



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 66/2019

Rankahakkeen keinokuivaus

Metsähakkeen keinokuivauksen vaikutus hankintaketjun
kannattavuuteen – hankkeen loppuraportti

Jaakko Repola, Juha Laitila, Anssi Ahtikoski, Johanna Routa,
Petri Kuisma, Jani Isökääntä ja Mikko Sirviö

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 66/2019

Rankahakkeen keinokuivaus

Metsähakkeen keinokuivauksen vaikutus hankintaketjun
kannattavuuteen – hankkeen loppuraportti

Jaakko Repola, Juha Laitila, Anssi Ahtikoski, Johanna Routa, Petri Kuisma,
Jani Isokääntä ja Mikko Sirviö



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Viittausohje:

Repola, J., Laitila, J., Ahtikoski, A., Routa, J., Kuisma P., Isokääntä, J. & Sirviö M. 2019. Rankahakkeen keinokuivaus : Metsähakkeen keinokuivauksen vaikutus hankintaketjun kannattavuuteen – hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 66/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 36 s.

Korjattu 2.1.2019. Euroopan unioni, EAKR-logo vaihdettu.



ISBN 978-952-326-831-9 (Painettu)

ISBN 978-952-326-832-6 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-832-6>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Repola, J., Laitila, J., Ahtikoski, A., Routa, J., Kuisma P., Isokääntä, J. & Sirviö M.

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2019

Julkaisuvuosi: 2019

Kannen kuva: Johanna Routa

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Jaakko Repola¹⁾, Juha Laitila²⁾, Anssi Ahtikoski³⁾, Johanna Routa²⁾, Petri Kuisma⁴⁾, Jani Isokääntä⁵⁾ ja Mikko Sirviö⁶⁾

¹⁾ Luonnonvarakeskus (Luke), Ounasjoentie 6, 96200 Rovaniemi

²⁾ Luonnonvarakeskus (Luke), Yliopistonkatu 6 B, 80100 Joensuu

³⁾ Luonnonvarakeskus (Luke), Paavo Havaksen tie 3, 90014 Oulun yliopisto

⁴⁾ Lapin ammattikorkeakoulu, Jokiväylä 11, 96300 Rovaniemi

⁵⁾ SFTec Oy, Paavo Havaksen tie 5D, 90570 Oulu

⁶⁾ Mikkone Oy, Pisantie 1163, 97140 Muurola

Energiapuun matka metsästä haketuksen kautta lämpölaitoksen kattilaan kestää useita kuukausia. Eniten aikaa kuluu energiapuun kuivaamiseen ja puskurivarastointiin tienvarressa. Pitkä varastointi ei pelkästään sido pääomia, vaan aiheuttaa puun lahoamisen seurauksena kuiva-ainetappioita. Luonnonkuivaus ei takaa tasalaatuista ja aina riittävän kuivaa lopputulosta. Lämpölaitoksissa hakkeen kosteus ja sen vaihtelu hake-erien välillä on merkittävä ongelma, joka lisää mm. hiukkaspäästöjä ja syö lämmöntuotannon kannattavuutta. Metsähakkeen toimitusketjun kannattavuutta voidaan parantaa nopeuttamalla toimitusketjua kannolta polttoon sekä tuottamalla laadukasta ja tasalaatuista haketta. Yksi ratkaisuvaihtoehto tähän on metsähakkeen keinokuivaus, jolloin tuore hake keinokuivataan ennen polttoa. Lämpöyrittäjillä olisi mahdollista hyödyntää vajaakäytössä olevan laitoksen lämmöntuotantoa hakkeen keinokuivaukseen kevään ja syksyn välisenä aikana.

Projektissa selvitettiin, voidaanko metsähakkeen keinokuivauksella parantaa hakkeen toimitusketjun kannattavuutta. Tätä varten testattiin bioraaka-aineiden kuivaukseen kehitettyä siirrettävää kontti-kuivuria (SFTec Oy) metsähakkeen (energiaranka) kuivaukseen. Koekuivaukset toteutettiin Rovaniemellä 2017–2018. Kuivauslämpö tuotettiin lämpölaitoksen reservilämmöllä (v. 2018) ja erillisellä hakekontilla (v. 2017). Lisäksi polttokokeissa (lämpölaitos, laboratorio) selvitettiin keinokuivatun hakkeen hyödyt lämmöntuotannossa.

Hakkeen kosteus putosi koekuivauksissa (2018) keskimäärin 15,6 prosenttiyksikköä vaihdellen 12–21 prosenttiyksikön välillä riippuen kuivausajasta (1:33–1:49 tuntia) ja tuntituottavuudesta (2,5–3,6 i-m³/h). Kuivauksessa hakkeesta poistettiin vettä keskimäärin 44 kg/i-m³ (33–56 kg/i-m³), jolloin hakkeen energiasisällön muutos oli keskimäärin 0,030 MWh/i-m³ (0,024–0,037 MWh/i-m³). Lämpötila kuivurissa oli noin 30 astetta.

Laboratoriossa tehtyjen savukaasu- ja hiukkanalyysien perusteella keinokuivaus vähensi typen oksidien määrää ja erityisesti savukaasujen häikäpitoisuutta sekä kokonaishiukkaspäästöjä. Myös palamisen hyötysuhde oli parempi keinokuivatulla hakkeella (kosteus 20 %) verrattuna hakkeeseen, jonka kosteus vastasi luonnonkuivatun hakkeen kosteustasoa (35 %). Sen sijaan lämpölaitoksen koepoltossa keinokuivatun hake-erä ei poikennut vastaavana ajankohtana laitokselle toimitettujen hake-erien energiatuotosta (0,6–0,7 MW/i-m³). Kesä 2018 oli tosin poikkeuksellisen lämmin, jolloin energiapuu kuivui myös välivarastolla tavanomaista kuivemmaksi.

Keinokuivauksella voidaan kasvattaa metsäenergiapotentialiaa, merkittävästikin jos kohdealue on riittävän iso (esimerkkinä Rovaniemen alue, kokonaisenergiasisältö 317 232–359 874 MWh vuodesa). Yksittäisen lämpöyrittäjän näkökulmasta, keinokuivaukseen käytettävä energia pitäisi saada reilusti alle markkinahinnan, jotta rankahakkeen keinokuivaus olisi liiketaloudellisesti perusteltua. Perinteinen (luonnonkuivaus) ja keinokuivauksen sisältämä toimitusketjut olivat yhtä kannattavia, kun

kuivurin tehotuntuottavuus oli noin 5 i-m³/h. Tätä suuremmilla arvoilla keinokuivaukseen perustuva toimitusketju oli kannattavampaa. Keinokuivauksen kannattavuus parani merkittävästi, mikäli keinokuivatusta hakkeesta maksetaan yhden euron lisähinta per MWh verrattuna ulkoilmassa kuivattuun metsähakkeeseen.

Asiasanat: keinokuivaus, metsähake, metsäenergia, energiaranka, kannattavuus

ESIPUHE

Bioenergian tuotannolle niin EU:ssa kuin Suomessakin on asetettu merkittäviä kasvutavoitteita. Suomessa uusiutuvista polttoaineista suurimmat kasvutavoitteet on asetettu puuperäisiin polttoaineisiin, etenkin metsähakkeeseen. Metsähakkeen asema energiatuotannossa onkin kasvanut voimakkaasti viimeisen 2000-luvulla, mutta viimeisten vuosien aikana metsähakkeen käyttömäärät ovat olleet laskusuunnassa. Haketuotannon kannattavuutta on nakertaneet useat tekijät kuten lopputuotteen laadun vaihtelu ja toimitusketjun hitaus kannolta polttoon, mikä aiheuttaa kuiva-ainehävikkiä ja sitoo pääomia.

Projektin tarkoituksena oli parantaa metsäenergian koko tuotantoketjun kannattavuutta raaka-aineen hankinnasta aina energian tuottamiseen lämpölaitoksella. Tavoitteena oli luoda toimintamalli, joka nopeuttaa sekä metsähakkeen koko toimitusketjua että parantaa hakkeen jalostusarvoa (laatua), ja joka on sovellettavissa erityisesti hajautettujen energiatuotannon järjestelmissä parantaen paikallisten metsäenergiatoimijoiden liiketoimintamahdollisuuksia. Projektissa keskityttiin metsähakkeen keinokuivaukseen ja siitä saatavien hyötyjen selvittämiseen metsäenergiatuotannossa. Projektissa testattiin biopolttoaineiden kaivaukseen kehitettyä konttikuivurin soveltuvuutta metsähakkeen kuivaukseen.

Metsähakkeen keinokuivauksen vaikutus hankintaketjun kannattavuuteen -hanke toteutettiin Luonnonvarakeskuksen (Luke), Lapin ammattikorkeakoulun, SFTec Oy:n ja Mikkone Oy:n yhteistyönä. Hankkeen hallinnoinnista vastasi Luke. Hanketta (A71770) rahoitti Euroopan Unionin aluekehitysrahoitus, ja rahoituksen myönsi Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus. Haluamme kiittää rahoittajia ja kaikkia hankkeen toteuttamiseen osallistuneita henkilöitä yhteistyöstä.

Rovaniemellä 12.9.2019

Tekijät



Mikkone Oy



LAPIN AMK
Lapland University of Applied Sciences

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

Sisällys

1. Johdanto	7
2. Logistiikkavertailu voimalaitos kokoluokassa	9
2.1. Hidas ja nopea toimitusketju	9
2.2. Keinokuivaus paisuttaa suuralueen energiapotentiaalia	11
2.3. Kuivauksen enimmäiskustannus suuraluetasolla.....	13
3. Rankahakkeen kuivauskokeet	15
3.1. Keinokuivaus terminaalissa.....	16
3.2. Keinokuivaus käyttöpaikalla.....	18
4. Rankahakkeen polttokokeet	22
4.1. Koepoltot lämpölaitoksella	22
4.2. Koepoltot laboratoriossa	23
5. Keinokuivatun hakkeen ominaisuudet	25
5.1. Uuteaineet	25
6. Keinokuivauksen kannattavuus lämpöyrittäjä kokoluokassa.....	28
7. Johtopäätökset.....	33
Viitteet	35

1. Johdanto

Maailman kokonaisenergian kulutuksesta n 14 % tuotetaan biomassoista (Xu ym. 2018), ja uusiutuvat biomassat voivat korvata fossiilisia polttoaineita jopa siinä määrin että biomassoista tuotettavan bioenergian on katsottu olevan yksi tärkeimmistä keinoista rajoittaa kasvihuonekaasuja (Girones ym. 2017). Bioenergian hyödyntäminen ja kehitys edesauttavat muuttamaan energian tuotantoa ja kulu-tusta maapallolle edullisempaan suuntaa (Mao ym. 2018). Euroopan Unioni on sitoutunut tuotta-maan vuoteen 2030 mennessä noin 27 % kokonaisenergiastaan uusiutuvalla energialla (Euroopan Komissio 2014). Eritoten puubiomassoilla on todettu olevan ratkaiseva merkitys, jotta jäsenmaat saavuttaisivat tämän tavoitteen, 27 % (Ghaffariyan ym. 2017). Suomessa tavoite on asetettu vieläkin korkeammalle: vuoteen 2020 mennessä peräti 38 % kokonaisenergian kulutuksesta tuotettaisiin uu-siutuvalla energialla (Commission... 2008). Itse asiassa Suomi saavutti edellä mainitun 38 % tavoit-teensa jo vuonna 2014 (Tilastokeskus 2016).

Puubiomassoilla on monia kilpailevia käyttötarkoituksia – perinteisen paperi- ja massateollisuuden lisäksi (Tong ym. 2018). Vaikka puubiomassoja voidaankin hyödyntää monella eri tapaa – esimerkiksi tekemällä niistä kemikaaleja tai jopa ruokaa (Falck ym. 2013) – on Suomessa ollut varsin vahvana toimintatapana tehdä puusta paperia ja sellumassaa sekä energiaa (Lodenus ym. 2009, Natarajan ym. 2012). Koska Suomi on harvaan asuttu maa, ovat hajautetut järjestelmät bioenergian tuotannos-sa painottuneet (Karhunen ym. 2015). Lisäksi viime aikoina kiinnostus hukkaenergian (engl. waste heat) hyödyntämiseen bioenergian tuotannossa on merkittävästi kasvanut (Hengeveld ym. 2016). Samalla on kuitenkin todettava, että kansalliset tukijärjestelmät ovat ratkaisevassa asemassa päätet-täessä siitä, mikä energia ylipäänsä luetaan hukkaenergiaksi (Mardoyan ja Braun 2015).

Perinteisessä nuorista kasvatusmetsistä talteenotettavan puuenergian toimitusketjussa puunrungot karsitaan ja pääosa biomassasta tuotetaan rankana haketettavaksi (esim. Routa ym. 2013, Repola ym. 2014, Ghaffariyan ym. 2017). Ennen haketusta rangat kuitenkin kerätään pinoihin kuivumaan ulkoilmassa usean kuukauden ajaksi (Laitila ym. 2017). Menettelyllä pyritään pienentämään puiden kosteutta, jotta niiden lämpöarvo paranisi (Laitila ym. 2017). Kosteuden pienentäminen on tosin rat-kaisevasti riippuvainen kuivausjakson sääolosuhteista – keskimääräistä sateisempaan kesänä ja syk-synä saattaa jopa käydä niin, että puut ovat kosteampia kuin tuoreina, kaadettaessa. Usean kuukau-den kuivausjakson jälkeen puut haketetaan joko tienvarressa, terminaalissa tai käyttöpaikalla (Laitila ym. 2017). Lopuksi, hake kuljetetaan suoraan käyttöpaikalle tai välivarastolle (Laitila ym. 2017). Edel-lä kuvatun metsähakkeen toimitusketjun, ns. perinteisen, hitaan toimitusketjun ongelmina on pidetty nimenomaan pitkään kuivausjaksoon liittyvinä: kuiva-ainehävikki sekä uuteaineiden haihtuminen (Routa ym. 2017), hyönteisriski (Kanzian ym. 2017), sääolosuhteisiin liittyvää epävarmuus (Wolfsmayr and Rauch, 2014) ja pääoman sitoutuminen varastoon, ts. kuivauspinoihin (Rauch 2010).

Nykyisen haketuotannon ongelmia voitaisiin vähentää nopeuttamalla toimitusketjua kannolta pol-toon. Tähän olisi tällä hetkellä kaksi vaihtoehtoa: 1) kaatotuore puu haketetaan ja tuore hake polte-taan tai 2) tuore hake keinokuivataan ennen polttoa. Tuoreen hakkeen polttamisessa perusajatukse-na on, että kaatotuoreessa puussa on energiaa sisältäviä uuteaineita, joita voidaan poltossa hyödyn-tää lisäenergian saamiseksi. Tuoreen hakkeen (kosteus 50–60 %) poltto kuitenkin edellyttää, että kattilateknologia soveltuu tuoreelle hakkeelle ja savukaasuista saadaan energiaa talteen savukaasu-pesureiden ja lämmön talteenottojärjestelmien avulla. Tällä hetkellä tuoreen hakkeen poltto ei on-nistu kuin lähinnä suurilla ja nykyaikaisilla laitoksilla. Pienillä ja keskisuurilla lämpölaitoksilla hakkeen kosteus on edelleenkin kriittinen laatutekijä. Sen sijaan tuoreen hakkeen keinokuivaus ennen polttoa voidaan, ainakin periaatteessa toteuttaa jo pienten lämpölaitosten yhteydessä – keinokuivauksen kustannuksia voidaan jopa pienentää, jos keinokuivaukseen tarvittavasta energiasta osa saataisiin hukkalämmöstä.

Viimeaikainen ja toistaiseksi kansainvälisesti kattavin tiedeartikkeli (Ghaffariyan ym. 2017) metsäbiomassan talteenotosta korostaa puuenergian toimitusketjun energiatehokkuuden parantamista eritoten niin, että poltettavan raaka-aineen kosteutta voitaisiin laskea toimitusketjun aikana. Puuraaka-aineen kosteutta voidaan laskea esimerkiksi keinokuivaamalla haketta (Wolfsmayr and Rauch, 2014, Laitila ym. 2017). Keinokuivaus mahdollistaa sekä toimitusketjun nopeuttamisen että hakkeen laadun, energiasisällön parantamisen kuivaamalla hake haluttuun kosteuteen. Tällöin pystytään takaamaan myös hakkeen tasaisempi laatu (pienempi kosteuden vaihtelu) hake-erästä toiseen, jota on pidetty merkittävänä ongelmana lämmöntuotannossa. Kosteus vaikuttaa suoraan hakkeen polttoominaisuuksiin (energiämäärä, tehollinen lämpöarvo, kattilan hyötysuhde, päästöjen määrä) sekä hakkeen säilyvyyteen (kuiva-ainehävikki, itsesytyminen, homehtuminen) ja käytettävyyteen (jäätyminen).

