

Bioenergiakeskuksen julkaisusarja  
(BDC-Publications)  
Nro 33



# **PAIKALLISTEN BIOPOLTTOAINEIDEN KÄYTETTÄVYYS 60 kW LÄMMITYSLAITTEISTOSSA**

**Heikki Autio, Asmo Erjava, Sanna Halonen, Jonna Heinänen,  
Matti Hokkanen, Johanna Kivimäki, Antti Laitinen,  
Arttu Lamminmäki, Perttu Ojakoski, Harri Penttilä, Jenni Sironen,  
Matti Toivakka, Laura Vertainen, Liisa Vesterinen,  
Tiina Vilkkilä, Tuomo Vilkkilä**

**Projektiraportti**

**Helmikuu 2008**



**JYVÄSKYLÄN  
AMMATTIKORKEAKOULU**

**Luonnonvarainstituutti**

# SISÄLTÖ

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | JOHDANTO .....   | 4  |
| 1.1   | Työn tausta .....  | 4  |
| 1.2   | Työn tavoitteet.....                                       | 4  |
| 2     | TYÖN TOTEUTUS .....  | 5  |
| 2.1   | Aikataulu ja organisaatio .....                            | 5  |
| 2.2   | Polttolaitteiston kuvaus.....                              | 5  |
| 2.3   | Kosteuden määrittäminen kiinteästä biopolttoaineesta ..... | 8  |
| 2.4   | Polttoaineiden massan ja tilavuuden määrittäminen .....    | 8  |
| 2.5   | Savukaasuanalysointilaitteen käyttö polttokokeissa .....   | 9  |
| 3     | TULOKSET .....   | 10 |
| 3.1   | Ruokohelpi .....   | 10 |
| 3.1.1 | 100 % ruokohelpi.....                                      | 12 |
| 3.1.2 | Ruokohelpi–hake-seos .....                                 | 12 |
| 3.2   | Palaturve.....   | 15 |
| 3.3   | Viljan esipuhdistusjäte-kokopuuhiute .....                 | 18 |
| 3.3.1 | Koemateriaali ja koeolosuhteet.....                        | 18 |
| 3.3.2 | Kokeen suorittaminen .....                                 | 19 |
| 3.4   | Märkä kokopuuhiute .....                                   | 22 |
| 3.5   | Hevoslanta–kuivikehiute-seos.....                          | 25 |
| 3.5.1 | Polttoaine.....  | 25 |
| 3.5.2 | Polttokokemuksia.....                                      | 26 |
| 3.6   | Normaali kokopuuhiute .....                                | 26 |
| 3.7   | Rypsihiute–hake-seos .....                                 | 27 |
| 3.7.1 | Kokeen eteneminen.....                                     | 28 |
| 3.7.2 | Tuhkan muodostus poltossa .....                            | 29 |
| 3.8   | Kaura–kokopuuhiute-seos .....                              | 30 |
| 3.8.1 | Kokeen aloitus ja mittaukset .....                         | 30 |
| 3.8.2 | Asetusten säätäminen.....                                  | 31 |
| 3.8.3 | Seoksen käyttäytyminen silossa ja palopöydällä.....        | 32 |
| 3.8.4 | Energiamäärät ja savukaasuanalyysi.....                    | 34 |
| 3.9   | Yhteenveto polttokokeiden tuloksista.....                  | 35 |
| 4     | JOHTOPÄÄTÖKSET .....                                       | 37 |
| 4.1   | Tunnetut polttoaineet .....                                | 37 |
| 4.1.1 | Kokopuuhiute.....  | 37 |

|         |  |
|---------|--|
|         | 2  |
| 4.1.2   | Palaturve..... 37                                |
| 4.2     | Seospolttoaineet..... 39                         |
| 4.2.1   | Kaura–kokopuuhake-seos ..... 39                  |
| 4.2.2   | Viljan esipuhdistusjäte–kokopuuhake-seos..... 40 |
| 4.2.3   | Rypsirouhe–kokopuuhake-seos ..... 41             |
| 4.2.4   | Ruokohelpi–kokopuuhake-seos..... 42              |
| 4.2.5   | Kehittämisehdotukset..... 43                     |
| 4.3     | Uudet polttoaineet..... 43                       |
| 4.3.1   | Ruokohelpi ..... 43                              |
| 4.3.2   | Hevosenlanta–kuiviketurve-seos ..... 44          |
| LÄHTEET | ..... 45   |

## KUVIOT

|           |   |
|-----------|---|
| KUVIO 1.  | Arimax 360 -kattila testauspisteessä..... 6                             |
| KUVIO 2.  | 60 kW Hakejet-biopoltin (Biolämpöopas 2007, 11)..... 7                  |
| KUVIO 3.  | Kaaviokuva polttoaineen varastosäiliöstä ..... 7                        |
| KUVIO 4.  | Testo 300 -savukaasuanalysaattori ..... 9                               |
| KUVIO 5.  | Polttokokeissa käytetty ruokohelpi..... 11                              |
| KUVIO 6.  | Polttokokeissa käytetty kokopuuhake..... 11                             |
| KUVIO 7.  | Ruokohelpisilppua varastosiilossa..... 12                               |
| KUVIO 8.  | Ruokohelpi–hake-seosta varastosiilossa ..... 13                         |
| KUVIO 9.  | Ruokohelpi–hake-seoksen palaminen käynnissä..... 14                     |
| KUVIO 10. | Ruokohelven polttokokeissa hyväksi havaittu ensiöilman puhallinsäätö 14 |
| KUVIO 11. | Ruokohelven polttokokeessa syntyneen tuhkan määrä..... 15               |
| KUVIO 12. | Palaturvetta (Palaturve 2008) ..... 15                                  |
| KUVIO 13. | Palaturvetta pienkuormaajan kauhassa ..... 16                           |
| KUVIO 14. | Palaturvetta polttoainesiilossa ..... 16                                |
| KUVIO 15. | Palaturpeen poltosta syntyneitä tuhkaa ja laavaa ..... 17               |
| KUVIO 16. | Kokopuuhaketta..... 18  |
| KUVIO 17. | Viljan esipuhdistusjätettä ..... 18                                     |
| KUVIO 18. | Esipuhdistusjäte–hake-seosta polttoainesiilossa..... 20                 |
| KUVIO 19. | Liekki palopäällä..... 20   |
| KUVIO 20. | Hakekasa ja polttoaineen lastaus ..... 22                               |
| KUVIO 21. | Hake palopäällä ennen sytyttämistä..... 22                              |
| KUVIO 22. | Palaminen märällä kokopuuhakkeella ..... 23                             |

|  |    |
|--|----|
|  | 3  |
| KUVIO 23. Palaminen kokopuuhakkeella pelletin jälkeen .....  | 24 |
| KUVIO 24. Savu märkää kokopuuhaketta polttaessa.....         | 24 |
| KUVIO 25. Märän kokopuuhakkeen palamisjäännös .....          | 25 |
| KUVIO 26. Hevosenturvelantaa kottikärryjen pohjalla.....     | 25 |
| KUVIO 27. Rypsirouhe–hake-seosta.....                        | 27 |
| KUVIO 28. Rypsirouheen ja hakkeen sekoitus.....              | 28 |
| KUVIO 29. Kuva liekistä ja palopäästä .....                  | 28 |
| KUVIO 30. Hiilipitoista tuhkaa.....                          | 29 |
| KUVIO 31. Laavakimpale.....                                  | 30 |
| KUVIO 32. Hake–kaura-seosta siilossa.....                    | 31 |
| KUVIO 33. Ensiöilman säädöt .....                            | 32 |
| KUVIO 34. Toisioilman säädöt.....                            | 32 |
| KUVIO 35. Tasaista palamista. ....                           | 33 |
| KUVIO 36. Seoksen lajittumista siilossa .....                | 33 |
| KUVIO 37. Hake-kauraseoksen poltossa syntynyttä tuhkaa ..... | 34 |

## TAULUKOT

|   |    |
|---|----|
| TAULUKKO 1. Arimax 360 -biokattilan ominaisuuksia (Biolämpöopas 2007, 20.)... 6 |    |
| TAULUKKO 2. Ruokohelpisilpun pituus.....  | 11 |
| TAULUKKO 3. Polttokokeen eteneminen .....                                       | 17 |
| TAULUKKO 4. Savukaasuanalyysin mittaustulokset.....                             | 21 |
| TAULUKKO 5. Turvelannan koostumus .....   | 25 |
| TAULUKKO 6. Savukaasuanalysointorilla mitatut arvot kokeen aikana.....          | 29 |
| TAULUKKO 7. Savukaasuanalysointorin keskimääräiset arvot mittauskerroista ..... | 35 |
| TAULUKKO 8. Kokeessa käytettyjen polttoaineiden vertailu.....                   | 36 |

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Maa- ja metsätaloudessa syntyy monenlaisia energiatuotannossa hyödyntämiskelpoisia sivutuotteita, joita ei ole tähän asti kovin paljoa hyödynnetty maamme lämpöenergian tuotannossa. Monien näiden materiaalien massa tai energiasisältö on suhteellisen pieni. Kuitenkin näiden jakeiden hyödyntäminen biopolttoaineina pienessä mittakavassa tai muiden polttoaineiden ohella saattaisi olla taloudelliset ja ympäristöystävälliset seikat huomioon ottaen kannattavaa. Osa polttoainejakeista on myös aiemmin koettu vaikeiksi tai haasteellisiksi käyttää, mutta polttolaitteistojen kehittymisen myötä jotkut näistä ongelmista saattaisivat olla nykyään ratkaistavissa.

Polttoaineiden polttoteknisistä vaatimuksista ja ominaisuuksista on olemassa joitain hajanaisia käyttökokemuksia, mutta systemaattista vertailevaa tutkimusta aiheesta ei ole maassamme juurikaan tehty. Tarkkaa tutkittua tietoa ei myöskään ole olemassa siitä, miten erilaiset biopolttoaineet käyttäytyvät niitä poltettaessa. Niinpä tämän työn tavoitteena oli saada analysoitua tietoa käyttäjille maataloilla olevan käyttäjäkokemusten tueksi. Aistinvarainen arviointi ei riitä puhtaan palamisen todentamiseen ja oikeiden laitesäätöjen tekemiseen. Tietoa siis tarvitaan hyvän palamisen aikaansaamiseksi. Päämääränä ei tule olla pelkästään korkea hyötysuhde, vaan myös matala häikäpitoisuus. Tulevaisuudessa tämän todentaminen on entistä tärkeämpää, kun päästö- ja hyötysuhdemääräykset tulevat koskemaan myös pienen kokoluokan lämmityslaitteistoja. Keski-Euroopassa säännökset ovat jo tällä hetkellä Suomea tiukemmat; siellä on mittattava säännöllisesti kiinteiden polttoaineiden palamisesta aiheutuvat savukaasupäästöt.

