

Bioenergiakeskuksen julkaisusarja  
(BDC-Publications)  
Nro 34



# **RUOKOHELPI MAATILAN JA LÄMPÖYRITTÄJÄN POLTTOAINEENA**

**Jenni Sironen**

**Opinnäytetyö**

Maaliskuu 2008



**JYVÄSKYLÄN  
AMMATTIKORKEAKOULU**

Luonnonvarainstituutti

Tekijä(t)  SIRONEN, Jenni	Julkaisun laji Opinnäytetyö	
	Sivumäärä 81	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus <input type="checkbox"/> Salainen _____ saakka	
Työn nimi RUOKOHELPI MAATILAN JA LÄMPÖYRITTÄJÄN POLTTOAINEENA		
Koulutusohjelma Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) VESISENAHO, Tero		
Toimeksiantaja(t) ”Bioenergiasektorin kehittäminen pohjoisessa Keski-Suomessa” -hanke		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Maatiloilla ja lämpöyrittäjäkohteissa käytetään lämmitysenergian raaka-aineena pääosin kotimaista puupolttoainetta sekä turvetta. Pelloilla tuotettu biomassa olisi yksi varteenotettava vaihtoehto energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Lupaavin Suomessa tuotetuista peltoenergiakasveista on ruokohelpi (<i>Phalaris arundinacea L.</i>). Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten kokopuuhakkeen joukkoon silputtu ruokohelpi toimii pienen kokoluokan (alle 1 MW) lämmitysjärjestelmissä. Ruokohelven polton teknisiä edellytyksiä ja vaatimuksia selvitettiin polttokokein kahdessa eri lämmitysjärjestelmässä, tehoiltaan 60 ja 200 kW. Tarkoituksena oli havainnoida helpi-hakeseoksen käyttäytymistä varastoitaessa, kuljetuissa, syöttölaitteissa ja palopäällä.</p> <p>Polttokokeista selvisi, että silputtu ruokohelpi kevyenä polttoaineena on haaste etenkin pienen kokoluokan lämmityslaitteiston syöttöjärjestelmälle. Polttoaineen holvaantuminen sekä lajittuminen varastosiilossa aiheuttivat ongelmia. Epätasainen polttoainevirta sekä polttoaineseoksen vaihteleva koostumus tekivät palamisesta epävakaa. Laitteiston säätäminen ja optimaalisen palamistilan saavuttaminen on vaikeaa, minkä takia päästötasot saattavat nousta tavoiteltua korkeimmiksi. Isompi ja tehokkaampi lämmitysjärjestelmä pystyy testijaksojen perusteella selviytymään haasteista paremmin, mutta 60 kW:n laitteistolle helpisilppua ei voi varauksetta suositella.</p> <p>Työn tulosten perusteella silputtu ruokohelpi sopii tietyin ehdoin maatilan tai pienen mitta-kaavan lämpöyrittäjän polttoaineeksi. Jos helpeä haluaa hyödyntää polttoaineena, kannattaa ruokohelven osuus polttoaineseoksessa pitää melko pienenä. Silpun on oltava mahdollisimman lyhyttä ja se on sekoitettava pääpolttoaineeseen huolellisesti. Ruokohelpeä poltettaessa lämmitysjärjestelmä vaatii jatkuvaa seurantaa, vaikka takapalon vaara ei tehtyjen kokeiden perusteella ollutkaan suuri. Ruokohelpeä ei myöskään voi suositella polttoaineeksi huipputehontarpeen aikana, sillä irtotiheydeltään alhaisesta helvestä on vaikea saada irti riittävästi tehoja.</p>		
Avainsanat (asiasanat) ruokohelpi, lämpöyrittäjäyys, seospoltto		
Muut tiedot		

Author(s)  SIRONEN, JENNI	Type of Publication Bachelor's Thesis	
	Pages 81	Language Finnish
	Confidential <input type="checkbox"/> Until _____	
Title REED CANARY GRASS AS AN ENERGY SOURCE FOR FARMS AND HEAT ENTREPRENEURS		
Degree Programme Degree Programme in Agriculture and Rural Industries		
Tutor(s) VESISENAHO, Tero		
Assigned by "Development of a Bioenergy sector in Northern Central Finland" -project		
Abstract <p>In farm-based boiler plants and in those operated by heat entrepreneurs, domestic biofuels such as wood chips and peat are the main sources of heat energy today. Field-cultivated energy crops offer an alternative to the traditional biofuels. Reed canary grass or RCG for short (<i>Phalaris arundinacea</i> L.) has proved to be the most promising energy grass cultivated for energy production in Finland. The aim of this study is to examine how shredded RCG blended with wood chips will operate in small scale boiler plants (less than 1 MW). Combustion experiments were conducted with two heating systems with boiler capacity of 60 and 200 kW. The purpose of the combustion experiments was to study the technical requirements of combustion and make observations on how the fuel mixture behaves during storage, in feeding systems and during combustion.</p> <p>According to the combustion experiments, as a loose and light material shredded RCG is a challenge to fuel handling and feeding systems. Vaulting and segregation of the fuel mixture caused problems during storage. Uneven fuel supply to the burner and variations in the contents of the fuel mixture made the combustion unstable. Adjusting the system and achieving an optimal state of combustion is therefore difficult. This may result in higher rates of emissions. Bigger and more efficient heating system seems to be better equipped to handle these challenges, but for the 60 kW boiler plant RCG can not be recommended as a fuel without certain conditions.</p> <p>In conclusion, shredded RCG is a suitable fuel for farms and small scale heat entrepreneurs under certain conditions. If one wishes to utilize RCG as an energy source, it is recommendable to keep the amount of RCG quite low in fuel mixtures. The length of RCG chaff should be short and the mixing to the main fuel should be conducted thoroughly. The heating system requires continuous surveillance even though no risk of back fire was detected during combustion experiments. RCG can not be recommended as a fuel source during periods when high amount of energy is required. It is difficult to obtain energy from RCG as it is light material with relatively low density.</p>		
Keywords reed canary grass, heat entrepreneurship, blended fuels		
Miscellaneous		

# SISÄLTÖ

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>5</b>
1.1	Opinnäytetyön tausta .....	5
1.2	Opinnäytetyön tavoite .....	7
<b>2</b>	<b>RUOKOHELPI POLTTOAINEENA</b> .....	<b>8</b>
2.1	Poltto-ominaisuudet .....	8
2.2	Ruukohelpi vs. viljan olki .....	11
2.3	Varastointi ja käsittely .....	16
2.4	Käyttökokemukset.....	17
2.5	Ruukohelven briketointi.....	19
<b>3</b>	<b>POLTTOKOKEIDEN TOTEUTUS</b> .....	<b>20</b>
3.1	Koelaitteistojen esittely.....	21
3.2	Polttokokeissa käytetyt polttoainejakeet.....	24
3.3	Polttoaineiden energiasisältöjen määrittäminen .....	27
3.4	Savukaasujen analysointi.....	28
<b>4</b>	<b>POLTTOKOKEET 60 KW:N LAITTEISTOLLA</b> .....	<b>30</b>
4.1	Ensimmäinen polttokoe.....	30
4.2	Toinen polttokoe.....	34
4.3	Kolmas polttokoe.....	39
<b>5</b>	<b>POLTTOKOKEET 200 KW:N LAITTEISTOLLA</b> .....	<b>43</b>
5.1	Ensimmäinen polttokoe.....	43
5.1.1	Seoksen käyttäytyminen syöttöjärjestelmässä ja palopäällä .....	46
5.1.2	Tulokset.....	49
5.1.3	Savukaasujen analysointi .....	52

5.2	Toinen polttokoe.....	54
5.2.1	Varsinainen polttokoe .....	56
5.2.2	Seoksen käyttäytyminen syöttöjärjestelmässä ja palopäällä .....	58
5.2.3	Tulokset.....	59
5.2.4	Savukaasujen analysointi .....	62
<b>6</b>	<b>PÄÄTELMÄT .....</b>	<b>64</b>
6.1	Kokeet 60 kW:n laitteistolla .....	64
6.2	Kokeet 200 kW:n laitteistolla .....	66
6.2.1	Ensimmäinen polttokoe .....	66
6.2.2	Toinen polttokoe .....	67
6.3	Yhteenveto.....	68
<b>7</b>	<b>JATKOTOIMENPITEET.....</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>POHDINTA .....</b>	<b>70</b>
	<b>LÄHTEET.....</b>	<b>74</b>
	<b>LIITTEET</b>	
	Liite 1. 60 kW:n laitteistolla tehtyjen polttokokeiden loki-tiedot .....	77
	Liite 2. 200 kW:n laitteistolla tehtyjen polttokokeiden loki-tiedot .....	80
	<b>KUVIOT</b>	
	KUVIO 1. Kertatäyttöinen paalinpolttolaitteisto.....	13
	KUVIO 2. LIN-KA oljenpolttolaitteisto .....	14
	KUVIO 3. REKA paalisilppuri.....	15
	KUVIO 4. Arimax 360 BIO energy -kattila ja HakeJet -palopää.....	21
	KUVIO 5. Arimax BIO energy -varastosiiho .....	22
	KUVIO 6. Arimax 200 kW -lämpökontti.....	23
	KUVIO 7. Arimax BIO energy -kattila ja BioJet -palopää.....	23
	KUVIO 8. Kahdessa ensimmäisessä 60 kW:n laitteistolla tehdyssä polttokokeessa käytetty ruokohelpi.....	25
	KUVIO 9. Polttokokeissa käytetty kokopuuhake.....	25
	KUVIO 10. Ruokohelpipaalien murskaus autohakkurilla .....	26

KUVIO 11. Ruukohelpisilppua varastokontissa .....	26
KUVIO 12. Helpisilppua pienkuormaajan kauhassa .....	28
KUVIO 13. Testo 300 M -savukaasuanalysointilaite .....	29
KUVIO 14. Ruukohelpeä varastosiilossa .....	30
KUVIO 15. 20 %:n seos varastosiilossa .....	31
KUVIO 16. Palaminen käynnissä .....	32
KUVIO 17. Ensimmäisessä polttokokeessa hyväksi havaittu ensiöilman säätö .....	33
KUVIO 18. Ensimmäisessä polttokokeessa syntynyttä tuhkaa.....	34
KUVIO 19. 10 %:n seos varastosiilossa .....	35
KUVIO 20. Palaminen käynnissä .....	36
KUVIO 21. Toisessa polttokokeessa hyväksi havaitut ensiö- ja toisiöilman säädöt.....	36
KUVIO 22. Toisessa polttokokeessa syntynyttä tuhkaa .....	37
KUVIO 23. Kuva varastosiilosta polttokokeen loppuvaiheessa .....	38
KUVIO 24. 5 %:n seos.....	39
KUVIO 25. Kolmannessa polttokokeessa hyväksi havaitut ensiö- ja toisiöilman säädöt.....	40
KUVIO 26. Kolmannessa polttokokeessa syntynyttä tuhkaa .....	41
KUVIO 27. Kuva varastosiilosta polttokokeen loppuvaiheessa .....	42
KUVIO 28. Kuvasarja ruukohelven ja hakkeen kippaamisesta siiloon.....	44
KUVIO 29. Stokerin ja kattilan asetukset.....	45
KUVIO 30. Polttoaineseoksen holvaantumista ja lajittumista varastosiilossa.	46
KUVIO 31. Hakevaltaista seosta suppiloon 28.12. klo 13.44.....	47
KUVIO 32. Helpivaltaista seosta suppiloon 29.12. klo 13.44.....	47
KUVIO 33. Tasaista seosta suppiloon 30.12. klo 15.20 .....	48
KUVIO 34. Palaminen käynnissä .....	49
KUVIO 35. Muutokset kattilalämmössä koejakson aikana.....	49
KUVIO 36. Muutokset jäännöshappiarvossa 30.12. klo 7.00–31.12. klo 7.00 välisenä aikana.....	50
KUVIO 37. Polttokokeessa syntynyttä tuhkaa .....	51
KUVIO 38. Konvektiopinnat kokeen jälkeen .....	51
KUVIO 39. Kuva laavakimpaleesta .....	52
KUVIO 40. CO- ja NO <sub>x</sub> -pitoisuudet mittausjaksojen aikana.....	53
KUVIO 41. Kuva sivusyöttölaitteen rakennusvaiheesta.....	54

KUVIO 42. Sivusyöttölaitteen sijoittuminen .....	55
KUVIO 43. Sivusyöttölaitteen syöttöruuvi kytkettynä syöttösuppilon .....	55
KUVIO 44. Helpeä sivusyöttölaitteen siilossa.....	56
KUVIO 45. Kattilan ja stokerin asetukset.....	57
KUVIO 46. Helpeä holvaantuneena siilossa.....	58
KUVIO 47. Tiivis tukko helpeä ruuvilta suppilon .....	59
KUVIO 48. Muutokset kattilalämmössä koejakson aikana.....	60
KUVIO 49. Kattilalämpö klo 15.07 .....	60
KUVIO 50. Muutokset jäännöshappiarvossa koejakson aikana .....	61
KUVIO 51. Hakkeen CO- ja NO <sub>x</sub> -pitoisuudet mittausjaksojen aikana .....	63
KUVIO 52. Helpi-hakeseoksen CO- ja NO <sub>x</sub> -pitoisuudet mittausjaksojen aikana .....	63

### **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Kevätkorjatun ruokohelven polttotekniset ominaisuudet verrattuna muihin biopolttoaineisiin. ....	9
TAULUKKO 2. Ruokohelven ja oljen lämpöarvo, kosteus ja energiatiheys....	12
TAULUKKO 3. Paalaimella silputun ruokohelven silpun pituus .....	24
TAULUKKO 4. Autohakkurilla silputun ruokohelven silpun pituus .....	26
TAULUKKO 5. Ensimmäisen koe-erän tiedot.....	31
TAULUKKO 6. Toisen koe-erän tiedot.....	35
TAULUKKO 7. Savukaasumittausten tulokset .....	38
TAULUKKO 8. Kolmannen koe-erän tiedot .....	39
TAULUKKO 9. Savukaasumittausten tulokset .....	42
TAULUKKO 10. Ensimmäisen koe-erän tiedot.....	43
TAULUKKO 11. Savukaasumittausten tulokset.....	53
TAULUKKO 12. Toisen koe-erän tiedot.....	57
TAULUKKO 13. Savukaasumittausten tulokset.....	62

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Opinnäytetyön tausta

Lämpöyrittäjyydeksi kutsutaan toimintamuotoa, jossa kiinteistöjen tai aluelämpölaitosten lämmöntuotantoa hoitaa ulkopuolinen yrittäjä tai näiden muodostama yhteenliittymä, esimerkiksi osuuskunta. Lämmöntuottaja eli lämpöyrittäjä vastaa lämpölaitoksen polttoaineen toimituksista sekä laitoksen hoidosta, huollosta ja valvonnasta. Myytävä tuote on lämpöenergia, josta yrittäjälle maksetaan mittaukseen ja sopimuksen yksikköhintaan perustuen. Lämmityskattila voi olla joko asiakkaan tai lämmöntoimittajan omaisuutta. (Tanskanen 2006.)

Paikallisena toimintana lämpöyrittäjyys tukee seudullista työllisyyttä. Tyypillinen lämpöyrittäjä on maanviljelijä, joka myymällä turvetta tai energiapuuta lämmöksi jalostettuna saa nostettua tuotteensa jalostusastetta ja siitä saatavaa hintaa. Hyviä lämpöyrittäjäkohteita ovat esimerkiksi kuntien, yritysten ja yhteisöjen omistuksessa olevat suuret kiinteistöt, joissa on suuri energiankulutus. (Lämpöyrittäminen 2006.)

Vuoden 2006 lopussa Suomessa oli toiminnassa lähes 340 lämpöyrittäjäkohdetta, Keski-Suomen metsäkeskuksen alueella laitoksia oli 17 kappaletta. Aluelämpölaitosten osuus laitoksista oli 28 %. Muut olivat kiinteistölämpökeskuksia, joista noin puolet lämmitti koulukiinteistöjä ja neljäsosa yksityisiä kiinteistöjä. Aluelämpölaitokset olivat kattilateholtaan 0,12–3,6, koulujen lämpölaitokset 0,04–2,0, vanhainkotien 0,15–0,7, yrityksen ja yksityisten kiinteistöjen 0,04–2,5 sekä muiden kiinteistöjen lämpökeskukset 0,06–1,0 MW. Kiinteistökohtaisten lämpökeskusten kattilateho oli vuoden 2006 lopussa keskimäärin 0,34 MW ja aluelämpölaitosten 1 MW. (Alanen & Solmio 2006, 1–2.)



## Ruokohelpi lämpöyrittäjän polttoaineena

Lämpölaitoksissa käytetään energian raaka-aineena pääosin kotimaista puu-polttoainetta sekä turvetta. Pelloilla tuotettu biomassa olisi kuitenkin yksi varteenotettava vaihtoehto energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Peltobio-massoista tuotettu polttoaine on ympäristöystävällistä, kotimaista ja uusiutu-vaa energiaa, jonka käytön ei katsota lisäävän hiilidioksidipäästöjä.

Lupaavin Suomessa tuotetuista peltoenergiakasveista on ruokohelpi (*Phalaris arundinacea L.*). Energiakäyttöön sopivan, alun perin rehukasvina viljellyn ruokohelven viljely on lisääntynyt 2000-luvulla ripeästi ja oletettavasti viljely-alat kasvavat edelleen tulevaisuudessa. Maa- ja metsätalousministeriön tieto-palvelukeskuksen Tiken (2007) mukaan vuonna 2006 ruokohelven viljelyala oli Suomessa 17 200 hehtaaria ja vuonna 2007 jo 19 000 hehtaaria (Käytössä oleva maatalousmaa vuonna 2007 2007). Keski-Suomen TE-keskuksen alu-eella ruokohelpeä viljeltiin vuonna 2007 yhteensä 5600 hehtaarin alalla (Käy-tössä oleva maatalousmaa vuonna 2007 työvoima- ja elinkeinokeskuksittain 2007).

Ruokohelven viljelijät ovat oikeutettuja normaaleihin kasvinviljelytukiin ja par-haimmillaan helven viljely saattaakin päihittää rehuviljan kannattavuusvertai-lussa. Pienet vuotuis kustannukset, vähäinen työmenekki ja lannoitustarve se-kä kasvuston pitkäikäisyys tekevät ruokohelvestä varteenotettavan viljelykas-vin. Kannattavuutta parantaa energiakasvituki, jota on mahdollista saada kas-vinviljelytukien lisäksi. Moni pitää kuitenkin noin 45 €/ha energiakasvitukea riittämättömänä, etenkin kun huomioidaan monimutkaiset tukiehdot ja -vaatimukset.