Vaikka kuivatun hyvälaatuisen hakkeen kysynnän odotetaan kasvavan, metsähakkeen keinokuivaus ei ole kuitenkaan yleistynyt. Kyselytutkimuksen mukaan (Huovinen 2012) moni lämpöyrittäjä koki tarvitsevänsä kuivuria ja olivat jo harkinneet kuivurin hankkimista. Suurin este kuivaukselle oli kuivurin kalliiksi koettu alkuinvestointi, teknisten ratkaisujen saatavuus ja se, että hyvänä kesänä puupolttoaine kuivuu riittävän hyvin ilman kuivuriakin. Aiemmissä tutkimuksissa on todettu, että hakkeen keinokuivaus olisi liiketaloudellisesti perusteltua jos kuivaamisessa voidaan merkittävästi hyödyntää hukkalämpöä – toisin sanoen, keinokuivaamiseen tarvittava energia saataisiin alle markkinahinnan. Yksi mahdollisuus tähän olisi hyödyntää vajaakäytössä olevan lämpölaitoksen lämmöntuotantoa kuivaukseen (Raitila ja Heiskanen 2014). Suurimman osan vuotta (kevät-syky) 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 tarvitseville.

Tässä raportissa esitellään uusi, nopea metsähakkeen toimitusketju, jossa tuore hake keinokuivataan ns. konttikuivurissa, joka hyödyntää kaukolämpöverkon hukkalämpöä kaukolämmityskauden ulkopuolella (touko-lokakuu). Raportissa vertaillaan perinteisen, hitaan toimitusketjun (puut kuivataan pinoissa ulko-olosuhteissa useamman kuukauden aikana) ja uuden, nopean toimitusketjun (tuore hake keinokuivataan) toimintaedellytyksiä ja ennen kaikkea määritetään laskennallisesti (optimoinnin avulla) keinokuivauksessa käytettävälle energialle maksimihinta, jolloin nopea toimitusketju olisi vielä yhtä kannattava kuin perinteinen, hidas metsähakkeen toimitusketju. Taloustarkastelut toteutetaan yksittäisen lämpöyrittäjän näkökulmasta – toisin sanoen, lämpöyrittäjä vastaa koko toimitusketjun kustannuksista ja vastaavasti hän saa tuloina myymänsä metsähakkeen lämpöarvon mukaisen summan. Laskelmat on toteutettu uusimpien kustannustietojen ja metsähakkeesta maksettavan hinnan (€/MWh) mukaan. Lisäksi raportissa tarkastellaan seikkaperäisesti molempien toimitusketjujen mahdollisia pullonkauloja. Raportti pohjautuu toteutuneisiin konttikuivurin kuivaustuloksiin kesällä 2018, ja molemmille toimitusketjuille oletetaan sama hakkeen tuotantomäärä: 17 000 irtokuutiometriä vuodessa. Lopuksi, raportissa myös tarkastellaan keinokuivauksen merkitystä suuraluetasolla, esimerkkinä Rovaniemen alue.

2. Logistiikkavertailu voimalaitos kokoluokassa

Energiapuu on perinteisesti kuivattu polttokelpoiseksi varastoimalla sitä tienvarsivarastoissa. Energiapuun varastointi sitoo kuitenkin pääomia, varastolaho heikentää tienvarressa kuivuvan pinon energiasisältöä ja kuivuminen on lähes täysin säiden armoilla. Keinokuivauksella voi ehkäistä kuiva-ainetappiot, nopeuttaa varastokiertoa ja taata hakkeen tasaisen laadun, mutta mitä kuivaus voisi enintään maksaa? Sitä selvitettiin suuraluetason laskelmassa, jonka keskipisteenä oli Rovaniemi. Tutkimuksessa arvioitiin rankahakkeen keinokuivaukseen perustuvan hankintaketjun kustannuskilpailukykyä verrattuna perinteiseen toimintatapaan, jossa hakkeen raaka-aine pyritään kuivaamaan tavoitesteuteen varastoinnin aikana tienvarsivarastolla (Kuva 1). Hankkeen alkuaikoina hakkeen keinokuivauksen kustannuksista tai tuottavuuksista ei ollut ajan tasalla olevaa julkista tietoa, joten tutkimuksen alkuvaiheessa määritettiin vertailulaskelmien avulla, millä tasolla keinokuivauksen kustannukset voisivat enimmillään olla eri hankintamäärillä suurelle voimalaitokselle Lapissa. Tutkimuksessa tuotettuja korjuun ja kuljetuksen kustannusparametreja hyödynnettiin myös kun selvitettiin keinokuivauksen kannattavuutta lämpöyrittäjä kokoluokassa Lapissa.



Kuva 1. Kuitupuulla puuaineen tuoreus on merkittävä laatu- ja kustannustekijä. Onko tilanne sama energiapuulla jos toimitusketju perustuu keinokuivaukseen ja nopeaan varastokiertoon?

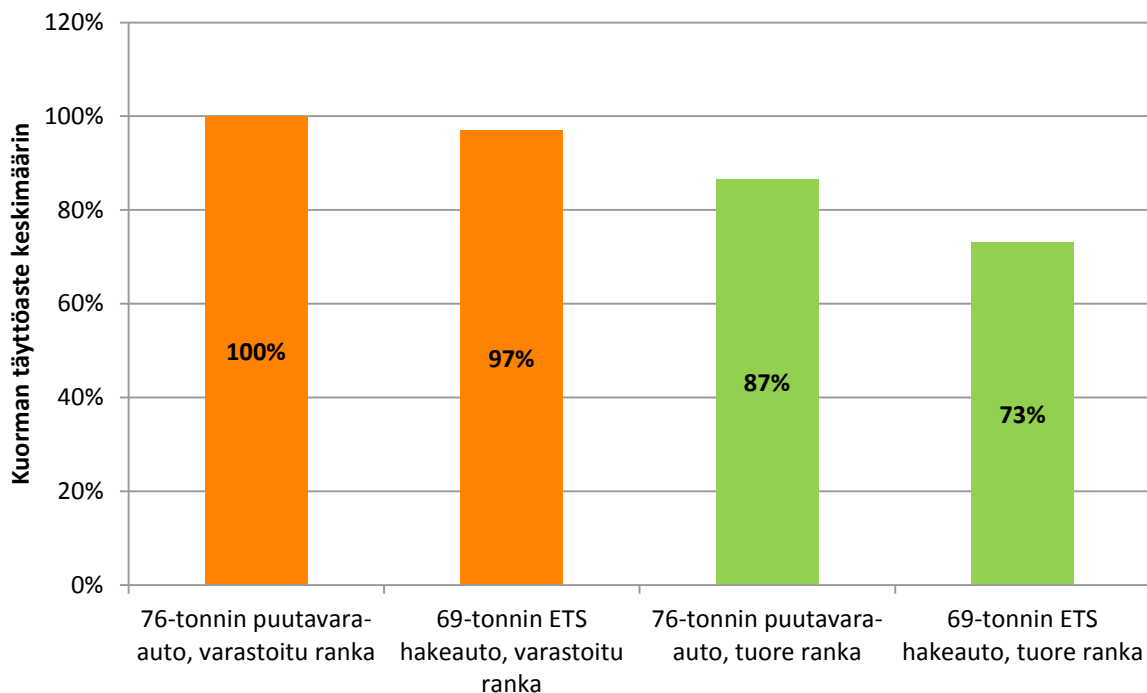
2.1. Hidas ja nopea toimitusketju

Korjuu-, kuljetus- ja haketus-kustannusten ohella vertailulaskennoissa huomioitiin hakkeen lämpöarvo sekä varastoinnin aiheuttamat kuiva-ainetappiot ja varastoihin sitoutuneen pääoman korkokulut molemmilla vertailtavilla toimintatavoilla (Laitila et al. 2017). Paikkatietoaineistoihin perustuvat las-

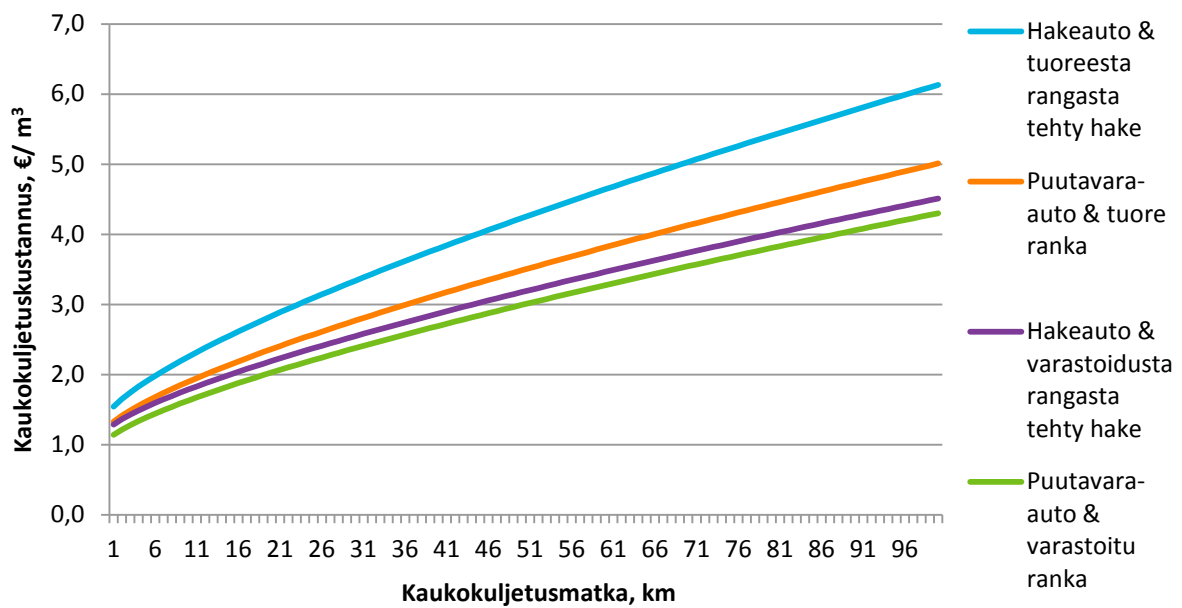
kelmat tehtiin Rovaniemellä sijaitsevalle käyttöpaikalle ja hankinta-alueen säde oli 100 kilometriä tieverkkoa pitkin. Rangan kertymät ja hankintakustannukset nuorista kasvatusemetsistä laskettiin VMI:n koelatietojen pohjalta. Tulokset laskettiin kiintokuutiometreinä (m³) ja rankahakkeen energiasisällön mukaan (MWh).

Vertailulaskelmissa rangat hakattiin joukkokäsittelylaittein varustellulla keskiraskaalla hakkuukoneella ja ajettiin tienvarsivarastolle metsätraktorilla. Rangan hakkuun ja metsäkuljetuksen, samoin kuin kaukokuljetuksen ja haketuksen tuottavuudet perustuivat aiemmin julkaistuihin ajanmenekkimalleihin tai tutkimuksiin (Nurminen & Heinonen 2007, Laitila & Väättäinen 2013, Laitila & Routa 2015, Laitila ym. 2015, Laitila ym. 2016, Laitila ym. 2017). Rankojen haketus suoritettiin autoalustaisella rumpuhakurilla joko käyttöpaikalla, terminaalissa tai tienvarsivarastolla. Hakkeen keinokuivauksen oletettiin tapahtuvan joko käyttöpaikalla tai terminaalissa. Rangat kuljetettiin tienvarsivarastolta käyttöpaikalle ja terminaaliin 76-tonnin puutavara-autolla. Haketta kuljetettiin terminaalista käyttöpaikalle 76-tonnin hakeautolla ja tienvarsivarastolta 69-tonnin kääntyväkseliselä hakeautolla.

Hankintakustannuslaskelmissa tienvarsivarastolla kuivatetun rangan loppukosteus oli 40 % ja varastointiaika yhdeksän kuukautta. Varastoinnin aiheuttamat kuiva-ainetappiot olivat 6,75 % ja varastointiin sitoutuneen pääoman korko 5 %. Kosteus- ja kuiva-ainetappiotietoa käytettiin kun määritettiin hakkeen energiasisältöä ja autokuljetuksen hyötykuormia (Kuva 2) tai kuljetuskustannuksia (Kuva 3). Keinokuivaukseen perustuvassa toimitusketjussa kaatotuoreen rangan kosteus oli 55 %. Vertailulaskelmassa tuoreesta rangasta tehty hake kuivattiin 20 %, 30 % tai 40 % loppukosteuteen ja käyttöpaikalla valmiin hakkeen oletettiin olevan kuukauden sisällä hakkuusta.



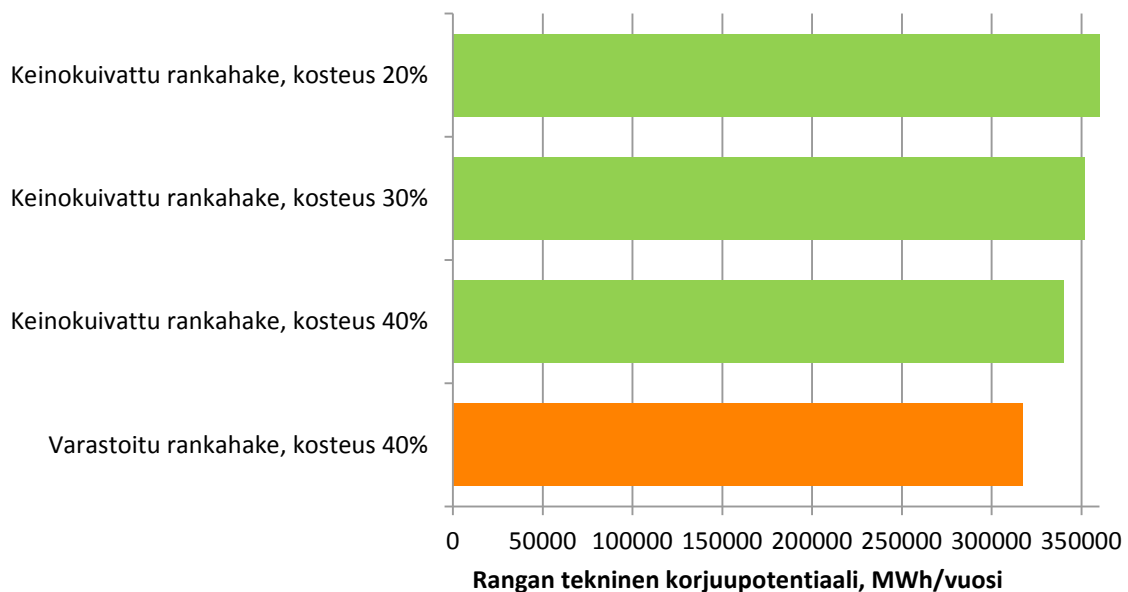
Kuva 2. Hake- ja puutavara-auto kuormien keskimääräinen täyttöaste varastoidulla ja kaatotuoreella rangalla.