## 1.2 Työn tavoitteet

Työssä tutkittiin kahdeksan erilaisen biopolttoaineen tai biopolttoaineseoksen lyhytkaista käytettävyyttä 60 kW:n biopolttoainelaitteistossa. Työhön otettiin mukaan seuraavat polttoaineet ja -seokset: palaturve, normaali ja märkä kokopuuhake, viljan esipuhdistusjäte-hake-seos, kaura-hake-seos, hevosen lanta-kuiviketurve -seos, rypsi-rouhe-hake-seos ja ruokohelpi-hake-seos. Valituista polttoaineista ja -seoksista ei ole paljoa tutkimustietoa tai ne oletettiin haasteellisiksi käyttää. Alun perin suunniteltas-

sa ollut märkä hakkuutähdehake jouduttiin vaihtamaan laatuongelmien vuoksi normaaliin kokopuuhakkeeseen.

Paikallisten biopolttoaineiden käytettävyysselvityksen tilasi Bioenergiasektorin kehittäminen pohjoisessa Keski-Suomessa -hanke. Työn toteuttivat opiskelijaparityönä Jyväskylän ammattikorkeakoulun Luonnonvarainstituutin bioenergia-alan opiskelijat. Työn tilaajana toimi hankkeen projektipäällikkö Tapani Sauranen ja työn ohjauksesta vastasi yliopettaja Tero Vesisenaho.

## 2 TYÖN TOTEUTUS

### 2.1 Aikataulu ja organisaatio

Projektityö alkoi tutkimussuunnitelman laatimisella marraskuussa 2007. Tutkimussuunnitelma hyväksyttiin työn tilaajalla, joka myös ohjasi työn toteutusta pidetyissä ohjausryhmän kokouksissa. Polttokokeet ajoituivat joulutammikuulle 2007–2008. Lopullinen raportti luovutettiin ja esiteltiin työn tilaajalle 19.2.2008.

Polttokokeiden toteutuksessa, tulosten analysoinnissa sekä raportoinnissa kukin työpari vastasi yhdestä polttoaineesta tai -seoksesta. Bioenergiakeskuksen henkilöstö ja opiskelijat vastasivat tarvittavien polttoaine-erien hankkimisesta.

### 2.2 Polttolaitteiston kuvaus

Polttokokeissa laitteistona käytettiin lämmittämättömässä merikontissa sijainnutta Ariterm Oy:n valmistamaa Arimax 360 -biokattilaa, 60 kW Hakejet-biopoltinta ja kontin ulkopuolella sijainnutta Arimax 1040 MiniJet -polttoaine-varastojärjestelmää. Laitteistoa ohjataan Tiimi 5302 -järjestelmällä, johon on valmiiksi ohjelmoitu neljä eri polttoainetta. Ohjelmointia voi helposti itse säädellä polttoaineen ominaisuuksien mukaan. Ensio- ja toisioilman määrää säädetään käsin kääntämällä haittalevyjä. (Tuikka-  
nen 2007, 1.)

Arimax 360 -biokattilaa pidetään helppohoitoisena ja tehokkaana. Tulipesän keraaminen takaseinä varaa lämpöä, ylläpitää puhdasta palamista ja lisää kattilan tehokkuutta. Kattila soveltuu hyvin biopolttoaineille, koska siinä on iso tulipesä. Puhdistaminen on

helppoa isojen huolto- ja puhdistusluukkujen ansiosta (kuvio 1). (Biolämpöopas 2007, 20.) Taulukossa 1 on nähtävillä Arimax 360 -biokattilan ominaisuuksia.

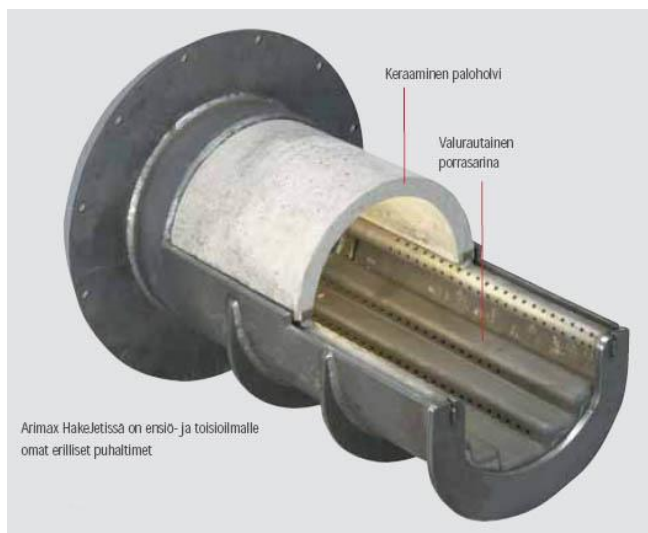


KUVIO 1. Arimax 360 -kattila testauspisteessä

TAULUKKO 1. Arimax 360 -biokattilan ominaisuuksia (Biolämpöopas 2007, 20.)

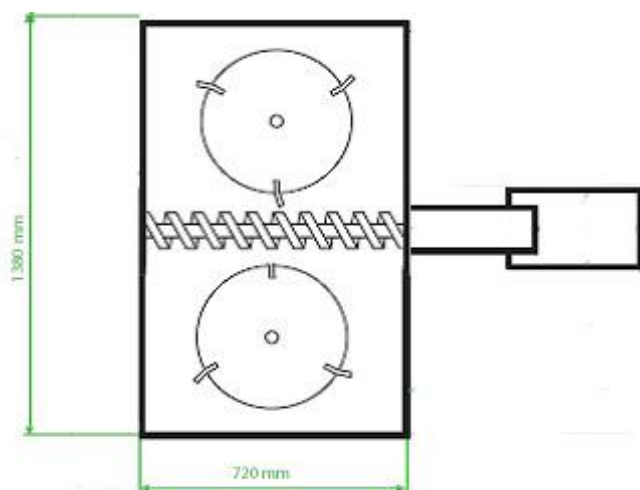
|                            |         |
|----------------------------|---------|
| Teho                       | 60 kW   |
| Paino                      | 611 kg  |
| Tilavuus                   | 280 l   |
| Max. käyttöpaino           | 1,5 bar |
| Max. käyttölämpötila       | 120 °C  |
| Savupiipun min. halkaisija | 180 mm  |
| Savupiipun min. pituus     | 6 m     |
| Kattilan korkeus           | 1400 mm |
| Kattilan leveys            | 700 mm  |
| Kattilan syvyys            | 1192 mm |

Arimax HakeJet -biopoltin on tarkoitettu ensisijaisesti hakkeen polttoa varten. Puoliympyrän muotoinen avoin palopää on valurautarakenteinen, mikä tekee arinasta kestävä ja pitkäikäisen. Liekin lämpötila saadaan riittävän korkeaksi ja palaminen puhtaaksi keraamisen paloholvin avulla (kuvio 2). Biopoltin painaa 67 kg. Jatkuvassa pellettikäytössä polttimeen tulee valita pellettiarina. (Biolämpöopas 2007, 11.)



KUVIO 2. 60 kW Hakejet-biopolttin (Biolämpöopas 2007, 11)

Arimax 1040 Minijet koostuu polttoainesiilosta kansineen, kahdesta lautaspurkaimesta, syöttöruuvista ja palamista ohjaavasta automatiikkayksiköstä. Normaalisti pakettiin kuuluu 20–40 kW:n palopää, mutta testikäyttöön varustetussa polttolaitteistossa palopää on vaihdettu 60 kW:n tehoiseen polttimeen. Polttoaineen varastosäiliön tilavuus on 1.000 litraa. (Biolämpöopas 2007, 10.) Kuviossa 3 on nähtävillä kaaviokuva varastosäiliöstä ja polttoaineen siirtelyjärjestelmästä.



KUVIO 3. Kaaviokuva polttoaineen varastosäiliöstä



### 2.3 Kosteuden määrittäminen kiinteästä biopolttoaineesta

Kukin työpari määrittäi polttoaineidensa kosteuden ISO 589 -standardin mukaisesti Bioenergiakeskuksen laboratorioissa.

Polttoaineen kosteuden määrittämiseen käytettiin seuraavia välineitä:

- Digitaalivaaka, Kern KB, punnitustarkkuus 0,01 g.
- Laboratorio lämpökaappi, Heraeus Function line T12.
- Foliorasia, 2 kpl puhtaita ja kuivia rasioita.

Näytteitä kuivattiin kuivatusuunissa 105 °C:ssa 16–24 tunnin ajan. Näytteitä ei saa kuivata yli 24 tuntia. Kuivatessa kosteita näytteitä lämpökaapissa ei saa olla samaan aikaan kuivia näytteitä.

Kosteusnäytteiden kokoon vaikuttaa käytettävän vaa’an punnitustarkkuus sekä polttoaineen palakoko. Punnitustarkkuuden ollessa 0,01 g, punnitaan kaksi 30–100 g:n painoista näytettä, ja kun punnitustarkkuus on 0,1 g, punnitaan kaksi 200–400 g:n painoista näytettä. Oikean lopputuloksen saamiseksi on muistettava punnita tyhjät rasiat erikseen. Näytteet punnitaan heti kuivauksen jälkeen. Näytteet voidaan myös jäähdyttää eksikaattorissa huoneen lämpötilaan, minkä jälkeen näytteet punnitaan.

Näytteiden kosteus lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

$m_1$

$M_{ar}$  = märkäpainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%)

$m_1$  =\* märän näytteen massa (g)

$m_2$  = kuivatun näytteen massa (g)

### 2.4 Polttoaineiden massan ja tilavuuden määrittäminen

Ennen polttokokeen aloittamista valmistelevana toimenpiteenä määritettiin käytettävien polttoaineiden massat. Punnituksen jälkeen voitiin tehdä tarvittava seos. Joillakin polttoaineilla katsottiin käytännöllisemmäksi tehdä seossuhteet tilavuuksien perusteel-

la. Massan ja kosteuden avulla määritettiin polttoaineiden sisältämät energiamäärät. Polttokokeen loppuvaiheessa punnittiin palamisesta syntyneen tuhkan määrää.

Punnitukset suoritettiin saaveissa taikka ämpäreissä. Punnituksissa käytetyn vaa'an mittaustarkkuus oli 10 grammaa. Tilavuudet polttoaineille määritettiin polttoaineesta riippuen saavilla taikka ämpärillä.

## 2.5 Savukaasuanalysoijan käyttö polttokokeissa

Polttokokeiden aikana mitattiin savukaasujen koostumusta Testo 300 -savukaasu-analysoijalla (kuvio 4). Savukaasuanalysoijan tietoja tarkistamalla suoritimme laitteiston säädön optimaalisen palamisen aikaansaamiseksi. Kokeen edetessä otimme myös mittauksia puolen tunnin välein seurataksemme palamisen puhtautta ja syntyviä päästöjä. Savukaasuista mitattiin seuraavia muuttujia:

- O<sub>2</sub>-sisältö eli palamisen jäännöshappi
- CO-sisältö eli savukaasun häkäpitoisuus
- savukaasun lämpötila, °C
- palamishyötysuhde
- NO-sisältö eli savukaasun typenoksidipitoisuus



KUVIO 4. Testo 300 -savukaasuanalysoija

Tavoitteena oli päästä häkäpitoisuudessa alle 500 ppm sekä savukaasujen jäännöshapen tulisi olla 5–10 %. Savukaasujen typen oksidien pitoisuuteen vaikuttaa ilmamäärän suuruus sekä palamislämpötila.

