

Mikko Härkönen & Teemu Uutela

**PELLETIN KORVAAMINEN HAKKEELLA  
BIOPOLTTOKATTILASSA**

**PELLETIN KORVAAMINEN HAKKEELLA  
BIOPOLTTOKATTILASSA**

Mikko Härkönen & Teemu Uutela  
Opinnäytetyö  
Kevät 2016  
Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma

---

Tekijät: Mikko Härkönen, Teemu Uutela

Opinnäytetyön nimi: Pelletin korvaaminen hakkeella biopolttokattilassa

Työn ohjaajat: Anu Hilli, Erkki Kylmänen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2016

Sivumäärä: 48

---

Opinnäytetyössä tutkittiin, voiko polttohaketta polttaa biopolttokattilassa pelletin sijasta ja kuinka tehokkaasti ja puhtaasti palaminen tapahtuu. Yksi kynnystekijä polttoissa oli hakkeen kulkeminen syöttöruuvissa. Polttokokeet suoritettiin kahdella eri palakolla ja kolmella eri kosteuspitoisuudella.

Polttokokeet suoritettiin Oulun ammattikorkeakoulun omassa energialaboratoriossa biopolttokattilassa ja polttokokeissa käytetty hake hankittiin yksityisyrittäjältä Limingasta. Hake kuivattiin ennen polttoja haluttuihin kosteuspitoisuuksiin lavakuivurin avulla ja näytteistä mitattiin kosteuspitoisuuden lisäksi irtotiheydet ja lämpöarvot. Lämpöarvot määritettiin Oulun ammattikorkeakoulun spektrometrian laboratoriossa pomikalorimetrillä.

Polttokokeet aloitettiin tulokostean hakkeen poltolla. Tulokostea hake paloi erittäin huonosti, joten siitä ei poltettu kuin yhtä palakoko. Muista palakoista ja kosteuksista poltettiin kustakin kaksi näytettä. Polttojen yhteydessä mitattiin savukaasuarvoja sekä seurattiin tehontuottoa, kattilaveden lämpötilaa, kokonaisenergiaa ja hakkeen kulu- tusta.

Polttokokeiden perusteella polttohakkeet, joilla oli alhaisimmat kosteusprosentit tuottivat miltei saman verran tehoa samalla kilomäärällä kuin pelletti. Polttohaketta, jonka kosteuspitoisuus oli noin 20 %, täytyi polttaa enemmän, jotta samoihin tehomääriin päästiin.

Polttokokeiden perusteella hakkeesta on pelletin korvaajaksi, kunhan se on tarpeeksi tasalaatuista ja kosteuspitoisuus ja palakoko ovat tarpeeksi pieniä. Isompi palakoko ei tule kulkemaan 115 mm:n kokoluokan syöttöruuveissa, koska ongelmia esiintyi jo lyhyissä koepoltoissa. Pieni palakoko antoi lupaavia tuloksia syöttöruuvissa kulkemisen ja tehontuoton suhteen. Isommissa ruuveissa ja syöttöputkissa myös isompi palakoko voisi toimia.

---

Asiasanat: polttohake, pelletit, bioenergia, arinapoltto, savukaasut, hyötysuhde

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Agricultural and Rural Industries

---

Authors: Mikko Härkönen, Teemu Uutela

Title of thesis: Replacing pellets with wood chips in a biofuel boiler plant

Supervisors: Anu Hilli, Erkki Kylmänen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2016

Pages: 48

---

This thesis tests whether it is suitable to burn woodchips in a biofuel boiler plant and how efficiently and cleanly it burns in it. One of the reasons for this thesis was also to test if the woodchips moved along the feed screw to the fixed bed combustion area without problems. The tests were done on two different sample sizes and three different percentage of moisture.

The burning tests were conducted in Oulu University of Applied Sciences energy laboratories in a bio boiler plant and the woodchips used in the burning tests were acquired from an entrepreneur in Liminka. The woodchips were dried to the desired moisture percentages with the help of a drier bed. Samples taken from the drier bed were also measured for bulk density and calorific value. The calorific values for the woodchips were determined in Oulu University of Applied Sciences spectrometry lab with a bomb calorimeter.

The burning tests began with burning the woodchips in arrival moisture. Woodchips in arrival moisture did not burn well so it was decided that we would only burn one sample. From the other sample sizes and moisture percentages two burning tests were conducted for each. As the burning tests were underway it was measured how much combustion gas and power it created. The boiler plant's boiler water temperature, total energy and the amount of woodchips used were also monitored.

According to the burning tests woodchips that had the lowest moisture percentages produced almost the same amount of power with the same amount of woodchips as pellets. Woodchips with moisture percentage of approximately 20 % had to be burned more to get to the same amount of power output.

Wood chips can replace pellet on the grounds of burning tests as long as it is homogeneous enough and moisture and sample size are low enough. Larger chip size is not going to work in a device of this size because there were problems already during short test burnings. The results of burning small chip size were promising because it runs smoothly in the feed screw and produces enough power output. Larger chip size could work in larger feed screws and in larger feed pipes.

---

Keywords: woodchips, bioenergy, pellet, fixed bed combustion, efficiency, combustion gas

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 PUUPOHJAISET POLTTOAINEET LÄMMÖNTUOTANNOSSA	7
2.1 Hakemmitys	7
2.2 Hake	7
2.3 Pelletti	8
2.4 Puupitoisten polttoaineiden lämpöarvot	9
2.5 Biopolttoainekattilat	10
2.6 Ariterm Biocomp60	11
3 AINEISTO JA MENETELMÄT	13
3.1 Hakkeen seulonta	13
3.2 Kosteuspitoisuuden ja irtotiheyden määrittäminen	14
3.3 Hakkeen kuivaus ja kosteuspitoisuuden määrittäminen	17
3.4 Lämpöarvon määrittäminen	19
3.5 Hakkeen koepoltto	25
4 TULOKSET	28
4.1 Irtotiheydet	28
4.2 Lämpöarvot	28
4.3 Lopulliset syöttöruuvien tehoasetukset	30
4.4 Pelletin ja hakkeen poltto biopolttokattilassa	30
4.5 Hyötysuhteet	42
4.6 Savukaasutulokset	43
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITTÄMISEHDOTUKSET	45
LÄHTEET	47

# 1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli tutkia hakkeen soveltuvuutta polttoon biopolttokattilassa. Polttoaineen syötössä on havaittu ongelmia pienissä hakkeen polttoon tarkoitetuissa kattiloissa. Ongelmia on aiheuttanut erityisesti polttoaineen syötön epätasaisuus, joka on johtunut hakkeen laadun epätasaisuuksista. Usein sekä hakkeen palakoko että kosteuspitoisuus vaihtelevat. Kun haketta käytetään polttoaineena biopolttokattilassa, korostuvat nämä asiat entisestään.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, soveltuisiko hake pelletin korvaajaksi monitoimipolttimella varustetussa kattilassa. Työssä selvitettiin hakkeen kulkeminen ruuvissa, paloiko hake ja tuottiko hakkeen palaminen tarpeeksi lämpöenergiaa, jotta kattilasta saadaan haluttu nimellisteho irti. Koe suoritettiin kahdella eri palakoolla ja kolmella eri kosteuspitoisuudella. Kosteuspitoisuudet, joita selvitettiin, olivat pienellä palakoolla 10,5 %, 20,6 % sekä tulokosteus ja isolla palakoolla 14,1 %, 20,5 % sekä tulokosteus.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Utajärven kunnan Puuta-hanke. Hankkeessa on tarkoitus selvittää muun muassa laatuhaakkeen tuotannon tekijöitä ja hakkeen kuivauksen kannattavuutta sekä hakkeen polttoa pelletin tilalla biopolttokattiloissa.

## 2 PUUPOHJAISET POLTTOAINEET LÄMMÖNTUOTANNOSSA

### 2.1 Hakemmitys

Haketta käytetään lämmittämään rakennuksia ja käyttövettä ja sitä käytetään myös suuremman mittakaavan lämpölaitoksilla ja teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksilla. Tärkein laatuominaisuus polttohakkeella on sen kosteus. Keskimääräinen tavoitepituus hakepaloille on normaalisti 30–40 mm. (Alakangas 2000, 48.)

Hakkeen tiiviys on myös yksi hake-erän laatua kuvaava tekijä. Hakkeen tiivydellä saadaan selville kiintotilavuuden ja irtotilavuuden suhde, josta saadaan selville kuinka monta kiintokuutiota saadaan yhdestä irtokuutiosta. Tärkeimmät hakkeen tiivytteen vaikuttavat tekijät ovat palakoko, palan muoto, puulaji, oksat, kosteus, vuodenaika, kuormausmenetelmä ja painuminen. (Alakangas 2000, 48.)

Hakkeella lämmitettiin vuonna 2010 pienkiinteistöjä yhteensä 1,77 TWh (Ylitalo 2011), kun kokonaislämmitysenergiankulutus pienkiinteistöissä oli samana vuonna 61,2 TWh (Tilastokeskus 2015, viitattu 1.4.2016). Hakkeen osuus lämmityksestä oli n. 2,9 %. Suurin osa pienkiinteistöjen hakkeenkäytöstä on maataloilla.

Hakkeen käytön puolesta pellettiin verrattuna puhuu sen halvempi hinta. Hakkeen kustannus energiamäärään suhteutettuna on noin puolet pelletin kustannuksista. Toisaalta pelletti tarvitsee vähemmän varastointitilaa ja pellettilaitteistot ovat hieman toimintavarmempia, koska pelletti on haketta tasalaatuisempaa kooltaan jo kosteuspitouudeltaan (Motiva 2009, viitattu 1.4.2016.)

### 2.2 Hake

Hake on koneellisesti silputtua puuta. Raaka-aineena hakkeen teossa käytetään karsittua tai karsimatonta kokopuuta, kantoja, hakkuutähteitä tai muuta puujätettä. Hake on metsistä saatavaa puhdasta bioenergiaa, joka on kotimaista ja uusiutuu luonnollisesti. Oikein kuivattuna ja poltettuna sillä voidaan saavuttaa suuret energia-arvot. Se on yksi edullisimmista vaihtoehtoista lämmöntuotannossa. Hakkeen käyttö on kasvanut paljon lämmityksessä käytettävänä polttoaineena. Haketta on alettu käyttää myös

CHP-laitoksissa tuottamaan yhtäaikaisesti lämpöä ja sähköä. (Bioenergianeuvoja 2016, viitattu 15.3.2016.)