Ruokohelven lopullinen tuottajahinta vaihtelee huomattavasti helven laadusta, ostajasta sekä viljelmän sijainnista riippuen. Ensijalostajan viljelijälle maksama hinta on joka tapauksessa alhainen, vain muutamia euroja megawattitunnilta. Korjuukustannukset ovat suurin kuluerä ruokohelven viljelyssä, noin 10 €/paali. (Honkaniemi 2007, 31.) Tämän perusteella on helppo ymmärtää, miksi ruokohelven viljely ei aina houkuttele, etenkin silloin kun viljojen myönteinen hintakehitys jyrää kannattavuuden pohjalukemiin.

Helpipolttoainetta käytetään jo nyt seospolttoaineena suurissa lämpölaitoskohteissa, mutta tilakohtaisena lämmönlähteenä tai pienen mittakaavan lämpöyrittäjän polttoaineena helpeä ei vielä yleisesti hyödynnetä. Jos helpeä voitaisiin käyttää lämmönlähteenä myös pienemmissä lämpölaitoksissa ja omakotitalouksissa, saattaisi tämä osaltaan vaikuttaa positiivisesti helpipolttoaineen hinnan kehitykseen.

## 1.2 Opinnäytetyön tavoite

Yhdeltä ruokohelpihehtaarilta saatavalla energiamäärällä (20–27 MWh) voitaisiin lämmittää isoa omakotitaloa vähintään vuoden verran. Ruokohelven hyödyntäminen kiinteistökohtaisena polttoaineena ei kuitenkaan ole täysin ongelmattonta. Tarvitaan paljon sekä polttoaineen että laitteistojen kehittämistä ennen kuin ruokohelpi löytää tiensä pienemmän kokoluokan lämpölaitosten energianlähteeksi. (Pahkala, Pentti, Aalto, Sahramaa, Poikola & Enroth 2006, 42–43.)

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, miten hakkeen joukkoon silputtu ruokohelpi toimii pienen mittakaavan (alle 1 MW) lämmitysjärjestelmissä. Tutkimustulosten toivotaan hyödyntävän muun muassa viljelijöitä sekä lämpöyrittäjiä, jotka voisivat mahdollisesti täydentää omaa polttoainevalikoimaansa helpellä. Opinnäytetyössä ei ole otettu kantaa ruokohelven polton taloudellisiin kysymyksiin, ensisijaisena tavoitteena on tutkia ruokohelven käytettävyyttä polttoaineena.

Kirjallisuuden ja muiden tietolähteiden lisäksi opinnäytetyölle asettuja keskeisimpiä tavoitteita selvitetään käytännön polttokokeiden avulla. Polttokokeissa tutkitaan polttoaineseoksen käyttäytymistä kahdessa eri lämmitysjärjestelmässä, tehoiltaan 60 ja 200 kW. Näin saadaan selville, kuinka helpi-hakeseos käyttäytyy varastoitaessa, kuljettimissa ja syöttölaitteissa sekä polton aikana. Polttokokeissa oli alkuperäisen suunnitelman mukaisesti tarkoitus testata myös briketöidyn ruokohelven toimivuutta, mutta polttoaineen saatavuusongelmien vuoksi tavoitteesta jouduttiin luopumaan.

Opinnäytetyön tilaajana toimii Keski-Suomen Liiton rahoittama ja Jyväskylän ammattikorkeakoulun hallinnoima Bioenergiasektorin kehittäminen pohjoisessa Keski-Suomessa -hanke. Hanke pyrkii yhdistämään Keski-Suomessa olevaa alan osaamista ja tehostamaan erityisesti pohjoisessa Keski-Suomessa bioenergian tuotantoa, jalostusta ja käyttöä. Hankkeen tavoitteena on bioenergiasektorin yhteistyöverkoston rakentaminen ja sitä kautta yritystoiminnan lisääminen. (Luonnonvarainstituutin hankkeet 2007.) Hankkeen projektipäällikkönä toimii Tapani Sauranen. Opinnäytetyön ohjaajana toimi yliopettaja Tero Vesisenaho.

## **2 RUOKOHELPI POLTTOAINEENA**

### **2.1 Poltto-ominaisuudet**

Ruokohelven polttoaineominaisuuksiin (taulukko 1) vaikuttavat useat eri tekijät, esimerkiksi kasvilajike, kasvupaikka ja -alusta, lannoitus sekä korjuun ajankohta. Ruokohelven energiasisältö kuiva-aineessa on keskimäärin 4,5–4,9 MWh/tn KA ja energiatiheys 0,3 MWh/i-m<sup>3</sup>. Keväällä korjatun ruokohelven kosteus on vain 10–15 %, joten kasvin tehollinen lämpöarvo massayksikköä kohti voi olla korkeampi kuin turpeella ja puulla. (Pahkala ym. 2006, 42.)

TAULUKKO 1. Kevätkorjatun ruokohelven polttotekniset ominaisuudet verrattuna muihin biopolttoaineisiin. Taulukko on muokattu Alakankaan (2000) julkaisusta.

<b>Palamisominaisuus</b>	<b>Ruokohelpi</b>	<b>Vehnän olki</b>	<b>Kokopuuhake</b>	<b>Palaturve</b>
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg (MWh/tn)	17,6 (4,9)	17,4 (4,8)	19,2 (5,3)	21,5 (6)
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg (MWh/tn)	14,6 (4,1)	14,4 (4)	8,5 (2,4)	12 (3,3)
Kosteus, %	14	15	50	40
Tuhkapitoisuus, %	5,5	7	1,5	4
Hiili, %	46	46	50	55
Typpi, %	0,9	0,5	0,3	1,5
Rikki, %	0,1	0,15	0,05	0,25
Kloori, %	0,09	0,5	0,02	0,05
Kalium, %	0,2	0,8	0,2	0,05
Kalsium, %	0,2	0,4	0,3	0,5
Magnesium, %	0,05	0,1	0,05	0,05
Natrium, %	0,01	0,1	0,01	0,01
Pii, %	1,8	1,8	0,4	0,8
Tuhkan sulamispiste, °C	1 404	930	1 150	1 100
Arseeni, mg/kg KA <sup>1</sup>	0,2	-	0,01	2
Elohopea, mg/kg KA	0,03	0,03	0,02	0,09
Kadmium, mg/kg KA	0,06	0,05	0,1	0,1
Lyijy, mg/kg KA	2	1	4	5

---

<sup>1</sup> Kuiva-aineen massalla tarkoitetaan polttoaineen vedettömän osan kokonaismäärää, jota käytetään kuiva-aineosuuksien vertailuperustana. Polttoaineen kuiva-aine sisältää sekä palavia että palamattomia ainesosia. Kuiva-aine koostuu hiilestä, vedystä, hapesta, typestä, rikistä ja palamattomasta epäorgaanisesta ainesosasta eli mineraaliaineksesta (tuhka) (Alakangas 2000, 12.)

### **Ruokohelpi seospolttoaineena**

Ruokohelpi soveltuu kiinteäksi polttoaineeksi turpeeseen, hakkeeseen tai kuoren ja purun seokseen sekoitettuna. Korsibiomassan käyttäjän kannalta polttoaineen tärkeimmät ominaisuudet ovat kosteus, tuhka ja sen sulamiskäyttäytyminen sekä irtotiheys. (Flyktman & Paappanen 2005, 7.) Sekoittamalla ruokohelpi turpeeseen tai hakkeeseen voidaan vaikuttaa seoksen palamis- ja polttoaineominaisuuksiin, jolloin myös tuhkan sulamiskäyttäytyminen muuttuu (Flyktman 1998, 59).

Ruokohelvessä on turpeeseen verrattuna enemmän haihtuvia aineita, toisaalta myös sen tuhkapitoisuus voi olla suurempi (Flyktman 1998, 59). Verrattaessa ruokohelven poltto-ominaisuuksia puuhun ja palaturpeeseen, voidaan havaita sen tuhkan sulamispisteen olevan noin 300 °C korkeampi kuin palaturpeella ja 250 °C korkeampi kuin puulla. Laitteistojen toiminnan kannalta on parempi, jos polttoaineen tuhkapitoisuus on pieni ja sen sulamispiste korkea. Rikin, arseenin, elohopean, lyijyn ja kadmiumin pitoisuudet ovat helvellä pienemmät kuin turpeessa, mutta samaa suuruusluokkaa tai suuremmat kuin puussa. (Pahkala ym. 2006, 42.)

Ruokohelpi on hyvin kevyttä ja näin ollen sen energiatiheys (MWh/m<sup>3</sup>) on alhainen. Voimalaitoksissa polttoaineseoksen energiasisällöstä ruokohelpeä voi käyttökokemusten perusteella olla korkeintaan noin 10 %. Koska helpisilppu on hyvin kevyttä ja kuivaa verrattuna pääpolttoaineisiin, polttoaineiden sekoittaminen täytyy tehdä huolellisesti. (Pahkala ym. 2006, 42.)

### **Kevät- ja syyskorjatun ruokohelven poltto-ominaisuudet**

Ruokohelpi korjataan useimmiten kuloheinänä keväällä, jolloin sadon laatuominaisuudet ovat energiakäytön kannalta hyvät, sillä korren osuus biomassasadosta on silloin suuri. Korren tuhkapitoisuus on pienempi ja kuitupitoisuus suurempi kuin muiden kasvinosien. (Pahkala ym. 2006, 42.)

Kevät- ja syyskorjatun ruokohelven ominaisuudet poikkeavat Flyktmanin (1998) mukaan rikin suhteen huomattavasti toisistaan; syyskorjatussa helvessä rikkipitoisuuden on havaittu olevan 1,5-kertainen kevätkorjatun helven rikkipitoisuuteen verrattuna. Ruokohelvelle on tyypillistä ominaisuuksien melko suuri hajonta, mikä johtuu kasvuolosuhteista, maaperästä ja lajikkeesta. Huomionarvoista on syyskorjatun ruokohelven suuri klooripitoisuus kevätkorjattuun verrattuna. Samoin kalsium- ja kaliumpitoisuudet ovat korkeammat syyskorjatulla helvellä. Alkalimetallit sekä kloori saattavat aiheuttaa korroosiota kattilassa ja savupiipussa. (Flyktman 1998, 59.)

Merkittävin ero syys- ja kevätkorjatulla ruokohelvellä on polttoaineen tuhkan sulamiskäyttäytymisessä. Keväällä korjattaessa helpikasvustosta poistuu talven aikana muun muassa juuri klooria, jolloin poltto-ominaisuudet paranevat ja esimerkiksi tuhkan sulamispiste nousee huomattavasti. (Flyktman & Paappanen 2005, 7.)

## **2.2 Ruokohelppi vs. viljan olki**

Ruokohelppi ja olki muistuttavat korsimaisina polttoaineina käytettävyydeltään suuresti toisiaan. Oljen energiakäyttö on jäänyt Suomessa kuitenkin vähäiseksi. Tämä johtuu muun muassa olkisatojen pienuudesta, oljen suuresta kosteudesta korjuuaikana sekä kattilaa syövyttävien ainesten määrästä. Toisaalta oljen tuotantokustannukset ovat pienet, koska kustannusten voidaan laskea kohdistuvan päätuotteeseen eli jyväsatoon.

Knuutilan (2006) mukaan oljen hyödyntämisen huonon menestyksen syynä ovat olleet kuivan oljen korjuun vaikeus, pätevien korjuumenetelmien puute, varastoinnin suuri tilantarve ja kelvollisten kotimaisten polttolaitteiden olematon tarjonta (Knuutila 2006, 10).

Olki soveltuu ulkomaisten esimerkkien mukaan polttoaineeksi suorassa poltossa ja etenkin Tanskassa ja Etelä-Ruotsissa on pitkät perinteet oljen hyödyntämisessä (Rahkonen 2007, 17–19). Olki sisältää paljon haihtuvia aineita ja vaatii palotilakseen laajan tulipesän. Oljen käyttöarvoon vaikuttavat poltossa syntyvän tuhkan määrä, koostumus ja tuhkan sulamispiste. Parhaiten polttoon soveltuvat vehnän ja rukiin oljet, heikoiten kauran. Olkituhkan korkea kalium-, magnesium- ja kalsiumpitoisuus laskee tuhkan sulamispistettä, minkä vuoksi olki on vaikeampi polttoaine kuin puu tai ruokohelvi. (Pahkala & Keskitalo 2006, 48–50.)

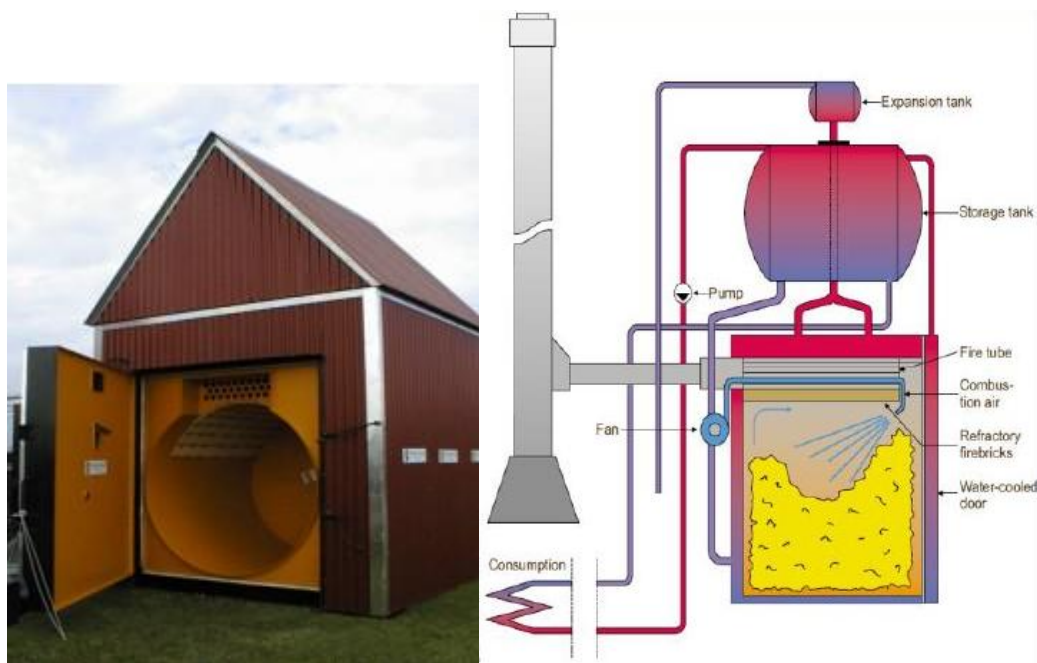
Vaikka ruokohelvi ja olki poikkeavat poltto-ominaisuuksiltaan toisistaan, ovat ne käytettävyydeltään hyvin samantapaisia polttoaineita. Molempien käytön suurimpia ongelmia ovat keruu, kuljetus ja varastointi. Irto-oljen tilavuuspaino on vain 30–40 kg/i-m<sup>3</sup>. (Pahkala ym. 2006, 48–50.) Vapon (2006) tietojen mukaan silputun oljen irtotiheys käyttökosteudessa on 80 kg/i-m<sup>3</sup> (taulukko 2) (Paikalliset polttoaineet, Suomen huoltovarmuuden perusta 2006). Sekä ruokohelven että oljen tilavuuspainoa voidaan kasvattaa paalaamalla, silppuamalla, jauhamalla, pelletöimällä tai briketöimällä (Pahkala ym. 2006, 48–50).

TAULUKKO 2. Ruokohelven ja oljen lämpöarvo, kosteus ja energiatiheys. Taulukko on muokattu Vapon (2006) taulukosta.

Ominaisuus	Ruokohelvi (kevätkorjattu)	Olki (silputtu)
Tehollinen lämpöarvo, MWh/tn (kosteus 0 %)	4,75–5,17	4,83
Kosteus	8–20	17–25
Tehollinen lämpöarvo, MWh/tn käyttö- kosteudessa	3,7–4,7	3,44–3,89
Irtotiheys käyttökosteudessa kg/i-m <sup>3</sup>	70	80
Energiatiheys (MWh/i-m <sup>3</sup> )	0,3–0,4	0,3–0,4
Tuhkapitoisuus, kuiva-aineessa %	1–10	5

## Oljenvolttolaitteet

Oljen poltossa käytetään yleisesti kahdenlaisia laitteistoja, kertatäyttöisiä (kuvio 1) sekä automaattisia. Kertatäyttöisissä järjestelmissä paalit poltetaan kokonaisina. Kattilat asennetaan aina vesivaraajan yhteyteen, jonka avulla poltosta saatava energia varastoidaan. Automaattisella syöttöjärjestelmällä varustetuissa laitteistoissa paalit silputaan ennen polttoa ja polttoainetta syötetään kattilaan automaattisesti lämmöntarpeen mukaan. (Boiler plants for farms.)



KUVIO 1. Kertatäyttöinen paalinolttolaitteisto (Boiler plants for farms.)

Suomeenkin oljenvolttolaitteita toimittavista yrityksistä tunnetuimpia lienevät tanskalaiset REKA ja LIN-KA. Kuviossa 2 on esiteltyä LIN-KA:n polttojärjestelmä.





KUVIO 2. LIN-KA oljenpolttolaitteisto (Straw firing systems 200–1500 kW, 2006.)

Molempien valmistajien laitteistoissa olki silputaan ennen polttoa. Paalimurskain (kuvio 3) murskaa pyörö- tai suurkantipaaleja sitä mukaa kun kattila polttoainetta tarvitsee. Näin säästytään monelta turhalta työvaiheelta, eikä tarvita välivarastoja, silloja tai kalliita kuljetinratkaisuja. Silputtu olki kuljetetaan palopäälle liukuhihnan avulla tai vaihtoehtoisesti pneumaattisella syöttöjärjestelmällä. Merkittävää on se, että järjestelmä mahdollistaa oljen tai ruokohelven hyödyntämisen sellaisenaan. Laitteistojen kattilat on lisäksi varustettu liikkuvalla arinalla, jonka avulla haasteellisten polttoaineiden käyttäminen on helppoa. Suomen ensimmäinen paalimurskainlinjasto on REKAN toimittama ja on Honkaniemen (2007) mukaan toiminnassa Kokkolassa. (Honkaniemi 2007, 31.)



KUVIO 3. REKA paalisilppuri (Silppurit, 2006.)

