



Pekka Lastumäki & Taneli Myllylä

KORKEAN LÄMPÖTILAN VASTAVIRTAKUIVAUKSEN VAIKUTUS HAKKEEN LAATUOMINAISUUKSIIN

KORKEAN LÄMPÖTILAN VASTAVIRTAKUIVAUKSEN VAIKUTUS HAKKEEN LAATUOMINAISUUKSIIN

Pekka Lastumäki & Taneli Myllylä
Opinnäytetyö
Syksy 2011
Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

Tekijät: Pekka Lastumäki & Taneli Myllylä

Opinnäytetyön nimi: Korkean lämpötilan vastavirtakuivauksen vaikutus hakkeen laatuominaisuuksiin

Työn ohjaaja: Mikko Aalto ja Anu Hilli

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2011

Sivumäärä: 61 + 2 liitettä

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella uudentyyppisen puuhakkeen kuivatukseen tarkoitettun kuivurin koeajot ja osallistua niihin. Työn tilaajana toimi kuivurin kehittänyt CCM-Power yritys. Kuivurin toiminta perustuu korkean lämpötilan vastavirtakuivaukseen, joka hyödyntää höyrystymisenergian talteenottoa toiminnassaan. Laitetta testattiin kevään 2011 aikana kolmella eri haketyypillä ja erilaisilla laitteen kuivausasetuksilla. Koeajojen aikana näytteitä otettiin kuivausta ja tuoreesta hakkeesta. Hakenäytteitä analysoitiin CEN TC 335 mukaisten EN-standardien perusteella. Hakkeesta analysoitiin kuivauksen aiheuttamia muutoksia kosteudessa, lämpöarvossa ja energiatiheudessa. Työn tuloksena yritys sai käyttöönsä koeajojen aikana määritetyt tulokset.

Työn kirjallinen osuus on kirjoitettu syksyn 2011 aikana. Aineistoa hankittiin bioenergia-alan kirjallisuudesta, internetlähteistä sekä yrityksen henkilöstön kanssa käydyistä keskusteluista. Työn teoriaosuus käsittelee pääosin hakkeen laatuominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Työssä esitellään myös menetelmät, joilla hake-eriä testattiin.

Koeajojen perusteella voidaan todeta, että kuivauksella on myönteisiä vaikutuksia kaikkiin testattuihin laatuominaisuuksiin. Merkittävimmät muutokset kuivauksella saatiin hakkeen kosteuteen ja saapumistilaiseen lämpöarvoon kuiva-aineessa. Parhaat kuivaustulokset saatiin aikaan suuripalakokoisella hakkeella. Yhtenä testatuista haketyypeistä oli pelletin korvaavaksi tuotteeksi suunniteltu laatuhaake. Vaikka kuivauksen tulokset olivat lupaavia, ei laatuhaakeelle asetettuja ominaisuuksia kuitenkaan täysin saavutettu.

Asiasanat: hake, puuhake, kuivaus, kosteus, lämpöarvo, energiatiheys

Authors: Pekka Lastumäki & Taneli Myllylä

Title of thesis: The effect of high temperature counter-current drying to wood chip quality.

Supervisor: Mikko Aalto and Anu Hilli

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2011

Number of pages: 61+ 2 appendices

ABSTRACT

The aim of this thesis was to design and participate in the test runs for a prototype wood chip dryer. The commissioner for the work was CCM – power, the developer of the dryer. The operation of the dryer is based on high-temperature counter-current drying, which utilizes steaming energy for drying. The device was tested in spring 2011 with three different types of chips and with different drying settings. During the test runs, samples were taken from dried and fresh chips. The chip samples were analyzed based on CEN TC 335 EN standards. The changes in chips during the drying were analyzed by measuring the changes in humidity, heating value and energy density. As a result of thesis the company was given the results from the test runs.

The written part of the work was completed in the autumn of 2011. The material was acquired from the bioenergy sector literature, Internet sources and the discussions with the company's staff. The theory deals mainly with chip quality characteristics and factors affecting them. The work also presents the methods which were used to test the chips.

Based on the tests, it can be concluded that drying has positive effects on all tested qualities. The most significant changes were measured in moisture and the lower heating value of wood chips. The best drying results were generated by large particle sized wood chips. One of the tested types of chips was high quality wood chip which is designed to substitute wood pellets. Although the drying results of high quality wood chips were promising, they did not entirely meet the quality requirements set to a high quality wood chip.

Keywords: chips, wood chips, drying, moisture, heating value, energy density

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 PUUN RAKENNE JA PALAMINEN	8
2.1 Puun rakenne	8
2.2 Puun palaminen	9
3 HAKKEEN LAATUOMINAISUUDET	11
3.1 Kosteus	11
3.2 Energiatiheys	12
3.3 Palakoko	13
3.4 Lämpöarvo.....	14
4 HAKETYYPIT	16
5 HAKKEEN TUOTANTO JA KÄYTTÖ.....	18
5.1 Hakkeen tuotantoketjut.....	18
5.2 Hakkeen käyttökohteet.....	18
5.2.1 Lämmön- ja sähköntuotanto	19
5.2.2 Kaasutus	19
5.2.3 Muu käyttö.....	20
5.3 Hakkurit ja murskaimet.....	20
5.3.1 Laikkahakkuri.....	21
5.3.2 Rumpuhakkuri	22
5.3.3 Ruuvihakkuri.....	23
5.3.4 Murskaimet	23
6 HAKKEEN KUIVAUS.....	25
6.1 Luonnonolosuhteissa tapahtuva kuivaus.....	25
6.2 Keinokuivaus	26
7 KOEAIJOISSA KÄYTETTY KUIVURI	27
8 HAKKEEN ANALYSOINTIMENETELMÄT.....	32
8.1 Kosteus	32
8.2 Lämpöarvo.....	37
8.3 Energiatiheys.....	44

9 KUIVURIN KOEAJOT JA NIIDEN TULOKSET	46
9.1 Selluhake	46
9.2 Sekahake	50
9.3 Laatuhaake	52
10 POHDINTA	56
LÄHTEET.	58

1 JOHDANTO

Puuhakkeen käyttö ja kysyntä kasvaa Suomessa jatkuvasti. Taustalla vaikuttaa EU:n ilmasto- ja energiapolitiikka, joka tukee bioenergian käyttöä. Vaikka Suomessa on kokemusta puuhakkeen käytöstä jo 50-luvulta lähtien, pyritään tuotantoa silti kehittämään jatkuvasti. Yksi kehitettävä osa-alue ovat hakkeen tuotantoketjut. Nykymuodossaan ne kestävät jopa useita vuosia, koska puun kuivaus tapahtuu varastokasoissa luonnonolosuhteissa. Tehokkaalla keinokuivauksella tuotantoketjut voitaisiin lyhentää muutamaa päivään. Markkinoilla ei kuitenkaan ole saatavilla tarkoitukseen sopivia hakekuivureita. Hakkeelle etsitään myös uusia käyttökohteita. Yksi mahdollisuus olisi jalostaa hakkeen laatuominaisuuksia. Näin syntyvällä niin sanotulla laatuhaikkeella voitaisiin korvata pelletin käyttöä. (Kuitto 2005, 56-59.)

Opinnäytetyön tilasi CCM-Power. Yritys sijaitsee Oulunsalossa ja se on kehittänyt laitteita puun kaasutukseen ja kuivaukseen. Yritys on kehittänyt jo useiden vuosien ajan uudentyypistä orgaanisen materiaalin kuivuria. Kuivurin merkittävin käyttökohde on hakkeen kuivaus ja se kykenee kuivaamaan hakkeen muutamassa tunnissa tuorekosteudesta alle 30 % kosteuteen. (CCM-Power, haku päivä 1.11.2011.)

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää miten hakkeen tärkeimmät laatuominaisuudet muuttuvat korkean lämpötilan vastavirtakuivauksen aikana. Mitattuja laatuominaisuuksia olivat hakkeen kosteus, lämpöarvo ja energiatiheys. Samalla tutustuttiin hakkeen analysointimenetelmiin ja niissä käytettäviin standardeihin. Kuivuria testattiin kevään 2011 aikana koeajoissa, joiden suunnitteluun ja toteutukseen tämän opinnäytetyön tekijät osallistuivat.

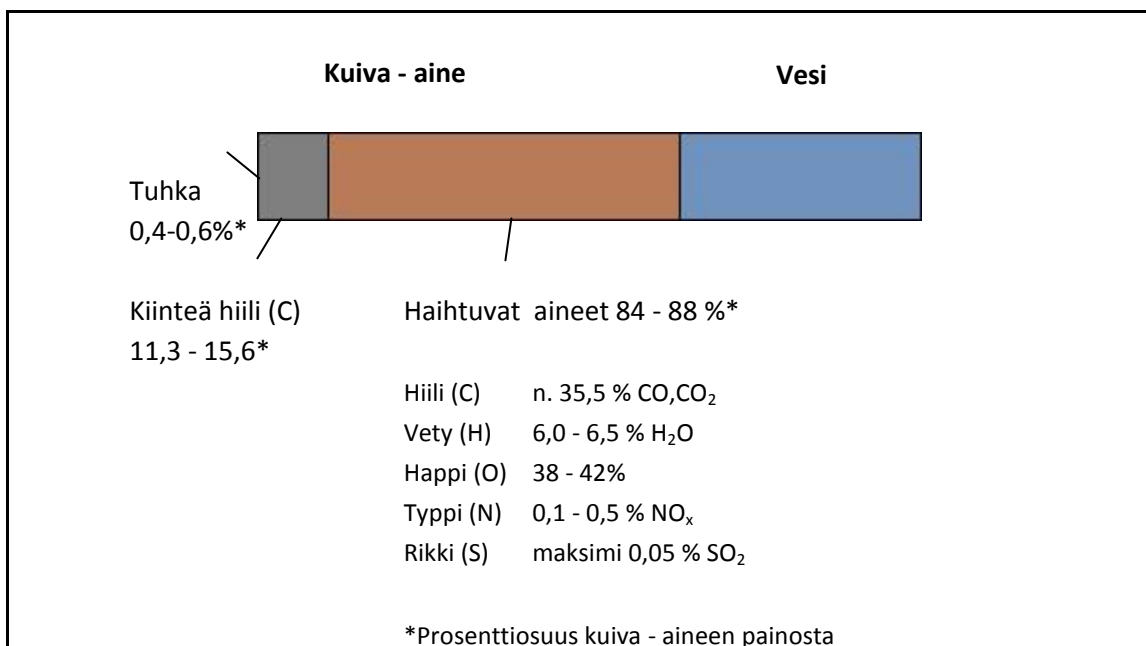
Hakkeessa kuivatuksen aikana tapahtuvia muutoksia ymmärtääksemme on tutustuttava puun koostumukseen ja siinä tapahtuviin reaktioihin kuumentumisen aikana. Lisäksi on otettava huomioon hakkeen muut ominaisuudet, jotka vaikuttavat kuivaukseen. Tärkeimpinä näistä ovat hakkeen raaka-aine ja palakoko.

2 PUUN RAKENNE JA PALAMINEN

2.1 Puun rakenne

Puu on biomassaa, joka syntyy yhteyttämisen eli fotosynteesin tuloksena. Puun vihreät osat muodostavat fotosynteesissä ilmakehän hiilidioksidista ja vedestä auringon energian avulla happea ja yksinkertaisia sokereita. Kasvin solut muokkaavat sokereita eteenpäin monimutkaisemmiksi yhdisteiksi, jotka sisältävät hiiltä (C), happea (O) ja vetyä (H). Hiilestä, vedystä ja hapesta koostuukin valtaosa puun kuiva-aineen massasta. Nämä aineet muodostavat yhdistyessään selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä puun rakennusaineiksi. Tämän lisäksi puussa on myös erilaisia uuteaineita. (Hakkila 2003, 24.)

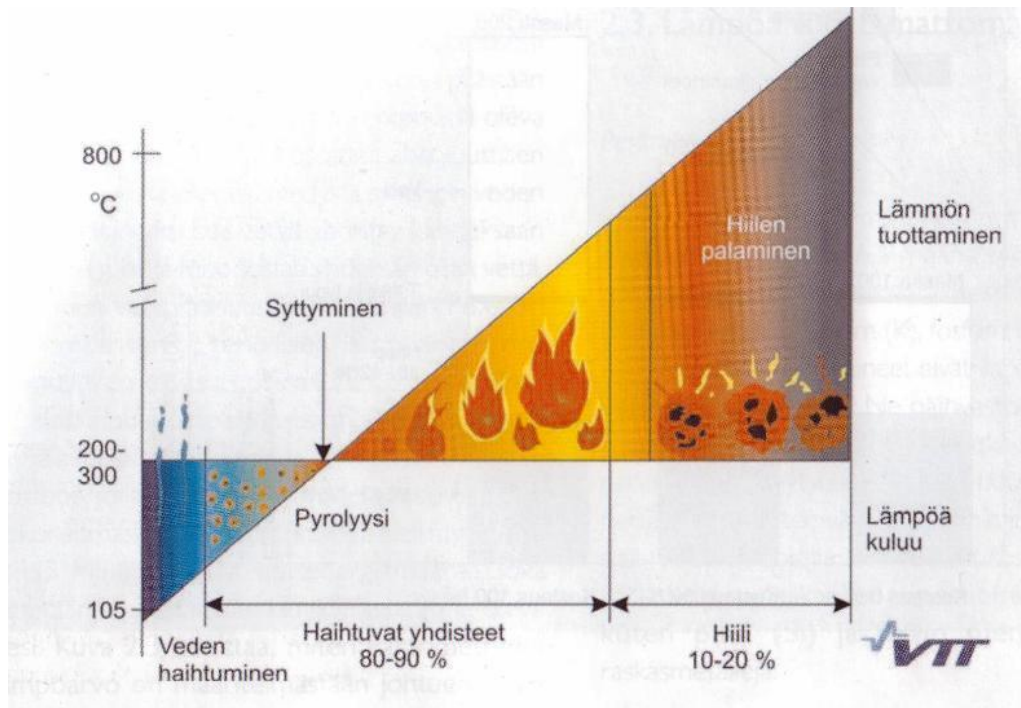
Puuainekko koostuu kuiva-aineesta sekä vedestä (KUVIO 1). 84 – 88 % kuiva-aineesta on puun palotapahtumassa haihtuvia yhdisteitä. Loput on kiinteää hiiltä ja tuhkaa. Tuhkan osuus kuiva-aineen massasta on 0,4 – 0,6 % puulajista riippuen. Veden määrä, eli kosteusprosentti, vaihtelee suuresti eri puupolttoainekkojen välillä.



KUVIO 1. Puupolttoainekko keskimääräinen kemiallinen koostumus (Savolainen 2000, 33).

2.2 Puun palaminen

Palamisella tarkoitetaan kemiallista reaktiota, jossa aine yhtyy happeen niin nopeasti, että syntyy korkea lämpötila ja valoilmio. Palaminen on monivaiheinen ketjureaktio, jonka vaiheiden ymmärtäminen auttaa hahmottamaan myös korkean lämpötilan kuivauksen vaikutuksia kuivattavalle hakkeelle. Puu sisältää runsaasti palaessa haihtuvia aineita, jonka johdosta se on pitkäliekkinen polttoaine ja vaatii suuren palotilan. Polttoaineen energiasisällön määrä on riippuvainen polttoaineen kemiallisesta rakenteesta eli sen hiili- ja vety-yhdisteisiin sitoutuneesta auringon energiasta. Energiakäyttöön soveltuvan polttoaineen puusta tekeekin sen korkea hiili- ja vetypitoisuus. Havupuussa hiilipitoisuus on 51 % ja lehtipuilla 49 %. Vastaavasti vetypitoisuus on 6,2 % ja 6,0 %. Ero johtuu havupuiden suuremmasta ligniinistä ja uuteaineiden määrästä. (Alakangas 2000, 35; Hakkila 2003, 25; Koivula 2008, 7.)



KUVIO 2. Puun palamisprosessin eteneminen. (Hakkila 2003, 25.)