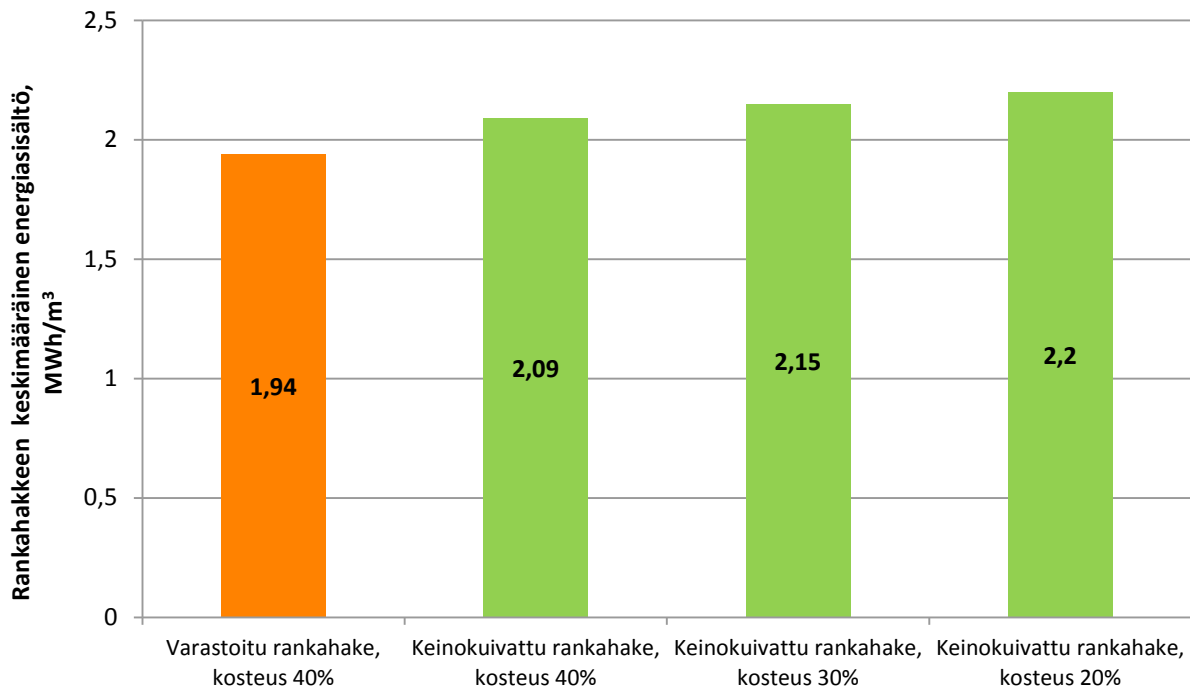
Kuva 3. Tuoreen ja varastoidun hakkeen ja rangan kaukokuljetuskustannukset eri kaukokuljetusmatkoilla.

2.2. Keinokuivaus paisuttaa suuralueen energiapotentiaalia

Rangan tekninen korjuupotentiaali oli Rovaniemen ympäristössä 162 905 m³ vuodessa, mikä vastaa laskentaperusteista riippuen 317 232–359 874 MWh energiasisältöä (Kuva 4). Tienvarsivarastolla kuivatetun rangan energiasisältö oli kuiva-ainetappiot huomioiden koko laskenta-aineiston keskiarvona 1,94 MWh/m³ (Kuva 5). Vastaavat arvot tuoreesta rangasta tehdyille ja keinokuivatulle hakkeelle olivat 2,09 MWh/m³, 2,15 MWh/m³ ja 2,2 MWh/m³ 40 %, 30 % ja 20 % loppukosteuksilla (Kuva 5).



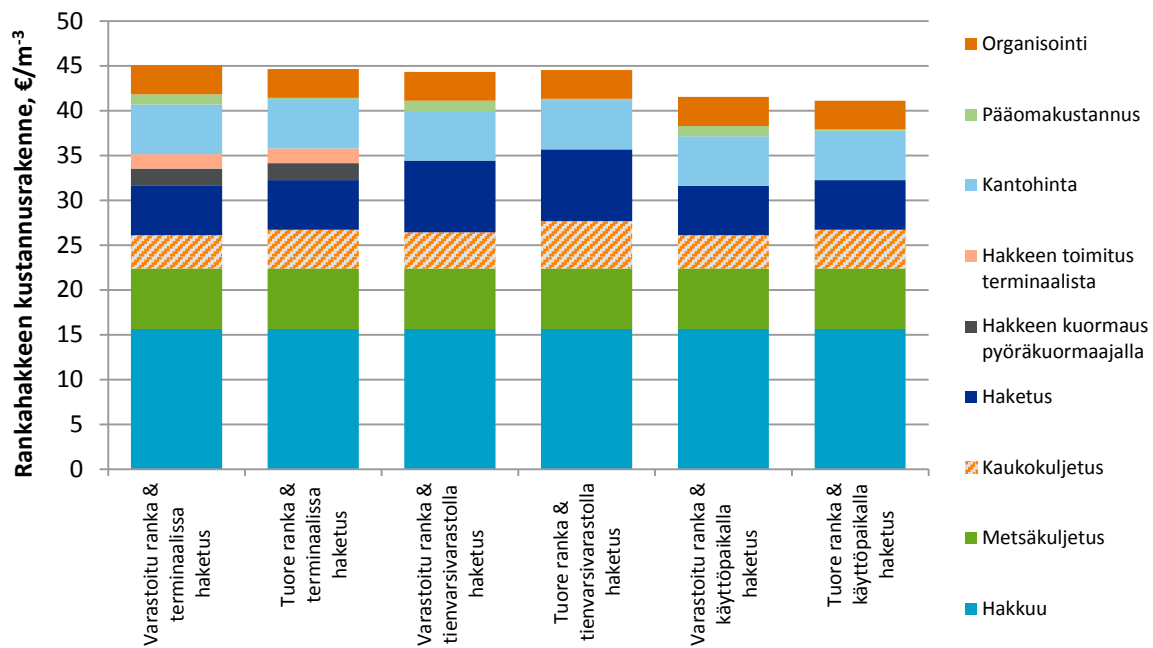
Kuva 4. Rankahakkeen tekninen korjuupotentiaali Rovaniemen ympäristössä 100 km säteellä tieverkkoa pitkin energiasisällön mukaan (MWh/vuosi).



Kuva 5. Hakekiintokuutiometrin keskimääräinen energiasisältö (MWh/m³) laskenta-alueella kuivaustavan ja kosteusprosentin mukaan.

Rankahakkeen hankintakustannukset olivat alhaisimmat kun rangan haketus suoritettiin käyttöpai-
kalla (Kuva 6). Terminaalihaketukseen perustuvalla hankintaketjulla rankahakkeen hankintakustan-
nukset olivat puolestaan vertailun korkeimmat. Hakkuun ja metsäkuljetuksen osuus oli noin puolet
rankahakkeen hankintakustannuksista (Kuva 6). Keinokuivaukseen perustuvalla toimintatavalla kau-
kokuljetuksen kustannukset olivat korkeammat ja varastoihin sitoutuneen pääoman kustannukset
alemmat kuin toimintatavassa, jossa ranka kuivattiin tavoitekosteuteen varastoinnin aikana (Kuva 6).
Muutoin kustannusrakenne oli sama molemmilla toimintatavoilla kun kustannukset laskettiin kiinto-
kuutiometriä kohden (€/m³).

Kuljetusmatkasta riippuen (1–100 km) kaatotuoreen rangan kuljetuskustannukset olivat puutavara-
autolla 0,19–0,71 €/m³ korkeammat kuin varastoidulla rangalla. Vastaavasti välivarastolla haketetun
tuoreen rankahakkeen kuljetuskustannukset olivat 0,26–1,62 €/m³ korkeammat kuin varastoidusta
rangasta tehdyn hakkeen (Kuva 3). Varastoihin sitoutuneen pääoman korkokulu oli keinokuivaukseen
perustuvalla toimintatavalla 1,04 €/m³ alempi (Kuva 6) kuin perinteisellä toimintatavalla (koko aineis-
ton keskiarvo).

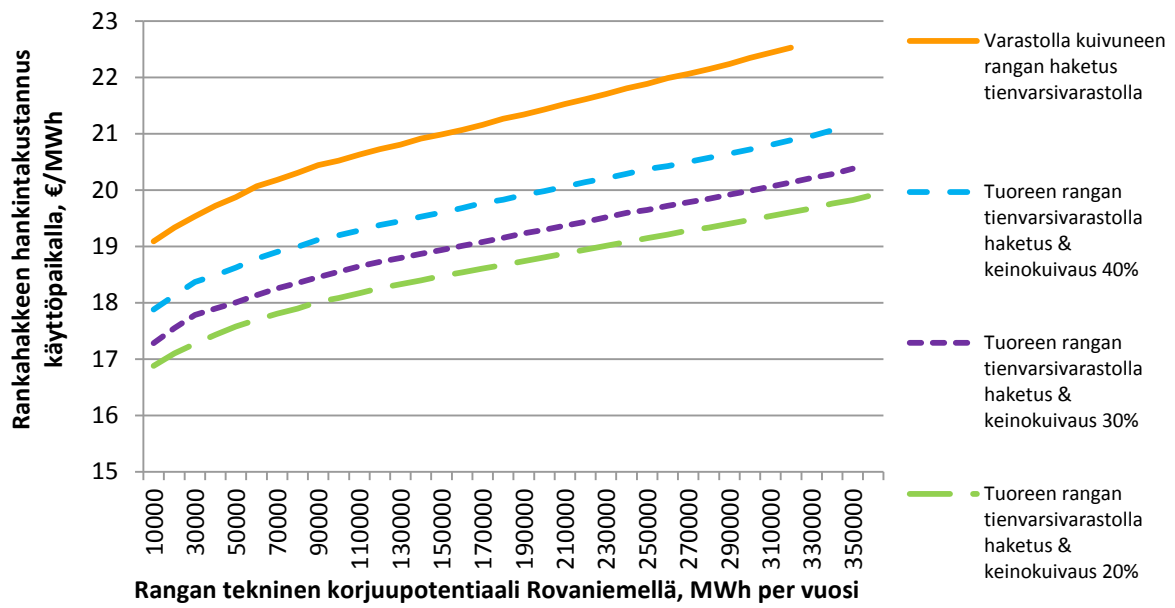


Kuva 6. Rankahakkeen kustannusrakenne käyttöpaikalla (koko aineiston keskiarvo).

2.3. Kuivauksen enimmäiskustannus suuraluetasolla

Tulosten mukaan hakkeen keinokuivauksella, nopeutetulla varastokierrolla ja kuiva-ainetappioiden minimoinnilla olisi mahdollista alittaa hakkeen hankintakustannukset perinteiseen toimintatapaan verrattuna. Vertailulaskelmien mukaan keinokuivauksen kustannussäästö potentiaali kasvaa hankintamäärien kasvaessa ja toiminnan tehostamispotentiaali on samaa tasoa käyttöpaikka-, tienvarsi- ja terminaalihaketukseen perustuvilla hankintaketjuilla.

Hakkeen hankintamäärästä riippuen, keinokuivauksen enimmäiskustannus voi olla 1,8–2,7 €/MWh jos keinokuivatun hakkeen loppukosteus on 30 %. Vastaava enimmäiskustannuksen vaihteluväli on 2,2–3,2 €/MWh kun keinokuivatun hakkeen loppukosteus on 20 % ja 1,2–1,9 €/MWh kun keinokuivatun hakkeen loppukosteus on 40 %. Esimerkiksi tienvarsivarastolla haketukseen perustuvalla hankintaketjulla ja 150 000 MWh:n vuotuisella hankintamäärällä (Kuva 7) keinokuivauksen enimmäiskustannus voi olla 2,5 €/MWh jos keinokuivatun hakkeen loppukosteus on 20 % ja 1,4 €/MWh, jos keinokuivatun hakkeen loppukosteus on 40 %. Tulosten perusteella hakkeen keinokuivauksen enimmäiskustannus on, hakkeen hankintamäärästä ja loppukosteudesta riippuen samaa suuruusluokkaa kuin metsäkuljetuskustannus, rangan kantohinta tai hankinnan organisointikustannukset ovat.



Kuva 7. Rankahakkeen hankintakustannus vertailtavilla kuivaustavoilla hankintamäärän ja hakkeen loppukosteuden mukaan, kun haketus tehdään tienvarsivarastolla.

3. Rankahakkeen kuivauskokeet

Metsähakkeen kuivauskokeissa testattiin bioraaka-aineiden kuivaukseen kehitettyä siirrettävää konttikuivuria (SFTec Oy) (Kuva 8). SFTec Oy:n kehittämä patentoitu ModHeat -kuivain (Modular Heating) on suunniteltu ja rakennettu standardi merikontiin, mikä tekee ratkaisusta mobiiliin. Lisäksi kuivain on rakenteeltaan modulaarinen, mikä laskee kuivaimen valmistus- ja huoltokustannuksia. Rakenteen modulaarisuus mahdollistaa samalla myös kuivauskapasiteetin optimoinnin tarpeen mukaan. Kuivain on suunniteltu lähtökohtaisesti vähäarvoisten sivuvirtojen kuivaukseen, ja teknologia suunnittelussa jo on huomioitu mm. erilaisten teollisten hukkalämpöjen hyödyntämisen mahdollistaminen. Konvektiivisesta kuivauksesta lämpimällä ilmalla ollessa kyseessä muodostaa kuivauslämmön tuotanto jopa 70 % kuivauksen käyttökuluista, joten erilaisten hukkalämpöjen hyödyntäminen kuivaukseen on avain asemassa kuivauksen kustannustehokkuun ja taloudellisen kannattavuuden kannalta.

Materiaali kuivaimeen syötetään kontin päältä ja kuivaustasoilla olevien lapojen avulla materiaali siirretään tasolta toiselle ylhäältä alaspäin kuivauksen edetessä. Kuivaukseen käytettävä lämminilma puhalletaan vastavirtaan alhaalta ylöspäin, näin hyödyntäen kuivausilmassa käytössä oleva kuivauskapasiteetti maksimaalisesti materiaalin kuivaukseen. Teknologian rakenteellisissa ratkaisuissa on näin huomioitu kaikki kuivausprosessiin vaikuttavat siirtoilmiöt (massa, aine ja liike) sekä materiaalin ominaisuudet, kun materiaali liikkuu tasolta toiselle ja sitä sekoitetaan samalla kuivauksen aikana. Materiaalin jatkuva liikkuttelu ja sekoittaminen kuivauksen aikana takaavat kuivatun tuotteen tasalaatuisuuden.

ModHeat -kuivain teknologian on useamman vuoden suunnittelu- ja tuotekehitystyön tulos. Tässä hankkeessa koekuivauksissa käytettiin ensimmäistä teollisenmittakaavan pilot-kuivainta, joka valmistui 2016. Ensimmäisessä koekuivauksessa (v. 2017) pilot kuivaimen rakenne oli alkuperäisen suunnitellun rakenteen mukainen eli materiaalia liikuteltiin tasoilla lapojen avulla. Toista koejaksoa varten (v. 2018) tehtiin kuivaimeen teknisiä muutoksia kuivaimen kapasiteetin optimoimiseksi hake materiaalille.

Koekuivaukset toteutettiin Rovaniemellä (Hirvas) toukokuussa 2017 ja kesäkuussa 2018. Toukokuun 2017 koekuivauksissa demonstroititiin tilannetta, joka vastasi välivarastolla tai terminaalisissa tapahtuvaa kuivausta, jolloin kuivauslämpö tuotettiin erillisellä hakekontilla. Kesäkuussa 2018 koekuivaukset tehtiin käyttöpaikalla, ja kuivauslämpönä käytettiin lämpölaitoksen (1 MW, Mikkone Oy) reservilämpöä. Kuivattava hake valmistettiin tuoreesta energiarangasta sillä nopeutetun varastokierron edut tulevat parhaiten esille rankahakkeella, jonka korjuukustannukset ja varastoon sitoutuneen pääoman määrä on hakelajeista kaikkein korkein. Se on myös pienten lämpölaitosten polttoaine, jotka juuri tarvitsevat korkealaatuista polttoainetta. Kosteuden määrittämistä varten hakenäytteet otettiin ennen kuivausta (tuore) ja kuivauksen jälkeen. Näytteiden kosteus määritettiin sekä kenttämittarilla että laboratoriomittauksilla. Kesäkuun 2018 hakenäytteistä määritettiin myös vesi- ja rasvaliukoisten) uuteaineiden määrä.



Kuva 8. Metsähakkeen keinokuivauksessa testattiin SFTec Oy:n valmistamaa konttikuivuria. Merikonttiin rakennettu kuivuri sopii useiden eri materiaalien kuivaukseen ja se on siirrettävissä kuivaustarpeen mukaan.

3.1. Keinokuivaus terminaalissa

Toukokuun 2017 koekuivauksissa demonstroitii tilannetta, joka vastasi välivarastolla tai terminaalissa tapahtuvaa kuivausta eli kuivuri lisälaitteineen oli irti sähköverkosta ja tarvittava sähkö tuotettiin aggregaateilla ja kuivauslämpö erillisellä hakekontilla (Kuva 9).



Kuva 9. Toukokuun 2017 koekuivauksissa kuivauksessa tarvittava lämpö tuotettiin hakkeella (hakekontti) ja tarvittava sähkö agrekaateilla.

