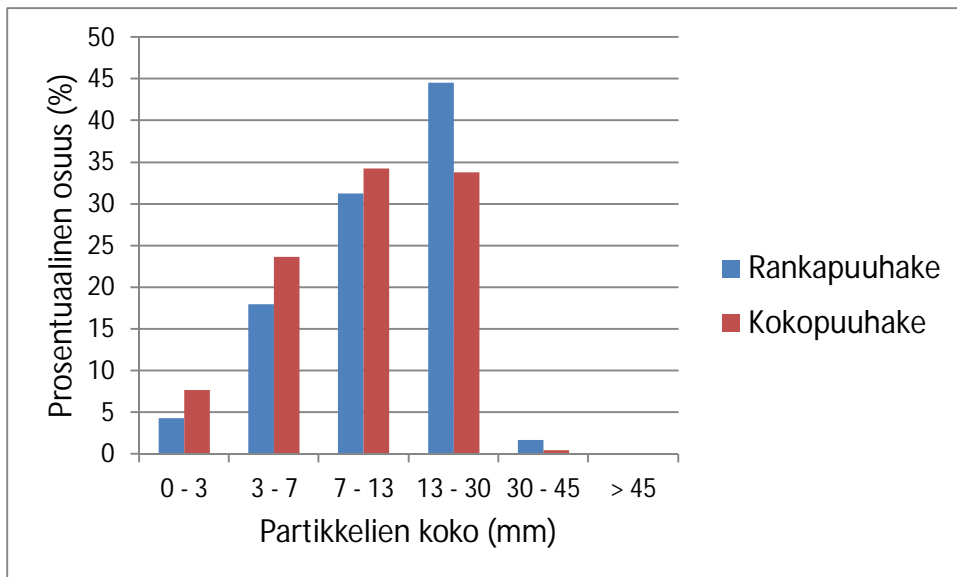
3.3.1 Hakevarastojen perustaminen ja koejärjestelyt

Tässä tehtävässä tutkittiin metsähakkeen säilymistä varastoauomoissa kahdella eri kosteuteen kuivuneella hakkeella. Hake tehtiin sekä mäntykokopuusta että –rangasta ja koehakekasat sijoitettiin aukealla kentälle Keuruun lämpövoiman voimalaitoksen viereen ja läheiseen tyhjiin kylmillään olevaan varastohalliin. Kummastakin hakelaadusta haluttiin tehdä neljä eri hakekasaa kooltaan 200-300 irtom³ (10-15 x 7 x 3 m) siten, että kahden kasan alkukosteus oli 20 – 25 % ja toisten kahden 35 – 40 %. Hakkeiden tavoiteltuihin alkukosteuksiin pyrittiin seuraamalla raaka-ainevarastojen kosteutta kosteusnäyttein, jotta voitiin ennakoita tavoiteltu kosteuden ajankohta ja hakettaa raaka-aine. Kaikkein kuivinta haketta oli tarkoitus vielä kuivattaa asfalttikentällä riittävän alhaiseen kosteuteen pääsemiseksi. Vuoden 2012 kevään säät olivat kuitenkin siinä määrin haasteelliset, että hakkeiden todelliset alkukosteudet jäivät jonkin verran suunniteltua korkeammiksi (ks. Taulukko 1).



Kuva 11. Ulkona varastoituja hakekasoja. Etualalla kokopuusta ja takana rangasta tehdyt kasat. Kasoista puolet peitettiin muovilla ja niihin asennettiin lämpötila- ja ilmankosteusanturit. Kuva: Antti Heikkinen

Valmistetuille hake-erille tehtiin myös seulonta-analyysi, jotta voitiin varmistaa sekä ranka- että kokopuusta tehdyn hakkeen olevan kutakuinkin samaa palakokoa. Palakoko ja hienoaineksen määrä vaikuttavat kuivumisnopeuteen ja lämpötilan muutoksiin varastoauressa. Seulonta-analyysin tulokset on esitetty alla olevassa kuvassa.



Kuva 12. Tutkimuskasoissa olleiden hakkeiden palakokojakauma.

Kaikkein kuivin hake jouduttiin erikseen kuivaamaan kesäkuussa 2013. Käytännössä se tehtiin niin, että valmis hake (alkukosteus n. 45 %) levitettiin asfalttikentälle ohueksi kerrokseksi (maksimissaan 10 cm) viiden päivän ajaksi. Hakemattoa käännettiin traktorin perään asennetun kääntäjän avulla päivittäin. Puolikuiva hake kuivuu asfaltilla ohuena kerroksena erittäin hyvin, mutta riskinä on sade, joka voi nopeasti uudelleen kastella koko

hake-erän. Näin kävi heti kuivauksen alussa, mutta siitä huolimatta hake ehti kuivua riittävästi loppuviikon aikana.



Kuva 13. Kaikkein kuivimmat hakkeet kuivattiin levittämällä ne ohueksi kerrokseksi asfalttikentälle ja kääntämällä niitä päivittäin. Kuva: Antti Heikkinen

Alkukosteuksissa 42 % ja 32 % olleita hakkeita varastoitii noin vuoden sekä ulkona asfalttikentällä että katoksessa betonipohjalla. Hakekasan peittämisen vaikutus ulkona olevan hakkeen säilyvyyteen ja kosteuteen tutkittiin peittämällä kasan toinen puoli pressulla.



Kuva 14. Kylmään varastohalliin sijoitetut kokopuu- (vasen) ja rankahakekaset (oikea). Kuva: Antti Heikkinen

Hakkeen kosteutta ja säilyvyyttä hakekasoissa seurattiin säännöllisin välein ottamalla varastokasoista kosteusnäytteitä kairalla. Näytteiden kosteudet mitattiin ja mahdolliset näkyvät laadunmuutokset rekisteröitiin. Varastokasan lämpenemistä seurattiin lämpötila-anturien ja erillisten lämpömittarien avulla, joita asennettiin neljä kuhunkin aumaan; kaksi vertikaalisesti kasan ylä- ja alakolmannekseen. Horisontaalisesti anturit sijaitsivat pitkulaisen kasan kokonaispituuden suhteen noin kolmanneksen kummastakin reunasta.



Kuva 15 Hakekasoista otettiin näytteet muoviputken ja kairan avulla. Kuva: Kari Hillebrand.

Kostea 45 – 60 %:n haketta varastoitettiin lisäksi peittämättömänä kentällä kahdessa kasassa, joista toista sekoitettiin ja toisen annettiin olla koskemattomana. Nämä varastot tehtiin vasta vuonna 2013 kesäkuussa ja seuranta jatkui syyskuun loppuun. Sekoitus tehtiin levittämällä kasa pyöräkuormaajalla asfalttikentälle, jossa se käännettiin perusteellisesti ja sitten kasattiin uudelleen. Riittävän edustavan mittausaineiston saamiseksi kumpaankin aumaan asennettiin kolme dataloggeria kasan korkeimman kohdan poikkileikkaukseen vertikaalisesti tasavälein. Perusteellinen sekoitus suoritettiin kerran 5.6.2013.

Yhteensä tutkittavia hakekasoja oli 10 kappaletta, taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Tutkimuksessa seurattut hakkeen varastokasat.

No	Hakelaatu	Alkukosteus, %	Varastointipaikka	Peitetty
1	Kokopuuhake	42	Avoin kenttä	Puolet
2	Kokopuuhake	42	Katoksessa	Ei
3	Kokopuuhake	32	Avoin kenttä	Puolet
4	Kokopuuhake	32	Katoksessa	Ei
5	Rankahake	42	Avoin kenttä	Puolet
6	Rankahake	42	Katoksessa	Ei
7	Rankahake	32	Avoin kenttä	Puolet
8	Rankahake	32	Katoksessa	Ei
9	Tuore rankahake	n. 50	Avoin kenttä	Ei
10	Tuore rankahake	n. 50	Avoin kenttä	Ei katetta, sekoitus

Kasat 1-8 tehtiin 6/2012 ja niihin asennettiin lämpötila- ja kosteusanturit
 Kasat 9-10 tehtiin 5/2013

3.3.2 Varastoalueella vallinnut säätila

Liitteessä 2 on esitetty Keuruun varastoalueella vallinnut säätila, joka mitattiin VTT:n kenttäsääasemalla. Pitkän ajan sadannan ja haihdunnan keskiarvot hankittiin Ilmatieteen laitokselta. Vuoden 2012 kesä ja syksy olivat selvästi keskimääräistä sateisempia, jopa siinä määrin, että haihduntasumma jäi lähes jatkuvasti alle kumulatiivisen sadannan. Seurantajaksolla 29.6.-28.9. kumulatiivinen haihdunta jäi yli 230 mm alle pitkäaikaisen keskiarvon. Ulkona varastoidun energiapuun kuivumisen kannalta olosuhteet olivat siis erittäin huonot. Tavallisesti kuivumiskausi jatkuu aina elo-syyskuulle ja vasta sitten puun kosteudet alkavat uudelleen nousta, mutta nyt kastuminen alkoi jo heinäkuussa.

Pieni poikkeus huonoihin sääoloihin sattui elokuussa, jolloin sadanta alitti pitkän ajan keskiarvon. Vastaavasti haihdunta nousi tällöin lähelle pitkän ajan keskiarvoja.

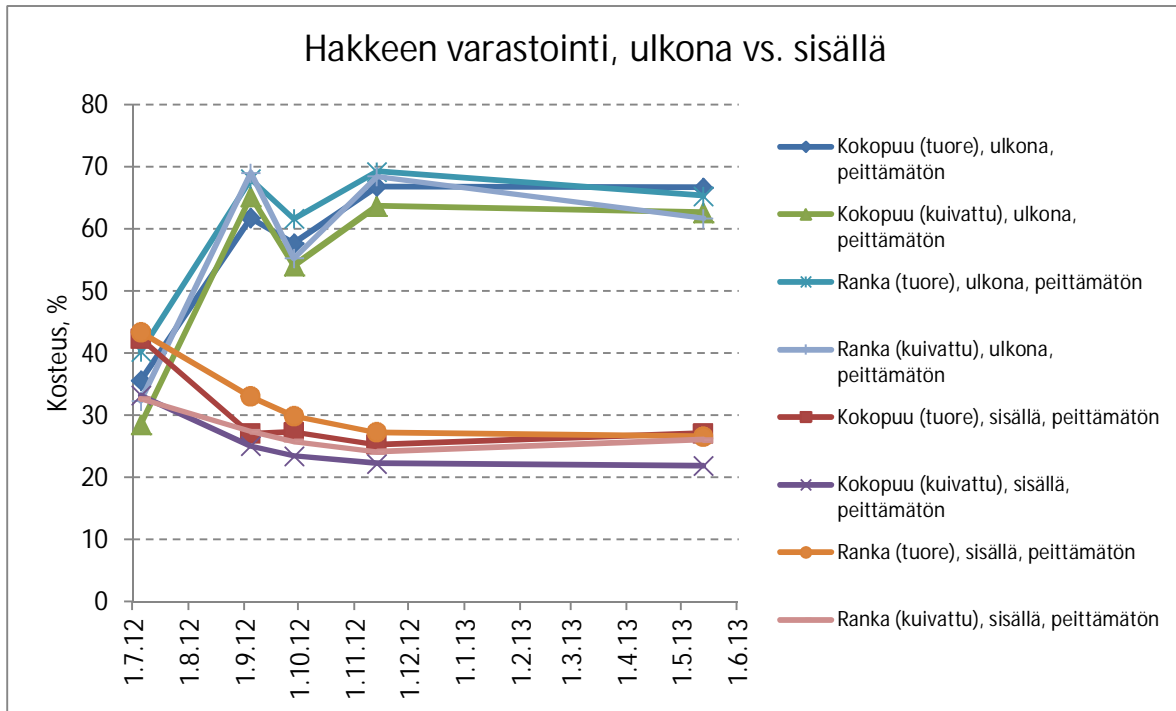
3.3.3 Varastoseurannan tulokset

Kosteudet

Varastoitujen ranka- ja kokopuuhakekasojen kosteuksia seurattiin kymmenen kuukauden ajan ottamalla niistä useita kosteusnäytteitä. Pakkaskauden alettua marraskuussa kasat tosin jäätyivät niin, ettei näytteitä voitu enää ottaa ennen kevättä. Tällä ei kuitenkaan ollut tuloksiin merkitystä, sillä talven aikana varastossa olevan puun keskimääräinen kosteus ei juurikaan muutu.

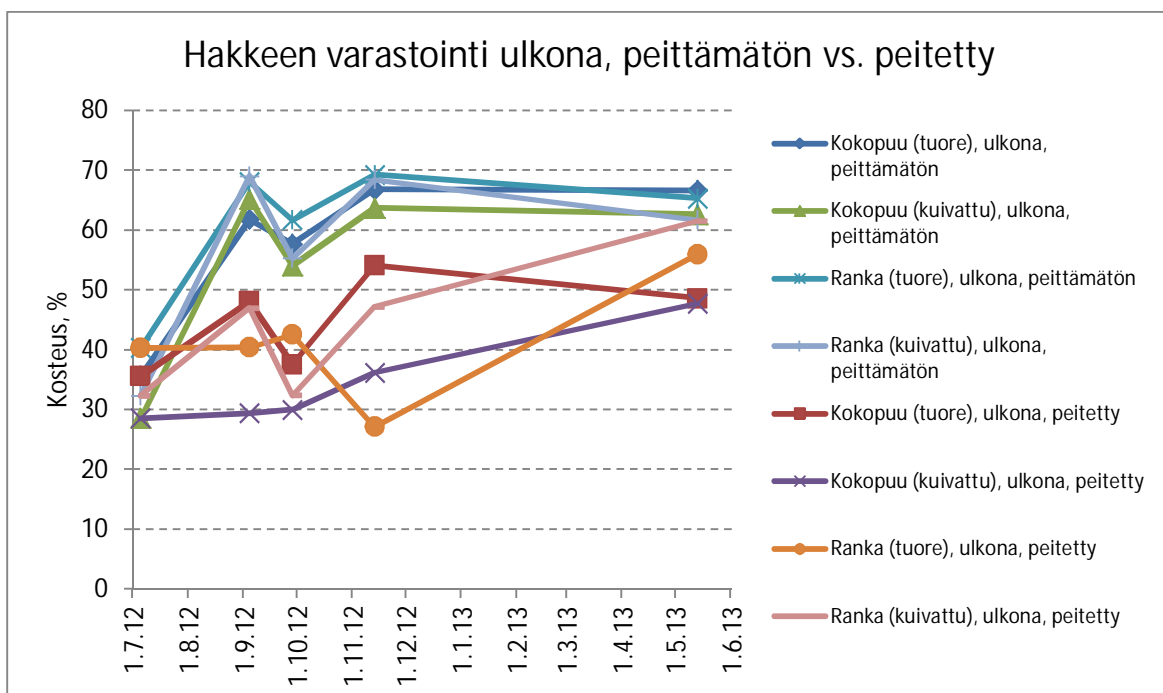
Kesä 2012 oli kuivumisolosuhteiltaan huomattavasti keskimääräistä heikompi. Tämä näkyy selvästi ulkona varastoitujen peittämättömien hakekasojen voimakkaana kastumisena. Lyhyt kuivempi kausi elokuun lopulla laski keskimääräisiä kosteuksia vain lyhytaikaisesti ja käytännöllisesti katsoen kaikki ulkona olleet peittämättömät aumat olivat läpimärkiä kevääseen asti keskimääräisen kosteuden ylittäessä jopa 60 %. Alemmalla alkukosteudella ei ollut mainittavaa merkitystä hakkeen pysymiseen kuivana varastoinnin aikana. Myöskään hakelajit, kokopuu- tai rankahake, eivät eronneet toisistaan tässä suhteessa.

Mielenkiintoista on sen sijaan havaita, kuinka varastohallissa olleet hakekasat kuivuivat selvästi kesän ja vielä syksyinkin aikana. Kaikkien sisällä olleiden hakkeiden keskimääräinen kosteus jäi alle 30 % marraskuun mittauksissa ja pysyi lähes muuttumattomana koko talven ajan. Tällainen hake olisi erinomaista polttoainetta pien- ja lämpöyrittäjäkokoluokan kattiloissa kylmimpänä lämmityskautena, jolloin kattilasta tarvitaan maksimitehoa. Alemmalla lähtökosteudella tai hakelajilla ei ollut olennaista merkitystä hakeauman loppukosteutta ajatellen.



Kuva 16. Ulkona ja varastohallissa sijainneiden peittämättömien hakkeiden kosteuksien muutokset koko varastointijaksolla.

Verrattaessa peitettyjä hakekasoja peittämättömiin huomataan, ettei peittäminenkään täysin estänyt kasoja kastumasta, vaikka se selvästi hidasti aumojen kostumista kesän pahimpien sateiden aikaan. Tarkastelujakson lopussa kaikki hakkeet olivat hyvin märkiä kosteuden ollessa vähintään 50 %. Luonnollisesti tällainen hake soveltuisi huonosti pienille tai keskisuurille arinakattiloille, sillä märkä polttoaine saattaa jopa sammuttaa kattilan ja joka tapauksessa alentaa kattilan huipputehoa ja hyötysuhdetta sekä aiheuttaa usein ongelmia polttoaineen syötössä.



Kuva 17. Peitettyjen ja peittämättömien hakeaumojen kosteuksien muutokset koko varastointijaksolla.

Säilyvyys

Hakkeiden säilyvyyttä tutkittiin pääasiassa seuraamalla kasojen sisällä tapahtuvia lämpötilojen muutoksia aiemmin kuvatulla tavalla. Varsinaisia kuiva-ainetappio- tai mikrobianalyysejä ei tässä tutkimuksessa tehty. Hakkeiden lämpötila on kuitenkin erittäin merkittävä indikaattori, josta voidaan päätellä, kuinka vilkasta on mikrobitoiminta ja kemiallinen hajoaminen kasan sisällä. Kohonneiden lämpötilojen aikana tapahtuu eniten kuiva-ainetappioita ja hakkeen polttoarvon alenemista. Toisaalta erittäin korkeat aumojen lämpötilat aiheuttavat suoranaisen aumapaloriskin.

Kuiva-ainetappiot aumassa johtuvat mikrobitoiminnasta ja kemiallisesta hajoamisesta. Nämä tapahtumat kuluttavat happea ja muodostavat hajoavasta kuiva-aineesta hiilidioksidia. Kasan koko, muoto, korkeus, lämpötila, peittäminen sekä hakkeen palakoko, kosteus ja viheraineksen määrä vaikuttavat, kuinka nopeasti ja tehokkaasti kuiva-ainetta tuhoutuu (Garstang ym. 2002). Mikrobitoiminnalle olosuhteet ovat otolliset, kun materiaalin kosteus on 30-60 % ja lämpötila 20-30 °C. Kuiva-aineen kemiallista hajoamista tapahtuu merkittävästi vasta lämpötilan ylitettyä 40 °C, jolloin puolestaan mikrobien ja lahottajasienten toiminta jo estyy (NT Method 2008). Viheraineen sisältämät ravinteet kiihdyttävät mikrobitoimintaa. Matalamman auman lämpötila pysyy korkeaa alempana, koska siinä on vähemmän haketta ja toisaalta koska lämmön haihtuminen on tehokkainta kasan päällyskerroksissa. Ilmankiertoa ei juuri pääse tapahtumaan suuren kasan sisällä. Kuolleiden solujen yhdisteet reagoivat kiihkaasti ilman hapen kanssa synnyttäen lämpöä. Nämä orgaanis-kemialliset reaktiot kiihtyvät lämpötilan noustessa ja voivat lopulta aiheuttaa aumapalon. (Martiskainen 2013)

Hakkeen kuiva-ainetappioiden määrittäminen tarkasti tunnetuilla menetelmillä on varsin haasteellista. Ideaalinen puun kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen olisi nopea, halpa, tarkka ja toimisi myös jäiselle puulle. Perinteiset uunikuivaus ja hydrolyysi ovat tarkkoja, mutta ne ovat hitaita. Suurin osa käytössä olevista menetelmistä perustuu sekä sähkömagneettisen säteilyn ja materiaalin vuorovaikutukseen että kuiva-ainemäärän selvittämiseen määrittämällä materiaalin kosteuspitoisuus. Nämä menetelmät edellyttävät kuitenkin kalibrointia tunnetuilla näytteillä ja toimivat tarkasti vain vastaavilla analyysierillä. Lisäksi kaikkien menetelmien tarkkuutta heikentää näytteiden edustavuus. Varastokasojen sisällä kosteus, palakoko, puulaji, neulasten määrä, jne. voivat vaihdella hyvinkin paljon. (Martiskainen 2012)

Uumajan maatalousyliopiston tutkimuksessa (Thörnqvist ym. 1990) suuren hakkuutähteistä tehdyn hakeauman kuiva-ainetappiot 28 viikon seuranjaksolla olivat yhteensä hieman yli 11 %. Ensimmäisellä viikolla ne olivat kuitenkin jopa 3,6 % aleten sitten nopeasti noin yhteen prosenttiin kuukaudessa. Hakeauman kosteus vaihteli 35 ja 50 prosentin välillä ja siinä oli runsaasti mukana viherainesta. Uudemmassa itävaltalaisessa tutkimuksessa (Heinek ym. 2012) tuoreen, runsaasti kuorta sisältäneen rankahakkeen (alkukosteus n. 50 %) kuiva-ainetappioiksi mitattiin n. 11 % viiden kuukauden tarkastelujaksolla. Tässä tutkimuksessa hakekasat olivat verraten pieniä, kukin ainoastaan 15-20 irtom³. Molemmissa tutkimuksissa kuiva-aineen muutosta mitattiin ns. pussimenetelmällä. Se tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että hakeaumassa olevaa haketta laitetaan tarkasti mitattu määrä erillisiin pusseihin, jotka sijoitetaan kasan sisään. Näissä pusseissa olevan hakkeen kosteus ja kuiva-ainemäärä voidaan siten erikseen määrittää haluttuna ajankohtana. Tämän menetelmän ongelmana on, että ylimääräistä materiaalia saattaa tarttua pussiin tai toisaalta sieltä voi tulla hienoainesta verkkopussin läpi.

Tämän tutkimuksen tärkeimmät anturitulokset on kuvattu liitteessä 3. Liitteen kuviin on piirretty käyrät kasojen sisäisestä lämpötilasta, suhteellisesta ilmankosteudesta ja kastepisteestä seurantajaksolla. Verrattaessa eri kasojen lämpötiloja käy selvästi ilmi, että kokopuuhaakekasat lämpenivät rankahakeaumoja enemmän. Esimerkiksi katoksessa varastoitu kokopuuhaake lämpeni noin 20 °C enemmän kuin rankahake. Vastaava ilmiö oli

nähtävissä myös ulkovarastoissa. Kaikkein korkeimmat lämpötilat mitattiin ulkovarastoidussa kokopuukasassa, jossa lämpötila hetkellisesti saavutti 67 °C.

Verrattaessa kasojen alkukosteuksia ja lämpötilojen kehittymistä huomataan, että kosteamman hakkeen (alkukosteus 42 %) lämpötila pysyi korkeamana kauemmin kuin kuivemman hakkeen (alkukosteus 32 %). Kostealla kokopuulla ero oli pisimmillään parisen viikkoa, kun taas rankahakekasoilla vastaava ero oli vain joitakin päiviä. Kaikki kasat saavuttivat maksimilämpötilansa yleensä vain muutama päivä kasauksesta. Sen jälkeen lämpötilat laskivat verraten nopeasti. Kuukauden jälkeen ne olivat kaikissa kasoissa jo alle 30 °C. Syyskuussa parin kuukauden varastoinnin jälkeen aumojen lämpötila oli jo laskenut alle 20 °C jatkaen laskuaan niin, että joulukuussa lukema oli jo nollan tuntumassa tai sen alla. Tämä on merkittävä ero aikaisemmin viitattuun ruotsalaiseen tutkimukseen (Thörnqvist ym. 1990), jossa hakkuutähteestä tehdyn hakeauman lämpötilat säilyivät niinkin korkealla kuin 70 °C vielä neljä kuukautta varastoinnin aloittamisesta. Hakeauman huippulämpötila oli korkeimmillaan 75 °C eli selvästi korkeampi kuin Keuruun tutkimuksessa.