Hakkeen käytön pienkohteissa tekee ongelmalliseksi sen suuri varastotilan tarve ja vaihteleva laatu eli esimerkiksi vaihteleva kosteuspitoisuus ja palakoon vaihtelevuus. Tuoreen puun kosteus on yleensä 40–60 % (Puhakka, Alakangas, Alanen, Airaksinen, Soini, Siponen & Kainulainen 2001, 6). Jos hake haketetaan suoraan tuoreesta puusta, on hakkeenkin kosteuspitoisuus samaa luokkaa. Annettaessa peitettyjen puunrankojen kuivaa kesän yli laskee kosteuspitoisuus puunrangoilla 25–35 %:iin. (Raitila, Virkkunen & Heiskanen 2014, viitattu 19.4.2016.) Pienkohteissa polttoaineen tulisi olla tasalaatuista ja melko kuivaa toimiakseen, joten hake pitäisi kuivata ennen polttoa ja se pitäisi tehdä rankahakkeesta. Kuutio öljyä vastaa energiamäärältään karkeasti 12 kuutiota haketta, joten esimerkiksi öljyyn verrattuna varastointitilan tarve on huomattavan suuri. (Motiva 2009, viitattu 1.4.2016.)

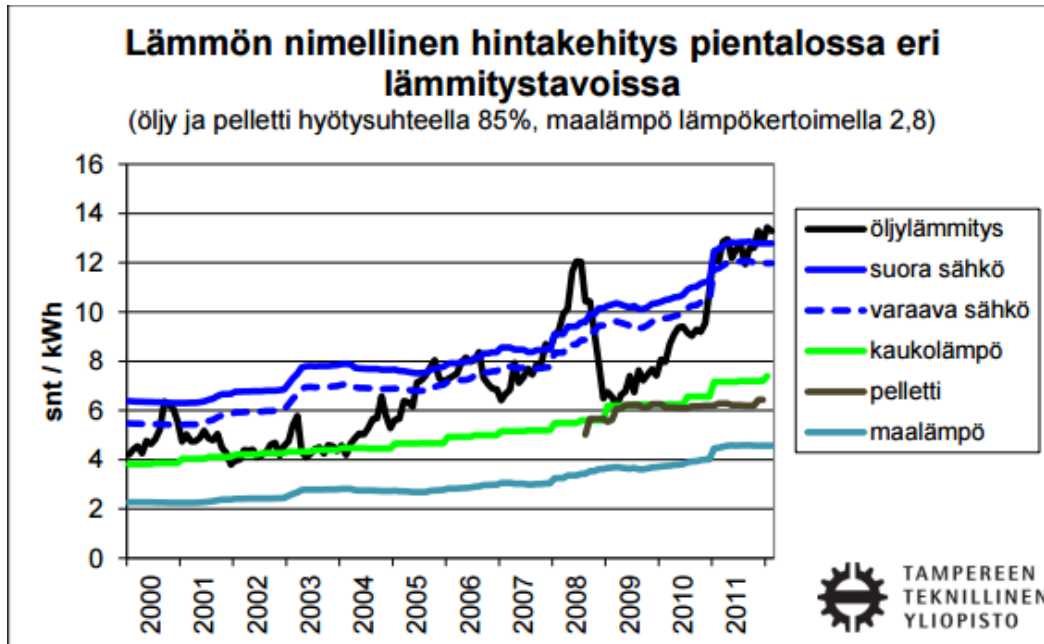
### **2.3 Pelletti**

Puupelletit puristetaan puhtaasta puusta. Valmistukseen käytetään kuoretonta puuta, kuten kuivaa puusepänteollisuuden kutteripurua ja -lastua. Yhä useammin pelletin raaka-aineena on puhdas sahanpuru. Pelletti on ympäristöystävällinen ja kotimainen polttoaine, vaikka viime vuosina ulkomaisen ja erityisesti venäläisen pelletin osuus on lisääntynyt halvan hintansa takia, kun kotimaisen pelletin hinta on vuosi vuodelta kohonnut. Puupellettejä tuotiin vuonna 2015 59 000 tonnia, joista suurin osa tuli Venäjältä (Palokallio 2016, viitattu 19.4.2016). Valitettavasti ulkomainen pelletti ei ole aina yhtä hyvää lämpöarvoltaan ja rakenteeltaan. Pelletin etuna lämmityksessä on se, että se ei vie varastotilaa kovinkaan paljon esimerkiksi hakkeeseen verrattuna. Kolme kuutiota pellettiä vastaa suunnilleen kuutiota öljyä energiamäärältään. (Motiva 2009, 3) Kotimaassa tuotetuista pelleteistä koti- ja maatalouksissa poltettiin 58 000 tonnia (Palokallio 2016, viitattu 19.4.2016).

Hyvälaatuinen pelletti on hyvä lämmitysratkaisu pienkohteisiin kuten omakotitaloihin. Pelletin kannattavuutta on hieman syönyt jatkuva hinnannousu ja kotimaisen hyvälaatuisen pelletin väheneminen markkinoilta. Toisaalta samaan aikaan lähes kaikkien



muidenkin lämmitysratkaisujen kustannukset ovat nousseet (Kuvio 1). Pelletille on määritelty joitakin laatustandardeja, mutta standardien noudattaminen on vapaaehtoista. (Bioenergia ry 2016, viitattu 19.4.2016.)



KUVIO 1. Lämmön nimellinen hintakehitys pientalossa eri lämmitystavoissa (Vihola & Heljo 2012, viitattu 1.4.2016)

## 2.4 Puupitoisten polttoaineiden lämpöarvot

Lämpöarvolla voidaan määrittää kuinka paljon täydellinen palaminen tuottaa lämpöä polttoaineen massaa kohti. Kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden osalta lämpöarvot tavallisesti ilmoitetaan megajouleina polttoainekiloa kohti, MJ/kg. (Motiva OY 2013, viitattu 15.3.2016.)

Puun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on suunnilleen samaa luokkaa eri puulajeilla riippumatta siitä, mistä puun osasta/osista polttoaine on tehty (Taulukko 1). Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa taas vaihtelee suuresti, tärkein lämpöarvoon vaikuttava tekijä on kosteuspitoisuus.

TAULUKKO 1. Puupolttoaineiden lämpöarvoja. Motiva OY 2013. Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Viitattu 15.3.2016

Lämpöarvo	Metsätähdehake	Kokopuu-hake	Rankahake
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	18,5-20	18,5-20	18,5-20
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	6-9	7-10	7-11
Lämpöarvo	Kantohake	Havupuunkuori	Koivunkuori
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	18,5-20	18,5-20	21-23
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	8-13	5-9	8-11
Lämpöarvo	Pilke	Puutähdehake	Sahahake
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	18,5-19,0	18,5-20	18,5-20
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	13,4-14,5	6-15	6-10
Lämpöarvo	Sahanpuru	Kutterinlastu ja hiontapöly	Puupelletti
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	19-19,2	19-19,2	19,0-19,2
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	6-10	16-18	16,8

## 2.5 Biopolttoainekattilat

Riippuen kohteen lämmitystarpeesta ja käytettävästä polttoaineesta markkinoilla on erikokoisia kattila- ja poltintarvikkeita. Maatilakokoluokkaan soveltuu 40 kW:n ja sitä tehokkaammat lämmityskattilat. Omakotitalojen lämmitykseen puolestaan soveltuvat hyvin 20 kW:n lämmityskattilat.

Kattiloissa käytettävät polttimet vaihtelevat. Polttimia valmistetaan erikseen esimerkiksi pelletin tai hakkeen polttoon ja sitten on myös polttimia, joilla voidaan polttaa useampaa eri polttoainetta. Kattilan asetukset (syöttöruuvin teho, puhaltimien teho, arinan liike ym.) joudutaan säätämään käytettävän polttoaineen mukaan, joten käytettävä polttoaine ja sen laatu ei voi vaihdella kovin paljon.

Kattiloihin on saatavilla erikokoisia syöttöruuveja ja ratkaisuja polttoaineen siirtämiseen varastosta kattilaan. Syöttöruuvien kokoon vaikuttavat polttoaine ja kattilan teho. Syöttöruuvi, joka on kooltaan 115 mm, sopii erinomaisesti pelletille sekä pienelle, alle 20 mm:n hakkeelle. Isommalle hakkeelle siirtoruuvien tulisi olla isompi, tarjolla on muun muassa 165 mm:n siirtoruuveja. Alle 40 kW:n kattiloihin sopii hyvin 95 mm:n ruuvi tai pienempikin, jos polttoaineen koko antaa myöden.

## **2.6 Ariterm Biocomp60**

Tässä työssä käytettiin Aritermin Biocomp60-biokattilaa, johon on asennettu MultiJet-poltin. Kattila on automaattinen nimellisteholtaan 60 kW:n biolämmityskattila. Polttimessa on liikkuva arina, joka mahdollistaa monien erilaisten polttoaineiden käytön. MultiJet-poltin on suunniteltu useiden eri biopolttoaineiden polttoon, kuten pelletin, hakkeen ja palaturpeen polttoon. Liikkuva arina auttaa polttoainetta sekoittumaan ja siirtää tuhkaa eteenpäin kohti tuhkasäiliötä. Polttimessa on ensiö- ja toisiopuhallin palamisilman säätämistä varten, jotta palotapahtumasta saadaan mahdollisimman tehokas ja puhdas. Oulun ammattikorkeakoulun laboratoriossa olevan kattilan syöttöruuvi on kooltaan 115 mm ja tämä sopii erinomaisesti pelletille sekä pienelle alle 20 mm:n hakkeelle.

Kattilan asetuksia säädetään erilliseltä kosketusnäytöltä. Suoraan polttotapahtumaan vaikuttavia säädettäviä arvoja ovat syöttöruuvien teho, arinan liike sekä ensiö- ja toisiopuhaltimen puhallusteho. Polttimen tehoasetusta pystyy säätämään käsin halutulle tehotasolle tai antaa automatiikan hoitaa tehon säätäminen annettujen tehoasetusten mukaan. Tehoasetuksista säädetään arvot polttimen teholle kattilan tehon ollessa 100 %, 75 % ja 50 %. Tämä tarkoittaa sitä, että jos poltossa vapautuva lämpöenergiamäärä on liian suuri, laskee automatiikka polttimen tehoasetuksen esimerkiksi 75 %:iin, jolloin myös muut tehoasetukset laskevat 75 %:n tasolle, eli esimerkiksi syöttöruuvien liike hidastuu ja puhaltimet puhaltavat vähemmän ilmaa. Jos taas palamisessa syntyvä lämpö ei riitä tuottamaan nimellistehoa, nostaa automatiikka tehoasetuksen esimerkiksi 50 %:sta 75 %:iin, jolloin vastaavasti syöttöruuvien, puhaltimien ym. teho

nousee vastaamaan 75 %:n tehoasetuksia. Polttimen tehoasetus 100 % vastaa kattilan nimellistehoa. Jokaiselle polttoaineelle joudutaan erikseen säätämään arvot, joilla 100 %:n tehoasetukseen päästään.