Kuivattava hake valmistettiin tuoreesta energiarangasta (mäntyvaltainen), jonka kosteus vaihteli 50 - 55 prosentin välillä (Taulukko 1). Kahtena ensimmäisenä kuivauspäivänä hakkeen läpimenoaika kuivurissa oli 2:45 ja kuivurin tuntituottavuus oli 1,0 i-m³. Lämpötila kuivurissa oli 45–50 astetta, jolloin polttimen hakkeen kulutus oli keskimäärin 0,81 i-m³/h. Kuivauksen jälkeen hakkeen kosteus oli alhainen, keskimäärin 11 % vaihdellen 4,4–17,0 prosentin välillä. Seuraavalle kuivauspäivälle (19.5) kuivauslämpötilaa laskettiin 25–43 asteen välille, jolloin polttimen hakkeen kulutus laski (0,57 i-m³/h). Samalla kuivurin ohjausjärjestelmään tehtiin automaatiopäivitykset, jolla saatiin nostettua hakkeen läpimenoaika kuivurissa (1:30) ja tuottavuutta (2,1 i-m³/h). Kuivauksen jälkeen hakenäytteiden keskimääräinen kosteus oli 34,1 % (29,8 – 35,8 %).

Taulukko 1. Kuivauskokeiden (toukokuu 2017) tulokset päiväkohtaisina keskiarvoina.

Pvm	Tuottavuus, i-m ³ h ⁻¹	Läpimenoaika, h	Lämpötila kuivuri, °C	Kosteus tuore, %	Kosteus kuiva, %
17.5	1,0	2:45	45 - 50	52,3	8,4
19.5	1,0	2:45	45 - 50	51,3	16,4
24.5	2,1	1:35	35 - 45	55,2	34,1

Kokeissa kuivurin kuivausteho todettiin hyväksi ja hake kuivui liikaa, mutta kuivurin tuottavuus jäi alhaiseksi (2 i-m³/h). Erillisen hakekontin ja agrekaattien käyttäminen kuivauslämmön ja sähkön tuottamiseen yhdessä kuivurin alhaisen tuottavuuden kanssa todettiin käytännön kannalta kannattamattomaksi ratkaisuksi. Todettiin, että huomattavasti kannattavampi ratkaisu olisi ottaa sähkö verkosta ja hyödyntää kuivauksessa hukkalämmön lähteitä tai esimerkiksi lämpölaitoksen reservilämpöä, jota olisi saatavilla kevään ja syksyn välisenä aikana.

3.2. Keinokuivaus käyttöpaikalla

Kesäkuussa 2018 koekuivaukset tehtiin käyttöpaikalla ja kuivauslämpönä käytettiin lämpölaitoksen (1 MW, Mikkone Oy) reservilämpöä. Lämpölaitoksen vesikierto ohjattiin erilliselle lämmönvaihtimelle, josta lämmin ilma puhallettiin edelleen kuivuriin (Kuva 10). Laitoksen reservilämmön hyödyntäminen ei myöskään sulkenut pois ideaa mobiilikuivurista, sillä ajatuksena on, että kuivuria ei asenneta pysyvästi laitoksen kylkeen vaan se on siirrettävissä esim. toiselle laitokselle kuivaustarpeen mukaan. Edellisen koekuivauksen (toukokuu 2017) kokemusten perusteella kuivuria oli modifioitu nopeamaksi syöttökapasiteetin, kuljetusnopeuden, sekä purkukapasiteetin osalta vaihtamalla hydraulipumput suurempiin, jolloin nopeudet automatiikassa saatiin kaksinkertaisiksi. Lisäksi kuivaimessa materiaalin liikutteluun tarkoitettua lapajärjestelmään uudistettiin vastaamaan paremmin kappalemaisen hakkeen ominaisuuksia ja liikeominaisuuksia. Muutosten tarkoituksena oli parantaa kuivurin soveltuvuutta hakkeen kuivaukseen: nopeuttaa hakkeen kiertoa kuivurissa ja parantaa kuivurin tuottavuutta ($\text{i-m}^3/\text{h}$).



Kuva 10. Kuivauksessa hyödynnettiin lämpölaitoksen reservilämpöä. Lämpölaitoksen vesikierto ohjattiin erilliselle lämmönvaihtimelle (kuvassa oikealla), josta lämmin ilma puhallettiin edelleen kuivuriin.

Kesäkuun 2018 koekuivauksissa kuivattava hake valmistettiin tuoreesta energiarangasta (koivuvaltainen), joka oli kaadettu toukokuun puolessa välissä eli noin reilu kuukausi ennen koekuivausten aloittamista. Koekuivauksissa tuotantokapasiteettia nostettiin asteittain, jolloin myös kuivattavan materiaalin massa kasvoi. Kuivausilman määrä ja -lämpötila pidettiin vakiona. Kuivurissa lämpötila oli noin 30 astetta. Ulkolämpötila vaihteli 10 ja 18 asteen välillä. Koekuivauksissa kuivurin tuntituottavuutta nostettiin päivittäin aloittaen 2,5 i-m^3 :sta päättyen 3,6 i-m^3 :in. Vastaavasti hakkeen läpimenoaika kuivurissa vaihteli välillä 1:33–1:49 h. Lisäksi yhtenä päivänä (26.6) testattiin hakkeen kuivausta ilman

lisälämpöä, jolloin kuivuriin puhallettiin pelkästään ulkoilmaa. Lämpötila kuivurissa oli tuolloin keskimäärin 20 astetta.

Hakkeen kosteus tuoreena (ennen kuivausta) oli varsin alhainen vaihdellen 31–36 prosentin välillä (Taulukko 2). Kosteus putosi kuivauksen aikana keskimäärin 15,6 prosenttiyksikköä eli 18,9 prosentin loppukosteuteen. Hakkeen läpimenoaika ja siten myös tuntituottavuus ($i\text{-m}^3$) vaikuttivat hakkeen kuivumiseen. Alle 3 $i\text{-m}^3$:n (läpimenoaika 1:45–1:49 tuntia) tuntituottavuuksilla kuivuminen oli 17–21 prosenttiyksikköä ja yli 3 $i\text{-m}^3$:n (läpimenoaika 1:33–1:38 tuntia) tuottavuuksilla 12–13 prosenttiyksikköä (Taulukko 2). Kuivauksessa hakkeesta poistettiin vettä keskimäärin 44 $\text{kg}/i\text{-m}^3$ (33,1–56,3 $\text{kg}/i\text{-m}^3$). Kuivattaessa pelkällä ulkoilmalla hake kuivui noin 5 prosenttiyksikköä ja vettä haihtui 11,8 $\text{kg}/i\text{-m}^3$.

Taulukko 2. Kuivauskokeiden (kesäkuu 2018) tulokset päiväkohtaisina keskiarvoina

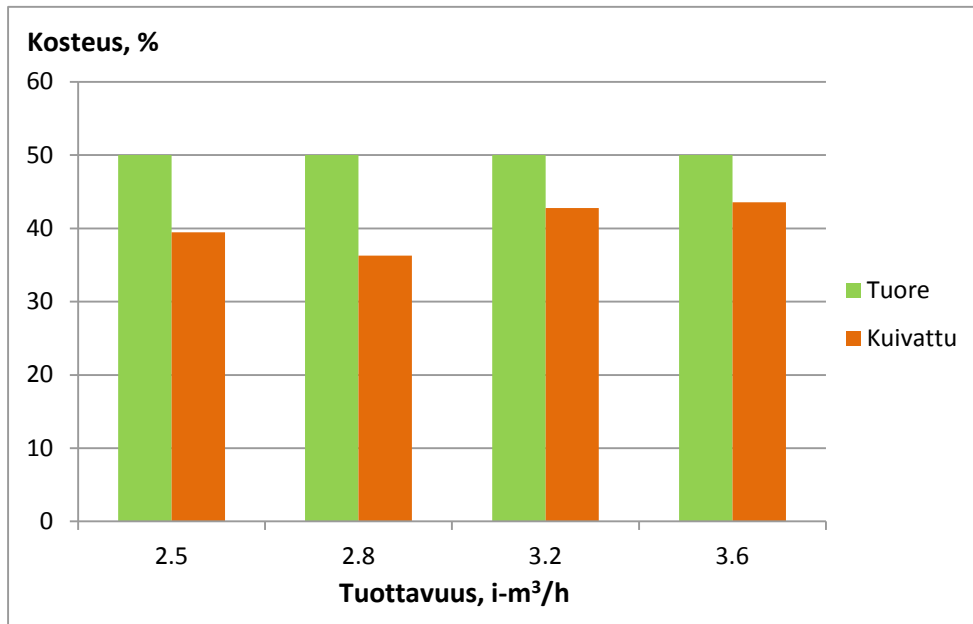
Pvm	Tuottavuus, $i\text{-m}^3\text{h}^{-1}$	Läpimeno- aika, h	Kosteus tuore, %	Kosteus kuiva %,	Poistettu vesi, $\text{kg}/i\text{-m}^3$	Kulutettu energia **, kWh
20.6	2,5	1:49	36,1	19,0	51,0	36,3
21.6	2,8	1:45	34,8	14,3	56,3	44,8
25.6	3,2	1:38	32,1	19,1	36,4	26,2
27.6	3,6	1:33	31,1	19,1	33,1	23,9
26.6*	2,5	1:49	31,0	25,2	17,3	11,8

* Kuivaus pelkällä ulkoilmalla (ei lisälämpöä), ** Veden poistamiseen tarvittava laskennallinen energiamäärä

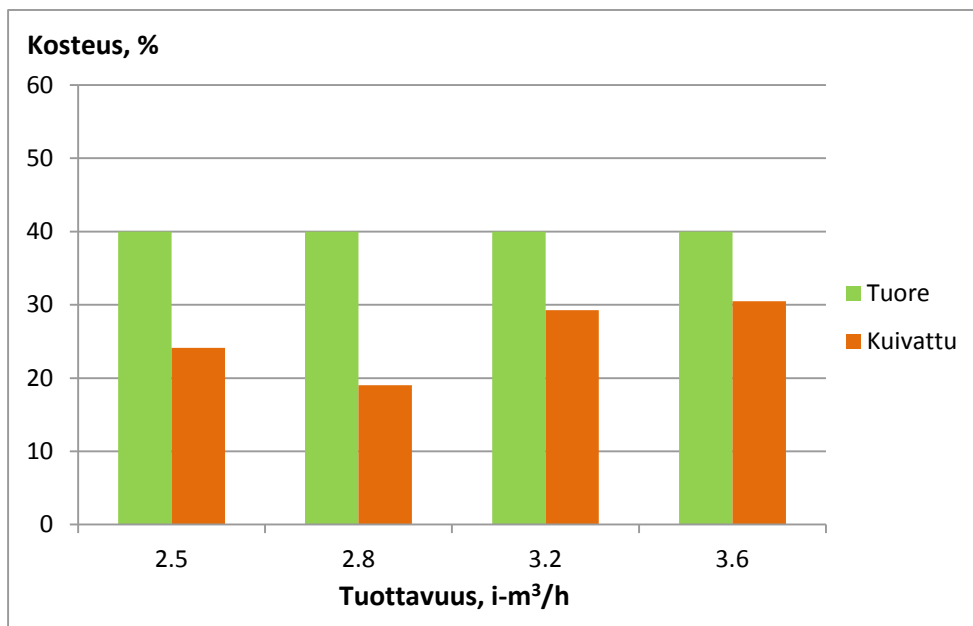
Koekuivauksissa hake kuivui alle tavoitekosteuden eli alle puun syiden kyllästymispisteen (kosteus < 23 %), jolloin kuivattiin vapaan veden lisäksi sidottua vettä. Puun syiden kyllästymispiste (PSK) kuvaa kosteussuhdetta, jolloin soluonteloissa ei ole vapaata vettä, mutta puun soluonteloiden seinämät ovat täysin veden kyllästämiä. Sidottu vesi on adsorboitunut tiukasti kiinni puuaineksen soluonteloiden välisiin seinämiin, kun taas vapaa vesi on soluonteloissa. Vapaan veden poistaminen vastaa normaalia veden höyrytämistä, jolloin lämpöenergian tarve on vakio (0,68 kWh/kg). Sen sijaan sidotun veden poistaminen vaatii selvästi enemmän lämpöenergiaa, ja sen tarve riippuu puun kosteudesta eli energiatarve on sitä suurempi mitä alhaisempaan kosteuteen puu kuivataan.

Toukokuun lämpimien säiden takia energiapuu oli päässyt kuivahtamaan pinossa, minkä seurauksena tuoreen sekä kuivatun hakkeen kosteudet olivat suunniteltua alhaisempia. Tämän takia laskettiin veden poistamiseen kulutettu energiamäärä ja kuinka paljon määritetyllä energiamäärällä olisi voitu poistaa vapaata vettä kaatotuoreesta hakkeesta. Laskennallisissa tuloksissa simuloitiin hakkeen kuivuminen eri kuivauspäivinä, kun hakkeen kosteus tuoreena oli 50 % ja 40 %.

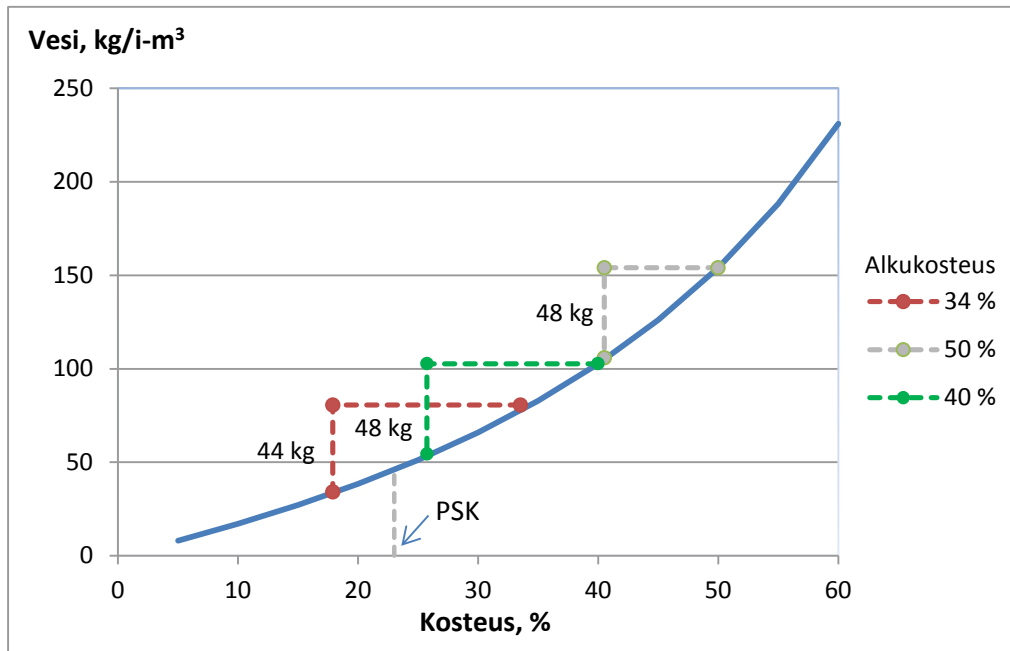
Kun kaatotuoreen hakkeen kosteus oli 50 %, kosteus putosi kuivauksen aikana keskimäärin 9,5 (6,4–13,7) prosenttiyksikköä, jolloin loppukosteus oli 40,5 prosentin vaihdellen 36,5–43,6 prosentin välillä hakkeen läpimenoajasta riippuen (Kuva 11). Vastaavasti tuoreen hakkeen kosteuden ollessa 40 % hake kuivui keskimäärin 14,3 prosenttiyksikköä (9,5–21,0) eli 25,7 prosentin loppukosteuteen (19,0–30,5 %) (Kuva 12). Simuloiduissa kuivauksissa hakkeesta poistettiin vettä keskimäärin 48 $\text{kg}/i\text{-m}^3$ (35,2–65,8 $\text{kg}/i\text{-m}^3$), mikä oli 4 $\text{kg}/i\text{-m}^3$ enemmän kuin toteutuneissa kuivauksissa (Kuva 13).



Kuva 11. Simuloidut hakkeen kuivaustulokset kuivurin eri tuottavuusarvoilla kun kaatotuoreen hakkeen kosteus on 50 %.