Palamisprosessi etenee lämpötilan kasvaessa ja se voidaan jakaa neljään vaiheeseen: alkulämpeneminen, kosteuden haihtuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen (KUVIO 2). Näiden lisäksi syttymistä ja pyrolyysikaasujen palamista liekillä voidaan pitää erillisinä vaiheina. Palamisen vaiheet voidaan jakaa myös sen mukaan, ovatko ne lämpöä kuluttavia vai lämpöä tuottavia. Haihtuminen, syttyminen ja pyrolyysi kuluttavat lämpöä kun taas pyrolyysikaasujen ja jäännöshiilen palaminen tuottavat sitä. (Hytönen & Sippula 2005, 34.)

Paloprosessin alussa kostea puu alkaa lämmitä ja se saavuttaa kuivumislämpötilan. Tällöin suurin osa puun sisältämästä vedestä höyrystyy pois. Kun lämpötila puun kuivuessa nousee 100 – 105 asteeseen, alkaa pyrolyysivaihe, joka vaikuttaa puun haihtuviin aineisiin. Tässä vaiheessa puun suuret molekyylit kuten selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini pilkkoutuvat ja kaasuuntuvat. Näin syntyy paljon palavia kaasuja. Lisäksi syntyy nestemäistä tervaa ja eräitä inerttejä kaasuja. (sama, 34.)

Puumassan syttyminen tapahtuu 225 - 300 asteessa riippuen puumateriaalista. Havupuu syttyy lehtipuuta nopeammin. Pyrolyysissä haihtuneet kaasut syttyvät palamaan noin 500 - 600 asteen lämpötilassa. Viimeisessä palamisen vaiheessa pyrolyysistä jäljelle jäänyt kiinteä hiili syttyy palamaan 800-900 asteen lämpötilassa. Tämä on palamisen vaiheista hitain ja pitkäkestoisin. (Wester 2000, 110.)

Opinnäytetyön kannalta kiinnostavin vaihe palamisessa on pyrolyysi, sillä se on lämmön vaikutuksesta tapahtuva reaktio eikä vaadi happea. Pyrolyysin vaatima lämpötila on myös riittävän alhainen, jotta sitä voi tapahtua korkean lämpötilan kuivauksessa. Kuivauksessa haihtuvien aineiden määrää voidaan arvioida mittaamalla puun lämpöarvoa pommikalorimetrillä. Näin voidaan arvioida kuivauksessa haihtuvien yhdisteiden määrää vertaamalla hakkeen lämpöarvoa ennen ja jälkeen kuivauksen.

3 HAKKEEN LAATUOMINAISUUDET

Hakkeen laadun mittaamiseen on olemassa joukko laatuominaisuuksia. Näistä opinnäytetyömme kannalta tärkeimpiä ovat kosteus, lämpöarvo, energiatiheys ja palakoko. Eri haketyypeillä on erilaiset laatuominaisuudet. Lisäksi tuotantoketjujen eri vaiheet ja niissä käytettävät menetelmät ja laitteet vaikuttavat näihin ominaisuuksiin. Hakkeen eri laatuominaisuuksille on olemassa standardit, jotka määrittelevät näytteidenottotavat ja niiden analysoinnin laskukaavoineen. Laskukaavat esitetään raportin hakkeen analysointimenetelmät osiossa.

3.1 Kosteus

Kosteus on energiapuun kannalta ratkaiseva laatuominaisuus. Sillä on vaikutus useisiin hakkeen tuotantoketjun osiin. Suuri kosteus vähentää toiminnan kannattavuutta lisäämällä kuluja ja vähentämällä palamisen hyötysuhdetta. Tuoreen puun kosteudet vaihtelevat puolajieittain. Lisäksi kosteusvaihtelua tapahtuu vuodenajoittain. Tuoreen koivun kosteus on noin 40- 50 %, kun taas männyllä ja kuusella se on 50- 60 %. (Alakangas 2003, 31.)

Puun kosteus vaihtelee myös sen mukaan, mistä osasta puuta materiaali otetaan. Puun oksat, latva ja ohuet juuret ovat puun kosteimpia osia. Lisäksi eroja on sydän- ja mantopuulla. Esimerkiksi männyllä sydänpuun suhteellinen osuus poikkipinta-alasta vaikuttaa puun kokonaiskosteuteen alentavasti, sillä männyllä sydänpuu on reilusti kuivempaa kuin pintapuuta. Tästä johtuu myös se, että tyvipuu on suhteessa kuivempaa kuin latvuspuu. (Kärkkäinen 2007, 132- 137.) Tämän vuoksi koeajoissa käytetty selluhake, joka on pääosin pintapuuta, on kosteampaa kuin muut koeajoissa käytetyt materiaalit.

Korkea kosteus vaikuttaa ratkaisevasti hakkeen poltosta saatavan energian määrään. Poltettaessa kosteaa haketta, energiaa kuluu ensin kosteuden höyrytämiseen ja vasta sen jälkeen palamiseen. Kostean polttoaineen käyttö lämpölaitoksessa aiheuttaa päästöongelmia ja toimintahäiriöitä, mitkä johtuvat epä-

täydellisestä palamisesta. Suuret lämpölaitokset pystyvät hyödyntämään paremmin kosteaa haketta, mutta toiminnan hyötysuhde laskee tämän takia. Kostea haketta kuluu reilusti enemmän kuin kuivaa. Kosteuden noustessa 20 %:sta 50 %:iin hakkeen kulutus kaksinkertaistuu (Maatilan hakelämmitysopas 2008, 20; Polttopuu lisätiedot 2009, hakupäivä 12.9.2011.)

Korkea kosteuspiitoisuus aiheuttaa myös ongelmia hakkeen varastoinnissa ja kuljetuksessa. Hakkeen säilyvyyden kannalta on tärkeä, että hake on kuivattu. Kuivaamattomassa hakkeessa, jonka kosteus on noin 40 - 60 %, mikrobitoiminta aiheuttaa lämpenemistä ja kuiva-ainetappioita. Mikäli kosteus saadaan alle 25 %, jää mikrobitoiminta vähäiseksi ja hake säilyy paremmin. Mikrobitoiminta ja siitä aiheutuva lämpeneminen aiheuttavat hakkeen poltto-ominaisuuksien heikkenemistä. Pahimmassa tapauksessa hake voi syttyä itsestään palamaan. Kosteaan hakkeeseen tulee myös hometta, mikä vaikeuttaa sen käsittelyä, aiheuttaa terveysriskin ja lisää haitallisten päästöjen määrää. (Varastoinnin vaikutus polttohakkeen laatuun 2009, hakupäivä 21.9.2011.) Homehtumisen riski vähenee, kun kosteus on alle 30 %. Tämän vuoksi kuivaus on tärkeä osa hakkeen tuotantoketjua (Maatilan hakelämmitysopas 2008, 20).

Korkea kosteus aiheuttaa hakkeen käsittelyssä ongelmia. Kostea hake holvaantuu siilossa ja on lämpölaitoksen kuljettimille raskasta kuljetettavaa. Tämän seurauksena laitoksessa tulee syöttöhäiriöitä. Kostea hake voi myös jäätyä talvella ja saattaa pahimmassa tapauksessa rikkoa kuljettimet. Hakkeen kuljetuskustannuksiin kosteudella on myös merkitystä, sillä kosteassa hakkeessa suuri osa painosta muodostuu vedestä. Toisin sanoen kuljetuksen energiatiheys jää pieneksi. (Lepistö 2010, 7; Varastoinnin vaikutus polttohakkeen laatuun 2009, hakupäivä 22.9.2011.)

3.2 Energiatiheys

Hakkeen kuljetuksessa ja varastoinnissa käytetään yleensä tilavuusmittoja. Tämän takia on tärkeä tietää polttoaineen energia myös tilavuusyksikköä kohden. Polttoaineen energiasisältöä tilavuusyksikköä kohden kutsutaan energiati-

heydeksi. Energiatiheys ilmoitetaan useimmiten irtokiintotilavuus-yksikköä (kWh/m^3) mutta se voidaan ilmoittaa myös kiintotilavuusyksikköä (kWh/m^3) kohden. Kilowattitunnin paikalla käytetään usein myös megawattituntia. Opin- näytetyössämme vertaamme koneellisesti kuivatun ja kuivaamattoman hakkeen energiatiheyttä toisiinsa. (Hakkila 2003, 29; Kiema, Pasanen & Parvianen 2005, 14 hakupäivä 25.9.2011.)

Energiatiheyteen irtotilavuusyksikössä vaikuttavat hakkeen tiiviys, kosteus, puun tehollinen lämpöarvo ja kuivatuoretiheys. Tiiviys kertoo sen, kuinka tiheästi partikkelit ovat, kun ne ovat kasassa. Tiiviyteen vaikuttavat hakkeen palakoko ja hienoaineksen määrä. Nämä ominaisuudet vaihtelevat sen mukaan, millaisesta raaka-aineesta hake on tehty. Myös hakkurityyppi vaikuttaa tiiviyteen, sillä se vaikuttaa palakokojakaumaan ja palan muotoon. Mikäli palakokojakauma on vaihteleva, on tiiviys korkea, sillä pienemmät palat täyttävät isompien palojen välit. Myös hakkeen käsittelyllä voidaan vaikuttaa sen tiheyteen. Puhaltamalla lastattu hake on tiiviimpää kuin pudottamalla lastattu hake. Yleisesti voidaan todeta, että mitä suuremmalla voimalla hake iskeytyy kuormaan, sitä suurempi on tiiviys. Kosteus kertoo sen, kuinka suuri osa kuorman painosta on vettä. Kuivatuoretiheys kertoo, paljonko kuivamassaa on yhdessä irtokuutiometrissä haketta. (Hakkila 2003, 29-30.)

3.3 Palakoko

Palakoko on ominaisuus, joka kertoo miten hakkeen partikkelikoot ovat jakautuneet. Laatuominaisuutena palakoko on tärkeä lähinnä pienissä lämpölaitoksissa, joiden kuljettimet tarvitsevat palakooltaan mahdollisimman tasalaatuista polttoainetta. Palakooltaan vaihteleva, runsaasti hienoainesta ja tikkuja sisältävä hake aiheuttaa ongelmia kuljettimissa. Suurissa lämpölaitoksissa ei tule ongelmia palakoon kanssa, koska niissä on järeämmät kuljettimet. Standardin mukaan hyvä keskimääräinen palakoko metsähakkeelle on 30 - 40 mm. Opin- näytetyössämme käytimme koeajoissa myös niin sanottua laatuhaketta, jonka

palakoko on keskimäärin 10 - 25 mm. Kuivurissa hakkeen palakoko vaikuttaa hakemassan virtaukseen ja kuivausnopeuteen. (Alakangas 2003, 31.)

3.4 Lämpöarvo

Polttoaineiden sisältämä energiamäärä ilmoitetaan yleisesti lämpöarvon avulla. Eri polttoaineiden lämpöarvot eroavat selvästi toisistaan. Myös puun lämpöarvo voidaan määrittää ja näin saadaan selville poltettavasta puusta saatava lämmitysteho. Lämpöarvoon vaikuttaa puulajin lisäksi puun kosteus, jolla on ratkaiseva merkitys puusta saatavaan energiaan. Tämä johtuu siitä, että puuta poltettaessa osa sen sisältämästä energiasta kuluu aina puun sisältämän veden höyrytämiseen. Mitä enemmän vettä puu sisältää, sitä suurempi osa energiasta kuluu puun kuivumiseen ja lämpöarvo on tästä johtuen pienempi. Eri puulajien lämpöarvoilla kuiva-aineyksikköä kohden ei ole kovin suuria eroja. Keskimäärin puun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on noin 19 MJ/kg (LIITE 2). Koivu on tiheimpänä puulajina lämpöarvoltaan korkein. Lämpöarvon mittayksikkönä käytetään yleisesti joko MJ/kg tai kWh/kg. Lämpöarvo voidaan ilmoittaa myös suhteutettuna öljytonniin, jolloin vertailukohteena on raakaöljy. Yksi raakaöljytonni (toe) vastaa lämpöarvoltaan 41,9 GJ tai 11,6 MWh. (Polttopuun lämpöarvo, hakupäivä 22.9.2011; Hakkila 2003, 26.)

Lämpöarvo voidaan ilmoittaa eri tavoilla riippuen siitä, otetaanko huomioon puun sisältämän veden vaikutus lämpöarvoon vai oletetaanko kaiken puun sisältämän energian päätyvän lämmitystehoksi. Eri lämpöarvoja ovat kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo, kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo eli alempi lämpöarvo ja tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. (Alakangas 2000, 27.)

Kalorimetriseen lämpöarvoon lasketaan mukaan sekä puun sisältämän vedyn palamisenergia että vedystä ja hapestä muodostuneen veden höyrytymisenergia. Koska veden höyrytymisenergia lasketaan mukaan, on kalorimetrinen lämpöarvo tästä johtuen aina muita lämpöarvolukuja suurempi. Polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo selvitetään laboratoriossa pommikalorimetrin avulla.

(Biopolttoaineiden lämpöarvoja 2009, hakupäivä 27.9.2011; Alakangas 2000, 27.)

Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan tyypillisesti kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona, jonka yksikkönä käytetään MJ/kg. Tehollinen lämpöarvo saadaan laskettua matemaattisesti muunnoskaavan (3) avulla kalorimetrisestä lämpöarvosta. Tällöin mukaan ei lasketa savukaasujen mukana poistuvaa veden haihduttamiseen kuluvaa energiaa, joka on peräisin polttoaineen sisältämästä vedystä. (Alakangas 2000, 34.)

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa eli toimituskosteana on lämpöarvoluvuisista alhaisin. Tämä johtuu siitä, että lämpöarvoa laskettaessa vähennetään energiamäärä, joka kuluu kun polttoaineen luontaisesti sisältämä ja palamisessa muodostuva vesi haihtuu. Puun kosteudella on tästä johtuen ratkaiseva vaikutus saapumistilaisen lämpöarvon suuruuteen. Saapumistilainen lämpöarvo kuvaa todellista energiamäärää, joka saadaan kun puu poltetaan. Saapumistilainen lämpöarvo voidaan laskea muunnoskaavan (4) avulla kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta, kun tunnetaan polttoaine-erän kosteusprosentti. (Biopolttoaineiden lämpöarvoja 2009, hakupäivä 27.9.2011; Alakangas 2000, 28.)

4 HAKETYYPIT

Yleisesti hakkeella tarkoitetaan pieniksi paloiksi murskattua tai leikattua puuta, joka on pääsääntöisesti tarkoitettu energiantuotantoon. Hake voidaan valmistaa mistä puun osasta tahansa, mutta yleensä käytetään teolliseksi ainespuuksi kelpaamatonta puuta. Syynä tähän on ainespuusta yleensä ottaen maksettava korkeampi hinta. Hake valmistetaan hakkurilla, jossa on terävät ja pilkkovat terät, tai murskaimella, joka repii puun palasiksi tylpillä terillä. Tyypillisesti haketyypit nimetään sen valmistukseen käytettävän raaka-aineen mukaan. Esimerkiksi rankahake tehdään puun karsitusta runko-osasta. Haketyypit voidaan myös jakaa niiden käyttötarkoituksen mukaan, kuten polttohake, joka on poltto- käyttöön ohjattua haketta. (Hake 2009, hakupäivä 12.9.2011; Termejä 2005, 9; Vesisenaho 2003, 37.)

Erilaisia haketyyppejä on olemassa lukuisia erilaisia ja termit vaihtelevat osittain määrittelijästä riippuen. Koeajoissa käytimme kolmea erilaista haketyyppeä, jotka olivat selluhake, sekahake ja niin sanottu laatu- hake. Tavanomaisesti laatu- hakeella tarkoitetaan yleisesti hyvälaatuista haketta. CCM-Power yritys käyttää laatu- hake termiä hakekuivurilla jalostamastaan pienipalakokoisesta hakkeesta. Jatkossa tekstissä laatu- hakeesta puhuttaessa viitataan CCM-Powerin valmis- tamaan laatu- hakeeseen.

Selluhake

Selluhake on sahateollisuuden sivutuotteena saatavaa haketta. Se tehdään puutavaran sahauksen yhteydessä ylijäävästä kuoritusta pintapuusta. Koska selluhake valmistetaan pintapuusta on sen kosteus usein muita haketyyppejä suurempi. Selluhakkeen palakoko on suuri. Näiden ominaisuuksien takia selluhake soveltuu paremmin käytettäväksi suurissa lämpölaitoksissa. Koe- ajoissa testattua selluhaketta käytetään normaalisti sahan oman lämpölaitoksen käyttöön. (Ahvensalmi 29.3.2011, keskustelu.)