### **Analysaattorin käyttö**

Ennen mittauksien aloittamista analysaattori tuli koota käyttökuuntoon. Analysaattoris-  
sa on erillinen suodatin, joka erottaa kaasun sisältämän kosteuden sekä pienhiukkaset.  
Pitempiketoisissa mittauksissa mahdollisuutena oli käyttää myös sähkökäyttöistä  
suodatinta. Analysaattorissa on sisäinen pumppu, joka kierrättää kaasut anturista let-  
kua pitkin mittauskennostoille. Ennen laitteen anturin asentamista savukanavaan ana-  
lysaattorin annettiin käynnistyä ja kalibroitu raittiilla ilmalla.

Kun analysaattori oli käynnistynyt, mittausanturi sijoitettiin savukanavaan savukaasu-  
lämpömittarin paikalle siten, että anturin pää oli keskellä savukanavaa. Polttolaitteis-  
ton säätämisen alkuvaiheissa vaarana on liian korkeaksi nouseva häikäpitoisuus, mikä  
voi vaurioittaa mittauskennostoa. Tämän vuoksi analysaattoriin voidaan asettaa rajat,  
jolloin se lopettaa savukaasujen pumppauksen. Kokeen aikana CO-pitoisuuden raja oli  
5000 ppm. Mittausten päätyttyä anturi poistettiin savukanavasta ja sen annettiin jääh-  
tyä sekä pumpata raitista ilmaa. Kun laitteisto oli kylmä, voitiin analysaattori purkaa.  
Suodattimesta poistettiin vesi ja osat kuivattiin ja jätettiin kuivumaan.

## **3 TULOKSET**

Polttokokeissa käytettyjen polttoaineiden ominaisuudet sekä kokeiden päätulokset on  
koottu taulukkoon 8, joka löytyy luvusta 3.9.

### **3.1 Ruokohelppi**

Ruokohelven polttokokeet tehtiin 5.12.2007. Polttokokeista ja niiden raportoinnista  
vastasivat Jenni Sironen ja Matti Toivakka. Kokeissa käytettiin keväällä 2007 lautas-  
niittokoneella niitettyä ja paalaimella pyöröpaalattua helpeä (kuvio 5) sekä kokopuu-  
haketta (kuvio 6). Polttoaineen toimittanut viljelijä oli käyttänyt kyseisen helpierän  
paalauksen yhteydessä paalaimen silppuamistoimintoa, joten erillistä silppuamista ei  
tarvinnut tehdä. Laadultaan helpipolttaine vaikutti hyvältä ja kuivalta. Joukossa ei  
ollut liiemmin epäpuhtauksia, risuja tai tuoretta kasvustoa. Hakkeen laatu oli myös  
kohtalaisen hyvä.



KUVIO 5. Polttokokeissa käytetty ruokohelpi



KUVIO 6. Polttokokeissa käytetty kokopuuhake

Silpun keskimääräiseksi pituudeksi mitattiin 5 cm. Joukossa oli myös pidempiä korsia (taulukko 2). Silpun pituus määriteltiin ottamalla helpisilpusta viiden litran näyte, josta eripituiset korret eroteltiin omiin osioihinsa. Osiot punnittiin ja eri osioiden massa verrattiin koko viiden litran näyte-erän painoon.

TAULUKKO 2. Ruokohelpisilpun pituus

| Silpun pituus | Osuus näyte-erän kokonaismassasta |
|---------------|-----------------------------------|
| 0–5 cm        | 80 %                              |
| 5–10 cm       | 11,6 %                            |
| yli 10 cm     | 8,4 %                             |

### 3.1.1 100 % ruokohelpi

Koe aloitettiin testaamalla puhtaan ruokohelpisilpun toimivuutta laitteistossa. Siiloon laitettiin aluksi 130 litraa helpisilppua (kuvio 7). Pian kuitenkin selvisi, että kevyenä polttoaineena helpisilppu ei lähtenyt kulkemaan siilosta ruuville. Siilon pohjan lautaspurkaimet eivät saaneet minkäänlaista otetta silpusta. Silppua yritettiin tiivistää ja tökkiä käsin, mutta tuloksetta. Näin ollen pelkän helpisilpun poltettavuutta ei päästy testaamaan, vaan päädyttiin tekemään seos hakkeen kanssa.



KUVIO 7. Ruokohelpisilppua varastosiilossa

### 3.1.2 Ruokohelpi–hake-seos

Seuraavaa yritystä varten valmistettiin ruokohelpi–hake-seos, jossa oli tilavuudesta puolet kokopuuhaketta ja puolet ruokohelpeä (kuvio 8). Energiasisällöstä helpeä oli noin 20 % (taulukko 8). Helpisilppu ja hake mitattiin 65 litran saavin avulla ja jokainen saavillinen punnittiin.



KUVIO 8. Ruokohelpi–hake-seosta varastosiilossa

Seoksen kokonaisenergiasisällöksi määritettiin 237 kWh. Siiloon jäi kuitenkin polttokokeen jälkeen noin 20 kg helpi–hake-seosta, sillä siiloa ei onnistuttu polttamaan tyhjäksi. Siiloon jäänyt polttoainemäärä sisältää energiaa noin 66 kWh, joten käytettyjen polttoaineiden energiasisällöksi muodostui loppujen lopuksi 171 kWh. Energiamittarin mukaan kokeen aikana tuotettiin energiaa 119 kWh. Edellä mainittujen lukujen perusteella laitteiston kokonaishyötysuhteeksi kokeen aikana saatiin 69,6 %.

### **Polttokokeen eteneminen**

Helpi–hake-seoksen kulku syöttöjärjestelmässä oli alusta alkaen epätasaista, joten laitteiston säätäminen ja vakiintuneen palamistilan saavuttaminen oli tästä syystä vaikeaa. Välillä helpeä tuli iso tukko palopäälle, välillä taas haketta tuli enemmän. Ruuvia joutui ajoittain pyörittämään käsikäytöllä pitkiäkin aikoja, sillä polttoainetta ei tuntunut tulevan ollenkaan.

Laitteiston lämpeneminen vei melko paljon aikaa ja palaminen lähti toden teolla käyntiin vasta muutamia tunteja kokeen aloittamisen jälkeen. Savukaasuanalyysiä ei pystytty tekemään, sillä vakiintuneen palamisen jaksot jäivät lyhyiksi. Helpi paloi sytytysvaiheen jälkeen palopäällä nopeasti ja syöttö tuli säätää isolle. Palo tapahtui tästä huolimatta palopään takaosassa (kuvio 9). Jos syöttö olisi liian pienellä, saattaisi vaarana olla takapalon syntyminen. Kyseiselle ruokohelpi–hake-seokselle sopiva pulssin pituus oli kokeen perusteella peräti 25 sekuntia ja tauko 0,5 sekuntia. Ruuvien tuli siis pyöriä lähes jatkuvasti, sillä polttoainevirta havaittiin epätasaiseksi ja helpi nopeasti palavaksi polttoaineeksi.



KUVIO 9. Ruokohelvi–hake-seoksen palaminen käynnissä

Ilmamäärien säätäminen savukaasuanalysaattoria hyväksi käyttäen jäi haaveeksi, koska palamisessa oli toistuvia häikäsiikkejä. Näin ollen ilmamääriä säädettiin ainoastaan silmävaraisesti liekkiä tarkkailemalla. Ruokohelvi tosin kipunoi paljon palon aikana, mikä vaikeutti liekin tarkkailua. Ilma-aukkojen ollessa täysin auki oli palaminen voimakasta ja nopeaa. Ilmamääriä päätettiin kokeen loppuvaiheessa pienentää, jotta palaminen ei etenisi liiankin nopeasti. Ensiöilma-aukkojen ollessa 1/2–2/3 auki (kuvio 10) ja toisioilma-aukkojen ollessa lähes kokonaan auki palaminen eteni kokeen perusteella parhaiten.



KUVIO 10. Ruokohelven polttokokeissa hyväksi havaittu ensiöilman puhallinsäätö

Tuhkaa syntyi kokeen aikana vaihtelevasti. Palon ollessa tasaista tuhkan syntyminen oli vähäistä. Ruokohelvestä syntyi hyvin kevyttä ja lentävää nokea sekä tuhkaa. Laitteisto nuohottiin kokeen jälkeen ja syntyneen tuhkan määräksi punnittiin 2,2 kg (kuvio

11), joka on 4,5 % polttoaineen kuiva-ainemäärästä. Tuhkatilassa oli kuitenkin myös palamatonta materiaalia, joten varsinaisen tuhkan määrä jäi todellisuudessa pienemmäksi. Tuhkan laavaantumista ei kokeen aikana havaittu ollenkaan. Laitteistosta saatiin kokeen aikana irti kohtuullisesti tehoja ja vakiintuneen palamisen aikana päästiin lähelle 60 kW:n tehoa.



KUVIO 11. Ruokohelven polttokokeessa syntyneen tuhkan määrä

### 3.2 Palaturve

Palaturpeen polttokoe tehtiin 11.1.2008. Polttokokeista ja niiden raportoinnista vastasivat Asmo Erjava ja Tuomo Vilkkilä. Kokeessa käytetty palaturve saatiin Vapo Oy:lta Ähtäristä. Palaturve on halkaisijaltaan 40–70 mm ja pituudeltaan 50–200 mm (kuvio 12). Turpeen keskimääräinen tuhkapitoisuus on 2–10 % (Alakangas 2000, 90).



KUVIO 12. Palaturvetta (Palaturve 2008)



Polttokokeessa poltetun turve-erän (62,8 kg) kokonaisenergiasisällöksi määritettiin 287 kWh (taulukko 8). Energiamittarin mukaan kokeen aikana tuotettiin 177 kWh energiaa. Edellä mainittujen lukujen perusteella laitteiston hyötysuhteeksi kokeen aikana voitiin laskea 61,7 %.

Palaturve kuljetettiin lämpökontin siiloon pienkuormaajan kauhalla (kuvio 13). Seuraavaksi ajoimme syöttöruuvilla polttoainetta palopäälle. Palaturve liikkui ruuvilla hitaasti, joten jouduimme pyörittämään ruuvia jonkin aikaa (kuvio 14). Edelliseltä ryhmältä oli jäänyt myös ruuville hieman hevosenlantaa, jonka jouduimme poistamaan ennen sytyttämistä.



KUVIO 13. Palaturvetta pienkuormaajan kauhassa



KUVIO 14. Palaturvetta polttoainesiilossa

Polttoaineen sytyttämistä hankaloitti palaturpeen seassa oleva hevosenlanta sekä sytytysnesteen ja muun sytytysaineen puute. Palaturpeen syttyminen näyttäisi vaativan korkean lämpötilan ja hyvät sytytysvälineet. Kun palaturve oli syttynyt kunnolla, se paloi erittäin kuumalla ja kirkkaalla liekillä lämmittäen laitteiston hyvin nopeasti. Palaminen tapahtui pääasiassa palopään takaosassa korkealla lämpötilalla, joten takapalon vaara saattaisi olla olemassa.