### **Biofire Oy:n polttokoe oljella**

Biofire Oy järjesti oljen polttokokeen Kauhanummi Oy:n lämpökeskuksessa huhtikuun lopulla vuonna 2006. Lämpökeskuksessa on käytössä Tulikkokattila sekä Biofire Oy:n 200 kW:n palopää. Kokeessa poltettiin alle viidentoista prosentin kosteudessa olevaa, Claasin Jaguar -ajosilppurilla silputtua olkea. Silpun pituudeksi määriteltiin 3 cm. Koe-erän kuutiopainoksi arvioitiin 100 kg. (Knuutila 2006, 10–11.)

Oljen poltto onnistui kokeen perusteella hyvin. Biofiren hydraulikoneikon liikutelema arina selvisi oljen tuhkasta ongelmitta. Käytetty silppu kulki moitteetta varastomakasiinista ruuvia myöten palopäälle. Silpun seassa olleet muutamat pitkähköt korrenpätkät aiheuttivat kuitenkin lievää kietomistaipumusta ja tekivät syötöstä palopäälle epätasaista. Ongelmana oli myös oljen paakkuuntuminen palopäälle tullessa. Paakku pysyi pitkään muodossaan leviämättä arinalle, eikä tästä syystä syttynyt heti kauttaaltaan. Paakkuuntumistaipumuksen arveltiin korjaantuvan käytettäessä lyhyempää silppua. Syöttö piti olla jyrksinturpeeseen verrattuna varsin suurella, jotta polttoainetta olisi tullut palopäälle riittävällä teholla. (Knuutila 2006, 11.)

## 2.3 Varastointi ja käsittely

Ruokohelpi, tai vaihtoehtoisesti olki, kuljetetaan korjuun jälkeen pelloilta yleisimmin pyörö- tai kanttipaaleina tai irtosilppuna. Paalatessa päästään korkeaan irtotiheyteen, jolloin etuna ovat alhaisemmat kuljetuskustannukset. Irtokorjuun etuna on polttoaineseoksen tekemisen helppous. Irtomateriaali voidaan sekoittaa muihin polttoaineisiin missä tahansa tuotantoketjun vaiheessa. (Lindh, Paappanen, Kallio, Flyktman, Käyhkö, Selin & Huotari 2005, 2.)

Mikäli ruokohelpi toimitetaan käyttöpaikalle paaleina, on ne murskattava ennen polttoa. Ruokohelpipaalien murskausta on kokeiltu muun muassa paalisilppureilla ja kaukalomurskaimilla. Merkittäviä ongelmia molemmilla laitteistoilla aiheuttavat pölyäminen sekä paalinarut, jotka tarttuvat etenkin paalisilppurin akselille. (Flyktman & Paappanen 2005, 13.) Opinnäytetyön polttokokeita varten hankitut helpipaalit murskattiin autohakkurilla. Menetelmä osoittautui toimivaksi, sillä silpusta saatiin riittävän lyhyttä (3 cm) ja tasalaatuista.

Ruokohelven varastointi irtosilppuna vaatii huomattavan suuren tilavuuden. Ruokohelvellä 1 MWh:n energiamäärä vastaa silppuna noin 3,5 m<sup>3</sup>. Paalattuna 1 MWh:n energia vaatii noin 1,3–1,5 m<sup>3</sup>. Mikäli polttoaine toimitetaan paalattuna, aiheutuu murskaamisesta lisäkuluja. Toisaalta, paalattua helpeä voidaan kuljettaa pidempiä matkoja ja varastoida pienemmässä tilassa. (Flyktman & Paappanen 2005, 13–14.)

Myös Knuuttila (2006) korostaa, että silputtu materiaali tarvitsee runsaasti varastotilaa. Hänen mielestään tässä vaiheessa edullisimmalta ratkaisulta vaikuttaisi silpun varastoiminen tuubimuoviin. Menetelmää ei ole vielä testattu, mutta todennäköisesti riittävän tehokkaan sullojan avulla silputtu ruokohelpi tai vaihtoehtoisesti olki saadaan tiiviisti muovin sisään. Toinen vaihtoehto on aumavarastointi. Auman paikka on kuitenkin valittava huolella, etteivät pinta- ja sadevedet kastele auman pohjaa. Muovia kuluu paljon ja etenkin purkuvaiheessa saattaa ilmetä ongelmia. (Knuuttila 2006, 11–12.)

## 2.4 Käyttökokemukset

Suomessa kiinteään polttoaineen yleisimmät polttotavat ovat arina- ja leijupoltto. Arinapolttota käytetään tyypillisesti pienehköissä lämpölaitoksissa, joiden lämpöteho on alle 5 MW (Flyktman & Paappanen 2005, 9–10). Ruukohelven polttoa on Suomessa tutkittu lähinnä suurten lämpölaitosten tarpeita ajatellen. Voimalaitosten kattiloissa ruukohelven käyttö onnistuukin teknisesti melko hyvin, mutta määrän noustessa ensisijaiseksi ongelmaksi tulevat lähinnä kuljetinlaitteet ja erilaiset anturit ja mittarit, jotka on sovitettu joko turpeen tai hakkeen polttamiseen. (Tuomisto 2005, 15–16.)

Kuten aiemminkin on jo todettu, ruukohelpi poltetaan yleisimmin seoksena turpeen tai hakkeen kanssa, sillä yksin poltettuna ruukohelven palamislämpötila nousee hyvin korkeaksi. Lisäksi ruukohelpisilpun keveyden takia kattilasta saatava teho alenee. Ruukohelpisilppu sisältää vain noin kolmasosan jyrsinturpeen energiasta tilavuusyksikköä kohti. Siksi ruukohelpeä on parasta polttaa silloin, kun laitosta ei ajeta täydellä teholla. Ruukohelpi on silputtava riittävän lyhyeksi, jotta polttoaineet sekoittuvat hyvin keskenään ja lämpökeskusten polttoaineiden käsittelylaitteet toimisivat moitteetta. Päästöjen puolesta ruukohelpi ei ole osoittautunut muita polttoaineita huonommaksi vaihtoehdoksi. Kevätkorjatulla ruukohelvellä tehdyissä polttokokeissa CO-päästöt eivät mittaus-ten mukaan ole olleet normaalista poikkeavia. (Tuomisto 2005, 15–16.)

### VTT:n koe Kiuruvedellä

Flyktmanin (1998) mukaan VTT teki vuonna 1996 ruukohelven polttokokeita Kiuruvedellä Timber Oy:llä Sermet Oy:n toimittamalla 3,5 MW:n arinakattilalla. Kyseiseen polttoaineen käsittelyjärjestelmään kuuluu tankopurkaimilla varustettu polttoainevarasto, kolakuljetin sekä syöttösiilo, jonka pohjalla oleva ruuvikuljetinjärjestelmä siirtää polttoaineen kattilan etupesään. (Flyktman 1998, 61–62.)

Ensimmäisessä kokeessa helpeä oli 12 % energiasisällöstä. Kokeen aikana polttoaineen syötössä ilmeni ongelmia, sillä syöttö arinalle ei ollut tasaista. Välillä arinalle tuli liikaa polttoainetta, mikä aiheutti savukaasuihin häkäpiikin. Kattilasta ei myöskään saatu irti riittävästi tehoja, sillä syöttöautomaattiikka ei kyennyt syöttämään kattilaan riittävästi polttoainetta. (Flyktman 1998, 61–62.)

Kokeessa, jossa ruokohelpeä oli energiaosuudesta 7 %, koe onnistui syötön osalta huomattavasti paremmin. Kummassakaan kokeessa tankopurkainvarasto ei toiminut suunnitellusti, sillä purkaimet eivät kyenneet siirtämään ongelmitta kattilan tarvitsemaa polttoainemäärää. Tehdyissä kokeissa ruokohelpeosesten päästömittaustulokset eivät poikenneet merkittävästi peruspolttoaineen arvoista, häkäpiikkejä lukuun ottamatta. (Flyktman 1998, 61–62.)

VTT:n suorittamista kokeista selvisi, että nykyisissä lämpökeskuksissa ruokohelven seospolton tekniset rajoitukset ilmenevät polttoaineen käsittelylaitteiden toiminnassa. Polttolaitteissa havaitut ongelmat olivat vähäisempiä. Kokeiden perusteella eri polttoainejakeet tulee sekoittaa hyvin keskenään. Myös ruokohelven silpun pituudella on merkitystä: lyhyt silppu sekoittuu paremmin pääpolttoaineeseen ja aiheuttaa siten vähemmän ongelmia syöttölaitteistossa. (Flyktman 1998, 61–62.)

### **Jyväskylän ammattikorkeakoulun polttokoe Kinnulassa**

Jyväskylän ammattikorkeakoulun hallinnoima Bioenergiasektorin kehittäminen Pohjoisessa Keski-Suomessa -hanke toteutti polttokokeen ruokohelvellä Kinnulan lämpölaitoksella Ekopointin 2 MW:n arinakattilalla keväällä 2007. Ruokohelpipaalit silputtiin apevaunulla, silpun pituus jäi tavoiteltua viittä senttimetriä pidemmäksi. Hake sekä ruokohelpi levitettiin tasaiseksi matoksi pihamaalle kerroksittain ja sekoitettiin traktorin etukuormaajalla. Ruokohelven kosteudeksi määriteltiin noin 20 %. Kokeessa poltettiin seosta, joka sisälsi helpeä noin 17 % seoksen kokonaisenergisällöstä. (Sauranen 2007, 2–4.)

Helpi-hakeseos toimi kokeen perusteella kohtuullisesti laitteiston syöttöjärjestelmässä. Pohjapurkulaitteet siirsivät seoksen melko tehokkaasti kolakuljettimelle. Keskelle varastosiilon takaseinää muodostui kuitenkin kasautuma. Seos siirtyi kokeessa vaivatta pudotussuppilon kautta porrasarinan yläosaan. Pitkätkään oljet eivät olleet kuljettimille ongelma, eikä kietoutumista ketjuihin, akseleihin tai muihin osiin havaittu kokeen aikana. Kolakuljetin havaittiin toimivaksi ratkaisuksi, sillä siinä ei ole seularakenteita. Kuljettimet mahdollistivat melko pitkänkin silpun syötön. Laitos pystyi kokeen aikana käyttämään vaivatta ruokohelpeä ja tuottamaan tarvittavan tehon huippukuormaa alempien käyttöjaksujen aikana. (Sauranen 2007, 4–9.)

## **2.5 Ruokohelven briketöinti**

Briketöinnillä tarkoitetaan jauhetun, murskatun tai silputun materiaalin tiivistämistä sylinterin muotoisiksi kappaleiksi (Laurila 2006, 8). Ruokohelpisilpun poltto on tekniikaltaan vaativampaa kuin puun, sillä ruokohelpi on sellaisenaan kevyttä. Pelletöidyn tai briketöidyn ruokohelven poltto on huomattavasti helpompaa. Myös polttoaineen kuljetettavuus ja varastointi briketin muodossa on käytännöllisempää kuin paaleissa tai silputtuna. Kotitalouksien kattiloita ei ole suunniteltu puhtaan ruokohelven polttoon. Ruokohelpipelletti- tai brikettimarkkinat koostuvat pääosin suurista kunnallisista lämpölaitoksista sekä suurista lämpöä ja sähköä tuottavista laitoksista. (Boren 2007, 4.)

### **Konepaja M. Pappisen pelletöintikoe**

Ruokohelven briketöinnistä ja pelletöinnistä on melko vähän käytännön kokemuksia. Konepaja M. Pappinen järjesti tästä syystä ruokohelven ja puuaineksen pelletöintikokeen. Konepaja M. Pappinen Oy on kehittänyt uudentyyppisen pelletöintikoneen, joka soveltuu pieneen ja keskisuureen tuotantoon. Samaisella pelletöintilaitteistolla tehtiin koesarja, joka aloitettiin pelletöimällä puhdasta mäntyä, jolla koneen tiedettiin tekevän ensiluokkaista pellettiä. Tämän jälkeen lisättiin ruokohelpeä: aluksi 5 % kokonaispainosta sitten 10 % ja 20 %. Viimeisenä testattiin pelletöintiä puhtaalla ruokohelvellä. (Boren 2007, 6.)

Koesarjan tulos oli yllättävä, sillä ruokohelpi ei heikentänyt pelletin laatua ja itse asiassa tilavuuspainoltaan suurin pelletti saatiin puhtaasta ruokohelvestä. Tässä tapauksessa ruokohelven hyvään pelletöintitulokseen oli syynä pelletöintilaitteiston ominaisuuksien lisäksi ruokohelven normaalia alempi kosteus (7,4 %) sekä hyvin onnistunut jauhatus vasaramyllyllä. (Boren 2007, 6.)

### **Briketöinti- ja polttokoe Kuortaneella**

Seinäjoen ammattikorkeakoulu sekä Kuortaneen energiaosuuskunta tutkivat vuonna 2006 ruokohelven korjuun, murskauksen sekä briketöinnin työvaiheita ja kustannuksia. Tavoitteena oli lisäksi tarkastella ruokohelpibriketin ominaisuuksia sekä soveltuvuutta lämmöntuotantoon. (Laurila 2006, 1.)

Kokeissa kyettiin valmistamaan hyvälaatuista ruokohelpibrikettiä, jonka kiintotiheys oli yli kuusinkertainen pyöröpaalien kiintotiheyteen verrattuna. Tiheyden nousu pienentää oleellisesti varastointitilan tarvetta sekä alentaa kuljetuskustannuksia. Kevätkorjatun ruokohelven briketöinnin todettiin olevan taloudellista toimintaa tietyin edellytyksin. (Laurila 2006, 27–29.)

Ruokohelpibrikettien polttoa testattiin lämpölaitoksessa Kuortaneella, Tulostekniikan valmistamalla 700 kW:n lämmityslaitteistolla. Kokeiden perusteella briketit soveltuivat poltettavaksi. Tulokset olivat rohkaisevia, sillä kokeiden perusteella brikettejä voitaisiin hyödyntää myös pienissä lämpölaitoksissa, maataloilla ja kotitalouksissa. (Laurila 2006, 27–29.)

## **3 POLTTOKOKEIDEN TOTEUTUS**

Polttokokeet ruokohelpi-kokopuuhakeseoksella suoritettiin 5.12.2007–22.1.2008 välisenä aikana. Kokeet tehtiin Saarijärvellä Jyväskylän ammattikorkeakoulun Bioenergiakeskuksen laitteistoilla. 60 kW:n laitteistolla suoritettiin kolme polttokoetta kolmena eri päivänä. 200 kW:n laitteistolle koejaksoja kertyi kaksi, joista toisessa helpeä syötettiin suppiloon sivusyöttölaitteen kautta. Sää oli polttokokeiden aikana ajankohtaan nähden varsin leuto. Sää pysyteli pääosin plussan puolella, muutamana päivänä lämpötilat putosivat pakkaselle.

### 3.1 Koelaitteistojen esittely

#### **Arimax BIO energy 60 kW**

Polttokokeet aloitettiin 60 kW:n laitteistolla, joka koostuu 60 kW:n Arimax 360 BIO energy -kattilasta ja 60 kW:n HakeJet -palopäästä (kuvio 4). Laitteistoa ohjataan Tiimi 5302 -järjestelmällä, ensiö- ja toisioilman määrää säädetään käsin. Polttoainevarastona toimii vetoisuudeltaan 1 m<sup>3</sup>:n BIO energy -siilo (kuvio 5). Siilon pohja on varustettu pyörivillä lautaskuljettimilla, jotka siirtävät polttoaineen ruuville ja siitä suoraan palopäälle.



KUVIO 4. Arimax 360 BIO energy -kattila ja HakeJet -palopää





KUVIO 5. Arimax BIO energy -varastosiiilo

### **Arimax 200 kW lämpökontti**

Kokeita jatkettiin Arimaxin 200 kW:n lämpökontin laitteistolla (kuvio 6). Laitteisto koostuu 200 kW:n BIO energy -kattilasta ja 200 kW:n BioJet -palopäästä (kuvio 7). Laitteita ohjataan Tiimi 5304 -järjestelmällä, joka mahdollistaa tehoalueiden automaattisen vaihdon verkoston lämmöntarpeen mukaan. Laitteisto on varustettu lambda-anturilla, jonka avulla toisioilman määrää säädetään automaattisesti jäännöshappiarvon mukaan.

Polttoainevarastona toimii tilavuudeltaan 15 m<sup>3</sup>:n laakapohjainen siilo. Siilon pohja on varustettu tankopurkaimilla, jotka siirtävät polttoaineen varastoruuville. Varastoruuvilta polttoaine siirtyy syöttösuppilon kautta varsinaiselle syöttöruuville ja sitä kautta palopäälle.



KUVIO 6. Arimax 200 kW -lämpökontti



KUVIO 7. Arimax BIO energy -kattila ja BioJet -palopää

### 3.2 Polttokokeissa käytetyt polttoainejakeet

Kokeissa käytettiin keväällä 2007 lautasniittokoneella niitettyä ja paalaimella pyöröpaalattua ruokohelpeä (kuvio 8) sekä kokopuuhaketta (kuvio 9). Laadultaan helpipolttaine vaikutti hyvältä ja kuivalta, joukossa ei ollut liiemmin epäpuhtauksia, risuja tai tuoretta kasvustoa. Hake oli myös laadultaan kohtalaisen hyvää, joskin kosteahkoa. Palakooltaan hake oli tasaista, seassa oli tosin muutamia risuja.

60 kW:n laitteistolla suoritettiin kolme koetta, joista kahdessa ensimmäisessä poltettiin paalaimen silppuamistoiminnolla silputtua helpeä, joten erillistä silppuamista ei tarvinnut suorittaa. Silpun keskimääräiseksi pituudeksi mitattiin 5 cm, joukossa oli myös pidempiä korsia (taulukko 3). Silpun pituus määriteltiin ottamalla helpisilpusta viiden litran näyte, josta eripituiset korret eroteltiin omiin osioihinsa. Osiot punnittiin ja eri osioiden massaa verrattiin koko viiden litran näyte-erän massaan.