Sekahake

Sekahake on kuitupuuksi kelpaavasta materiaalista valmistettua pienipalakokoista haketta. Koeajoissa käytetty sekahake tehtiin koivusta ja havupuista. Koska sekahake valmistetaan runkopuusta, on se laadultaan hyvää. Tämän ansiosta se soveltuu käytettäväksi myös pienemmissä lämpölaitoksissa. (Ahvensalmi 29.3.2011, keskustelu.)

Laatuhake

Laatuhake nimitystä voidaan käyttää pienipalakokoisesta, seulotusta ja koneellisesti kuivatusta hakkeesta. Laatuhake haketetaan yleensä rumpuhakkurilla, koska sillä saadaan tasalaatuinen tulos. Koeajoissa käytetyn laatuhakkeen palakoko oli noin 10- 25 mm. Laatuhake pitää kuivata koneellisesti, jotta saavutetaan riittävän alhainen kosteusprosentti. Laatuhakkeen käyttökohteena voisi olla esimerkiksi pellettilaitokset. (Ahvensalmi 29.3.2011, keskustelu.)

5 HAKKEEN TUOTANTO JA KÄYTTÖ

5.1 Hakkeen tuotantoketjut

Hakkeen tuotantoketjujen eri vaiheet on hyvä tuntea, sillä ne auttavat ymmärtämään koneellisen kuivauksen vaikutukset tuotantoketjuun. Tuotantoketju pitää sisällään kaikki työvaiheet puun matkatessa metsästä polttokattilaan. Nykyään hakkeen tuotantoketjut on jaoteltu neljään tyyppiin. Nämä ovat palsta-, välivarasto-, terminaali- ja käyttöpaikkahaketusjärjestelmä. Jako on tehty sen mukaan, missä haketus tapahtuu. Hakkeen tuotantoketjuissa on kaikissa samat pääpiirteet. (Kuitto 2005, 93 - 99.)

Tuotantoketjujen ensimmäinen vaihe on materiaalin hankinta. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi energiapuun kaatoa, tai hakkuutähteiden ja kantojen keruuta päätehakkuualueella. Seuraava vaihe on materiaalin varastointi, joka on tuotantoketjujen vaiheista pisin. Tämä johtuu siitä, että tässä vaiheessa tapahtuu materiaalin kuivaus, joka luonnonoloista, varastoinnista ja hakkeen tavoitekosteudesta riippuen kestää 1-2 vuotta. Kuivatuksen jälkeen seuraa haketettavan materiaalin kuljetus haketuspaikalle, jossa se haketetaan. Tämän jälkeen hake joko varastoidaan tai käytetään energiantuotantoon. (Kuitto 2005, 93 - 99.) Opinäytetyössä käsiteltävä korkean lämpötilan kuivuri tähtää juuri kuivatusvaiheen merkittävään lyhentämiseen. Optimioloissa tuotantoketjun pituus saadaan puristettua yhteen vuorokauteen.

5.2 Hakkeen käyttökohteet

Suomessa on käytetty haketta jo 1950-luvulta lähtien. Alusta asti suurin osa hakkeesta on käytetty lämmön tuotantoon, mutta vuosien aikana on tullut myös uusia käyttökohteita. Hakkeen kulutus on vaihdellut vuosikymmenten aikana, mutta pääosin se on kasvanut. Kulutuksen kasvun ovat mahdollistaneet uudet

käyttökohteet sekä tuotantokaluston kehittyminen. Nykyään hakkeen kysyntä on kasvussa ja tavoitteena on, että sen käyttö laajenee teollisuuden, kaukolämmön, liikenteen ja hakkeen pienkäytön saralla paljon. Vuoden 2008 kansallisen energiastrategian tavoitteena on moninkertaistaa metsähakkeen käyttö vuonna 2020 21 TWh:iin vuoden 2005 5,8 TWh:n tasosta. (Helynen 2005, 264- 269; Laurila 2005, 272- 275; Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 2008, 41.)

5.2.1 Lämmön- ja sähköntuotanto

Haketta käytetään yleisimmin vain lämmöntuotantoon, mutta hakkeen käyttö on yleistä myös lämmön- ja sähköntuotannossa. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto tapahtuu pääosin suurissa lämpölaitoksissa, mutta myös pieniä voimalaitoksia on käytössä. Trendinä tällä hetkellä onkin, että sähkön- ja lämmöntuotanto hakkeen avulla tapahtuu entistä pienemmissä voimalaitoksissa (Helynen 2005, 268). Lämmöntuotantoon haketta käytetään sekä pienissä että suurissa lämpölaitoksissa. Tulevaisuuden visiona on, että hakkeen käyttö lisääntyy paljon joka alalla. Koska lämmön- ja sähköntuotanto tapahtuu usein suurissa yksiköissä, ei hakkeen laadulla ole niin suurta merkitystä. Järeitten kuljettimien ansiosta suuret yksiköt voivat hyödyntää palakooltaan vaihtelevaa haketta. Isot voimalaitokset käyttävät leijupetikattiloita, jolloin kostea hake ei aiheuta ongelmia polttoprosessissa. (Helynen 2005, 264-269; Laurila 2005, 272-275.) Lämmön- ja sähkön pientuotanto on yksi mahdollinen sijoituskohde työssä testatulle kuivurille. (Ahvensalmi 29.3.2011, keskustelu.)

5.2.2 Kaasutus

Vaihtoehtona hakkeen suoralle poltolle on kaasutus. Hakkeen kaasutusta käytetään lämmöntuotantoon useissa suurissa voimalaitoksissa. Tulevaisuuden visiona on, että kaasu saataisiin puhdistettua, jolloin se voidaan hyödyntää polttomoottoreissa ja kaasuturbiineissa (Helynen 2005, 268). Kaasutusta voidaan

soveltaa esimerkiksi kokonaisten omakotitaloalueiden energian-tuotantoon, jolloin saadaan energiaomavaraisia alueita (Kempelen ekokortteli 2009. hakupäivä 29.9.2011).

5.2.3 Muu käyttö

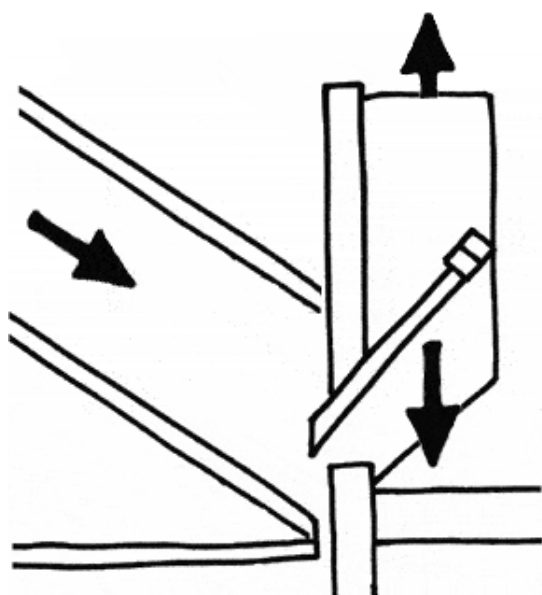
Hakkeen muu käyttö on pääosin puutarhakäyttöä. Kuiva hake pakataan säkkeihin ja pusseihin ja myydään katteena. Puutarhakäyttöön menevän hakkeen tulee olla mahdollisimman tasalaatuista ja kuivaa. Katteeksi käytettävä hake värjätään usein eri väreillä. (Kekkilä. Hakupäivä 29.9.2011.)

5.3 Hakkurit ja murskaimet

Energiapuu käsitellään ennen käyttöä yleisesti joko hakkurilla tai murskaimella. Näin puu saadaan muutettua helposti käsiteltävään ja poltettavaan muotoon. Eri hakkurityypeillä on toisistaan poikkeava toimintaperiaate ja käyttöominaisuudet. Tämä johtaa siihen, että myös hakkeen ominaisuudet vaihtelevat riippuen hakkeen tekoon käytetystä laitteesta. Hakkurityypillä on vaikutusta esimerkiksi hakkeen palakokoon ja tätä kautta hakkeen tiiviyteen sekä kuivumisnopeuteen. Hakkureiden toimintaperiaate pohjautuu raaka-aineen leikkaamiseen pieniksi paloiksi erityyppisillä terätkaisuilla. Murskaimissa raaka-aine sen sijaan hienonnetaan repimällä. Yleisimpiä hakkurityyppejä ovat laikkahakkuri, rumpuhakkuri ja ruuvihakkuri. (Pohjois-Karjalan ammatti-korkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011.)

5.3.1 Laikkahakkuri

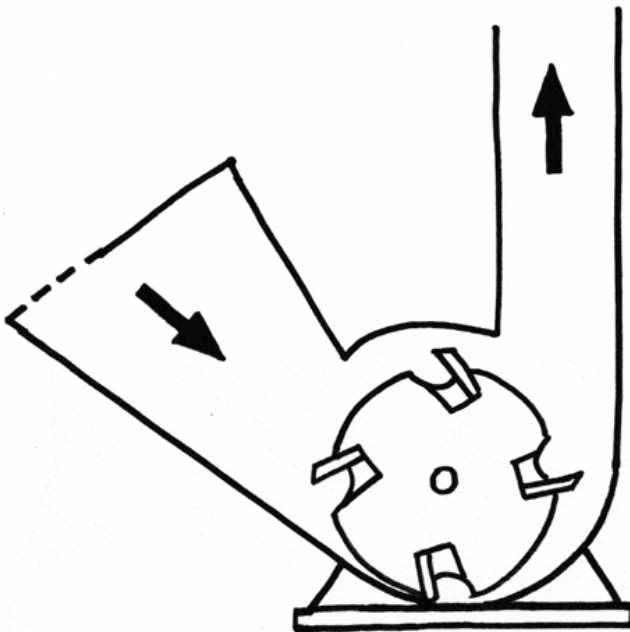
Laikkahakkuri on yleinen hakkurityyppi erityisesti pienissä hakkureissa. Laikkahakkuri leikkaa puun 2-4 terän avulla, jotka on kiinnitetty säteen suuntaisesti teräpyörän sivupinnalla (KUVIO 3). Puut syötetään vinosti teräpyörän sivua kohden. Pienissä laikkahakkureissa ei tarvita erillistä syöttölaitetta, sillä terät vetävät puuainesta laitteen sisään leikatessaan. Suuremmissa laikkahakkureissa puun syöttöä koneeseen voidaan tehostaa syöttörullilla. Hankintahinnaltaan laikkahakkuri on edullinen ja sen puhallusteho on hyvä. Se on kuitenkin arka kiville ja maa-ainekselle ja soveltuukin tästä johtuen parhaiten koko- ja rankapuun haketukseen. Laikkahakkuri vaatii myös paljon tehoa toimiakseen johtuen suuresta massapyörästä. (Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011; Sauranen 2003, 71.)



KUVIO 3. Laikkahakkurin toimintaperiaate. (Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011.)

5.3.2 Rumpuhakkuri

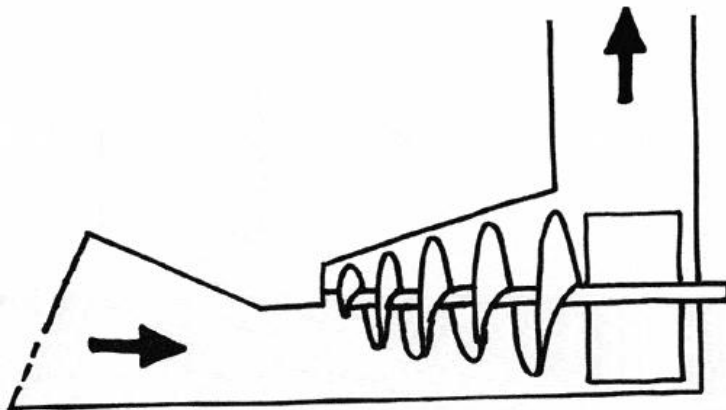
Rumpuhakkuri on yleisin ratkaisu suurissa hakkureissa. Rumpuhakkurissa on 2-6 terää lieriömäisen terärummun ulkokehällä (KUVIO 4). Terätyynyn lähelle on usein asennettu syöttörullat, jotka helpottavat puun syöttöä koneeseen. Rumpuhakkuri kestää rakenteensa vuoksi hyvin epäpuhtauksia ja soveltuu siksi myös hakkuutähteiden haketukseen. Rumpuhakkuri tekee myös palakooltaan tasaista haketta ja vaatii laikkahakkuria vähemmän tehoa. Hakkeen palakokoa voidaan myös säädellä rumpuhakkuriin asennettavien erikokoisten seulojen avulla. Näin saadaan aikaiseksi tarvittaessa palakooltaan hyvinkin pientä haketta kuten koeajoissa käytetty laatuhaake. Hankintahinnaltaan rumpuhakkuri on laikkahakkuria kalliimpi. (Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011.)



KUVIO 4. Rumpuhakkurin toimintaperiaate. (Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011.)

5.3.3 Ruuvihakkuri

Ruuvihakkurit ovat kooltaan pieniä ja hankintahinnaltaan edullisia. Koneen terä, eli ruuvi, on kiinnitetty vaaka-asentoon pyörivään akseliin (KUVIO 5). Ruuvi vetää puuaineksen hakkuriin, joten erillistä syöttölaitetta ei tarvita. Hakkuri soveltuu hyvin oksattoman rangan ja pintalaudan haketukseen. Ruuvihakkuri vaatii kuitenkin paljon vääntömomenttia. Kuluvia osia on vähän, joten huollon tarve on vähäinen ja kone on varmatoiminen. Terän vaihto voi olla kuitenkin isotöistä. (Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011; Sauranen 2003, 72.)



KUVIO 5. Ruuvihakkurin toimintaperiaate. (Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011.)

5.3.4 Murskaimet

Murskaimet voivat olla joko kiinteitä tai mobiilimurskaimia. Murskaimet ovat rakenteeltaan joko levy- tai vasaramurskaimia. Murskaimet hienontavat raaka-aineen repimällä kun taas haketuksessa se leikataan. Tästä johtuen murskattu puuaines on laadultaan selvästi haketta epätasaisempaa ja soveltuukin tikkuisuudestaan johtuen paremmin suurten voimalaitosten käyttöön. Murskaimet vaativat paljon tehoa toimiakseen, mutta niillä saavutetaan myös suuria tunti-

tuotoksia. Suuresta koostaan johtuen murskaimet soveltuvat parhaiten käyttöpaikan lähellä olevalle terminaalille. Murskaimet kestävät hyvin raaka-aineen sisältämiä epäpuhtauksia ja ne soveltuvatkin hyvin esimerkiksi hakkuutähteiden käsittelyyn. (Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 29.9.2011; Sauranen 2003, 72.)

6 HAKKEEN KUIVAUS

Hakkeen kuivauksella pyritään parantamaan hakkeen saapumistilaista lämpöarvoa. Näin ollen myös hakkeesta poltettaessa saatava energia lisääntyy. Samalla parannetaan myös hakkeen säilyvyyttä ja käsittelyominaisuuksia. Kuivalla hakkeella on myös vaikutus kuljettamisen kannattavuuteen. Hakkeen kuivaus voidaan jakaa luonnonolosuhteissa tapahtuvaan kuivaukseen ja keinokuivaukseen. Toisin kuin luonnonvarainen kuivaus, keinokuivaus kuluttaa energiaa, joten se lisää hakkeen tuotantokustannuksia. (Lepistö 2010, 32.)