Laitteiston säätämisen aloitimme kokeilemalla raja-arvoja laidasta laitaan etsien oikeita säätöjä (taulukko 3). Laitteistoa säädimme tarkkailemalla savupiipusta tulevan savun väriä sekä savukaasuanalysointorin avulla. Polttokokeessa palaturpeesta syntyi 1,5 kg tuhkaa (kuvio 15) eli tuhkapitoisuus on noin 3,0 % polttoaineen kuiva-ainemäärästä.

TAULUKKO 3. Polttokokeen eteneminen

| Pulssi | Tauko | Huomiot  |
|--------|-------|--|
| 3,0    | 10,0  | Ensimmäinen savukaasuanalyysi:<br>O <sub>2</sub> = 3,7 %, CO = 278 ppm, svk = 203 °C, NO <sub>x</sub> = 390 ppm, teho = 51,7 kW  |
| 2,7    | 9,5   | Toinen savukaasuanalyysi:<br>O <sub>2</sub> = 5,9 %, CO = 180 ppm, svk = 226 °C, NO <sub>x</sub> = 366 ppm, teho = 53,3kW  |
| 2,0    | 8,5   | Säädöt alkavat olla kohdillaan. Kolmas savukaasuanalyysi:<br>O <sub>2</sub> = 5,4 %, CO = 74 ppm, svk = 217 °C, NO <sub>x</sub> = 400 pm, teho = 57,2 kW               |
| 2,0    | 8,0   | Löysimme oikeat säädöt pulssille ja tauolle. Neljäs savukaasuanalyysi:<br>O <sub>2</sub> = 6,7 %, CO = 53 ppm, svk = 214 °C, NO <sub>x</sub> = 385 ppm, teho = 53,5 kW |
| 2,0    | 8,0   | Viides savukaasuanalyysi:<br>O <sub>2</sub> = 3,4 %, CO = 60 ppm, svk = 223 °C, NO <sub>x</sub> = 300 ppm, teho = 58,6 kW.   |



KUVIO 15. Palaturpeen poltosta syntynyttä tuhkaa ja laavaa

### 3.3 Viljan esipuhdistusjäte-kokopuuhake

#### 3.3.1 Koemateriaali ja koeolosuhteet

Kokeessa käytettiin Bioenergiakeskukselle toimitettua kokopuuhaketta (kuvio 16) ja erään maatilan kuumailmakuivurin esipuhdistajalta tullutta lajittelutähdettä, joka koostui akanasta eli kevyistä, pääosin kauran jyvistä, ruumenista sekä rikkakasvin siemenistä ja muusta roskasta (kuvio 17). Polttokokeista 8.1.2008 ja niiden raportoinnista vastasivat Laura Vertainen ja Liisa Vesterinen.



KUVIO 16. Kokopuuhaketta



KUVIO 17. Viljan esipuhdistusjätettä

Polttoaineen seossuhde määriteltiin tilavuuden mukaan siten, että haketta oli 80 % ja esipuhdistusjätettä 20 % tilavuudesta, koska polttoainesiihon täyttäjää ei käytännössä lähde punnitsemaan jakeita, vaan täyttää siilon helpoimmin toteutettavan perusteen eli tilavuusmitan perusteella. Aiempien viljan ja ruokohelpin polttokokemusten perusteel-

la arvioimme, että esipuhdistusjakeen ja hakkeen suhde 1:4 saataisi olla realistinen ja toimiva. Esipuhdistusjaetta syntyy suhteellisen pieni määrä hyvin rajoitettuna ajankohtana, joten kovin suuria muutoksia esim. kattilan säätöihin ei kannata ryhtyä sen takia tekemään. Toisaalta, jos esipuhdistusjake soveltuu poltettavaksi esimerkiksi hakkeen ohessa, ei ole mitään syytä olla hyödyntämättä sitä polttoaineena.

Hake oli syystalven sateisten ja leutojen säiden myötä kostunut ja jäänyt (kosteus 43,3 %). Myös esipuhdistusjake oli ollut ulkosäilytyksessä ja sen kosteus oli 29,4 %. Sää koepäivänä oli melko tyyni ja ulkoilman lämpötila  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lämpökontti oli ollut useita viikkoja lämmittämättä, joten laitteisto oli kylmä. Onkin oletettavaa, että maatilakäytössä esipuhdistusjake poltetaan jo valmiiksi lämpimällä laitteistolla.

### 3.3.2 Kokeen suorittaminen

#### Koepoltto

Kattilan ja koko lämpökontin ollessa jäässä meni laitteiston ja polttokokeen käynnistämiseen oletettua enemmän aikaa. Kattilalämpötila nousi siis hitaasti. Palaminen vaikutti kuitenkin lupaavalta, joten lisäsimme vähitellen kaiken polttoaineen siiloon. Kosteasta polttoaineesta ja kylmästä palopäästä johtuen syttymisestä tasaiseen palamisen kului runsaasti aikaa. Säätämisen suoritimme kokeilemalla eri säätöjä ja arvioimalla silmämääräisesti liekin väriä ja kokoa. Tavoitteena oli kirkas ja isohko liekki, jottei palaminen päässyt liian kauas taakse palopään etuosasta eikä tuhkatilaan pudonnut palamatonta materiaalia. Vakiintuneen palamisen aikana syöttöruuvin sopivimmiksi säädöiksi osoittautuivat: pulssi 2–3 s ja tauko 5–6 s. Savukaasuanalyysin tulosten ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ) perusteella silmämääräiset säätömme osoittautuivat myös olevan kohdallaan.

Kokeen alkuvaiheessa emme havainneet polttoaineen lajittumista (kuvio 18), mutta polttoaineseos holvaantui välillä siilossa, joten sitä täytyi käydä kokeen loppua kohden yhä useammin sekoittelemassa. Vähitellen palo muuttui epätasaiseksi ja vaati jatkuvaa syöttöruuvin käyntisuhteen säätämistä. Loppua kohden polttoaineseos alkoi siis lajittua. Siilon reunoille jäi enemmän esipuhdistusjaetta ja seos ei kulkeutunut riittävän tasaisesti ruuville, joten välillä polttoaineen saannissa oli häiriötä. Esipuhdistusjake paloi varsin nopeasti ja hake taas viipyi kauemmin. Se vaikutti palamisen sujuvuuteen ja mm. päästöihin. Kovin suureksi ongelmaksi emme lajittumista koejakson aikana

kokeneet, mutta pidempään jatkuvassa poltossa ja suurempien erien kanssa siihen lie-  
nee syytä kiinnittää huomiota.



KUVIO 18. Esipuhdistusjäte-hake-seosta polttoainesiihossa

### Savukaasuanalyysi

Kun palaminen alkoi mielestämme vaikuttaa tasaiselta (kuvio 19), aloitimme savukaa-  
sun mittaukset. Pyrimme suorittamaan mittaukset 30 minuutin välein. Muutaman ker-  
ran häiriöiden ja välttämättömien huoltotöiden takia jouduimme tekemään mittauksen  
vasta tilanteen vakiinnuttua. Saamamme arvot vaikuttivat mielestämme ihan kohtuul-  
lisilta ottaen huomioon vähäisen kokemuksemme, uuden polttoaineen ja polttamisolo-  
suhteet (mm. varsin hitaasti lämpenevä polttolaitteisto). Savukaasuanalyysin mittaus-  
tulokset on esitetty taulukossa 4.



KUVIO 19. Liekki palopäällä

TAULUKKO 4. Savukaasuanalyysin mittaustulokset.

| Mittaus<br>nro | O <sub>2</sub><br>(%) | CO<br>(ppm) | Savukaasun<br>lämpötila (°C) | NO <sub>x</sub><br>(ppm) | Hyötysuhde<br>η (%) | Kattilateho<br>(kW) |
|----------------|-----------------------|-------------|------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| 1              | 11,0                  | 684         | 165                          | - *                      | 87,5                | - *                 |
| 2              | 7,8                   | 156         | 169                          | 244                      | 90,3                | 37,5                |
| 3              | 7,3                   | 220         | 198                          | 220                      | 89,1                | 44,7                |
| 4              | 4,6                   | 172         | 221                          | 300                      | 89,8                | 53,0                |
| 5              | 5,9                   | 250         | 223                          | 253                      | 88,8                | 55,7                |
| 6              | 12,6                  | 1257        | 179                          | 149                      | 83,8                | 39,5                |
| 7              | 3,5                   | 271         | 197                          | 303                      | 91,4                | 40,9                |

\* puuttuva tieto

### Palamistulos

Palamatonta polttoainetta ei tuhkatilaan juurikaan jäänyt. Polttamisen päätyttyä nuohosimme tuhkatilan sekä lämmönvaihtopinnat ja punnitsimme molempien tuhkan erikseen. Tuhkatilaan oli kertynyt 2,5 kg tuhkaa ja lämmönvaihtopinnoille 0,4 kg eli 3,8 % polttoaineiden kuivamassasta. Tuhkatilan tuhka vaikutti silmämääräisesti arvioiden hyvin palaneelta, joskin tyypillisiä mustuneita jyviä ja pitkänomaisia leijuvia partikkeleita sekä puuperäistä hiiltä oli joukossa. Leijailevia hiukkasia poistui jonkin verran myös savukaasujen mukana ulkoilmaan. Palopäälle oli puolestaan kertynyt noin nyrkin kokoinen laavaantunut palojäännös, joka vaikutti olevan hiekkaa ja pikkukiviä. Lämmönvaihtopintojen tuhka oli hienojakoista ja väriltään harmaata. Se sijaitsi pääasiassa ensimmäisen konvektion pohjalla eivätkä itse lämmönvaihtopinnat olleet merkittävästi likaantuneet. Varsinaista kuonaantumista ei juuri ilmennyt.

Polttokokeessa poltetun polttoaine-erän kokonaisenergiasisällöksi määritettiin 364 kWh (taulukko 8). Energiamittarin mukaan kokeen aikana tuotettiin 251 kWh energiaa. Edellä mainittujen lukujen perusteella laitteiston hyötysuhteeksi kokeen aikana voitiin laskea 68,8 %.

### 3.4 Märkä kokopuuhake

Polttokoe märällä kokopuuhakkeella tehtiin 22.12.2007. Polttokokeista ja niiden raportoinnista vastasivat Heikki Autio ja Tiina Vilkkilä. Koepäivän säätila oli poutainen ja pakkasta oli muutama aste. Kokeessa käytettävä polttoaine, märkä kokopuuhake, saatiin Bioenergiakeskuksen pihalla olevasta kasasta pienkuormaajalla (kuvio 20).



KUVIO 20. Hakekasa ja polttoaineen lastaus

Kattilan sytytykseen käytettiin paperia ja sytytysnesteinä biodieseliä (kuvio 21). Kiertovesipumppu kytkettiin päälle ensimmäisen syttymiskerran jälkeen. Palaminen oli kuitenkin epävakaata ja tuli sammui tunnin aikana noin 3–4 kertaa (kuvio 22).



KUVIO 21. Hake palopäällä ennen sytyttämistä



KUVIO 22. Palaminen märällä kokopuuhakkeella

Kokeilun kautta voitiin todeta, ettei sytyttäminen onnistu märällä kokopuuhakkeella. Päätimme kokeilla sytyttämistä kuivalla polttoaineella, puupelletillä. Pellettiä syötettiin palopään kautta ajaen syöttöruuvia taaksepäin kunnes ruuvi oli täysi (noin 10 kg). Pellettiä poltettiin noin tunnin verran käsiajolla käyttäen. Pellettiä poltettaessa liekki oli suuri ja polttoaine paloi hyvin. Pelletillä saatiin kattilalämmöt nousemaan 10 asteesta 42 asteeseen.