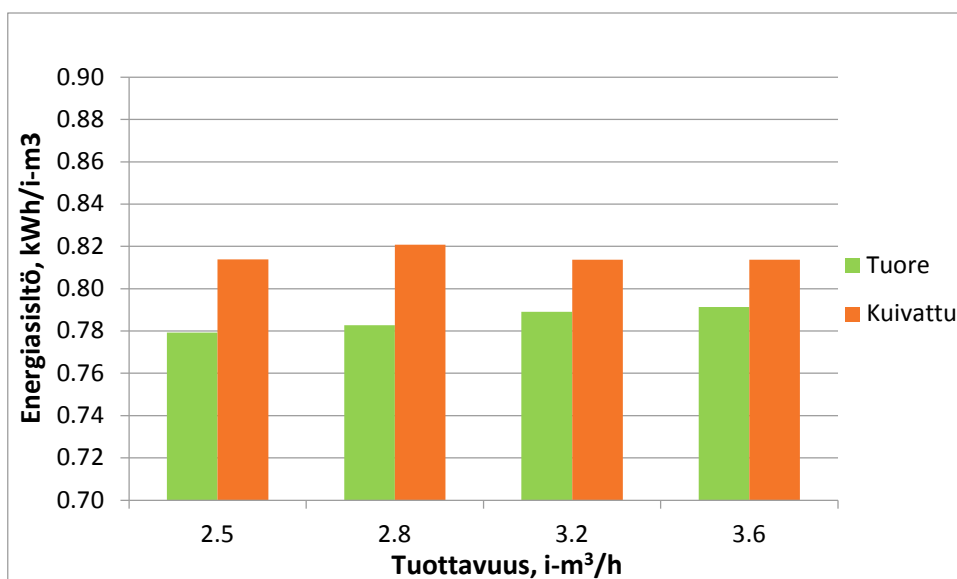


Kuva 12. Simuloidut hakkeen kuivaustulokset kuivurin eri tuottavuusarvoilla kun kaatotuoreen hakkeen kosteus on 40 %.



Kuva 13. Hakkeen keskimääräiset kosteudet ja vesimäärät sekä niiden muutokset toteutuneissa (alkukosteus 34 % ja simuloituissa (alkukosteus 40 % ja 50 %) kuivauksissa. PSK on puun syiden kyllästymispiste.

Kesäkuun kokeet osoittivat, että hakkeen energiasisältö kasvoi kuivauksikokeissa. Toteutuneissa kuivauksissa tuoreen hakkeen energiasisältö oli keskimäärin 0,786 MWh/i-m³ ja kuivauksen jälkeen 0,816 MWh/i-m³ eli muutos oli keskimäärin 0,030 MWh/i-m³. Kuivurin tuntituottavuuden kasvaessa hakkeen kuivuminen oli vähäisempää ja näin ollen myös energiasisällön muutos pienempää (Kuva 14). Alle 3 i-m³:n tuntituottavuuksilla energiasisällön muutos oli noin 0,037 MWh/i-m³ ja yli 3 i-m³:n tuntituottavuuksilla 0,024 MWh/i-m³. Laskennallisissa tuloksissa, jossa kaatotuoreen hakkeen kosteudeksi oletettiin 40 % ja 50 % energiasisällön muutos oli hieman suurempi, keskimäärin 0,033 MWh/i-m³ vaihdellen 0,024–0,046 MWh/i-m³ välillä kuivurin tuntituottavuudesta riippuen.



Kuva 14. Hakkeen energiasisältö (kWh/i-m³) tuoreena ja kuivauksen jälkeen kuivurin eri tuntituottavuuksilla.

4. Rankahakkeen polttokokeet

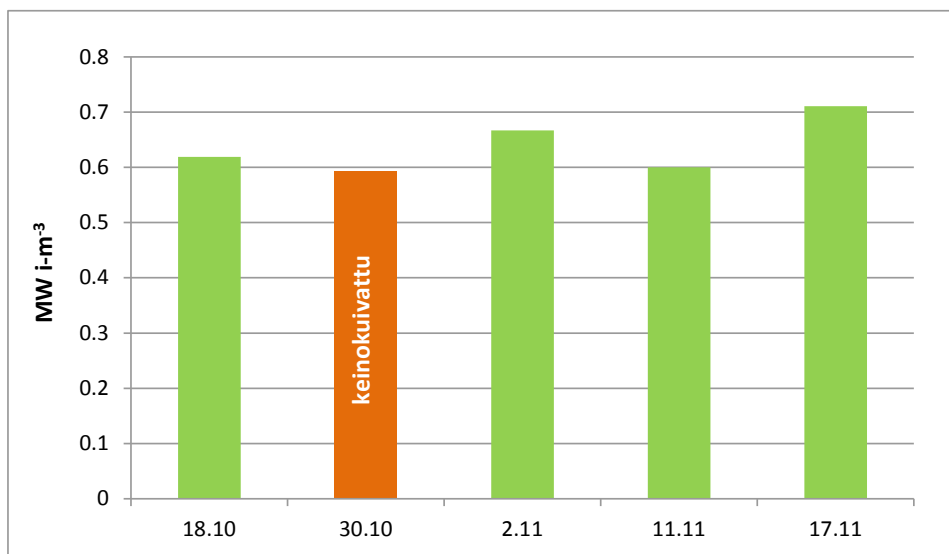
Polttokokeiden tarkoituksena oli selvittää keinokuivatun hakkeen poltto-ominaisuudet ja verrata niitä tuoreen sekä ilmakeiviatun (luonnonkuivaus väliavarastolla) hakkeen poltto-ominaisuuksiin. Koepoltot tehtiin sekä lämpölaitoksella että laboratoriossa. Laboratoriokoepolttoissa verrattiin keinokuivatun ja tuoreen hakkeen energiasisältöä sekä savukaasu- ja hiukkaspäästöjä. Lämpölaitoksella toteutetussa koepoltossa verrattiin keinokuivatun rankahakkeen energiasisältöä ($\text{MW}/\text{i-m}^3$) laitokselle tuotuihin normaalin käytännön mukaisiin eli luonnonkuivattuihin (ilmakuivattu) hake-eriin. Aineisto koostettiin tuoreen ja keinokuivatun hakkeen osalta vuoden 2018 kuivauskokeista.

4.1. Koepoltot lämpölaitoksella

Keinokuivatun hakkeen koepoltoista saatuja energiantuottoa ($\text{MW}/\text{i-m}^3$) verrattiin lämpölaitokselle loka-marraskuun aikana toimitettuihin hakekuormiin ($40\text{--}45 \text{ i-m}^3/\text{kuorma}$). Näiden verrokkikuormien hake oli tuotettu normaalin käytännön mukaisesti eli puu oli kuivattu energiapuupinossa väliavarastolla. Koepoltot toteutettiin $0,3 \text{ MW}$:n lämpölaitoksella (Mikkone Oy) $31.10\text{--}3.11.2018$. Sitä varten haketta säkitettiin kesän 2018 koekuivaussissa noin 15 i-m^3 . Ennen koepolttoja, neljän kuukauden varastoinnin jälkeen otettiin vielä kosteusnäytteet, joilla arvioitiin hakkeen mahdollinen kosteuden muutos varastoinnin aikana.

Keinokuivatun hakkeen kosteus neljän kuukauden varastoinnin jälkeen vaihteli pääsääntöisesti $21\text{--}23$ prosenttia välillä. Kesän koekuivausten jälkeen hakkeen kosteusarvot olivat hieman alhaisempia keskimäärin 19% . Syynä eroon voi olla hakkeen lievä kostuminen syksyn varastoinnin aikana tai kosteusnäytteiden otantaerot poltto- ja kuivauskokeiden välillä.

Lämpölaitoksen koepoltossa keinokuivattu hake-erä tuotti vajaa $0,6 \text{ MW}/\text{i-m}^3$ (Kuva 15). Vastaavana ajankohtana laitokselle toimitettujen hake-erien energiantuotto oli hieman korkeampi $0,6\text{--}0,7 \text{ MW}/\text{i-m}^3$ hakekuormasta riippuen. Epävarmuutta keinokuivatun hakkeen tuloksiin saattoi aiheuttaa pieni hake-erä (15 i-m^3). Ja toisaalta kesä 2018 oli poikkeuksellisen lämmin, jolloin energiapuu kuivui myös väliavarastolla tavanomaista kuivemmaksi. Hake-erien vertailtavuutta heikensivät myös mahdolliset erot hake-lajista; keinokuivattu hake oli koivuvaltaista rankahaketta ja hakekuormien hakelaji ei ollut tiedossa.



Kuva 15. Keinokuivatun (oranssi) ja ilmakeiviatun (luonnonkuivatun) hake-erien energiasisällöt ($\text{MW}/\text{i-m}^3$) lämpölaitoksen koepolttoissa v. 2018.

4.2. Koepoltot laboratoriossa

Laboratoriokoepolttojen tarkoituksena oli verrata tuoreen ja keinokuivatun hakkeen energiasisältöä sekä savukaasu- ja hiukkaspäästöjä. Hakenäytteet koostettiin kesän 2018 koekuivauksista, ja molempia hake-eriä (tuore, keinokuivattu) oli noin 8 kg. Polttokokeet tehtiin Karelia-ammattikorkeakoulussa Sirkkalan energiapuistossa. Savukaasu- ja hiukkasanalyysissä saatiin tulokset O₂-, CO-, Nox- ja CO₂-pitoisuuksille sekä palamisen hyötysuhteelle ja savukaasujen lämpötiloille.

Polttokokeet tehtiin HyllicFlame-polttimella (25 kW), joka on asennettuna Jäspi Triplex-kaksoispesäkattilan poltinpuolelle. Savukaasujen hiukkaspitoisuuden analysointilaitteisto oli MRU FSM (gravimetrinen hiukkasmittaus), jossa oli mukana Optima 7-savukaasuanalysointilaitteisto. Savukaasujen analysoinnissa käytettiin TESTO 330-2 LL-analysointilaitteisto. Energiasisällön määrittämisessä käytettiin IKA C1-pommikalorimetriä.

Polttokokeita varten kattila lämmitettiin n. 70 asteen lämpötilaan ennen koeajoja. Kokeissa poltinta käytettiin n. 11 kW teholla, joka oli syöttökuljettimen antama maksimi polttoaineteho keinokuivatulle hakkeella. Korkeammasta kosteuspitoisuudesta johtuen tuore hake ei siirtynyt ruuvikuljettimella riittävän hyvin, joten sen syöttö tehtiin käsin annostelemalla n. 8 kW teholla. Polttokokeita varten hakkeiden näyte-erät ajettiin matalakierros murskaimen läpi, jotta palakoko saatiin riittävän pieneksi koepolttoa varten. Koepolttojärjestelmän syöttökuljettimen sekä stokeriruuvin läpimitta rajoittivat maksimipalakoon n. 20 mm:iin. Murskauksen jälkeen näyte-eristä seulottiin hienoaines pois.

Keinokuivatulla hakkeella tehtiin neljä erillistä savukaasujen mittausjaksoa. Tuoreella hakkeella tehtiin vain kaksi mittausjaksoa, koska testikattilan lämpötila ei pysynyt riittävän korkealla polton aikana. Mittausjaksojen välissä polttimeen syötettiin tarvittaessa hakkeen ja pellettien seosta kattilan lämpötilan nostamiseksi n. 70 asteeseen. Testikattilan lämmitysvaiheessa säädettiin polttimen palamisilman syöttöä analysointilaitteen arvojen perusteella ja pyrittiin hakemaan ko. polttoaineelle parhaat säätöarvot. Testihakkeen vähäinen määrä rajoitti säätö- ja testiaikaa, mikä näkyy tuloksissa mm. huomattavan korkeina ylijäämähapen arvoina. Toisaalta analyysien mittausarvoissa näkyy selkeästi myös hakkeen pienpolton tyyppinen huojunta ja siten tulosten vaihtelu. Testihakkeiden polton hiukkasmitaukset tehtiin välittömästi savukaasuanalyysien jälkeen. Hiukkasmittauksen kesto oli 15 minuuttia.

Hakkeen kosteuden vaikutus hakkeen poltto-ominaisuuksiin kuten savukaasu- ja hiukkaspäästöihin sekä kattilan hyötysuhteeseen tuli esille laboratoriossa tehdyissä polttokokeissa. Savukaasu- ja hiukkasanalyysien perusteella keinokuivaus vähensi typen oksidien määrää ja erityisesti savukaasujen häkäpitoisuutta sekä kokonaishiukkaspäästöjä (Taulukot 3 ja 4). Myös palamisen hyötysuhde oli parempi keinokuivatulla hakkeella (kosteus n. 20 %) verrattuna hakkeeseen, jonka kosteus vastasi luonnonkuivatun hakkeen kosteustasoa (n. 35 %).

Polttokokeet aloitettiin savukaasujen lämpötilan ollessa 70 °C. Savukaasuanalyysien tulokset (Taulukko 3) osoittavat korkeita häkäpitoisuuden arvoja, jotka puolestaan laskevat typen oksidien arvoja. Jos kattila olisi lämmitetty huomattavasti pidempään, niin todennäköisesti häkäpitoisuus olisi laskenut, joka puolestaan olisi kasvattanut typen oksidien määrää. Korkeat häkäarvot osoittavat, että palavat kaasut eivät olleet sekoittuneet riittävän hyvin palamisilman kanssa. Ylimääräinen ilma jäädyttää palamisilmaa.

Taulukko 3. Polttokokeiden (laboratorio) savukaasuanalyyysien tulokset

	ppm CO		ppm COx λ		ppm Nox		ppm No		% η	
	Tuore	Kuiva	Tuore	Kuiva	Tuore	Kuiva	Tuore	Kuiva	Tuore	Kuiva
Jakso 1	1042	382	6934	2155	22	43	21	41	85,3	88,8
Jakso 2	1519	293	5838	1051	47	50	45	48	87,8	91,7
Jakso 3		448		2601		23		21		92,1
Jakso 4		386		1770		37		35		93,4

CO=häkä, COx λ=laimentamaton häkä, Nox=typen oksidit, % η=palamisen hyötysuhde

Taulukko 4. Polttokokeiden hiukkasanalyyysin tulokset.

Hake	P.M. mg/m ³	P.M. mg/m ³ O ₂	CO ppm	CO mg/m ³	O ₂ %
Keinokuivattu	51,8	64,8	359	449	14,6
Tuore	343,8	1719,1	1099	1373	19,4

P.M.=kokonaishiukkaspäästöt, O₂=happi, CO=häkä, ppm=miljoonasosa

5. Keinokuivatun hakkeen ominaisuudet

5.1. Uuteaineet

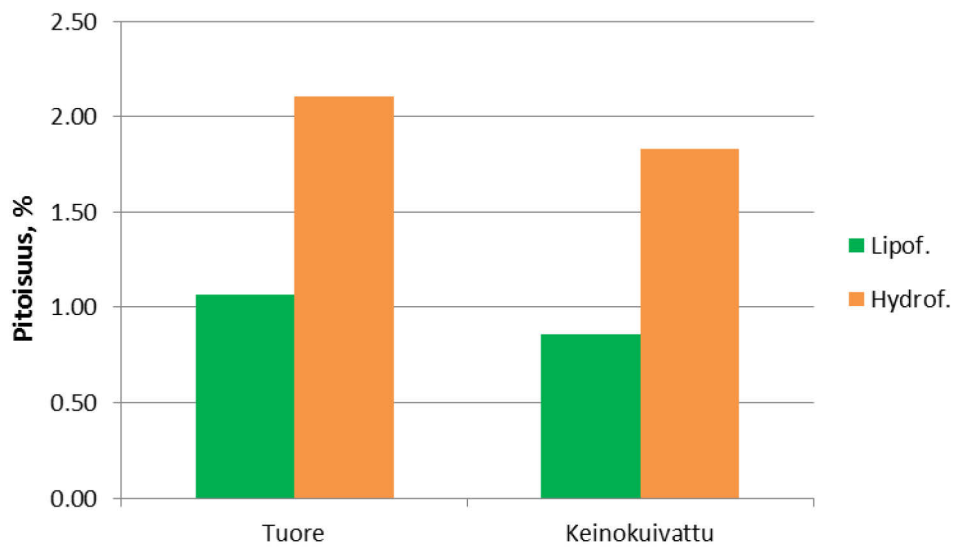
Metsäbiomassa on yksi biomateriaalien, biokemikaalien ja muiden uusien biotuotteiden sekä bioenergian pääraaka-aineista. Puussa on sen rakenteellisten pääkomponenttien (selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini) lisäksi erilaisia pienimolekyylisiä yhdisteitä, uuteaineita, jotka voidaan nimensä mukaisesti erottaa puusta uuttamalla. Uuteaineiden koostumus ja määrä vaihtelevat puulajeittain, yksittäisen puun eri osissa ja myös saman puulajin eri yksilöiden välillä. Myös puun ikä, korjuuajankohta, geneettinen alkuperä ja kasvupaikka vaikuttavat uuteaineiden määrään. Puun ligniini- ja uuteainepitoisuus vaikuttaa puun lämpöarvoon. Rasvojen, hartsien ja ligniinin lämpöarvo ovat selluloosaan verrattuna korkeammat niiden suuren hiilimäärän johdosta (Kärkkäinen 2003, Nurmi 1999).