TAULUKKO 3. Paalaimella silputun ruokohelven silpun pituus

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



KUVIO 8. Kahdessa ensimmäisessä 60 kW:n laitteistolla tehdyssä polttokokeessa käytetty ruokohelppi



KUVIO 9. Polttokokeissa käytetty kokopuuhake

Kolmannessa 60 kW:n laitteistolla tehdyssä kokeessa sekä 200 kW:n laitteistolla tehdyissä kokeissa käytettiin Kotimaiset Energiat Oy:n rumpuhakkurilla varustetulla Giant -autohakkurilla silputtua ruokohelpeä (kuvio 10.) Silppuaminen onnistui hyvin ja keskimääräiseksi silpun pituudeksi muodostui 3 cm (taulukko 4). Silpun pituus määriteltiin ottamalla helpisilpusta viiden litran näyte, josta eripituiset korret eroteltiin omiin osioihinsa. Osiot punnittiin ja eri osioiden massaa verrattiin koko viiden litran näyte-erän massaan. Silppu todettiin tasalaatuiseksi, joukossa ei ollut pitkiä korsia. Silppu varastoitui konttiin, jotta polttoaine pysyisi mahdollisimman kuivana (kuvio 11).



TAULUKKO 4. Autohakkurilla silputun ruokohelven silpun pituus

Silpun pituus	Osuus näyte-erän kokonaismassasta
0–3 cm	84 %
3–5 cm	15,2 %
5–10 cm	0,86 %



KUVIO 10. Ruokohelpipaalien murskaus autohakkurilla



KUVIO 11. Ruokohelpisilppua varastokontissa

### 3.3 Polttoaineiden energiasisältöjen määrittäminen

Käytetyistä polttoainejakeista määriteltiin irtotiheys, energiatiheys, erän koko kuutioina ja kilogrammoina, energiamäärä megawatti- tai kilowattitunteina sekä seossuhde prosentteina käytetyn seoksen kokonaisenergiamäärästä. Energiamittarin lukemaa seuraamalla saatiin selville kulloisessakin kokeessa tuotettu energiamäärä.

Jokaisessa polttokokeessa käytetystä ruokohelvestä sekä hakkeesta otettiin kustakin kaksi kosteusnäytettä kosteussisältöjen selvittämiseksi. Kosteudet määriteltiin ISO 589 -standardin mukaisesti. Näytteet punnittiin digitaalivaa'alla (Kern KB), punnitustarkkuus 0,01 g. Näytteitä kuivatettiin 105 °C kuivausuhunissa (Heraeus Function line T12) noin 17 tuntia, jonka jälkeen näytteet punnittiin kuumina. Kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona käytettiin Alakankaan (2000) julkaisussa esiteltyä arvoa (Alakangas 2000, 105).

Polttoaine-erien kosteudet saapumistilassa, tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ja energiasisällöt laskettiin Alakankaan (2000) teoksessa esiteltyjen kaavojen ja arvojen mukaisesti. (Alakangas 2000, 24–30.)

#### **Polttoaineiden massan ja tilavuuden määrittäminen**

60 kW:n laitteistolla tehdyissä kokeissa kaikkien käytettyjen polttoaineiden määrät mitattiin 65 litran saavin avulla. Jokainen saavillinen punnittiin erikseen.

200 kW:n laitteistolla tehdyissä kokeissa hakkeen määrä mitattiin ottamalla mitat peräkärystä, jolla haketta kuljetettiin. Hake tasattiin, mutta sitä varottiin tiivistämisestä. Massan määrittämistä varten punnittiin yksi saavillinen (65 litraa) haketta.

Ensimmäisessä 200 kW:n laitteistolla tehdyssä kokeessa ruokohelpisilpun määrä mitattiin täyttämällä pienkuormaajan kauha 65 litran saavilla. Kauhaan mahtui 19 saavillista, jokaisen saavillisen paino punnittiin. Kauhan täyttötilavuudeksi määriteltiin noin 1 m<sup>3</sup>, silpun kuutiopainoksi muodostui 58 kiloa (kuvio 12).



KUVIO 12. Helpisilppua pienkuormaajan kauhassa

Toisessa 200 kW:n laitteistolla tehdyssä kokeessa poltetun helpisilpun määrä saatiin selville laskemalla, paljonko sivusyöttölaitteen siilossa olleen silpun pinta oli vajantunut koejakson aikana. Kuutiopainona käytettiin aikaisemmin mitattua 58 kiloa

### 3.4 Savukaasujen analysointi

Polttokokeiden aikana tehtiin mahdollisuuksien mukaan savukaasumittauksia. Mittaukset pyrittiin tekemään vakiintuneen palamistilan aikana. Savukaasumittaukset suoritettiin jatkuvatoimisella Testo 300 M -savukaasuanalysointilaitteella (kuvio 13).

Savukaasuista mitattavia suureita olivat esimerkiksi yli-ilmakerroin ( $\lambda$ ), jäännöshappi ( $O_2$  %), savukaasujen lämpötila ( $^{\circ}C$ ), hiilidioksidi ( $CO_2$ ), typen oksidit ( $NO$  ja  $NO_x$  ppm), hiilimonoksidi ( $CO$  ppm) sekä palamishyötysuhde (%). Savukaasuanalysointilaitteen käyttökokemusten perusteella analysointilaitteen mitaama jäännöshappiarvo on ollut noin 2 % korkeampi kuin 200 kW:n lämpökontin jäännöshappianturin mitaama arvo.



KUVIO 13. Testo 300 M -savukaasuanalysointilaitteen



## 4 POLTTOKOKEET 60 KW:N LAITTEISTOLLA

### 4.1 Ensimmäinen polttokoe

#### **Puhdas ruokohelpi**

Ruokohelven polttokokeet aloitettiin keskiviikkona 5.12.2007 testaamalla puhtaan ruokohelpisilpun toimivuutta laitteistossa. Jyväskylän ammattikorkeakoulun bioenergia-alan opiskelija Matti Toivakka avusti kokeessa. Kokeen aluksi varastosiiloon laitettiin 130 litraa helpisilppua (kuvio 14). Pian kuitenkin selvisi, että kevyenä polttoaineena helpi ei lähtenyt kulkemaan siilosta ruuville. Siilon pohjan lautaspurkaimet eivät saaneet minkäänlaista otetta silpusta. Silppua yritettiin tiivistää ja tökkiä, mutta tuloksetta. Puhtaan helpisilpun poltettavuutta ei näin ollen päästy testaamaan, vaan päädyttiin tekemään seos hakkeen kanssa.



KUVIO 14. Ruokohelpeä varastosiilossa

## 20 %:inen ruokohelppi-hake-seos

Kokeita jatkettiin 5.12. ja seuraavaa yritystä varten valmistettiin ruokohelppi-hakeseos, jossa oli tilavuudesta puolet kokopuuhaketta ja puolet helpeä (kuvio 15). Energiasisällöstä helpeä oli noin 20 % (taulukko 5).



KUVIO 15. 20 %:n seos varastosiihossa

TAULUKKO 5. Ensimmäisen koe-erän tiedot

	<b>Ruokohelppi</b>	<b>Hake</b>
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	17,6	19,2
Kosteus saapumistilassa, %	18,5	35,6
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	13,89	11,49
Irtotiheys, kg/i-m <sup>3</sup>	44	233
Energiatiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,2	0,74
Erän koko, i-m <sup>3</sup>	0,26	0,26
Erän koko, kg	11,5	60,6
Energiamäärä, kWh	44	193
Koko erän energiamäärä, kWh	237	
Osuus energiasisällöstä, %	18,57	81,43

### **Polttokokeen eteneminen**

Helpi-hakeseoksen kulkeutuminen syöttöjärjestelmässä oli alusta alkaen epätasaista, joten laitteiston säätäminen ja vakiintuneen palamistilan saavuttaminen oli todella 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. Savukaasu-analyysiä ei pystytty suorittamaan, sillä vakiintuneen palamisen jaksot jäivät lyhyiksi. Helpi paloi sytytysvaiheen jälkeen palopäällä nopeasti ja syöttö tuli säätää isolle. Palo tapahtui tästä huolimatta palopään takaosassa (kuvio 16) ja jos syöttö olisi liian pienellä, saattaisi vaarana olla takapalon syntyminen.



KUVIO 16. Palaminen käynnissä

Kyseiselle ruokohelpi-hakeseokselle 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.

Ilmamäärien säätäminen savukaasuanalysaattoria hyväksikäyttäen jäi haaveeksi. Ilmamääriä säädettiin näin ollen ainoastaan silmävaraisesti liekkiä tarkkailemalla. Ruokohelppi tosin kipunoi todella 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 17) ja toisioilma-aukkojen ollessa lähes kokonaan auki palaminen eteni kokeen perusteella parhaiten.



KUVIO 17. Ensimmäisessä polttokokeessa hyväksi havaittu ensiöilman säätö

### **Syntyneen tuhkan määrä**

Tuhkaa syntyi kokeen aikana vaihtelevasti. Palon ollessa tasaista tuhkan syntyminen oli vähäistä. Ruokohelvestä havaittiin syntyvän hyvin kevyttä ja lentävää nokea sekä tuhkaa. Laitteisto nuohottiin kokeen jälkeen ja syntyneen tuhkan määräksi punnittiin 2,2 kg (kuvio 18). Tuhkatilassa oli kuitenkin myös palamatonta materiaalia, joten varsinaisen tuhkan määrä jäi todellisuudessa pienemmäksi. Tuhkan sulamisesta johtuvaa laavaantumista ei kokeen aikana havaittu ollenkaan.



KUVIO 18. Ensimmäisessä polttokokeessa syntynyttä tuhkaa

### **Hyötysuhde koejakson aikana**

Seoksen kokonaisenergiasisällöksi määriteltiin 237 kWh. Siiloon jäi kuitenkin polttokokeen jälkeen 20 kiloa helpi-hakeseosta, sillä siiloa ei onnistuttu polttamaan tyhjäksi. 20 kiloa 20 %:n seosta 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 hyötysuhteeksi kokeen aikana voidaan laskea 69,6 %. Hyötysuhdetta voitaneen pitää kohtuullisena. Laitteistosta saatiin kokeen aikana irti melko hyvin tehoja ja vakiintuneen palamisen aikana päästiin lähelle 60 kW:n tehoa

## **4.2 Toinen polttokoe**

Polttokoe suoritettiin perjantaina 7.12.2007. Koetta varten valmistettiin seosta, jossa oli energiasisällöstä 10 % ruokohelpeä (taulukko 6 ja kuvio 19).



TAULUKKO 6. Toisen koe-erän tiedot

	Ruokohelpi	Hake
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	17,6	19,2
Kosteus saapumistilassa, %	20	36
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	13,59	11,41
Irtotiheys, kg/i-m <sup>3</sup>	50	268
Energiatiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,2	0,85
Erän koko, i-m <sup>3</sup>	0,16	0,28
Erän koko, kg	8,15	74,9
Energiamäärä, kWh	30,77	237,38
Koko erän energiamäärä, kWh		268,2
Osuus energiasällöstä, %	11,5	88,5



KUVIO 19. 10 %:n seos varastosiihossa

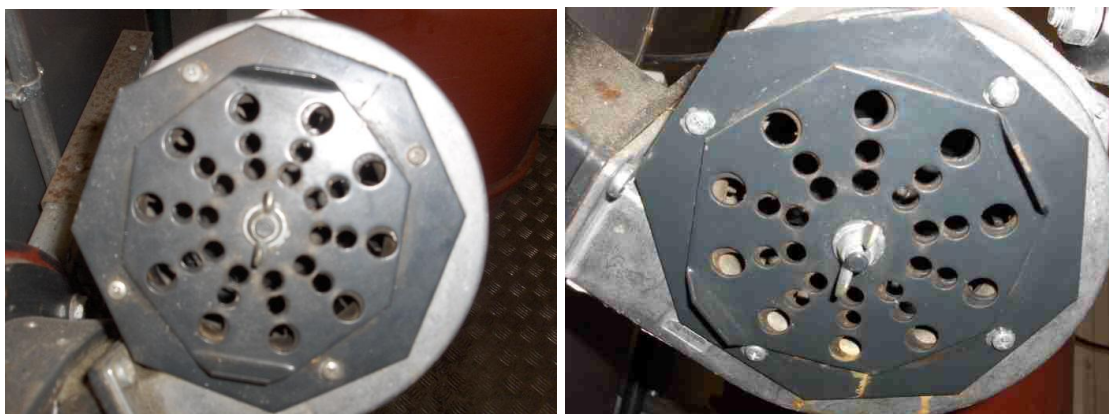
### Polttokokeen eteneminen

Seoksen palaminen lähti hyvin käyntiin ja yleisesti ottaen 10 %:inen helpi-hakeseos vaikutti käyttäytyvän kohtuullisesti sekä kuljettimissa, ruuvilla että palopäällä (kuvio 20). Syöttö ei takellellut läheskään yhtä paljon kuin edellisessä kokeessa, vaikka aivan tasaisesti eivät eri polttoainejakeet palopäätä tämänkään seoksen kohdalla saavuttaneet.



KUVIO 20. Palaminen käynnissä

Vakiintuneen palamistilan löytäminen ja polttoainesyötön säätäminen osoittautui edelleen haastavaksi, vaikka kyseinen seos paloi hallitummin ja rauhallisemmin kuin enemmän helpeä sisältänyt seos. Takapalovaaran riski oli 10 %:n seoksella pienempi kuin 20 %:n seoksella, sillä liekki oli helpompi saada palamaan palopään etuosassa. Ongelmia syntyi kuitenkin ajoittain, kun helppisilppua työntyi ruuvilta isompia määriä. Käytetylle seokselle sopivin pulssin pituus oli kokeen perusteella 12–14 sekuntia ja tauko 2–4 sekuntia. Ensiöilmauukkojen ollessa 2/3–3/4 auki (kuvio 21) ja toisioilma-aukkojen ollessa lähes kokonaan auki, palaminen eteni kokeen perusteella parhaiten.



KUVIO 21. Toisessa polttokokeessa hyväksi havaitut ensiö- ja toisioilman säädöt

### **Syntyneen tuhkan määrä**

Tuhkaa syntyi kokeen aikana melko vähän. Tuhkan joukossa ei ollut palamattonta materiaalia, vaan tuhka oli kevyttä ja väriltään vaaleahkoa. Laitteisto nuohottiin kokeen jälkeen ja syntyneen tuhkan määräksi punnittiin 1 kg (kuvio 22). Laavaantumista ei tämänkään kokeen aikana havaittu ollenkaan. Laitteistosta saatiin kokeen aikana irti hieman vähemmän tehoa kuin edellisessä kokeessa. Vakiintuneen palamisen aikana päästiin kuitenkin yli 50 kW:n teholuokkiin.



KUVIO 22. Toisessa polttokokeessa syntynyttä tuhkaa

### **Hyötysuhde koejakson aikana**

Seoksen kokonaisenergiasisällöksi määriteltiin 268 kWh. Siiloon jäi polttokoejakson jälkeen 17,4 kiloa seosta (kuvio 23). 17,4 kiloa 10 %:n seosta sisältää energiaa 56 kWh, joten käytettyjen polttoaineiden energiasisällöksi muodostui 212 kWh. Energiamittarin mukaan kokeen aikana tuotettiin energiaa 134 kWh. Edellä mainittujen lukujen perusteella laitteiston hyötysuhteeksi kokeen aikana voidaan laskea 63 %.





KUVIO 23. Kuva varastosiiosta polttokokeen loppuvaiheessa

### Savukaasujen analysointi

Vakiintuneen palamisen jaksot olivat kokeen aikana lyhyitä, mutta huomattavasti helpommin saavutettavissa kuin 20 %:n seosta poltettaessa. Savukaasumittauksia onnistuttiin suorittamaan kaksi kertaa, klo 14.30 ja klo 15.00 (taulukko 7). Savukaasuanalyysin perusteella ensiö- ja toisioilman säädöt olivat kohdallaan, sillä jäännöshappiarvo jäi 10 %:n tienoille. Hiilimonoksidin osalta tulokset olivat vaihtelevia. Vakiintuneen palamisen aikana päästiin jopa alle 300 ppm CO-päästöihin, mutta häkäpiikkejä muodostui herkästi ja usein. Korkeimmat mittaustulokset hiilimonoksidin osalta olivat yli 4000 ppm CO. Häkäpitoisuuden noustessa korkealle tuli analyysi keskeyttää ja mittauslaitteisto huuhdella raikkaalla ilmalla. NO<sub>x</sub>-päästöt olivat molemmilla mittauskerroilla yli 300 ppm.

TAULUKKO 7. Savukaasumittauksien tulokset

Klo	O <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>
14.30	8,2 %	256 ppm	302 ppm
15.00	10 %	600 ppm	350 ppm

### 4.3 Kolmas polttokoe

Polttokoe suoritettiin sunnuntaina 23.12.2007. Koetta varten valmistettiin seosta, jossa oli energiasisällöstä 5 % helpeä (taulukko 8 ja kuvio 24). Koeksessa käytettiin autohakkurilla silputtua ruukohelpeä.

TAULUKKO 8. Kolmannen koe-erän tiedot

	<b>Ruukohelpi</b>	<b>Hake</b>
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	17,6	19,2
Kosteus saapumistilassa, %	22	42
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	13,19	10,11
Irtotiheys, kg/i-m <sup>3</sup>	51,5	248
Energiatiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,2	0,7
Erän koko, i-m <sup>3</sup>	0,078	0,395
Erän koko, kg	4,02	97,9
Energiamäärä, kWh	14,73	275,21
Koko erän energiamäärä, kWh		289,94
Osuus energiasisällöstä, %	5,08	94,92



KUVIO 24. 5 %:n seos

### Polttokokeen eteneminen

Koe aloitettiin polttamalla ensiksi hieman haketta, jotta laitteisto saataisiin lämpenemään nopeammin. Ruukohelpi-hakeseoksen polttaminen aloitettiin loki-tietojen (liite 1) mukaan klo 10.30. Palaminen lähti hyvin käyntiin, polttoaineseos vaikutti olevan tasaista ja liikkui hyvin syöttöjärjestelmässä. Käytetty ruukohelpisilppu oli lyhyempää ja tasalaatuisempaa kuin edellisissä kokeissa poltettu silppu. Silpun pituuden vaikutus polttoaineseoksen käyttäytymiseen ja liikkuvuuteen oli havaintojen perusteella kuitenkin vähäistä.

5 %:n seosta poltettaessa säätöjen löytäminen oli kohtuullisen helppoa, sillä säätämässä voitiin hyödyntää edellisistä kokeista saatuja kokemuksia. Täysin ilman ongelmia ei polttokoe kuitenkaan edennyt, sillä tauot polttoainevirrassa aiheuttivat paikoitellen liekin hiipumista. Siilon lautaskuljettimien haukattaessa tyhjää ruuville syntyi herkästi tyhjiä kohtia, jolloin polttoaineseosta täytyi käydä käsin sekoittamassa. Seos siis selvästi holvaantui ajoittain. Käytetylle seokselle sopivin pulssin pituus oli kokeen perusteella 8 sekuntia ja tauko 4 sekuntia. Ensiöilma-aukkojen ollessa 2/3–3/4 auki ja toisioilma-aukkojen ollessa 3/4 auki palaminen eteni kokeen perusteella parhaiten (kuvio 25).