Kattilassa on erillinen kuormituspiiri, joka vastaa lämmitysverkostoa. Kuormaa säädetään erillisellä automatiikalla. Automatiikka säätää menoveden lämpötilaa kolmitieventtiin avulla. Tarkoitus on lämmittää lämmitysverkon menovesi 70°C:een. Kattilasta saadaan nimellisteho irti, kun lämmitysverkon paluueden lämpötila-asetus saadaan laskettua 40°C:een. Tällöin kattilassa on täysi kuorma eli paluu- ja menoveden lämpötilaero on 30°C. Jos kattilan lämpötila alkaa laskea tällä kuormalla, ei poltossa synny tarpeeksi lämpöenergiaa, eli joko palaminen ei riitä tuottamaan tarvittavaa energiaa liiasta kosteudesta johtuen tai tehoasetukset ovat liian pienet. Tällöin kuormaa eli paluu- ja menoveden lämpötilaeroa joudutaan pienentämään paluueden lämpötilaa nostamalla, jolloin lämpötilaero olisi enää esimerkiksi 20°C. Testien ajaksi kuormitus pyrittiin säätämään 60 kW:n nimellisteholle. (Kylmänen 2016 Oamk keskustelu 23.2.2016).

## 3 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 3.1 Hakkeen seulonta

Kuivattava hake toimitettiin 15.2.2016 Sanginsuussa sijaitsevan lavakuivurin kolmessa suursäkissä, ja ne varastoitettiin kylmässä hallissa sijaitsevan lavakuivurin viereen. Hake oli tuoreesta karsitusta koivurangasta tehtyä. Toimittaja ilmoitti hakkeen palakooksi 30x30 mm. Haketta tarvittiin yhteensä noin 1600 kg, josta yhteen polttoko-keeseen kului arviolta 60 kg. Pienemmän hakekoon testaamiseksi hake seulottiin itse.

Haketta seulottiin kahteen eri palakokoon minkkiverkosta tehdyllä seulalla (Kuvio 2), jonka silmäkoko oli 10x17 mm. Seulottavat hakkeet olivat 10x17 mm:n seulan läpäisevä palakoko, ja tätä suurempi hake. Pienenpää 10x17 mm:n palakokoa tuli seulottaessa huomattavasti enemmän kuin suurempaa palakokoa. Isommalla palakoolla saatiin suoritettua vain yksi koepolttu kutakin kosteuspitoisuutta kohden hakkeen vä-häisen määrän takia.



*KUVIO 2. Vasemmalla laatikossa seulottua haketta ja oikealla käytetty seula*

Opinnäytetyössä käytetään 10x17 mm:n seulan läpäisseestä palakoosta nimitystä pieni palakoko ja hakkeesta, joka ei läpäissyt seulaa, nimitystä iso palakoko. Seulonnan yhteydessä suurimmat hakepalat ja oksat poistettiin (Kuvio 3).



*KUVIO 3. Poistetut liian suuret hakepalat ja oksat.*

### **3.2 Kosteuspitoisuuden ja irtotiheyden määrittäminen**

Ennen jokaista kuivausta määritettiin jokaisesta kuivattavasta erästä irtotiheys ja kosteusprosentti. Irtotiheyden määrittämiseksi haketta otettiin kymmenen litran ämpäriin eri kohdista kuivuria. Kymmenen litran ämpäristä otettiin kolmeen eri alumiiniastiaan haketta, jonka jälkeen astiat punnittiin ja uunikuivattiin standardin uunikuivausmenetelmän (SFS-EN 14774-1 -2 ja -3/ FS-EN ISO 18134-1 osa 1 ja 2) mukaisesti.

Menetelmässä analysoitavaa näytettä mitataan n. 300 g uuninkestävään astiaan, kuten folioastiaan. Tyhjä astia punnitaan ensin erikseen (m1) ja sitten näytteen kanssa (m2) ja tulokset otetaan ylös. Punnituksen jälkeen täysi astia laitetaan välittömästi lämpökaappiin, jonka lämpötila on 105°C. Tuuletusventtiiliin on oltava auki, jotta kosteus pääsee haihtumaan näytteistä. Näyteastioita ei saa laittaa liian tiheästi kaappiin, jotta kosteuden haihtuminen ei esty.

Näytteitä kuivataan kaapissa vähintään 16h, mutta enintään 24h. Näyteastiat punnitaan välittömästi lämpökaapista ottamisen jälkeen (m3). Näytteen alkuperäinen kosteus lasketaan seuraavan kaavan (1) mukaan:

$$M_{ar} = (m2-m3)/(m2-m1) \times 100 \quad (1)$$

missä  $M_{ar}$  = näytteen kosteus ennen kuivatusta, p-%

$m1$  = tyhjän kuivatusastian paino, g

$m2$  = kuivausastian ja näytteen yhteispaino ennen kuivatusta, g

$m3$  = kuivausastian ja näytteen yhteispaino kuivauksen jälkeen, g

Tulos ilmoitetaan 0,1 g:n tarkkuudella. (Bioenergia, Energiateollisuus, Metsäteollisuus 2014, 49-50). Yksi määrittäminen kutakin näytettä kohti riittää, mutta opinnäytetyössämme määritimme joka näytettä kohden kolme uunikuivaustulosta, joista laskettiin keskiarvo.

Kosteusprosentti otettiin pikamittarilla ja standardin mukaisella uunikuivausmenetelmällä. Käytimme kosteusprosentin määrittämiseen myös kosteusanalysaattoria. Pikamittarilla mittasimme kuudesta eri kohtaa kuivuria hakkeen kosteuspitoisuutta. Pikamittaus tehtiin ennen ja jälkeen kuivauksen sekä sillä seurattiin kuivumisen edistymistä. Pikamittarin avulla saimme nopean arvion hakkeen kosteudesta.

Irtotiheys määritettiin Sanginsuussa olevalla litran (1 l) irtotiheysmitalla. Aluksi vaaka taarattiin tyhjän mitan kanssa. Näytteestä otettiin useasta kohtaa haketta ämpäriin ja siitä kaadettiin mitta täyteen ja poistettiin ylimääräinen hake, niin että haketta oli mitan yläreunaan asti. Tämän jälkeen mitta punnittiin, jolloin saatiin suoraan irtotiheyspaino grammoina litraa kohti eli  $\text{g/dm}^3$  (Kuvio 4). Tästä saadaan suoraan muutettua yksikkö arvoon  $\text{kg/m}^3$  ilman erillisiä laskutoimituksia. Jos astia on eri kokoinen, mitataan tyhjän astian paino erikseen ja lasketaan irtotiheys alla olevan kaavan (2) mukaisesti:

$$BDar = (m_2 - m_1)/V \quad (2)$$

missä

$BDar$  = näytteen irtotiheys,  $\text{kg/m}^3$

$m_1$  = tyhjän säiliön paino, kg

$m_2$  = täytetyn säiliön paino, kg

$V$  = mittaus säiliön tilavuus,  $\text{m}^3$





*KUVIO 4. Irtotiheyden mittausta litran kokoisella astialla*

### **3.3 Hakkeen kuivaus ja kosteuspitoisuuden määrittäminen**

Kuivuri on rakennettu sään kestävästä materiaalista, kuten filmivanerista, sillä sitä säilytetään ja käytetään lämmittämättömässä tilassa (Kuvio 5). Pohjalevynä lavakuivurissa toimii suomupohjalevy, jonka kautta lämmin ilmavirta kulkeutuu ylöspäin. Aukkopinta-ala pohjalevyllä on 4 %, jonka ansiosta lavakuivurilla on mahdollista kuivata myös hienoa materiaalia. Kuivurissa käytetty puhallin on Ventur Finland Oy Ab:n MSB-2-355/125-220-keskipakopuhallin, joka toimii pölyisessä ilmassa. Puhallin toimii 2,2 kilowatin sähkömoottorilla. Imuilmaa puhaltimelle lämmittää 9 kW:n ITM09-sähkölämmitin. Lavakuivurissa on Vacon 10-taajuusmuuttaja, jonka avulla puhaltimen pyörimisnopeus voidaan säätää haluttuun nopeuteen. Puhaltimen pyörimisnopeuden säätämällä estetään kuivattavan materiaalin pölyn leviäminen ympäristöön. (Mäkitalo 2012, 12.)



*KUVIO 5. Lavakuivuri ulkopuolelta. Laitteet (vasemmalta alkaen) lämmitin, puhallin, moottori ja sähkökaappi*

Hake oli tavoitteena kuivata noin 15 %:n ja 25 %:n kosteuspitoisuuteen. Ensimmäisellä kuivauskerralla 16.2.2016 lavakuivurissa kuivattiin ison ja pienen palakoon haketta yhtäaikaaisesti verkkoseinämän avulla. Pienen palakokoon haketta oli noin 40–45 cm:n paksuinen kerros. Isoa palakokoa oli kasattuna noin 10–15 cm vähemmän kuin pientä palakokoa.

Alkukosteus isolla palakoolla oli 46,4 % ja pienellä 46,3 %. Iso palakoko oli vuorokauden jälkeen kosteusprosentiltaan 14,1 % ja pieni palakoko 48,7 %. Väliseinä poistettiin kuivurista ja iso palakoko säkitettiin. Pienempi palakoko käännettiin ja tasoitettiin ja jätettiin vielä kuivumaan. Seuraavana aamuna, 18.2. mitattiin pikamittarilla kosteuspitoisuus, joka oli laskenut jo noin 13 %:iin. Uunikuivauksella kosteuspitoisuudeksi saatiin 10,5 %, joten alkuperäisen, kosteuspitoisuudeltaan 15 %:n hakkeen sijasta päätettiin suorittaa poltto tästä kosteuspitoisuudeltaan 10,5 %:n hakkeesta. Hake otettiin kuivurista pois ja säkitettiin.

Seuraavaksi kuivuriin laitettiin pelkästään pientä palakokoja, tarkoituksena kuivata sitä niin, että sen kosteuspitoisuus olisi 25 %. Vaikka kuivausta seurattiin tiiviimmin, ehti kosteuspitoisuus silti laskea tässäkin erässä liian alas, n. 20 %:iin. Lopputuloksena päätettiin pienen palakoon polttokokeet tehdä kosteuspitoisuuksilla 10 %, 20 % ja tulokostea.

Iso palakoko seulottiin kuivuriin 29.2. iltapäivällä ja tarkoituksena oli kuivata tästä haketta, jonka kosteuspitoisuus olisi 25 %. Kuivuriin liitetty lämpöpuhallin oli jäänyt päälle ja se oli puhaltanut koko yön lämmintä ilmaa kuivuriin. Aamuun mennessä hakkeen kosteuspitoisuus oli laskenut n. 17 %:iin pikamittarilla määritettynä. Myöhemmin uunikuivauksella kosteuspitoisuudeksi saatiin 23,5 %, joka oli jo selvästi lähempänä tavoitekosteutta.