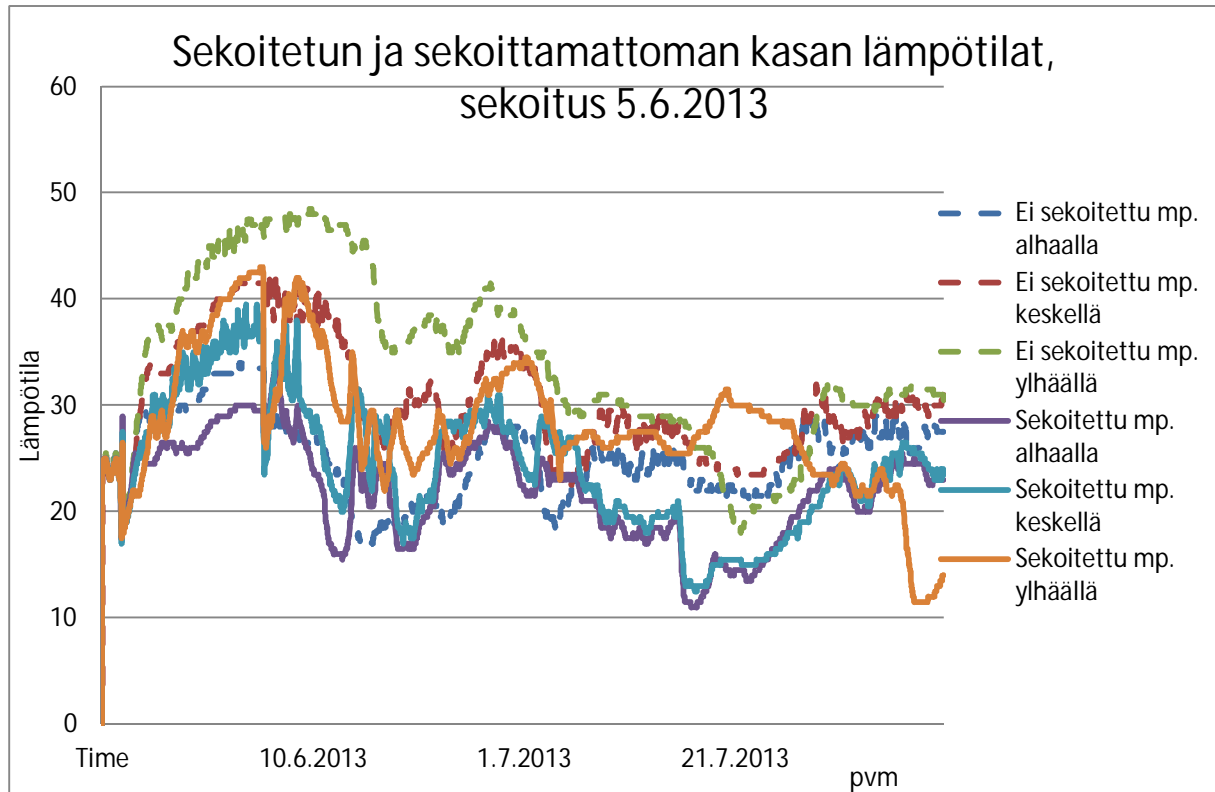
Peittämisellä ei näyttänyt olevan kovin suurta vaikutusta kosteampien hakkeiden lämpötilan nousuun. Kuivempien hakkeiden peitetyn kasan lämpötila sen sijaan nousi kymmenisen astetta korkeammaksi kuin peittämättömän, kun mittaus tehtiin kasan yläosasta. Näyttäisi siltä, että peittäminen estää kasan pintaa siirtyvää kosteutta haihtumasta ja ylläpitää siten pitempään mikrobeille otollista toimintaympäristöä, minkä seurauksena lämpötila pääsee nousemaan.

Lämpötiloista päätellen kaikki kuivemmat alkukosteudeltaan 32 % olleet hakekasat säilyivät hyvin sekä ulkovarastossa että katoksessa, eikä merkittäviä kuiva-ainetappioita oletettavasti syntynyt. Yhdenkään kasan lämpötila ei noussut niin korkealle, että olisi syntynyt itsesyttymisvaaraa. Kaiken kaikkiaan hakeaumojen lämpötilojen nousu ajoittui hyvin lyhyelle ajalle varastoinnin alussa, jonka jälkeen lämpötilat laskivat verraten nopeasti yleensä parin kolmen viikon kuluessa. Muuta kuin säätilasta johtuvaa lämpenemistä ei enää myöhemmin havaittu.

Sekoituksen vaikutus hakekasan lämpötilaan

Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että tuore hake lämpenee voimakkaasti varastoinnin alussa (mm. Thörnqvist 1990). Lämpeneminen on kuitenkin erilaista auman eri kerroksissa. Vastaava ilmiö tuli selvästi esille myös tässä tutkimuksessa. Yleensä lämpeneminen on voimakkainta keskellä ja kasan yläosassa ja lämpötila pysyy siellä myös korkeamana kuin kasan pohjakerroksissa. Keuruun varastokokeissa kasan eri kerrosten kosteuksia ei mitattu erikseen, mutta aiemmista selvityksistä tiedetään, että kosteus siirtyy auman yläosaan muodostaen hyvin kostean kerroksen sen pinnalle. Esimerkiksi hakkuutähdehakeauman ala- ja keskiosan on todettu kuivuvan 20-25 %, mutta ylä- ja pintaosien kastuvan 65-70 % (mm. Kuoppamäki, ym. 2003).

Lämpötilojen kehitys aumojen eri osissa oli odotusten mukainen ja näkyy hyvin selvästi Liitteessä 4, joissa seurantakäyrät on jaoteltu eri kuviin vertailun helpottamiseksi. Korkeimmat lämpötilat mitattiin kasojen yläkolmanneksessa. Kasan keskellä lämpötilavaihteluja tapahtui eniten kosteuden siirtyessä kasan läpi yläkerrokseen. Alla olevaan kuvaan (Kuva 18) kaikki käyrät on koottu yhteen.



Kuva 18. Sekoitettun ja sekoittamattoman rankahakekasan lämpötilojen kehitys kasojen eri kerroksissa. Mittauspisteet alhaalla, keskellä ja ylhäällä. Hakkeet oli tehty tuoreesta havurankapuusta ja toinen kasa sekoitettiin noin kolme viikkoa ensimmäisen aumauksen jälkeen.

Samoin kuin tutkimuksen muissa varastokasoissa rankahakkeen maksimilämpötilat eivät nousseet missään vaiheessa yli 50 °C. Lämpötila laski alle 40 °C viiden viikon varastoinnin jälkeen.

Kasan sekoittaminen eli tässä tapauksessa levitys ja uudelleenaumaus pudotti hakkeen lämpötilaa nopeasti parikymmentä astetta, mutta auma lämpeni muutamassa päivässä lähes entiselle tasolle. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, ettei hakekasan sekoittamisella pystytä pysyvästi hillitsemään lämpötilan nousua, eikä sen avulla oletettavasti voida paljonkaan vähentää hakkeen kuiva-ainehävikkiä.

4. Lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus

4.1 Hake- ja pilkekuivureiden mallintaminen

VTT:llä kehitetyllä keinokuivauksen laskentamenetelmällä voidaan laskea, miten paljon energiaa tarvitaan tietyn suuruisen puuerän tai esimerkiksi viljan kuivaamiseen haluttuun kosteuteen, kun käytetyn kuivurityypin hyötysuhde tiedetään. Laskentamenetelmää voidaan käyttää muun muassa arvioitaessa kuivuri-investoinnin kannattavuutta tai laskettaessa olemassa olevan kuivurin tehokkuutta.

Laskennassa tarvitaan 15 lähtötietoa, mm. puun kosteus alussa ja haluttu kosteus kuivauksen jälkeen, kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ennen lämmitystä, kuivurin hyötysuhde ja haluttu kuivausaika. Kaikki tarvittavat lähtötiedot näkyvät liitteen 5 esimerkkilaskennassa. Kuivatun puun ulostulolämpötila on mallissa ohjeellinen. Sen vaikutus on laskennassa lähes merkityksetön, koska puun lämpiämiseen kuluva energiamäärä on vähäinen muihin energiavirtoihin verrattuna. Mikäli puu on jäässä ennen kuivausta, kuluu jään sulattamiseen sen sijaan melko paljon energiaa. Siksi käyttäjän tulisi tarkistaa tai päättää laskentatapauksessa, onko materiaali jäässä ennen kuivausta ja valita sitten oikea lämpötila vastaamaan puun sisäänmenolämpötilaa. Sillä annetaanko sisäänmenolämpötilaksi esimerkiksi -2 tai -7 °C, on vain vähän merkitystä, koska puun lämpötilan muutokseen kuluu vain vähän energiaa kuten edellä jo todettiin.

Kyseessä olevan kuukauden keskimääräisen suhteellisen kosteuden käyttäjä voi hakea liitteessä 6 olevasta taulukosta tai antaa arvon itse perustuen omaan mittaukseen tai sääennustukseen. Vaikka laskennassa käytettäisiin kuukauden keskiarvoa, päästään riittävään tarkkuuteen, koska kuivuriin syötettävässä ilmassa on joka tapauksessa hyvin vähän vesihöyryä verrattuna kuivausilman vesipitoisuuteen kuivauksen jälkeen.

Laskennan tuloksena saadaan kuivaukseen tarvittavan energiamäärän ja tehon lisäksi lähes 20 muuta suuretta, kuten esimerkiksi kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus lämmityksen jälkeen, kuivausilman lämpötila kuivauksen jälkeen sekä polttoaineesta poistettu vesimäärä. Kaikki saatavat tulokset ilmenevät liitteessä 5 esitetystä esimerkkilaskennasta.

Laskentatuloksiin vaikuttavista lähtöarvoista kaikki muut kuivausilman tilavuusvirtaa lukuun ottamatta ovat olosuhteista ja kuivurin rakenteesta riippuvia. Käyttäjä voi asettaa kuivausilman tilavuusvirran haluamukseen tai asettaa sille alkuarvon seuraavasti. Liitteen 7 käyrästä A käyttäjä voi ensin arvioida polttoainekerroksesta aiheutuvan painehäviön. Esimerkiksi jos ilman virtausnopeus polttoainekerrokseen on $0,1$ m/s ja palakoko 15 mm, käyrästä saadaan painehäviöksi 60 Pa/m. Polttoainekerroksen korkeuden ollessa $2,2$ m, tulee painehäviöksi 130 Pa. Lisäksi on otettava huomioon, että hakekerroksen alla olevasta reikälevystä tai muusta vastaavasta sekä hakkeessa olevasta hienoaineksesta aiheutuu painehäviöitä. Jos oletetaan, että nämä painehäviöt ovat 100 Pa, on kokonaispainehäviö tässä tapauksessa 230 Pa. Käyrästä B saa edelleen käytettävissä olevan (tai valittavan) puhaltimen tuottaman ilman tilavuusvirran painehäviön avulla (10 mmvp vastaa noin 100 Pa/m). Tässä tapauksessa pieninkin 2 kW:n puhallin pystyisi tuottamaan ilmaa yli $10\,000$ m³/h, kun paine-ero on 230 Pa. Laskentaesimerkissä on ilmamääränä käytetty $3\,000$ m³/h. Tällöin puhallin voi toimia osakuormalla tai voitaisiin valita vielä pienempi puhallin.

Käyttäjä voi säätää valittavan kuivausajan ja kuivausilman tilavuusvirran avulla säätää kuivausilman lämpötilan (T_2) haluamukseen, esimerkiksi 50 - 60 °C. Kuivausilman lämpötila kuivurin jälkeen määräytyy sitten annetun kuivurin hyötysuhteen perusteella, tässä esimerkissä n. 18 °C. Kyseessä oleva lämpötila on keskiarvo koko kuivauksen ajalle. Se muuttuu kuivauksen edistyessä. Aluksi lämpötila on keskiarvoa matalampi ja lopuksi korkeampi.

Kuivurin hyötysuhteen parantamiseksi kuivuri on hyvä varustaa ilman esilämmityksellä. Tällöin kaikki kuivurista ulos poistettava ilma johdetaan esilämmittimelle, jossa toisella puolella virtaa kuivuriin ulkoilman lämpötilassa sisään menevä ilma, joka sitten lämpiää kuivurista ulos tulevan kostean ja lämpimän ilman avulla. Kuivurista poistettava ilma jäähtyy, jolloin osa siinä olevasta vesihöyrystä kondensoituu ja luovuttaa lämpöä sisään menevään lämpövirtaan. Lämpöä siirtyy myös sen vuoksi, että poistettavan ilman lämpötila laskee. Esilämmitin nostaa kuivuri-investoinnin hintaa, mutta saavutettava kuivausenergian säästö maksaa esilämmittimestä aiheutuvan lisäkustannuksen takaisin nopeasti, jos esilämmitin on oikein mitoitettu.

4.2 Hakkeen kosteuden vaikutus kattilan toimintaan

Polttokokeiden tavoitteet

Projektissa haluttiin selvittää myös hakkeen kosteuden vaikutusta pienten aluelämpölaitosten kattiloiden toimintaan. Tämän vuoksi Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalousinstituutin 500 KW:n koekattilalla suoritettiin polttokokeita. Kattilantestauslaboratorion tilat ja laitteet on akkreditoitu, joten niillä voidaan suorittaa virallista EN 303-5 standardin mukaista kattilatestausta yhdessä VTT Expert Servicen kanssa (FINAS T001 1.19).

Koepolttoaineet

Kokeissa käytettiin polttoaineina kokopuu- ja rankahaketta. Hakkeiden tavoitekosteudet olivat 20, 35 % ja 50 %, minkä vuoksi käytettävissä olevia hakkeita jouduttiin kostuttamaan tai kuivaamaan. Hakkeiden kosteudet kokeissa olivat taulukon 2 mukaiset.

Taulukko 2. Koepolttoaineiden kosteudet.

Kokopuuhake	A	B	C
Kosteus, %	21,1	34,1	49,9
Rankahake	D	E	F
Kosteus, %	24,8	34,1	49,8

Jokaista taulukon kuutta polttoaineen ja kosteuden yhdistelmää vastaavasti tehtiin koe ensin kattilan nimellisteholla 500 kW sekä lisäksi 30 % osakuormalla 150 kW, eli kaikkiaan 12 koetta.

Kuivimman rankahakkeen kosteus poikkesi jonkin verran tavoitekosteudesta, mutta oli kuitenkin selkeästi kuivempaa kuin seuraavan koe-erän kosteus (34,1 %) ja mahdollisesti siten näillä saatujen koetulosten vertailun. Polttoaineiden muita ominaisuuksia on taulukossa 3. Ne eivät poikkea toisistaan merkittävästi kuin irtotiheyden osalta, joka tietysti kasvaa polttoaineiden kosteuden kasvaessa.

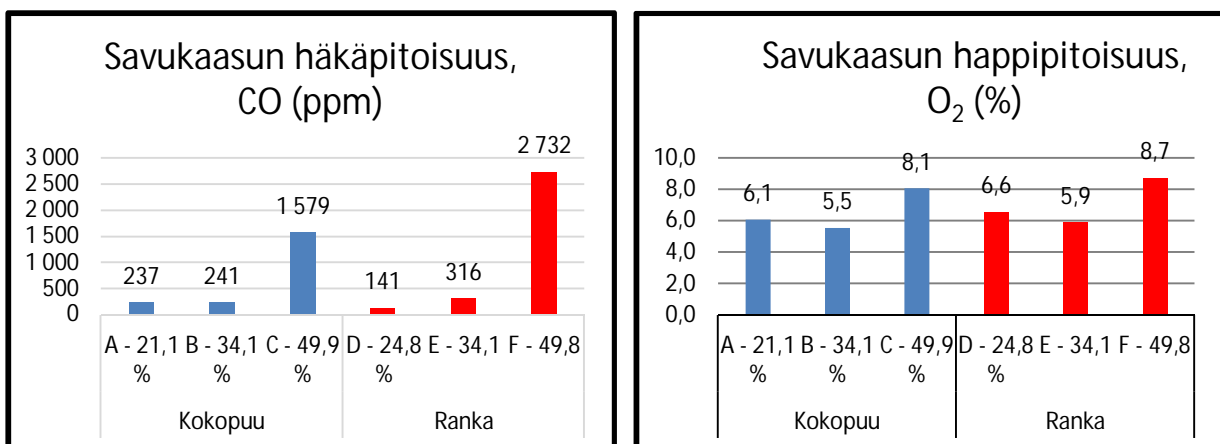
Taulukko 3. Koepolttoaineiden ominaisuuksia saapumistilassa.

Kokopuuhake	A – 21,1 %	B – 34,1 %	C – 49,9 %
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,7	18,4	17,8
Irtotiheys, kg/m ³	235	277	325
Tuhkapitoisuus, %	1,1	1,7	1,6
Rankahake	D – 24,8 %	E – 34,1 %	F – 49,8 %
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,2	18,3	17,8
Irtotiheys, kg/m ³	213	248	296
Tuhkapitoisuus, %	0,7	1,0	1,3

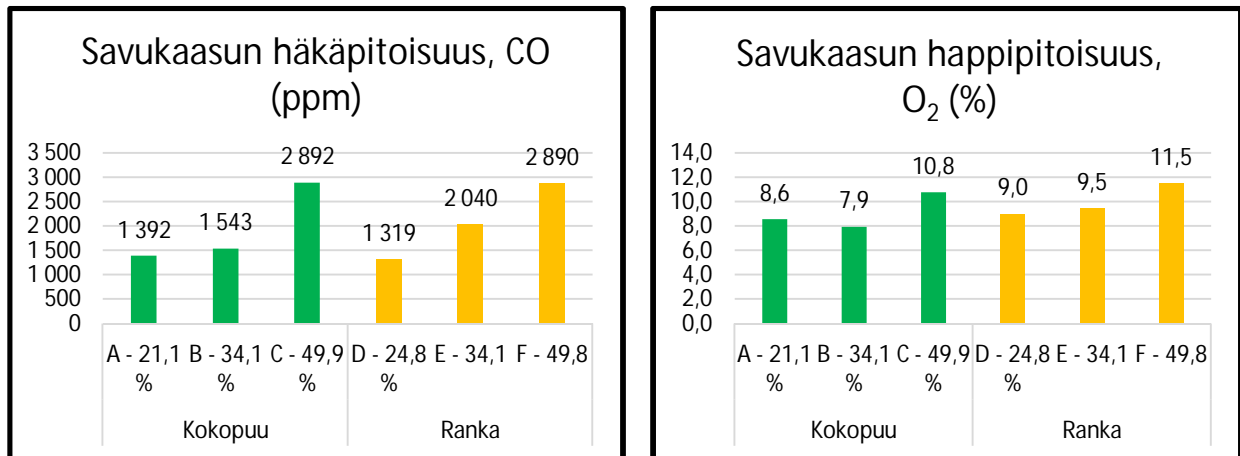
Koekattila ja suoritettut mittaukset

500 kW:n bioenergiakattilan ilmanjakoa ja arinan liikettä ja sen käyntiaikoja voidaan säätää halutuksi. Kattilassa on savukaasuanalysaattorit, joilla voidaan mitata savukaasun O₂, CO₂, CO, NO, NO_x, OGC ja hiukkapitoisuudet. Lämpötiloja mitataan tulipesästä, konvektio-osasta sekä kattilan meno- ja paluuedestä. Kattilaveden virtaus mitataan myös ja sen ja meno- ja paluueden lämpötilojen perusteella lasketaan teho jatkuvatoimisesti. Kaikki mittaustiedot tallennetaan halutulla taajuudella tiedonkeruujärjestelmällä, esimerkiksi näissä kokeissa 5 sekunnin välein.

Kokeet suoritettiin EN303-5:2012 mukaisesti. Kokeissa, joissa teho oli 500 kW, savukaasun happipitoisuus säädettiin mahdollisimman lähelle arvoa 6 % siten, että savukaasun CO-pitoisuus oli vielä hyväksyttävän matala. Noin 30 % eli 150 kW osateholla poltettaessa savukaasun happipitoisuutta jouduttiin kuitenkin nostamaan noin kymmeneen prosenttiin.


 Kuva 19. Savukaasun O₂- ja CO-pitoisuudet nimellisteholla tehdyissä kokeissa.

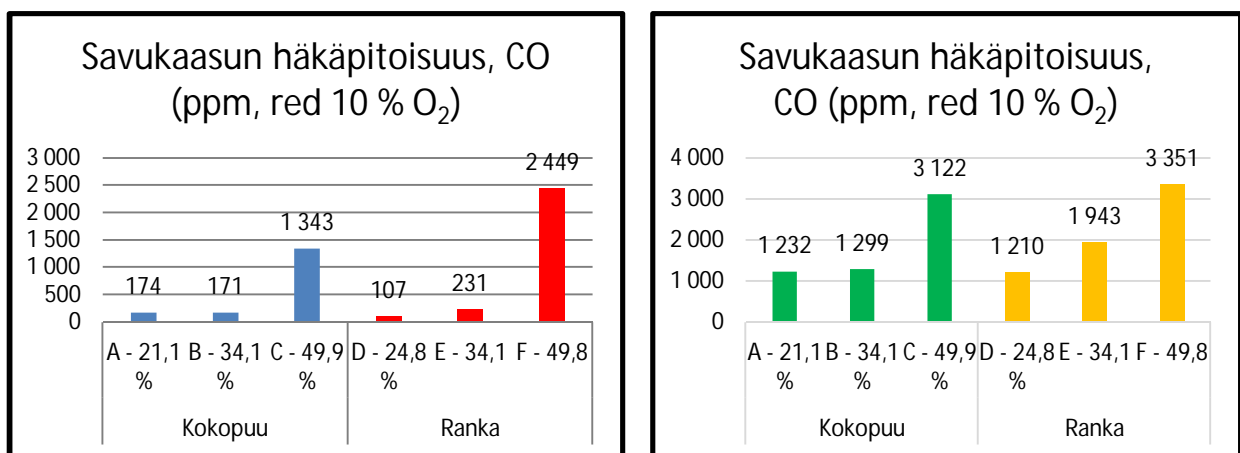
Referenssipisteinä käytettiin tällöin molemmilla polttoaineilla kuivimmalla polttoaineella saatuja arvoja. Nämä näkyvät kuvissa 19 ja 20, jossa on kattilan nimellisteholla ja osateholla tehtyjen savukaasun happi- ja häkämittausten tulosten keskiarvot.



Kuva 20. Savukaasun O₂- ja CO-pitoisuudet 150 kW osateholla tehdyissä kokeissa.

Koetuloksia

Kuivimmalla kokopuuhakkeella nimellisteholla 500 kW tehdyssä kokeessa A savukaasun keskimääräinen O₂-pitoisuus oli 6,1 % ja CO-pitoisuus vastaavasti 237 ppm. Osateholla 150 kW nämä pitoisuudet olivat 8,6 % ja 1392 ppm. Rankapuulla nämä pitoisuudet olivat nimellisteholla 6,6 % ja 141 ppm sekä osateholla 9,0 % ja 1319 ppm. Kaikkien mittaustulosten keskiarvot näkyvät kuvissa 19 ja 20.