Polttoaineen vaihduttua takaisin märälle kokopuuhakkeelle palaminen näytti aluksi hyvältä. Jatkoimme polttoa hetken aikaa käsiajolla, minkä jälkeen vaihdoimme automaattisyötölle. Märkä kokopuuhake paloi kituen ja runsaasti savuttaen (kuvio 23). Kokeilimme erilaisia säätöjä ja totesimme, että tauon pituuden tulee olla pitkä. Säädöistä huolimatta palopäässä oli havaittavissa edelleen runsaasti huonosti palavaa polttoainetta. Automaatti kytkettiin pois ja siirryimme takaisin käsikäyttöiseen ohjaukseen. Tuloksessa ei tapahtunut juurikaan parannusta, liekki oli edelleen kituva ja savua paljon. Liekki kasvoi hieman, kun ensiö- ja toisioilman määriä säädeltiin, mutta liekki ei pysynyt vakaana.





KUVIO 23. Palaminen kokopuuhakkeella pelletin jälkeen

Savupiipusta nousi sankkaa savua ja välillä seasta tuprahteli ruskeaa savua (kuvio 24). Polttokokeen aikana havaitsimme, että ensiöilman määrä tulee olla märkää polttoainetta polttaessa suuri. Liekki sammui lopullisesti kattilan lämmön ollessa 48 °C. Palopäässä oleva polttoaine oli edelleen märkää.



KUVIO 24. Savu märkää kokopuuhaketta polttaessa

Polttokokeen lopuksi kattila ja lämmönvaihtopinnat nuohottiin ja siilo tyhjennettiin jäljelle jääneestä polttoaineesta. Punnituksen tuloksesta voidaan todeta, että polttoainetta kului vain 21,3 kg, josta osa oli ajautunut tuhkatilaan. Vähäisen tuhkan seassa oli runsaasti palamatonta polttoainetta sekä sytytykseen käytettyä paperia ja pahvia (kuvio 25).



KUVIO 25. Märän kokopuuhakkeen palamisjäännös

### 3.5 Hevosenlanta–kuiviketurve-seos

#### 3.5.1 Polttoaine

Polttoaineena oli turvekuivitetun hevostallin karsinansiivousjäte suoraan karsinasta kuivaamatta. Seos sisältää pääasiassa hevosen lantakikkareita ja kuivaa tai kuivahkoa turvetta sekä satunnaisia heinäkorsia (taulukko 5 ja kuvio 26). Polttoaineen kosteus oli 65,8 %. Polttokokeista 9.1.2008 ja niiden raportoinnista vastasivat Johanna Kivimäki ja Perttu Ojakoski.

TAULUKKO 5. Turvelannan koostumus

| <b>lantaa</b> | <b>turvetta</b> | <b>heinäkorsia</b> |
|---------------|-----------------|--------------------|
| n. 60 %       | n. 40 %         | < 1 %              |



KUVIO 26. Hevosenturvelantaa kottikärryjen pohjalla

### 3.5.2 Polttokokemuksia

Kattila oli kokeen alussa kylmä ja kontissa oli melko kylmää ja kosteaa. Sytytyspahvikin paloi aluksi huonosti, mutta saimme runsaan sytytysnesteen avulla turvelannan syttymään suhteellisen helposti ja nopeasti. Polttoaine tuli hyvin läpi kuljettimilta, pienet heinäkorretkaan eivät haitanneet, mutta palopäälle massa tuli isona kökkönä ”tuutin täydeltä”. Turvelanta paloi kohtuullisella liekillä alhaaltapäin kunnes sytytysnesteen vaikutus lakkasi. Tällöin liekki alkoi voimakkaasti hiipua eikä ilman säätämisenkään auttanut. Palaminen lakkasi aina uudestaan, kun lisätty sytytysneste paloi loppuun. Välillä ylhäältäpäin sortui ”kakkua” liekin päälle, mikä tukahdutti liekkiä lisää. Useiden yritysten jälkeen luovutimme ja päätimme lisätä turvelannan sekaan reilusti haketta palamisen helpottamiseksi.

Kontin viereisessä kärryssä oleva hake oli myös melko märkää (kosteus noin 45 %) eikä hake muuttanut palamistapahtumaa mihinkään suuntaan, vaikka syötimme palopäälle aluksi lähes pelkkää haketta. Sytyttäminen oli hakkeen avulla ehkä hieman helpompaa, mutta liekki hiipui silti väistämättä samalla lailla. Kattilan oltua tulilla noin neljä tuntia kattilalämpö ei ollut nihkeän palamisen vuoksi noussut vielä edes 20 °C:een. Niinpä tulimme johtopäätökseen, että sekä turvelanta että lanta-hakeseos on liian märkää poltettavaksi. Emme siis saaneet savukaasumittauksia tehtyä.

### 3.6 Normaali kokopuuhake

Käytetty kokopuuhake oli normaalilaatuista kokopuuhaketta ja sen kosteus oli 37 %. Punnituksen ja laskelmien mukaan haketta laitettiin siiloon 172 kg (taulukko 8). Hake syttyi helposti ja paloi tasaisesti. Kattilan käytössä oli aluksi opettelemista, ennen kuin sen käyttäminen onnistui tehokkaasti. Kokeen alussa pidettiin säätöinä alueen 1 tehdasarvoja, jotta kattila saataisiin nopeasti lämpimäksi. Tästä syystä tuhkatilaan meni paljon palamatonta hiiltä ja hyötysuhde jäi alhaiseksi. Kun kattilan lämpö oli tasaantunut, hake holvaantui siilossa ja liekki melkein sammui. Kattila piti uudelleen lämmittää ja vasta sen jälkeen savukaasuanalyysit päästiin aloittamaan. Polttokokeista 23.1.2008 ja niiden raportoinnista vastasivat Jonna Heinänen ja Arttu Lamminmäki.

Savukaasuanalysaattorin keskimääräiset arvot mittauskerroista:

|                          |             |                             |
|--------------------------|-------------|-----------------------------|
| 1. O <sub>2</sub> 9,6 %  | CO 564 ppm  | savukaasun lämpötila 220 °C |
| 2. O <sub>2</sub> 14 %   | CO 2968 ppm | savukaasun lämpötila 183 °C |
| 3. O <sub>2</sub> 13,1 % | CO 1620 ppm | savukaasun lämpötila 160 °C |

Savukaasuanalyysin tulokset ovat hieman erikoiset, koska hakkeen syöttönopeutta oli pienennetty ja silmämääräisesti palaminen näytti hyvältä. Ilman lisääminen ei vähentänyt häkämääriä, vaikka happimäärät lisääntyivät. Syiksi huonoihin tuloksiin epäilemme joko analysaattorin virheellistä käyttöä tai tuhkatilassa olevan palamattoman aineksen vaikutusta tuloksiin. Enempää mittaustuloksia ei otettu, koska hake ja tasainen palaminen alkoivat loppua. Jos koe olisi jatkunut pidempään, olisivat tulokset luultavasti parantuneet.

### 3.7 Rypsirouhe–hake-seos

Kokeessa poltettiin rypsirouhe–hake-seosta, jossa oli 1/3 rypsirouhetta ja 2/3 haketta (kuvio 27). Seokseen mitattiin 140 litraa rypsirouhetta ja 280 litraa haketta eli yhteensä 420 l. Kokeen aikana seosta poltettiin 195 litraa. Seos valmistettiin pienkuormajan kauhassa lapiolla sekoittaen (kuvio 28). Polttokokeista 17.12.2007 ja niiden raportoinnista vastasivat Matti Hokkanen ja Antti Laitinen.



KUVIO 27. Rypsirouhe–hake-seosta



KUVIO 28. Rypsirouheen ja hakkeen sekoitus

### 3.7.1 Kokeen eteneminen

Rypsirouhe–hake-seos kulki syöttöjärjestelmässä hyvin. Se syttyi myös hyvin. Laitteiston säätämisen aloitimme hakeasetuksista. Jouduimme kuitenkin pidentämään taukoa 17 sekuntiin ja pienentämään syöttöä 1,7 sekuntiin. Ilmamäärien säätäminen oli erittäin tarkkaa ja pienikin muutos vaikutti suuresti savukaasun CO-pitoisuuteen. Alkusäädön teimme silmämääräisesti liekin ja savun värin perusteella. Hienosäätö hoidettiin savukaasuanalysointorilla. Polttokokeen aikana otimme mittaustuloksia puolen tunnin välein yhteensä seitsemän kertaa (kuvio 29, taulukko 6).



KUVIO 29. Kuva liekistä ja palopäästä

TAULUKKO 6. Savukaasuanalyssaattorilla mitatut arvot kokeen aikana

|                              | pienin arvo | suurin arvo | keskiarvo |
|------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| O <sub>2</sub> -pitoisuus, % | 6,0         | 8,7         | 7,0       |
| CO-pitoisuus, ppm            | 46          | 80          | 65        |
| Savukaasun lämpötila, °C     | 182         | 218         | 196       |
| Palamishyötysuhde, %         | 88,5        | 90,4        | 89,4      |
| NO-pitoisuus, ppm            | 414         | 600         | 496       |

Kokeen loputtua tyhjensimme siilon ja poltimme syöttöruuvilla olleen seoksen loppuun. Energiaa kokeen aikana tuli 139 kWh, joka oli 50,2 % käytetyn polttoaineen energiasisällöstä (taulukko 8). Kattilan tehot vaihtelivat kokeen aikana 40–45 kW. Kattilan jäähtyttyä nuohosimme sen. Tuhkaa oli syntynyt yhteensä 2,7 kg.

### 3.7.2 Tuhkan muodostus poltossa

Rypsirouhe–hake-seos toimi hyvin käytetyssä lämmitysjärjestelmässä. Oikeiden säätöjen löytäminen onnistui myös hyvin. Tuhkan määrä oli kuitenkin suhteellisen suuri ja sitä syntyi 5,9 % käytetyn polttoaineen kuiva-ainemäärästä. Syynä korkeaan tuhkapitoisuuteen oli luultavasti se, että puhallusta joutui pitämään isolla ja tällöin osa palamattomasta hiilestä lensi tuhkatilaan (kuvio 30). Konvektioissa oli myös suhteellisen paljon tuhkaa, mikä todennäköisesti johtuu suurista ensiö- ja toisioilmamääristä.



KUVIO 30. Hiilipitoista tuhkaa

Kokeen aikana tuli ajatus, että säädöissä pulssia ja taukoa olisi voinut lyhentää, jolloin syöttö olisi ollut tasaisempaa. Rypsirouhe sisältää jonkin verran lehtivihreää, joten sen vuoksi typen oksidit olivat korkealla. Tästä syystä seoksessa saisi olla vähemmän ryp-

sirouhetta. Kokeen aikana palopäälle syntyi myös pieni laavakimpale (kuvio 31). Sopivan seossuhteen aikaansaaminen vaatisi vielä lisämittauksia erilaisilla seossuhteilla. Samalla selviäisi myös se, että aiheuttaako korkea rypsipitoisuus laavaamista. Lajittuminen ei ollut ongelmana näin pienillä määrillä. Suuremmissa erissä tällaisilla seossuhteilla lajittumista voi ilmaantua.