Tulokosteat ison ja pienen palakoon hakenäytteet olivat muovilaatikoissa energialaboratoriossa noin viikon ajan ennen kuin niitä käytettiin polttokokeissa. Tulokostean pienen palakoon hakkeen kosteuspitoisuus oli 46,3 % ja ison palakoon 46,4 %. Tulokostea poltettava hake oli ennen polttoa seissyt avonaisissa muovilaatikoissa energialaboratoriossa noin viikon ajan. Niistä määritettiin uudestaan kosteusprosentti standardin uunikuivausmenetelmän avulla ennen polttojen aloitusta. Kosteusprosentti oli pienessä palakoossa laskenut 33,19 %:iin.

### **3.4 Lämpöarvon määrittäminen**

Pommikalorimetrillä mitataan lämpömäärää, joka vapautuu, kun näyte poltetaan happi-ilmakehässä, veden ympäröimässä suljetussa astiassa. Pommikalorimetrissä reaktio tapahtuu vakio-tilavuudessa, joten sisäenergian muutos  $\Delta U$  on sama kuin vapautuva lämpömäärä  $q_v$ . Tapahtuva lämpötilanmuutos on suhteessa lämpömäärään, joka reaktiossa vapautuu tai sitoutuu. Polton seurauksena tapahtuva lämpöenergian siirtyminen pommia ympäröivään veteen aiheuttaa siinä lämpötilan nousun, jota laite mittaa. Lämpötilan muutoksen avulla voidaan laskea vapautuva lämpömäärä. Jotta kalorimetrillä saatavat tulokset olisivat mahdollisimman tarkkoja, täytyy kalorimetrille määrittää lämpökapasiteetti. (Kuokkanen, Kolppanen & Kuokkanen, viitattu 11.3.2016.)

Lämpökapasiteetti on lämpömäärä, joka tarvitaan nostamaan kalorimetrin lämpötilaa yhdellä celsiusasteella. Lämpökapasiteetti saadaan kalibroimalla laite käyttäen näyttettä, jonka tarkka lämpöarvo tiedetään. Käytettävä kalibrointiaine on yleensä bentsoehappo. Nykyiset pommikalorimetrit tekevät kaikki laskutoimitukset automaattisesti, mutta niiden automaatiikka-aste vaihtelee tarpeiden mukaan. (Kuokkanen ym. 2016, viitattu 11.3.2016.)

Lämpöarvot määritettiin Oulun ammattikorkeakoulun spektrometrian laboratoriossa pommikalorimetrillä IKA C5003. Laitteistoon tutustuttiin 16.2.2016 ja aloitettiin heti lämpöarvojen määrittäminen. Lämpöarvot määritettiin ensin tulokosteista näytteistä. Tulokostea haketta oli pakattuna molempia palakokoja tiiviisiin minigrip-pusseihin. Pusseista otettiin ensin haketta erikokoisia paloja noin viisi grammaa, josta mitattiin kosteusprosentti kosteusanalysointilaitteen avulla. Kosteuspitoisuusnäytteiden jälkeen jauhoimme osan minigrip-pussin sisältämästä hakkeesta jauheeksi IKA WERKE MF 10 basic-jauhantamylyllä (Kuvio 6), jotta sen lämpöarvoja voitaisiin mitata pommikalorimetrillä. Käytimme jauhantamylyssä 2,0 mm kokoista seulaa. Hakejauhe putosi suoraan dekantterilasiin, josta hakejauhetta otettiin tarvittava määrä (n. 0,5 grammaa) jokaista pommikalorimetrikoea varten.



*KUVIO 6. Jauhantamylly IKA WERKE MF 10 basic*

Ennen pommikalorimetrin (Kuvio 7) käyttöä testattiin bentsoehapon avulla, että pommikalorimetrin kalibraatioasetukset olivat kunnossa. Näytteet testattiin pommikalorimetrissä standardin SFS-EN ISO 1716:n mukaisesti (VTT 2016, viitattu 11.4.2016). Bentsoehappo tiivistettiin tabletin muotoon FTIR-laitteistossa käytettävällä tabletintekolaitteistolla. Pommikalorimetrin kalibroinnin tarkistuksen jälkeen yritettiin tehdä tulokosteasta jauhetusta hakkeesta myös tabletteja, mutta ne olivat liian kosteita pysyäkseen kasassa. Hake jauhettiin laboratorion omalla IKA WERKE MF 10 basic –jauhantamyllyllä ja mylly puhdistettiin jokaisen jauhantakerran jälkeen ennen uuden näytteen jauhamista. Jauhantamyllyssä käytettiin 2,0 mm:n suuruista seulaa.

Ensimmäisillä mittauskerroilla pommikalorimettilaitteistossa käytettiin polttopusseja. Polttopussit olivat IKA WERKE C 12 polyeteeni–polttopusseja. Polttopussit täytettiin puolilleen jauhettua haketta ja hakkeen paino punnittiin. Polttopussin paino otettiin myös ylös, jotta siitä vapautuva energia voidaan vähentää pommikalorimetrin sisällä

palavasta aineksesta. Näytteitä otettiin kolme jokaisesta kosteusprosentista ja niistä otimme ylös niiden Ho- ja Hu-arvot eli ylemmän kalorimetrinen lämpöarvon ( $Q_{gr}$ ) ja alemman tehollisen lämpöarvon ( $Q_{net}$ ) joista laskimme näytteille keskiarvot.



*KUVIO 7. Lämpöarvomäärittämissä käytetty pommikalorimetri IKA C5003*

8.3.2016 jatkettiin lämpöarvojen määrittämistä. Lämpöarvot otettiin pienestä palakoosta, jonka kosteuspitoisuus oli 10,5 % ja isosta palakoosta, jonka kosteuspitoisuus oli 14,1 %. Pienen palakoon näyte oli ollut kylmiössä noin kahden viikon ajan ja ison palakoon näyte noin viikon ajan. Näytteet säilytettiin tiiviissä minigrup-pusseissa. Ne olivat säilyneet kylmiössä, jotta niiden kosteusvaihtelu saatiin minimoitua pitemmällä aikavälillä.

Pommikalorimetrille tehtiin tavanomainen kalibraatioasetusten tarkistus bentsoetabletin avulla. Näytepusseista otettiin haketta, joka jauhettiin myllyn avulla. Pommikalorimetrissä käytettiin tällä kertaa polttokapseleita, koska polttopussit olivat loppuneet. Pommikalorimetrikokeissa käytettiin IKA WERKE C 10 asetobutyraatti-polttokapseleita. Polttopusseihin sopi hieman enemmän jauhettua haketta kuin polttokapseleihin.

Pommikalorimetriä varten näytteet kuivattiin uunikuivauksessa 105°C:ssa yön yli täysin kuivaksi 9.3.2016.-10.3.2016. Yön yli kuivuttuaan näytteet otettiin pois uunista ja ne laitettiin suoraan jauhantamylyyn, jonka jälkeen niiden annettiin tasaantua huoneenlämmössä 30 minuuttia. Tämän jälkeen niistä määritettiin kosteusanalysointorilla kosteus. Uunikuivatun ja jauhettun pienen palakoon kosteuspitoisuus nousi tasaantumisen aikana 2 %:iin ja ison palakoon kosteuspitoisuus 1,9 %:iin. Puuaines oli nyt sen verran kuivaa, että päätettiin taas kokeilla muodostaa niistä tabletteja (Kuvio 8). Aluksi tabletit näyttivät toimivan, mutta käytetty prässä meni epäkuntoon. Tableteista ei saanut enää tarpeeksi tiiviitä ja ne hajosivat käsiin. Pommikalorimetrin kalibrointiasetukset tarkistettiin bentsoehapolla. Ehdittiin polttaa neljä tablettinäytettä, joista kaksi paloi kunnolla ja kaksi jätti huomattavia epäpuhtauksia kammioon (Kuvio 9). Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa  $Q_{net,ar}$  on laskettu pommikalorimetrillä saaduista tehollisista lämpöarvoista kaavan (3) mukaan:

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,2443 * M_{ar} \quad (3)$$

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

$M_{ar}$  = polttoaine-erän kosteus saapumistilassa [%]

0,02443 [MJ/kg] = veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä vakiopaineessa (+25 °C).



*KUVIO 8. Prässi ja tabletintekovälineet*



*KUVIO 9. Epäpuhtaasti palanut näyte pommikalorimetrissä*



Taulukossa 2 on esitetty teoreettiset syöttöruuvien tehoasetukset eri hakenäytteille pelletille optimoitujen asetusten perusteella. Mitattujen irtotiheyksien ja lämpöarvojen perusteella on laskettu kullekin näytteelle energiasisältö litrassa näytettä kaavan (4) mukaan, ja verrattu sitä pelletin energiasisältöön. Tämän suhdeluvun perusteella on suoraan laskettu teoreettinen syöttöruuvien tehoasetus hakenäytteille (Taulukko 2).

$$E_{\text{litra}} = BD_{\text{ar}} * Q_{\text{net,ar}} \quad (4)$$

Missä  $E_{\text{litra}}$  = energiasisältö litrassa näytettä

$BD_{\text{ar}}$  = irtotiheys (kg/l)

$Q_{\text{net,ar}}$  = lämpöarvo tulokosteudessa

**TAULUKKO 2 Laskennalliset syöttöruuvien tehoasetukset**

	irtotiheys kg/l	lämpöarvo MJ/kg	lämpöarvo MJ/l	kerroin	teoreettinen syöttöruu- vin tehoasetus %
Pelletti	0,65	16,92	11,00	1	4
Hake pieni 10,5 %	0,2	17,42	3,48	3,2	12,6
Hake pieni 20,6 %	0,23	14,48	3,33	3,3	13,2
Hake iso 14,1 %	0,2	16,04	3,21	3,4	13,7
Hake iso 20,5 %	0,22	14,73	3,24	3,4	13,6

### 3.5 Hakkeen koepoltto

Hake poltettiin Oulun ammattikorkeakoulun energialaboratoriossa. Tässä työssä käytettiin Aritermin Biocomp60-biokattilaa, johon on asennettu MultiJet-poltin. Kattila on automaattinen nimellisteholtaan 60 kW:n biolämmityskattila. Polttimessa on liikkuva arina, joka mahdollistaa monien erilaisten polttoaineiden käytön. MultiJet-poltin on suunniteltu useiden eri biopolttoaineiden polttoon, kuten pelletin, hakkeen ja palaturpeen polttoon. Liikkuva arina auttaa polttoainetta sekoittumaan ja siirtää tuhkaa eteenpäin kohti tuhkasäiliötä.

Palamisilman määrän säätämistä varten polttimessa on ensiö- ja toisioilmapuhaltimet. Puhaltimien tehoa säätämällä pystytään vaikuttamaan palamisen tehokkuuteen ja puhtauteen palamisilman happimäärän kautta. Oulun ammattikorkeakoulun laboratoriossa olevan kattilan syöttöruuvi on kooltaan 115 mm ja tämä sopii erinomaisesti peltille sekä pienelle alle 20 mm:n hakkeelle.