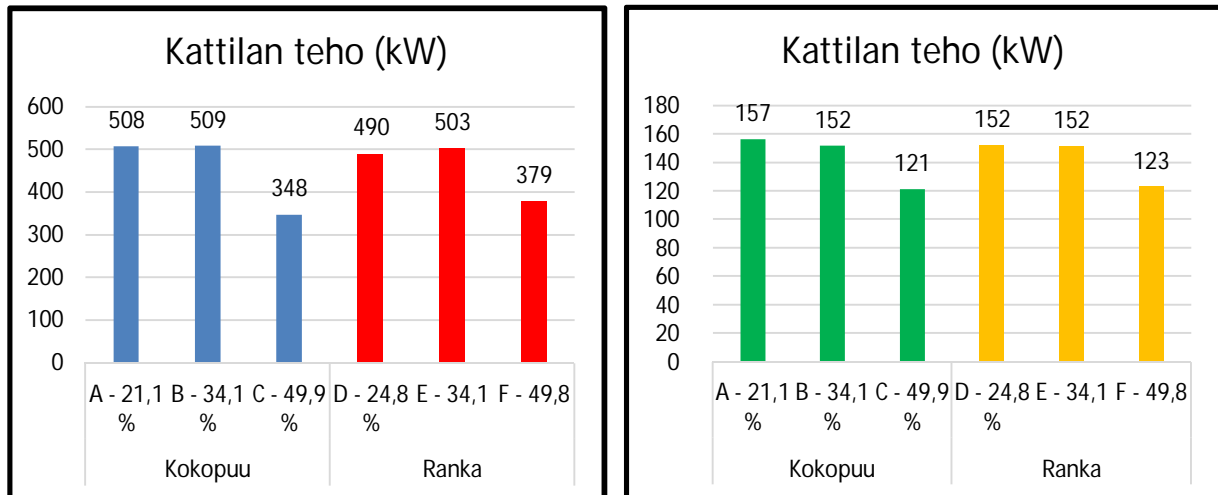
Kuva 21. Savukaasujen CO-pitoisuudet nimellis- ja osatehon kokeissa redusoituna 10 % O₂-tasolle.

Jotta CO-pitoisuudet olisivat keskenään vertailukelpoisia, savukaasujen mitatut arvot muutettiin laskennallisesti vastaamaan tilannetta, jossa O₂-pitoisuus olisi ollut kaikissa kokeissa 10 % (kuva 21). Esimerkiksi kuivimpien hakkeiden ppm luvut ovat tällöin 174 nimellisteholla ja 1210 osateholla. Kuvista 19 ja 20 nähdään, että kattilan häkäpäästöt (CO) nousevat molemmissa kokeissa selvästi käytettäessä kosteimpia hakkeita C ja F. Päästöt ovat kaikissa tapauksissa merkittävästi suuremmat osateholla ajettaessa.

Koska ko. kokoluokan kattiloiden piippujen korkeudet ovat tyypillisesti vain 10-20 m, voivat korkeat CO-pitoisuudet heikentää merkittävästi paikallista ilmanlaatua riippuen ilmanpaineesta, tuulen suunnasta ja voimakkuudesta yms. seikoista. Lisäksi savukaasun korkea häkäpitoisuus merkitsee myös korkeita hiilivetyjen päästöjä. Hiilivedyt ovat haitallisia ja monet niistä syöväälle altistavia. Näistä syistä tämän kokoluokan kattiloita pitäisi pystyä säätämään niin, että pitoisuudet olisivat korkeintaan suuruusluokkaa 1000 ppm. Kun polttoaineen kosteus on 50 % suuruusluokkaa kuten kokeissa C ja F, ei tämä ilmeisesti useimmilla kattiloilla onnistu. Jo pelkästään tästä syystä tällaisissa kattiloissa ei tulisi käyttää näin kosteita polttoaineita.

Kuvista nähdään myös, että polttoaineen kosteuden muuttuminen kokopuuhaikkeella tehdyissä kokeissa A ja B noin 20 %:sta 35 %:iin ei vaikuta lainkaan CO-pitoisuuteen nimellistehon kokeissa ja osatehollakin vaikutus on vähäinen. Rankahakkeella tehdyissä nimellistehon kokeissa D ja E sillä on ollut jonkin verran vaikutusta, mutta pitoisuudet ovat molemmissa kokeissa kuitenkin matalia. Osateholla ajettaessa CO-pitoisuudet selvästi kasvavat ja hakkeen kosteus näkyy selvemmin.

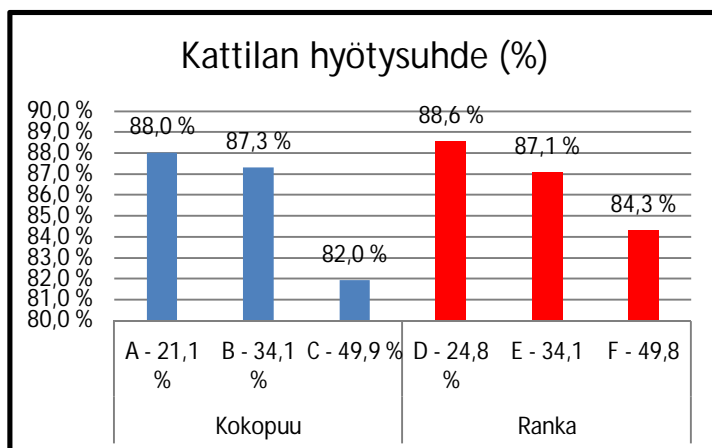
Häkäpäästön lisäksi polttoaineen kosteuden kasvu lisäsi erittäin paljon myös muita mitattuja päästöjä kuten savukaasun hiukkaspitoisuutta ja orgaanisen hiilen pitoisuutta. Typen oksidien määrään ei kosteuden lisäyksellä ollut merkittävää vaikutusta.



Kuva 22. Polttoaineen kosteuden vaikutus kattilan tehoon. Vasemmalla nimellistehon ja oikealla osatehon koeajon tulokset.

Polttoaineen kosteus vaikuttaa erittäin paljon kattilasta saatavaan tehoon. Tämä ilmenee kuvasta 22, jossa on kokeiden aikaiset keskimääräiset tehot kun kattilaa pyrittiin ajamaan sekä nimellisteholla 500 kW että osateholla 150 kW. Kokeissa C ja F, joissa polttoaineiden kosteudet olivat n. 50 %, ei nimellistehoa saavutettu lainkaan, vaan maksimitehot olivat tuolloin n. 70 % kattilan nimellistehosta. Tämä vaikeuttaa merkittävästi laitoksen toimintaa varsinkin talvella tai muulloin, kun kattilalla pitäisi tuottaa mahdollisimman paljon lämpöä.

Kuvassa 23 näkyy polttoaineen kosteuden vaikutus kattilan hyötysuhteeseen nimellisteholla ajettaessa. Hyötysuhde pienenee molemmilla polttoaineilla useita prosenttiyksikköjä, kun polttoaineen kosteus on korkea eli n. 50 %. Häviöt lisääntyvät niin paljon, että niillä on jo merkittävää taloudellista vaikutusta tämän tyyppisten laitosten toiminnassa.



Kuva 23. Polttoaineen kosteuden vaikutus kattilan hyötysuhteeseen.

Häviöiden lisäksi kostealla polttoaineella kattilan käytettävyys heikkenee ja laitoksen häiriöt lisääntyvät aiheuttaen siten myös lisäkustannuksia.

Muita kokeiden tuloksia olivat:

- Tuhkan palamiskelpoisen aineksen osuus kasvaa polttoaineiden kosteuden kasvaessa lisäten siten häviöitä ja pienentäen hyötysuhdetta.
- Hakkeen kosteuden muutos korkealla teholla vaikuttaa hyötysuhteeseen jonkin verran enemmän kuin osateholla.
- Hakkeen kosteuden muutos 20:sta 35:een prosenttiin ei vaikuta merkittävästi kattilan toimintaan ja päästöihin, kun taas kosteuden muutos edelleen 50 prosenttiin heikentää monella tavalla kattilan toimintaa ja lisää päästöjä.
- Suurimmat muutokset kattilan toiminnassa näyttivät tapahtuvan, kun hakkeen kosteus kasvoi 35:stä prosentista 50:een. Tämän kosteusalueen hakkeella olisi syytä tehdä lisätestausta.

4.3 Hakkeen kosteuden vaikutukset metsähakkeen hankintakustannuksiin lämmöntuotannossa

Hakkeen tuotantoketjun eri vaiheet voidaan ja käytännössä hinnoitellaan monilla eri tavoin sopimuksista riippuen. Usein hankintaketjun alkupään työvaiheet hinnoitellaan tilavuus- tai painoperusteisina kuten hakkuu, metsäkuljetus, haketus ja kaukokuljetus. Toisaalta hakkeen loppukäyttäjä eli lämpölaitos voi myös ostaa hakkeen kokonaisurakointina ja maksaa valmiista hakkeesta perille toimitettuna energiasisällön mukaan. Käytössä on myös lukuisia variaatioita eri hinnoitteluperusteista. Selkeyden vuoksi tässä tarkastelussa on laskettu hakkeen pääsääntöisesti tilavuusperusteinen tai energiasisältöön perustuva hankintakustannus tuotettua lämpö määrää (MWh) kohti. Esimerkit edustavat kuitenkin pienempien laitosten yleisiä metsähakkeen hankintaketjuja.

Aluksi laskettiin kokopuu- ja rankahakkeen hankintakustannukset kahdessa kuvitteellisessa esimerkkitapauksessa, joissa haketta hankitaan tyypillisille yrittäjäkokoluokan lämpölaitoksille. Laitosten vuotuinen lämmöntuotanto oletettiin olevan 5 000 MWh ja 1 500 MWh.

Ensimmäisessä toimitusketjussa hakkeen raaka-aine oletettiin ostettavan välivarastosta (esim. tienvarsivarasto), minkä jälkeen käytettiin alirakointsijoita haketukseen ja hakkeen kuljettamiseen laitokselle. Suuremman laitoksen haketus tehtiin kuorma-autoalustaisella mobiilihakkurilla ja hakkeen kuljettamiseen käytettiin täysperävaunurekkaa, jossa kokonaiskuormatila on 120 m³. Pienemmän laitoksen tarvitsema raaka-aine puolestaan ajateltiin hakettavan traktorikäyttöisellä hakkurilla ja kuljetusvälineenä käytettiin traktoria peräkärryineen kuormatilan ollessa 20 m³.

Toisessa tapauksessa hake ostettiin valmiiksi toimitettuna laitokselle asti eli ns. kokonaistoimituksena. Hintoina ja kustannuksina on käytetty kirjallisuudesta saatavilla olevia keskimääräisiä hintoja yrittäjähaastatteluilla tarkennettuna.

Laitos 1 (lämmöntuotanto 5 000 MWh/v):

Ensimmäisessä eli **osatoimitusmallissa** käytettiin seuraavia kustannuksia:

- Kokopuun tienvarsihintaa 12 €/MWh
- Haketus- ja kuljetuskustannukset 3,6 €/irto-m³
- Kuljetuskustannukset 3,6 €/km
- Kattilan hyötysuhde 78-88 % hakkeen kosteuden vaihdellessa välillä 55-20 %

- Häiriöistä aiheutuvat kustannukset 120 €/häiriö
- Lisäöljyn käytöstä aiheutuneet kustannukset 14 000-0 €/v (hake 55-20 %)

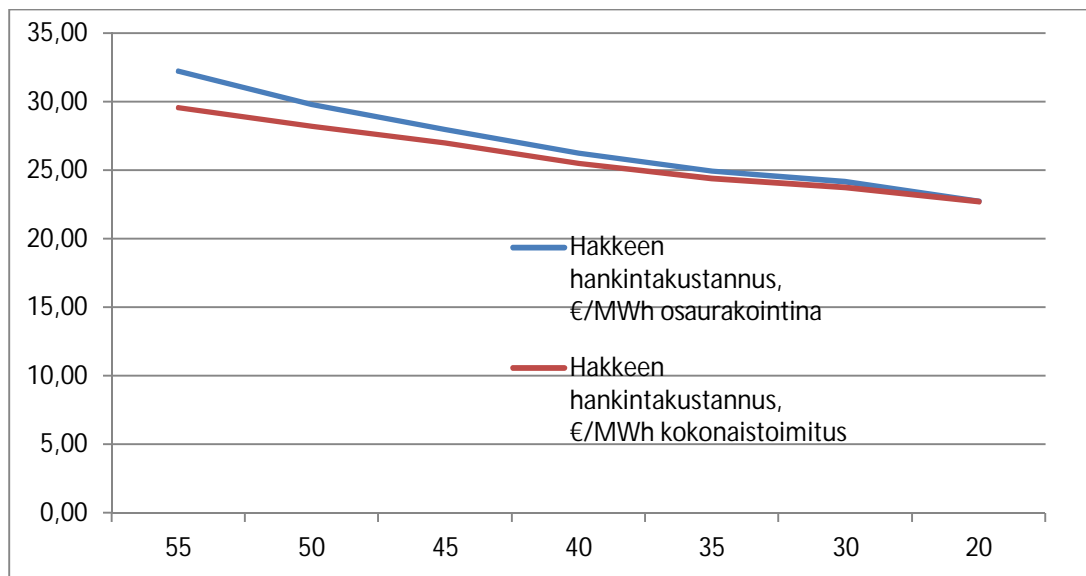
Tässä hieman suuremman laitoksen hankintaketjulaskelmassa käytettiin energiasisältöön perustuvaa hakkeen raaka-aineen hintaa, joka edellyttää kosteuden todentamista asianmukaisella näytteenotolla ja kosteusanalyysillä. Hakkeen kosteus vaikuttaa suoraan lämmöntuotannossa tarvittavan hakkeen kokonaismäärään ja sitä kautta myös haketus- ja kuljetuskustannuksiin. Märällä hakkeella (kosteus > 47 %) kuljetuskustannuksia lisää myös se, ettei hakerekan maksimitilavuutta enää voida hyödyntää kokonaispainon ylittäessä sallitun 60 tonnia vaan kuormat jäävät tilavuuden suhteen vajaiksi (vrt. Hakonen 2011).

Hakkeen kosteus alentaa kattilan hyötysuhdetta ja puun tehollista lämpöarvoa, jolloin polttoainetta tarvitaan enemmän ja kattilasta saatava maksimiteho jää alhaisemmaksi. Märkä hake aiheuttaa häiriöistä johtuvia lisäkustannuksia sekä lisää varapolttoaineena toimivan öljyn käyttöä. Lisäännytynyt hakkeen siirto aiheuttaa myös ylimääräisiä sähkökustannuksia, joita tässä yhteydessä ei tosin huomioitu. Kattilan hyötysuhdeprosentin arvioinnissa käytettiin hyväksi JAMK:in Bioenergiakeskuksessa tehtyjä hakkeen polttokokeita (ks. luku 4.2). Koetulosten perusteella hyötysuhde ekstrapoloitiin koko kosteusalueelle 55-20 %. Häiriöistä ja polttoöljyn lisäkäytöstä aiheutuvat kustannukset arvioitiin yhdessä Metsäkeskuksen bioenergieneuvojan kanssa perustuen käytännön kokemukseen eri lämpöyrittäjäkokoluokan laitoksista sekä laitoshaastatteluihin.

Kokonaistoimitusmallissa hakkeesta maksetaan edellisestä poiketen hakkeen toimittajalle energiasisältöön perustuva hinta eli €/MWh. Näin ollen laskelmissa käytettiin seuraavia kustannuksia:

- Valmis metsähake perille toimitettuna 20 €/MWh
- Kattilan hyötysuhde 78-88 % hakkeen kosteuden vaihdellessa välillä 55-20 %
- Häiriöistä aiheutuvat kustannukset 120 €/häiriö
- Lisäöljyn käytöstä aiheutuneet kustannukset 14 000-0 €/v (hake 55-20 %)

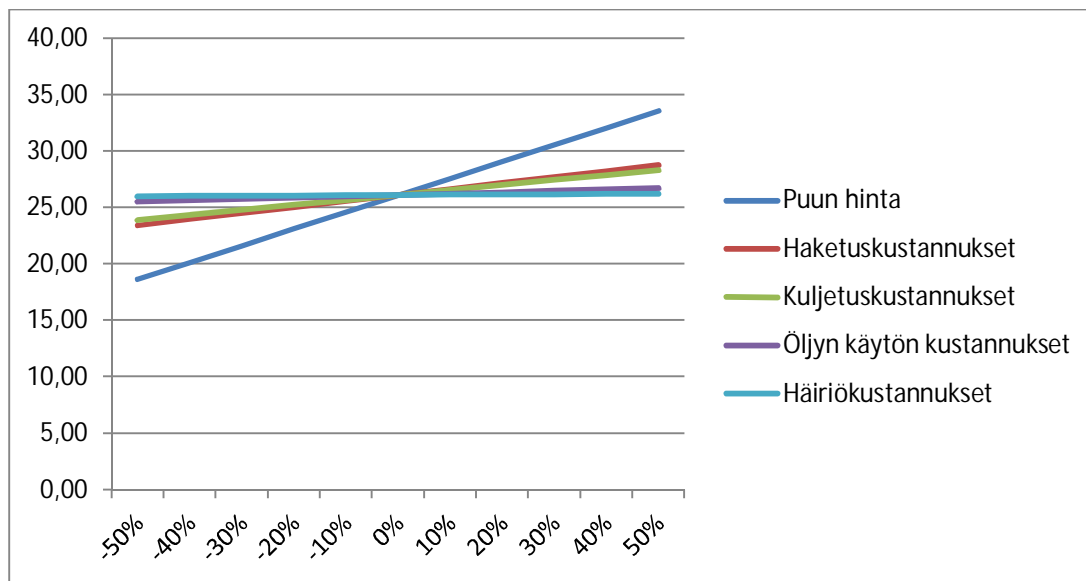
Alla olevassa kuvassa on esitetty metsähakkeen molempien hankintaketjujen kustannukset lämpölaitoksella tuotettua megawattituntia kohti suhteessa toimitetun hakkeen kosteuteen. Yli 43 kosteusprosentti hakkeen osaurakoinnin hankintakustannuksia lisää selvästi vajaista kuormista aiheutuneet korkeammat kuljetuskustannukset.



Kuva 24. Metsähakkeen hankintakustannukset osaurakointi- ja kokonaistoimitusmalleissa lämpölaitoksella, jonka vuotuinen lämmöntuotanto on 5 000 MWh.

Hakkeen hankintakustannuksille tehtiin myös herkkyystarkastelu osaurakointimallin eri kustannustekijöiden suhteen muuttamalla yhtä kustannustekijää kymmenen prosenttia kerrallaan skaalalla -50 % + 50 % (Kuva 25). Nollatasoksi valittiin 35-prosenttisen hakkeen hankintakustannus. Korostettakoon, ettei herkkyystarkastelu ota suoraan kantaa hakkeen kosteuteen vaan eri kustannustekijöiden yksikköhintoihin, jotka eivät ole suoraan kosteudesta riippuvaisia. Esimerkiksi metsähakkeesta maksetaan yleensä tietty määrä energiayksikköä kohti (€/MWh) riippumatta siitä, kuinka kuivaa tai kosteaa hake on. Niin sanottu laatuhinnoittelu eli yksikköhinnan muuttuminen suhteessa hakkeen kosteuteen on vielä suhteellisen harvinaista.

Tarkastelun tarkoituksena on havainnollistaa, mitkä tekijät ovat kustannusvaikutuksiltaan merkittävimpiä. Kuten kuvasta 25 näkyy hakkeen raaka-aineen hinnan muutos vaikuttaa kaikkein eniten lopputuotteen hankintakustannukseen. Myös kuljetuksella ja haketuksella on selkeä vaikutus.



Kuva 25. Metsähakkeen hankintakustannustekijöiden herkkyysoanalyysikäyrät skaalalla 50 % + 50 %. Nollataso on laskettu 35 % hakkeelle.

Laitos 2 (lämmöntuotanto 1 500 MWh/v):

Ensimmäisessä eli **osatoimitusmallissa** käytettiin seuraavia kustannuksia:

- Kokopuun tienvarsihinta 25 €/kiinto-m³
- Haketuskustannukset 4,5 €/irto-m³
- Kuljetuskustannukset 2 €/irto-m³
- Kattilan hyötysuhde 78-88 % hakkeen kosteuden vaihdella välillä 55-20 %
- Häiriöistä aiheutuvat kustannukset 120 €/häiriö
- Lisäöljyn käytöstä aiheutuneet kustannukset 5 200- 0 €/v (hake 55-20 %)

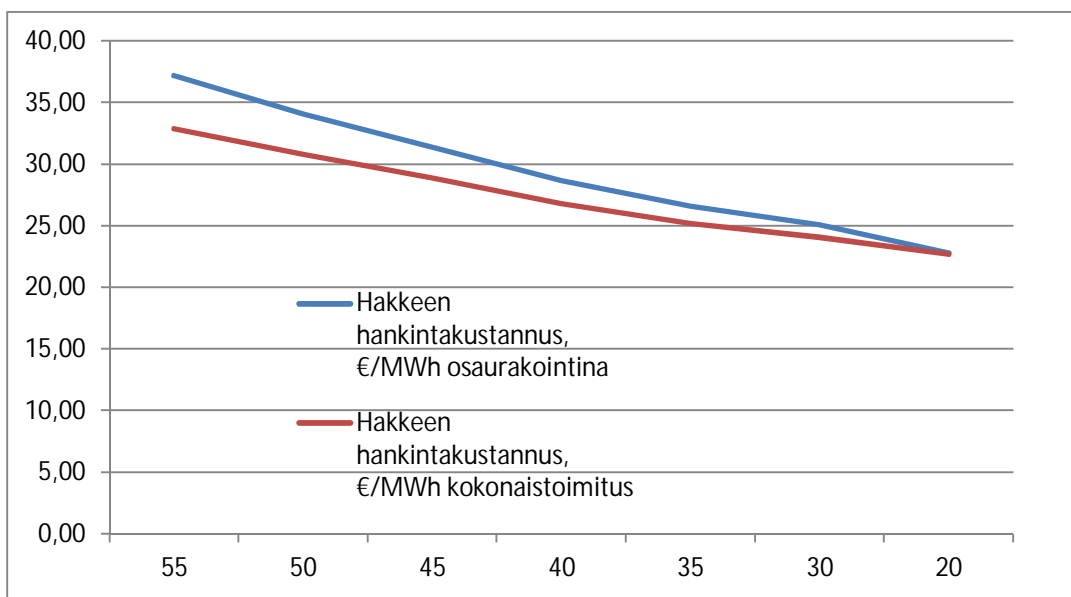
Vastaavasti **kokonaistoimitusmallissa** käytettiin seuraavia kustannuksia:

- Valmis metsähake perille toimitettuna 20 €/MWh
- Kattilan hyötysuhde 78-88 % hakkeen kosteuden vaihdella välillä 55-20 %
- Häiriöistä aiheutuvat kustannukset 120 €/häiriö
- Lisäöljyn käytöstä aiheutuneet kustannukset 5 200- 0 €/v (hake 55-20 %)

Vertailtaessa laitosten 1 ja 2 hankintaketjujen kustannustekijöitä huomattakoon, että raaka-aineen hinta perustuu tilavuuteen eikä energiasisältöön. Vastaavasti kuljetus on hinnoiteltu jälkimmäisessä tilavuuden mukaan eikä kilometritaksan perusteella. Kaikki edellä mainitut maksuperusteet ovat yleisesti käytössä varsinkin pienillä laitoksilla ja siksi haluttiin tietoisesti saada niitä mukaan tarkasteluun.