KUVIO 31. Laavakimpale

## 3.8 Kaura–kokopuuhake-seos

### 3.8.1 Kokeen aloitus ja mittaukset

Käytimme polttokokeessa ulkona, peräkärnyssä pressun alla säilöttyä kokopuuhaketta. Seoksen toisena jakeena oli kaura, jota oli säilytetty kangassäkeissä Bioenergiakeskuksen sisätiloissa. Päätimme hakkeen määräksi 300 litraa ja kauran määräksi 50 litraa (kuvio 32). Yhteensä seoksen massaksi tuli 89,6 kg, josta viljaa 24,5 kg ja haketta 65,1 kg. Määritimme seoksen energiasisällöksi 301 kWh. Testauksemme toteutunut tuotettu energiamäärä oli 198 kWh, jolloin kattilan hyötysuhteeksi tuli 66 % (taulukko 8). Polttokokeista 16.1.2008 ja niiden raportoinnista vastasivat Sanna Halonen ja Harri Penttilä.



KUVIO 32. Hake–kaura-seosta siilossa

### 3.8.2 Asetusten säätäminen

Aloittaessamme polttokokeen lähdimme kokeilemaan miten seos käyttäytyy palopäällä hakkeelle asetettujen säätöjen mukaan. Teimme ensin säätöjä ainoastaan muuttamalla pulssin ja tauon pituuksia. Kokeilimme ensin, miten paljon pystymme tuottamaan lämpöä lyhyemmillä jaksoilla. Huomasimme kuitenkin, että liekki paloi tällöin liian levottomasti ja osa polttoaineesta tippui tuhkatilaan palamattomana.

Seuraavaksi säädimme ensiö- ja toisioilmaa; lisäsimme ensiöilmaa ja hetken kuluttua toisioilmaakin. Palaminen jatkui levottomana, joten säädimme ensiöilmaa pienemmälle ja annoimme toisioilman olla isommalla, jolloin saimme palamisen vakiintumaan. Parhaimmat säädöt olivat ensiöilma-aukkojen ollessa auki 1/3-osaa (kuvio 33) ja toisioilma-aukkojen auki 2/3-osaa (kuvio 34).





KUVIO 33. Ensiöilman säädöt



KUVIO 34. Toisioilman säädöt

### 3.8.3 Seoksen käyttäytyminen siilossa ja palopäällä

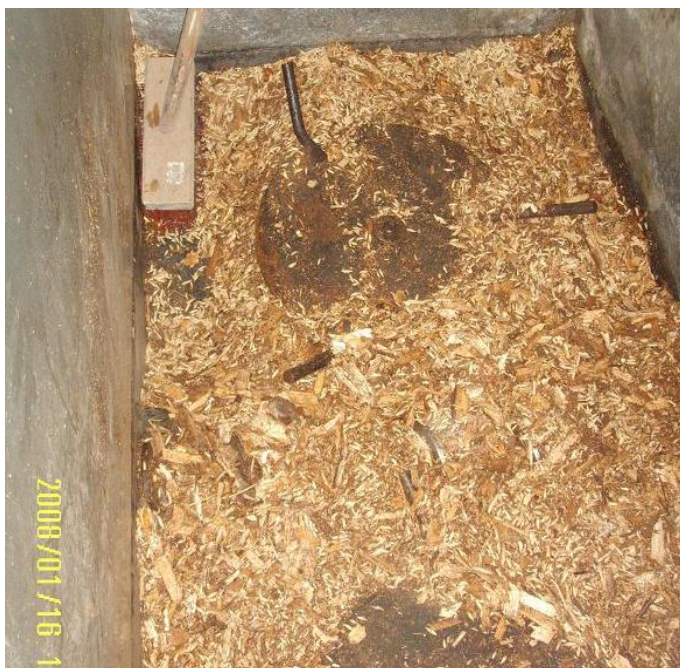
Hake paloi normaalisti palopäällä. Kauraa ei erottanut joukosta kuin ”poksahdus” omaisina ääminä. Erityisesti kaura paloi palopäällä kokonaan. Ainoastaan asetusten ollessa lyhyimmillään osa kaurasta meni ohi palopään suoraan tuhkatilaan. Kokeessa tuli myös ajoittain käyttökatkoksia, koska kattilalämpö ylitti 89 °C:een säädetyn ylläpitorajan.

Siilossa huomattavaa lajittumista ei tapahtunut, ja kuljettimellakin seos kulki tasaisesti ja ongelmitta. Palopäällä kauran palamista hakkeen joukosta ei huomannut liekin

voimakkuuden tai tuhkaamisen perusteella (kuvio 35). Kokeen loppuvaiheilla palaminen alkoi kuitenkin hiipua, koska lautaset eivät saaneet seosta tarpeeksi nopeasti kuljettimelle. Poltimme kuitenkin seoksen loppuun harjaamalla siilon puhtaaksi. Tästä syystä polttamatonta seosta ei jäänyt punnittavaksi. Polttoainesiiloa tyhjennettäessä oli huomattavissa pientä lajittumista lautasten alla ja siilon nurkissa, joissa oli mukana pientä hakepartikkelia sekä kauraa (kuvio 36).



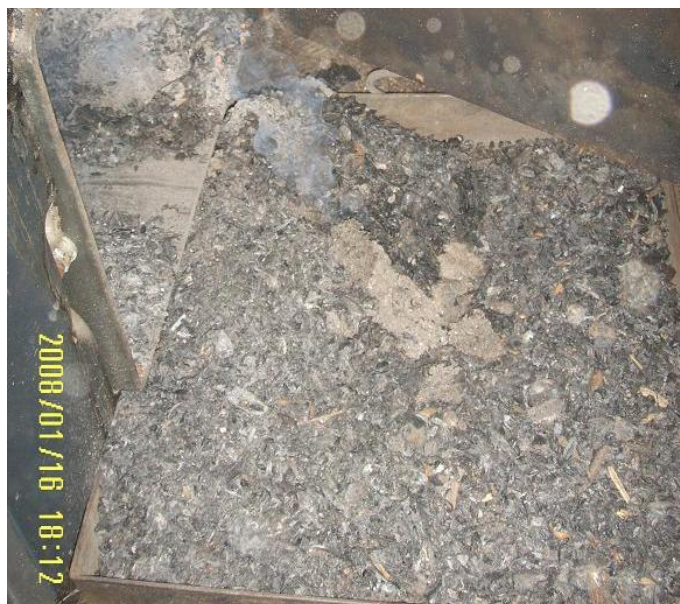
KUVIO 35. Tasaista palamista.



KUVIO 36. Seoksen lajittumista siilossa

Takapalon vaaraa ei kokeessa päässyt tapahtumaan, mutta lyhyimmillä pulssituksilla ja tauoilla tämä voisi olla mahdollista. Tällöin polttoaine ei ehdi palamaan kokonaan vaan tukkii palopään ja ruuvikuljettimen etuosan. Vähäistä laavaantumista ilmeni ajoittain, mutta tämä johtui uskoaksemme viljan valkuaisaineen sitoutumisena yhteen. Laavakimpale oli siksi helposti hajotettavissa.

Palopäälle ja kertyi tuhkaa 3,6 kiloa. Tuhkassa oli osittain mukana palamatonta haketta, mutta kokonaisia kauranjyviä emme havainneet. Osa kaurasta jatkoi palamistaan vielä lämpimässä tuhkassa. Kaikin puolin seoksen tuhka oli hienojakoista ja hyvin palanutta (kuvio 37).



KUVIO 37. Hake-kauraseoksen poltossa syntynyttä tuhkaa

#### 3.8.4 Energiamäärät ja savukaasuanalyysi

Kokeen aikana tuotettu kokonaisenergimäärä oli 198 kWh. Kattilateho oli kokeen aikana 32–51 kW, mutta parhaimmillaan jopa 67 kW. Mittasimme savukaasujen pitoisuudet puolen tunnin välein. Emme saaneet palamista kunnolla vakiintumaan ja siksi savukaasujen haitallisten komponenttien pitoisuudet olivat välillä hieman korkeita (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Savukaasuanalysointin keskimääräiset arvot mittauskerroista

| <b>Pulssi,<br/>s.</b> | <b>Tauko,<br/>s.</b> | <b>O<sub>2</sub>-<br/>sisältö, %</b> | <b>CO-sisältö,<br/>ppm</b> | <b>Savukaasujen<br/>lämpötila, °C</b> | <b>Hyötysuh-<br/>de, %</b> | <b>NO-sisältö,<br/>ppm</b> |
|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 2                     | 6                    | 7                                    | 132                        | 208                                   | 89,3                       | 368                        |
| 2                     | 5,5                  | 8,3                                  | 182                        | 234                                   | 86,6                       | 373                        |
| 3                     | 6                    | 5,0                                  | 363                        | 260                                   | 88,1                       | 291                        |
| 4                     | 5                    | 3,1                                  | 736                        | 206                                   | 89,4                       | 216                        |
| 2                     | 5                    | 11,6                                 | 732                        | 213                                   | 83,5                       | 237                        |
| 2                     | 5                    | 11,7                                 | 777                        | 211                                   | 83,6                       | 237                        |
| 4                     | 3                    | 13,3                                 | 601                        | 184                                   | 82,9                       | 193                        |

Kokeen alussa hakkeelle määritellyt tauot ja pulssitukset olivat seokselle parhaimmat. Liian nopea polttoaineen syöttö ja tauko lisäsivät energiansaantia, mutta myös haitallisia päästöjä ilmaan. Lisäksi palamattoman aineksen määrä sekä käyttökatkokset lisääntyivät. Jos aikaa ja polttoainetta olisi riittänyt, olisimme voineet hieman vielä säätää ensiö- ja toisioilmaa pienemmälle sekä pulssitusta hitaammalle. Näin ollen parhaimmat säädöt olivat pulssi 1–2 sekuntia ja tauko 6 sekuntia. Tätä hitaammilla pulssituksilla saattaa tulla ongelmaksi takapalovaara, koska hake-viljaseos palaa nopeasti palopäällä.

### 3.9 Yhteenveto polttokokeiden tuloksista

Seuraavan taulukon 8 tarkoituksena on helpottaa ja selkeyttää eri polttoaineista saatujen energiamäärien keskinäistä vertailua. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) on poimittu kirjallisuudesta ja polttoaineesta määritettyä kosteutta käyttäen on laskettu polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa.

Taulukon energiamäärät (kWh) osoittavat käytettyjen polttoaineiden energiasisällön. Tuhkan määrä on ilmoitettu kokeissa muodostuneen tuhkan määränä suhteessa käytetyn polttoaineen kuiva-aineen määrään. Kokonaishyötysuhde kertoo, kuinka paljon polttoaine-erän sisältämästä energiasta saatiin talteen.