Koepoltoissa olivat mukana molemmat opinnäytetyön tekijät ja ohjaaja Erkki Kylmänen. Haketta joutui lisäämään putkeen 3-4 minuutin välein käsin kuvion 10 mukaiseen syöttöalustaan ja siitä putkeen (Kuvio 10).



*KUVIO 10. Hakkeen syöttö syöttöruuviin*

Koepoltot aloitettiin aina puhdistamalla arina ja tuhkapesa, jonka jälkeen sytytettiin arinalle tuli testattavalla hakekoolla/kosteusprosentilla. Kattilavesi lämmitetään ensin ilman kuormaa 70 °C:een, jonka jälkeen kuormaa lisättiin asteittain. Tavoitteena oli

saada paluu- ja menoveden lämpötilaero maksimitasolle eli 40 °C niin, että kattilaveden lämpötila pysyy tasaisesti 80 °C:ssa ennen jokaisen mittauksen aloitusta. Hieman hakkeen kosteudesta riippuen 70 °C:een päästiin yleensä noin tunnissa.

Haketta tilattaessa sen palakooksi luvattiin 30x30 mm, mutta joukossa oli vielä useita yli 50 mm:n hakepaloja ja jopa muutama 100 mm:n pala, vaikka niitä oli jo seulonnan yhteydessä poistettu. Nämä suuret hakepalat poistettiin näytteestä ennen polttoa, koska ruuvi olisi saattanut mennä jumiin näistä palasista (Kuvio 11).



*KUVIO 11. Hakkeesta ennen polttoa poistettuja liian suuria hakepaloja*

## 4 TULOKSET

### 4.1 Irtotiheydet

Hakkeen irtotiheydet vaihtelivat 200 g/m<sup>3</sup>–330 g/m<sup>3</sup> (Taulukko 3). Irtotiheyteen vaikutti selvästi hakkeen kosteuspitoisuus. Mitä märempää hake oli sitä korkeampi oli sen irtotiheys. Sen sijaan palakoolla ei ollut vaikutusta irtotiheyteen.

TAULUKKO 3. Irtotiheyden keskiarvot

näyte	irtotiheys, keskiarvo	
pieni n.45 %	330	kg/m <sup>3</sup>
pieni palakoko 20,6 %	310	kg/m <sup>3</sup>
pieni 10,5 %	200	kg/m <sup>3</sup>
iso n.45 %	330	kg/m <sup>3</sup>
iso 20,5 %	220	kg/m <sup>3</sup>
iso 14,1 %	200	kg/m <sup>3</sup>

### 4.2 Lämpöarvot

Alla olevissa taulukoissa ovat pommikalorimetritä saadut kalorimetriset lämpöarvot ( $Q_{gross}$ ) ja teholliset lämpöarvot ( $Q_{net}$ ) hakkeen isolle ja pienelle palakoolle eri kosteuspitoisuuksissa (Taulukot 4, 5, 6 ja 7). Vain yhdestä näytteestä kaikki pommikalorimetrikokeet onnistuivat (Taulukko 5). Näytteistä, joista on jäänyt palanutta ainesta, ei ole otettu lämpöarvoja mukaan keskiarvon laskentaan. Lämpöarvot tulokosteuksissa ( $Q_{net,ar}$ ) on laskettu kaavan (1) avulla.  $Q_{net,ar}$  kertoo hakkeen sisältämän lämpö määrän tulokosteudessa.

TAULUKKO 4. Pienen palakoon lämpöarvo 10,5 %:n kosteudessa

pieni palakoko 10,5 %

	Qgross	Qnet	huom.
1.	18815	18559	jäi palanutta
2.	17435	17179	jäi palanutta
3.	19716	19460	
keskiarvo	19716	19460	

$Q_{\text{net, ar}}$  17417 J/g

TAULUKKO 5. Pienen palakoon lämpöarvo 20,6 %:n kosteudessa

pieni palakoko 20,6 %

	Qgross	Qnet	huom.
1.	19524	19017	
2.	19133	18625	
3.	19312	18805	
keskiarvo	19323	18816	

$Q_{\text{net, ar}}$  14480 J/g

TAULUKKO 6. Ison palakoon lämpöarvo 14,1 %:n kosteudessa

iso palakoko 14,1 %

	Qgross	Qnet	huom.
1.	18267	17953	jäi palanutta
2.	18925	18610	
3.	19343	18740	
keskiarvo	19134	18675	

$Q_{\text{net, ar}}$  16041 J/g

TAULUKKO 7. Ison palakoon lämpöarvo 20,5 %:n kosteudessa

Iso palakoko 20,5 %			
	Qgross	Qnet	huom.
1.	18800	18197	
2.	18065	17462	jäi palanutta
3.	19463	18860	
keskiarvo	19132	18529	

Qtulokost. 14731 J/g

### 4.3 Lopulliset syöttöruuvin tehoasetukset

Taulukossa 8 on lopulliset syöttöruuvin tehoasetukset, jotka säädettiin sopivaksi kul-  
lekin näytteelle koepolttojen yhteydessä. Pelletin säätö oli valmiiksi optimoitu. Hak-  
keella syöttöruuvin tehoasetus oli huomattavasti korkeampi, 9–13,5 %.

TAULUKKO 8 Lopulliset syöttöruuvin tehoasetukset eri näytteille

	lopullinen syöt- töruuvin te- hoasetus %
Pelletti	4
Hake pieni 10,5 %	9
Hake pieni 20,6 %	11
Hake iso 14,1 %	13
Hake iso 20,5 %	13,5

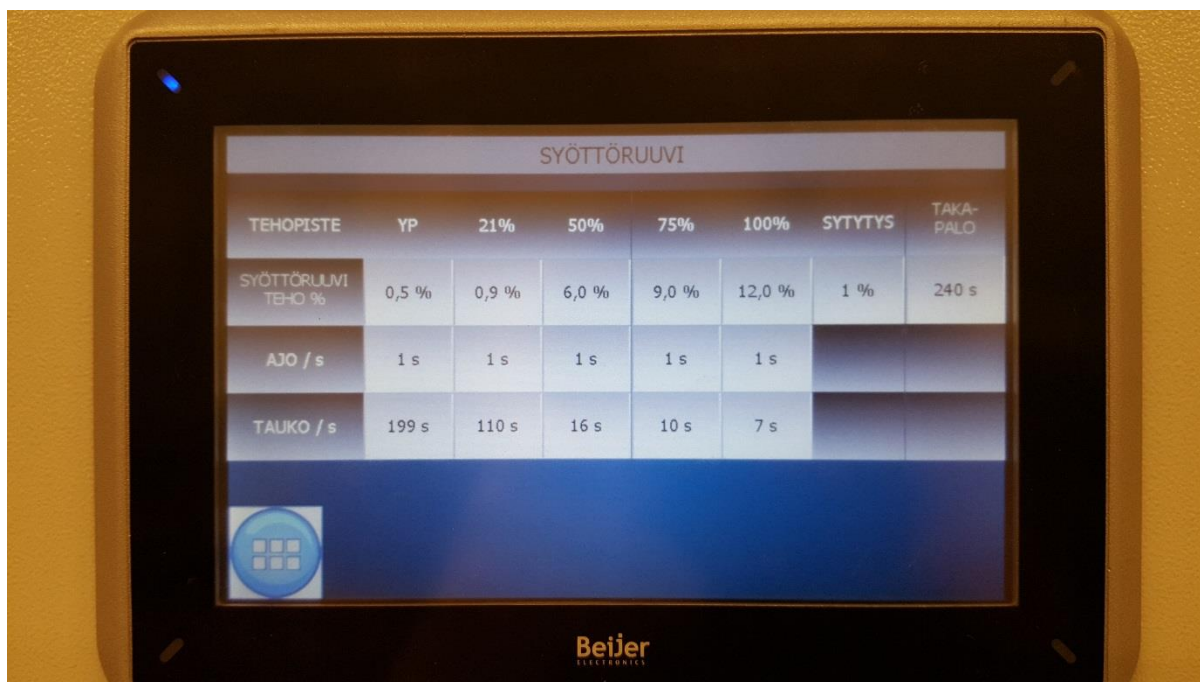
### 4.4 Pelletin ja hakkeen poltto biopolttokattilassa

Koepolttoissa ensimmäisenä poltettiin Versowoodin Verso Hotti-pellettejä (Versowood  
energy 2009, viitattu 1.4.2016) 23.2.2016. Pellettiä poltettiin, jotta saatiin vertailukohta  
hakkeen poltolle. Pellettejä poltettiin kaksi säkillistä, yhteensä 40 kg. Koe aloitettiin  
pelleteillä, koska niille oli jo määritelty asetukset ja se mahdollisti helpon tavan tutustua  
paremmin polttokattilan toimintaan. Syöttöruuvin tehoasetukset pelletille olivat 4 % (1  
s pyörimistä, 24 s tauko), 3 % (1 s pyörimistä, 32 s tauko) ja 2 % (1 s pyörimistä, 49 s  
tauko). Riippuen kattilan tehontarpeesta säätö automatiikka tehoasetuksia niin, että

ruuvin nopeus eli tehoasetus vastasi tarvittavaa pellettimäärää. Pelletit syötettiin ruuviin muovisen putken ja erillisen astian avulla. Pellettien poltossa ei ilmennyt ongelmia (Taulukko 8).

Ensimmäinen hakekoepoltto suoritettiin 24.2.2016 pienellä palakoolla, jonka kosteuspitoisuus oli 33,19 %. Hake oli kuitenkin liian kosteaa eikä se palanut hyvin. Molempien palakokojen tulokosteiden näytteiden polttaminen päätettiin lopettaa tämän tuloksen perusteella. Kosteasta hakkeesta ei saatu edes häkätuloksia, koska mittari ei pystynyt mittaamaan niin korkeita arvoja.

23.2. poltettiin pientä palakokoa, jonka kosteus oli 10,5 %. Ruuvin tehoasetukset (Kuvio 12 ja Taulukko 8) säädettiin aluksi tasolle 8 %, 6 % ja 4 %. Ruuvi täytettiin ensin hakkeella manuaalisesti ruuvia pyörittämällä kunnes kattilaan kertyi hakekasa. Sen jälkeen hakekasa sytytettiin ja tehoasetus säädettiin suoraan 50 %:iin, koska hake paloi sytytysvaiheen asetuksiin nähden liian nopeasti. Kun kattilan lämpötila oli saatu tavoitetasolle, ruuvin tehoasetukset nostettiin 10 %:iin, 7,5 %:iin ja 5 %:iin, koska näytti, että tehoa ei saada tarpeeksi ensimmäisillä syöttöasetuksilla. Kun palaminen ja kattilan lämpötila tasaantui, osoittautuikin että tehoa irtosi yli tarpeiden, koska automatiikka tiputti kattilan tehotason noin 80 %:iin (Taulukko 10).