Puun uuteaineet ovat mielenkiintoinen yhdisteryhmä, koska niihin kuuluu hyvin monenlaisia, ominaisuuksiltaan erilaisia yhdisteitä, joita voidaan käyttää useiden sellaisten tuotteiden valmistamiseen, joita vaihtoehtoisesti voitaisiin valmistaa esimerkiksi fossiilisista raaka-aineista tai ravinnoksi kelpaavista kasviöljyistä. Uuteaineet soveltuvat raaka-aineiksi esimerkiksi erilaisten teollisuuskemikaalien valmistukseen. Uuteaineille löytyy potentiaalisesti myös hyvin arvokkaita sovelluskohteita niiden bioaktiivisten ominaisuuksien ansiosta. Uuteaineperäisiä yhdisteitä voidaan hyödyntää esimerkiksi kosmetiikkateollisuudessa, funktionaalisissa elintarvikkeissa tai lääketeollisuuden raaka-aineena.

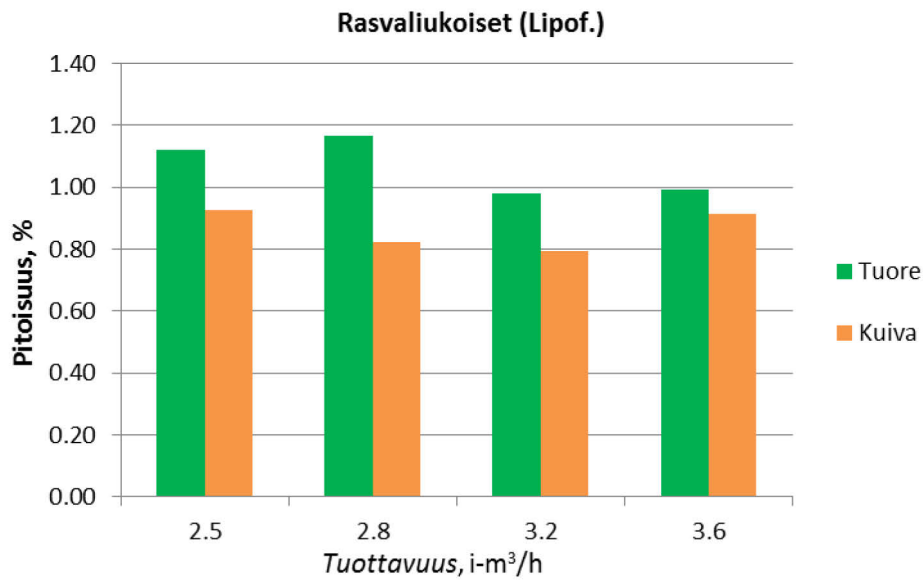
Uuteaineiden hyödyntäminen biojalostuksen raaka-aineina asettaa kuitenkin vaatimuksia toimitusketjulle materiaalin tuoreuden suhteen. Tiedetään, että uuteaineet alkavat hajota ja haihtua heti puun kaadon jälkeen, jolloin niiden pitoisuus pienenee ja myös uuteainefraktion koostumus muuttuu. Tiedetään, että tulevaisuudessa biojalostus asettaa raaka-aineille uusia laatuvaatimuksia, jotka saattavat poiketa suurestikin niistä vaatimuksista mitä metsäteollisuus tällä hetkellä asettaa raaka-aineille. Raaka-aineiden kemiallinen koostumus voi muuttua hyvinkin nopeasti toimitusketjun eri vaiheissa. Tämä puolestaan vaikuttaa jalostusprosessien saantoon ja kannattavuuteen. Kun uuteaineita halutaan hyödyntää biojalostuksen raaka-aineina, on tärkeää ymmärtää, että miten toimitusketju metsästä tehtaalle vaikuttaa uuteaineiden määrään ja uuteainefraktion koostumukseen. Tämä on otettava huomioon suunniteltaessa toimitusketjua.

Tutkimuksessa selvitettiin keinokuivauksen vaikutusta rasvaliukoisten (lipofiiliset) ja vesiliukoisten (hydrofiiliset) uuteaineiden määrään. Alustavien tulosten mukaan hydrofiilisten uuteaineiden määrä oli noin 13 % alhaisempi kuivauksen jälkeen. Lipofiilisten uuteaineiden pitoisuus puolestaan väheni noin 19 % kuivauksen aikana (Kuva 16). Hakkeen läpimenoaika kuivurissa ei näytä vaikuttavan lipofiilisten uuteaineiden määrään, mutta sen sijaan hydrofiilisten uuteaineiden määrä pysyy lähes samalla tasolla tuoreen hakkeen kanssa nopeimmilla läpimenoajoilla (tuottavuus 3.2 ja 3.6 i-m³/h). (Kuvat 17 ja 18).

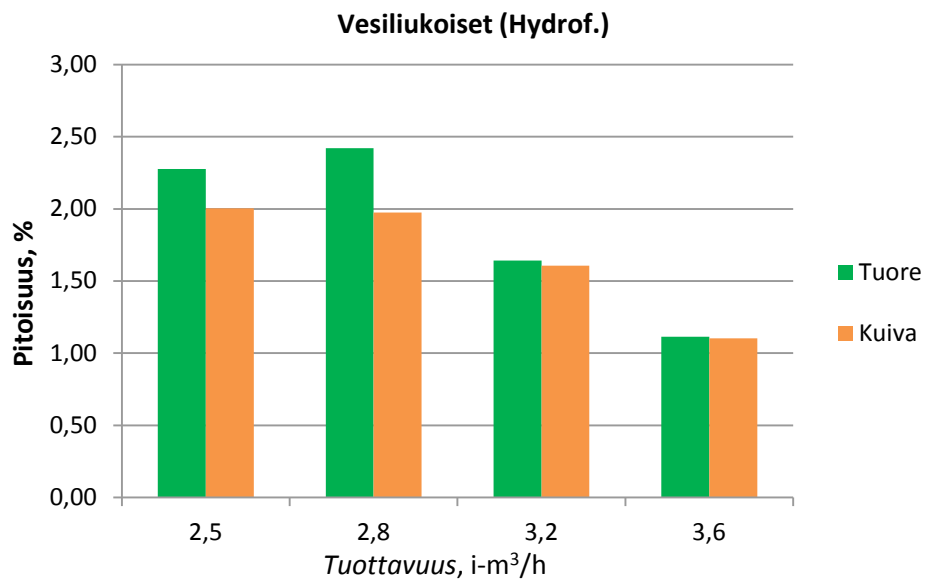
On kuitenkin muistettava että tulokset ovat vain suuntaa antavia, koska näytteiden määrä tässä tutkimuksessa oli pieni, ja hake materiaalina on äärimmäisen heterogeenistä. Näytteenotolla on tarkoitus saada hake-erästä edustava näyte, millä tarkoitetaan, että näytteen tulisi olla halutuilta ominaisuuksiltaan samanlainen verrattuna erään josta näyte otetaan. Edustavalla näytteenotolla pyritään pienentämään sekä systemaattista, että satunnaista virhettä. Koska tutkittava hake valmistettiin tuoreesta energiarangasta, joka oli kaadettu toukokuun puolella välissä eli noin reilu kuukausi ennen koekuivausten aloittamista ja raaka-aineena oli sekä mäntyä että koivua, mahdollisuus näytteiden heterogeenisuuteen kasvoi entisestään. Uuteaineiden määrä puun eri osissa vaihtelee voimakkaasti ja näytteiden saaminen täysin toisiaan vastaaviksi on äärimmäisen vaikeaa. Kuivauksen vaikutusta uuteaineiden määrään on tutkittava tarkemmin, suuremmalla näytemäärällä ja vain yhdestä puulajista tehdyllä hakkeella.



Kuva 16. Rasvaliukoisten ja vesiliukoisten uuteaineiden määrä tuoreessa ja keinokuivatussa hakkeessa.



Kuva 17. Rasvaliukoisten uuteaineiden määrä tuoreessa ja keinokuivatussa hakkeessa erilaisilla kuivurin tuottavuuksilla.



Kuva 18. Vesiliukoisten uuteaineiden määrä tuoreessa ja keinokuivatussa hakkeessa erilaisilla kuivurin tuottavuuksilla.

6. Keinokuivauksen kannattavuus lämpöyrittäjä kokoluokassa

Jotta nopeaa, keinokuivatukseen perustuvaa metsähakkeen toimitusketjua voidaan ylipäänsä vertailla perinteisen, hitaan toimitusketjun kanssa on molemmista toimitusketjuista laadittava yksityiskohtainen kokonaiskustannusmalli (Ahtikoski ym. 2019). Tässä raportissa kokonaiskustannusmalli perustui yhden lämpöyrittäjän hallinnoimaan toimitusketjukokonaisuuteen, jossa vuotuinen lämpölaitoksille toimitettava hakemäärä oli 17 000 irtokuutiometriä. Lähtökohtaisesti molemmissa toimitusketjuissa eri työvaiheet kuvattiin yksityiskohtaisesti kahdessa osassa. Ensin selvitettiin yleiset kustannukset (Taulukko 5a), minkä jälkeen tarvittiin vielä tietoa tutkimukseen osallistuneen lämpöyrittäjän toimintaympäristöstä sekä konttikuivuriin liittyvistä teknistä yksityiskohdista (Taulukko 5b).

Taulukko 5. Kokonaiskustannusmallin muuttujat ja niiden arvot perinteisessä (hidas) ja nopeassa toimitusketjussa (nopea). Kaikki kustannukset ilmoitettu kiintokuutiometriä kohden, € m⁻³.

Muuttuja	Hidas	Nopea
Hallintokustannukset	3,2 ^{a)}	sama ^{b)}
Hakkuu (ranka),	15,6	sama
Metsäkuljetus (ranka)	6,8	sama
Kaukokuljetus ^{c)}	3,7 ^{d)}	3,78 / 3,94 / 4,85 ^{d)}
Haketus, terminaali	5,5	sama
Lastaus, pyöräkuormaaja	1,9	sama
Hakkeen toimitus terminaaliin ^{e)}	1,6	sama
Kantohinta, energiaranka	5,5	sama
Varastointiaika (ranka), kuukausia	9 kk ^{f)}	1 kk ^{g)}
Pääomakustannus, rankapino	1,2 ^{h)}	0.1 ^{h)}
Varastointiaika (hake), kuukausia	0 month ^{h)}	2 months ⁱ⁾
Pääomakustannus, hakkeen varastointi	0	0,26 ^{j)}

^{a)} kaikki kustannukset perustuvat Laitila ym.2017 artikkeliin, ^{b)} hallintokustannukset ovat samat nopeassa toimitusketjussa (3,2 € solid-m⁻³), ^{c)} kaukokuljetus toteutetaan 76 tonnin rekalla, ^{d)} kaukokuljetuskustannukset riippuvat kuljetettavan puun kosteudesta: perinteisessä, hitaassa toimitusketjussa 40 % kosteusprosentti oletettu, sen sijaan nopeassa toimitusketjussa kolmea eri kosteusprosenttia käytetty: 45 % (3,78), 50 % (3,94) and 60 % (4,85), ^{e)} hakkeen toimitus toteutettu 76 tonnin hakerekalla, ^{f)} yhdeksän kuukauden varastoinnin aikana rankapuupinoista oletetaan 6,75 % kuiva-ainetappiot (e.g. Routa et al. 2018), mikä laskennallisesti vastaa kustannusta 0,36 € m⁻³, ^{g)} nopeassa toimitusketjussa ranka on korkeintaan yhden kuukauden ulkoilmassa (useimmissa tapauksissa ei tätäkään), eikä kuiva-ainetappiota synny lainkaan, ^{h)} pääomakustannus on tietenkin riippuvainen varastointiajasta (Ks. Laitila et al. 2017, s.7, Kaava 2) ⁱ⁾ hitaassa toimitusketjussa metsähake poltetaan lämmöksi keskimäärin 1-2 viikon kuluessa, jolloin varastointiaikaa ei käytännössä ole, sen sijaan nopeassa toimitusketjussa keinokuivattu hake saatetaan varastoida (ei kuitenkaan välttämättä) keskimäärin pariksi kuukaudeksi, ^{j)} pääomakustannus luonnollisesti riippuu varastointiajasta, tässä laskettu kahden kuukauden varastointiajan mukaan.

Taulukko 6. Konttikuiivurin tekniset yksityiskohdat (mm. kosteusprosentin muutos kuivatuksessa) ja lämpöyrittäjän toimintaympäristöön liittyvät muuttujat.

Kosteusprosentti ennen ^{a)}	Kosteusprosentti jälkeen ^{b)}	Skenaario ^{c)}
60% ^{d)}	40%	Δ20A
50%	30%	Δ20B
45%	25%	Δ20C
60%	35%	Δ25A
50%	25%	Δ25B
45%	20%	Δ25C
<i>Hinnat ja kustannukset</i>		<i>Yksikköarvo</i>
Energian hinta (metsähake)		21,15 € MWh ⁻¹
Konttikuiivurin vuokra ^{e)}		150 € vrk ⁻¹
Perussähkö, konttikuiivuri ^{f)}		20 kW ^{g)}
Työvoimakustannus ^{h)}		20 € vrk ⁻¹
Asennuskustannus ⁱ⁾		2 967 € vuosi ⁻¹

^{a)}hakkeen kosteusprosentti ennen keinokuivaamista, ^{b)} kosteusprosentti keinokuivauksen jälkeen, ^{c)} lyhenteet tarkoittavat kosteusprosentin muutosta (Δ) yhdistettynä lähtökosteuteen (A,B ja C), ^{d)} Kutakin kosteusprosenttia vastaava lämpöarvo otettu Laitila ym. 2017 artikkelista, ^{e)} vuokrakustannukset pohjautuvat konttikuiivurin viiden vuoden vuokra-aikaan, 7 %:n pääoman korkoon ja konttikuiivurin vuosittaiseen käyttöaikaan (vrk/vuosi), ^{f)} Perussähkö sisältää sähköenergian, joka tarvitaan konttikuiivurin mekaniikan (syöttölavat) toimintaan (*Huom.* perussähkö ei tietenkään sisällä keinokuivaukseen tarvittavaa energiaa, joka tässä raportissa määritetään erillisesti ^{g)} Perussähkömäärä, joka tarvitaan konttikuiivuriin, yksikkökustannus 4,1 cmt kWh⁻¹ käyttötunnilta, ^{h)} työvoimakustannus, joka perustuu oletukseen että keskimäärin yksi tunti vuorokaudessa tarvitaan konttikuiivurin ylläpitoon työaika: käytännössä tarkoittaa että yksi työntekijä on toimintavalmiina konttikuiivurin mahdollisten virhetilanteiden varalta, ⁱ⁾ Konttikuiivurin asennuskustannukset, jotka sisältävät mm. putkituksen (kaukolämpöverkosta lämmönvaihtimeen liitettävät putket), vuotuiset asennuskustannukset pohjautuvat konttikuiivurin viiden vuoden vuokra-aikaan

Kun kokonaiskustannusmalliin liittyvien työvaiheiden kustannus- ja hintatiedot olivat selvillä, voitiin muodostaa tekninen laskentakehikko. Laskentakehikossa lämpöyrittäjä vastasi kaikista toimitusketjun kustannuksista ja vastaavasti hän sai itselleen kaiken tulon, jota metsähakkeen myynnistä muodostui. Laskentakehikossa metsähakkeen toimitusketjuja (hidas vs. nopea) verrattiin keskenään niin, että nopeassa toimitusketjussa keinokuivaukseen tarvittavalle energialle määritettiin maksimihinta (€ kWh⁻¹), jolloin nopea ketju oli vielä yhtä kannattava kuin perinteinen, hidas toimitusketju. Teknisesti, ensin kuvattiin perinteisen, hitaan toimitusketjun kannattavuus:

$$NB_i^H = Q_i * E_i^H * \bar{\omega} - \left[\sum_{k=1}^K (dml_k + cap_k) + \sum_{n=1}^N tc_n + fh_l + cc_l \right] \quad [1]$$