6.1 Luonnonolosuhteissa tapahtuva kuivaus

Suurin osa hakkeen kuivauksesta tapahtuu luonnonolosuhteissa. Haketettava materiaali varastoidaan yleensä joko hakkuualalle pienissä kasoissa tai metsätien varteen suuriin kasoihin. Näistä tavoista yleisempi on tienvarsivarastointi. Puuaineksen kuivumiseen vaikuttaa olennaisesti varastopaikan valinta ja puiden kasaaminen. Hyvällä varastopaikalla on riittävästi tilaa haketuskalustolle ja se on, jos mahdollista, tuulisella paikalla. Energiapuupinon aluspuiden tulee olla riittävän korkeat, jotta ilma pääsee kiertämään myös pinon alakautta. Korkealla alusrakenteella estetään myös maa-aineksen sekoittuminen haketettavaan puuhun. Kasan kastumista voidaan ehkäistä pinoamalla ylimmät puut ”lipaksi” puukasan päälle. Tämän lisäksi pino voidaan peittää pressulla tai pinojen peittämiseen tarkoitettulla peitepaperilla, jolloin voidaan tehokkaasti estää sadeveden pääseminen pinoon. Kuivaus luonnonolosuhteissa kestää 1-2 vuotta. Tavallisesti luonnonolosuhteissa kuivatun hakkeen kosteus on 30 - 50 %, mutta hyvin onnistuttaessa voidaan päästä 25 %:n kosteuteen. (Lepistö 2010, 20-23, 32.)

6.2 Keinokuivaus

Kuivaukseen on olemassa erilaisia teknisiä ratkaisuja ja usein kuivurit ovat ”tee se itse” mallia. Keinokuivaus voidaan jakaa kylmäilma- ja kuumailmakuivaukseen. Suurin osa nykyisestä keinokuivauksesta tapahtuu kylmäilmakuivauksella. Suurissa lämpölaitoksissa käytetään jonkin verran hyödyksi energiantuotannossa syntyvää hukkalämpöä hakkeen kuivauksessa. Toimintaperiaate kuivureissa on tyypillisesti hakepatjan alapuolelta hakkeeseen ohjattava ilmavirta. Kuivurit voivat olla malliltaan liikuteltavia tai kiinteitä. Liikuteltava hakekuivuri voi olla hyvä ratkaisu hakkeen pienkäyttäjien yhteiskoneeksi. Viljavaunu on yksi vaihtoehto liikuteltavan hakekuivurin alustaksi. Nykyisillä kylmäilmakuivureilla hakkeen keinokuivaus kestää hyvissä oloissa noin kolme viikkoa, kun kuivataan 35 %:n kosteudesta 20 %:iin. (Lepistö 2010, 32-33.) Opinnäytetyön aiheena oleva kuivuri perustuu kuumailmakuivaukseen ja sillä kuivatusaika voidaan lyhentää muutamaan tuntiin. Näin saavutetaan useita etuja. Pääoman kierto nopeutuu, sillä haketettavaa puuainesta ei tarvitse seisottaa varastokasoissa kuivumassa montaa vuotta. Energiatuotannossa toiminnan suunnittelu helpottuu, sillä puun nopea kierto metsästä kattilaan lisää joustavuutta materiaalihankinnassa.

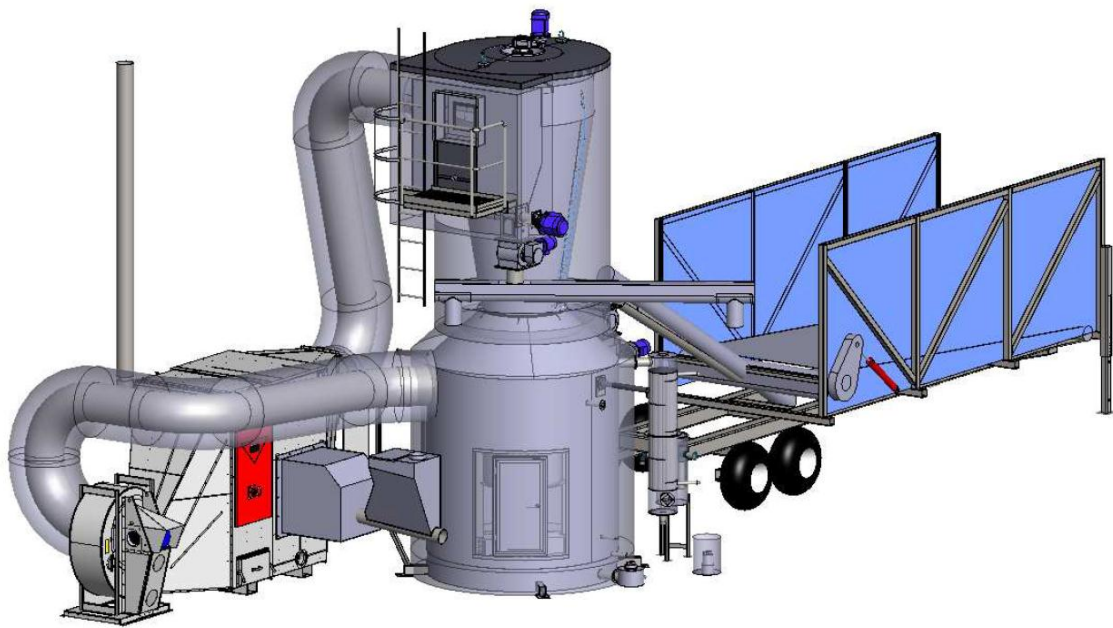
7 KOEAJOISSA KÄYTETTY KUIVURI

Hakkeen koeajot suunniteltiin ja toteutettiin CCM-Power Oy:n kehittämällä kuivurilla, joka on suunniteltu erilaisten orgaanisten materiaalien kuivaamiseen. Kuivuri on korkean lämpötilan vastavirtakuivuri. Kuivuri poikkeaa merkittävästi tyypillisistä keinokuivauksen ratkaisuista ja kuivausmenetelmälle sekä kuivurille on myönnetty patentti 31.8.2011. CCM-Powerin kuivuri on prototyyppiasteella, joten sen yksityiskohdat eivät ole lopullisia ja pieniä muutoksia on tehty myös koeajojen aikana. Koeajoissa kuivurissa havaittiin heikkouksia, joita on pyritty kehittämään seuraavassa prototypissä, jonka yritys saa käyttöönsä loppuvuodesta 2011. Uudessa prototypissä tulee olemaan myös tiettyjä teknisiä eroavaisuuksia testattuun kuivuriin nähden. (Patenttijulkaisu FI 122117 B 2011, hakupäivä 24.10.2011.)

Kuumaa kaasua hyödyntäviä kuivureita on kehitetty jo aiemminkin, mutta ne ovat usein suhteellisen hitaita ja vaativat paljon seurantaa ja työtä toimiakseen. Yksi kuivausta hidastava tekijä on, että kuivurit ovat yleensä panostäytteisiä, jolloin käsitellään yhtä kuivattavaa erää kerrallaan. CCM-Powerin kehittämä kuivuri on suunniteltu jatkuvatoimiseksi ja pitkälti automatisoiduksi. Nämä ominaisuudet mahdollistavat suuremmat kuivatusmäärät ja pienentävät ihmistyön tarvetta. (Patenttijulkaisu FI 122117 B 2011, hakupäivä 24.10.2011.)

CCM-Powerin kuivurin toiminta perustuu kuumennettuun kaasuun, joka johdetaan vastavirtaan hakkeen kulkusuuntaan nähden. Kuivurin olennaispiirteenä on kuivauskaasun suljettu kierto laitteessa, jolloin kondensioenergia saadaan talteen ja hyödynnettyä kuivausprosessissa. Korkean lämpötilan kuivauksella säävutetaan useita hakkeen laatua parantavia ominaisuuksia tavanomaiseen kuivaukseen verrattuna. Näitä ovat muun muassa homehtumisriskin väheneminen ja tasalaatuisuus sekä kosteuden että ulkonäön osalta. Kuivurilla kuivattu hake on myös loppukosteudeltaan luonnonoloissa kuivattua kuivempaa.

Kuivuri (KUVIO 6) koostuu kattilasta, itse kuivurista ja hakesäiliöstä. Kuivuri saa kuivaustehonsa kattilasta, jolla kuumennetaan kuivauskaasu. Kattila on varustettu liikkuvalla arinalla ja se on teholtaan 500 kW.



KUVIO 6. Hakekuivuri kokonaisuudessaan. (CCM-Power.)

Kattila hyödyntää osan kuivurin kuivaamasta hakkeesta polttoaineena ja sen käyttöön menee 10 - 20 % kuivatusta hakkeesta. Kattilan tuottama lämpöenergia käytetään kuivurissa kiertävän kaasun lämmittämiseen. Kattilan luona kuumennettu kaasu syötetään kuivurin yläosaan. Kuivurin läpi menessään kaasu luovuttaa lämpöenergiansa hakkeen kuivaukseen, jonka jälkeen viilentynyt kaasu ohjataan kuivurin alaosasta takaisin kattilalle uudelleen kuumennettavaksi. Kuivauskaasun siirto tapahtuu puhaltimien avulla. Kuivauskaasun lämpötilaa voidaan säädellä tarpeen mukaan ja laitteessa voidaan käyttää huomattavasti veden höyrystymislämpötilaa korkeampia lämpötiloja. (Ahvensalmi 29.3.2011, keskustelu.)

Varsinainen kuivuriosa on muodoltaan lieriömäinen torni, jonka korkeus on noin viisi metriä (KUVIO 7). Kuivurin vetoisuus on noin viisi kuutiota ja hake kulkee kuivurissa jatkuvana virtana. Koeajoissa kuivurin kuivaama hakemäärä oli 0,75 – 1,25 m³ tunnissa. Kosteaa hake syötetään laitteeseen sen alaosasta, jonne se

siirtyy sulkusyöttimellä varustetulla ruuvilla. Kuivurin alaosasta hake nostetaan ylöspäin hydraulisesti. Laitteen sisällä on talikot, jotka pitävät hakepatjan paikallaan hakkeen nostojen välillä. Kuivurissa on kattavasti erilaisia antureita ja mittareita, jotka kertovat käyttäjälle prosessin kulusta ja ohjaavat automatiikkaa. Hake kulkee laitteen alaosasta kohti yläosaa, josta kuiva hake puretaan sulkusyöttimellä varustetun kuljettimen avulla. Sulkusyöttimet varmistavat kuivauskaasujen suljetun kierron. (Ahvensalmi 29.3.2011, keskustelu.)



KUVIO 7. Kuivuriosa ja kattila. Kuvassa on näkyvillä myös kuivauskaasun siirtoputket. (CCM-Power.)

Ylhäältä kuivuriin syötettävä kuuma kaasu virtaa alaspäin samalla kun hakepatja nousee hitaasti ylös. Puhallettavan kaasun lämpötila voi olla jopa yli 200 astetta. Kaasun lämpötila säädetään kuitenkin siten, ettei kuivattava hake pääse lämpenemään yli 130 asteiseksi. Kuivattavasta materiaalista haihtuva vesi pitää materiaalin lämpötilan kuivauskaasua viileämpänä. Materiaalin lämpötilaa pitää rajoittaa, jotta orgaanisten aineiden haihdunta ei olisi pyrolyysistä johtuen liian voimakasta. Samalla kun hake laitteen yläosassa kuivuu, kuivauskaasu kuljet-

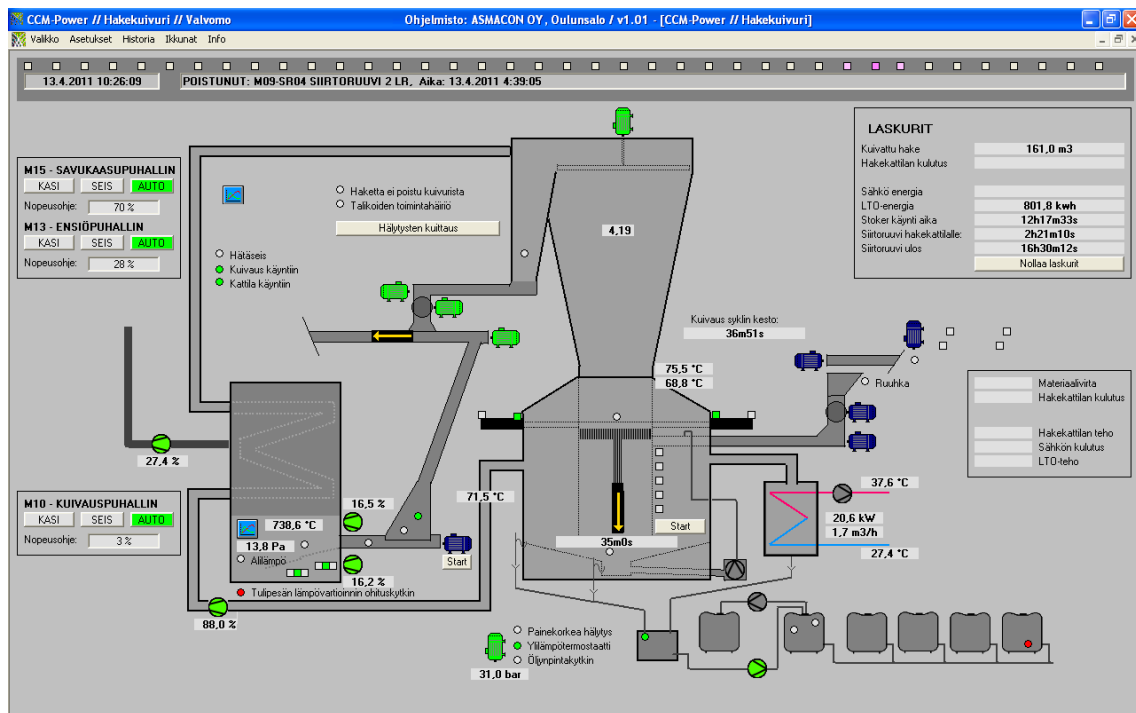
taa haihtuvan kosteuden laitteen alaosaan. Alhaalla vesihöyry tiivistyy takaisin vedeksi, kostuttaen samalla alhaalla olevaa haketta. Kondensioreaktio luovuttaa energiaa, mikä osaltaan esilämmittää vasta laitteeseen syötettyä haketta. Hakkeen kostuminen myös edesauttaa sen kuivumista, sillä se avaa puumassan pintasolukkoa, jolloin kuivuminen tehostuu. Kuivattavasta hakkeesta irronnut vesi kerätään talteen ja johdetaan putkistoa pitkin säiliöihin. (Patenttijulkaisu FI 122117 B 2011, hakupäivä 24.10.2011.)

Hakesäiliö on kuivurin osa, jonne kuivattava materiaali laitetaan ja josta se johdetaan kuivuriin ruuvikuljettimen avulla (KUVIO 8). Hakesäiliön rakenne on peräisin jo aiemmasta prototyypistä. Hakesäiliö toimii lähinnä hakkeen varastona ennen sen siirtämistä kuivuriin. Sen koko on kuitenkin järkevä pitää riittävän suurena, jottei sitä tarvitse täyttää jatkuvasti.



KUVIO 8. Kuvassa näkyvillä hakesäiliö, josta tuore hake johdetaan kuivuriin.

Kuivuria ohjataan tietokoneohjelman kautta (KUVIO 9). Sen avulla kuivuria voidaan ajaa automaattitilassa tai säätää sen toimintaa manuaalisesti. Säädettäviä arvoja ovat esimerkiksi kuivauskaasun lämpötilä, puhaltimen teho ja hakkeen virtausnopeus. Nämä arvot sovitetaan kuivattavan materiaalin ja halutun loppukosteuden mukaan. Eri materiaaleille voidaan myös luoda valmiita kuivausasetuksia. (Patenttijulkaisu FI 122117 B 2011, hakupäivä 24.10.2011.)



KUVIO 9. Näkymä kuivurin ohjausohjelmistosta, jolla hallitaan kuivurin toimintaja. (CCM-Power.)

8 HAKKEEN ANALYSOINTIMENETELMÄT

Hakekuivurin koeajoissa määritimme hake-eristä kosteuden, lämpöarvon sekä energiatiheuden. Alun perin tarkoitus oli määrittää myös hakkeen palakoko, mutta saatavilla ei ollut palakoon määrittämiseen tarvittavaa seulaa, joten emme pystyneet määrittämään palakokoa tarkasti. Laatuhakkeessa palakoko on käytön kannalta tärkeä laatuominaisuus. Hakkeen laatuominaisuuksien mittauksessa pyrimme noudattamaan CEN TC 335 mukaisia EN – standardeja mahdollisimman tarkasti luotettavien tulosten aikaansaamiseksi. (Biomass energy centre, hakupäivä 4.10.2011.) Joitain muutoksia menetelmiin oli kuitenkin tehtävä puutteellisten tarvikkeiden takia.