KUVIO 12. Syöttöruuvin säätöpaneeli

24.2. suoritettiin tästä näytteestä toinen poltto, ruuvien tehoasetus säädettiin heti aluksi 9 %:iin, 7 %:iin ja 4,5 %:iin (Taulukko 8.) ensimmäisen polttokerran tulosten perusteella. Poltto suoritettiin näillä asetuksilla loppuun, koska kattilaa pystyttiin ajamaan täydellä kuormituksella ja kattilan tehoasetus pysyi lähellä 100 %:ia.

26.2. poltettiin pientä palakokoa, jonka kosteusprosentti oli 20,6 %. Kattilan tehoasetus jouduttiin taas sytytysvaiheessa säätämään 50 %:iin, koska haketta ei tullut tarpeeksi arinalle. Ruuvien asetukset olivat aluksi samat kuin kosteusprosentuiltaan 10,5 %:n hakkeella eli 9 %, 7 % ja 4,5 %, mutta kun kuormaa nostettiin, alkoi lämpötila kattilassa laskea. Syöttöteho nostettiin ensin 10 %:iin, 7,5 %:iin ja 5 %:iin ja sitten 12 %:iin, 9 %:iin ja 6 %:iin ennen kuin kattilan lämpötila saatiin pysymään 70 °C:ssa täydellä kuormituksella (Taulukko 7.). Kun systeemi tasaantui, tuli tehoa taas liikaa ja kattila tiputti tehotason n. 75 %:iin.

Toiseen polttoon laskettiin syöttöruuvien asetukset 11 %, 8,5 % ja 5,5 %:iin (Taulukko 7). Koko näyte poltettiin näillä ruuvien tehoasetuksilla. Lopullinen kattilan tehoasetus näytti 85 % eli syöttöruuvien tehoa olisi voinut hieman laskea. Tälle hakkeelle oli vaikea löytää optimaalisia asetuksia.



1.3. poltettiin isoa palakokoa, jonka kosteuspitoisuus oli 14,1 %. Iso hake kulki ruuvissa kohtalaisesti, välillä ruuvista kuului epämiellyttäviä ääniä. Ison hakkeen kohdalla ongelmaksi muodostui se, että hake holvaantui muutaman kerran (Kuvio 13) syöttöputkeen ja sitä joutui kopauttamaan, ennen kuin hake lähti taas liikkeelle. Syöttöputken pitää siis olla isompi. Myös ruuvin pitäisi olla isompi, koska äänistä päätellen on mahdollista, että tällä palakoolla ruuvi menee jumiin.

Ruuvin teho säädettiin asetuksille 13 %, 9,5 % ja 6 % (Taulukko 8). Nämä asetukset osoittautuivat oikeiksi tälle näytteelle, joten niitä ei tarvinnut enempää säätää. Isoa palakokoa oli niin vähän, että siitä riitti vain yhteen polttoon molempien kosteuspitoisuuksien osalta.



*KUVIO 13. Iso palakoko holvaantuneena syöttöputkeen*

Viimeinen koepoltto suoritettiin 4.3., jolloin poltettiin isoa haketta. Hakkeen kosteuspi-toisuus oli 20,5 %. Ruuvin tehoasetukset olivat aluksi 11 %, 8,5 % ja 5 %, mutta ha-ketta kertyi aluksi liikaa palopesään ja tehoasetuksia jouduttiin laskemaan jatkuvasti. Lopulta syyksi selvisi auki jäänyt tuhkaluukku, joka päästi ilman kulkemaan väärää kautta, eikä hake palanut siksi kunnolla. Asia korjaantui heti, kun luukku suljettiin ja ruuvin asetukset palautettiin alkuperäisiin. Lopulta jouduttiin nostamaan ruuvin tehoasetukset tasolle 13,5 %, 9,5 % ja 6 % ennen kuin kattilasta saatiin tarvittava teho irti. (Taulukko 8).

Pellettiä kului poltossa keskimäärin 1,14 kg/h. Pellettiä poltettaessa tuotettu teho vaihteli vain vähän, 59,5 kW–61, 5 kW (Taulukko 9) ja oli keskimäärin 60,2 kW.

Tulokostea hake ja hake, joka kuivattiin noin 34 %:iin paloivat huonosti, eikä tehoa saatu tarpeeksi irti suuren kosteuspi-toisuuden takia. Hakkeet, joiden kosteuspi-toisuus oli 10 % ja 20 % paloivat hyvin.

Hakkeen keskikulutus pienellä palakoolla vaihteli 1,1 - 1,4 kg/h. Kulutuksen ero kos-teuspi-toisuudeltaan 10 %:n ja 20 %:n hakkeen välillä johtuu kosteuspi-toisuudesta. Suuremman kosteuspi-toisuuden takia lämpöarvo on pienempi, jolloin polttoainetta jou-tuu polttamaan enemmän saman tehon saamiseksi. Isolla palakoolla haketta kului mo-lemmilla kosteuspi-toisuuksilla noin 1,3 kg tunnissa. Tuotettuun tehoon ei juuri vaikut-tanut hakkeen palakoko, sillä keskimääräinen tehontuotto oli 59,6- 59,9 kW. (Taulukot 9-15). Kosteuspi-toisuus taas vaikutti suuresti, koska kosteuspi-toisuudeltaan yli 30 %:n hake paloi huonosti ja tehoa irtosi vain 20–40 kW. Kosteuspi-toisuudeltaan 10 %:n ja 20 %:n hakkeilla saatiin molemmilla kattilasta nimellisteho eli 60 kW irti.

TAULUKKO 9. Polttokokeen tulokset, pelletti Versowood Hotti

aika min	pelletin kulutus kg	energialukema MWh	t1	t2	t1-t2	virtaus l/h	tuotettu teho kW
0	0	4,649	70,6	40,84	29,76	1764	60,4
5	1,418	4,654	70,28	40,11	30,17	1764	61,5
10	1,173	4,659	70,12	40,42	29,7	1749	60,4
15	0,955	4,663	69,88	40,39	29,49	1749	59,5
20	1,018	4,668	69,82	40,51	29,31	1749	59,6
25	1,184	4,673	69,87	40,27	29,6	1756	59,8
30	1,116	4,678	70,25	40,42	29,83	1749	60,5
35	0,999	4,683	70,16	40,51	29,65	1735	59,8
40	1,23	4,688	70,45	40,41	30,04	1756	60,2
45	1,086	4,693	69,98	40,34	29,64	1756	59,7
50	1,152	4,698	70,29	40,64	29,65	1756	59,7
55	1,217	4,703	70,54	40,4	30,14	1764	61,3
60	1,112	4,708	70,68	40,52	30,16	1749	60,9
65	1,3	4,713	70,08	40,54	29,54	1771	60,3
70	1,06	4,718	70	40,4	29,6	1749	59,6
kokonais- kulutus	16,02						
keskikulutus	1,144					tehon keskiarvo	60,2

t1 lämmitetyn veden lämpötila  
t2 paluuv veden lämpötila  
t1-t2 meno- ja tuloveden lämpötilaero

TAULUKKO 10. Polttokokeen tulokset, pieni palakoko, kosteuspitoisuus 10,5 %  
1.poltto

aika min	hakkeen kulutus kg	energialukema MWh	t1	t2	t1-t2	virtaus l/h	tuotettu teho kW
0	0	4,843	70,71	40,26	30,45	1699	59,7
5	1,353	4,848	70,32	40,06	30,26	1742	60,2
10	1,204	4,853	70,6	40,91	29,69	1756	59,8
15	0,98	4,858	69,77	39,84	29,93	1756	60,3
20	1,077	4,863	69,62	40,39	29,23	1742	58,6
25	1,043	4,868	69,66	40,23	29,43	1764	60,1
30	1,024	4,874	69,88	40,41	29,47	1742	59,3
35	1,072	4,878	70,28	40,92	29,36	1742	59,6
40	1,065	4,883	70,14	40,6	29,54	1756	59,8
45	1,049	4,888	70,14	40,56	29,58	1764	60,4
50	1,202	4,893	70,47	41,01	29,46	1742	59,4
55	1,049	4,898	69,92	40,45	29,47	1749	59,9
60	1,179	4,903	70,47	40,38	30,09	1749	60,4
kokonais- kulutus	13,30						
keskikulutus	1,108					tehon kes- kiarvo	59,8

t1 lämmitetyn veden lämpötila  
t2 paluuveden lämpötila  
t1-t2 meno- ja tuloveden lämpötilaero

TAULUKKO 11. Polttokokeen tulokset, pieni palakoko, kosteuspitoisuus 10,5 %

2.poltto

aika min	hakkeen kulutus kg	energialukema MWh	t1	t2	t1-t2	virtaus l/h	tuotettu teho kW
0	0	4,964	69,84	40,39	29,45	1756	59,2
5	0,983	4,969	70,53	40,58	29,95	1749	59,9
10	1,057	4,974	70,26	40,44	29,82	1764	59,2
15	1,054	4,979	70,26	40,71	29,55	1742	59,3
20	1,065	4,984	70,02	40,61	29,41	1735	58,9
25	1,12	4,989	70,1	40,62	29,48	1749	59,5
30	1,158	4,994	70,49	40,43	30,06	1735	60
35	1,17	4,999	70,42	40,34	30,08	1756	59,8
40	1,137	5,004	70,09	40,5	29,59	1756	59,8
45	1,115	5,009	69,96	40,11	29,85	1749	59,3
50	1,193	5,014	70,08	40,31	29,77	1764	59,7
55	1,118	5,019	70,33	40,62	29,71	1742	59,6
60	1,164	5,024	69,89	40,77	29,12	1742	58,6
65	1,138	5,029	70,31	40,4	29,91	1749	60,3
70	1,129	5,034	70,51	40,78	29,73	1742	60,8
75	1,278	5,039	70,31	40,3	30,01	1749	60,5
kokonaiskulu- tus	16,88						
keskikulutus	1,125					tehon kes- kiarvo	59,7

- t1 lämmitetyn veden lämpötila  
t2 paluuveden lämpötila  
t1-t2 meno- ja tuloveden lämpötilaero