TAULUKKO 8. Kokeessa käytettyjen polttoaineiden vertailu

|  | Ruokohelpi | Hake | Turvelanta | Palaturve | Märkä hake | Normaali hake | Rypsirouhe | Hake | Kaura | Hake | Puhdistusjae | Hake  |
|--|------------|------|------------|-----------|------------|---------------|------------|------|-------|------|--------------|-------|
| <b>Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg</b>    | 17,6       | 19,2 | 17,4       | 21,5      | 19,3       | 19,3          | 21,4**     | 19,2 | 16,7  | 19,2 | 17,3         | 19,3  |
| <b>Kosteus saapumistilassa, %</b>                  | 18,5       | 35,6 | 65,8       | 21        | 57         | 37,0          | 9,0        | 35,6 | 21,5  | 33,8 | 29,4         | 43,3  |
| <b>Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg</b> | 13,9       | 11,5 | 4,3        | 16,5      | 6,88       | 11,2          | 19,3       | 11,5 | 12,6  | 11,9 | 11,5         | 9,9   |
| <b>Irtotiheys, kg/i-m<sup>3</sup></b>              | 44         | 233  | 200        | 387       | 392        | 302           | 475        | 235  | 490   | 217  | 179          | 285   |
| <b>Energia tiheys, MWh/i-m<sup>3</sup></b>         | 0,17       | 0,74 | 0,18       | 1,79      | 0,75       | 0,94          | 2,55       | 0,75 | 1,71  | 0,72 | 0,57         | 0,78  |
| <b>Erän koko, i-m<sup>3</sup></b>                  | 0,26       | 0,26 | 0,15       | 0,16      | 0,40       | 0,57          | 0,07       | 0,13 | 0,05  | 0,30 | 0,10         | 0,40  |
| <b>Erän koko, kg</b>                               | 11,5       | 60,6 | 30         | 62,8      | 157        | 172           | 33,3       | 30,6 | 24,5  | 65,1 | 17,7         | 112,6 |
| <b>Energiamäärä, kWh</b>                           | 44         | 193  |            |           |            |               | 179        | 98   | 86    | 215  | 56           | 308   |
| <b>Koko erän energiamäärä, kWh</b>                 | 237        |      | 36         | 287       | 300        | 537           | 277        |      | 301   |      | 364          |       |
| <b>Osuus energiasisällöstä, %</b>                  | 18,6       | 81,4 | 100        | 100       | 100        | 100           | 65         | 35   | 29    | 71   | 15,4         | 84,6  |
| <b>Tuhkan määrä polttoaineen kuiva-aineesta, %</b> | 4,5        |      | Ei tulosta | 3,0       | Ei tulosta | Ei tulosta    | 5,9        |      | 5,7   |      | 3,8          |       |
| <b>Kokonaishyötysuhde, %</b>                       | 69,6       |      | Ei tulosta | 61,7      | Ei tulosta | Ei tulosta    | 50,2       |      | 66,0  |      | 68,8         |       |

HUOM! \*Kokonaishyötysuhde olisi 1-7 % korkeampi, mikäli kattilan ja kiertovesiputkiston vesi olisi jäädytetty polttokokeen päätteeksi samaan lämpötilaan kuin polttokokeen alussa.

\*\* Pitkään puristuksen jälkeen varastoidun rypsirouheen lämpöarvo todennäköisesti merkittävästi käytettyä arvoa pienempi öljyn haihtumisen takia.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 4.1 Tunnetut polttoaineet

#### 4.1.1 Kokopuuhake

Sytyttämiseen kannattaa käyttää aina aluksi kuivaa polttoainetta, jotta kattila ja palopää saadaan nopeasti lämpimäksi ja palopäälle hyvä hiillos. Kokopuuhake kulkee siilosta palopäälle hyvin sekä märkänä että kuivana. Märkä hake kulkee kuitenkin varastoruuvilta palopäälle kiinteänä, tiiviinä massana ja pyrkii palopäälle saapuessaan kaatumaan palopään etuosassa olevan liekin päälle sammuttaen sen.

- + Kuivahko hake syttyy helposti ja säätäminen on helppoa
- + Kokopuuhake toimii siilossa ja ruuvilla hyvin, kun polttoaine on palakooltaan tasalaatuista.
- Märkä kokopuuhake ei syty palopäällä.
- Testilaitteistolla ensiöilman määrä ei ole riittävä märälle kokopuuhakkeelle.
- Märkä kokopuuhake voi pakkasella jäättyä siiloon → siilon lämpöeristys tai siilon sijoittaminen sisätiloihin voisi vähentää jäätymisriskiä märällä kokopuuhakkeella
- Säätöjärjestelmä on vaikeakäyttöinen.
- Märkää kokopuuhaketta kannattaa polttaa seoksena.
- Lämpimän ilman johtaminen siiloon voisi kuivattaa märkää kokopuuhaketta.
- Ensiöilman määrää voisi lisätä joko toisella lisäpuhaltimella tai tehokkaammalla puhaltimella, mikä todennäköisesti parantaisi märän kokopuuhakkeen palamista.
- Märän kokopuuhakkeen syttymistä ja palamista voi edistää liikkuva palopää
- Märän kokopuuhakkeen palamista voisi edistää suurempi palopää, jossa olisi enemmän lämpöä varaavaa pinta-alaa.

#### 4.1.2 Palaturve

Polttoaineena palaturve on hitaasti palavaa ja lämpöarvo on korkea. Palaturvetta on kuitenkin oltava reilusti siilossa, jotta lautaskuljetin pystyy ottamaan riittävästi polttoainetta. Testauksen alussa luulimme palaturpeen aiheuttaneen pieniä tukoksia ruuvi-

kuljettimella, mutta polttoaineen kulku ruuvien läpi tapahtuikin vain erittäin hitaasti. Kontin sammuttamisen jälkeen ylimääräisen palaturpeen kuljettaminen ruuvien läpi tuhkatilaan kesti myös oman aikansa. Hidas kulkeminen johtunee liian pienestä syöttöruuvista palaturvetta ajatellen.

Pelkästään liekin värin mukaan ei palaturpeella pystynyt tekemään hyviä säätöjä, koska liekin väri pysyi erittäin kirkkaana koko ajan. Paremman kuvan polttoaineen palamisesta sai savupiipusta tulevasta savun väristä, jonka mukaan pystyi toteamaan, milloin esimerkiksi polttoainetta syötettiin palopäälle liian paljon ja milloin liian vähän. Palaturpeen hyvistä lämpöarvoista johtuen kattilan lämpötilan vaihteluja on haastavaa hallita etsittäessä oikeita säätöjä. Lämpötilan lähtiessään nousuun sen pysäyttäminen vie oman aikansa, vaikka polttoaineen syötön laittaisi mahdollisimman pienelle. Ilman savukaasuanalysointia olisi kuitenkin ollut erittäin hankala löytää oikeita ja ympäristöystävällisiä säätöjä. Kun oikeat säädöt löydettiin, palaminen oli hallittua ja tasaista. Palaminen synnytti kuitenkin jonkin verran laavaa, mikä saattaisi haitata palotapahtumaa pidemmällä aikavälillä. Tuhkaa palaturpeesta syntyi sen yleisiin ominaisuuksiin nähden vähän. Tuhkan painosta suurin osa koostui sulaneesta tuhkasta eli slagista.

- + Polttoaineominaisuuksiltaan soveltuu myös pienen kokoluokan lämpölaitokselle
  - + Palaminen hallittua ja tasaista
  - + Polttokokeessa käytetyn turve-erän tuhkamäärä alhainen
  - + Lentotuhkan määrä alhainen, joten lämmönvaihtopinnat olivat puhtaat
  - + Hyvä hyötysuhde
  - + Puhdas palaminen
  - + Soveltuu erityisen hyvin talvioloihin, koska palaturpeesta saa paljon tehoja irti ja se ei jäädy siiloon
- 
- Puhtaiden säätöjen löytäminen hankalaa ilman savukaasuanalysointia
  - Laavaantumisen runsasta → tyrkkijät tai liikkuva arina
  - Polttoaineen kulku ruuvilla hidasta → isompi ruuvi
  - Polttoainetta oltava riittävästi siilossa, jotta polttoaine liikkuu lautaspurkaimilla
  - Sytyttäminen suhteellisen työlästä
- 
- Tankopurkaimet soveltuisivat ehkä paremmin palaturpeelle, koska lautaspurkain ei kerää kaikkea polttoainetta siilon pohjalta.

## 4.2 Seospolttoaineet

### 4.2.1 Kaura–kokopuuhake-seos

Kaura–kokopuuhake-seos käyttäytyi siilossa ja ruuvilla erittäin hyvin, kun seos oli tehty tasaisesti. Viljan ja hakkeen välillä ei tapahtunut lajittumista siilon tyhjentäessä, kun käytetty polttoainemäärä oli pieni. Erityisesti kaura paloi palopäällä kokonaan. Ainoastaan asetusten ollessa lyhyimmillään osa kaurasta meni ohi palopään suoraan tuhkatilaan. Palopäällä seos paloi normaalisti, eikä laavaantumista tai liiallista tuhkaa ilmennyt asetusten ollessa kohdallaan. Vähäistä laavaantumista ilmeni ajoittain, mutta tämä johtui uskoaksemme viljan valkuaisaineen sitoutumisesta yhteen. Piipusta tullut savu oli haaleaa ja lähes näkymätöntä, kun palo oli optimaalista.

Laitteisto toimi seoksella hyvin ja seos oli kaiken kaikkiaan helppo valmistaa. Takapalon vaaraa ei kokeessa päässyt tapahtumaan, mutta lyhyimmillä pulssituksilla ja tauoilla tämä voisi olla mahdollista. Liian nopea polttoaineen syöttö ja tauko lisäsivät energiansaantia, mutta myös haitallisia päästöjä ilmaan. Lisäksi palamattoman aineksen määrä sekä käyttökatkokset lisääntyivät.

- + Kulkee hyvin ruuvilla
- + Ei haittaavaa lajittumista
- + Ei laavaantumista
- + Helppo sekoittaa
- + Ei haitallista jäätymistä siilossa
  
- Vilja liian arvokasta poltettavaksi
- Haittaeläinriski



#### 4.2.2 Viljan esipuhdistusjake–kokopuuhake-seos

Esipuhdistusjake soveltuu polttoaineeksi hakkeen ohessa. Holvaantumista ja vähäistä lajittumista lukuun ottamatta materiaali kulki laitteistossa ilman vaikeuksia. Polttoaineseos syttyi hyvin, savutti runsaasti syttymisvaiheessa ja paloi hyvänoloisella liekillä nopeasti. Esipuhdistusjakeesta muodostui paljon lentävää, kevyttä nokipartikkelia, joka luukun avaamisen myötä pääsi sisälle konttiin ja likasi sisätiloja. Lentävää nokea tuli myös piipusta.

Esipuhdistusjakeen polttamista voidaan suositella tämän tyyppisessä laitteistossa muun polttoaineen ohella – varsinkin, kun se yleensä poltetaan kuivempana melko pian puintien jälkeen. Hieman tavanomaista enemmän valvontaa se kuitenkin vaatinee ainakin alkuvaiheessa säätöjen asettamiseksi kohdalleen. Lisäksi määrällisesti 20 % esipuhdistusjätettä vaikuttaa ylärajalta. Suosittelemme mieluummin pienempää määrää esipuhdistusjakea huolellisesti hakkeeseen sekoitettuna, jolloin palaminen ei ole niin vaihtelevaa ja herkkää säädöille.