Hakkeen kosteus ja energiatiheys määritettiin hakekuivurin luona Shinshowan saha-alueella Haukiputaan Kellossa. Lämpöarvomääritykset tehtiin Oulun seudun ammattikorkeakoulun Tekniikan yksikön laboratoriossa, josta löytyy mittaukseen tarvittava pommikalorimetri ja muu välineistö.

8.1 Kosteus

Kosteuden määrittämiseen käytettiin CEN/TS 14774-2:2009 standardia, joka on niin sanottu yksinkertaistettu menetelmä kosteuden määrittämiseen. Laskemalla näyte-erän massamuutos kuivauksen aikana voidaan määrittää hakkeen kokonaiskosteus M_{ar} . Menetelmässä näyte kuivataan 105 +/- 2 asteisessa lämpökaapissa vakiopainoon, jolloin kaikki kosteus on haihtunut näytteestä. Yleensä 16 tunnin kuivatus riittää, kuivatusaika ei saa kuitenkaan ylittää 24 tuntia. Kuivattavan näytteen partikkelikoon tulee olla alle 30 mm. Näytteen massan tulee olla minimissään 300 g kun punnitustarkkuus on 0,1 g. 0,01 g punnitustarkkuudella voidaan käyttää myös vähintään 100 g:n näytteitä. Standardin mukaan yksi kuivattava näyte riittää, eikä tarvita välttämättä rinnakkaismäärityksiä. Tulos ilmoitetaan 0,1 %:n tarkkuudella. Kokonaiskosteus määritetään kaavan (1) avulla. (Lehtovaara 2010, hakupäivä 4.10.2011.)

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (1),$$

missä

M_{ar} kokonaiskosteus,

m_1 tyhjän kuivausastian massa (g),

m_2 kuivausastian ja näytteen massa (g) ennen kuivausta,

m_3 kuivausastian ja näytteen massa (g) kuivauksen jälkeen ja

m_4 pakkaukseen liittynyt kosteuden massa (g).

(Polttoaineen kosteuden määrittäminen 2005, 73.)

Kuivurin koeajojen aikana kosteusnäytteitä otettiin kolmesta erilaisesta hakkeesta sekä tuoreena että eri lämpötiloissa ja erilaisilla virtausnopeuksilla kuivattuina. Näin pystyttiin vertailemaan kuivauksen vaikutusta hakkeen kosteuteen. Näytteet otettiin pääsääntöisesti aamuisin ja iltaisin. Näin voitiin ottaa kuivuneet näytteet uunista ja laittaa seuraavat näytteet kuivumaan uuniin. Tyypillisesti näytteet olivat uunissa yli 16 tuntia mutta alle 24 tuntia. Aluksi kokeilimme 12 tunnin kuivausaikaa, mutta se todettiin riittämättömäksi. Ennen koeajoja, teimme kosteusnäytteiden tulosten tallentamista varten Excel-pohjan (LIITE 1), jonka tulostimme paperille. Pohjaa säilytettiin uunin läheisyydessä, jotta sitä oli helppo täyttää tuloksia laskiessa. Myös CCM – powerin henkilöstö otti kosteusnäytteitä ja merkitsi niitä ylös tulostamaamme taulukkoon. Taulukkoon tehtiin koeajojen aikana muutoksia, kun havaittiin mitä lisätietoja taulukkoon tuli merkittävä ja näin lisätä taulukon informatiivisuutta yritykselle. Lisätietoja olivat kuivauslämpötila ja puhaltimen teho. Näin kosteustaulukosta pystyi helpommin lukemaan millä kuivurin säädöillä kulloinenkin hake-erä oli kuivattu.

Tuoreesta hakkeesta näytteet otettiin kuivurin syöttösilosta kuivuria syöttävän ruuvien läheisyydestä. Ruuvien viereen syntyy pystysuora hakeseinämä (KUVIO 10), josta voi ottaa kattavan näytteen eri puolilta hakepatjaa. Syöttösilosta näyt-

teet nostettiin pitkään varteen kiinnitetyn astian avulla. Haketta nostettiin monta astiallista eri puolilta hakepatjaa ja koottiin niistä yksi kuivattava näyte.



KUVIO 10. Näkymä kuivurin syöttösiilosta purkuruuville.

Kuivurin läpi menneestä hakkeesta näytteet otettiin purkuruuvien alapuolella olevasta kontista. Näytteet koottiin eri puolilta ja eri syvyyksiltä hakekasaa. Hake tulee koneesta ulos höyryävän kuumana (KUVIO 11), joten kosteutta haihtuu hakkeesta vielä kasassakin. Siksi näytteiden annettiin tasaantua noin 15 minuuttia ennen näytteen viemistä uuniin.



KUVIO 11. Kuivurista ulos tulevaa höyryävää haketta.

Sekä tuoreesta että kuivurin läpi menneestä hakkeesta koottiin jokaisella näytteenotokerralla kahdet näytteet. Näin saatiin lisättyä mittausten tarkkuutta. Näytteet koottiin alumiinisiin kuivausastioihin, joihin näytettä tuli noin 30 – 50 mm kerros. Tässä kohtaa standardin suositus ylitettiin. Punnituksessa käytösämme ollut vaaka antoi tuloksen yhden gramman tarkkuudella, standardin suositteleman 0,1 g sijaan. Siksi näytteiden kooksi otettiin 350 - 500 g, jotta pystyttiin vähentämään vaa'an epätarkkuudesta aiheutuvaa pyöristystä. Vaikka näytteiden koko oli standardia suurempi, riitti 16 - 24 kuivatus kuivattamaan näytteet kokonaan. Näin ollen mittausten tuloksia voidaan pitää uskottavina standardista poikkeamisesta huolimatta.

Ennen näytteiden uuniin laittoa punnittiin tyhjän kuivausastian paino (m_1) ja näytteen ja astian yhteispaino ennen kuivausta (m_2). Punnituksen jälkeen näytteet numeroitiin. Numerointi tapahtui haketyypin mukaan. Numeroinnissa ensimmäinen luku tarkoittaa haketyypin ja pisteen jälkeinen luku on näytenumero juoksevassa järjestyksessä. Näytenumeron jälkeinen K-kirjain tarkoittaa kuivurin läpi mennyttä näyte-erää. Esimerkiksi näytenumero 1.3K tarkoittaa kuivurin läpi mennyttä selluhakenäytettä numero kolme. Numeroinnin jälkeen näytteet laitet-

tiin kuivatusuuniin (KUVIO 12). Kuivatusuunin standardin mukainen 105 asteen lämpötila varmistettiin uunin oman sekä uunin sisällä pidetyn lämpömittarin avulla. Näin varmistettiin, että kuivatusolot pysyivät vakiona.



KUVIO 12. Kosteusnäytteitä kuivumassa kuivatusuunissa.

Kuivatuksen jälkeen näytteet otettiin ulos uunista ja kuivausastian ja näytteen massa (m_3) punnittiin välittömästi tämän jälkeen, jotta kosteus ei ehtinyt imeytyä puuhun. Kuivatusastiaan imeytynyttä kosteutta (m_4) ei tarvinnut laskuissa huomioida, koska se on tässä tapauksessa nolla.

Muutamia kosteusnäytteitä jouduimme koeajojen aikana hylkäämään, sillä osa ei ollut ehtinyt kuivua 12 tunnin kuivatuksessa. Muutama näyte oli myös uunissa useamman vuorokauden sekaannuksen vuoksi. Pitkään uunissa olleita näytteitä ei voi ottaa tuloksissa huomioon, koska niistä on voinut haihtua orgaanisia aineita, mikä vääristää tuloksia.

8.2 Lämpöarvo

Hakkeen lämpöarvomääritykset suoritettiin Oulun Seudun Ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Lämpöarvomäärityksiä tehtiin kaiken kaikkiaan viitenä eri päivänä, joista ensimmäisenä päivänä opeteltiin lähinnä pommikalorimetrin ja muiden laitteiden käyttöä. Testit suoritettiin CEN/TS 14918 standardia mukailleen. Laboratoriossa määritettiin hakenäytteiden kalorimetriset lämpöarvot kuiva-aineessa (KAAVA 2). Puun tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa sekä saapumistilan lämpöarvo ovat laskennallisia suureita, jotka määritetään muunnoskaavojen avulla (KAAVA 3 & 4). (Lehtovaara 2010, hakupäivä 8.10.2011.)

Lämpöarvomäärityksiin näytteet koottiin hakkeesta, joihin oli tehty kosteusmääritys. Näin saatiin käsiteltävyydeltään sopivaa materiaalia, joka on helppo jauhaa ja puristaa tabletiksi lämpöarvomäärityksiä varten. Yritimme käyttää myös tuoretta haketta, mutta kosteus teki käsittelyn vaikeaksi. Kostean hakkeen jauhatus oli vaikeaa ja rasittaa jauhatusmyllyn moottoria. Myös tabletiksi puristaminen oli vaikea, sillä hakejauheesta tihkuva vesi jumitti pillerimuotin.

Lämpöarvonäytteisiin kerättiin materiaali kahdesta rinnakkaisesta kosteudenmääritysnäytteestä. Näin saatiin keskimäärin edustavampi näyte kulloinkin testatusta haketyypistä. Omat näytteensä tehtiin sekä kuivurin läpi menneestä että vastaavasta tuoreesta hakkeesta. Tällä tavalla voitiin vertailla mahdollisia korkean lämpötilan kuivauksen aiheuttamia muutoksia hakkeen lämpöarvossa. Näytteet kerättiin minigrip pusseihin ja ne säilöttiin valolta suojassa. Pisimmillään näytteet olivat varastossa ennen testejä muutaman päivän. Pitempiaikainen säilytys tulisi tehdä viileässä tilassa.

Ennen kuin hakkeen lämpöarvo voitiin määrittää, käsiteltiin hake sopivaan muotoon. Lisäksi puuaineksen analyysikosteus tulee määrittää. Aluksi hake jauhattiin hienoksi jauheeksi (KUVIO 13). Jauhatukseen valittiin haketta mahdollisimman tasapuolisesti. Näin pyrittiin välttämään esimerkiksi koivun kuoren liiallinen osuus jauheessa, joka voisi nostaa lämpöarvoa. Jauhatusmyllyssä voidaan käyttää erikokoisia seuloja halutun karkeuden saavuttamiseksi. Käytössämme oli 2 mm ja 0,5 mm seulat. Testeissä totesimme, että 2 mm seulalla saadaan

sopiva jauheen hienous. Hienommalla 0,5 mm seulalla jauhetulla hakkeella tuli pommikalorimetrissä enemmän epätäydellisesti palaneita näytteitä.



KUVIO 13. Hakkeen jauhamista lämpöarvomääritystä varten.

Seuraavaksi jauhetusta hakkeesta puristettiin standardin mukainen tabletti, joka on massaltaan 0,5-1 g. (Alakangas 2000, hakupäivä 8.10.2011). Tablettikoko pyrittiin pitämään mahdollisimman tasalaatuisena. Jauhetta laitettiin tabletti-muottiin, jonka jälkeen se puristettiin prässissä kymmenen tonnin paineella tablettimuotoon (KUVIO 14). Tabletteja käsiteltiin ainoastaan pinseteillä, jolloin vältettiin rasvan tarttuminen niihin (KUVIO 15).

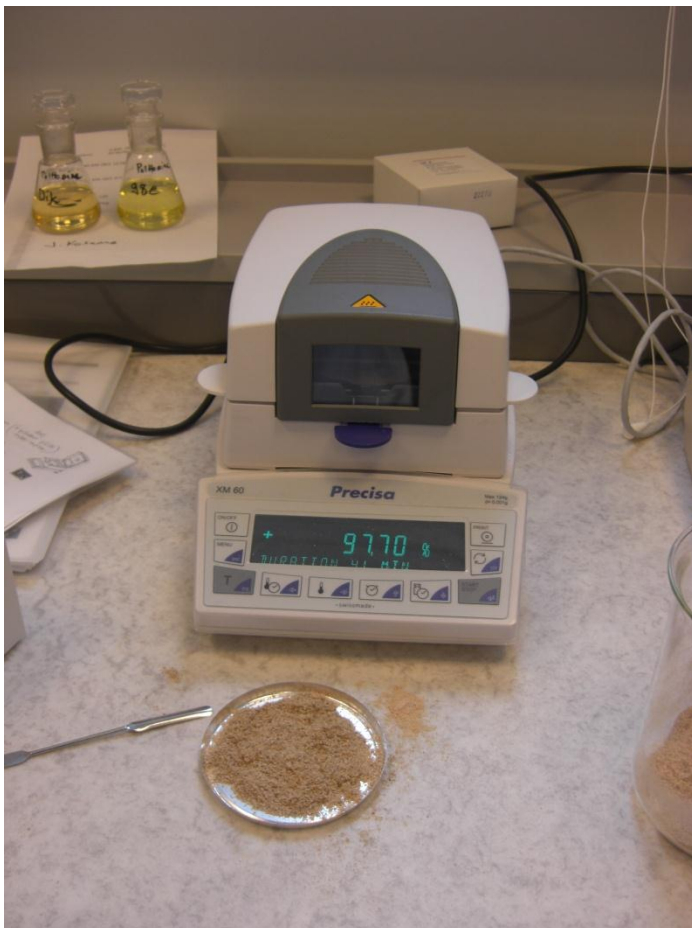


KUVIO 14. Jauhetabletti prässättyinä ohjeen mukaisella paineella.



KUVIO 15. Valmiin tabletin käsittelyä.

Ennen lämpöarvomääritystä jauhetusta hakkeesta määritettiin vielä analyysikosteus pikakosteusmittarilla (KUVIO 16). Ennen kosteuden määrittystä jauheen annettiin tasaantua huoneilmassa noin 20 minuuttia, jotta saatiin selville, paljonko jauhe imee kosteutta huoneilmasta. Analyysikosteus otettiin huomioon kuiva-aineen kalorimetristä lämpöarvoa laskiessa.



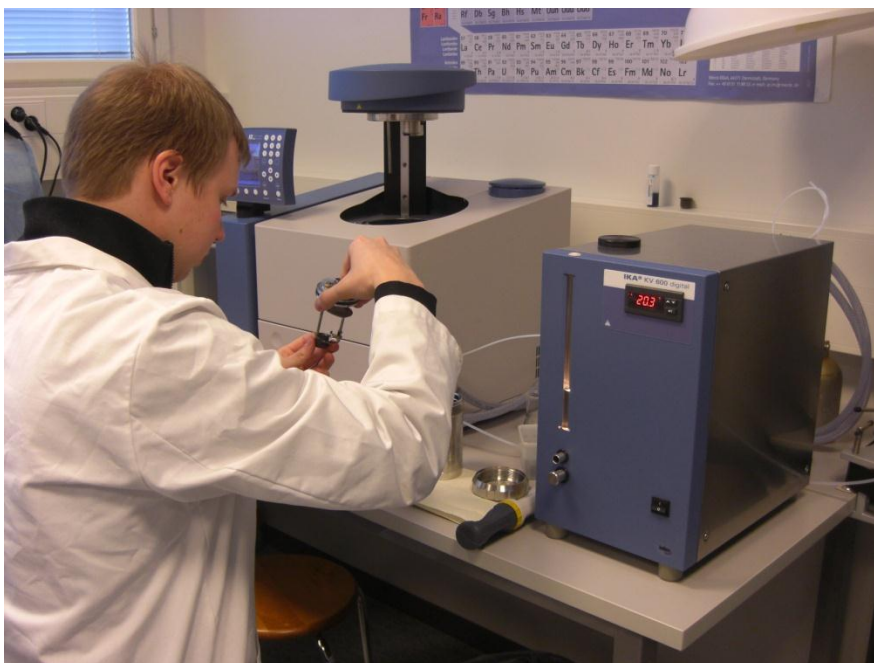
KUVIO 16. Pikakosteusmittari ja hakejauhetta tasaantumassa.