TAULUKKO 12. Polttokokeen tulokset, pieni palakoko, kosteuspitoisuus 20,6 %

1.poltto

aika min	hakkeen kulutus kg	energialukema MWh	t1	t2	t1-t2	virtaus l/h	tuotettu teho kW
0	0	5,143	70,57	40,78	29,79	1742	59,9
5	1,656	5,148	70,06	40,68	29,38	1720	58,4
10	1,504	5,153	70,32	40,5	29,82	1742	59,4
15	1,541	5,158	69,81	40,24	29,57	1764	59,9
20	1,35	5,164	70,12	40,54	29,58	1742	59,4
25	1,359	5,168	69,85	40,11	29,74	1749	59,7
30	1,334	5,173	69,98	40,19	29,79	1742	60,3
35	1,387	5,178	70,14	40,09	30,05	1749	60,5
40	1,441	5,183	70,64	40,42	30,22	1756	61,1
45	1,415	5,188	70,06	40,04	30,02	1735	59,8
50	1,556	5,193	70,49	40,29	30,2	1742	60,6
55	1,352	5,198	70,45	40,32	30,13	1764	61,3
60	1,355	5,203	70,01	40,29	29,72	1742	59,6
65	1,179	5,208	69,55	40,85	28,7	1764	60,1
70	1,285	5,213	70,31	40,57	29,74	1728	59,5
75	1,369	5,218	69,66	40,64	29,02	1742	58,2
80	1,54	5,223	70,79	40,83	29,96	1742	60,2
85	1,243	5,228	69,96	40,51	29,45	1736	59,7
90	1,314	5,233	70,28	40,38	29,9	1736	58,9
95	1,347	5,238	70,32	40,32	30	1749	60,4
100	1,255	5,244	70,11	40,46	29,65	1742	59,2
105	1,366	5,248	70,03	40,7	29,33	1735	59,6
110	1,252	5,253	69,7	40,38	29,32	1749	59,2
kokonaiskulutus	30,4						
keskikulutus	1,382					tehon keskiarvo	59,8

t1 lämmitetyn veden lämpötila  
t2 paluuveden lämpötila  
t1-t2 meno- ja tuloveden lämpötila-ero

TAULUKKO 13. Polttokokeen tulokset, pieni palakoko, kosteuspitoisuus 20,6 %  
2.poltto

aika min	hakkeen kulutus kg	energiälukema MWh	t1	t2	t1-t2	virtaus l/h	tuotettu teho kW
0	0	5,298	69,97	40,2	29,77	1749	59,6
5	1,407	5,304	70,69	40,72	29,97	1764	60,4
10	1,37	5,309	70,14	40,12	30,02	1749	60,4
15	1,438	5,314	70,43	40,52	29,91	1749	60,2
20	1,3	5,319	70,77	40,59	30,18	1735	59,9
25	1,375	5,324	69,81	40,50	29,31	1756	59,3
30	1,415	5,329	70,17	40,67	29,50	1728	58,7
35	1,343	5,334	70,38	40,64	29,74	1742	59,0
40	1,371	5,339	69,51	40,55	28,96	1764	58,3
45	1,276	5,344	70,57	40,39	30,18	1749	61,2
50	1,426	5,349	69,98	40,40	29,58	1749	59,6
55	1,532	5,354	70,3	40,68	29,62	1742	59,4
60	1,337	5,359	70,26	40,60	29,66	1749	59,4
65	1,229	5,364	70,37	40,43	29,94	1756	60,8
70	1,427	5,368	69,77	40,51	29,26	1756	59,0
75	1,371	5,373	70,38	40,64	29,74	1756	59,3
80	1,391	5,378	70,2	40,43	29,77	1735	59,4
85	1,479	5,383	70,28	40,73	29,55	1764	59,5
90	1,41	5,389	69,99	40,81	29,18	1756	59,0
kokonaiskulu- tus	24,90						
keskikulutus	1,383					tehon kes- kiarvo	59,6

t1 lämmitetyn veden lämpötila  
t2 paluuveden lämpötila  
t1-t2 meno- ja tuloveden lämpötilaero

TAULUKKO 14. Polttokokeen tulokset, iso palakoko, kosteuspitoisuus 14,1 %

aika min	hakkeen kulutus kg	energielukema MWh	t1	t2	t1-t2	virtaus l/h	tuotettu teho kW
0	0	5,443	70,03	40,54	29,49	1728	59,7
5	1,17	5,448	69,7	40,7	29,00	1735	58,1
10	1,296	5,452	70,59	40,39	30,20	1735	60,4
15	1,283	5,457	70,56	40,58	29,98	1742	61,3
20	1,285	5,462	69,89	40,57	29,32	1756	59,1
25	1,297	5,468	70,53	40,67	29,86	1749	60,1
30	1,196	5,472	70,43	40,38	30,05	1742	60,6
35	1,292	5,477	70,10	40,76	29,34	1756	59,3
40	1,28	5,482	70,93	40,3	30,63	1749	61,2
45	1,286	5,487	70,09	40,52	29,57	1749	59,6
50	1,217	5,493	70,17	40,36	29,81	1728	60,5
55	1,289	5,498	70,24	40,24	30,00	1742	60,2
60	1,413	5,503	70,13	40,24	29,89	1742	60,3
65	1,201	5,507	69,81	40,53	29,28	1742	58,6
70	1,133	5,513	69,23	40,33	28,90	1756	58,5
kokonais- kulutus	17,64						
keskikulutus	1,260					tehon kes- kiarvo	59,8

t1 lämmitetyn veden lämpötila  
t2 paluuvien lämpötila  
t1-t2 meno- ja tuloveden lämpötilaero



TAULUKKO 15. Polttokokeen tulokset, iso palakoko, kosteuspitoisuus 20,5 %

aika min	hakkeen kulutus kg	energialukema MWh	t1	t2	t1-t2	virtaus l/h	tuotettu teho kW
0	0	5,671	69,95	40,38	29,57	1756	56,1
5	1,437	5,677	69,94	40,16	29,78	1749	60
10	1,217	5,681	70,37	40,35	30,02	1742	60,2
15	1,199	5,686	70,48	40,06	30,42	1756	61,5
20	1,396	5,692	70,29	40,57	29,72	1749	60,1
25	1,438	5,697	69,83	40,46	29,37	1749	59,2
30	1,427	5,702	69,81	40,35	29,46	1749	59,4
35	1,268	5,706	70,55	40,26	30,29	1728	60,2
40	1,34	5,711	71,1	40,39	30,71	1756	61,9
45	1,38	5,717	70,17	40,33	29,84	1735	58,9
50	1,413	5,722	70,36	40,02	30,34	1720	60,1
55	1,038	5,727	70,36	40,33	30,03	1764	61
60	1,096	5,732	70,16	40,01	30,15	1749	60,7
65	1,24	5,736	69,8	40,16	29,64	1749	59,7
70	1,413	5,742	70,29	40,47	29,82	1735	60,3
75	1,162	5,746	69,74	40,47	29,27	1742	58,7
80	1,01	5,752	69,62	40,47	29,15	1764	58,8
85	1,243	5,757	70,41	40,51	29,9	1742	60
90	1,393	5,761	69,81	40,84	28,97	1749	58,4
95	1,26	5,767	70,63	40,45	30,18	1749	60,5
100	1,357	5,771	70,75	40,67	30,08	1756	60,8
105	1,199	5,777	70,82	40,65	30,17	1785	61,1
kokonais- kulutus	26,93						
keskikulutus	1,284					tehon kes- kiarvo	59,9

t1 lämmitetyn veden lämpötila  
t2 paluuveden lämpötila  
t1-t2 meno- ja tuloveden lämpötilaero

## 4.5 Hyötysuhteet

Näytekohtaiset suorat hyötysuhteet (Taulukko 16) on laskettu kaavan (5) mukaisesti:

$$\eta = \frac{Q_{hyöty}}{Q_{tuotu}} \quad (5)$$

missä  $\eta$  = kattilan hyötysuhde

$Q_{hyöty}$  = kattilasta hyödyksi saatu lämpövirta

$Q_{tuotu}$  = kattilaan tuotu energiavirta

$Q_{hyöty}$  saatiin suoraan kattilan energiamittauslaitteelta ja  $Q_{tuotu}$  laskettiin poltetusta hakemäärästä lämpöarvojen perusteella.

TAULUKKO 16. Näytekohtaiset hyötysuhteet

	hyöty- suhde
pelletti	0,92
pieni 10,5 %, 1.poltto	0,93
pieni 10,5 %, 2.poltto	0,92
pieni 20,6 %, 1.poltto	0,9
pieni 20,6 %, 2.poltto	0,91
iso 14,1 %	0,89
iso 20,5 %	0,96

Isolle kosteammalle hakkeelle saatiin uunimäärityksellä kaksi eri kosteuspitoisuutta, 17 % ja 24 %. Lämpöarvo hakkeen tulokosteudelle laskettiin näiden keskiarvolla, kosteuspitoisuudella 20,5 %. Tämän hakkeen polton hyötysuhteeksi saatiin 0,96, joten luultavasti uunikuivauksessa saatu korkeampi kosteuspitoisuus johtuu siitä, että hake on ollut joistakin kohtaa kosteampaa, mutta pääasiassa kuivaa, n.17 % kosteudeltaan.

Näin korkea hyötysuhde kuulostaa epäilyttävältä tällaiselle kattilalle ja toisten näytteiden hyötysuhteeseen verrattuna. Jos hyötysuhteen laskisi kosteuspitoisuudeltaan 17 %:n hakkeen lämpöarvolla, tulisi hyötysuhteeksi noin 0,92, mikä kuulostaa jo mahdolliselta hyötysuhteelta. Todennäköistä siis on, että kuivuminen on tapahtunut epätasaisesti ja hake on ollut pääasiassa kosteudeltaan n. 17 %.

#### **4.6 Savukaasutulokset**

Polttokokeiden yhteydessä mittasimme savukaasuanalysointorilla savukaasuista päästöarvoja (Taulukko 17). Pelletillä oli selvästi pienimmät häkäarvot, ne olivat keskimäärin n. 100 mg/m<sup>3</sup>. Myös hakenäytteillä palaminen saatiin säädettyä puhaltimien avulla melko puhtaaksi. Hakkeen näytekohtaiset arvot eivät juuri eronneet toisistaan, ne vaihtelivat pääasiassa 150-250 mg/m<sup>3</sup>.