KUVIO 25. Kolmannessa polttokokeessa hyväksi havaitut ensiö- ja toisioilman säädöt

### **Syntyneen tuhkan määrä**

Tuhkaa syntyi kokeen aikana 1,46 kiloa (kuvio 27). Tuhkan joukossa oli jonkin verran palamatonta sekä vaillinaisesti palanutta puuainesta. Tästä voidaan päätellä, että kokeen aikana ei löydetty ihanteellisia säätöjä polttoaineen syötön suhteen. Laavaantumista ei kokeen aikana havaittu. Kokeessa käytetyn hakkeen kosteusprosentti oli melko korkea, vakiintuneen palamisen aikana päästiin kuitenkin lähes 60 kW:n teholumemiin.



KUVIO 26. Kolmannessa polttokokeessa syntynyttä tuhkaa

### **Hyötysuhde koejakson aikana**

Seoksen kokonaisenergiasisällöksi määriteltiin 290 kWh. Siiloon jäi polttokoejakson jälkeen 14 kiloa seosta (kuvio 27). 14 kiloa 5 %:n seosta sisältää energiaa 39,8 kWh, joten käytettyjen polttoaineiden energiasaannoksi muodostui 250 kWh. Energiamittarin mukaan kokeen aikana tuotettiin energiaa 159 kWh. Edellä mainittujen lukujen perusteella laitteiston hyötysuhteeksi kokeen aikana voidaan laskea 63,6 %.



KUVIO 27. Kuva varastosilosta polttokokeen loppuvaiheessa

### Savukaasujen analysointi

Savukaasujen koostumusta mitattiin kahteen eri otteeseen, klo 12.15 ja klo 12.35. Mittausjaksojen pituus oli noin viisi minuuttia. Mittausdataa tallennettiin kannettavalle tietokoneelle 30 sekunnin välein mittausjakson aikana. Taulukosta 9 voidaan todeta, että häkäpitoisuudet olivat seoksella mittaustulosten mukaan melko korkeat, vaihdellen kuitenkin huomattavasti. NO<sub>x</sub>-päästöt olivat keskimäärin luokkaa 250 ppm ja savukaasujen lämpötila 198 °C.

TAULUKKO 9. Savukaasumittauksien tulokset

	O <sub>2</sub> %	CO ppm	NO <sub>x</sub> ppm	Savukaasujen lämpötila
<b>Pienin arvo</b>	3,4	424	109	156
<b>Suurin arvo</b>	11,4	1640	318	223
<b>Keskiarvo</b>	7,5	788	250	198

## 5 POLTTOKOKEET 200 KW:N LAITTEISTOLLA

### 5.1 Ensimmäinen polttokoe

Ensimmäinen polttokoe 200 kW:n laitteistolla aloitettiin perjantaina 28.12.2007. Laitteisto oli nuohottu sekä palopää puhdistettu ennen koetta. Kokeessa käytettiin autohakkurilla silputtua ruokohelpeä sekä kokopuuhaketta. Koetta varten siilon pohjalle kipattiin aluksi noin 6 m<sup>3</sup> haketta. Hakkeen päälle kipattiin 5 m<sup>3</sup> eli viisi pienkuormaajan kauhallista helpeä, jonka päälle kipattiin loput 6 m<sup>3</sup> haketta. Polttoainejakeet olivat siilossa kerroksittain, erillisistä sekoittamista ei suoritettu (kuvio 28). Polttoseos sisälsi laskelmien mukaan energiasisällöstä noin 10 % ruokohelpeä (taulukko 10). Kyseiseen seossuhteeseen päädyttiin 60 kW:n laitteistoilla saavutettujen polttokoekokemusten perusteella.

TAULUKKO 10. Ensimmäisen koe-erän tiedot

	<b>Ruokohelpi</b>	<b>Hake</b>
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	17,6	19,2
Kosteus saapumistilassa, %	19,4	45,7
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	13,71	9,31
Irtotiheys, kg/i-m <sup>3</sup>	57,60	323
Energiatiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,2	0,84
Erän koko, i-m <sup>3</sup>	5	12,42
Erän koko, kg	288	4013
Energiamäärä, kWh	1096	10378
Koko erän energiamäärä, kWh	11457	
Osuus energiasisällöstä, %	9,56	90,4





KUVIO 28. Kuvasarja ruokohelven ja hakkeen kippaamisesta siiloon

Polttokokeen aluksi palopäälle tuli luonnollisesti lähes yksinomaan haketta, sillä sitä oli kipattu siiloon alimmaiseksi. Loki-tietojen (liite 2) mukaan klo 12.00–13.00 hakkeen joukkoon oli jo sekoittunut hieman helpisilppua. Silpun mukaan sekoittuminen ei aiheuttanut häiriötä tai ongelmia, palo jatkui tasaisena. Laitteisto oli koejakson aikana autosäädöllä eli käytetty tehoalue vaihtui automaattisesti verkoston kulloisenkin lämmöntarpeen mukaan.

Laitteistoa ei kokeen aikana liemmin säädetty tai asetuksia muutettu, vaan pitäydettiin hakkeelle määritellyissä asetuksissa (kuvio 29). Asetukset vaikuttivat soveltuvan melko hyvin kyseiselle seokselle, sillä esimerkiksi jäännöshap-piarvo ei pääsääntöisesti noussut kokeen aikana liian korkeaksi. Runsaan helpimäärän kulkeutuminen palopäälle teki palamisesta ajoittain epävakaista, mutta tilanne rauhoittui seossuhteen muuttuessa. Laitteiston säätäminen koettiin hyödyttömäksi vaihtelevan polttoainekoostumuksen vuoksi. Kokeen loppuvaiheessa, kun helpeä oli poltossa runsaasti, polttoainesyöttöä lisättiin hetkel-lisesti pulssia pidentämällä ja taukoa lyhentämällä.

The screenshot shows the 'TiiMi 5304' control software interface. The window title is 'TiiMi 5304' and the menu bar includes 'Tiedosto', 'Tiedonsiirto', and 'Tietoja'. The toolbar contains icons for file operations and a 'RT' button. The main area is divided into several sections:

- Stokeri/Kattila & Autosäätö:**
  - Käytettävät asetukset: { 3,8 }
  - Kattilan asetus: 100,0°C
  - Hystereesi: 5,0°C
  - Kattilan hälytysraja: 112,5°C
  - Autosäätö käytössä: ON
  - Autosäädön P-alue: 3,0°C
  - Autosäädön I-aika: 10 min
- U2:**
  - Käytössä: ON
  - Asetus: 7,0%
  - P-alue: 5,2%
  - I-Aika: 20 s
  - Y3-Muutos: 49,8%
  - Y3-Maksimi: 100,0%
  - Y3-Minimi: 11,0%
  - Hälytysraja: 1,0%
  - 0-25,5%
- Tehokäynti:**
  - 1.0 - Pulssi: 0,8 s
  - 1.0 - Tauko: 25,0 s
  - 1.0 - Y2: 11,8%
  - 1.0 - Y3: 28,6%
  - 2.0 - Pulssi: 3,0 s
  - 2.0 - Tauko: 15,0 s
  - 2.0 - Y2: 40,0%
  - 2.0 - Y3: 51,8%
  - 3.0 - Pulssi: 4,0 s
  - 3.0 - Tauko: 10,0 s
  - 3.0 - Y2: 65,1%
  - 3.0 - Y3: 76,1%
  - 4.0 - Pulssi: 7,0 s
  - 4.0 - Tauko: 6,5 s
  - 4.0 - Y2: 90,2%
  - 4.0 - Y3: 85,1%
- Ylläpito:**
  - Pulssi: 1,3 s
  - Tauko: 260 s
  - Y2: 20,0%
  - Y3: 20,0%
  - Y-Pulssitus: ON
  - Puhaltimet: ON
- Muut:**
  - Suppilon täyttöväli: 30 s
  - Suppilon täyttöaika: 30 s
  - T-Purkaimien käynti: 30 s
  - Tuhkaruuvien pulssi: 1200 s
  - Tuhkaruuvien tauko: 1440 min
  - Tyrkinnän tauko: 300 s
  - Ajo takapalossa: 60 s
  - Alipaineen hälytysraja: 0,0%
  - Suppilon täynnäoloaika: 30 s
  - Varastoruuvien pyöräytys: 5 s

At the bottom, there is a status bar with the text 'JAMK / LUVA / Lämpökontti / TiiMi 5304 / USER' and the time '18:30:22 30.12.2007'. Below the status bar is a navigation bar with tabs: 'Lämmitys', 'Stokeri+Kattila', 'Sto. asetukset' (selected), 'Hälytykset', 'Asetukset', 'Kaukokäyttö', and 'Kohdetiedot'. At the very bottom, there is a 'Tila:' section with values: '00:09:36', '18:31', and '30.12.2007'.

KUVIO 29. Stokerin ja kattilan asetukset



### 5.1.1 Seoksen käyttäytyminen syöttöjärjestelmässä ja palopäällä

Poltossa ollut seos vaihteli koostumukseltaan koejakson aikana, sillä helppisilppu ei sekoittunut tasaisesti pääpolttoaineeseen, vaan pyrki jäämään pinnalle. Lajittuminen sekä holvaantuminen (kuvio 30) aiheuttivat ongelmia ja polttoaineseosta joutuikin sekoittelemaan käsin useita kertoja koejakson edetessä.



KUVIO 30. Polttoaineseoksen holvaantumista ja lajittumista varastosiihossa

Syöttölaitteistossa eli varastoruuvilla, syöttösuppilossa sekä syöttöruuvilla, polttoaineseos käyttäytyi moitteettomasti. Edes runsaasti helpeä sisältänyt seos ei takellellut syöttölaitteissa vaan kulkeutui palopäälle varsin mallikkaasti. Syöttösuppilo tasasi hyvin polttoainevirtaa, jolloin syöttöruuville ei päässyt muodostumaan tyhjiä kohtia. Suppilon täyttöautomaatti toimi seosta poltettaessa hyvin, eivätkä polttoainejakeet esimerkiksi tukkineet pintavahtina toimivaa valosilmää. Kuvioiden 31, 32 ja 33 perusteella voidaan havaita polttoaineseoksen vaihtelu hakevaltaisesta helpivaltaiseen koejakson edetessä.



KUVIO 31. Hakevaltaista seosta suppiloon 28.12. klo 13.44



KUVIO 32. Helpivaltaista seosta suppiloon 29.12. klo 13.44



KUVIO 33. Tasaista seosta suppiloon 30.12. klo 15.20

Seoksen koostumuksen vaihtelu teki palamisesta aika ajoin epävakaa, mutta pääosin palaminen eteni rauhallisesta. Takapalon vaaraa ei esimerkiksi syntynyt missään vaiheessa. Toisinaan poltossa oli lähes pelkästään helpeä, toisinaan taas enemmän haketta. Palopäällä runsas helpimäärä aiheutti tehojen sekä kattilalämmön alenemista. Tilanne kuitenkin tasoittui, kun haketta tuli mukaan polttoon.

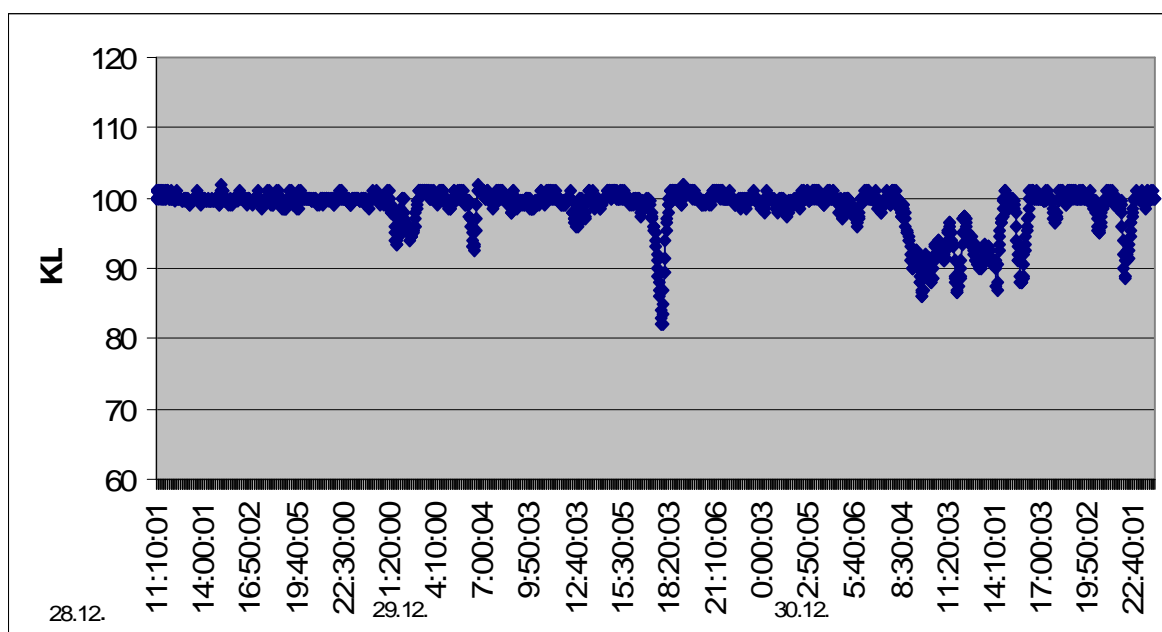
Runsaasti ruokohelpeä sisältänyt seos kipunoi palaessaan voimakkaasti, samoin kevyttä tuhkaa vaikutti syntyvän melko runsaasti (kuvio 34). Tuhka saattaisi pidemmän päälle aiheuttaa ongelmia, sillä se ei liikkunut toivotulla tavalla palopäältä tuhkatilaan vaan pyrki jämähtämään palopaikalle.



KUVIO 34. Palaminen käynnissä

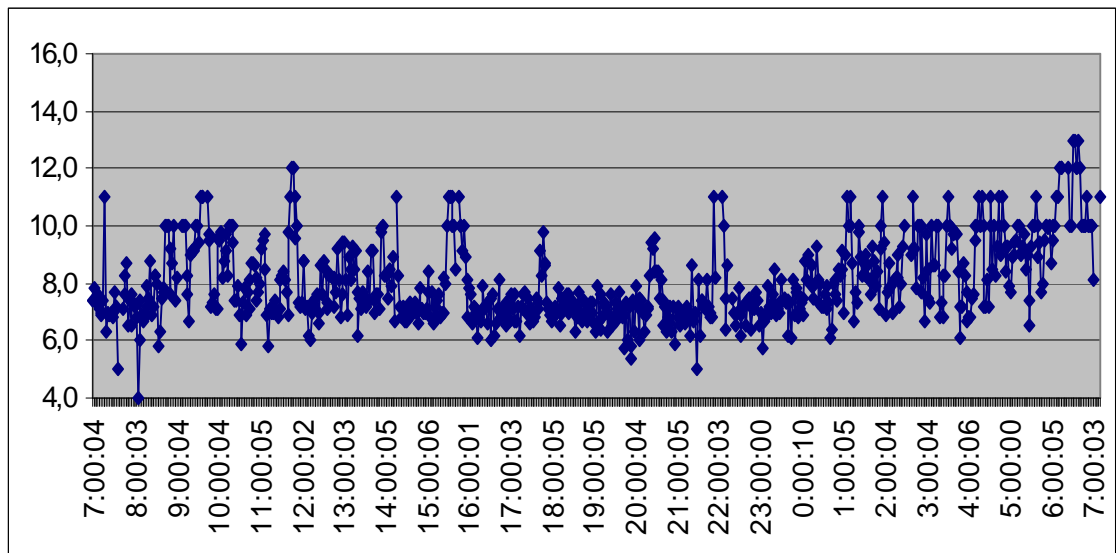
### 5.1.2 Tulokset

Kuvion 35 perusteella voidaan todeta, että kun helpeä oli poltossa runsaasti, tapahtui kattilalämmössä notkahduksia. Koejakson loppupuolella polttoaineseos oli helpivaltaista ja tämä näkyy selvästi kattilalämmön alenemisena. Kattilalämmön tavoiteasetuksena oli 100 °C. Loki-tiedoista (liite 2) voidaan todeta ne ajankohdat, jolloin poltossa ollut seos sisälsi paljon helpeä.



KUVIO 35. Muutokset kattilalämmössä koejakson aikana

Kuviossa 36 on esitelty muutokset jäännöshappiarvossa 30.12. klo 7.00–31.12. klo 7.00 välisenä aikana. Kuviosta voidaan päätellä, että poltettaessa ruokohelpeä jäännöshappiarvo kohoaa, kun vastaavasti kattilalämpö alenee. Jäännöshappiarvon laskettu asetus oli kokeen aikana 7,0, mutta etenkin kokeen loppuvaiheessa arvo kohosi asetusarvosta.



KUVIO 36. Muutokset jäännöshappiarvossa 30.12. klo 7.00–31.12. klo 7.00 välisenä aikana

### Syntyneen tuhkan määrä ja laitteiston nokeentuminen

Kokeen aikana syntyi noin 40 kiloa tuhkaa (kuvio 37). Tuhkan joukossa ei ollut juurikaan palamatonta materiaalia, tuhkan väri ja koostumus oli hyvä. Helven tuhkan havaittiin olevan hyvin kevyttä ja lentävää, osittain jopa tomumaista.





KUVIO 37. Polttokokeessa syntynyttä tuhkaa

Laitteisto ajettiin alas ja nuohottiin kokeen jälkeen. Silmävaraisesti arvioituna konvektiopinnat olivat koejakson päätyttyä suhteellisen puhtaat. Pintojen alaosiin oli tosin kertynyt ruokohelvestä syntynyttä hyvin hienojakoista ja kevyttä tuhkaa sekä palaneiden korsien "luurankoja" (kuvio 38). Ulkona puhtaalla hängellä voitiin havaita piipusta lentäneitä tuhkapartikkeleja.



KUVIO 38. Konvektiopinnat kokeen jälkeen

Laavaantumista esiintyi kokeen aikana, mutta on vaikea sanoa millainen vaikutus helvellä oli asiassa. Aikaisempien laitteiston käyttökokemusten perusteella voitaneen sanoa, että laavaantuminen koejakson aikana ei ollut ainaakaan voimakkaampaa kuin pelkkää haketta poltettaessa. Helven poltosta syntynyt laavaa oli rakenteeltaan kovaa, kimpaleet olivat kooltaan pieniä (kuvio 39).