, missä NB_i^H= hitaan toimitusketjun nettotulos metsähakkeen kokonaismäärälle Q_i (17 000 irtokuutiometriä), €, Q_i= metsähakkeen kokonaismäärä, jonka lämpöyrittäjä toimittaa ja myy kalenterivuoden aikana esim. lämpölaitoksille, i-m³, E_i^H= hitaan toimitusketjun metsähakkeen keskimääräinen energiatiheys, MWh m⁻³, $\bar{\omega}$ = kiinteä metsähakkeesta maksettava hinta, € MWh⁻¹, dml= kuiva-ainehävikki kuukaudessa, €, cap= puurakaa-aineen varastoinnista aiheutuva pääomakustannus, €,

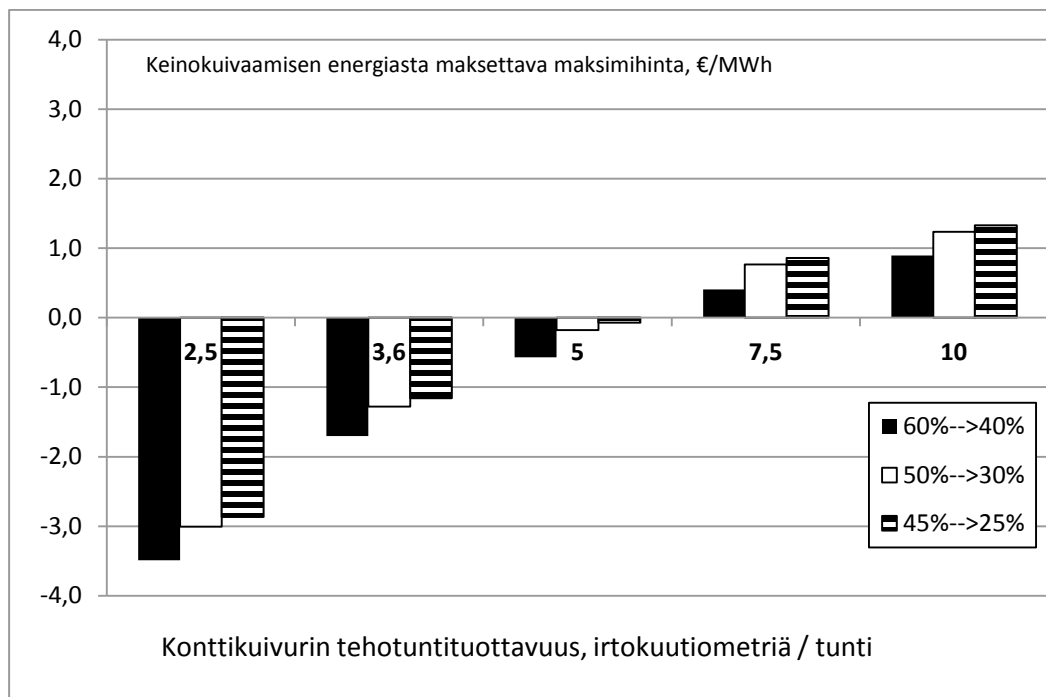
tc_n = toimitusketjuun työvaiheeseen n liittyvä kuljetuskustannus, €, fh_l = metsäkuljetuskustannus, joka liittyy puumäärään l , joka puolestaan vastaa metsähakkeen kokonaismäärää Q_i , €, cc_l = hakkuukustannukset (ranka), jotka liittyvät puumäärään l , joka vastaa metsähakkeen kokonaismäärää Q_i , €. Koska laskentakehikko perustuu yhden kalenterivuoden tuotantomäärään, ei lukuarvoja ole erikseen diskontattu (Ks. Price 2018). Vastaavasti, nopean toimitusketjun kannattavuus määritettiin kaavalla:

$$NB_i^{FAST} = Q_i * E_i^{FAST} * \bar{\omega} - \left[\sum_{k=1}^K (dml_k + cap_k) + \sum_{n=1}^N tc_n + \sum_{s=1}^S dc_s + fh_l + cc_l \right] \quad [2]$$

, missä NB_i^{FAST} = nopean toimitusketjun nettotulos metsähakkeen kokonaismäärälle Q_i (17 000 irtokuutiometriä), €, E_i^{FAST} = nopean toimitusketjun metsähakkeen keskimääräinen energiatiheys, MWh m^{-3} , (Huom. $E_i^{FAST} > E_i^H$), $\bar{\omega}$ = kiinteä metsähakkeesta maksettava hinta, € MWh^{-1} , dml = kuiva-ainehävikki kuukaudessa, €, cap = puurakaa-aineen varastoinnista aiheutuva pääomakustannus, €, tc_n = toimitusketjuun työvaiheeseen n liittyvä kuljetuskustannus, €, dc_s = keinokuivaamiseen (konttikuivuri) liittyvä kustannus s (Huom. myös konttikuivurin vuokra sisältyy tähän, sillä vuokran kokonaismäärä riippuu konttikuivurin toimintatunneista *per annum*), €, fh_l = metsäkuljetuskustannus, joka liittyy puumäärään l , joka puolestaan vastaa metsähakkeen kokonaismäärää Q_i , €, cc_l = hakkuukustannukset (ranka), jotka liittyvät puumäärään l , joka vastaa metsähakkeen kokonaismäärää Q_i , €.

Laskentateknisesti yhtälöt [1] ja [2] määritettiin yhtäsuuriksi siten, että ensin poistettiin nopean toimitusketjun yhtälöstä termi dc_s . Tämän jälkeen määritettiin yhtälöt [1] ja [2] yhtäsuuriksi jotta termille dc_s voitiin määrittää maksimiarvo. Seuraavaksi termin dc_s kaikki muut kustannuskomponentit paitsi keinokuivaukseen tarvittava energian kokonaiskustannus vähennettiin termin dc_s arvosta. Lopuksi, numeerisella iteroinnilla (teknisesti Excelin Ratkaisimella) ratkaistiin keinokuivaukseen tarvittavan energian kokonaiskustannuksen suurin arvo, jolla nopea toimitusketju vielä olisi yhtä kannattava kuin perinteinen, hidas toimitusketju. Koska metsähakkeen kokonaismäärä, 17 000 irtokuutiometriä *per annum* jakaantui seitsemälle lämpölaitokselle toimitettavien hakemäärien summana, määritettiin myös keinokuivaukseen tarvittavan energian kokonaiskustannuksen suurin arvo yllä kuvatun numeerisen iteroinnin avulla näille seitsemälle toimituspaikalle. Talouslaskelmat toteutettiin konttikuivurin koekuivausten (kesäkuu 2018) tuloksiin perustuen siten, että konttikuivurin tehotuntuottavuus vaihteli välillä 2,5 – 3,6 irtokuutiometriä/tunti (toteutuneet), minkä lisäksi laskelmiin sisällytettiin 5,0, 7,5 ja 10,0 irtokuutiometriä/tunti vaihtoehdot ikään kuin olettaen teknologinen edistyminen konttikuivuritekniikassa lähivuosina. Tämän lisäksi talouslaskelmissa sovellettiin keinokuivauksessa ainoastaan 20 %-yksikön kosteusprosenttimuutoksia (ennen → jälkeen): 60 % → 40 %, 50 % → 30 % ja 45 % → 25 %, joista jälkimmäinen oli varsin lähellä toteutuneita, mitattuja kosteusprosentteja. Perinteisen, hitaan toimitusketjun kohdalla hakkeen toimituskosteus käyttöpaikalla oli 40 %. Lopuksi, talouslaskelmat määritettiin olettaen, että konttikuivuria käytetään 16-tuntia päivässä, viitenä päivänä viikossa.

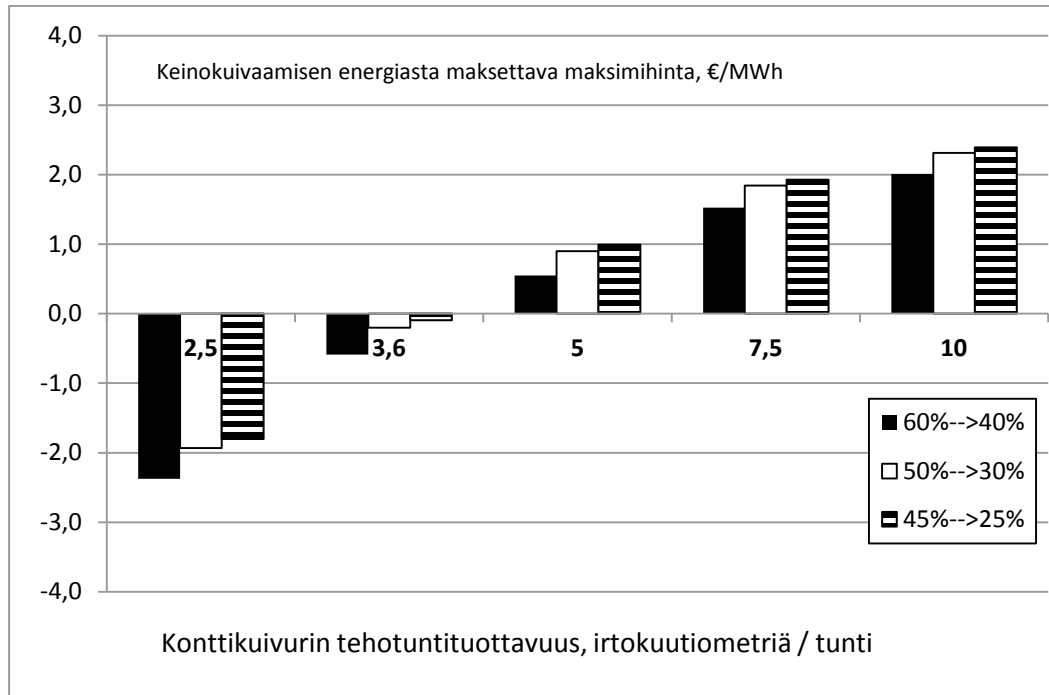
Tuloksista nähdään, että toteutuneiden tehotuntuottavuuksien mukaan (2,5 ja 3,6) nopea toimitusketju (jossa siis keinokuivataan tuoretta haketta) ei ole kannattava: negatiiviset pylväät kuvaavat tilannetta, jolloin keinokuivaukseen käytettävästä energiasta ei lainkaan pystytä maksamaan (Kuva 5a). Sen sijaan jos konttikuivurin tehotuntuottavuus lähivuosina saataisiin nousemaan esimerkiksi 7,5 irtokuutiometriä / tunti, voitaisiin keinokuivaukseen käytettävästä energiasta maksaa noin 0,5–0,9 €/MWh, riippuen hakkeen kosteudesta ennen ja jälkeen keinokuivauksen (Kuva 5a).



Kuva 19. Keinokuivaamisen energiasta maksettava maksimihinta, jotta nopea toimitusketju yhtä kannattava kuin perinteinen, hidas metsähakkeen toimitusketju, €/MWh.

Koska energian hinta on ratkaisevassa asemassa määritettäessä metsähakkeen tuotantopotentiaaleja (esim. Ranta ym. 2017), tehtiin tässä raportissa herkkyyksianalyysi, jossa lämpölaitos maksaisikin yhden euron enemmän (+ 1 €/MWh) keinokuivatusta metsähakkeesta, verrattuna perinteisen toimitusketjun mukaan toimitettuun metsähakkeen yksikköhintaan. Lähtökohtaisestihan tiedetään, että keinokuivatusta hake on ainakin tasalaatuisempaa kuin perinteisen, hitaan toimitusketjun ulkoilmassa kuivatusta metsähake, mikä puolestaan voisi lisätä lämpölaitosten maksuhalukkuutta (Raitila ja Heiskanen 2015).

Vertaamalla Kuvia 16 ja 17 huomataan, että metsähakkeesta maksettavalla yhden euron lisähinnalla on suuri merkitys keinokuivaamisen energiasta maksettavaan maksimihintaan, ja näin ollen nopean toimitusketjun kannattavuuteen.



Kuva 20. Keinokuivaamisen energiasta maksettava maksimihinta, kun keinokuivatusta metsähakkeesta maksetaan yhden euron lisähinta, €/MWh. Muuttujat samat kuin Kuvassa 16.

Alustavien taloustulosten ja kenttäkokeesta saatujen havaintojen perusteella voidaan sanoa, että metsähakkeen nopea toimitusketju on liiketaloudellisesti perusteltu vaihtoehto lämpöyrittäjälle, jos keinokuivaamiseen käytettävä energia saadaan reilusti alle markkinahinnan, esim. kaukolämpöverkon hukkalämpönä. Lisäksi, konttikuivurin tekniselle kehittämiselle, ts. tehotuntuottavuuden parantamiselle on selkeät taloudelliset perusteet.

7. Johtopäätökset

Toistaiseksi kattavin tutkimus (Ghaffariyan ym. 2017) painottaa puuenergian toimitusketjun energia- tehokkuuden parantamista eritoten niin, että poltettavan raaka-aineen kosteutta voitaisiin laskea toimitusketjun aikana. Suomen olosuhteissa, hajautetussa bioenergian tuotannossa puuraaka-aineen kosteutta voidaan käytännössä laskea kahdella tavalla: joko keräämällä kaadetut puut pinoihin kuivumaan ulkoilmassa usean kuukauden ajaksi (Laitila ym. 2017) tai keinokuivaamalla haketta (Wolfsmayr and Rauch, 2014, Laitila ym. 2017). Ulkoilmassa tapahtuvaan, täysin sääolosuhteista riippuvaan kuivaukseen sisältyy kuitenkin merkittäviä ongelmia, joista vakavimpina pidetään kuiva-ainehävikkiä sekä uuteaineiden haihtumista (Routa ym. 2017), hyönteisriskiä (Kanzian ym. 2017 ja pääoman sitoutumista varastoon, ts. kuivauspinoihin. Sen sijaan hakkeen keinokuivaus mahdollistaa sekä toimitusketjun nopeuttamisen että hakkeen laadun, energiasisällön parantamisen kuivaamalla hake haluttuun kosteuteen (Laitila ym. 2017).

Metsähakkeen keinokuivaus ei ole kuitenkaan vielä yleistynyt. Tähän on monia syitä, jotka voidaan lähtökohtaisesti jakaa kahteen kategoriaan: asenteet (ml. tiedon puute) ja teknis-taloudelliset rajoitteet. Tässä raportissa pureuduttiin lähinnä teknis-taloudellisten rajoitteiden tarkasteluun, mutta toisaalta raportti lisää tietämystä keinokuivauksen mahdollisuuksista. Aiempien tutkimusten mukaan suurimmaksi esteeksi hakkeen keinokuivaukselle on koettu kuivurin kallis alkuinvestointi sekä teknisten ratkaisujen saatavuus. Myös kesän sääolosuhteiden merkitystä on korostettu: hyvänä kesänä puupolttoaine kuivuu riittävän hyvin ilman kuivuriakin.

Tämän raportin tulokset osoittavat, että keinokuivaus kasvattaa energiapotentiaalia, merkittävästikin jos kohdealue on riittävän iso (esimerkkinä Rovaniemen alue, kokonaisenergisäily 317 232–359 874 MWh vuodessa). Toisaalta, yksittäisen lämpöyrittäjän näkökulmasta tarkasteltuna, keinokuivaukseen käytettävä energia pitäisi saada reilusti alle markkinahinnan, jotta rankahakkeen keinokuivaus oli liiketaloudellisesti perusteltua toimintaa. Suurimmaksi yksittäiseksi pullonkaulaksi liiketaloudellisen kannattavuuden näkökulmasta muodostui konttikuvurin suhteellisen alhainen tehotuntuottavuus: 2,5–3,6 irtokuutiometriä tunnissa. Tehotuntuottavuuden lisäys esimerkiksi 30 %:lla (mikä teknisesti mahdollista) parantaisi merkittävästi kannattavuutta. Näin ollen, konttikuvurin tekniset ratkaisut edellyttävät vielä tuotekehitystä lähitulevaisuudessa. Rankahakkeen keinokuivatuksen kannattavuutta alensi myös korkeat kontin siirtokustannukset – tämä saattoi kylläkin johtua myös senhetkisestä markkinatilanteesta, joka mahdollisti monopolistisen hinnoittelun nostoen konttikuvurin kuljetuskustannuksia merkittävästi välillä Oulu-Muurola.