TAULUKKO 17. Savukaasupitoisuuksia poltetusta pelletistä ja hakkeesta

Pala- koko ja kosteus	T- kaasu	T- ilma	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO(ppm)	CO(mg/m <sup>3</sup> )	Lambda	NO(ppm)	NO(mg/m <sup>3</sup> )
pelletti	120,3	18,4	9,03	10	76	94	1,76	75,5	155
	120,9	18,5	9,09	9,2	63	79	1,77	83,7	172
	118,4	18,4	10,81	8,6	106	132	2,07	66,5	136
	119,1	19,2	8,91	9,7	86	108	1,74	77,7	160
pieni 10,5 %	115,8	21,7	12,68	6,5	328	410	2,53	105,9	218
	120,6	21,8	8,86	9,6	174	217	1,73	130,8	269
	122,2	21,8	9,41	9,7	159	199	1,81	119,1	245
	117,8	21,8	9,67	8,6	226	283	1,86	114,9	236
pieni 10,5 %	113,4	19,2	12,98	6,5	384	479	2,63	95,2	195
	118,1	19,1	10,26	8	160	208	1,96	100,7	207
	117,9	19,1	11,2	7,9	145	181	2,15	93,5	192
	117,5	19,3	12,15	7,2	192	240	2,38	86,8	178
pieni 20,6 %	122,5	17,8	10,05	8,9	189	236	1,92	123,2	253
	122,9	17,7	10,02	9,3	91	114	1,92	122,1	251
	121,7	18,1	9,58	9,4	175	219	1,84	117,7	242
	119,3	18,1	9,62	9	203	254	1,85	118,8	244
	119,1	18,2	8,73	9,7	123	154	1,71	123,9	254
pieni 20,6 %	118,9	18,6	10,45	8,7	203	253	1,99	169,1	347
	121,8	18,7	8,92	10,2	114	143	1,74	125,7	258
	120,6	18,5	10,21	8,9	145	181	1,95	118,9	244
	122,1	18,8	8,38	9,3	61	76	1,67	131,2	269
	123,8	18,7	8,68	10,5	176	220	1,71	123,7	254
iso 14,1 %	119,1	18	11,12	8,8	198	247	2,13	87,9	181
	120,6	18	11,43	8	246	307	2,2	90,9	187
	122,8	18	10,97	8,2	222	277	2,1	94,4	194
	123,8	18,1	9,36	10,1	162	203	1,81	104,7	215
	123,3	18,1	9,56	8,7	209	261	1,84	104,2	214
iso 20,5 %	118,2	18	10,66	7,7	95	119	2,03	109,2	224
	121,9	18,1	11,33	7,6	226	283	2,18	100,2	206
	121,8	18,2	11,09	8	178	222	2,12	99,2	204
	123,8	18,3	10,78	7,8	155	193	2,06	108,7	223

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITTÄMISEHDOTUKSET

Alkuvaiheessa kuivattiin molempia hakekokoja yhtäaikaisesti jakamalla kuivuri kahden osaan verkkoseinämän avulla. Kuivauksen edetessä havaittiin kuitenkin, että eri palakokojen kuivuminen tapahtui eri nopeudella ja se vaikeutti kuivauksen ajastamista. Tämän havainnon jälkeen kuivattiin vain yhtä palakokoa kerrallaan ja verkkoseinäjä poistettiin.

Myös hakekerroksen paksuudella ja palakoolla oli merkitystä kuivauksen edistymisessä. Isoa palakokoa oli noin 15-20 cm ohuempi kerros kuivurissa kuin pientä palakokoa, joten se kuivui huomattavasti nopeammin. Lisäksi ison palakoon kosteuspitoisuus oli tulokosteudessa alhaisempi verrattuna pieneen palakokoon. Isomman palakoon poisto kuivurista ja hakekerroksen korkeuden pieneneminen kuitenkin johtivat siihen, että pieni palakoko kuivui odotettua nopeammin ja pääsi siten tavoitekosteuspitoisuuden alle.

Lisäksi hakkeen kuivaukseen kuluvaan aikaan vaikutti ulkoilman lämpötila. Kuivuri sijaitsi peltikattoisessa, betonipohjaisessa lautavuoratussa kylmässä hallissa. Ulkoilman lämpötila oli ensimmäisillä kuivauskerroilla päiväsaikaan nollan tuntumassa tai hieman plussan puolella ja yölläkin oli vain muutama aste pakkasta. Kuivatettaessa pienen palakoon haketta oli yhden yön aikana ollut pakkasta lähes 20 astetta eikä ollut varmuutta oliko lämpövastus toiminut ollenkaan yön aikana. Kun tilannetta mentiin tarkastamaan päivällä, oli hake jäätynyt pinnalta, eikä siitä saanut pikamittarilla luotettavia tuloksia.

Hakkeen kuivaamista haluttuun kosteuspitoisuuteen vaikeutti myös kuivurin sijainti 12 km:n päässä koululta, jossa poltot suoritettiin, joten kosteuspitoisuusmittauksia ei voitu kustannus- ja aikataulusyistä suorittaa kovin monta kertaa vuorokaudessa.

Hakkeelle, jonka kosteuspitoisuus oli 20,6 %, oli vaikea löytää optimaalisia asetuksia poltossa. Hakkeen uunikuivauksen antamat kosteuspitoisuuden tulokset vaihtelivat 17,5 % ja 24 % välillä, joten tämä on saattanut vaikuttaa tästä hake-erästä saatavaan tehoon. Syy suurelle kosteusvaihtelulle on mahdollisesti se, että kuivuri kuivaa hieman epätasaisesti eikä haketta ole sekoitettu ennen säkitystä. Kosteimmilla poltetuilla hakkeilla aikaa meni lähes 1 h 30 min, eikä kattilasta saatu täyttä tehoa irti liian suuresta kosteuspitoisuudesta johtuen.

Iso hakkeen palakoko ei kulkenut ongelmitta arinalle johtavassa kuljettimessa eikä edes syöttöputkessa. Syöttöputkessa havaittiin holvaantumista ja ruuvikuljettimessa tukkeutumista. Varsinkin, jos seassa on pienikokoista haketta, joka nyt oli seulottu pois, on vaarana, että ruuvi pakkautuu liian täyteen ja menee jumiin. Jos ruuvin koko on kyseinen 115 mm, voi hakkeen palakoko olla enintään 20–25 mm, jotta hake kulkee hyvin ruuvissa.

Polttokokeet olivat melko lyhyitä (1-2h näytettä kohden) hakkeen vähyydestä johtuen, joten kaikkia säätöjä ei saatu optimoituja ja tulokset saattaisivat tarkentua pidemmällä polttokokeilla. Etenkin ison palakoon haketta oli vähän, joten siitä saatiin vain yksi poltto suoritettua kummallakin kosteuspitoisuudella.

Kokeiden lopputuloksena voidaan todeta, että pelletti voidaan korvata hakkeella 60 kW biopolttoainekattiloissa, jos hakkeen kosteuspitoisuus on alle 25 % ja hakkeen palakoko on alle 20–25 mm ruuvin ollessa 115 mm. Isompi ruuvi mahdollistaisi sen, että kattilassa voisi polttaa myös palakooltaan isompaa haketta eikä ruuvin jumittumista tarvitsisi pelätä niin paljon. Pienellä ruuvilla yksikin isompi hakepalanen voi jo aiheuttaa ruuvin jumittumisen.

## LÄHTEET

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT-tiedote. Espoo 2000. Viitattu 29.3.2016, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/t2045.pdf>

Bioenergia, Energiateollisuus, Metsäteollisuus 2014. Puupolttoaineiden laatuohje VTT-M-07608-13 – päivitys 2014. Viitattu 21.3.2016, [http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-07608-13\\_2014\\_%20update.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-07608-13_2014_%20update.pdf)

Bioenergia ry. Pelletin laatu. Viitattu 19.4.2016, <http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20laatu>

Bioenergianeuvoja 2016. Hake. Viitattu 15.3.2016, <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hake/>

Heljo, J & Vihola J. Lämmitystapojen kehitys 2000-2012 –aineistoseelvitys. Viitattu 1.4.2016, [http://www.tut.fi/ee/Materiaali/Lammitystapojen\\_kehitys\\_2000\\_2012.pdf](http://www.tut.fi/ee/Materiaali/Lammitystapojen_kehitys_2000_2012.pdf)

Huikuri, N. Pien-CHP-tuotannon kannattavuuden arviointia. Energiaomavarainen maatila –seminaari. Viitattu 15.3.2016, <http://bioenergia.pikes.fi/documents/812306/813224/Pien-CHP+-tuotannon+kannattavuus.pdf/93c11e0a-e6ab-48e7-ad77-18c54f6d1a99>

Kuokkanen, M., Kolppanen, R., & Kuokkanen, T. 2016. Nesteiden ja kiinteiden aineiden lämpöarvojen määrittäminen. Raportti. Viitattu 11.3.2016, [http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti\\_info\\_010911.pdf](http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti_info_010911.pdf)

Kylmänen, E. 2016. Projektisuunnittelija, Oulun ammattikorkeakoulu. Keskustelu 23.2.2016.

Motiva. 2009. Lämpöä puusta puhtaasti ja uusiutuvasti. Pellettilämmitys. Opas. Helsinki:Libris.

Motiva OY 2013. Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Viitattu 15.3.2016. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden\\_lampoarvoja](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja)

- Mäkitalo, M. 2012. Lavakuivurin käyttöönotto. Opinnäytetyö. Viitattu 15.3.2016. [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/50759/Makitalo\\_Mikko.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/50759/Makitalo_Mikko.pdf?sequence=1)
- Paananen, T. 2011. Laatuhaakkeen polttokokeilu Kuivaniemellä 3.5-5.5.2011. Raportti. Viitattu 18.1.2016, <http://www.oulunkaari.com/tiedostot/Uusiutuvaenergia/raportit/hake%20pellettikattilassa.pdf>
- Palokallio, J. 2016. Pellettituotanto supistui. Maaseudun tulevaisuus 6.4.2016. 100 (39), 7.
- Puhakka, A., Alakangas, E., Alanen, V-M., Airaksinen, L., Soini, R., Siponen, T. & Kainulainen, S. 2001. Hakelämmitysopas. Helsinki: Motiva.
- Raitila, J., Virkkunen, M. & Heiskanen, V-P. 2014. Metsäpolttoaineiden varastoitavuus runkoina ja hakkeena sekä lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus. Viitattu 19.4.2016, <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04524-14.pdf>
- Tilastokeskus 2015. Asuinrakennusten lämmitysenergiankulutus. Viitattu 1.4.2016, [http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ene\\_asen/?tablelist=true](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_asen/?tablelist=true)
- Versowood energy 2009. Verso Hotti-lämmityspelletti. Viitattu 1.4.2016, [http://www.versowood.fi/wp-content/uploads/HOTTI\\_lammityspelletti.pdf](http://www.versowood.fi/wp-content/uploads/HOTTI_lammityspelletti.pdf)
- Vihola, J. & Heljo, J. 2012. Lämmitystapojen kehitys 2000-2012-aineistoseelvitys. Tampere University of Technology 2012. Viitattu 1.4.2016, [http://www.tut.fi/ee/Materiaali/Lammitystapojen\\_kehitys\\_2000\\_2012.pdf](http://www.tut.fi/ee/Materiaali/Lammitystapojen_kehitys_2000_2012.pdf)
- VTT 2016. Lämpöarvon määrittäminen SFS-EN ISO 1716. Viitattu 11.4.2016, [http://www.vttexpertservices.fi/Pages/lamp%C3%B6arvon\\_maaritys\\_SFS-EN-ISO1716.aspx](http://www.vttexpertservices.fi/Pages/lamp%C3%B6arvon_maaritys_SFS-EN-ISO1716.aspx)
- Ylitalo, E. 2011. Puun energiakäyttö 2010. Metsätilastotiedote. Viitattu 1.4.2016, <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/tilatut/mtt/puupolttoaine2010.pdf>