KUVIO 39. Kuva laavakimpaleesta

### **Hyötysuhde koejakson aikana**

Kattila oli tulilla yhteensä noin 75 h eli yli kolme vuorokautta. Vakiintuneen palamisen aika jäi kuitenkin tätä lyhyemmäksi, sillä laitteiston käynnistämiseen ja etenkin alasajoon kului runsaasti aikaa. Kokeen aikana tuotettiin energiamittarin mukaan energiaa 10,17 MWh. Polttoaineiden energiasisällöksi määritettiin 11,46 MWh. Kokonaishyötysuhde koejakson aikana oli siis 88,7 %. Hyötysuhteen voidaan todeta olevan hyvä.

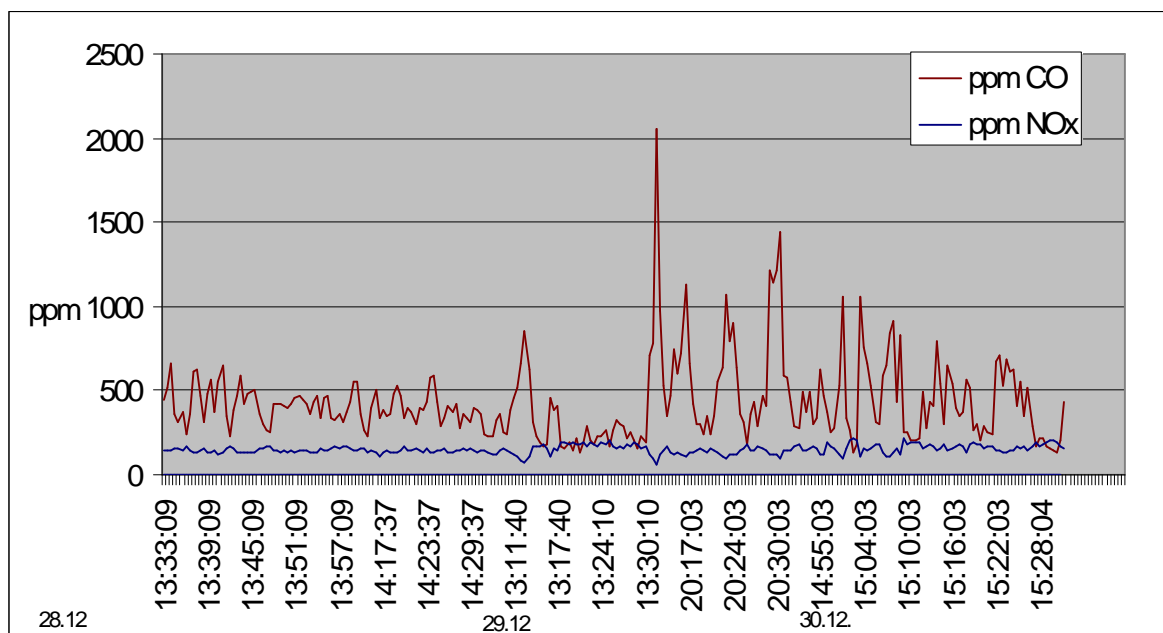
### **5.1.3 Savukaasujen analysointi**

Savukaasumittauksia tehtiin viisi kertaa koejakson kuluessa, kestoaltaan mittausjaksot olivat 15–30 minuuttia. Mittausdataa tallennettiin kannettavalle tietokoneelle 30 sekunnin välein mittausjakson aikana. Taulukosta 11 voidaan todeta keskimääräiset mittaustulokset.

TAULUKKO 11. Savukaasumittausten tulokset

	O <sub>2</sub> %	CO ppm	NO <sub>x</sub> ppm	Palamis-hyötysuhde	Savukaasujen lämpötila °C
<b>Keskiarvo</b>	9,7	431	150	90	161

Kuviossa 40 on esitelty CO-pitoisuuksien sekä NO<sub>x</sub>-pitoisuuksien muutokset mittausjakson aikana. Häkäpitoisuudet kohosivat polttokokeen edetessä polttoaineseoksen koostumuksen muuttuessa helpivaltaisemmaksi. Myös häkäpiikkejä muodostui selvästi herkemmin kokeen loppupuolella.

KUVIO 40. CO- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuudet mittausjaksojen aikana



## 5.2 Toinen polttokoe

Polttokokeita jatkettiin 200 kW:n laitteistolla, tarkoituksena tutkia, miten ruokohelpsilppua voitaisiin syöttää suoraan suppiloon sivusyöttölaitteen kautta (kuvat 41, 42 ja 43). Oletuksena oli, että sivusyöttölaitteen avulla polttoaineen seossuhde saataisiin pysymään tasaisempuna, jolloin palaminenkin saataisiin paremmin vakiintumaan. Vakiintuneen palamisen aikana laitteistoa voitaisiin säätää ja löytää toimivat asetukset ruokohelppi-hakeseoksen polttamiselle.



KUVIO 41. Kuva sivusyöttölaitteen rakennusvaiheesta (Vilkkilä 2008)

### Sivusyöttölaitteen tekniset tiedot

- Valmistaja: Hannu Vilkkilä
- Varastosiihon mitat: pituus sisältä 2000 mm, leveys 1260 mm ja korkeus 1680 mm.
- Siilon tilavuus: 4,2 m<sup>3</sup>
- Siilon pohjan viistoseinän kulma noin 45°, joka vie laatikon tilavuudesta 1,3 m<sup>3</sup>.
- Polttoainetilan hyötytilavuus 2,9 m<sup>3</sup>
- Siirtoruuvien kokonaispituus 5950 mm
- Putken täyttöaukon koko 2000 mm x 140 mm
- Putken halkaisijan ulkomitta 169 mm ja sisämitta 159 mm
- Lehtiakselin halkaisija 76 mm ja vetorattaan keskireiän halkaisija 50 mm. (Vilkkilä 2008.)



KUVIO 42. Sivusyöttölaitteen sijoittuminen (Vilkkilä 2008)



KUVIO 43. Sivusyöttölaitteen syöttöruuvi kytkettynä syöttösuppilon

### **Sivusyöttölaitteen koekäyttö**

Polttokokeen valmistelu aloitettiin maanantaina 20.1.2008. Sivusyöttölaitteen siiloon ladattiin 2,79 i-m<sup>3</sup> autohakkurilla hakettua ruokohelpeä (kuvio 44). Lämpökontin siilossa oli valmiina haketta, sillä laitteisto oli tulilla. Sivusyöttölaitteen toimintaa testattiin kolmen tunnin ajan. Samalla seurattiin polttoaineseoksen käyttäytymistä suppilossa, syöttöruuvilla sekä palopäällä.



KUVIO 44. Helpeä sivusyöttölaitteen siilossa

Laitteisto pakotettiin käyttämään koekäytön aikana tehokäynnin asetusta kolme. Näin laitteiston säätäminen olisi tarpeen vaatiessa helpompaa. Sivusyöttölaitteen ruuvi oli automatisoitu siten, että varastoruuvien käydessä myös sivusyöttölaitteen ruuvi kävisi ja kuljettaisi tavaraa eteenpäin. Koekäytön aikana havaittiin, että ruokohelppi ei kulkeutunut tasaisesti, vaan toisinaan sivusyöttölaitteen ruuvi pullautti ison kasan helpeä suppiloon. Syöttöruuvi möyhensi kuitenkin melko tehokkaasti helven hakkeen joukkoon, eikä suurempia ongelmia havaittu. Välillä helpeä tuli ruuvilta suppiloon vain vähän, jolloin seos koostui pääosin hakkeesta. Sivusyöttölaitteen koekäyttö onnistui hyvin ja helppi vaikutti kulkeutuvan siilosta suppiloon siedettävästi. Laitteiston säätämistä ei koettu tarpeelliseksi, sillä palaminen eteni hyvin hakkeen asetuksilla.

### 5.2.1 Varsinainen polttokoe

Varsinainen polttokoe sivusyöttölaitetta hyödyntäen suoritettiin tiistaina 22.1.2008. Taulukosta 12 voidaan todeta kokeessa poltettujen polttoaineiden tiedot.

TAULUKKO 12. Toisen koe-erän tiedot

	Ruukohelpi	Hake
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	17,6	19,2
Kosteus saapumistilassa, %	19	45,5
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	13,8	9,4
Irtotiheys, kg/i-m <sup>3</sup>	57,6	379,7
Energiatiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,2	0,99
Erän koko, i-m <sup>3</sup>	0,2	0,39
Erän koko, kg	11,5	146,9
Energiamäärä, kWh	44,1	381,6
Koko erän energiamäärä, kWh	425,9	
Osuus energiasisällöstä, %	10,4	89,7

Laitteisto pakotettiin käyttämään polttokokeen aikana tehokäynnin asetusta kolme. Kuviosta 45 voidaan todeta stokerin ja kattilan asetukset tehokäynnin alueella kolme. Kattila oli jo valmiiksi tulilla, joten koe aloitettiin tekemällä savukaasumittauksia pelkällä hakkeella vertailuarvojen saamiseksi.

**TiMi 5304**

Tiedosto Tiedonsiirto Tietoja

SMS Komennot Muistio Muutos historia

**Stokeri/Kattila & Autosäätö**

Käytettävät asetukset **3.0**  
Kattilan asetukset **100.0°C**

Hystereesi **5.0°C**  
Kattilan hälytysraja **112.5°C**  
Autosäätö käytössä **EI**  
Autosäädön P-alue **3.0°C**  
Autosäädön I-aika **10 min**

**U2**

Käytössä **ON**  
Asetus **7.0%**  
P-alue **5.2%**  
I-Aika **20 s**  
Y3-Muutos **49.8%**  
Y3-Maksimi **100.0%**  
Y3-Minimi **11.0%**  
Hälytysraja **1.0%**  
0-25.5% **ON**

**Tehokäynti**

1.0 - Pulssi **0.7 s**  
1.0 - Tauko **25.0 s**  
1.0 - Y2 **11.8%**  
1.0 - Y3 **28.6%**  
2.0 - Pulssi **3.0 s**  
2.0 - Tauko **15.0 s**  
2.0 - Y2 **40.0%**  
2.0 - Y3 **51.8%**  
3.0 - Pulssi **4.0 s**  
3.0 - Tauko **10.0 s**  
3.0 - Y2 **65.1%**  
3.0 - Y3 **76.1%**  
4.0 - Pulssi **7.0 s**  
4.0 - Tauko **6.5 s**  
4.0 - Y2 **90.2%**  
4.0 - Y3 **85.1%**

**Ylläpito**

Pulssi **1.3 s**  
Tauko **260 s**  
Y2 **20.0%**  
Y3 **20.0%**  
Y-Pulssitus **ON**  
Puhaltimet **ON**

**Muut**

Suppilon täyttöväli **30 s**  
Suppilon täyttöaika **30 s**  
T-Purkaimien käynti **30 s**  
Tuhkaruuvien pulssi **1200 s**  
Tuhkaruuvien tauko **1440 min**  
Tyrkinnän tauko **300 s**  
Ajo takapalossa **60 s**  
Alipaineen hälytysraja **0.0%**  
Suppilon täynnäoloaika **30 s**  
Varastoruuvien pyöräytys **5 s**

JAMK / LUJVA / Lämpökontti / TiMi 5304 / USER 9:21:05 22.1.2008

Lämmitys Stokeri+Kattila **Sto. asetukset** Hälytykset Asetukset Kaukokäyttö Kohdetiedot

Tila 9:42 22.1.2008

KUVIO 45. Kattilan ja stokerin asetukset

### 5.2.2 Seoksen käyttäytyminen syöttöjärjestelmässä ja palopäällä

Sivusyöttölaite kytkettiin päälle klo 11.00. Ongelmia ilmeni välittömästi, sillä ruokohelpi ei tuntunut kulkeutuvan siilosta suppiloon. Sivusyöttölaitteen ruuvia pyöritettiin käsikäytöllä pitkiä aikoja, mutta tuloksetta. Helpisilppu oli holvaantunut pahoin siiloon, jolloin ruuvi pyöri tyhjä. Siilon nurkkaan kaivettiin reikä, jotta päästäisiin tarkastelemaan ruuvien liikkeitä. Helpisilppun havaittiin olevan siilossa tiiviinä mattona, joka ei alkuunkaan vörynyt ruuville (kuvio 46).



KUVIO 46. Helpeä holvaantuneena siilossa

Helpeä sekoitettiin ja syötettiin käsin ruuville. Klo 13.20 helpeä tuli viimein suppiloon ja varsinainen polttokoejakso voitiin aloittaa. Seoksen polttaminen eteni ailahtelevasti, sillä helpeä tuli suppiloon vaihtelevia määriä. Hetkittäin helpeä tuli ruuvilta isoja tukkoja, jolloin polttoon meni välillä lähes pelkkää helpeä sisältänyttä seosta (kuvio 47). Helvestä muodostui palopäälle hehkuvia pesäkkeitä, kipunointi oli myös voimakasta. Ajoittain helven tulo suppiloon lakasi, jolloin siilossa piti käydä tökkimässä silppua ruuville.

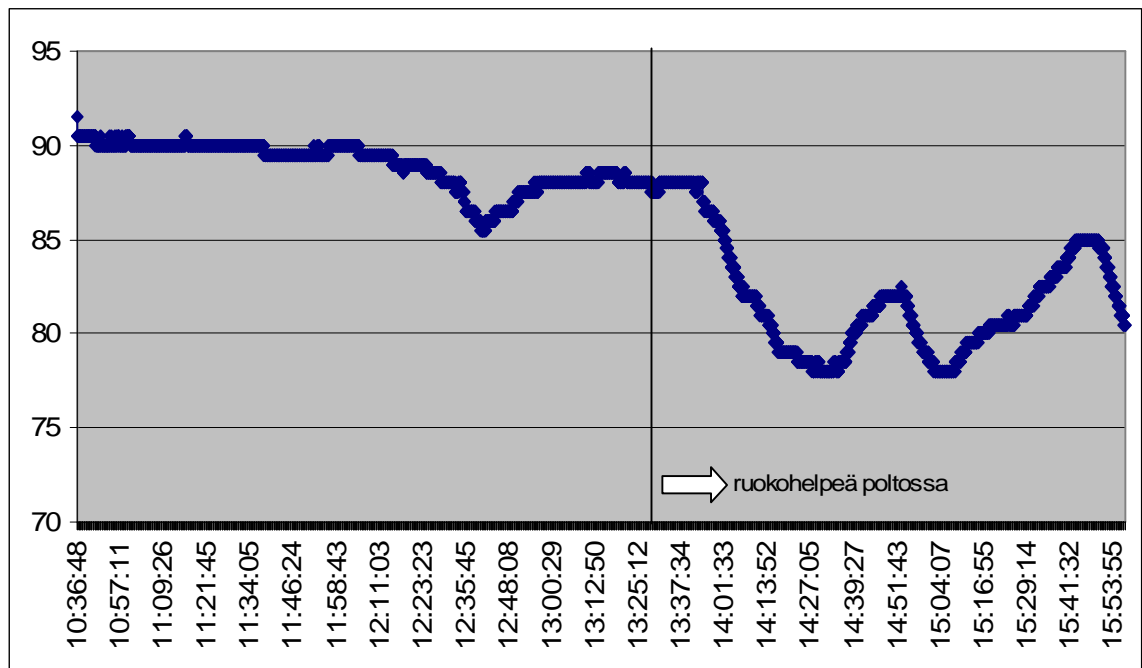


KUVIO 47. Tiivis tukko helpeä ruuvilta suppiloon

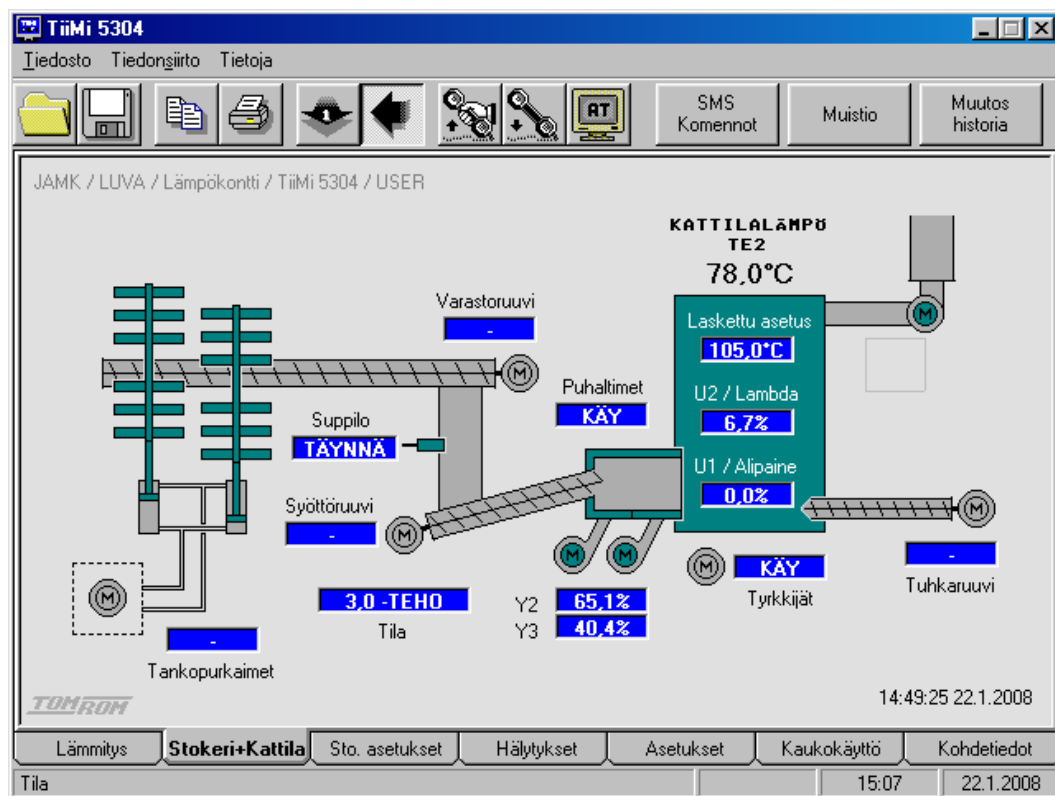
Polttokoe lopetettiin klo 16.00, sillä helpisilpun tulo suppiloon oli lakannut ja kokeen jatkaminen todettiin hyödyttömäksi.