Laboratoriossa oli käytössämme IKA C5000 pommikalorimetri. Pommikalorimetrisä näyte poltetaan happi-ilmakehässä veden ympäröimässä suljetussa tilassa ja vapautuva lämpömäärä mitataan. Laitteessa reaktio tapahtuu vakiotilavuudessa, jolloin sisäenergian muutos on sama kuin vapautuva lämpömäärä. Näytteen polttaminen siirtää lämpöenergiaa pommia ympäröivään veteen nostamalla sen lämpötilaa. Pommikalorimetri mittaa tätä lämpötilan nousua. Lämpöti-

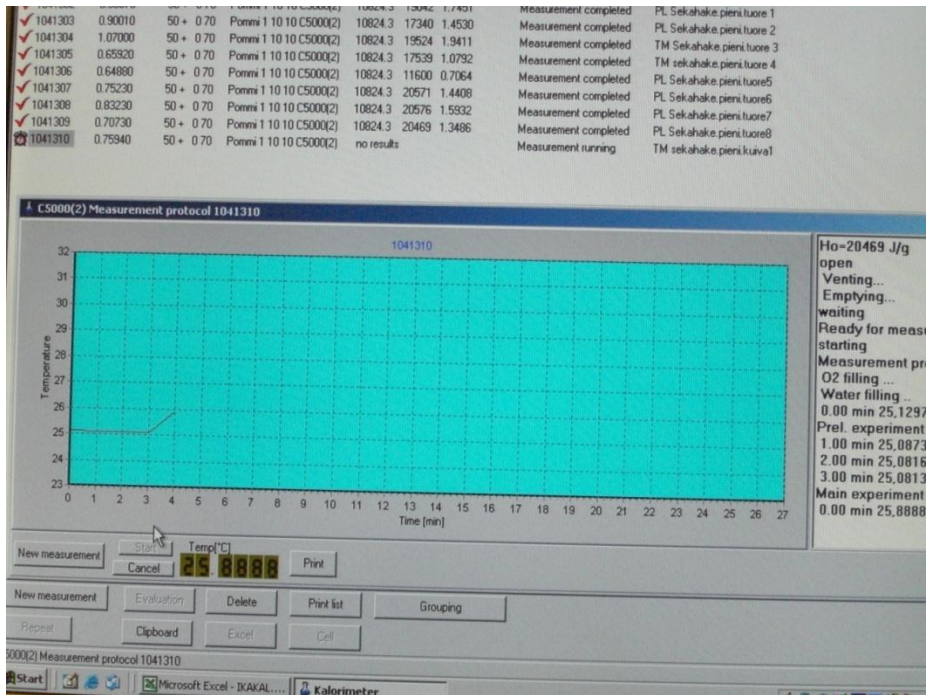
lan muutoksen perusteella voidaan laskea vapautuva lämpömäärä. Tarkkojen tulosten saamiseksi oli pommikalorimetrille määritettävä lämpökapasiteetti. Lämpökapasiteetti vastaa lämpömäärää, joka tarvitaan nostamaan kalorimetrin lämpötilaa yhdellä asteella. Lämpökapasiteetti kalibroitiin lämpöarvomäärityksissä polttamalla pommissa bentsoehappotabletti, jonka sisältämä energiamäärä tunnettiin. Näin varmistettiin tulosten oikeellisuus. (Kuokkanen, Kolppanen & Kuokkanen, hakupäivä 10.10.2011.)

Ennen näytteiden oton aloittamista pommikalorimetri valmisteltiin käyttöä varten. Happipullo avattiin ja tarvittaessa jäähdytysnestettä lisättiin laitteeseen. Tämän jälkeen laitteen annettiin tasaantua käyttölämpötilaan. Ennen hakenäytteiden lämpöarvon määrittämistä poltettiin pommissa bentsoehappotabletti.

Laitteessa näyte kootaan niin sanottuun pommiin (KUVIO 17). Pommi koostuu pohjaosasta sekä siihen ruuvattavasta kannesta. Pommin pohjalle laitetaan puhdistettua vettä 5 ml. Kansiosaan kiinnitetään sytytyslanka ja näyte upokkaassa. Näyte pitää punnita ennen upokkaaseen asettamista, jotta tietokoneelle osataan syöttää oikeat arvot. Suurin osa laitteen toiminnoista tapahtuu tietokoneohjelman kautta. Ohjelma esimerkiksi piirtää käyrän polton edistymisestä (KUVIO 18).



KUVIO 17. Pommin kokoamista ennen lämpöarvon määrittämistä.



KUVIO 18. Näytteen palamisen edistyminen näkyy pommikalorimetrin ohjausohjelmassa.

Testipolttojen jälkeen voitiin aloittaa haketablettien poltto. Jokaista tablettia varten pommi piti koota aina uudestaan. Testeissä poltimme kolme rinnakkaisnäytettä vaikka standardin mukaan kaksi riittää. Standardin mukaan rinnakkaisnäytteiden lämpöarvojen ero sai olla korkeintaan 0,120 MJ/kg. Ongelmia kokeissa aiheutti haketablettien epätäydellinen palaminen. Kun pommiin jäi palamatonta puuta, tulos jäi todellista tulosta pienemmäksi. Pahimmillaan jouduimme polttamaan pommikalorimetrissä kahdeksan tablettia ennen kuin saimme tarvittavat kolme tablettia poltettua täydellisesti. Palamista yritettiin parantaa laittamalla näyte erilliseen polttopussiin, mutta siitä ei ollut apua.

Pommikalorimetri ilmoittaa tuloksen ilma-kuivan näytteen kalorimetrisenä lämpöarvona. Tulos muutetaan absoluuttisen kuivan näytteen kalorimetriseksi lämpöarvoksi muunnoskaavan (2) avulla. Tässä vaiheessa tulee tuntee myös näytteen analysikosteus. (Alakangas 2000, hakupäivä 10.10.2011.)

$$Q_{gr,d} = Q_{gr,ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (2),$$

missä

$Q_{gr,d}$ Kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo (MJ/kg),

$Q_{gr,ad}$ analyysikostean (ilmakuivan) näytteen kalorimetrinen lämpöarvo ja

M_{ad} näytteen (ilmakuivan) analyysikosteus (%).

(Alakangas 2000, hakupäivä 10.10.2011.)

Kun absoluuttisen kuivan puun kalorimetrinen lämpöarvo on saatu selville, voidaan siitä johtaa puun tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa. Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan yleisimmin tässä muodossa. Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa voidaan laskea kaavan (3) avulla.

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - 2,443 \times 0,09H = Q_{gr,d} - 0,219H \quad (3),$$

missä

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

$Q_{gr,d}$ kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo (MJ/kg) ja

H polttoaineen vetytitoisuus % (taulukkoarvo).

(Hakkila 2003, 27.)

Tehollisen lämpöarvon laskennassa käytimme standardista poikkeavaa, yksinkertaistettua kaavaa, jossa polttoaineen kuiva-aineen vedyn palaessa syntyvän prosentuaalisen vesimäärän likiarvo on jo valmiiksi laskettu (Alakangas 2000, hakupäivä 11.10.2011). Käyttämässämme kaavassa kerroin 0,09 osoittaa absoluuttisen kuivassa puussa olevasta vedystä syntyvän veden määrän, kun yksi

osa vetyä yhdistyy kahdeksaan osaan happea ja muodostaa näin ollen yhdeksän osaa vettä. Puun vetyttöisyys on keskimäärin 6 % ja tätä arvoa käytimme myös omissa laskelmissa. Kalorimetrinen ja tehollisen lämpöarvon erotus on absoluuttisen kuivassa puussa noin $0,22 \times 6$ eli 1,3 MJ/kg. (Hakkila 2003, 27.) Puun kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta voidaan johtaa puun tehollinen lämpöarvo saapumistilassa kaavan (4) mukaan. Polttoaineen kosteudella on ratkaiseva merkitys saapumistilaisen lämpöarvon suuruuteen.

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{net,d}} \times \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100} - 0,02443 \times M_{\text{ar}} \quad (4),$$

missä

$Q_{\text{net,ar}}$ Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg),

$Q_{\text{net,d}}$ kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (MJ/kg) ja

M_{ar} vastaavan polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa (%).

(Alakangas 2010, hakupäivä 11.10.2011)

Saapumistilainen lämpöarvo muutettiin vielä muunnosluvun avulla siten, että yksiköksi saatiin MWh/tonni. Luvun avulla voidaan arvioida polttoaineen sisältämää energiamäärää poltettaessa. Luku saadaan kun saapumistilainen lämpöarvo jaetaan 3,6:lla. (Polttoaineen kosteuden määrittäminen 2005, 73.)

8.3 Energiatiheys

Energiatiheys oli kolmas hake-eristä mitattu laatuominaisuus. Energiatiheyden laskemista varten tulee tuntea hakkeen irtotiheys ja tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Kun tarvittavat arvot olivat tiedossa, laskettiin energiatiheys kaavan (5) mukaisesti.

$$E_{ar} = \frac{1}{3600} \times Q_{net,ar} \times BD_{ar} \quad (5),$$

missä

E_{ar} Saapumistilaisen polttoaineen energiatiheys (MWh/i-m³),

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

BD_{ar} saapumistilaisen polttoaineen irtotiheys (kg/i-m³) ja

1/3600 energiayksikön muunnoskerroin (MWh/MJ).

(Alakangas 2000 hakupäivä 14.10.2011; Energiatiheyden laskenta 2005, 74.)

Hakkeen saapumistilainen lämpöarvo saatiin lämpöarvomääritysten kautta. Irtotiheyden laskemiseen hankimme tarvittavia välineitä, joita olivat 40 litran astia ja vaaka. Energiatiheyden laskenta otettiin testeihin mukaan koeajojen loppuvaiheessa, joten saimme laskettua tuoreen ja kuivatun hakkeen energiatiheiden ainoastaan lauluhakkeelle. Selluhakkeelle ja sekahakkeelle saimme laskettua ainoastaan tuoreen hakkeen energiatiheiden, sillä kuivattua haketta ei ollut enää saatavilla.

Irtotiheys määritettiin CEN/TS 15103 standardia mukaillen. Erona oli, että meillä käytössä oli 40 litran astia 50 litran sijaan ja vaa'an tarkkuus oli puutteellinen. Tämä johtui siitä, ettei sopivan kokoista astiaa ollut kaupassa saatavilla ja hankkimamme vaaka oli henkilövaaka, joka hankittiin yrityksen pyynnöstä. (Alakangas 2010, hakupäivä 14.10.2011.) Työmenetelmät olivat kuitenkin standardin mukaisia, joten tuloksia voidaan pitää ainakin suuntaa-antavina. Tulokset olivat myös linjassa taulukkoarvojen kanssa.

Irtotiheyden määrittäminen aloitettiin täyttämällä astia lapiolla kukkuroilleen. Tämän jälkeen astia pudotettiin kaksi kertaa noin 20 senttimetrin korkeudelta. Näin hake tiivistyy lähemmäs todellista kuormatiiviyttä. Tämän jälkeen astia tassaattiin käyttäen apuna suoraa laudanpätäkää. Lopuksi näyte punnittiin vaa'alla. Saatu punnitustulos kerrottiin 25:llä jotta päästään tuhannen litran ja samalla kuutiometrin painoon. (Alakangas 2010, hakupäivä 14.10.2011.)

9 KUIVURIN KOEAJOT JA NIIDEN TULOKSET

Kuivurin koeajot suoritettiin 28.3. - 13.4.2011. Laitte sijaitti Kellossa Shinshowa Oy:n omistaman sahan alueella. Paikka oli koeajojen kannalta käytännöllinen, sillä sahalla saatiin käyttöön selluhaketta kuivurin testiajoja varten. Testien tarkoituksena oli selvittää laitteen toimivuutta ja saada se toimimaan vakaasti jatkuvatoimisena. Me osallistuimme koeajoissa näytteiden oton suunnitteluun ja teimme excel laskupohjat tulosten tallentamista, laskemista ja vertailua varten. Vastuullamme oli myös näytteiden ottaminen ja niiden analysointi. Näytteiden avulla määritettiin vastavirtakuivauksen vaikutusta hakkeen laatuominaisuuksiin. Määritettyjä laatuominaisuuksia olivat hakkeen kosteus, lämpöarvo sekä energiatiheys. Kaikkia mittauksissa saatuja tuloksia verrattiin taulukkoarvoihin (LIITE 2). Koeajojen aikana kuivurissa testattiin kolmenlaista haketyyppiä, jotka eroavat toisistaan raaka-aineen, tuorekosteuden sekä palakoon mukaan. Eri haketyyppejä testaamalla yritys sai tietoa laitteen toimivuudesta kunkin haketyypin kohdalla. Koeajoissa tehtyjen havaintojen avulla laitteeseen tehtiin pieniä muutoksia koeajojen aikana. Havainnot ovat toimineet pohjana myös uuden kuivuriprototyypin suunnittelussa.

9.1 Selluhake

Koeajot aloitettiin selluhakkeella (KUVIO 19), jota oli saha-alueella paljon saatavilla. Normaalisti selluhake käytetään sahan omalla lämpölaitoksella energian tuotantoon. Koeajot selluhakkeella suoritettiin 28.3 - 8.4.2011. Laitetta testattiin jaksoittain vaihdellen lämpötilaa, virtausta ja puhaltimen tehoa. Selluhakkeella kuivauskaasun lämpötila oli aluksi 160 astetta ja se nostettiin vaiheittain aina 230 asteeseen. Virtausnopeutta muutettiin siten, että hakkeen viipymä koneessa piteni. Kosteusnäytteitä pyrittiin ottamaan kaikilla kuivurin lämpöasetuksilla. Koeajojen alussa näytteenottotapojen harjoittelu vei aikaa ja osa näytteistä täytyi hylätä tämän takia. Selluhakkeen koeajot antoivat myös yritykselle lisätietoa

kuivuriin tehtävistä parannuksista ennen siirtymistä laatuhakkeen koeajoihin. Laatuhakkeella on suurempi merkitys kuivurin mahdollisen käyttökohteen kannalta.



KUVIO 19. Selluhaketta kasassa. Kuvasta havaittavissa suuri palakoko. (CCM-Power)

Ensimmäiset kuivaukset tehtiin 160 asteen lämmöllä. Kosteusmääritykset näistä eristä epäonnistuivat, sillä pidimme näytteitä uunissa vain 12 tunnin ajan, jolloin näytteet eivät ehtineet täysin kuivua. (TAULUKKO 1) Ensimmäiset pätevät näytteet ovat 180 asteen lämpötilassa kuivatusta erästä. Taulukossa kuivauslämmöllä tarkoitetaan kuivauskaasun lämpötilaa koneeseen mennessä. Virtausnopeus tarkoittaa tunnissa koneen läpi menevää hakemäärää. Puhaltimen teho kuvaa kuivauskaasujen kierrätykseen tarkoitetun puhaltimen tehoa. Taulukon kosteusarvot ovat useiden näytteiden keskiarvoja.

TAULUKKO 1. Selluhakkeen kosteuksia eri kuivauslämpötiloilla ja virtausnopeuksilla.