- + Kulkee hyvin ruuvilla
- + Syttyy ja palaa hyvin myös suhteellisen kosteana
- + Sopii poltettavaksi hakkeen ohella huolellisesti sekoitettuna, riittävän pieninä määrinä kerrallaan ja säädöt huomioiden
  
- Lajittumista tapahtuu jonkin verran jo pienellä koe-erällä
- Vaatii runsaasti säätämistä, koska seos ei ole tasarakenteista
- Lentävää tuhkaa muodostuu, joten saattaa liata ympäristöä. Hiukkasten erotus on suositeltavaa esimerkiksi syklonierottimella
- Laavaa muodostui palopään taka-osaan, mikä saattaa olla ongelma pidempiaikaisessa poltossa.
- Ulkona sijaitseva siilo on altis säiden vaihteluille, joten siilon lämmityksellä tai toisella sijainnilla vältettäisiin jäätymisongelmia.

### 4.2.3 Rypsirouhe–kokopuuhake-seos

Rypsirouhe–kokopuuhake-seos toimi hyvin käytetyssä lämmitysjärjestelmässä. Polttoaineen sytyttäminen onnistui helposti, eikä itse palamisprosessissaakaan ollut mitään ongelmia. Oikeiden säätöjen löytäminen onnistui myös hyvin. Sopivan seossuhteen aikaansaaminen vaatisi vielä lisämittauksia erilaisilla seossuhteilla. Samalla selviäisi myös, aiheuttaako korkea rypsipitoisuus laavaamista. Yksi laavakimpale oli syntynyt kokeen aikana palopäälle, mutta se voi johtua myös hakkeen epäpuhtaudesta. Lajittuminen ei ollut ongelmana näin pienillä määrillä. Suuremmissa erissä tällaisilla seossuhteilla lajittumista voi ilmaantua.

Rypsirouhe sisältää jonkin verran lehtivihreää, joten sen vuoksi palamisen typen oksidit olivat korkealla. Tästä syystä seoksessa saisi olla vähemmän rypsirouhetta. Jos rypsirouhetta maatilallakin poltetaan hakekattilassa, ovat määrät varmasti pienempiä kuin tässä kokeessa käytetyssä seossuhteessa. Savukaasuanalysaattorilla tehdyistä mittauksista saaduista tuloksista näkee, että CO-pitoisuudet olivat hyvällä tasolla, kun taas NO-pitoisuudet olivat hieman korkeat verrattuna muihin polttoaineisiin.

Polttoaineiden sekoittaminen hoidettiin tässä kokeessa lapiolla käsipelissä. Mikäli rypsirouhetta poltettaisiin maatilalla, riittäisi rypsirouheen kippaaminen esimerkiksi etukuormaajalla hakesiiloon.

- + Seos liikkui hyvin syöttöruuvilla
- + Säädöt oli helppo löytää ja palaminen oli tasaista
- + Ei lajittumista
- + Savukaasujen CO-pitoisuus alhainen
  
- Suuren ensiö- ja toisioilmamäärän takia osa palamattomasta hiilestä lensi tuhkatilaan → korkea tuhkapitoisuus
- Laavaantumisen voi muodostua ongelmaksi, jos poltetaan suurempia eriä kokeessa käytetyllä seossuhteella

#### 4.2.4 Ruokohelpi–kokopuuhake-seos

Pienessä kokoluokassa ruokohelpi aiheuttaa ongelmia lähinnä polttoaineen syöttöjärjestelmässä. Siilon lautaspurkaimet eivät kyenneet siirtämään polttoainetta ruuville odotetulla tavalla. Syöttöruuville syntyy tästä johtuen herkästi tyhjiä kohtia, jolloin polttoaineen syöttö palopäälle katkeaa. Polttoaineen epätasainen syöttö palopäälle vaikeuttaa laitteiston säätämistä ja vakiintuneen palamistilan saavuttamista.

Ruokohelpi syttyy herkästi ja palaa nopeasti. Jos syöttöjärjestelmä mahdollistaisi seoksen tasaisen liikkuvuuden, saattaisi helpisilpun hyödyntäminen polttoaineseoksena hakkeen kanssa olla mahdollista. Kokeissa käytetty helppi ei ollut silpun pituuden kannalta täysin tasalaatuista, vaan joukossa oli myös pidempiä korsia. Lyhyempi silpu olisi ehkä kulkenut laitteistossa paremmin, vaikka toisaalta kiertymistä ruuvin tai lautaskuljettimien ympärille ei koejakson aikana liiemmin havaittu.

Eri polttoainejakeiden lajittuminen oli odotettua vähäisempää ja kokeen lopussa siiloon jäänyt seos vaikutti silmämääräisen arvioinnin perusteella tasaiselta. Seosta tosin sekoitettiin useasti kokeen aikana, joten lajittumisen arviointi on vaikeaa. Polttoaineseos holvaantui siilon laidoille hieman, mutta varsinaisia ongelmia tästä ei aiheutunut.

- + Seos syttyy hyvin
- + Laavaa ei muodostunut lyhyellä ajalla palopäälle
- + Ei jäädy siiloon
  
- Oikeiden säätöjen löytäminen hankalaa
- Polttoaineseoksen kulkeutuminen ruuvilla epätasaista
- Leijaileva noki savukaasuissa
- Seoksen kiertyminen purkaimiin

#### 4.2.5 Kehittämisehdotukset

##### Seokset

- Tehokkaammat lautaspurkaimet, jotta holvaantuminen vältettäisiin.
- Ruuvissa oleva pudotussuppilo tasaisi polttoainevirtaa palopäälle
- Säättäminen on epätasaisella polttoaineella työlästä ja jatkuvaa. Automaattinen ohjaus- ja säätöjärjestelmä helpottaisi käyttämistä.
- Puhaltimien ilmareikien säätöasteikko tai toisenlainen toteutus rakenteessa olisi tarpeellinen säätöjen todentamiseksi.
- Isompi palopää olisi hyvä, jotta myös ajoittain kosteat polttoaineet ehtisivät kuivua siinä
- Liikkuva palopää ehkäisisi laavaantumista ja tasaisi seoksen palamista

##### Ruukohelpi–kokopuuhake-seos

- Ruukohelven korren pituus vaikuttaa olennaisesti seoksen kulkemiseen ruuvilla; kyseisellä laitteistolla ja helven korren pituudella on 20 %:n seos maksimi
- Seoksen alettua kulkea ruuvilla, rajoittavaksi tekijäksi tulee ruuvin syöttökapasiteetti (ruukohelpi palaa nopeasti)
- Sykloni poistaisi nokiongelman savukaasuissa
- Ruukohelpi on kevyttä ja ilmavaa; on vältettävä seoksessa liiallista helven käyttöä ja ruukohelven korret tulisi silputa lyhyiksi (max. 5 cm)

### 4.3 Uudet polttoaineet

#### 4.3.1 Ruukohelpi

Puhdas ruukohelpisilppu ei kokeen perusteella soveltunut 60 kW:n laitteistolla poltettavaksi, sillä helpi ei kevyenä polttoaineena kulkeutunut siilosta syöttöruuville. Siilon lautaskuljettimet eivät saaneet otetta holvaantuneesta silpusta, joten varsinaista polttoainetta ei kyetty suorittamaan. Käytetyn helpisilpun pituus oli noin 5 cm. Joukossa oli tosin myös pidempiä korsia, joten polttoaine ei ollut aivan tasalaatuista. Lyhyempi silpun pituus ei kuitenkaan todennäköisesti olisi vaikuttanut kokeen lopputulokseen.

Puhtaan ruukohelven hyödyntäminen polttoaineena on ongelmallista, sillä helven irto-  
tiheys on alhainen. Koelaitteiston kaltaisessa järjestelmässä helpisilpun hyödyntäminen edellyttää seospoltoa esimerkiksi hakkeen kanssa. Tällöin helpisilpun tulee olla mahdollisimman lyhyttä, samoin sekoittaminen pääpolttoaineeseen tulee tehdä huolel-

la. Jos puhdasta ruokohelpeä haluttaisiin hyödyntää 60 kW:n lämmityslaitteistossa, tulisi etenkin polttoaineen syöttöjärjestelmää kehittää. Esimerkiksi paineilmakäyttöinen syöttöjärjestelmä voisi olla toimiva ratkaisu kevyen polttoaineen siirtämiseen siilosta palopäälle. Myös ruokohelven polttaminen pelletin tai briketin muodossa on yksi varteenotettava vaihtoehto.

#### 4.3.2 Hevosenlanta–kuiviketurve-seos

Turvelannan palaminen vaikutti aluksi sytytysnesteeseen kanssa niin hyvältä, että hieman kuivattuna se olisi varmasti aivan toimiva polttoaine. Mielenkiintoista olisi myös ollut tehdä koe kuumaksi ajetulla kattilalla. Tällöin keramiikkalevyn varaamaa lämpöä olisi päästy hyödyntämään kunnolla ja kokeen tulokset saattaisivat olla hieman toisenlaisia. Turvelanta sellaisenaan saattaa kuitenkin olla liian märkä polttoaine ja ainakin sytyttämävaiheessa märkyys varmasti aiheuttaa ongelmia. Kuljettimilla polttoaine kulki kuitenkin niin hyvin, että se sopisi varmasti hyvin tällaiselle systeemille polttoaineeksi hieman kuivempana. Kuivempi turvelanta varmaankin tulisi palopäälle tasaisemmin eikä isona ”sikarimaisena putkena”.

- + Kulkee hyvin kuljettimella
  
- Tiivistyy ruuvilla
- Palaa huonosti
- Jäättyy pakkasella siilon seinään

Keskeisimpänä ongelmana tämän polttoaineen kohdalla oli kosteus, joka aiheutti tämän tyyppisessä laitteistossa ongelmia. Ratkaisuna tähän olisi polttoaineen polttaminen pelletin tai briketin muodossa. Tällöin polttoaine olisi kuivempaa, eikä todennäköisesti tiivistyisi niin pahasti kuljettimella. Polttaminen voisi onnistua irtotavarallakin, jos laitteistossa olisi liikkuva palopää ja ensiöilmaa saataisiin enemmän. Seospoltto hakkeen kanssa olisi myös varteenotettava vaihtoehto. Talviaikaan tulisi siilo sijoittaa lämpimään tilaan, jottei seos pääse jäätymään siilon.

## LÄHTEET

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: VTT tiedotteita 2045. Espoo: Otamedia.

Biolämpöopas. 2007. Ariterm Oy. Viitattu 4.2.2008.  
[http://www.ariterm.fi/pdf/ARITERM\\_Biol\[amp\]o\]lopas.pdf](http://www.ariterm.fi/pdf/ARITERM_Biol[amp]o]lopas.pdf).

Palaturve. 2008. Vapo Oy:n kotisivut. Viitattu 25.1.2008.  
<http://www.vapo.fi/fin/haku/index.php?id=158>

Tuikkanen, J. 2007. 60 kW:n hakekattilan käyttöohje. Julkaisematon.