### 5.2.3 Tulokset

Kuvion 48 perusteella voidaan todeta, että kattilalämpö laski myös toisessa 200 kW:n laitteistolla tehdyssä kokeessa, kun ruokohelpeä ilmaantui palopäälle. Helpeä tuli ensimmäisen kerran syöttösuppiloon klo 13.20. Kuvion 49 mukaan klo 15.07 kattilalämpö oli laskenut jo 78 asteeseen, kun pelkkää haketta poltettaessa kattilalämpö pysytteli kolmostehoalueella 90 asteen tienoilla. Loki-tietojen (liite 2) perusteella voidaan todeta, että ruokohelpeä tuli polttoon hyvin vaihtelevasti koejakson aikana. Kun helpeä oli loki-tietojen mukaan poltossa runsaasti, näkyi tämä kattilalämmön alenemisena. Hakkeen lisääntymisen poltossa sai taas puolestaan kattilalämmön jälleen nousuun.



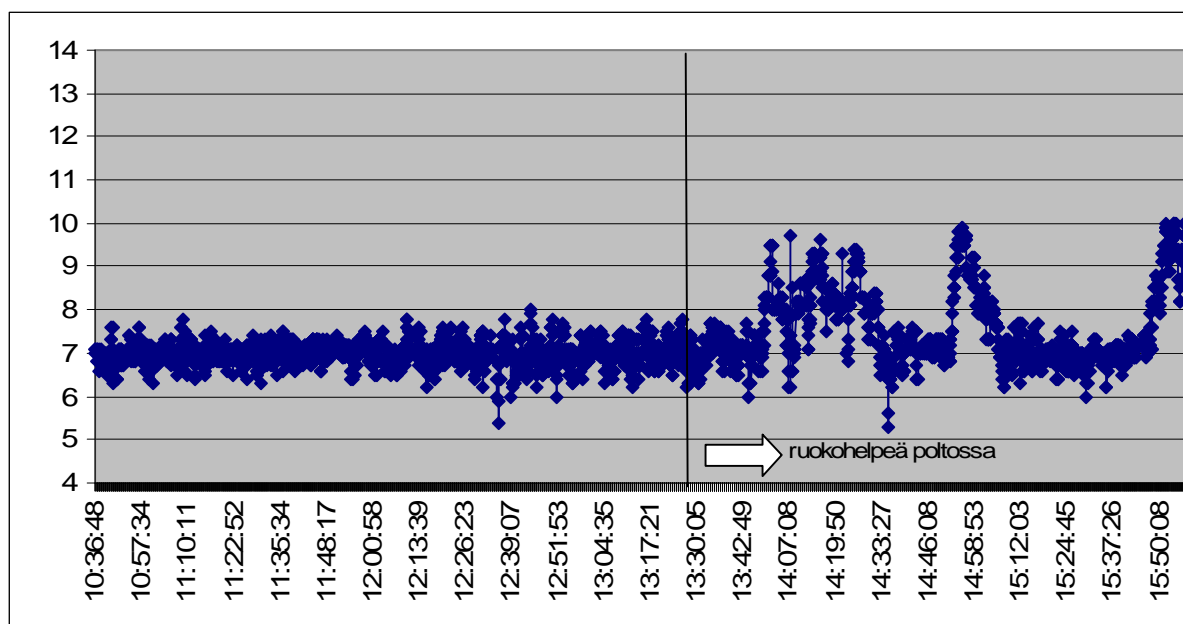
KUVIO 48. Muutokset kattilalämmössä koejakson aikana



KUVIO 49. Kattilalämpö klo 15.07



Kuviossa 50 toistuu aikaisemminkin todettu ilmiö eli jäännöshappiarvon nouseminen asetusravosta 7,0, silloin kun poltossa on runsaasti helpeä.



KUVIO 50. Muutokset jäännöshappiarvossa koejakson aikana

### Syntyneen tuhkan määrä ja laitteiston nokeentuminen

Laitteistoa ei nuohottu koejakson jälkeen eikä syntyneen tuhkan määrää punnittu. Tuhkan koostumus oli silmämääräisen arvioinnin perusteella kohtuullinen. Joukossa oli hieman palamatonta materiaalia, lähinnä puuainesta.

### Hyötysuhde koejakson aikana

Poltetun seoksen kokonaisenergiasisällöksi määriteltiin 402,22 kWh. Energiamittarin mukaan kokeen aikana (noin klo 13.18–16.00) tuotettiin energiaa 362 kWh. Edellä mainittujen lukujen perusteella laitteiston hyötysuhteeksi koejakson aikana voidaan laskea 85 %.



### 5.2.4 Savukaasujen analysointi

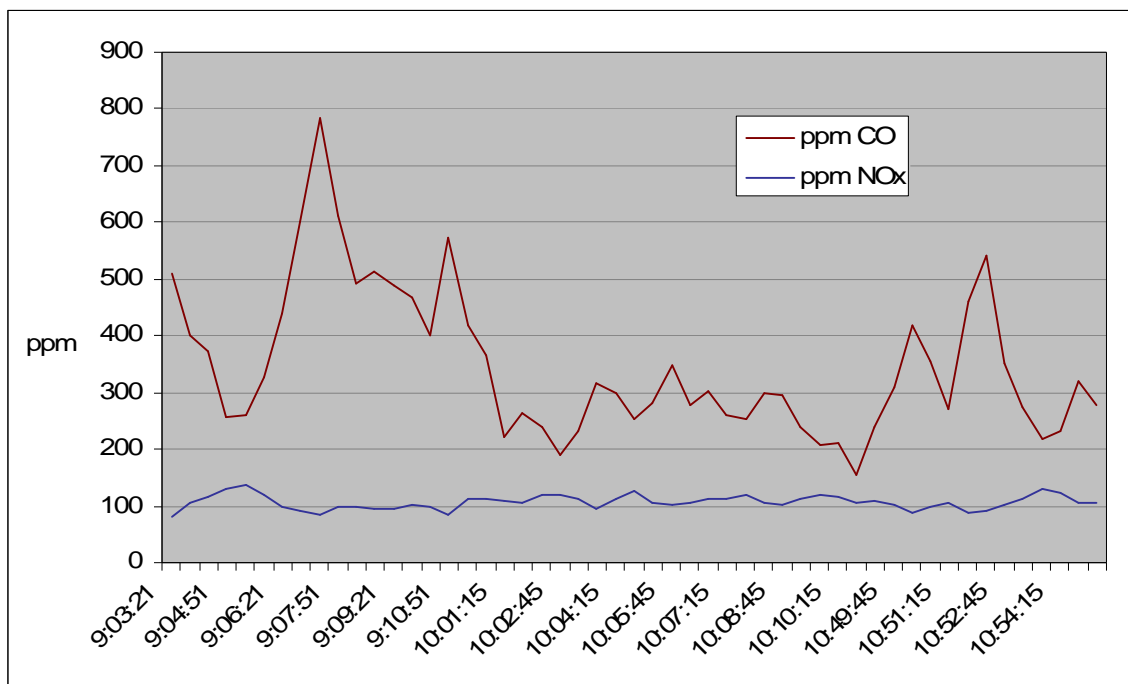
Pelkkää haketta poltettaessa savukaasumittauksia tehtiin tunnin välein, yhteensä mittauskertoja kertyi kolme. Kestoltaan mittausjaksot olivat noin viisi minuuttia. Helpi-hakeseosta poltettaessa savukaasumittauksia suoritettiin koejakson aikana puolen tunnin välein. Kestoltaan mittausjaksot olivat myös noin viisi minuuttia. Mittausdataa tallennettiin kaikissa mittauksissa kannettavalle tietokoneelle 30 sekunnin välein mittausjakson kuluessa.

Taulukossa 13 ovat esiteltynä hakkeen sekä helpi-hakeseoksen keskimääräiset mittautulokset. Taulukosta voidaan havaita, että jäännöshappiarvo oli sekä hakkeella että seoksella keskimäärin sama. Häkäpitoisuuksissa sekä NO<sub>x</sub>-pitoisuuksissa eroavaisuuksia sen sijaan löytyy, etenkin CO-pitoisuus oli seoksella korkeampi. Savukaasujen lämpötila oli alhaisempi helpi-hakeseosta poltettaessa. Tästä johtuen palamishyötysuhde oli mittautulosten mukaan seoksella hieman parempi.

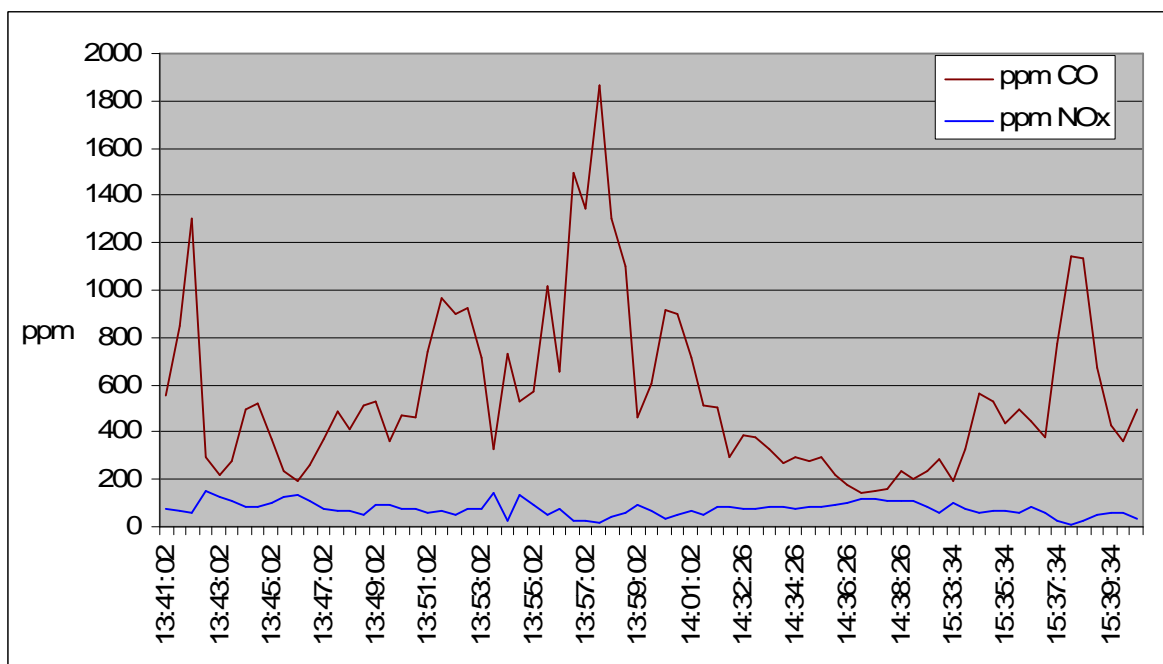
TAULUKKO 13. Savukaasumittausten tulokset

	O <sub>2</sub> %	CO ppm	NO <sub>x</sub> ppm	Palamis-hyötysuhde	Savukaasujen lämpötila
<b>Hake</b>	9,9	347	107	89	161
<b>Seos</b>	9,9	600	76	91	130

Kuviossa 51 on esiteltynä hakkeen polton aikana tapahtuneet muutokset CO- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuuksissa. Kuvioista 52 voidaan todeta samat tiedot helpi-hakeseosta poltettaessa. Kuvaajien perusteella seosta poltettaessa CO-pitoisuus vaihteli huomattavasti koejakson aikana, myös häkäpiikkejä syntyi seoksella herkemmin. Korkeimmat mittautulokset hiilimonoksidin osalta olivat seosta poltettaessa yli 1000 ppm, hakkeella alle 800 ppm.



KUVIO 51. Hakkeen CO- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuudet mittausjaksojen aikana



KUVIO 52. Helpi-hakeseoksen CO- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuudet mittausjaksojen aikana

## 6 PÄÄTELMÄT

### 6.1 Kokeet 60 kW:n laitteistolla

Polttokokeiden edetessä havaittiin, että pienen mittakaavan käytössä kevyt ja kuiva ruokohelpi aiheuttaa ongelmia etenkin syöttöjärjestelmässä. Polttoaineen epätasainen syöttö palopäälle vaikeuttaa laitteiston säätämistä ja vakiintuneen palamistilan saavuttamista. 60 kW:n koelaitteiston polttoainevarastona toimiva Arimaxin siilo ja sen pohjan lautaskuljettimet eivät pystyneet käsittelemään silputtua ruokohelpeä toivotulla tavalla ja etenkin polttoaineen huvetessa pohjakuljettimien oli vaikea saada otetta seoksesta. Puhdas ruokohelpisilppu ei kokeen perusteella soveltunut laisinkaan kyseisellä laitteistolla poltettavaksi.

Siiloon mahtuu kerrallaan melko vähän polttoainetta, jolloin polttoaineen oma paino ei paina seosta ruuville. Suora syöttö varastosiihosta palopäälle ei ollut toimiva ratkaisu polton kannalta, sillä polttoainevirrassa tapahtui väistämättä katkoksia syöttöruuvin pyörähtäessä tyhjää. Helpivaltaista seosta poltettaessa syötön joutui säätämään isolle, jolloin ruuvi pyöri ajoittain lähes tauotta. Kun helpeä tuli palopäälle, syttyi se nopeasti ja paloi jo palopään takaosassa. Riskinä voi siis olla takapalo tilanteessa, jossa helpeä tulee ruuvilta palopäälle runsaita määriä.

Kahdessa ensimmäisessä kokeessa käytetty helpi ei ollut silpun pituuden kannalta täysin tasalaatuista, vaan joukossa oli myös pidempiä korsia. Kolmannessa kokeessa käytetty lyhyempi silppu vaikutti toimivan parhaiten syöttöjärjestelmässä, vaikka suuria eroja polttoaineseosten liikkuvuudessa ei tullut esille. Helven kiertymistä ruuvin tai pohjakuljettimien ympärille ei koejaksojen aikana juurikaan havaittu. Polttoaineseoksen holvaantuminen siilon nurkkiin aiheutti sen sijaan suuria ongelmia ja edellytti polttoaineseoksen sekoittamista. Polttoainejakeiden lajittumista kokeiden aikana oli vaikea havainnoida, sillä seosta joutui jokaisen kokeen aikana sekoittamaan useasti.

10 %:inen ruokohelpi-hakeseos oli kokeen perusteella käytettävyydeltään ja poltettavuudeltaan parempaa kuin aikaisemmassa kokeessa testattu 20 %:inen seos. Täysin ongelmattonta 10 %:n seoksen polttaminen ei ollut, sillä vakiintuneen palamisen jaksot jäivät lyhyiksi. 5 %:n seoksen polttamisessa ilmeni hyvin pitkälti samoja ongelmia kuin kahdessa edellisessäkin kokeessa. Vakiintuneen palamistilan sekä laitteiston säätöjen löytäminen oli kuitenkin helpompaa, vaikka polttoaineseoksen virta siilosta palopäälle oli edelleen epätasaista.

Savukaasumittauksia päästiin suorittamaan 10 %:n sekä 5 %:n seosta poltettaessa, mutta mittaustulokset jäivät suppeiksi. Polttokokeet antoivat näin ollen luotettavaa tietoa lähinnä polttoaineen käytettävyydestä kuljettimilla, sillä palamisen säätäminen savukaasumittaria hyödyntäen ei täysin onnistunut. Ilmamäärien säätäminen käsin haittavevyjä pyörittämällä oli hankalaa, polttoaineseoksen koostumuksen vaihtelu sekä epätasainen syöttö eivät auttaneet asiaa. Analyseistä selvisi kuitenkin, että hiilimonoksidipäästöjä syntyy helpihake-seosta käytettäessä herkästi. Laavaantumisen tai tuhkan sulamiskäyttäytyminen eivät ainakaan näin lyhyiden testijaksojen aikana aiheuttaneet ongelmia. Tuhkan syntyminen oli vähäistä, mutta ruokohelvestä syntyvä kevyt tuhka saattaa aiheuttaa päästöjä lennellessään piipusta ympäröivään ilmiin.

Koelaitteiston kattilalämpö pidettiin kokeiden aikana riittävän alhaisena lauhduttimen avulla, sillä muutoin järjestelmä olisi kytkeytynyt ylläpidolle. Jatkuva toiminen syöttöjärjestelmä sopisi todennäköisesti katkokäyttöistä järjestelmää paremmin helvelle, sillä tällöin palopäällä palaisi aina liekki ja ylläpitojaksoilta vältyttäisiin. Varastoruuvi-syöttösuppilo-syöttöruuvi -järjestelmä olisi lisäksi omiaan tasaamaan polttoainevirtaa.

Kuivana, herkästi syttyvänä ja nopeasti palavana polttoaineena ruokohelpi voisi mahdollisesti tasoittaa kosteahkon hakkeen palamisominaisuuksia. Säädöt olisi kuitenkin saatava kohdalleen, jotta vältyttäisiin takapalon vaaralta sekä päästäisiin mahdollisimman pieniin päästöihin. 60 kW:n laitteistolla tehdyissä kokeissa optimaalisia säätöjä ei löydetty.

## 6.2 Kokeet 200 kW:n laitteistolla

### 6.2.1 Ensimmäinen polttokoe

Ruokohelpi-hakeseos toimi 200 kW:n laitteistolla ensimmäisen kokeen perusteella kohtuullisen hyvin. Seoksen polttamisesta ei aiheutunut suurempia ongelmia, ainoana vakavampana haittapuolena voidaan mainita polttoainejakeiden lajittuminen sekä silputun ruokohelven holvaantuminen: helpi jämähti siilon nurkkiin eikä tahtonut sekoittua pääpolttoaineeseen. Silppu muodosti hakkeen keskelle tiiviin maton, jota tankopurkaimet ja varastoruuvi eivät kyenneet riittävästi möyhentämään. Tämän vuoksi seosta joutui etenkin kokeen loppuvaiheessa sekoittamaan. Helven kiertymistä ruuville tai pohjakuljettimiin ei koejakson aikana havaittu.

Koelaitteisto ei kyennyt saamaan ruokohelvestä irti riittävästi tehoja, minkä seurauksena kattilalämpö laski helpivaltaista seosta poltettaessa. CO-päästöjen kannalta helpi vaikuttaisi olevan haasteellinen polttoaine pienen mittakaavan laitteistoissa. Polttoaineseoksen koostumuksen vaihdellessa häikäsiikkejä syntyy herkästi. Myös jäännöshappiarvo nousi silloin kun helpeä tuli polttoon runsaita määriä. Tämä voisi selittyä sillä, että kevyttä helpeä poltettaessa palopäällä on vain vähän kaasuuntuvaa massaa. Järjestelmä säätää toisioilman määrää automaattisesti jäännöshappianturin avulla. Käytännössä tämä ilmeni siten, että helpeä poltettaessa toisioilman määrä laski alhaiseksi ensiöilman puhaltaessa lähes täysillä.