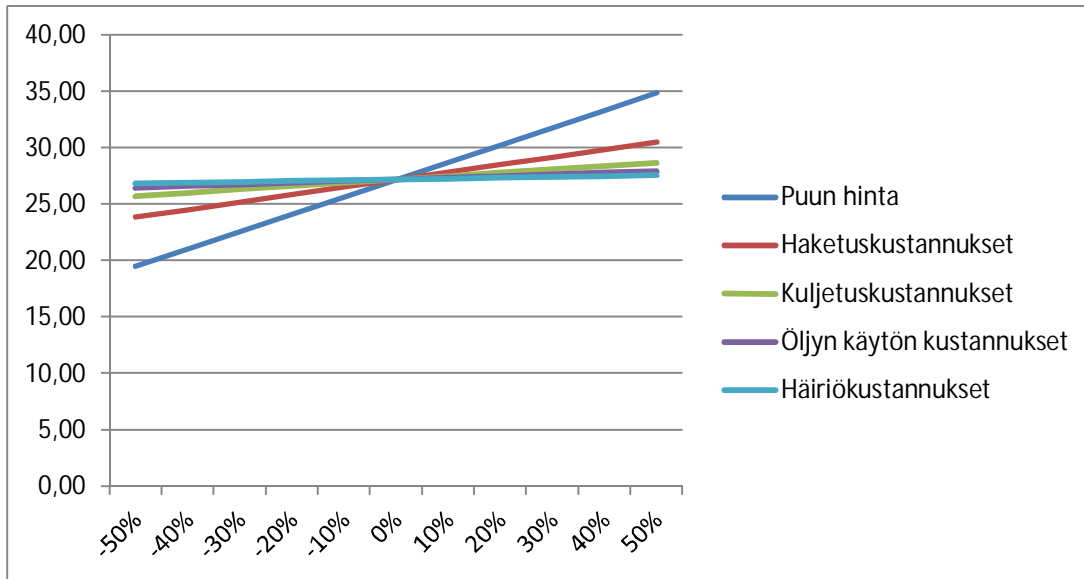
Kattilan käyttöön ja toimintaan liittyvät kustannukset määriteltiin samoin perustein kuin laitoksella 1. Polttoöljyn ja häiriöiden vaikutus luonnollisesti suhteutettiin pienempään kattila- ja lämmöntuotantokapasiteettiin.

Kuvassa 26 on esitetty molempien hakkeen hankintaketjujen kustannukset lämpölaitoksella tuotettua megawattituntia kohti suhteessa metsähakkeen kosteuteen. Pienemmästä kuljetuskalustosta johtuen kuormien painorajat eivät tule vastaan vaan aina voidaan kuljettaa täysiä kuormia. Tällöin raaka-aine- sekä kuljetus- ja haketus-kustannukset kasvavat suoraan verrannollisesti toimitetun hakkeen energiasisällön suhteen.



Kuva 26. Metsähakkeen hankintakustannukset osaurakointi- ja kokonaistoimitusmalleissa lämpölaitoksella, jonka vuotuinen lämmöntuotanto on 1 500 MWh.

Samaan tapaan kuin laitoksella 1 tehtiin tässäkin tapauksessa hakkeen hankintakustannuksille herkkyystarkastelu osaurakointimallin eri kustannustekijöiden suhteen muuttamalla yhtä kustannustekijää kymmenen prosenttia kerrallaan skaalalla -50 % + 50 % (Kuva 27). Nollatasoksi valittiin 35-prosenttisen hakkeen hankintakustannus. Jälleen tarkastelun tarkoituksena on havainnollistaa, mitkä tekijät ovat kustannusvaikutuksiltaan merkittävimpiä. Kuten kuvasta 27 näkyy, hakkeen raaka-aineen hinnan muutos vaikuttaa kaikkein eniten lopputuotteen hankintakustannukseen. Pienemmän laitoksen hankintaketjussa haketuksen hinnanmuutokset ovat merkittävämpi kuin suuremmissa toimitusketjuissa.



Kuva 27. Metsähakkeen hankintakustannustekijöiden herkkyyksianalyysikäyrät skaalalla 50 % + 50 %. Nollataso on laskettu 35 % hakkeelle.

Kuivan ja kostean hakkeen kustannuserot

Edellä kuvatuissa esimerkitapauksissa ensimmäisen laitoksen hakkeen hankintakustannuseroksi muodostui 5,3 € osatoimitusmallissa ja 4,3 € kokonaistoimitusmallissa (Kuva 22) sekä toisella laitoksella 10,2 € osatoimitusmallissa ja 6,2 € (Kuva 24) tuotettua megawattituntia kohti, kun hakkeen kosteus väheni 45 prosentista 20 prosenttiin. Mikäli esimerkkilaitoksille toimitettaisiin täysin tuoretta (55 %) haketta hankintakustannusero verrattuna 20 prosentin hakkeeseen vastaavat luvut ensimmäisellä laitoksella olisivat 8,9 €/MWh (osatoimitus) ja 6,8 €/MWh sekä toisella laitoksella 14,6 €/MWh ja 8,7 €/MWh. Tuoretta metsähaketta ei tietenkään pystytä näillä laitoksilla sellaisenaan käyttämään vaan sitä olisi kuivattava ennen polttoa. Kuivauksen vaikutusta kokonaiskustannuksiin on tarkasteltu tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Lasketuista esimerkeistä huomataan, että raaka-aineen kosteudella on suuri merkitys hakkeen hankintakustannuksiin, varsinkin tapauksissa, joissa hankintaketjun työvaiheet hinnoitellaan pääsääntöisesti raaka-aineen tilavuuden mukaan. Metsähakkeen hankintakustannusten ero ilmaisee myös sen, kuinka paljon enemmän lämpölaitoksen kannattaisi maksaa kuivemmasta hakkeesta tarkastelluissa esimerkitapauksissa. Mikäli käytettäisiin keinokuivausta ja hake käytettäisiin omalla laitoksella, saisi kokonaiskuivauskustannus olla korkeintaan esitetyn eron suuruinen. Mikäli kuivattu hake taas myytäisiin toisille käyttäjille, pitäisi hankintakustannuseron kattaa myös kuivatun hakkeen kuljetus- ja käsittelykustannukset, jotta keinokuivatun hakkeen hankkiminen olisi laitokselle kannattavaa.

4.4 Hakkeen tai pilkkeen tuotanto ja kuivaus osana lämpöyrittäjyyttä

Tässä tutkimuksessa rajoituttiin käsittelemään hakkeen ja pilkkeen kuivausta osana lämpöyrittäjän liiketoimintaa. Pää tarkoituksena oli selvittää lämpökattilan käyttämättömän lämmöntuotantokapasiteetin hyödyntämisen taloudellisia edellytyksiä kuivauksessa. Tästä syystä kylmäilmakuivaus rajataan tarkastelun ulkopuolelle. Liiketoimintamalliin ei sinänsä oteta kantaa vaan tarkastelunäkökulma sopii kaikkiin yritys-, yrittäjä- ja osuuskuntiin ja muihin vastaaviin, jotka vastaavat lämmöntuotannosta ja polttoaineen

hankinnasta pienen- ja keskisuuren kokoluokan lämpölaitoksissa. Polttoaineen käsittelyn oletettiin tapahtuvan lämpölaitoksen läheisyydessä.

4.4.1 Yleistä

Biopolttoaineiden kuivaus parantaa polttoaineen ominaisuuksia, kuten lämpöarvoa ja käsiteltävyyttä. Tällöin polttoainetta tarvitaan vähemmän saman lämpöenergiamäärän aikaansaamiseksi. Kuivemmalla polttoaineella myös palaminen on puhtaampaa ja savukaasuhäviöt vähenevät. Kuivatun biopolttoaineen käsittely on helpompaa, kun polttoaine ei talven aikana jäädy ja varastoinnin ongelmat kuten kuiva-ainetappiot, homehtuminen ja bakteerikasvu vähenevät.

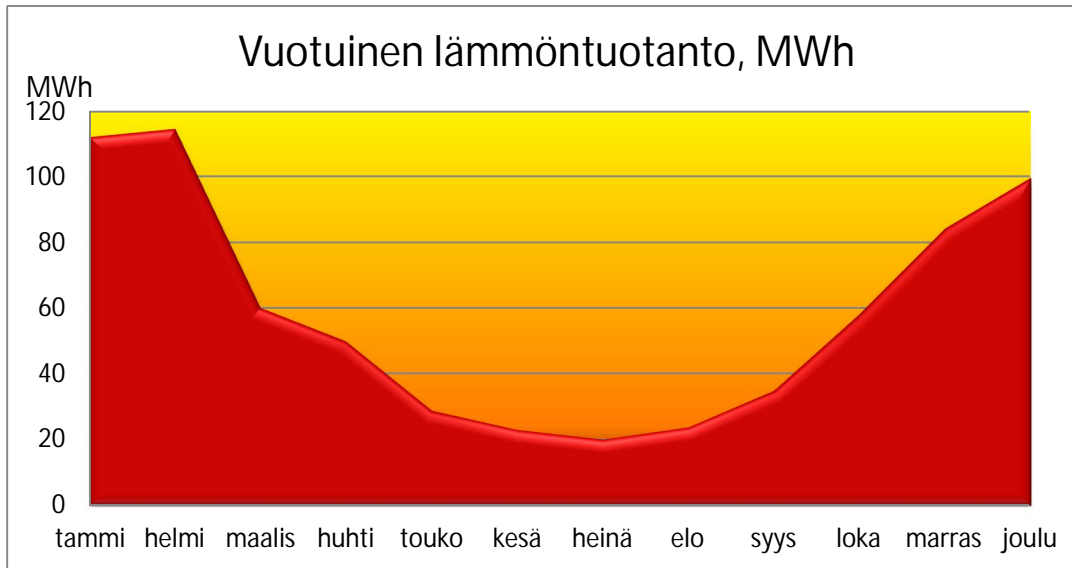
Hakekuivurit ovat pääsääntöisesti varastokuivureita, joissa polttoaine voidaan varastoida kuivauksen jälkeen. Pilkekuivuryyppettä ovat mm. siirrettävä kuivuri, kenttäkuivuri, varastokuivuri, ajonkestävä monikäyttökuivuri ja lämminilmakonttikuvuri.

Lämminilmakuivauksessa lämpöä on tuotettu yleensä hakkeella, sähköllä tai öljyllä. (Rinne 2002) Kuivurissa ilmaa joko imetään tai puhalletaan (yli- tai alipainekuivaus). Alipainekuivaus on todettu pilkkeillä paremmaksi vaihtoehdoksi, koska tällöin lämmin ilma saadaan siirtymään tasaisemmin koko kuivattavan puuerän läpi. Lämpökeskuksen yhteyteen rakennetussa kuivurissa lämminvesiputket vedetään kuivurin lämmönvaihtimeen tai radiaattoriin, josta lämpöä saadaan kuivausilman lämmittämiseen.

Anniina Huovinen (2012) selvitti keskisuomalaisten lämpöyrittäjien kiinnostusta laajentaa lämpöyrittäjätoimintaa hakkeen ja pilkkeen kuivaukseen. Tutkimus toteutettiin kirjekyselynä, joka postitettiin noin 250:lle bioenergiaklusterin parissa työskentelevälle yrittäjälle tai yksityishenkilölle. Vastauksia kyselyssä saatiin 47.

Yli puolet vastaajista olisi halukkaita laajentamaan biolämpöyrittämistä. Puolet vastanneista koki tarvitsevansa kuivuria ja oli jo harkinnut kuivurin hankkimista. Suurin este kuivaukselle oli kuivurin kalliiksi koettu alkuihminen investointi. Keinokuivaus arveltiin kalliiksi myös siksi, että polttoaineelle ei uskottu tulevan suurta arvonnousua, sillä kuivauskustannusten epäiltiin olevan hankalaa siirtää puupolttoaineen hintaan.

Samassa selvityksessä tutkittiin keskisuomalaisten lämpöyrittäjäkohteiden kattiloiden käyttöastetta. Keskiarvokoko kaikista tiedossa olevista biolämpölaitoksista kohderyhmän kokoluokassa (50 kW -2 000 kW) oli 420 kW. Kun oletetaan, että ne on mitoitettu käymään 2300 tuntia vuodessa nimellisteholla, tuottavat ne keskimäärin 950 MWh vuodessa. Samalta käyttöastekäyrällä laskettuna lämpölaitoksissa olisi noin 225 MWh ylimääräistä lämmityskapasiteettia kuukaudessa laitosta kohden.



Kuva 28. Kyselyyn vastanneiden lämpölaitosten koko vuoden keskimääräinen lämmöntuotanto lämmityskaudella 2011. (Huovinen 2012)

Mainitulla ylimääräisellä kapasiteetilla (225 MWh/kk) voitaisiin kuivata noin 2 000 i-m³ klapeja tai vastaava määrä metsähaketta kuukaudessa, jos kuivaus kuluttaa 120 kWh/i-m³ (vaihteluväli 100-160 kWh/ i-m³ vuodenaikojen mukaan). Vuodessa tämä tarkoittaisi siis lähes 20 000 i-m³ kuivattuja puupolttoaineita biolämpökattilaa kohden, jos kuivataan yhdeksänä kuukautena vuodessa. Tämä tarkoittaa maakuntamittakaavassa sitä, että teoriassa suurin osa Keski-Suomen alueella käytettävät hakkeesta ja klapeista voitaisiin kuivata biolämpölaitosten ylimääräisellä lämpökapasiteetilla (Huovinen 2012). Keski-Suomessa käytettiin Metlan mukaan 856 000 m³ polttopuuta ja haketta vuonna 2011 (Ylitalo 2012).

Kuivauksen kannattavuus

Jotta hakkeen tai pilkkeen kuivaus olisi kannattavaa, tulee saavutettujen hyötyjen kattaa kuivauksen suorat kustannukset (lämpö, sähkö ja materiaalin lisäsiirrot) sekä investoinnit kuivauslaitteistoon (esim. kärry/kontti, lämmönvaihdin, puhallin ja lämmönjakoputkisto) ja kuivauslaitteiston poistot. Pienehkön, esimerkiksi 25 m³ panoskuivurin investointi maksaa 20–35 k€ toteutuksesta riippuen (E. Lehtola Ky 2012). Lisäksi saatetaan tarvita katettu varasto kuivatulle materiaalille.

Kuivauksella saavutetaan useita etuja. Klapituotannossa lisätuloja saadaan paremman klapin myyntihinnan, varaston nopeamman kierron ja ympärivuotisen toiminnan kautta. Kustannussäästöjä syntyy, kun varastoon sitoutuneet pääomat ovat jatkuvassa tuotantotoiminnassa pienemmät ja varaston kierto on tämän myötä nopeampi.

Kuiva hake mahdollistaa merkittäviä säästöjä lämmöntuotannossa. Käytettäessä kuivaa haketta omassa laitoksessa hakkeen kulutus laskee merkittävästi; 10 %:n lasku polttoaineen kosteudessa mahdollistaa 15 % pienemmän hakkeen kulutuksen (Huovinen 2012). Sähköä säästyy siirtoruuvien ja ilmapuhaltimien pienemmän käytön takia. Kuiva polttoaine parantaa laitoksen toimintavarmuutta ja vähentää häiriöitä ja varajärjestelmän käyttöä, mikä puolestaan tuo säästöjä varapolttoaineen, useimmiten lämmitysöljyn, käytössä.

Kuivalla, 25 % hakkeella saavutetaan alle 1 MW kattiloissa jopa 6 % korkeampi laitosteho kuin poltettaessa märkää 45 % haketta (Huovinen 2012, ks. myös 4.2). Etenkin kylmimpinä kuukausina tämä lisäteho on erittäin oleellinen kustannustekijä. Lisäksi varastotappiot ovat pienemmät ja huonolaatuisen hakkeen aiheuttamat terveyshaitat vähäisemmät.

4.4.2 Kuivatun hakkeen myynti

Yhtenä vaihtoehtona perinteiselle hake- ja lämmöntuotantoketjulle oletettiin, että lämpöyrittäjä voisi laajentaa liiketoimintaansa ja tehostaa biokattilan käyttöä investoimalla kiinteään polttoaineen kuivuriin ja kuivaamalla siinä haketta myyntiin toisille lämpökeskuksille tai maataloille. Kuivuri saisi kaiken tarvitsemansa lämpöenergian kyseisestä lämpölaitoksesta.

Tässä vaihtoehdossa laskettiin myyntihakkeen kuivauksen kannattavuuden edellytyksiä, mikäli haketta kuivattaisiin joko 55 % eli kaatotuoreesta tai 45 % vettä sisältävästä eli metsävarastoidusta mäntykokopuusta 20 % tavoitekosteuteen. Tavoitekosteus voisi kattilan kannalta olla korkeampikin, mutta hakkeen perusteellisella kuivauksella varmistetaan sen säilyvyys laadukkaana myös hakevarastossa ja ehkäistään hakkeen itsekuumeneminen.

Esimerkkilaskelmissa käytettiin 25 i-m³ panoskuivurista saatua hinta-arviota (E. Lehtola Ky) sekä hankkeessa tehtyjä hakkeen hankintakustannusvertailuja ja kuivausmallinnusta. Tällainen kuivuri vaatisi kattilasta 40-60 kW tehontarvetta kuivausilman lämmittämiseen. Kuivurin hyötysuhteeksi oletettiin 70 %. Esimerkkilaskelmassa kyseisellä kuivurilla kuivattaisiin sata erää vuodessa eli yhteensä 2 500 i-m³ haketta. Kuivauskustannusten laskentaan käytettiin seuraavia arvoja:

- Kuivattava hakemäärä 2 500 i-m³/v
- Kuivauksessa kuluva lämpöenergia – määritettiin laskentamallin avulla - 445 MWh (55 % hake) ja 268 MWh (45 % hake)
- Kuivauksessa käytettävän lämmön hinta 40 €/MWh (lämmöntuotannon omakustannushinta lämpöyrittäjälle) ja 24 €/MWh (vain kuivauksessa käytetyn hakkeen kustannukset, jolloin hakkeen ostohintana pidettiin 20 €/MWh ja kattilan hyötysuhteena 82 %)
- Kuivurin investointikustannus 35 000 €
- Sähkö ja ylläpito 1300 €/v
- Investoinnin takaisinmaksuaika 10 v
- Laskentakorko 5 %

Edellä mainituilla arvoilla 55 % hakkeen kuivauskustannuksiksi saatiin 9,3 €/i-m³, mikäli kuivaukseen käytetyn lämmön hintana pidettiin lämpölaitoksen oletettua lämmön omakustannushintaa 40 €/MWh, joka siis sisältää kaikki lämpölaitoksen kustannukset ilman verkostokustannuksia. Mikäli kuivauslämmön hintana pidetään vain polttoainekuluja, kuivauksen hinnaksi tulee 6,5 €/i-m³. Vastaavat kustannukset 45 % hakkeen kuivauksessa ovat 6,6 €/i-m³ ja 4,8 €/i-m³.

Esimerkkilaskelman mukaisilla luvuilla haketta kannattaisi kuivata myyntiin, mikäli myytävästä hakkeesta saisi edellä esitettyjen kuivauskustannusten verran enemmän rahaa suhteessa tuoreen hakkeen osto- tai hankintahintaan. On kokonaan toinen asia, onko asiakkaalla halua maksaa näin paljon kuivatusta hakkeesta. Pelkkä lämpöarvon nousu ei tietenkään kata kuivauskustannuksia, koska kuivurissa väistämättä tapahtuu häviöitä ja toisaalta kuivaus sisältää myös pääomakustannuksia. Siksi asiakkaan tulee laskea, saako hän kuivan hakkeen käytöstä riittävästi muita hyötyjä, jotta kuivattua haketta kannattaa ostaa. Niistä mainittakoon kattilan parempi hyötysuhde, häiriöiden väheneminen, kattilan suurempi maksimitehon tuotto sekä sähkön- ja varapolttoaineenkäytön väheneminen.

4.4.3 Hakkeen kuivaaminen omaan käyttöön

Toisena tarkasteltavana vaihtoehtona on, että lämpöyrittäjä kuivaa operoimassaan lämpölaitoksessa metsähaketta omaan käyttöön. Oletuksena on edelleen, että investoitava kuivuri sijaitsisi lämpölaitoksen välittömässä yhteydessä ja ottaisi sieltä kaiken tarvitsemansa lämpöenergian.

Investoinnin kannattavuutta laskettiin nykyarvomenetelmällä käyttämällä kymmenen vuoden takaisinmaksuaikaa ja viiden prosentin laskentakorkokantaa. Nykyarvomenetelmää käytettäessä lasketaan investointiin liittyvien tuottojen ja kustannusten nykyarvot sekä niiden erotukset. Investointia voidaan pitää käytettyjen lukujen valossa kannattavana, jos tuottojen nykyarvo on suurempi kuin kustannusten nykyarvo.

Nykyarvolaskelmat tehtiin oletetun luvussa 4.3 kuvatun laitoksen 2 tilanteeseen sopiviksi, jolloin kuivuriksi sopii edellisessä luvussa kuvattu kapasiteetiltaan 25 i-m³ panoskuivuri. Vertailussa tarkasteltiin tilanteita, joissa kaatotuoreesta (55 %) ja metsävarastoidusta (45 %) kokopuusta tehty hake kuivataan 20 -prosenttiseksi. Laitoksessa 2 oletetaan tuotettavan vuosittain 1 500 MWh lämpöenergiaa, mikä tarkoittaa että 88 % hyötysuhteella toimiva kattila (500 kW) tarvitsee polttoaineekseen n. 2 100 i-m³ mäntykokopuuhaketta, jonka kosteus on 20 %. Vastaavasti tämä hakemäärä on kuivattava alkukosteudesta riippumatta.

Nykyarvomenetelmässä vuosittaisina kustannuksina käytetään muuttuvia kustannuksia, jotka tässä tapauksessa ovat pääasiassa kuivauksessa käytettävän lämmön hankintakustannukset. Lämpöyrittäjätarkastelussa kuivauslämmön kustannuksiksi valittiin joko lämpölaitoksen ns. lämmöntuotannon omakustannushinta sisältäen lämpölaitoksen muuttuvat ja kiinteät kulut, muttei lämmönsiirtokustannuksia tai vain kuivaukseen käytetyn polttoaineen hinta kattilan hyötysuhteella huomioituna. Näin ollen kuivausenergian kustannuksina käytettiin joko 40 €/MWh tai 24 €/MWh.

Korkeampaa kuivauslämmön hankintakustannusta voidaan perustella sillä, että se on lämmöntuotannon 'todellinen' kustannus riippumatta käyttötarkoituksesta. Kuivauksen muuttuvana kustannuksena sitä voidaan pitää, mikäli ajatellaan, että kuivauslämpö 'ostetaan' kyseisestä lämpölaitoksesta. Alempi kuivauslämmön hankintakustannus puolestaan on perusteltua, mikäli oletetaan, että kuivauslämpöä on riittävästi saatavilla tavallisen lämmöntoimituksen ohessa ja varsinainen lämpöliiketoiminta kattaa lämpölaitoksen kiinteät ja operatiiviset kustannukset.

Kuivauksen tuotoksi laskelmassa huomioitiin kuivemman hakkeen käytöstä aiheutuneet säästöt lämmöntuotannossa verrattuna märkään tai kosteaan hakkeeseen. Polttoaineen hankintakustannuksissa tuotettua lämpöenergiaa kohti huomioitiin seuraavat hyödyt, jotka on tarkemmin kuvattu luvussa 4.3:

- Kuivempaa haketta kuluu vähemmän kuin tuoretta eli hakkeen raaka-aineen ostokustannukset alenevat
- Hakkeen kuljetuskustannukset vähenevät kuljetussuoritteiden vähetessä
- Haketuskustannukset vähenevät volyymin pienetessä
- Kattilan hyötysuhde paranee
- Kattilan ja syöttölaitteiston häiriöt vähenevät
- Tukipolttoainetta (laskettu lämmitysöljyn mukaan) kuluu vähemmän

Metsähakkeen tuotantoketjussa eri vaiheiden suoritteita ja kustannuksia voidaan hinnoitella useilla eri tavoilla kuten luvussa 4.3 on kerrottu. Perinteisesti ketjun alkupään toimijat eli metsänomistajat sekä korjuu- ja haketusurakoitsijat operoivat perustuen raaka-aineen tilavuuden mittaukseen, kun taas lämpölaitoksesta vastaava on ensisijaisesti kiinnostunut hankkimansa hakkeen energiasisällöstä. Metsähakkeen kuljetus sen sijaan voidaan hinnoitella joko tilavuuden tai painon sekä kuljetusmatkan mukaan. Lisäksi on olemassa koko joukko muunnelmia näistä hinnoitteluperusteista.