Keinokuivauksen kannattavuus riippui ratkaisevasti kuivatun metsähakkeen hinnasta – jo yhden euron lisähinta, +1 €/MWh (verrattuna ulkoilmassa kuivattuun metsähakkeeseen) paransi merkittävästi keinokuivaukseen perustuvan toimitusketjun taloutta. Aikaisempi tutkimus (Raitila ja Heiskanen 2015) tukee ajatusta maksaa enemmän keinokuivatusta metsähakkeesta, joka on laadultaan tasaisempaa kuin ulkoilmassa kuivattuun rankaan perustuvan, perinteisen toimitusketjun metsähake. Tämä raportti yhdessä aikaisemman tutkimuksen (Raitila ja Heiskanen 2015) kanssa onkin oiva keino mainostaa keinokuivatun metsähakkeen eduista kuten tasalaatuisuudesta ja toimitusvarmuudesta.

Tehtyjen kuivauskokeiden perusteella arvioitiin konttikuvurin (SFTec Oy) soveltuvuutta metsähakkeen kuivaukseen. Kuivaustehon ohella kuivurin tuntituottavuus on olennainen tärkeä tekijä arvioitaessa kuivurin soveltuvuutta käytännön tarpeisiin. Koekuivauksissa varioitiin lähinnä kuivauslämpötilaa (30–50 astetta) ja hakkeen läpimenoaika kuivurissa (1:30–2:45 h). Kuivurin kuivausteho todettiin hyväksi jo varsin alhaisilla kuivauslämpötiloilla ja hake kuivui jopa liikaa eli alle puun syiden kyllästymispisteen (kosteus < 23 %). Tällöin kuivattiin vapaan veden lisäksi sidottua vettä, jonka poistamiseen kuluu selvästi enemmän energiaa. Esimerkiksi kaatotuoreesta puusta valmistettu hake (kosteus > 50 %) kuivui 40–50 asteen lämpötilassa ja 2:45 tunnin kuivausajalla alle 20 %:n kosteuteen. Pitkällä

kuivausajalla kuivurin tuntituottavuus jäi kuitenkin alhaiseksi ($1 \text{ i-m}^3/\text{h}$). Lyhyemmillä kuivausajoilla (1:33–1:49 h) kuivurin tuntituottavuutta voitiin nostaa $2,5\text{--}3,6 \text{ i-m}^3$:n välille. Käytännön tarpeita varten kuivurin tuottavuus voisi olla korkeampi, jolloin voitaisiin paremmin hyödyntää kuivurin kuivaus-tehoa käytännön kuivauksissa. Kesäkuun 2018 kokeissa kuivattavan hakkeen tuorekosteus, johtuen lämpimästä keväästä, oli matala (noin 35 %), mikä osaltaan aiheutti epävarmuutta tulosten tulkin-taan. Tuorehaketetun hakkeen kosteusprosentti on puulajista ja vuodenaajasta riippuen noin 50–55 %, mikä olisi kosteudeltaan ihanteellinen kuivausprosessiin.

SFTec Oy:n kuivausteknologiana avulla kuivan hakkeen toimitusta loppukäyttäjälle voidaan lyhentää tehokkaasti eli nopeuttaa hakkeen toimitusketjua kannolta polttoon. Kokeissa kuivurin kuivausteho todettiin hyväksi ja hake kuivui jopa liikaa. Liian kuiva hake lisää suoraan polttolaitokseen syöttäessä takatulen vaara. Takatuli on ei-toivottu ominaisuus, jossa hake lähtee palamaan syöttöruuvissa ja etenee hakesiiloon asti polttaen yleensä hakesiilon tai jopa koko laitoksen. Lämpölaitoksen reservi-lämmön hyödyntäminen kuivauslämmön tuottamisessa todettiin myös hyväksi ratkaisuksi. Kuivaus-kokeissa lämmönvaihdin oli kiinni lämpölaitoksen paluulinjassa. Tällä kytkennällä saatiin lämmityksen tehon tarve pienentettyä vain murto-osaan alkuperäisestä. Samalla lämpölaitoksen säädettävyys pa-rani koska paluuvesi tuli kylmempänä takaisin kuin normaalisti kesäisin.

Keinokuivauksen tavoite on parantaa hakkeen laatua eli kuivata hake haluttuun loppukosteuteen ja vähentää myös kosteuden vaihtelua. Koekuivauksissa (kesä 2018) saatujen tulosten perusteella kui-vuri tuotti kosteudeltaan tasalaatuista materiaalia eli kuivatun hakkeen kosteuden vaihtelu oli varsin vähäistä: kuivimman ja kosteimman näytteiden välinen ero oli keskimäärin 3 prosenttiyksikköä per kuivauspäivä. Koekuivauksissa tuoreen hakkeen kosteuden vaihtelu oli todennäköisesti vähäistä, sillä kuivattavat hake-erät koostettiin yhdestä hakerekan kuormasta. Käytännössä hakkeen kosteus voi voihdella kuormasta toiseen paljonkin, mikä asettaa omat haasteet kuivauksen laadun hallinnalle. Mikäli hake pystytään toimittamaan kaatotuoreena kuivaukseen, kosteuden arviointi on huomatta-vasti helpompaa erityisesti männyllä ja kuusella, joiden kosteus (noin 55 %) on suhteellisen stabiili vuodenaajasta riippumatta. Sen sijaan koivulla kosteuden vuodenaikainen vaihtelu on selvästi suu-rempaa.

Hakkeen kosteuden vaikutus hakkeen poltto-ominaisuuksiin kuten savukaasu- ja hiukkaspäästöihin sekä kattilan hyötysuhteeseen tuli selvästi esille laboratoriossa tehdyissä polttokokeissa. Savukaasu- ja hiukkasanalyysienanalyysien perusteella keinokuivaus vähensi typen oksidien määrää ja erityisesti savukaasujen häikäpitoisuutta sekä kokonaishiukkaspäästöjä. Myös palamisen hyötysuhde oli parempi keinokuivatulla hakkeella (kosteus n. 20 %) verrattuna hakkeeseen, jonka kosteus vastasi luonnon-kuivatun hakkeen kosteustasoa (n. 35 %). Sen sijaan lämpölaitoksella (0.3 kW) tehtyjen koepolttojen perusteella keinokuivatun hake-erän energian tuotto ei juurikaan poikennut tai oli jopa hieman alhai-semppi verrattuna lämpölaitokselle tuotuihin normaalin käytännön mukaisiin eli luonnonkuivattuihin (ilmakuivattu) hake-eriin. Yhtenä syynä tähän ole se, että kesä 2018 oli poikkeuksellisen lämmin, jolloin energiapuu kuivui välivarastolla tavanomaista kuivemmaksi. Hake-erien vertailtavuutta heikensivät myös mahdolliset erot hakelajeista.

Kuivan hakkeen säilyvyys on todettu hyväksi eli hakkeen kosteus pysyy lähes enallaan, jos hake on varastoitu katoksen alla. Tässä selvityksessä koepolttoihin menevän hake-erän (15 i-m^3) kosteus oli nousut neljän kuukauden varastoinnin jälkeen 2–3 prosenttiyksikköä verrattuna koekuivausten jäl-keen mitattuihin arvioihin. Syynä eron voi olla hakkeen lievä kostuminen syksyn varastoinnin aikana tai kosteusnäytteiden otantaerot poltto- ja kuivauskokeiden välillä.

Kaiken kaikkiaan hankkeen tulokset osoittavat, että hakkeen keinokuivaus on teknistaloudellisestikin mahdollista toteuttaa seuraavin reunaehdoin. Kuivaimen teknisten muutosten kautta, jotta kuivai-men kapasiteetti saadaan paremmin vastaamaan tarvetta sekä volyymiä, jolla keinokuivauksen ta-

loudellinen kannattavuus saavutetaan. Kuivaukseen käytettävän energianhinta, johon voidaan vaikuttaa hyödyntämällä hukkalämpöä ja edelleen optimoimalla kuivaimen tehokkuutta. Merkittävä vaikuttava tekijä on myös kuivatun lopputuotteen arvo, ja ollaanko tasalaatuisesta raaka-aineesta valmiita maksamaan korotettu markkinahinta. Edellä kuvatut reunaehdot ovat käytännössä toteutettavissa.

Kuivatun hakkeen eduksi on lisäksi laskettava vaikutukset polttolaitoksen tuottavuuteen, tuotannon stabiloitumiseen sekä merkittävä vaikutus lämpölaitoksen hiukkaspäästöihin. Seuraava askel kohti toimintatavan käyttöönotto ja todentamista on pidempikestoisten koekampanjoiden toteuttaminen prosessin eri osien toiminnan optimoimiseksi ja vertailutulosten saamiseksi.

Viitteet

- Ahtikoski, A., Routa, J., Repola, J. and Laitila, J. 2019. The financial viability of artificial drying of forest chips, a case study from Northern Finland. *Journal of Cleaner Production* 212 (2019): 1454-1461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.110>
- Commission of the European Communities. 2008. Impact assessment. Document accompanying the Package of implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020. Commission staff working document SEC(2008)85/3. 26 p.
- European Commission 2014. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. Brussels 22.1.2014. COM(2014) 15 final. 18 p. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52014DC0015&qid=1490627236259>
- Falck, P., Precha-Atsawan, S., Grey, C., Immerzeel, Stålbrand, H., Adlercreutz, P. and Nordberg Karlsson, E., 2013. Xylooligosaccharides from hardwood and cereal xylans produced by a thermostable xylanase as carbon sources for *Lactobacillus brevis* and *Bifidobacterium adolescentis*. *J. Agr. Food Chem.* 61, 7333-7340. [dx.doi.org/10.1021/jf401249g](https://doi.org/10.1021/jf401249g).
- Ghaffariyan, M.R., Brown, M., Acuna, M., Sessions, J., Gallagher, T., Kühmaier, T., Spinelli, R., Visser, R., Devlin, G., Eliasson, L., Laitila, J., Laina, L., Iwarsson Wide, M., Egnell, G., 2017. An international review of the most productive and cost effective forest biomass recovery technologies and supply chains. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 74, 145-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.014>
- Girones, V.C., Moret, S., Peduzzi, E. and Nasato, M., 2017. Optimal use of biomass in large-scale energy systems: Insights for energy policy. *Energy* 137: 789-797. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.027>
- Hengeveld, E.J., Bekkering, J., van Gemert, W.T.J. and Broekhuis, A.A., 2016. Biogas infrastructures from farm to regional scale, prospects of biogas transport grids. *Biomass Bioenerg.* 86, 43-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.005>
- Huovinen, A. 2012. Metsäpolttoaineiden ja pilkkeen kuivauksen kiinnostus ja mahdollisuudet Keski-Suomessa. Opinnäytetyö, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Luonnonvara- ja ympäristöala. 81 s.
- Kanzian, C., Kuhmaier, M., Erber, G., 2016. Effects of moisture content on supply cost and CO₂ emissions for an optimized energy wood supply network. *Croat. J. For. Eng.* 37, 51-60.
- Karhunen, A., Laihanen, M. and Ranta, T., 2015. Supply security for domestic fuels at Finnish combined heat and power plants. *Biomass Bioenerg.* 77, 45-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.019>
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Karisto Oy.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2013. The Cutting Productivity of the Excavator-based Harvester in Integrated Harvesting of Pulpwood and Energy Wood. *Baltic Forestry* 19(2): 289-300.
- Laitila J. & Routa, J. 2015. Performance of a small and a medium sized professional chippers and the impact of storage time on Scots pine (*Pinus sylvestris*) stem wood chips characteristics. *Silva Fennica* vol. 49 no. 5 article id 1382. 19 p.

- Laitila, J., Ranta, T., Asikainen, A., Jäppinen, E. & Korpinen, O-J. 2015. The cost competitiveness of conifer stumps in the procurement of forest chips for fuel in Southern and Northern Finland. *Silva Fennica* vol. 49 no. 2 article id 1280.23 p.
- Laitila, J., Asikainen, A. & Ranta, T. 2016. Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland. *Biomass and Bioenergy* 90(2016): 252-261.
- Laitila J., Ahtikoski A., Repola J. & Routa J. 2017. Pre-feasibility study of supply systems based on artificial drying of delimbed stem forest chips. *Silva Fennica* vol. 51 no. 4 article id 5659. 18 p. <https://doi.org/10.14214/sf.5659>
- Lodenius, M., Heino, E. and Viljakainen, S., 2009. Introducing a new model for material savings in the Finnish Paper industry. *Resour. Conserv. Recy.*53, 255-261. doi:10.1016/j.resconrec.2008.12.006
- Mao, G., Huang, N., Chen, L. and Wang, H., 2018. Research on biomass energy and environment from past to the future: a bibliometric analysis. *Sci. Total Environ.* 635: 1081-1090. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.173>
- Mardoyan, A. and Braun, P., 2015. Analysis of Czech subsidies for solid biofuels. *Internat. J Green Energy* 12: 405–408. DOI: 10.1080/15435075.2013.841163
- Natarajan, K., Leduc, S., Pelkonen, P., Tomppo, E. and Dotzauer, E., 2012. Optimal locations for methanol and CHP production in Eastern Finland. *Bioenergy Res.*5, 412–423.
- Nurmi, J. 1999. Hakuutähteen ominaisuuksista. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 722. Kannus: Metsäntutkimuslaitos.
- Price, C., 2018. Declining discount rate and the social cost of carbon: forestry consequences. *J. Forest Econ.* In press. doi.org/10.1016/j.jfe.2017.05.003
- Raitila, J., Heiskanen, V-P. 2014. Profitability of supplying wood chips dried at small or medium scale heatings plants. *International Journal of Engineering Research And Management (IJERM)* ISSN : 2349- 2058, Volume-01, Issue-09, December 2014.
- Raitila, J., Heiskanen, V-P., 2015. Profitability to drying wood chips integrated into fuelwood supply. *Proceedings of the 48th FORMEC Symposium, Oct 4-8 2015, Linz, Austria.*
- Ranta, T., Karhunen, A., Laihanen, M., 2017. Factors behind the development of forest chips use and pricing in Finland. *Biomass Bioenerg.*98, 243-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.02.004>
- Rauch, P., 2010. Stochastic simulation of forest fuel sourcing models under risk. *Scand. J. Forest Res.* 25(6), 574–584.
- Repola, J., Ahtikoski, A., Laitila, J., Honkanen, S., 2014. Aines -ja energiapuuharvennusten kannattavuus Lapissa [The profitability of industrial and energywood thinnings in northern Finland]. Working Papers 305, the Finnish Forest Research Institute Metla.
- Routa, J., Asikainen, A., Björheden, R., Laitila, J., Röser, D., 2013. Forest energy procurement: state of the art in Finland and Sweden. *WIREs Energy Environ* 2, 602-613 doi:10.1002/wene.24
- Routa, J., Brännström, H., Anttila, P., Mäkinen, M., Jänis, J., Asikainen, A., 2017. Wood extractives of Finnish pine, spruce and birch – availability and optimal sources of compounds : A literature review. *Natural resources and bioeconomy studies* 73/2017. Natural Resources Institute Finland, Helsinki. 55 p.
- Tilastokeskus, 2016. Official Statistics of Finland 2016 (OSF): Energy supply and consumption [e-publication]. ISSN=1799-7976. 2016. Helsinki: Statistics Finland [referred: 12.9.2018]. Access method: http://www.stat.fi/til/ehk/2016/ehk_2016_2017-12-08_tie_001_en.html
- Tong, X., Shen, W., Chen, X. and Corriu, J-P., 2018. Qualitative and quantitative analysis of gaseous pollutants for cleaner production in pulp and paper mills. *J. Clean. Prod.*198, 1066-1075. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.118>
- Wolfsmayr, U.J., Rauch, P., 2014. The primary forest fuel supply chain: A literature review. *Biomass Bioenerg.* 60, 203–221.
- Xu, C., Liao, B., Pang, S., Nazari, L., Mahmood, N., Tushar, M.S.H.K, Dutta, A. and Ray, M.B. 2018. Biomass Energy, Chapter 1.19. *Comprehensive Energy Systems*, Vol. 1:770-794. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00121-8>.



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000