Kuivauslämpö	Virtausnopeus m ³ /h	Puhaltimen teho	Näyte	Kosteus %
-	-	-	Tuore	57,9
160	1,5	80 %	Kuivattu	ei tulosta
180	1,5	80 %	Kuivattu	48,3
Lauhdutin otettu käyttöön				
190	0,75	80 %	Kuivattu	25,9
200	0,75	80 %	Kuivattu	17,0
210	1	80 %	Kuivattu	38,0
220	0,75	80 %	Kuivattu	7,6
230	1	80 %	Kuivattu	36,2

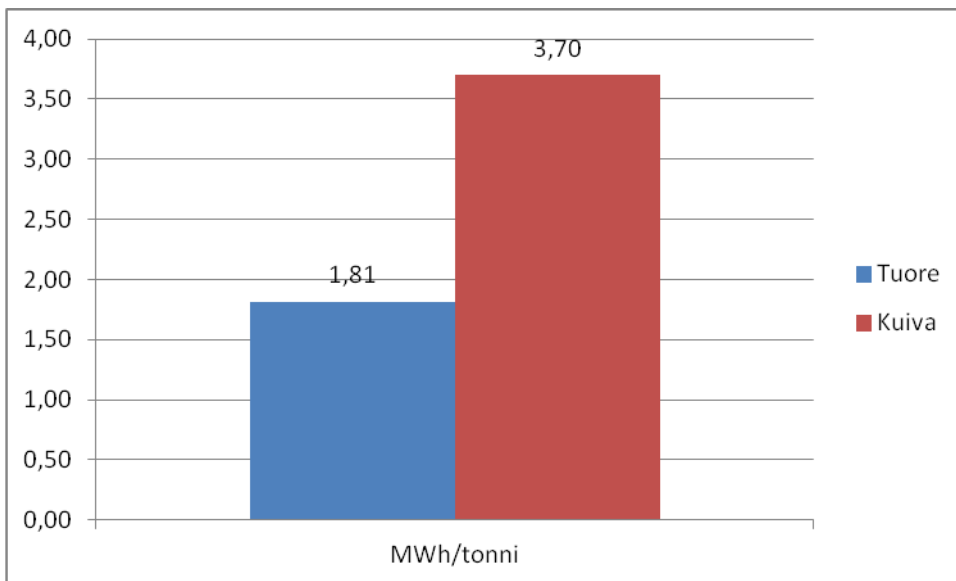
Pian testien aloittamisen jälkeen havaittiin puutteita laitteistossa. Tämän seurauksena otettiin käyttöön lauhdutin, joka tehosti kuivausta huomattavasti. Koska selluhake on palakooltaan suurta, pääsee kuivauskaasu helpommin hakepatjan läpi myös pienemmällä puhaltimen teholla. Hitaalla virtauksella ja suurella 220 asteen kuivauslämmöllä hake kuivui todella alhaiseen pellettiluokan kuivuuteen. Tuloksista huomattiin, että mikäli virtausnopeutta laskettiin riittävän hitaaksi, tehostui kuivuminen huomattavasti. Toisaalta kovilla lämpötiloilla vaarana on, että hake alkaa hitaasti virratessaan hiiltä, minkä oletetaan heikentävän poltt ominaisuuksia, koska suuri osa orgaanisista aineista voi päästä haihtumaan.

Selluhakkeesta määritettiin lämpöarvoja 190 asteen lämpötilassa kuivatusta erästä sekä tuoreesta hakkeesta. Kalorimetrinen lämpöarvo määritettiin kolmen rinnakkaisnäytteen keskiarvosta. Tätä keskiarvoa on käytetty laskettaessa tehollista lämpöarvoa kuiva-aineessa ja saapumistilassa. Tuloksista (TAULUKKO 2.) voidaan havaita, ettei kuivauksella ollut suurta vaikutusta hakkeesta haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin. Vaikka kuivauskaasu on riittävän kuivaa aiheuttaakseen pyrolyysin, ei kuivattavan hakkeen lämpötila kuitenkaan nouse riittävän korkeaksi pyrolyysia varten. Hakkeesta haihtuva vesi pitää hakkeen lämpötilan matalampana niin kauan kuin puussa riittää kosteutta. (Patenttijulkaisu FI 122117 B 2011, hakupäivä 24.10.2011.)

TAULUKKO 2. Selluhakkeen lämpöarvojen muutos kuivauksen aikana.

Näyte	Kalorimetrinen lämpöarvo MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	Lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg
Tuore	20,170	18,85	6,39
Kuivattu	20,143	18,82	13,32

Koska hakkeesta poistuu kuivauksen aikana paljon vettä, vaikuttaa se merkittävästi sen lämpöarvoon saapumistilassa. Tällä on ratkaiseva merkitys haketta poltettaessa saatavaan energiaan. Saapumistilainen lämpöarvo voidaan muuttaa megawattitunneiksi tonnia kohden (KUVIO 20). Kun tuoreen hakkeen kosteus oli noin 58 % ja kuivatun hakkeen kosteus noin 26 % oli kuivatusta hakkeesta poltossa saatava energiamäärä yli kaksinkertainen verrattuna tuoreeseen.



KUVIO 20. Kuivauksen vaikutus selluhakkeen energiamäärään.

Kuivauksen vaikutusta selluhakkeen energiatihyteen emme voineet määrittää, sillä saimme tarvittavat laitteet käyttöömmme vasta laatuhakkeen koeajoihin. Tuo-

reen selluhakkeen energiatiheys oli 0,66 MWh/i-m³. Tulos on linjassa sahakkeen taulukkoarvojen kanssa. (LIITE 2)

Kuivauksen vaikutus oli selluhakkeen laatuominaisuuksia parantava. Kosteus saatiin kuivauksella laskemaan tehokkaasti ilman, että sillä oli suurta vaikutusta puun orgaanisiin aineisiin. Tämänkaltaisen hakkeen kuivauksen kustannustehokkuus ei ole yrityksen mukaan kovin hyvä. Toisaalta kuivuria ei ole myöskään ensisijaisesti suunniteltu tavallisen, suurissa laitoksissa käytettävän polttohakkeen kuivaukseen.

9.2 Sekahake

Sekahaketta testattiin 11.4 - 12.4.2011. Sekahake oli pienipalakokoista ja sisälsi runsaasti hienoainesta. Yritys halusi selvittää kuivurin toimivuutta tämän tyyppisellä hakkeella ennen laatuhakkeen koeajoihin siirtymistä. Tuorekosteudeltaan sekahake on selkeästi selluhaketta kuivempaa, sillä se sisältää myös puun sydänosia. Lähtöoletuksena oli, että pienestä palakoosta johtuen hake kulkee kuivurin läpi tiiviinä kasana ja hienoaines tiivistää kasaa entisestään. Tämän oletettiin vaikeuttavan kuivauskaasun kulkua hakepatjan läpi, joka heikentää kuivaustehoa. Kosteusmäärittelyissä selvisi, että oletukset pitivät myös paikkansa (TAULUKKO 3). Vaikka sekahaketta kuivattiin korkealla 225 asteen lämpötilalla, hitaalla virtausnopeudella ja kovalla puhaltimen teholla, ei kuivuminen ollut yhtä tehokasta kuin selluhakkeella.

TAULUKKO 3. Sekahakkeen kosteus tuoreena ja kuivattuna.

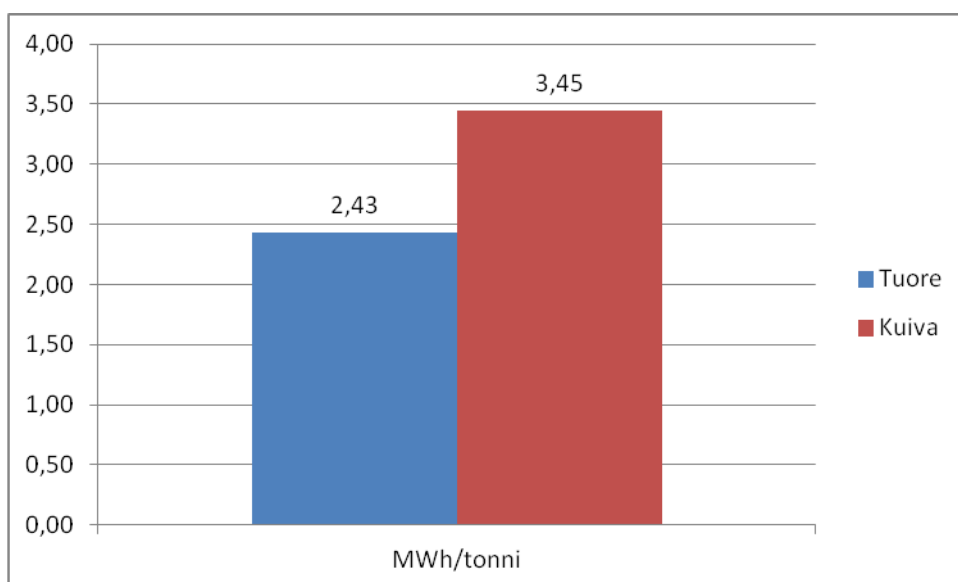
Kuivauslämpö	Virtausnopeus m ³ /h	Puhaltimen teho	Näyte	Kosteus %
-	-	-	Tuore	48,9
225	0,75	90 %	Kuivattu	31,9

Puun kalorimetriseen tai teholliseen lämpöarvoon kuiva-aineessa ei kuivauksella ollut suurta vaikutusta (TAULUKKO 4). Ero tuoreen ja kuivatun hakkeen välil-

lä oli kuitenkin selluhaketta suurempi. Pienen muutoksen oletetaan johtuvan yli 30 %:n loppukosteudesta. Näin korkea kosteus hidastaa orgaanisten ainesten haihtumista. Saapumistilaiseen lämpöarvoon kuivaus vaikutti siten, että kuiva-
tun hakkeen saapumistilainen lämpöarvo oli 42 % tuoretta haketta suurempi.

TAULUKKO 4. Sekahakkeen lämpöarvojen muutos kuivauksen aikana.

Näyte	Kalorimetrinen lämpöarvo MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	Lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg
Tuore	20,782	19,46	8,76
Kuivattu	20,689	19,37	12,41



KUVIO 21. Kuivauksen vaikutus sekahakkeen energiamäärään.

Muutokset puun saapumistilaiseen lämpöarvoon ja täten energiamäärään (KUVIO 21) eivät olleet sekahakkeella niin merkittävät kuin selluhakkeella, johtuen pääosin sekahakkeen pienemmästä tuorekosteudesta. Muutokseen vaikutti myös sekahakkeen suurempi tiheys, joka heikensi tuloksia.

Sekahakkeen energiatihyyttä kuivattuna emme myöskään voineet määrittää johtuen samasta syystä kuin aiemminkin. Tuoreen selluhakkeen energiatiheys kuitenkin mitattiin ja se oli 0,78 MWh/i-m³. Tämä tulos on myös myös linjassa taulukkoarvojen kanssa.

9.3 Laatuhaake

Suurin mielenkiinto koeajoissa kohdistui kuivurin toimivuuteen laatuhaakkeen tuotannossa. Palakooltaan laatuhaake vastasi sekahaketta, mutta hienoaineen määrä oli vähäisempi (KUVIO 22). Laatuhaakkeen koeajoilla oli kiire, sillä riittävä määrä kuivattua haketta piti saada valmiiksi polttokoetta varten. Lopulta koeajot keskeytyivät kuivurin tekniseen vikaan. Laatuhaakkeen tuotanto on yksi yrityksen kuivurille suunnittelemissa käyttökohteista. Kuivurin avulla laatuhaakkeen kosteus saadaan lähelle pelletin kosteutta, jolloin siitä saadaan poltettaessa mahdollisimman paljon energiaa irti. Laatuhaakkeella olisikin mahdollisesti tarkoitus korvata pelletin käyttöä. Irtoaines vaikeuttaa pelletin korvaamista laatuhaakkeella, joten myytävä tuote pitäisi seuloa ennen käyttöä tasakokoiseksi. Seulan asentamista kuivurin purkuruuvien yhteyteen koetettiin, mutta se estyi teknisten ongelmien takia. Laatuhaakkeen koeajot suoritettiin 12.4 - 13.4.2011.



KUVIO 22. Laatuhaaketta kasassa. Auton avaimet havainnollistavat hakkeen palakokoa.

Koeajojen aikana kuivurin säädöt pidettiin samana, jotta koepolttoihin menevä hake olisi mahdollisimman tasalaatuista. Kokemukset aiemmista koeajoista helpottivat koneen säätämistä. Kuivauslämpönä oli 215 astetta. Virtausnopeutta oli hieman nostettu ja puhaltimen tehoa laskettu sekahakkeen koeajoista (TAULUKKO 5).

TAULUKKO 5. Laatuhakkeen kosteus tuoreena ja kuivattuna

Kuivauslämpö	Virtausnopeus m ³ /h	Puhaltimen teho	Näyte	Kosteus %
-	-	-	Tuore	44,9
215	1,00	88 %	Kuivattu	27,2

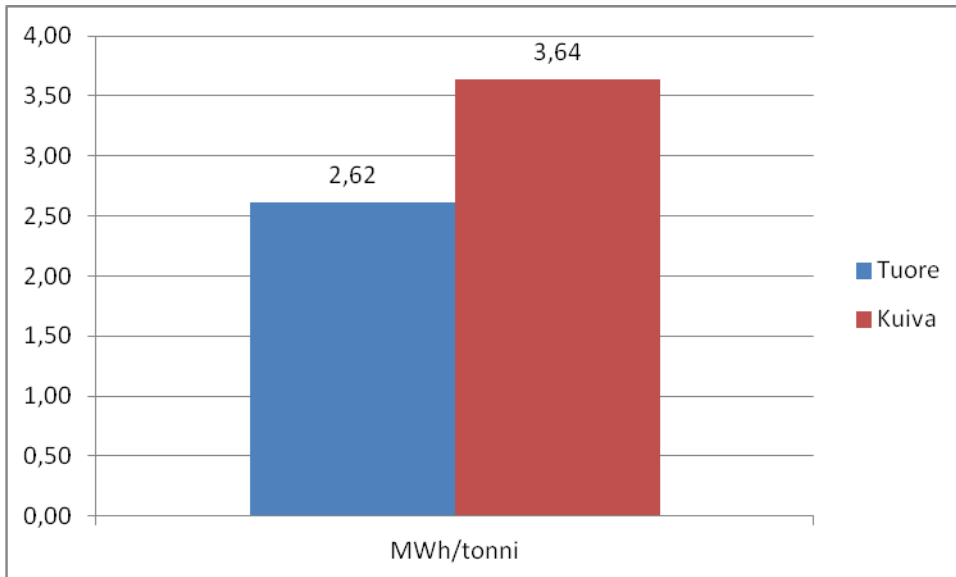
Laatuhakkeen tuorekosteus oli koeajoissa testattavista haketyypeistä alhaisin. Tiivis hakepatja aiheutti jälleen haasteita koneen toiminnalle. Kosteus saatiin kuitenkin laskemaan alle 30 %:n. Luonnonolosuhteissa tapahtuvassa kuivauksessa päästään harvoin näin alhaisiin lukemiin. Myytävän laatuhakkeen tavoitekosteuden tulisi kuitenkin olla alle 20 %.

Laatuhakkeen lämpöarvoissa havaittiin suurin muutos koeajojen aikana (TAULUKKO 6). Tämän oletetaan johtuvan korkeasta kuivauslämpötilasta yhdistettynä matalaan loppukosteuteen. Alhaisiin kosteuksiin kuivuessaan hake lämpee paljon kuivauksen loppuvaiheessa, jolloin myös orgaanisten aineiden haihtuminen lisääntyy. Kuitenkin kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo laski vain 1,1 %. Tällä ei ole käytännön vaikutusta laatuhakkeen polttamisen kannalta.

TAULUKKO 6. Laatuhakkeen lämpöarvojen muutos kuivauksen aikana

Näyte	Kalorimetrinen lämpöarvo MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	Lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg
Tuore	20,414	19,09	9,43
Kuivattu	20,208	18,89	13,10

Kosteuden haihtumisen seurauksena laatuhaakkeen saapumistilainen lämpöarvo nousi kuitenkin 39 %. Energiämäärä tonnia kohden hakkeessa nousi vastaavasti saman verran. (KUVIO 23)



KUVIO 23. Kuivauksen vaikutus laatuhaakkeen energiämäärään.

Laatuhaakkeesta saimme mitattua hakkeen energiatiheyden sekä tuoreena, että kuivauksen jälkeen. (TAULUKKO 7.) Kuivatun laatuhaakkeen energiatiheys on hakkeeksi suuri. Esimerkiksi rankahakkeen taulukkoarvo energiatiheydellä on 0,7-0,9 MWh/i-m³. On kuitenkin muistettava, että pelletin energiatiheys on silti kolminkertainen laatuhaakkeeseen verrattuna. Kuivatus nosti laatuhaakkeen energiatiheyttä noin 10 %.

TAULUKKO 7. Kuivauksen vaikutus laatuhaakkeen energiatiheyteen.

Näyte	Energiatiheys MWh/i-m ³
Tuore	0,882
Kuiva	0,967

Kuivatus on laatuhaakkeen tuotannossa välttämätön välivaihe. CCM-Powerin vastavirtakuivuri on toimiessaan hyvä vaihtoehto kuivauksen suorittamiseen.

Jotta laatuhakkeesta saataisiin myyntikelpoinen tuote, tulisi se seuloa tasalaa-
tuiseksi ja saada loppukosteus vielä alhaisemmaksi. Kaikilla haketyypeillä ha-
vaittiin hakkeen laatuominaisuuksien parantumista vastavirtakuivauksen ansios-
ta. Kuivaus tapahtui menetelmällä nopeasti verrattuna nykyisiin koneellisen kui-
vauksen ratkaisuihin.