Asian yksinkertaistamiseksi kuivauksen kannattavuustarkasteluihin valittiin selkeästi joko tilavuuteen perustuva eri työvaiheiden kustannushinnoittelu eli ns. *osaurakointimalli* tai hakkeen energiasisällöön perustuva toimitusketju eli *kokonaistoimitusmalli*. Käytännössä pienten aluelämpökeskusten polttoaineen hankinta varsin pitkälle perustuu tilavuusperusteiseen hinnoitteluun, sillä jatkuvien hakenäytteiden otto ja analysointi koetaan työlääksi laitoksilla, joiden toiminta pyritään pitämään miehittämättömänä niin paljon kuin mahdollista. Polttoaineen laadunhallinta perustuu enimmäkseen kokemukseen ja osapuolten

keskinäiseen luottamukseen. Suuremmissa laitoksissa puolestaan kiinteä polttoaine voidaan ostaa hankintaorganisaatiolta kokonaistoimituksena, jolloin lopputuotteen hinta määräytyy energiasisällön mukaan.

Hakkeen kuivauksen kannattavuus osaurakointimallissa

Mikäli hakkeen hankintaketjun eri työvaiheet on hinnoiteltu pääasiassa tilavuussuoritteen mukaan, kuivemman ja siten energiasisällöltään paremman hakkeen käyttäminen lämpölaitoksessa vähentää selvästi lämmöntuotannon kokonaiskustannuksia, sillä polttoainekustannukset alenevat merkittävästi. Kuten aiemmin on esitetty, Laitoksen 2 polttoainekustannukset alenivat 14,6 € tuotettua megawattituntia kohti hakkeen alkukosteuden ollessa 55 % ja 8,7 €, kun alkukosteus oli 45 %. Molemmissa laskentaesimerkeissä hake kuivattiin 20 % loppukosteuteen.

Vaikka esimerkin kustannussäästöt olivat huomattavia, korkeammalla ns. lämmön omakustannushinnalla (40 €/MWh) kuivuri-investointi osoittautui kannattavaksi vain kuivattaessa kaatotuoretta (55 %) haketta lämpölaitoksen omaan käyttöön. Tällöinkin kustannusten ja tuottojen nykyarvojen erotukseksi jäi vain n. 15 000 € kymmenen vuoden tarkastelujaksolla. (Taulukko 4)

Jos kuivauksessa käytetyn lämmön hintana käytetään alemmaa vain lisääntyneen polttoaineen käytöstä aiheutuvia kustannuksia (24 €/MWh), investoinnin kannattavuus paranee merkittävästi. Tällöin molempien sekä 55 % että 45 % hakkeiden kuivaus osoittautui perusinvestoinnin eli kuivurin osalta kannattavaksi. Kustannusten ja tuottojen nykyarvojen erotukseksi tuli ensimmäisessä tapauksessa lähes 60 000 € ja jälkimmäisessä lähes 20 000 € kymmenen vuoden laskentajaksolla. (Taulukko 4)

Edellä mainituissa laskentaesimerkeissä ei ole kuitenkaan huomioita hakkeen kuivauksesta aiheutuvien lisätöiden kuten siirtelyjen eikä mahdollisten lisätilojen kuten varastojen kustannuksia. Jotta kuivaus olisi kokonaisuudessaan kannattavaa yrittäjälle, pitäisi erotukseksi saadut rahasummat riittää myös kuivauksen mahdollisesti edellyttämiin lisäinvestointeihin sekä kaikkiin muihin mahdollisiin lisäkustannuksiin, mitä kuivaus aiheuttaa.

Vertailun vuoksi laskettiin myös, miten mahdollinen kuivatun hakkeen varastoinvestointi vaikuttaa investointien kokonaiskannattavuuteen. Esimerkissä, jossa lisävarasto maksaa 35 000 €, ei korkeammalla (40 €/MWh) kuivauslämmön hinnalla saavuteta kannattavuutta kummassakaan toimintavaihtoehdossa. Sen sijaan alemmalla (24 €/MWh) lämmön hinnalla investoinnit olisivat kannattavia osaurakointimallin mukaisessa lämmön toimitusketjussa. (Taulukko 4)

Hakkeen kuivauksen kannattavuus kokonaistoimitusmallissa

Mikäli hakkeen hankintaketjun eri työvaiheet on hinnoiteltu pääasiassa tuotetun polttoaineen energiasisällön mukaan tai valmiille hakkeelle on asetettu energiasisältöön perustuva ns. laitoshinta, joka sisältää kaikki eri tuotantovaiheen kustannukset, on luonnollista, etteivät hakkeen kuivaamisella saavuteta yhtä suuria säästöjä hakkeen hankintakustannuksissa kuin yllä olevissa esimerkeissä. Silti esimerkkilaitoksen polttoainekustannukset alenivat 10,2 € tuotettua megawattituntia kohti hakkeen alkukosteuden ollessa 55 % ja 6,2 €, kun alkukosteus oli 45 %. Tämä johtuu siitä, että pienessä laitoksessa suurimmat säästöt muodostuvat ennen kaikkea kattilan hyötysuhteen paranemisesta sekä häiriöiden ja tukipolttaineen käytön vähenemisestä.

Verraten suuret säästöt polttoaineen hankintakustannuksissa eivät kuitenkaan riitä tekemään kuivausinvestoinneista kannattavia kokonaistoimitusmallissa, mikäli kuivauksessa käytetään lämmön hintana 40 €/MWh. Alemmalla, 24 €/MWh, kuivauslämmön hinnalla määrän 55 % hakkeen kuivaus osoittautui niukasti kannattavaksi, mikäli kustannuksia ei tule lisätöistä tai – investoinneista. Tällöin nykyarvojen erotukseksi muodostui n. 9 000 €. (Taulukko 4)

Taulukko 4. Kuivausinvestointien nettotuottojen nykyarvojen erotukset osurakointi- ja kokonaistoimintamalleissa kuivattaessa 55 % ja 45 % haketta loppukosteuteen 20 % eri investointivaihtoehdoilla.

	Kuivauslämpö 40 €/MWh		Kuivauslämpö 24 €/MWh		Kuivauslämpö 40 €/MWh + lisävarasto		Kuivauslämpö 24 €/MWh + lisävarasto	
	Osaurakointi	Kokonaistoimitus	Osaurakointi	Kokonaistoimitus	Osaurakointi	Kokonaistoimitus	Osaurakointi	Kokonaistoimitus
Hakkeen alkukosteus								
55 %	14 792	-36 170	60 196	9 234	-775	-51 738	46 683	-6 334
45 %	-8 159	-37 222	19 407	-9 655	-23 727	-52 789	5 894	-25 223

Lisääntyneen lämmön myynnin vaikutus kuivauksen kannattavuuteen

Edellisissä esimerkeissä on oletettu, ettei hakkeen kuivaus vaikuta mitenkään lämpölaitoksen lämpöliiketoimintaan eli vuotuinen lämmönmyynti pysyy vakiona. Mikäli laitoksen lämpökattila on mitoitettu toteutunutta lämmönmyyntiä vastaavaksi, ei laitoksella ole kapasiteettia tuottaa lämpöä uusille asiakkaille, vaikka kysyntää olisikin. Käytettäessä kuivempaa haketta lämpökattilan tuotantoteho kuitenkin kasvaa.

Oletetaan, että esimerkkinä käyttämämme lämpölaitos kuivaa oletuskuivurissa maksimimäärän haketta vuodessa eli 2 500 i-m³ ja tuottaa sillä kaiken asiakkaalle myytävän lämmön, lämmönmyyntipotentialiaali kasvaisi n. 300 MWh, kun otetaan huomioon polttoaineen kohonnut lämpöarvo ja kattilan parantunut hyötysuhde. Jos lämpöyrittäjä saisi myymästään lisälämmöstä esimerkiksi 60 €/MWh, tarkoittaisi se vuositasolla 18 000 € bruttotulojen lisäystä.

Jos edellä esitetty lisätuotto otetaan huomioon kuivausinvestoinnin nykyarvolaskelmissa, kuivauksen kannattavuus paranee radikaalisti. Taulukon 5 nykyarvolaskelmissa on huomioitu lisääntyneestä lämmönmyynnistä saatu tulo. Lisähakkeen kuivauskustannukset on laskettu samaan tapaan kuin aiemmin on esitetty. Laskelmista nähdään, että lisääntynyt lämmönmyynti tekisi kaikista kuivaus- ja investointivaihtoehdoista hyvin kannattavia.

Taulukko 5. Kuivausinvestointien nettotuottojen nykyarvojen erotukset osurakointi- ja kokonaistoimintamalleissa kuivattaessa 55 % ja 45 % haketta loppukosteuteen 20 % eri investointivaihtoehdoilla. Tuottoihin on lisätty 18 000 €/v lämmön lisämyynnistä.

	Kuivauslämpö 40 €/MWh		Kuivauslämpö 24 €/MWh		Kuivauslämpö 40 €/MWh + lisävarasto		Kuivauslämpö 24 €/MWh + lisävarasto	
	Osaurakointi	Kokonaistoimitus	Osaurakointi	Kokonaistoimitus	Osaurakointi	Kokonaistoimitus	Osaurakointi	Kokonaistoimitus
Hakkeen alkukosteus								
55 %	162 462	101 792	216 514	155 845	146 894	63 779	203 001	140 277
45 %	135 139	100 541	167 956	133 358	119 571	61 724	154 443	117 790

Samaa asiaa voidaan tarkastella kysymällä, kuinka paljon lämmön lisämyyntiä lämpöyrittäjän pitäisi saada, jotta hakkeen kuivaaminen esitetyillä oletuksilla olisi hänelle kannattavaa. Heikoimmin kannattavassa tapauksessa eli kokonaistoimituksessa, jossa investoitaisiin kuivurin lisäksi hakevarastoon kuivauslämmön hinnan ollessa 40 €/MWh, bruttotuloja tarvittaisiin noin 9 000 € enemmän vuodessa, jotta yrittäjän kannattaisi lähteä kyseisiin investointeihin. Käytännössä tämä tarkoittaisi noin puolta lisääntyneestä lämmöntuotantokapasiteetista ja 200 ylimääräisen hakekuution kuivaamista lämmöntuotantoon. Vastaavasti osaurakointimallissa kannattavuuteen riittäisi 3 000 € vuotuinen bruttomyyntiin lisäys, mikä saadaan kuivaamalla 50 hakekuutiota enemmän kuin perustapauksessa.

Edellä esitetyt esimerkit osoittavat selkeästi, kuinka paljon lämmön lisämyynti voi parantaa kuivausinvestointien kannattavuutta. On kuitenkin syytä korostaa, että suuremmalle lämmöntuotannolle pitäisi myös olla kysyntää eli käytännössä pitäisi saada uusia asiakkaita. Lisäksi on hyvä muistaa, että lämpölaitoksen vuotuinen lämmöntuotanto voi vaihdella hyvinkin paljon riippuen asiakkaiden todellisesta lämmöntarpeesta, mihin puolestaan vaikuttavat säätila, vedenkulutus, mahdolliset teollisuuden prosessit, jne. Se, kuinka paljon lämpöyrittäjän on mahdollista tuottaa lisälämpöä muille kuin jo sovituille asiakkaille, riippuu myös paljon kattilan mitoituksesta suhteessa todelliseen lämmöntarpeeseen. Ylimoitettulla kattilalla voidaan tuottaa lämpöä sovittua enemmän ilman hakkeen kuivaamistakin.

5. Johtopäätökset

Kesän kuivumisjakson jälkeen ulkona varastoitu energiapuu alkaa kostua uudelleen elosyyskuusta alkaen riippuen luonnollisesti paikallisesta säätilasta. Ennen pakkaskautta varastoidun puun kosteus voi hyvinkin nousta 5-10 % ja jopa enemmän, mikäli varastopaikka on valittu huonosti. Tällöin esimerkiksi maakosteus ja/tai valumavedet voivat entisestään lisätä pinon kastumista. Saarijärvellä tehty varastointitutkimus tukee hyvin aikaisempia tutkimuksia hyvän ja nopean kuivumisen suhteen aukealla ja tuulisella varastoalueella. Kasat eivät myöskään näyttäneet uudelleen kastuvan enemmän tai nopeammin kuin tyypillisessä metsätievarastossa. Täytyy kuitenkin muistaa, että vallinnut säätila vaikuttaa kuivumiseen ja kuivana säilymiseen eniten, joten eri vuosina varastoidun energiapuun kosteus voi vaihdella jopa kymmeniä prosenttiyksiköjä.

Kaikki tutkitut ulkona varastoidut hakekasat kastuivat perusteellisesti, joten peittämisellä, hakelaadulla tai alkukosteudella ei näyttänyt olevan merkitystä hakkeen säilymiseen kuivana. Sateisesta kesästä huolimatta voidaan päätellä, että valmista polttohaketta ei kannata säilyttää pienissä ulkoauimoissa, joissa ne voivat kastua läpikotaisin.

Varastohallissa olleet hakekasat sen sijaan kuivuivat selvästi kesän ja vielä syksyinkin aikana. Mikäli varastoitavan puun kosteus on alle 30 %, hakekasan lämpötila nousee vain muutamaksi viikoksi eikä silloinkaan paloturvallisuuden kannalta liian suureksi. Koska hakkeen laatu säilyy hyvänä eikä mikrobien aiheuttamia kuiva-ainetappioita ilmeisesti tapahdu suuressa määrin, voi tällaisen hakkeen varastointia suositella katetussa tilassa jo hyvissä ajoin ennen lämmityskauden alkua. Kaiken kaikkiaan pienet kasat, oli ne sitten tehty koko- tai rankapuusta, tuulettuvat hyvin, jolloin kasan lämpötila laskee nopeasti eikä enää uudelleen lähde nousuun talven aikana. Mikäli katettua varastotilaa on käytössä, kannattaisi ainakin osa energiapuusta hakettaa ja varastoida silloin, kun puu on kuivimmillaan. Siten kevään ja kesän kuivausjakso saataisiin hyödynnettyä hakkeen laadun kannalta parhaiten.

Polttokokeiden perusteella polttoaineen kosteuden lisääntyminen heikentää kattilan toimintaa ja sen käytettävyyttä ja lisää merkittävästi lähes kaikkia päästöjä. Kyseinen vaikutus ei näkynyt vielä merkittävästi silloin, kun polttoaineen kosteus oli n. 20 tai 34 %. Sen sijaan kun polttoaineen kosteus kasvoi n. 50 %:iin, kattilan toiminta heikkeni merkittävästi. Kokeiden perusteella tavanomaisissa tällaisen kokoluokan kattiloissa ei tulisi käyttää märkää polttoainetta.

Liian kostea polttoaine voi vähentää lämpölaitoksen tuloja merkittävästi. Ensinnäkin kattilan teho pienenee, joten kattilalla tuotettavan lämmön määrä vähenee. Sen seurauksena myynnistä saatavat tulot voivat pienentyä huomattavasti. Lisäksi kattilan hyötysuhde heikkenee merkittävästi, mikä taas lisää polttoainekuluja. Kosteaa polttoainetta aiheuttaa usein toimintaongelmia, jolloin laitoksella joudutaan käymään ongelmien poistamiseksi, mikä puolestaan lisää käyttö- ja huoltokuluja.

Koska lämpöyrittäjäkokoluokan (<5 MW) lämpölaitoksissa on runsaasti käyttämätöntä lämmöntuotantokapasiteettia, niiden yhteydessä voitaisiin kuivata merkittäviä määriä haketta tai pilkettä. Pilkettä kannattaisi kuivata myyntiin ja haketta omaan käyttöön. Kuivaamiseen kannattavuuteen vaikuttaa eniten käytettävän kuivauslämmön hinta, sillä kuivuri voidaan rakentaa varsin edullisesti. Toki tekniset ratkaisut vaikuttavat kuivauksen hyötysuhteeseen ja sitä kautta kokonaiskustannuksiin.

Hakkeen kuivauksen kannattavuus riippuu myös oleellisesti puunhankinnan toimintamallista. Mitä useampi työvaihe hakkeen tuotantoketjussa hinnoitellaan tilavuuden tai painon mukaan, sitä helpommin saadaan oman polttoaineen kuivaus kannattavaksi. Lisäksi parannetaan laitoksen toimintavarmuutta ja mahdollistetaan suurempi lämmöntuotanto kuin käytettäessä kosteaa haketta. Mikäli edes osa paremmasta lämmöntuotantokapasiteetista voidaan realisoida lisääntyneenä lämmönmyyntinä, on kuivuri-investointi lähes poikkeuksetta perusteltua.

Toisaalta rakennettaessa uutta lämpölaitosta voidaan kattila mitoittaa pienemmäksi, mikäli käytettävä hake kuivataan. Tämä saattaa pienentää kokonaisinvestointia riippuen kuivurin ja mahdollisesti tarvittavien lisävarastotilojen kustannuksista. Kaiken kaikkiaan lämpöyrittäjien kannattaisi selvittää mahdollisuuksia lisätä vajaakäytössä olevan lämpölaitoksen lämmöntuotantoa integroimalla laitos lämminilma-kuivaukseen. Tällaisissa kuivureissa voitaisiin puupolttoaineiden lisäksi hyvin kuivata myös maatalojen viljaa tai heinää.

6. Yhteenveto

Hankkeen päätavoitteena oli kehittää lämpöyrittäjäkohteiden koko liiketoimintaketjun laatua, osaamista ja kannattavuutta. Lämpöyrittäjällä tarkoitetaan tässä yhteydessä yksityistä elinkeinonharjoittajaa, osuuskuntaa, osakeyhtiötä tai usean yrittäjän yhteenliittymää, jotka toimittavat asiakkailleen lämpöenergiaa (Raitila 2009). Tyypillinen lämpöyrittäjä toimii paikallisesti ja käyttää pääasiallisena polttoaineenaan puuta. Polttoaine on peräisin yrittäjän omasta metsästä, paikallisilta metsänomistajilta tai puunjalostusteollisuudesta. Yrittäjä on itse vastuussa lämpölaitoksensa toiminnasta ja hänen tulonsa määräytyvät tuotetun lämpöenergian määrän mukaan.

Projektin tutkimuksellinen osuus on kirjattu tähän raporttiin. Tutkimuksen tavoitteina oli täydentää aikaisempia hakkeen raaka-aineen varastointikokeita, tutkia valmiin hakkeen säilymistä varastoituna sekä tarkastella lämmöntuotantoon integroidun kuivauksen edellytyksiä.

Varastointikokeet

Aikaisemmissa tutkimuksissa (mm. Nurmi & Hillebrand 2007) varastoja on yleensä seurattu tyypillisillä tienvarsivarastopaikoilla, jotka sijaitsevat ainakin jossain määrin metsän varjossa. Aikaisempia tutkimuksia täydentäen nyt selvitettiin erilaisten hakeraaka-ainevarastojen kuivumista ja raaka-aineen laatuun vaikuttavia tekijöitä avoimella varastopaikalla. Tutkittavat varastokasat sijoitettiin vanhaan sorakuoppaan ja niiden kosteuden muutoksia sekä vallinnutta säätilaa seurattiin seitsemän kuukauden ajan.

Kuten oletettiin, varastoidut puut kuivuivat erittäin hyvin. Kaikki varastokasat saavuttivat n. 30 % tai sen alla olevan kosteustason. Karsittu ranka kuivui selvästi nopeammin ja paremmin kuin kokopuu. Tähän vaikutti karsinnan yhteydessä tapahtunut kuoren rikkoutuminen. Voimakkaasti käsitelty mäntyranka kuivui paremmin kuin normaalisti karsittu, mutta kuitenkin heikommin kuin puhdas lehtipuuranka. Karsittu lehtipuu kuivui nopeammin ja sen lähtökosteus oli alempi kuin havupuun. Sen sijaan lehtikokopuu jäi alemmasta lähtökosteudestaan huolimatta lähes 10 prosenttiyksikköä kosteammaksi kuin havupuun kuivausjakson jälkeen. Karsinnassa tapahtuva kuoren rikkominen siis nopeuttaa lehtipuun kuivumista enemmän kuin havupuun.

Kahdella eri kosteuteen kuivuneen metsähakkeen säilymistä varastossa tutkittiin sijoittamalla kasat aukealla kentälle Keuruun lämpövoiman voimalaitoksen viereen ja sen läheiseen tyhjäan kylmillään olevaan varastohalliin. Haketta tehtiin sekä mäntykokopuusta että -rangasta niin, että kumpaakin haketettiin vertailupareittain neljään eri hakekasaan kuhunkin 200-300 irto-m³ alkukosteuksien ollessa joko noin 30 % tai 40 %. Hakkeen kosteutta ja säilyvyyttä seurattiin kymmenen kuukauden ajan mittaamalla kosteudet ja lämpötilat säännöllisin välein. Lisäksi mahdolliset näkyvät laadunmuutokset rekisteröitiin. Myös paikallinen säätila rekisteröitiin seuranta-ajalta. Tarkempaa mikrobi- tai kuiva-aineanalyysiä ei kuitenkaan tehty.

Kesä 2012 oli kuivumisolosuhteiltaan huomattavasti keskimääräistä heikompi. Tämä näkyi selvästi ulkona varastoitujen peittämättömien hakekasojen voimakkaana kastumisena. Lyhyt kuivempi kausi elokuun lopulla laski keskimääräisiä kosteuksia vain lyhytaikaisesti ja käytännöllisesti katsoen kaikki ulkona olleet peittämättömät aumat olivat läpimärkiä kevääseen asti keskimääräisen kosteuden ylittäessä jopa 60 %. Alemmalla alkukosteudella ei ollut mainittavaa merkitystä hakkeen pysymiseen kuivana varastoinnin aikana. Myöskään hakelajit, kokopuu- tai rankahake, eivät eronneet toisistaan tässä suhteessa. Peittäminenkään ei täysin estänyt kasoja kastumasta, vaikka se selvästi hidasti aumojen vettymistä kesän pahimpien sateiden aikaan.

Mielenkiintoista on sen sijaan havaita, kuinka varastohallissa olleet hakekasat kuivuivat selvästi kesän ja vielä syksykin aikana. Kaikkien sisällä olleiden hakkeiden keskimääräinen

kosteus jäi alle 30 % marraskuun mittauksissa ja pysyi lähes muuttumattomana koko talven ajan. Tällainen hake olisi erinomaista polttoainetta pien- ja lämpöyrittäjäkokoluokan kattiloissa kylmimpänä lämmityskautena, jolloin kattilasta tarvitaan maksimitehoa. Alemmalla lähtökosteudella tai hakelajilla ei ollut olennaista merkitystä hakeauman loppukosteutta ajatellen.

Verrattaessa eri kasojen lämpötiloja käy selvästi ilmi, että kokopuuhakekasat lämpenivät rankahakeaumoja enemmän. Esimerkiksi katoksessa varastoitu kokopuuhake lämpeni noin 20 °C enemmän kuin rankahake. Vastaava ilmiö oli nähtävissä myös ulkovarastoissa. Kaikkein korkeimmat lämpötilat mitattiin ulkovarastoidussa kokopuukasassa, jossa lämpötila hetkellisesti saavutti 67 °C.

Kasojen alkukosteuksista ja lämpötilojen kehittymisestä huomataan, että kosteamman hakkeen (alkukosteus 42 %) lämpötila pysyi korkeampana kauemmin kuin kuivemman hakkeen (alkukosteus 32 %). Kostealla kokopuulla ero oli pisimmillään parisen viikkoa, kun taas rankahakekasoilla vastaava ero oli vain joitakin päiviä. Kaikki kasat saavuttivat maksimilämpötilansa yleensä vain muutama päivä kasauksesta. Sen jälkeen lämpötilat laskivat verraten nopeasti. Kuukauden jälkeen ne olivat kaikissa kasoissa jo alle 30 °C.

Peittämisellä ei näyttänyt olevan kovin suurta vaikutusta kosteampien hakkeiden lämpötilan nousuun. Kuivempien hakkeiden peitetyn kasan lämpötila sen sijaan nousi kymmenisen astetta korkeammaksi kuin peittämättömän, kun mittaus tehtiin kasan yläosasta. Näyttäisi siltä, että peittäminen estää kasan pintaa siirtyvää kosteutta haihtumasta ja ylläpitää siten pitempään mikrobeille otollista toimintaympäristöä, minkä seurauksena lämpötila pääsee nousemaan.

Lämpötiloista päätellen kaikki kuivemmat alkukosteudeltaan 32 % olleet hakekasat säilyivät hyvin sekä ulkovarastossa että katoksessa, eikä merkittäviä kuiva-ainetappioita oletettavasti syntynyt. Yhdenkään kasan lämpötila ei noussut niin korkealle, että olisi syntynyt itsesyttymisvaaraa. Kaiken kaikkiaan hakeaumojen lämpötilojen nousu ajoittui hyvin lyhyelle ajalle varastoinnin alussa.

Lopuksi lämpötilojen muutoksia seurattiin erillisessä kasassa, joka sekoitettiin kerran seurantajakson aikana. Lämpötila laski merkittävästi heti sekoituksen jälkeen, mutta kohosi nopeasti entiselle tasolle, joten hakkeen sekoittamisella ei pystytä estämään kasan lämpenemistä varastoinnin aikana.

Polttokokeet

Projektissa haluttiin selvittää myös hakkeen kosteuden vaikutusta pienten aluelämpölaitosten kattiloiden toimintaan. Tämän vuoksi Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalousinstituutin 500 KW:n koekattilalla suoritettiin polttokokeita koko- ja rankahakkeella, joiden kosteudet olivat n. 21 %, 34 % ja 50 %. Jokaista taulukon kuutta polttoaineen ja kosteuden yhdistelmää vastaavasti tehtiin koe ensin kattilan nimellisteholla 500 kW sekä lisäksi 30 % osakuormalla 150 kW, eli kaikkiaan 12 koetta. Kokeet suoritettiin EN303-5:2012 mukaisesti. Vastaaviksi hyötysuhteiksi saatiin 88,0 %, 87,3 % ja 82,0 % kokopuulle sekä 88,6 %, 87,1 % ja 84,3 % rankapuulle.

Kokeissa, joissa käytettiin kosteimpia hakkeita (kosteus 50 %), häkäpitoisuudet olivat hyvin korkeat. Savukaasujen laskennallisilla 10 % happipitoisuuksilla ne olivat 1343 ppm kokopuuhakkeella ja 2449 ppm rankahakkeella nimellistehon koeajoissa sekä osateholla vastaavasti 1232 ja 3351 ppm. Koska ko. kokoluokan kattiloiden piippujen korkeudet ovat tyypillisesti vain 10-20 m, voivat korkeat CO-pitoisuudet heikentää merkittävästi paikallista ilmanlaatua. Savukaasun korkea häkäpitoisuus merkitsee myös korkeita hiilivetyjen päästöjä. Hiilivedyt ovat haitallisia ja monet niistä syöväälle altistavia. Näistä syistä tämän kokoluokan kattiloita pitäisi pystyä säätämään niin, että pitoisuudet olisivat korkeintaan suuruusluokkaa 1000 ppm.

Polttoaineen kosteus vaikuttaa erittäin paljon kattilasta saatavaan tehoon. Kun polttoaineiden kosteudet olivat n. 50 %, ei nimellistehoa saavutettu lainkaan, vaan maksimitehot olivat tuolloin n. 70 % kattilan nimellistehosta. Tämä vaikeuttaa merkittävästi laitoksen toimintaa varsinkin talvella tai muulloin, kun kattilalla pitäisi tuottaa paljon lämpöä.

Kattilan hyötysuhde pieneni molemmilla polttoaineilla useita prosenttiyksikköjä, kun polttoaineen kosteus oli korkein eli n. 50 %. Häviöt lisääntyvät niin paljon, että niillä on jo merkittävää taloudellista vaikutusta ko. tyypisten laitosten toiminnassa. Häviöiden lisäksi kostealla polttoaineella kattilan käytettävyys heikkenee ja laitoksen häiriöt lisääntyvät aiheuttaen siten lisäkustannuksia.

Kuivaus lämpölaitoksen yhteydessä

Suurimman osan vuotta lämpölaitokset tuottavat lämpöä varsin alhaisella teholla keskimäärin 20-40 % nimellistehosta. Tuottamallaan lisälämmöllä lämpöyrittäjä voisi kuivata kaiken tarvitsemansa hakkeen omaan käyttöön tai myydä kuivaa haketta sitä tarvitsevalle. Koko Keski-Suomen alueella tiedossa olevien lämpöyrittäjien vastuulla olevien lämpölaitosten käyttämättömällä lämmöntuotantokapasiteetilla voitaisiin kuivata yli miljoona irtokuutiota haketta tai pilkettä (Huovinen 2012). Tämä vastaa noin puolta koko maakunnan metsäpolttoaineiden käytöstä vuonna 2011. Tämä edellyttäisi kuivuri-investointeja 30 laitoksella, joiden yhteenlaskettu nimellisteho on noin 20 MW. Lämpölaitosinvestointiin verrattuna kuivurin hankkiminen ei sinänsä ole suuri kustannuserä. Kuivauksen kannattavuus riippuu ennen kaikkea kuivauslämmön hinnasta ja toimintamallista, jossa kuivauksella parannettua haketta käytetään.

Hakkeen kosteuden vaikutusta metsähakkeen hankintakustannuksiin lämmöntuotannossa selvitettiin aluksi laskemalla kustannukset kahdelle eri hankintaketjulle, osa- tai kokonaistoimitusketjulle, jotka toimittavat haketta vuosituotannoltaan sekä 5 000 että 1 500 MWh lämpölaitoksille. Osatoimituksessa raaka-aine ostetaan tien varressa, jonka jälkeen se haketetaan ja kuljetetaan laitokselle eri urakojien toimesta. Tällöin lämpöyrittäjä maksaa kustakin vaiheesta erikseen kyseiselle toimijalle. Kokonaistoimituksessa hake sen sijaan toimitetaan valmiina perille ja siitä maksetaan energiasisällön mukainen hinta. On selvää, että mitä useampi hankintavaihe hinnoitellaan tilavuuden (tai painon) mukaan sitä enemmän puun kosteus vaikuttaa kokonaishankintakustannukseen suhteessa lopputuotteena saatavan lämmön määrään. Molempien hankintaketjujen mukaisissa lämmön-toimitusmalleissa saadaan kustannussäästöjä käyttämällä kuivempaa haketta muun muassa siksi, että tarvittavan puupolttoaineen määrä vähenee, kattilan hyötysuhde nousee ja tarvittavan tukipolttoaineen määrä vähenee. Nämä seikat huomioiden voidaan tarkastella myös kuivauksen kannattavuutta osana lämpöliiketoimintaa.

Kuivauksen kannattavuuden arvioimisen avuksi tehtiin Excel-pohjainen taselaskuri, jonka avulla pystytään laskemaan muun muassa tietyn puuerän kuivaukseen tarvittava energia panoskuivurissa. Laskuria voidaan periaatteessa käyttää myös muiden biomassojen kuivauksen laskentaan ja kuivurin mitoitukseen. Varsinaista kannattavuustarkastelua varten laskettiin hakkeen kuivauskustannukset merikontista tehdyille esimerkkikuivurille, jollaista käytettiin myös kuivauskonseptin demotarkoituksiin. Kyseisellä panoskuivurilla kuivauksen kustannuksiksi tulevat 6,5 € ja 4,8 € hakekuutiota kohti 20 % loppukosteuteen lähtökosteuksien ollessa 55 % ja 45 %, kun käytetään kuivauslämmön hintana 24 €/MWh. Mikäli kuivauslämmön hinta on 40 €/MWh, nousevat kuivauskustannukset vastaavasti 9,3 ja 6,6 euroon hakekuutiota kohti.

Kuivaus saadaan helpommin kannattavaksi käyttämällä kuivattua haketta omassa lämpölaitoksessa. Tämän selvittämiseksi esimerkkikuivuri-investoinnin kannattavuutta pienemmän laitoksen (lämmöntuotanto 1 500 MWh/v) yhteydessä tarkasteltiin nykyarvomenetelmällä eri toiminta- ja investointivaihtoehtoja. Mikäli hakkeen raaka-aine ostetaan ja sen prosessoinnista maksetaan pääasiassa tilavuuden mukaan (vrt. osatoimitusmalli), kannattaa lämpöyrittäjän kuivata käyttämänsä hake lämpölaitoksen

yhteydessä, mikäli lämmöstä ei tarvitse maksaa enempää kuin polttoainekustannusten verran.

Toisaalta on huomioitava, että käytettäessä kuivaa haketta (20 %) voidaan kattilalla tuottaa selvästi enemmän lämpöä ja siten lisätä myyntiä, mikäli lämmölle löytyy kysyntää. Heikoimmin kannattavassa tapauksessa eli kokonaistoimituksessa, jossa investoitaisiin kuivurin lisäksi hakevarastoon kuivauslämmön hinnan ollessa 40 €/MWh, bruttotuloja tarvittaisiin noin 9 000 € enemmän vuodessa, jotta yrittäjän kannattaisi lähteä kyseisiin investointeihin. Käytännössä tämä tarkoittaisi noin puolta lisääntyneestä lämmöntuotantokapasiteetista ja 200 ylimääräisen hakekuution kuivaamista lämmöntuotantoon. Vastaavasti osaurakointimallissa kannattavuuteen riittäisi 3 000 € vuotuinen bruttomyyntiin lisäys, mikä saadaan kuivaamalla 50 hakekuutiota enemmän kuin perustapauksessa.

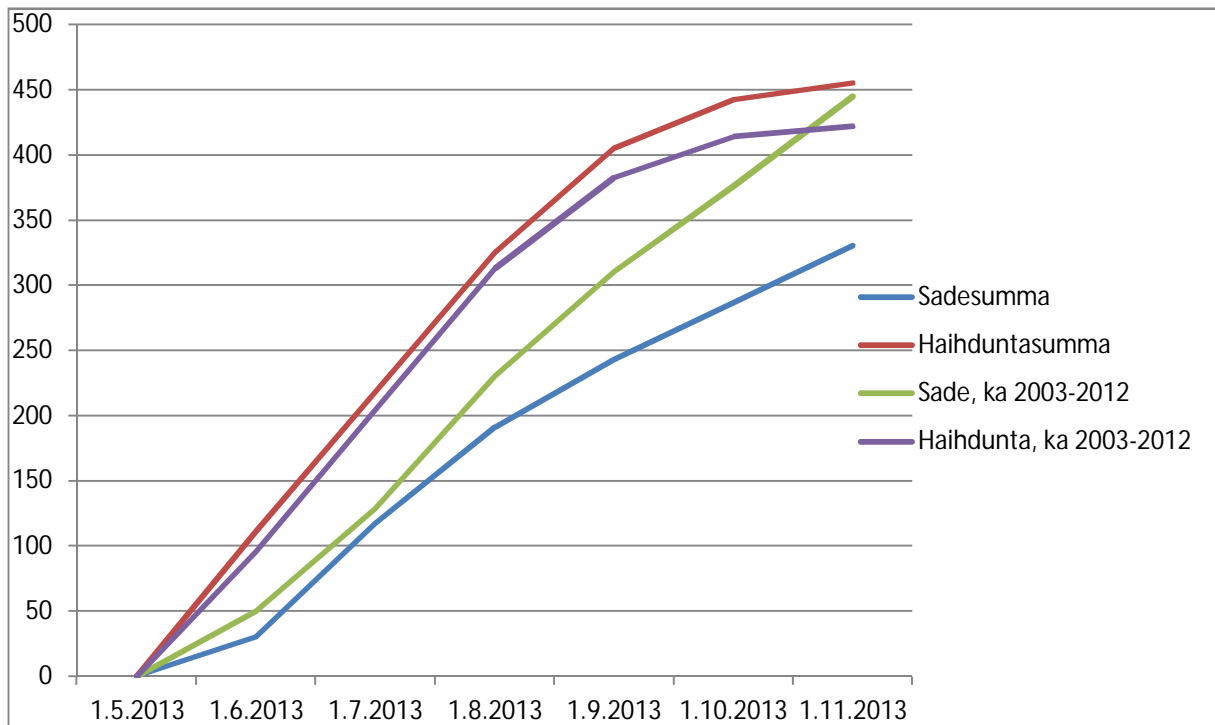
Lähdeviitteet

- Alakangas, E. & Virkkunen, M. 2007. Biomass supply chains for solid biofuels. EUBIONET2 project EIE/04/065/S07.38628).
- Erkkilä, A.; Hillebrand, K.; Raitila, J.; Virkkunen, M.; Heikkinen, A.; Tiihonen, I.; Kaipainen, H. 2010. Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen. VTT, Jyväskylä. 52 s. + liit. 2 s. Tutkimusraportti: VTT-R-10151-10
- Erkkilä, A., Hillebrand, K., Kaipainen, H., Tiihonen, I. & Oravainen, H; Sikanen, L.; Röser, D. 2009. Partial debarking and scarifying patterns as accelerants of natural drying of birch and pine energywood stems. Bioenergy 2009, Sustainable bioenergy Business, 4th International Bioenergy Conference and Exhibition. Savolainen, Mia (ed.). Jyväskylä, 31 Aug. - 4 Sept. 2009. Book of proceedings. Part 1. (2009), 423 – 432.
- Garstang, J., Weekes, A., Poulter, R. & Bartlett, D. 2002. Identification and characterization of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices. First Renewables Ltd.
- Heinek, S., Mair, G., Huber, M.B., Hofmann, A., Monthaler, G., Fuchs, H.P., Larch, C., Giovannini, A. 2012. Biomass conditioning: Minimization of the storage related loss of biomass. 20th European Biomass Conference and Exhibition, 18-22 June, Milan, Italy. Conference paper.
- Hillebrand, K. 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi, yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. VTT, Jyväskylä. 17 s. Tutkimusraportti: VTT-R-07261-09.
- Hillebrand, K. & Raitila, J. 2008. Improvement of Firewood Quality. Country Report, Finland, Quality Wood project - EIE/06/178/SI2.444403.
- Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2004. Nuorista metsistä korjatun energiapuun kuivatus ja varastointi. VTT Prosessit PRO2/P6014/04.
- Huovinen, A. 2012. Metsäpolttoaineiden ja pilkkeen kuivauksen kiinnostus ja mahdollisuuden Keski-Suomessa. Jyväskylä ammattikorkeakoulu. Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma. Luonnonvara ja ympäristöala.
- Järvi, J. 2010. Biometalli-hanke 2008-2011. <http://www.keulink.fi/index.php?PAGE=408>
- Koistinen, A. & Äijälä, O. 2006. Energiapuun korjuu. Tapio.
- Kokkonen, S. 2005. Business Models on Biofuel Productions Chains. Tutkimusraportti. VTT prosessit, Jyväskylä. http://www.chem.jyu.fi/ue/frame_left/UEsem2005-Kokkonen.pdf.3.5.2006.
- Kuoppamäki, R., Impola, R., Fagernäs, L. & Ajanko, S. 2003. Puupolttoaineiden muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa. Osaraportti 1. Puupolttoaineiden muutokset varastoinnissa. VTT, Projektiraportti PRO5/T6090/02.
- Laitila, J. 2012. Kokopuuta, rankaa, latvusmassaa & kantoja – teknologisia ratkaisuja energiapuun hankintaan. Metsäntutkimuslaitos, Itä-Suomen alueyksikkö, Joensuun toimipaikka. Bioenergiaa metsistä -tutkimusohjelman loppuseminaari. 19.4. 2012 Helsinki.
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja kuljetuslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT Tiedotteita – Research Notes 2564.

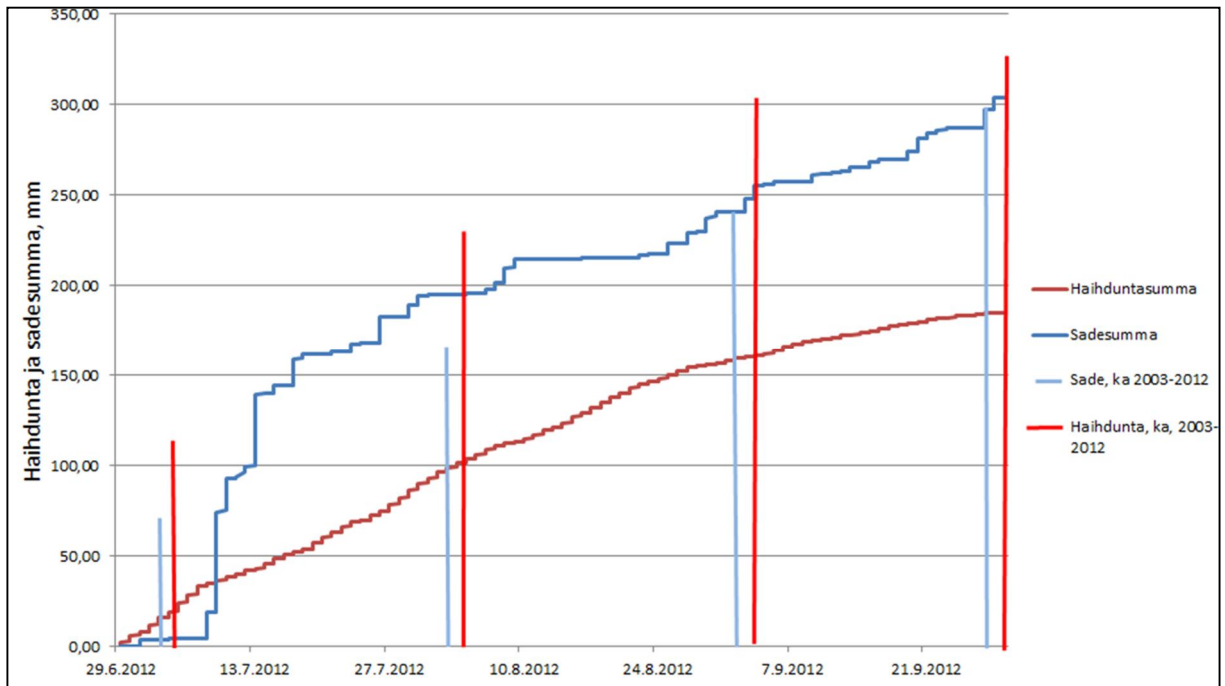
- Laitila, J.; Heikkilä, J.; Anttila, P. 2010. Polttohakkeeksi korjattavan pieniläpimittaisen harvennuspuun korjuuvaihtoehdot, kertymät ja korjuukustannukset Keski-Suomessa. Metsätieteen aikakauskirja; 2010 : 3, s. 328-329.
- Laitila, J. 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. Silva Fennica 42(2), s. 267–283.
- Lehtola, E. 2012. Puhelinhaastattelu. Hake- ja pilkekuivurien mitoitus ja hinnoittelu.
- Lepistö, T. (toim.). 2010. Laatuhakkeen tuotanto-opas. Suomen metsäkeskus.
- Lämpöyrittäjyyden selvityshanke. 2006. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Raportti.
- Martiskainen, J. 2013. Biomassan kuiva-aine- ja kosteuspitoisuuden sekä kuiva-ainetappioiden määrittämenetelmiä. Raportti työssä oppimisjaksolta VTT:llä osana 'Bioenergiaosaajakurssi korkeakoulutetuille' –kurssia.
- Nord Test Method. 2008. Guidelines for storing and handling of solid biofuels. Nordic Innovation Centre. Norway.
- Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2007. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. Biomass & Bioenergy 31 (2007) 381 – 392.
- Pietikäinen, P. 2006. Hakelämmöntuotannon liiketoimintamallit Pohjois-Karjalan kunnissa. Opinnäytetyö. PKAMK 2006.
- Raitila, J; Erkkilä, A. 2011. New and traditional technologies in pine stump pulling. Nordic Bioenergy 2011 Conference Proceedings. Jyväskylä 3 - 9 Sept. 2011. Finbio ry.. Jyväskylä (2011), s. 160 – 164.
- Raitila, J. 2010. Metsäenergian uudet mahdollisuudet 2008-10. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 112. Energia-alan kehittämishankkeet Keski-Suomessa. Bioenergiasta elinvoimaa -klusterin ja Jyväskylän seudun Energiateknologian osaamiskeskusohjelman vuosikatsaus 2010. Toivonen, Tiina (toim.). (2010), s. 26-32.
- Raitila, J., Virkkunen, M., Flyktman, M., Leinonen, A., Gerasimov, Y., Karjalainen, T. 2008. The pre-feasibility study of the biomass plant in Kostomuksha – Global forest resources, sustainable biomass supply and markets for bioenergy, GLOENER. VTT Research report VTT-R-08372-08.
- Raitila, J. 2009. Miten puulämmitys on kehittynyt liiketoiminnaksi Suomessa. Woodheat Solutions -projektin raportti 10/2009, projekti IEE/07/726/SI2.499568.
- Rinne, S. 2002. Puupoltoaineiden kuivausmenetelmien kartoitus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- Röser, D., Mola-Yudego, B., Sikanen, L., Prinz, R., Gritten, D., Emer, B., Väätäinen, K., Erkkilä, A. 2010. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. Biomass & Bioenergy 35 (2011) 4238 – 4247.
- Röser, D., Erkkilä, A., Mola-Yudego, B., Sikanen, L., Prinz, R., Heikkinen, A., Kaipainen, H., Oravainen, H., Hillebrand, K., Emer, B. & Väätäinen, K. 2010. Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 186. 60 s. ISBN 978-951-40-2279-1 (PDF). Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp186.htm>.