10 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli osallistua CCM - Powerin kehittämän hakekuivurin koeajojen suunnitteluun ja toteutukseen. Lisäksi tavoitteena oli hakkeen analysointi ja analysointimenetelmien oppiminen. Koeajojen tarkoituksena oli selvittää, miten CCM - Powerin valmistama kuumaa vastavirtakuivausta hyödyntävä hakekuivuri vaikuttaa hakkeen laatuominaisuuksiin. Muutoksia hakkeen ominaisuuksissa analysoitiin CEN TC 335 EN – standardeja mukaillen. Testattuja ominaisuuksia olivat hakkeen kosteus, lämpöarvo sekä energiatiheys.

Koeajojen perusteella voidaan sanoa, että kuivuri parantaa kaikkia mitattuja laatuominaisuuksia. Vaikutuksen suuruus vaihtelee eri haketyyppien kesken. Kuivuminen on tehokkainta palakooltaan suurella hakkeella, koska ilmavirta menee kuivattavan hakkeen läpi tehokkaammin. Tuloksista voi myös havaita, että hidas virtausnopeus edistää hakkeen kuivumista, sillä hake on tällöin kauemmin kuivurissa. Testien perusteella laitteella on mahdollista päästä hyvinkin alhaisiin, alle 10 % kosteuksiin mikäli laitteen säädöt ovat oikeat ja kuivattava materiaali palakooltaan sopivaa.

Laatuhakkeen tuotanto on yksi kuivurin mahdollisista käyttökohteista, sillä laatuhakkeen hinta on arvioitu tavallista haketta korkeammaksi. Hinnan tulee kuitenkin olla pellettiä halvempi, sillä laatuhake sisältää vähemmän energiaa. Laatuhakkeen tulee olla koneellisesti kuivattua, sillä kosteuden on oltava alhaisempi kuin mihin luonnonolosuhteissa tapahtuvalla kuivatuksella päästään. Koeajoissa ei vielä saavutettu riittävän alhaista kosteutta, joka myyntikelpoiselta laatuhakkeelta vaaditaan. Myös hakkeen seulonta on saatava toimimaan. Hake kannattaa myös seulonnan jälkeen levittää ohueksi kerrokseksi, sillä hake tulee koneesta yli 60 asteisena ja siitä haihtuu kosteutta vielä koneesta tulemisen jälkeen. Jatkossa yritys voisi määrittää kuivauksen kustannuksia, jolloin tiedettäisiin yhden laatuhakekuution hintahaarukka. Näin olisi mahdollista paremmin pohtia kuivauksen mielekkyyttä. Mielenkiintoista olisi myös määrittää luonnonolosuhteissa kuivatun hakkeen laatuominaisuuksia, jolloin hakkeen muutoksia kuivatuksen aikana voisi tarkemmin selvittää.

Kuivurin toimintaa voidaan tehostaa entisestään parantamalla kuivauskaasun virtausta hakepatjan läpi esimerkiksi ohentamalla hakepatjan paksuutta. Olennaista on myös saada kone toimimaan luotettavasti jatkuvatoimisena, jolloin on mahdollista saada suuria määriä haketta kuivattua päivässä.

Koeajojen suunnittelu aloitettiin keväällä 2011 pian aiheen valitsemisen jälkeen. Meille jäi noin kolme viikkoa aikaa tutustua hakkeen analysointiin ja valmistella laskupohjia ennen varsinaisten koeajojen alkua. Yrityksen kanssa olisi ollut hyvä keskustella tarkemmin koeajojen toteutuksesta jo etukäteen. Näin olisi ollut mahdollista suunnitella hakkeen näytteenotto paremmin. Myös näytteiden analysointivälineistössä oli parantamisen varaa. Esimerkiksi käytössämme olleet vaa'at olivat liian epätarkkoja täyttääkseen standardit. Hake-eriä ei testattu niin monipuolisesti ja järjestelmällisesti kuin olimme toivoneet. Syynä tähän oli hakekuivurin epävarma toiminta jatkuvatoimisena, mikä vaikeutti näytteidenottoa ja rajoitti kerätyn datan määrää. Saaduista tuloksista on vaikea muodostaa täysin varmoja johtopäätöksiä. Kuitenkin ne antavat riittävän tarkkaa suuntaa laitteen toimivuudesta ja toimivat näin apuna yrityksen toiminnassa.

Opinnäytetyön kirjoittamisen aloittaminen venyi syksyllä 2011 niin pitkälle, että kirjoittamiseen jäi aikaa vain kaksi kuukautta. Tämä osoittautui kireäksi aikatauluksi, koska työtä piti tehdä muiden opintojen ohella. Jälkikäteen ajateltuna olisi ollut järkevää aloittaa kirjoittaminen heti koeajojen loputtua. Kirjoittaminen tuntui kuitenkin vaikealta muiden kiireiden takia. Kun kirjoittaminen aloitettiin, pystyimme noudattamaan omaa aikatauluamme hyvin.

Työn tekeminen oli sekä koeajojen, että työn kirjoittamisen aikana hyvin opettavaista. Työssä tuli eteen paljon asioita, jotka on käsitelty kursseilla hyvin pintapuolisesti. Esimerkiksi lämpöarvomäärityksiä varten tuli tutustua teoriaan ja suorittaa testit eri yksikössä, koska tarvittavaa laitteistoa ei omasta yksiköstä löydy.

Mielestämme tulevaisuudessa agrologikoulutukseen liittyvillä bioenergia-kursseilla olisi tarpeellista käydä läpi hakkeen standardien mukaiset analysointimenetelmät ja määrittää niitä myös käytännössä. Näin opiskelijoilla olisi valmiudet tehdä hakkeesta luotettavia määrityksiä. Tämä on tarpeellinen taito, mikäli haluaa työllistyä bioenergia-alalle.

LÄHTEET

Painetut lähteet

Alakangas, E. 2003. Metsähakkeet. Teoksessa K. Knuuttila (toim.) Puuenergia. Jyväskylän teknologiakeskus Oy ja BENET Bioenergiaverkosto. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. 30-32.

Energiatiheyden laskenta. 2005. Teoksessa A. Kokkonen & I. Lappainen (toim.) Hakelämmöstä yritystoimintaa. Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu. Motiva Oy. Työtehosteura. Offsetpaino L. Tuovinen, Kuopio. 74.

Hakkila, P. 2003. Puu polttoaineena. Teoksessa K. Knuuttila (toim.) Puuenergia. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 24-30.

Helynen, S. 2005. Toimituskohteita. Teoksessa Pekka-Juhani Kuitto (toim.) Metsästä polttoaineeksi. Finbio. ER-paino Oy. 264-269.

Kuitto, P-J. 2005. Bioenergian ja energiapuun nykykäyttö ja näkymiä. Teoksessa P-J Kuitto (toim.) Metsästä polttoaineeksi. Finbio. ER-paino Oy. 56-59.

Kuitto, P-J. 2005. Metsähaketuksen tuotantojärjestelmät. Teoksessa P-J Kuitto (toim.) Metsästä polttoaineeksi. Finbio. ER-paino Oy. 91-99.

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Karisto Oy, Hämeenlinna 2007.

Laurila, P. 2005. Metsähakkeen tuotanto- ja käyttönäkymiä. Teoksessa P-J. Kuitto (toim.) Metsästä polttoaineeksi. Finbio. ER-paino Oy. 272-275.

Lepistö, T. 2010. Energiapuuharvennuksen lähtökohdat. Teoksessa T. Lepistö (toim.) Laatuhakkeen tuotanto-opas. Metsäkeskus ja Kehittyvä metsäenergia – hanke. Vammalan kirjapaino, Sastamala 2010, 6-35.

Maatilan hakelämmitysopas 2008. Teoksessa J. Viirimäki (toim.) Metsäkeskus. Hämeen Offset Tiimi Oy. Tampere 2008.

Polttoaineen kosteuden määrittäminen. 2005. Teoksessa A. Kokkonen & I. Lappainen (toim.) Hakelämmöstä yritystoimintaa. Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu. Motiva Oy. Työtehoseura. Offsetpaino L. Tuovinen, Kuopio 2005. 73.

Sauranen, T. 2003. Haketus- ja murskaustekniikat. Teoksessa K. Knuuttila (toim.) Puuenergia. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 70-72.

Savolainen, V. 2000. Properties of wood as a fuel. Teoksessa V. Savolainen & H. Berggren (toim.) Wood fuels basic information pack. Jyväskylä: ER-paino Oy, 33-34.

Termejä. 2005. Metsästä polttoaineeksi. Teoksessa P.-J. Kuitto (toim.) Finbio. ER-paino Oy.

Vesisenaho, T. 2003. Puuenergia. Metsähakkeet. Teoksessa K. Knuuttila (toim.) Jyväskylän teknologiakeskus Oy ja BENET Bioenergiaverkosto. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä 2003. 37-40.

Wester, L. 2000. Theory of Combustion. Teoksessa V. Savolainen & H. Berggren (toim.) Wood fuels basic information pack. Jyväskylä: ER-paino Oy, 109-112.

Digitaaliset lähteet

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Hakupäivä 14.9.2011 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>.

Alakangas, E. 2010. Kiinteiden biopolttoaineiden eurooppalaiset standardit. Hakupäivä 11.10.2011 http://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/05_Workshops_Training_Events/Taining_materials/finnish/D19_2_FI_Fuel_specification.pdf.

Biomass energy centre. CEN/TC 335 biomass standards. Hakupäivä 4.10.2011 http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=77,19836&_dad=portal&_schema=PORTAL.

Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Motiva. Hakupäivä 27.9.2011 http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biopolttoaineiden_lampoarvoja.

CCM-Power. Hakupäivä 1.11.2011 <http://ccm-power.fi/>.

Hake. Metsäkeskus. 2009. Hakupäivä 12.9.2011.

http://www.metsakeskus.fi/web/fin/palvelut/puuenergia/puupolttoaineet/hake_lisatiedot.htm.

Hytönen, K. & Sippula, O. 2005. Puun palaminen ja päästöt. Teoksessa J. Tisari (toim.) Puun polton pienhiukkaspäästöt. Kuopio: Kuopion Yliopisto, pienhiukkas- ja aerosoliteknikan laboratorio, 33-44. Hakupäivä 20.9.2011
http://bioenergia.fi/default/?__EVIA_WYSIWYG_FILE=6783&name=file.

Kekkilä. Katteet. Hakupäivä 29.9.2011.

<http://www.kekkila.fi/kotipuutarhurit/tuotteet/katteet>.

Kempeleen ekokortteli. Fortel invest Oy 8.7.2009. Hakupäivä 29.9.2011.

http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS_0_201_403_994_2095_43/http%3Btek-es-ali1%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/yhdyskunta/documents/seminaarit/juhasipila.pdf.

Kiema, M. Pasanen, K & Parvianen, J 2005. Bionenergian logistiikka. 4.2.3 Energiatiheys ja energiamäärä. Kuopion yliopisto. Hakupäivä 25.9.2011.

http://envi.uku.fi/ienvi2/files/iEnvi2_BIOLOG_loppuraportti.pdf.

Koivula, P. 2008. Palofysiikka ja palontorjunta. Satakunnan Ammattikorkeakoulu. Merenkulun koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 14.9.2011.
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/1159/Koivula_Pasi.pdf?sequence=1.

Kuokkanen, M. Kolppanen, R. & Kuokkanen, T. Nesteiden ja kiinteiden aineiden lämpöarvojen määrittäminen. Ekopelletti Hanke. Hakupäivä 10.10.2011.
http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti_info_220611.pdf.

Lehtovaara, J. 2010. Fysikaalisten ja mekaanisten ominaisuuksien määrittäminen. Vapo Oy. Hakupäivä 4.10.2011
<http://www.eubionet.net/GetItem.asp?item=digistorefile;150651;1361¶ms=open;gallery>.

Patenttijulkaisu FI 122117 B. Patentti- ja rekisterihallitus. 2011. Hakupäivä 24.10.2011.
<http://patent.prh.fi/pubserver/documentpdf.jsp?iDocId=27446&sDummyParam=.pdf>.

Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. 2008. Hakupäivä 13.1.2012.
http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf.

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Hakkurit. Hakupäivä 29.9.2011
http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/bio_demo/toimintaymp/energiapuun_hankinta/hakkurit/index.htm.

Polttopuu lisätiedot. Metsäkeskus. 2009. Hakupäivä 20.9.2011.
http://www.metsakeskus.fi/web/fin/palvelut/puuenergia/puupolttoaineet/polttopuu_lisatiedot.htm.

Polttopuun lämpöarvo. klapu.com. Hakupäivä 22.9.2011
<http://www.pamapo.com/hyodyllista/polttopuun-lampoarvo>.

Varastoinnin vaikutus polttohakkeen laatuun. 2009. Metsänhoitoyhdistys. Hakupäivä 21.9.2011.
http://www.mhy.fi/metka/kokeet/TTS/fi_FI/TTS_alku/_files/83482301252575402/default/Varastoinnin%20vaikutus%20polttohakkeen%20laatuun.pdf.

Kuvat

CCM-Power.

Pekka Lastumäki & Taneli Myllylä.

Keskustelut

Ahvensalmi, P., toimitusjohtaja, CCM-Power, Keskustelu 29.3.2011.

Kosteusmittaukset

EN 14774-2:2009 mukainen menetelmä hakkeen kosteuden määrittämiseen
(Polttoaineen kosteuden määrittäminen 2005, 73.)

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

- M_{ar} kokonaiskosteus
tyhjän kuivausastian paino gram-
 m_1 moina
 m_2 kuivausastian ja näytteen massa grammoina ennen kuivausta
 m_3 kuivausastian ja näytteen massa grammoina kuivauksen jälkeen
 m_4 pakkaukseen liittynyt kosteus grammoina (tässä tapauksessa 0)

Partikkelikoko < 30mm. Kuivattavan näytteen massa vähintään 300g. Mittaustarkkuus
0,1g

Näyte nro.	Päivämäärä	Uuniin	Uunista	m_1	m_2	m_3	m_4	M_{ar}

Ominaisuus	Metsätähdehake	Kokopuuhake	Rankahake	Kantohake	Havupuunkuori	Koivunkuori	Pilke
Kosteus % Hakkeet kaato- tuoreena	50-60	45-55	40-55	30-50	50-65	45-55	20-25
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	18,5-20	18,5-20	18,5-20	18,5-20	18,5-20	21-23	18,5-19
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	6,0-9,0	7,0-10	7,0-11	8,0-13	5,0-9	8,0-11	13,4- 14,5
Irtotiheys saa- pumistilassa kg/i-m ³	250-400	250-350	250-350	200-300	250-350	300-400	240-320
Energiatiheys MWh/i-m ³	0,7-0,9	0,7-0,9	0,7-0,9	0,7-1,0	0,5-0,7	0,6-0,9	1,35-1,6
Vetypitoisuus kuiva-aineessa (H), %	6-6,2	5,4-6	5,4-6	5,4-6	5,7-5,9	6,2-6,8	6-6,5
Ominaisuus	Puutähde- hake	Saha-hake	Sahanpuru	Kutterin- lastu	Hionta- pöly	Puupel- letti	Vaneri- tähde
Kosteus % Hakkeet kaato- tuoreena	10,0-50,0	45-60	45-60	5,0-15,0	5,0-15,0	8,0-10,0	5,0-15,0
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	18,5-20	18,5-20	19-19,2	19-19,2	19-19,2	19-19,2	19-19,2
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	6,0-15	6,0-10	6,0-10	16-18	16-18	16,80	16-18
Irtotiheys saa- pumistilassa kg/i-m ³	150-300	250-350	250-350	80-120	100-150	500-600	200-300
Energiatiheys MWh/i-m ³	0,7-0,9	0,5-0,8	0,45-0,7	0,45-0,55	0,5-0,65	2,9-3,4	0,9-1,1
Vetypitoisuus kuiva-aineessa (H), %	5,4-6,4	5,4-6,4	6,2-6,4	6,2-6,4	6,2-6,4	6,2-6,4	6,2-6,4

(Alakangas 2000, 152.)