- Sauvula-Seppälä, T. 2010. Lämpöyrittäjyyden kannattavuus lämmönostajan ja -myyjän sekä metsänomistajan näkökulmasta. Maataloustieteen päivät 2010.
- Sutinen, M. & Viklund, E. 2005. Kaikki mitä olet halunnut tietää yritystoiminnasta, mutta et ole tiennyt keneltä kysyä. Savonia – ammattikorkeakoulu. Kirjakas Ky.
- Thörnqvist, T. & Raida, J. 1990. Bränsleflisens förändring över tiden – vid lagring i stora stackar (Changes in fuel chips during storage in large piles). Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forestry. Report No. 219.
- Tuomi, S. & Solmio, H. 2005. Miksi lämpöyrittäjäksi? Teoksessa: Kokkonen, A.& Lappalainen, I. (toim.) Hakelämmöstä yritystoimintaa. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Kuopio: Offsetpaino, s. 7-13.
- Vuorio, K. 2013. Lämpöyrittäjätoiminta vuonna 2012. TTS:n tiedote. Metsätyö, -energia ja yrittäjyys. 4/2013 (765).
- Ylitalo, E. Puun energiakäyttö 2012. Metsätilastotiedote 16/2012. Metsäntutkimuslaitos, Metsätilastollinen tietopalvelu.
- Ylä-Mattila, A. 2011. Laatukäsikirja hakelämpöyrittäjälle Opinnäytetyö.
http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/31970/Yla-Mattila_Aki.pdf?sequence=1

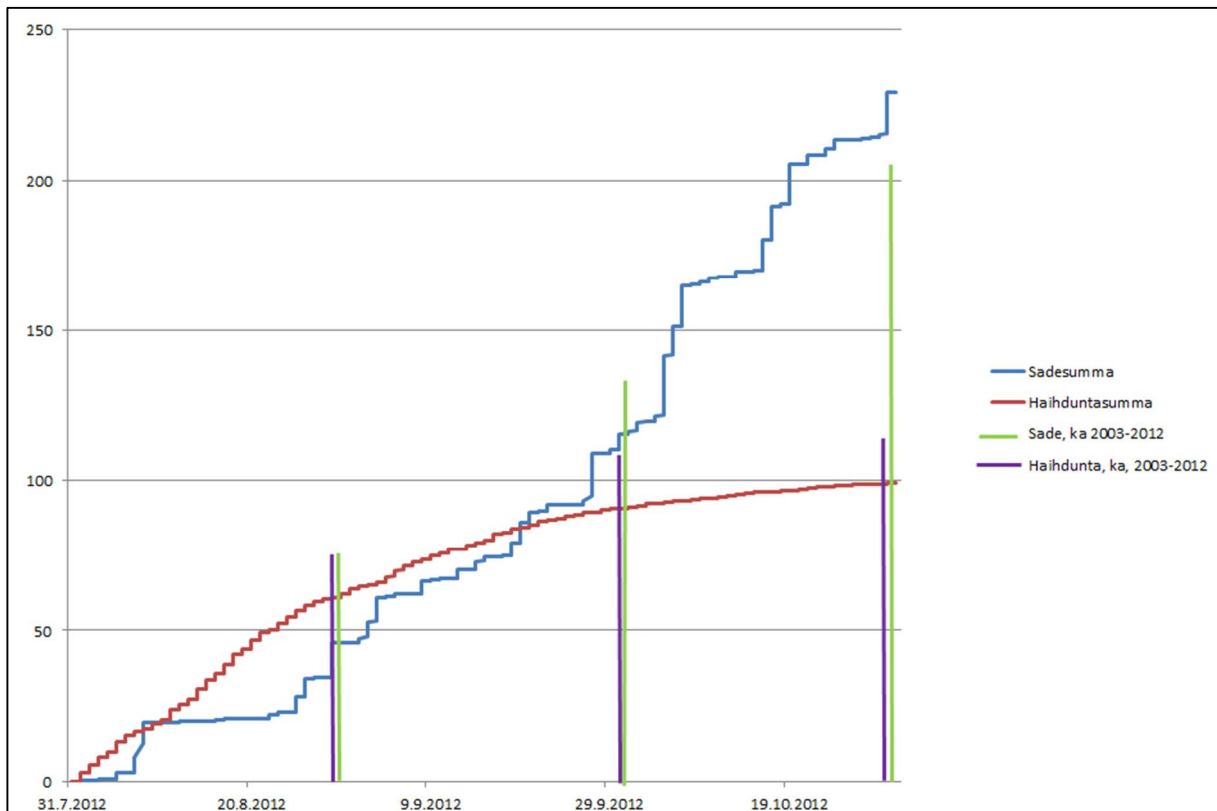
Liite 1



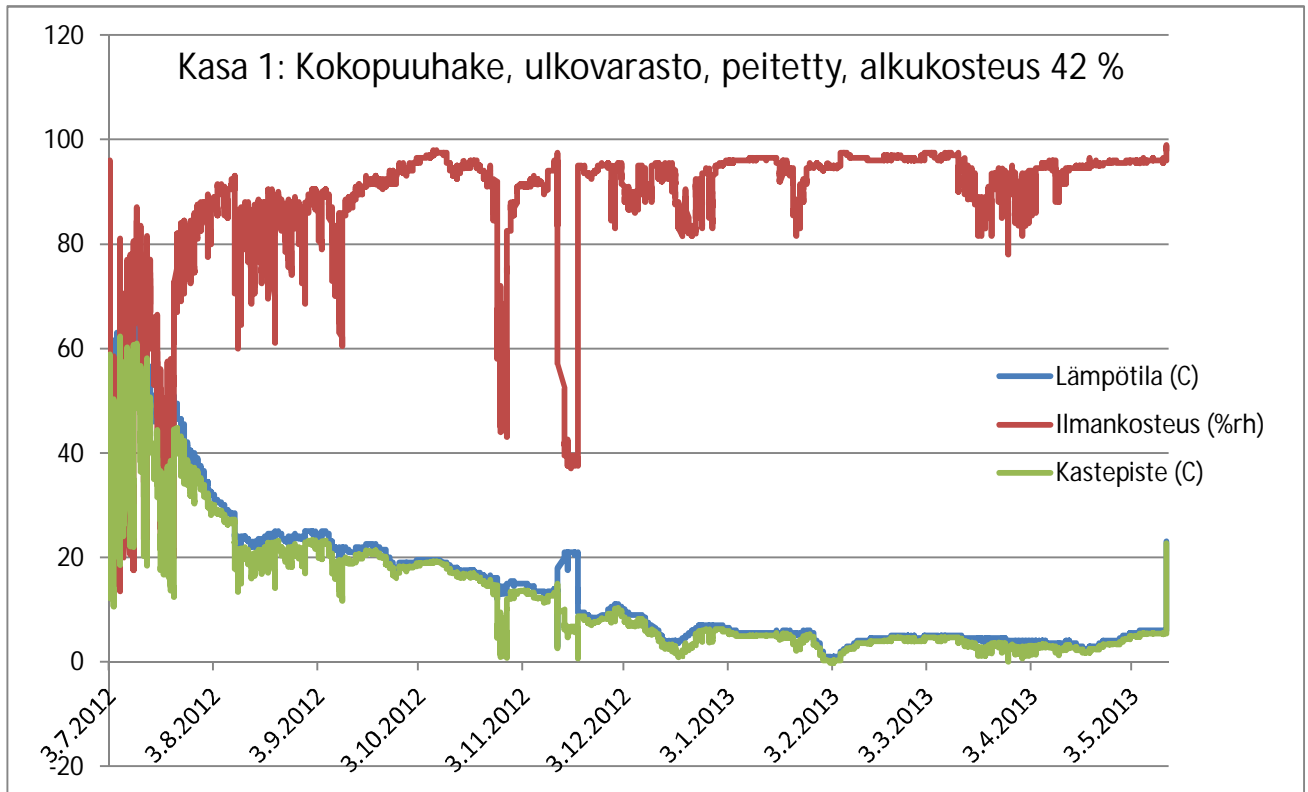
Kuva 1. Saarijärvellä mitattu sadanta ja haihdunta 1.5.-1.11.2013 sekä pitkän ajan keskiarvot. Lähde: Ilmatieteen laitos.

Liite 2


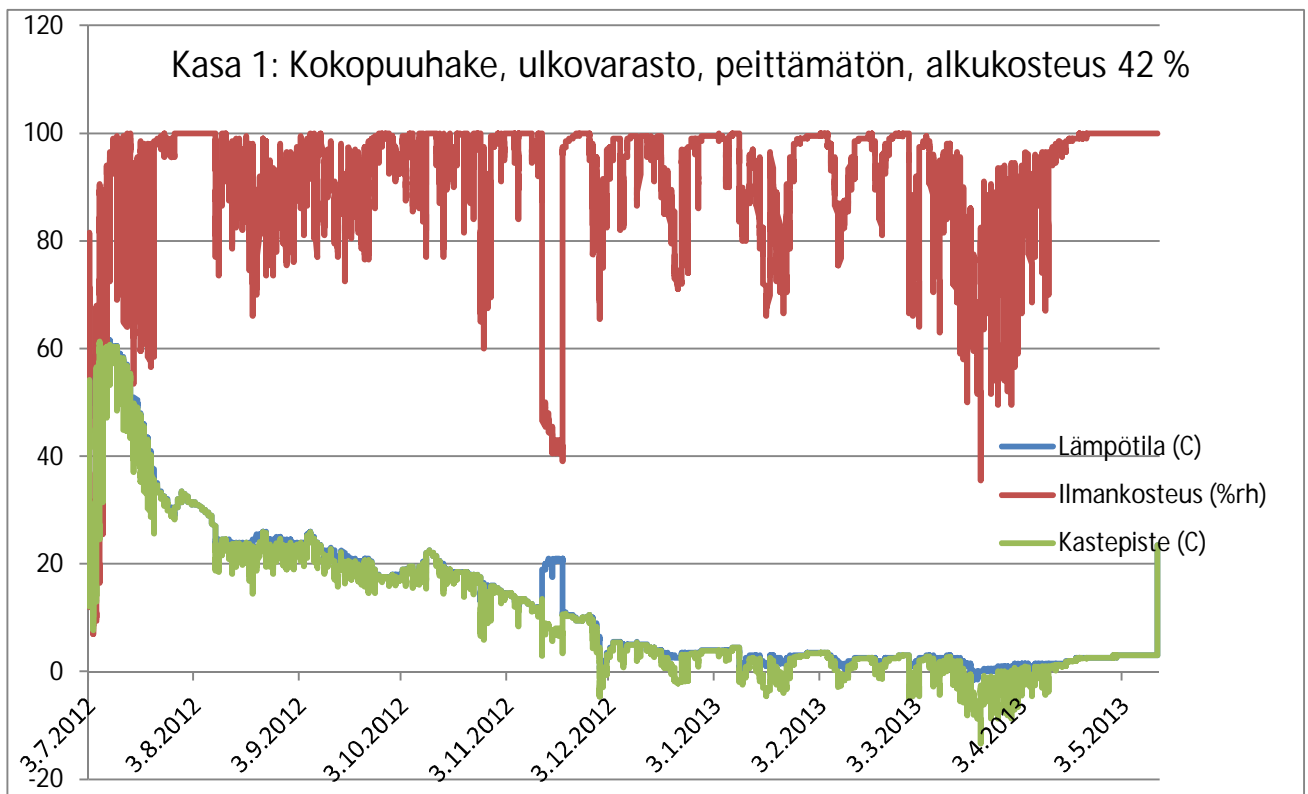
Kuva 1. Keuruun varastopaikalla mitattu sadanta ja haihdunta kesäkuun lopusta syyskuun loppuun 2012 verrattuna Ilmatieteen laitoksen keskimääräisiin arvoihin.



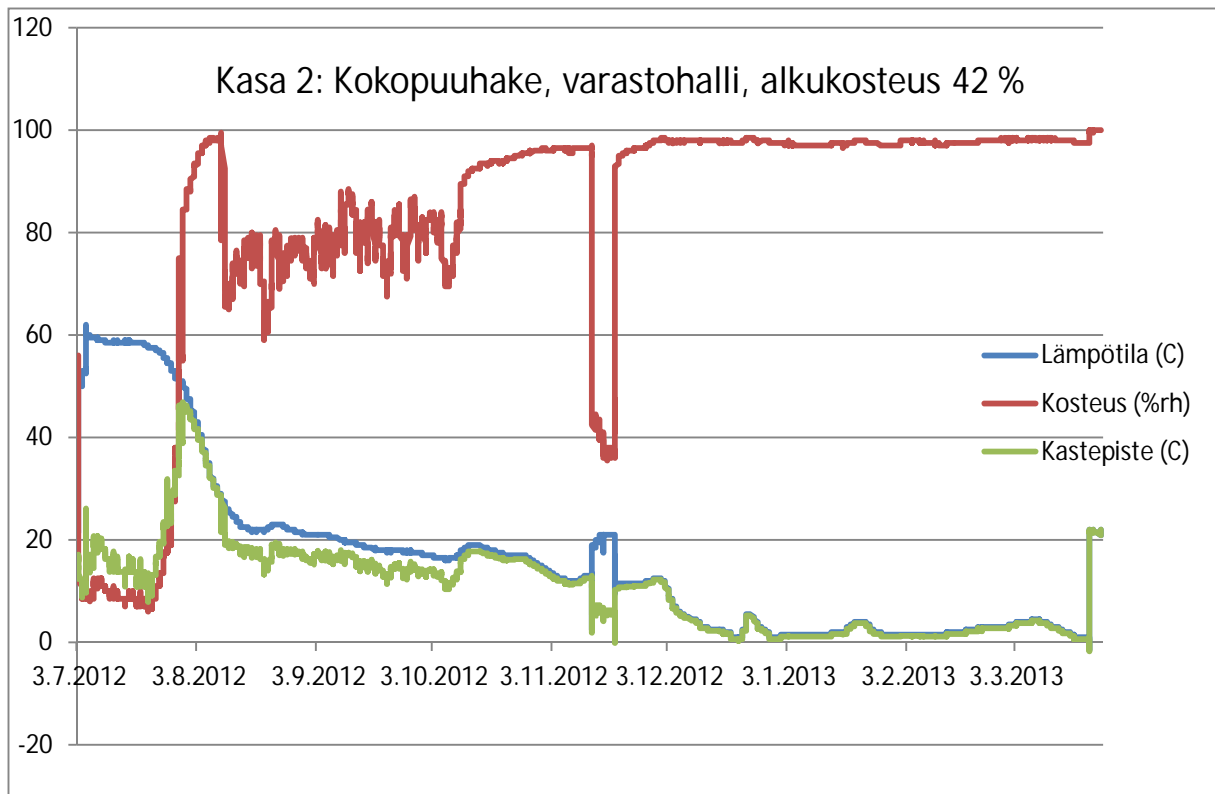
Kuva 2. Keuruun varastopaikalla mitattu sadanta ja haihdunta 31.7.-13.11.2012 verrattuna Ilmatieteen laitoksen keskimääräisiin arvoihin. Elokuussa sadanta oli selvästi vähäisempää verrattuna muihin seurantajakson kuukausiin.

Liite 3


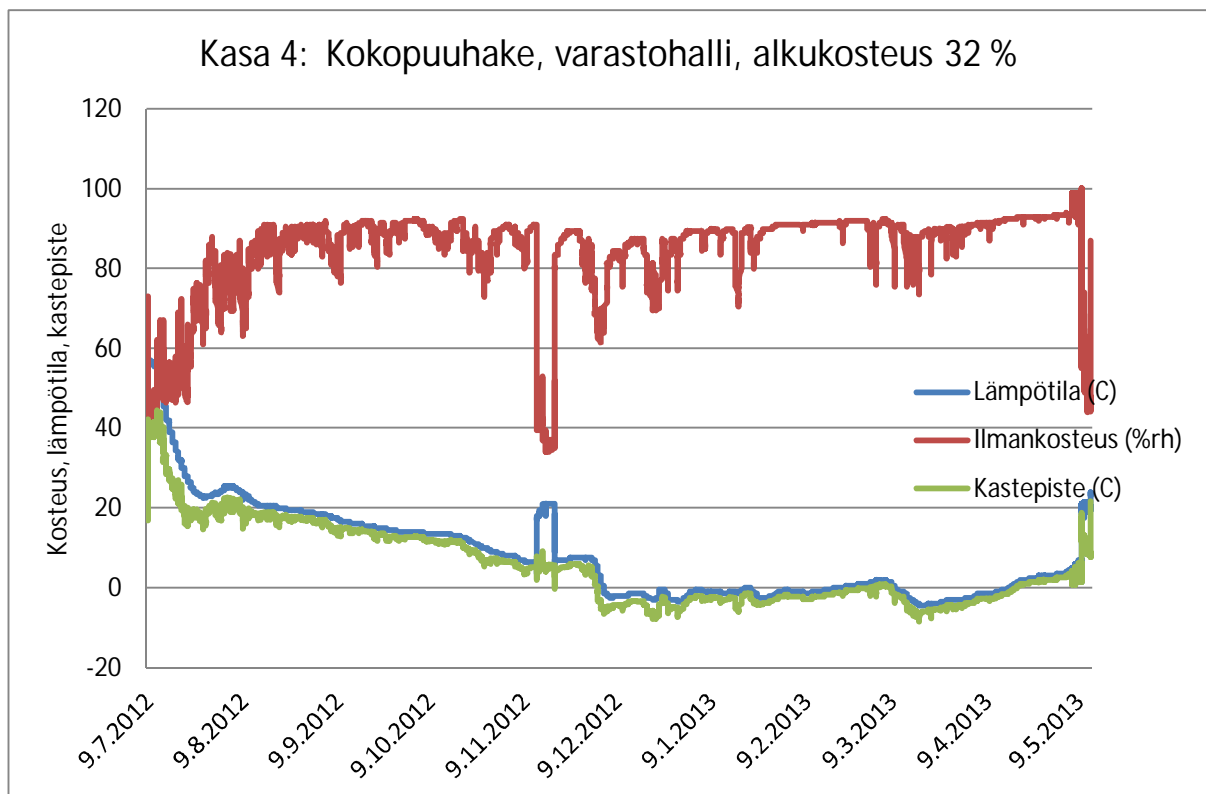
Kuva 1. Ulkona varastoidun peitetyn kokopuuhakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 42 %.



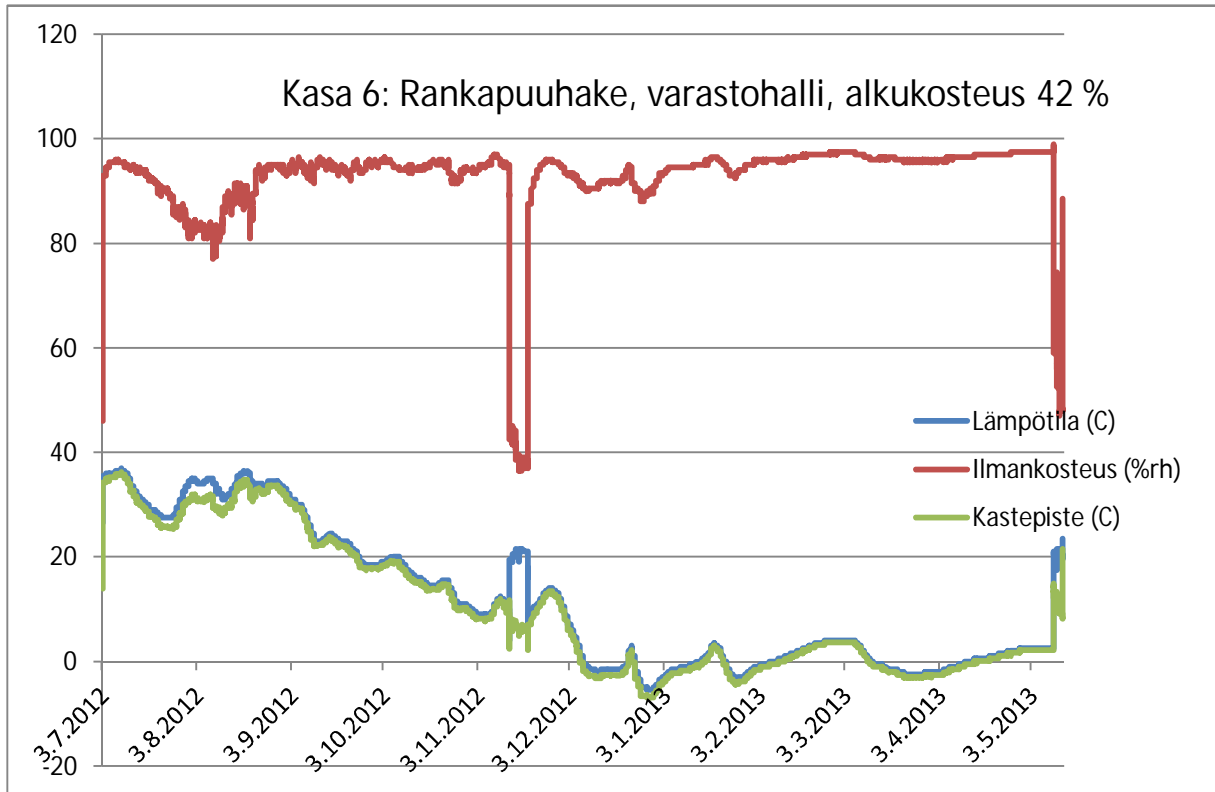
Kuva 2. Ulkona varastoidun peittämättömän kokopuuhakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 42 %.



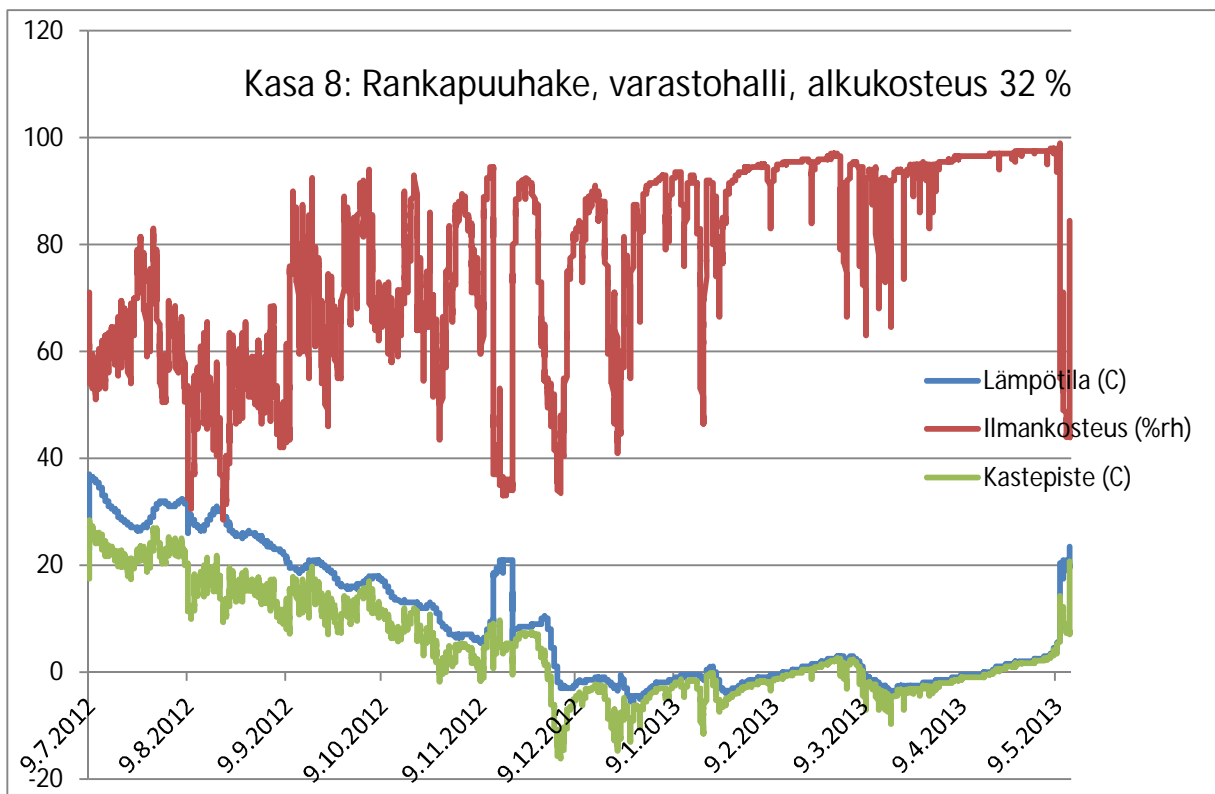
Kuva 3. Varastohallissa varastoidun kokopuuhakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 42 %.



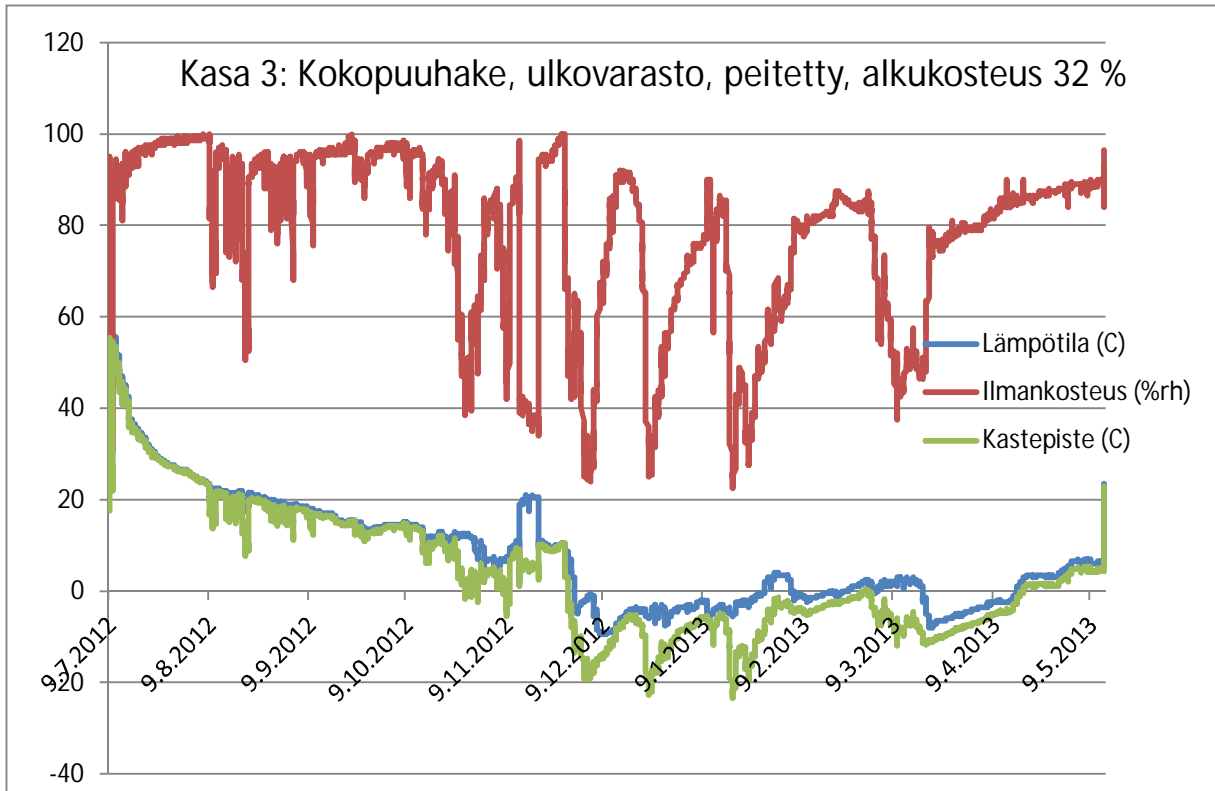
Kuva 4. Varastohallissa varastoidun kokopuuhakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 32 %.



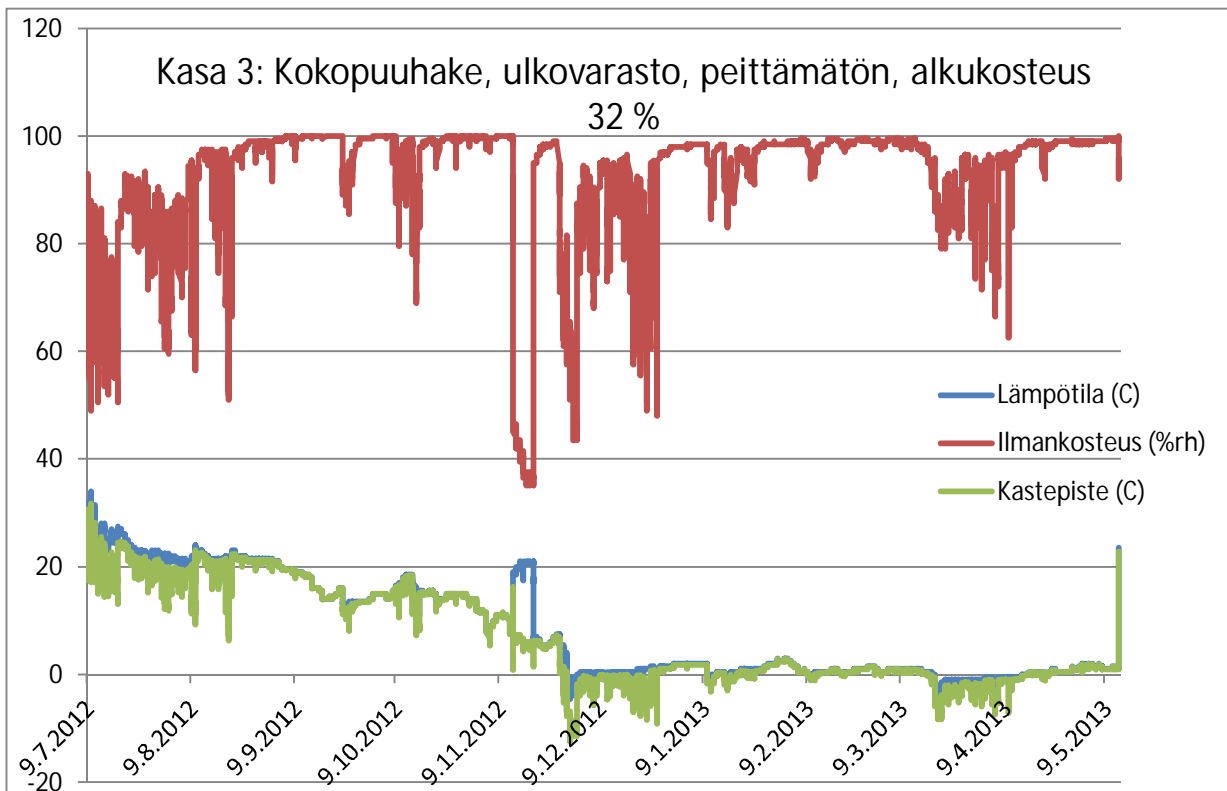
Kuva 5. Varastohallissa varastoidun rankahakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 42 %.



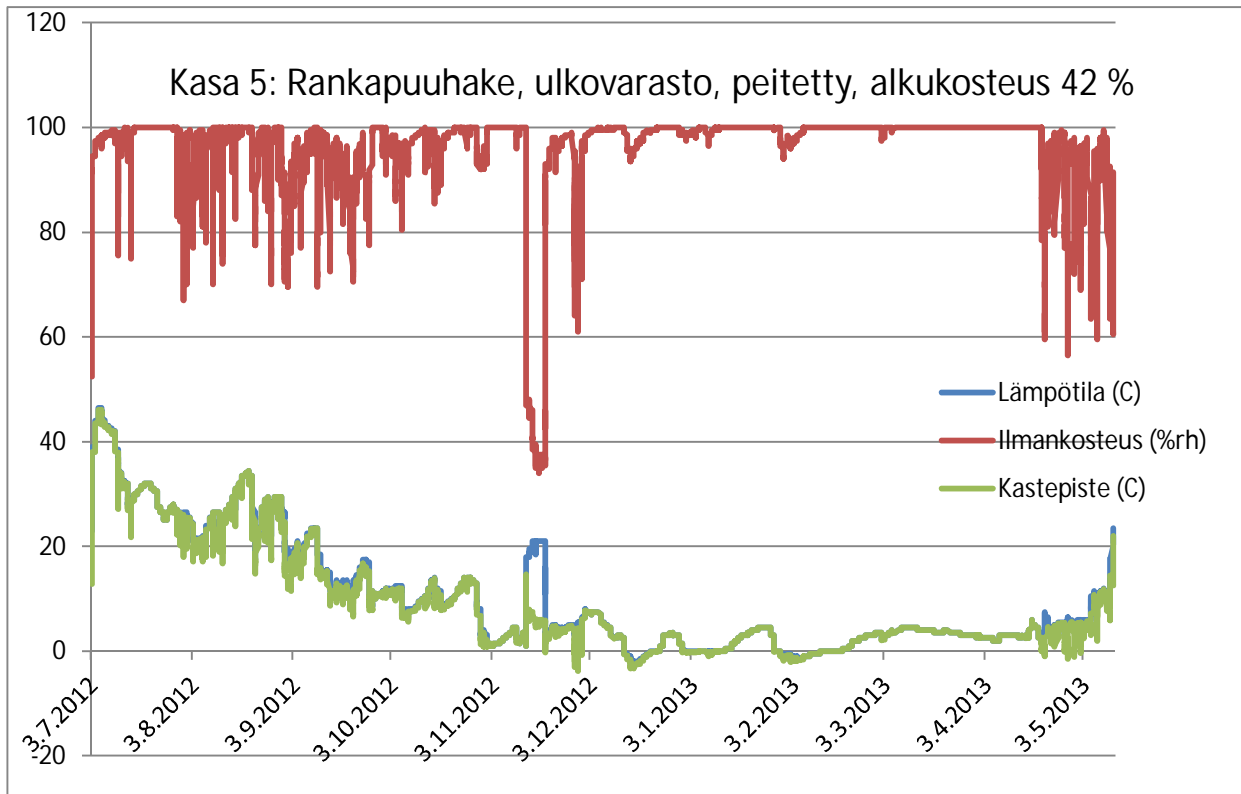
Kuva 6. Varastohallissa varastoidun rankahakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 32 %.



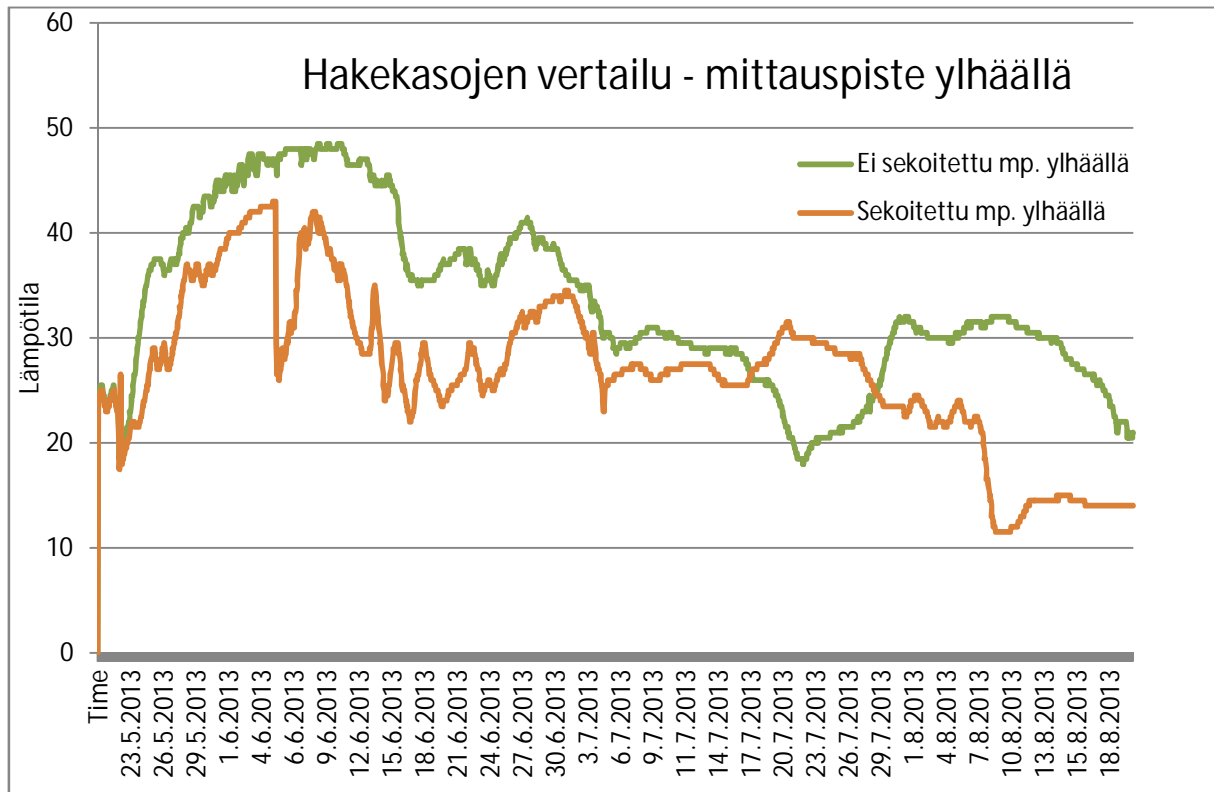
Kuva 7. Ulkovarastossa varastoidun peitetyn kokopuuuhakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 32 %.



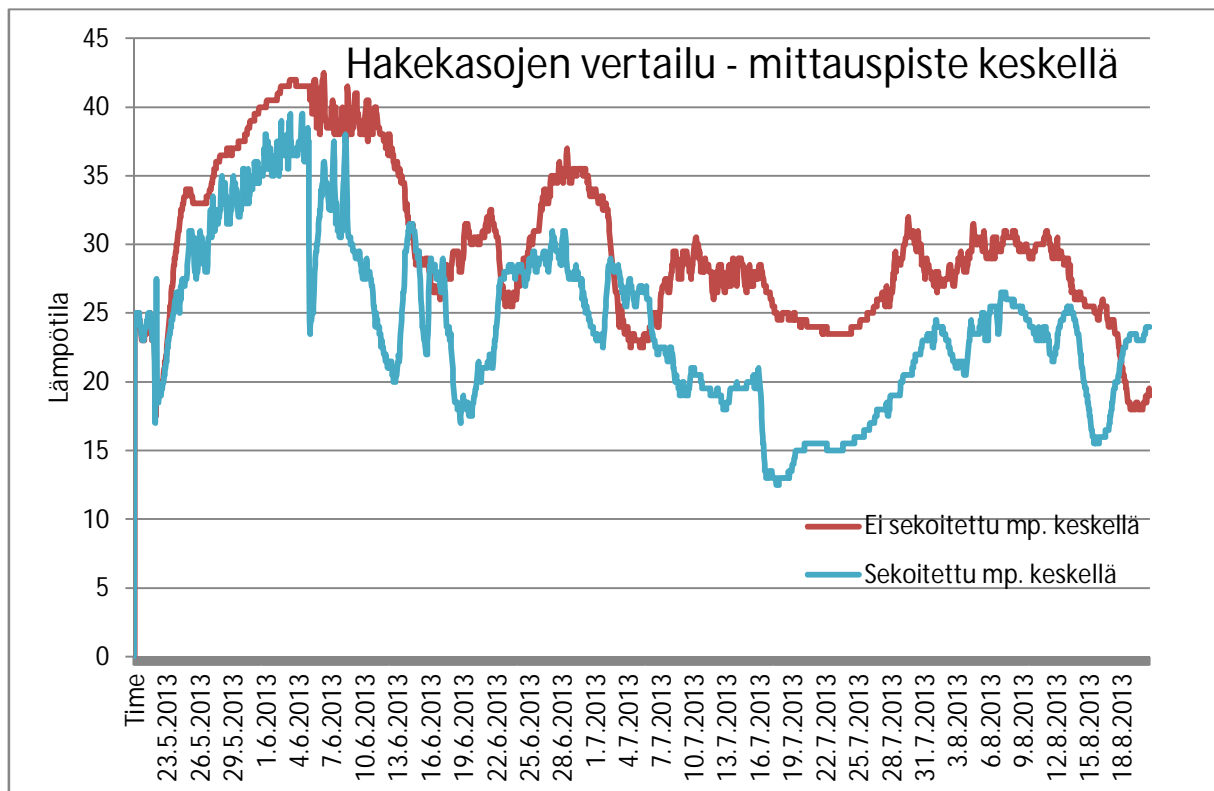
Kuva 8. Ulkovarastossa varastoidun peittämättömän kokopuuuhakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 32 %.



Kuva 9. Ulkovarastossa varastoidun peitetyn rankahakekasan seurantamittaustulokset koko varastointijaksolla. Alkukosteus 42 %.

Liite 4


Kuva 1. Sekoittamattoman ja sekoitetun rankahakekasasän lämpötilojen vertailu. Lämpötilan mittauspiste oli yläkolmanneksessa ja hakkeen alkukosteus n. 50 %.



Kuva 2. Sekoittamattoman ja sekoitetun rankahakekasasän lämpötilojen vertailu. Lämpötilan mittauspiste oli keskellä ja hakkeen alkukosteus n. 50 %.

Liite 5

Laskennan lähtöarvoja

Huom! Luvut syötetään harmaisiin soluihin.

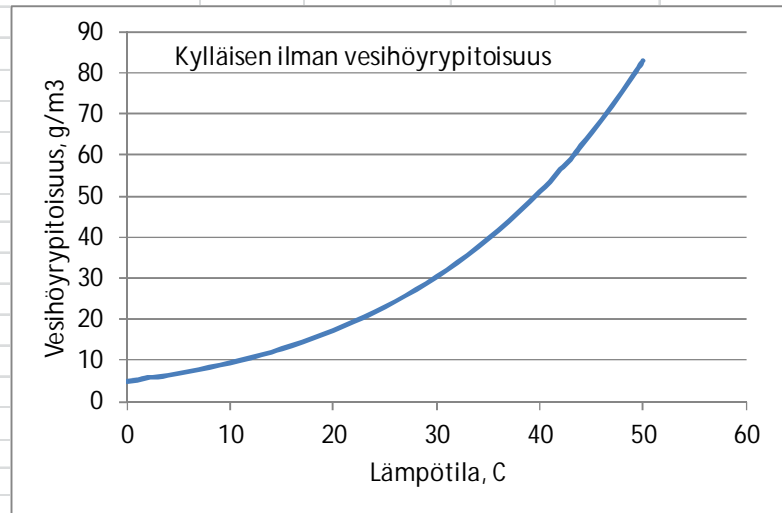
Kuivattavan polttoaineen määrä	V _{pa}	25	i-m ³
Kostean polttoaineen irtotiheys	ρ	342	kg/i-m ³
Polttoaineen alkukosteus	w _{pa1}	55	%
Polttoaineen haluttu loppukosteus	w _{pa2}	20	%
Polttoaineen sisäänmenolämpötila	T _{pa1}	0	C
Polttoaineen ulostulolämpötila	T _{pa2}	40	C
Kuivausilman lämpötila ennen lämmitystä	T _{i1}	0	C
Kuivausilman suht.kost. ennen lämmitystä	φ ₁	80	%
Vesihöyryä ilmassa ennen lämmitystä (T = T _{i1})	x _{i1}	3,95	g/m ³
Kuivurin pituus		4,90	m
Kuivurin korkeus		2,30	m
Kuivurin leveys		2,30	m
Kuivurin tilavuus		25,92	m ³
Kuivurin poikkipinta-ala		11,27	m ²
Polttoainekerroksen korkeus		2,22	m
Kuivurin vaipan pinta-ala		55,66	m ²
Kuivurin lämmönläpäisykerroin		0,0002	kW/m ² C
Kuivausilman tilavuusvirta (lämpötila T _{i1})		3000	m ³ /h
Kuivurin hyötysuhde		70	%
Haluttu kuivausaika		3	vrk
			72 h

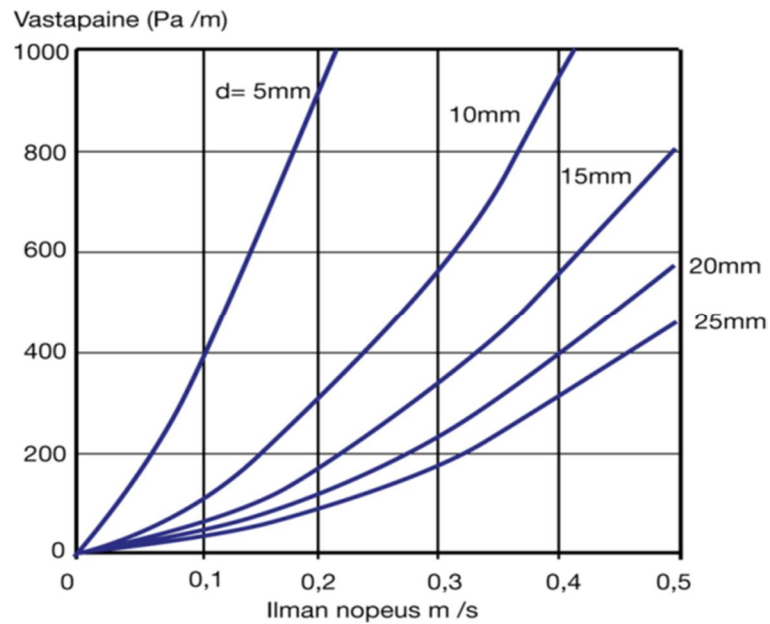
Laskettuja tuloksia

Polttoaineen ominaislämpö (puu)	1,14				
Höyrystymislämpö	2453				
Kuivausilman keskimääräinen ominaislämpö	1,01				
Kostean polttoaineen massa	8550	kg	(Kosteus	55	%)
Kuivatun polttoaineen massa	4809	kg	(Kosteus	20	%)
Polttoaineessa vettä ennen kuivausta	4703	kg			
Polttoaineessa vettä kuivauksen jälkeen	962	kg			
Kuivauksessa poistunut vettä	3741	kg			
Kuivauksessa lämpöä kuluu:					
1. Polttoaineessa olevan jään lämmittäminen	0,0	kWh			
2. Polttoaineessa olevan jään sulaminen vedeksi	435,0	kWh			
3. Polttoaineessa olevan veden lämmittäminen	218,9	kWh			
4. Kuivan polttoaineen lämmittäminen ulosmenolämpötilaan	48,8	kWh			
5. Veden höyryttäminen	2498,6	kWh			
6. Johtumishäviöt ympäristöön	32,1	kWh			
YHTEENSÄ ILMAN JOHTUMISHÄVIÖITÄ	3201,3	kWh			
Kuivausilman lämmittäminen:					
Vesihöyryn massavirta kuivausilmassa	11,85	kg/h			
Kuivan ilman massavirta kuivausilmassa	3792,8	kg/h			
Kuivausilman lämmitykseen tarvittava lämpömäärä	4573,3	kWh	(Kuivurin hyötysuhde oli annettu		
Kuivausilman lämmitykseen tarvittava teho	63,5	kW	70	%)	
Kuivausilman lämpötila lämmityksen jälkeen	T _{i2}	59,3	C		
Kuivausilman lämpötila kuivauksen jälkeen	T _{i3}	17,8	C		
Kuivausilman nopeus polttoainekerroksen pohjalla		0,09	m/s		
Vesihöyryä ilmassa lämmityksen jälkeen (T=T _{i2})	x _{i2}	3,25	g/m ³		
Kuivausilman suht.kost. lämmityksen jälkeen (T=T _{i2})	φ ₂	2,5	%		

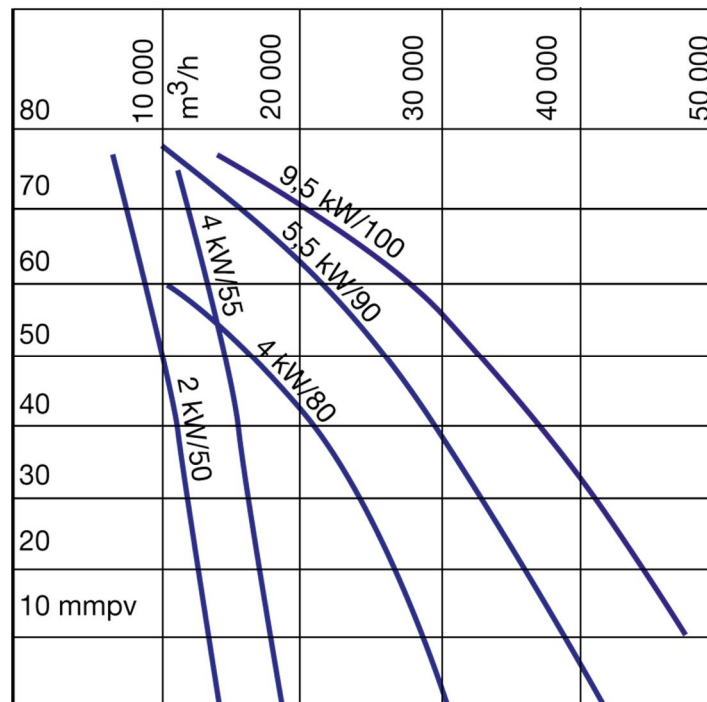
Liite 6
Kuukausien keskimääräiset lämpötilat ja suhteelliset kosteudet (Jyväskylä).

Kuukausi	Keskim. Lämpötila,	Ilman suht. kosteus, %
Tammi	-7.8	87
Helmi	-8.4	86
Maalis	-4.4	81
Huhti	2.7	70
Touko	9.2	61
Kesä	14.1	65
Heinä	17.2	68
Elo	14.7	76
Syys	9.6	81
Loka	3.8	86
Marras	-0.8	89
Joulu	-5.3	89

Kylläisen ilman vesihöyrypitoisuus


Liite 7


A: Paine-ero hakekerroksen läpi ilman nopeuden ja hakkeen palakoon funktiona, kun polttoainekerroksen korkeus on 1 metri.



B: Tarvittava puhallinteho polttoainekerroksen paine-eron ja kuivausilman tilavuusvirran funktiona.