Tuhkan syntyminen ei aiheuttanut mainittavasti ongelmia polttokokeen aikana. Jos haluttaisiin polttaa helpivaltaista seosta, saattaisi tuhkan kanssa kuitenkin pidemmän päälle tulla ongelmia. Laavaantumista esiintyi kokeen aikana, mutta ei oletettavasti normaalia enemmän. Laavaa jouduttiin poistamaan palopäältä 2–3 kertaa päivässä. Jos laavaa ei poistettaisi riittävän usein, häiriintyisi palaminen varmasti.

Polttokoe onnistui pääsääntöisesti hyvin. Ongelmia ilmeni lähinnä kokeen loppupuolella, jolloin poltossa oli helpeä liiaksikin. Kokeen perusteella seos, joka sisältää energiasisällöstä vain vähän ruokohelpeä, soveltui parhaiten poltettavaksi 200 kW:n laitteistolla. Polttoaineseoksen tulisi myös olla koostumukseltaan mahdollisimman tasaista. Takapalon vaaraa ei havaittu koejakson aikana. Hälytyksiä tai vakavampia häiriötiloja ei ilmennyt kertaakaan.

### 6.2.2 Toinen polttokoe

Toisen 200 kW:n laitteistolla tehdyn kokeen perusteella voidaan todeta, että kyseinen sivusyöttölaite ja sen varastona toiminut siilo eivät sellaisenaan soveltuneet silputun ruokohelven polttamiseen. Silpun holvaantuminen sivusyöttölaitteen siiloon ja siitä johtuva epätasainen polttoainevirta palopäälle tekivät polttokokeen jatkamisen mahdottomaksi.

Laitteiston käytettävyyso Ongelmien vuoksi ruokohelvi-hakeseoksen polttoaika jäi lyhyeksi. Seoksen koostumusta ei koejakson aikana myöskään kyetty pitämään tasaisena, vaan ruokohelven määrä poltossa vaihteli runsaasti. Tästä johtuen laitteistoa ei kyetty säätämään. Kokeen perusteella ei siis voitu löytää sopivia asetuksia seoksen polttamiselle, vaan pitäydyttiin hakkeen asetuksissa. Asetukset toimivat melko hyvin silloin kun seoksessa oli helpeä maltillisesti. Helpimäärän lisäys aiheutti tehojen ja kattilalämmön alenemista, myös jäänöshappiarvo kohosi. Ensimmäisessä polttokokeessa havaittu ilmiö toistui siis myös toisessa kokeessa.

Savukaasuanalysointorilla tehtyjen mittausten perusteella helvi-hakeseoksen CO-päästöt nousivat korkeammiksi kuin verrokkina mitatun hakkeen. Myös häkäpiikkejä syntyi herkästi seosta poltettaessa. Toisenkin polttokokeen perusteella ruokohelpivaltaisesta seoksesta saadut tehot jäivät melko alhaisiksi. Palaminen ei sinänsä ollut ongelmallista, sivusyöttöjärjestelmän toimimattomuus sen sijaan aiheutti kokeen keskeytymisen.

### 6.3 Yhteenveto

Polttokokeista selvisi kiistatta se, että silputtu ruokohelpi on todellinen haaste lämmityslaitteiston syöttöjärjestelmälle. Polttoaineen holvaantumisen sekä lajittumisen johdosta kulloinkin poltettavan polttoaineseoksen koostumus vaihtelee. Epätasainen polttoainevirta sekä vaihteleva polttoainekoostumus tekevät palamisesta epävakaa, jolloin laitteiston säätäminen ja optimaalisen palamistilan saavuttaminen vaikeutuu. Tästä voi olla seurauksena kohonneet päästötasot, etenkin hiilimonoksidin osalta. Isompi ja tehokkaampi lämmitysjärjestelmä pystyy paremmin selviytymään haasteista, mutta 60 kW:n laitteistolle helpisilppua ei voi varauksetta suositella.

Silputun ruokohelven käyttäminen polttoaineena vaatii useita työvaiheita, seuranta sekä lämmityslaitteiston säätämistä. Kaikki tämä lisää kiireisen maatilayrittäjän tai lämpöyrittäjän työmäärää. Ruokohelpi ei siis vaikuttaisi olevan kaikkein houkuttelevin polttoaine, etenkin jos perinteisiä, hyväksi havaittuja polttoaineita on helposti saatavilla. Toisaalta, ruokohelpi on Suomen oloissa oivallinen viljelykasvi, joka tarjoaa viljelijälle lisätuloja ja vaihtoehtoja peltoalansa hyödyntämiseen. Ruokohelven voidaan siis todeta olevan varteen otettava lisä maatilalla tai lämpöyrittäjän polttoainevalikoimaan, mutta sen hyödyntäminen perinteisten biopolttokäytöiden polttamiseen tarkoitetuilla laitteistoilla on ongelmallista ja vaatii kehitystyötä.

Loppupäätelmänä voidaan todeta, että silputtu ruokohelpi sopii tietyin ehdoin maatilalla tai pienen mittakaavan lämpöyrittäjän polttoaineeksi. Jos helpeä haluaa hyödyntää polttoaineena, kannattaa ruokohelven osuus polttoaineseoksessa pitää melko pienenä. Silpun tulisi myös olla mahdollisimman lyhyttä ja se on hyvä sekoittaa pääpolttoaineeseen huolellisesti. Ruokohelpeä poltettaessa lämmitysjärjestelmä vaatii jatkuvaa seuranta, vaikka takapalon vaara ei tehtyjen kokeiden perusteella ollutkaan suuri. Ruokohelpeä ei myöskään voi suositella polttoaineeksi huipputehontarpeen aikana, sillä kevyestä helvestä on vaikea saada irti riittävästi tehoja.

Ruokohelppi, etenkin silputtuna, on polttoaineena kevyttä, kuivaa ja erittäin pölysevää. Silputun helven käsittelyä tulisi välttää tuulisella säällä. Helpeä käsitellessä on lisäksi suositeltavaa käyttää hengityssuojainta, etenkin jos aines on kostea tai jopa homeista. Kaikkea kuivaa polttoainetta käsitellessä on myös hyvä pitää mielessä mahdollinen tulipaloriski.

## 7 JATKOTOIMENPITEET

Koelaitteistojen kaltaisissa lämmitysjärjestelmissä silputun ruokohelven hyödyntäminen edellyttää seospolttoa esimerkiksi hakkeen kanssa. Ongelmana on joka tapauksessa se, miten irtotiheydeltään alhaisesta helvestä saataisiin irti riittävästi tehoja. Jotta ruokohelpeä voitaisiin hyödyntää pienen mittakaavan polttoaineena, tulisi etenkin polttoaineen syöttöjärjestelmiä ja niiden kapasiteettia kehittää siten, että ne soveltuisivat käsittelemään myös kuivaa ja kevyttä ainesta.

Esimerkiksi pneumaattinen sivusyöttöjärjestelmä voisi olla toimiva ratkaisu kevyen polttoaineen siirtämiseen varastosiilosta syöttösuppilon. Näin olisi mahdollista saavuttaa tasainen seossuhde pääpolttoaineen kanssa. Mahdollisuutena olisi lisäksi puhtaan ruokohelven hyödyntäminen, mikäli polttolaitteisto osoittautuisi tähän soveltuvaksi. Puhdas helppi asettaa poltossa syntyvän tuhkan osalta erityisvaatimuksia palopäälle. Liikkuva arina voisi tällöin tulla kysymykseen.

Tehtyjen kokeiden perusteella ruokohelppisilpun hyödyntäminen seospolttoaineena on melko työlästä ja vaatii useita eri työvaiheita. Silputun helven käsittelyssä on omat vaikeutensa ja esimerkiksi varastointi vaatii runsaasti tilaa. Yksi vartenotettava vaihtoehto olisikin polttaa helppi pelletin tai briketin muodossa. Näin välttyttäisiin silputun helven kuljetuksesta, varastoinnista ja käsittelystä aiheutuilta ongelmilta sekä lisäkustannuksilta. Brikettiä on mahdollista polttaa sellaisenaan tai seoksena vaikkapa hakkeen kanssa.



Oljennpolttolaitteet eivät ole yleistyneet Suomessa, vaikka Euroopassa niitä käytetäänkin. Laitteistot soveltuvat myös ruukohelven polttoon ja säästävät käyttäjänsä useilta seospoltoon liittyviltä ongelmilta. Kattilaan integroidut paa-liratomurskaimet sekä kertatäyttöiset polttolaitteistot mahdollistavat lisäksi helpipaalien syötön järjestelmään kokonaisina.

Ruukohelvestä syntyy palon aikana runsaasti kevyttä ja lentävää tuhkaa. Lämmitysjärjestelmään olisikin syytä liittää piipun päähän laitteisto savukaasujen puhdistamiseksi. Pienen mittakaavan käytössä tavoitteeseen voisi yksinkertaisimmin päästä esimerkiksi syklonin avulla. Syklonit hyödyntävät savukaasujen puhdistamisessa keskipakovoimaa saattamalla savukaasun pyöri-vään liikkeeseen. Yksinkertaisen toimintaperiaatteensa ansiosta syklonit ovat hankintahinnaltaan melko edullisia.

## 8 POHDINTA

Tarve uusiutuvan energia lisäämiseksi niin kotimaisilla kuin kansainvälisilläkin markkinoilla on kasvanut. Euroopan Unionin energiapolitiikan yhtenä tavoitteena on lisätä bioenergian käyttöä. Peltoenergia tarjoaa suuria mahdollisuuksia ja EU tavoitteleeekin peltoenergian hyödyntämisen merkittävää kasvua, 523 TWh vuoteen 2010 ja jopa 1046 TWh vuoteen 2020 mennessä. (Knuutila 2008, 38–39.)

Ruukohelpi on lupaavin Suomessa viljellyistä peltoenergiakasveista, sillä se on pitkäikäinen, talvenkestävä ja satoisa. Rahkonen (2006) korostaa, että ruukohelven energiatase on hyvä, koska tuotantoketjun energiankulutus on vajaan kuusi prosenttia ruukohelven tuottamasta energiasta, kun hehtaarisadoksi oletetaan 5,5 tonnia. Suurin kuluerä tässä elinkaariketjussa on lannoitteen tuotanto (4–5 %). Kylvön ja korjuun vaatima energia on noin prosentin verran, kun satoa korjataan yhdeksänä vuonna. (Rahkonen 2006, 22.)

Suomessa arvioidaan olevan lähes puoli miljoonaa hehtaaria peltoa, jota voitaisiin käyttää peltoenergian tuotantoon (Knuutila 2008, 38–39). Keski-Suomen TE-keskuksen alueella kesantoa ja hoidettua viljelemätöntä peltoa oli vuonna 2007 yhteensä 11 600 hehtaaria (Käytössä oleva maatalousmaa vuonna 2007 työvoima- ja elinkeinokeskuksittain 2007).

FINBION tavoitteena on, että vuonna 2010 Suomessa tuotetaan ruokohelvellä ja oljella energiaa jopa 2,5 TWh, mikä tarkoittaa vajaata yhtä prosenttia energian kokonaiskulutuksesta. Pinta-aloina tämä merkitsee oljen keruuta 60 000 hehtaarilta ja ruokohelven viljelyä 75 000 hehtaarilla vuonna 2010. Tavoitteiden saavuttamiseksi ruokohelven koko tuotantoketjua sekä teknologioita on kehitettävä. (Knuutila 2008, 38–39.)

Opinnäytetyössä tutkittiin, miten silputtu ruokohelppi soveltuisi pienen kokoluokan lämpöyrittäjän polttoaineeksi. Opinnäytetyölle asetetuissa tavoitteissa onnistuttiin kohtuullisesti ja polttokokeista saatiin tärkeää tietoa etenkin helpipolttoaineen käytettävyydestä. Tarkoituksena oli myös säätää koelaitteistoja ja löytää sopivat asetukset ruokohelven polttamiselle. Näin olisi mahdollisesti voitu koostaa eräänlaiset työohjeet: toimi näin, jos aiot polttaa helpeä hakkeen joukossa. Tähän tavoitteeseen ei täysin päästy, sillä ainakaan 200 kW:n laitteistolla tehdyissä kokeissa säätämistä ei tehty, vaan pitäydettiin hakkeen asetuksissa. Säätämisen todettiin olevan vaikeaa ja hyödytöntä polttoaineseoksen seossuhteiden alati muuttuessa. 60 kW:n laitteistolla säätöjä tehtiin, mutta paloa ei saatu vakiintumaan niin, että varsinaisia suosituksia asetuksista ja säädöistä olisi luotettavasti voitu antaa. Toisaalta, onnistuneena tutkimustuloksena voidaan pitää myös sitä, että vastoinkäymiset syineen, seurauksineen ja kehittämissuhteineen on kuvattu ja raportoitu.

Opinnäytetyön tulosten luotettavuuteen vaikuttavat monet seikat, yhtenä tärkeimmistä pidän opinnäytetyön tekijän kokemattomuutta lämmitysjärjestelmien käyttäjänä. 200 kW:n järjestelmä oli ennestään tuttu, 60 kW:n järjestelmästä käyttökokemuksia ei ollut. Kokemattomuus näkyi epävarmuutena etenkin laitteistoja säädettäessä. Polttokokeiden suorittajan ammattitaito, tai tässä tapauksessa sen puute, vaikeutti oikeiden säätöjen löytämistä ja sitä kautta vakiintuneen palamistilan saavuttamista. Laitteistoille oli vaikea löytää sopivia asetuksia, sillä polttoaineen syöttö sekä seoksen koostumus vaihteli kaikissa kokeissa huomattavan paljon. Tällä seikalla saattaa olla vaikutusta esimerkiksi saavutettuun hyötysuhteeseen sekä savukaasumittauksista saatuihin tuloksiin. Kokemattomuuden takia koetulosten analysointi ja kehittämisideoiden keksiminen oli myös melko haasteellista.

Muita tulosten luotettavuuteen vaikuttavia seikkoja ovat esimerkiksi tekniset ongelmat, jotka häiritsivät savukaasumittausten suorittamista. Savukaasuanalysaattorin sekä kannettavan tietokoneen yhteistyö ei toiminut aina parhaalla mahdollisella tavalla. Epätavallisen lämmin sää koejakson aikana saattoi myös vaikuttaa testituloksiin. Olisi ollut mielenkiintoista tietää, miten polttokokeet olisivat onnistuneet pakkaskelin aikaan, jolloin verkoston tehontarve olisi ollut suurempi. Toisaalta, lämmitysjärjestelmä ei kyennyt koejaksonkaan aikana tuottamaan omillaan tarvittavaa energiamäärää, vaan tuki- ja varajärjestelmänä toimivat öljykattilat olivat myös ajoittain päällä. Koejaksot olivat kestoltaan melko lyhyitä. Pidempiaikaiset kokeet olisivat mahdollisesti voineet antaa kattavampaa ja luotettavampaa tietoa.

Opinnäytetyön tekeminen oli kaiken kaikkiaan vaativa mutta antoisa prosessi. Työ eteni sujuvasti ja aikataulun mukaisesti. Pidän opinnäytetyön tuloksia pääosin luotettavina sekä hyödyllisinä.

Olen myös suurimmaksi osaksi tyytyväinen omaan työskentelyyni opinnäytetyön parissa. Henkilökohtaiset kiireet vaikeuttivat työn tekemistä, joten esimerkiksi opinnäytetyön viimeistelyyn sekä teoriaosion sisältöön olisin toivonut voivani keskittyä enemmän. Toisaalta, työn painopiste oli käytännön tutkimustyössä ja tulosten raportoinnissa. Kiitokset opinnäytetyön ohjaajalle Tero Vesisenaholle sekä työn tilaajalle Tapani Sauraselle tuesta ja opastuksesta. Suuri kiitos myös Jyväskylän ammattikorkeakoulun Bioenergiakeskuksen henkilökunnalle hyvin sujuneesta yhteistyöstä.

## LÄHTEET

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

Alanen, V-M. & Solmio, H. 2006. Lämpöyrittäjätoiminta vuonna 2006. TTS tutkimuksen tiedote. Luonnonvara-ala: metsä 9/2007 (715). Loimaa: Priimus Paino.

Boiler plants for farms. n.d. German Biomass and Bioenergy Consulting Service. NRG-Consultants.com -sivusto. Viitattu 20.2.2008. <http://www.solar-cooling-units.com/index.html>, smaller systems, boiler plants for farms.

Boren, H. 2007. Ruokohelven ja puun pelletöinnin ja / tai briketöinnin tekniset mahdollisuudet ja kannattavuus. Loppuraportti, ProAgria Pohjois-Karjala. Viitattu 20.1.2008. <http://www.maaseutukeskus.fi/pk/LoppuraporttiBorenova.pdf>

Flyktman, M. 1998. Ruokohelvi seospolttoaineena. Julkaisussa Ruokohelvi-seminaari: Biomassan tuotanto pelloilla ja turvesoilla sekä käyttö energian tuotantoon. Toim. Salo, R. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja: Sarja A 39.

Flyktman, M. & Paappanen T. 2005. Ruokohelven käyttökapasiteetti selvitys. VTT tutkimusraportti PRO2105/06. Viitattu 13.1.2008. <http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu.html>, julkaisut, työryhmämuistiot, aikaisemmat muistiot.

Honkaniemi, A. 2007. Ruokohelven ja oljen tie paalista piippuun. BioEnergia 5, 31.

Knuuttila, J. 2006. Täysosuma oljen polttokokeessa kotimaisilla laitteilla. Maatalon Pellervo 5, 10–12.

Knuuttila, K. 2008. Ruokohelven käyttö edellyttää osaamisen ja yhteistyön kehittämistä. BioEnergia 1, 38–39.

Käytössä oleva maatalousmaa vuonna 2007. 2007. Päivitetty 14.12.2007. Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, Matilda-portaali. Viitattu 10.2.2008. <http://www.matilda.fi>, peltokasvitilastot.

Käytössä oleva maatalousmaa vuonna 2007 työvoima- ja elinkeinokeskuksittain. 2007. Päivitetty 14.12.2007. Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, Matilda-portaali. Viitattu 10.2.2008. <http://www.matilda.fi>, peltokasvitilastot.

Larsson, S., Örberg, H., Kalén G. & Thyrel, M. 2006. Rörflen som energi-gröda. Sveriges Lantbruksuniversitet. BTK-rapport 2006:11.

Laurila, J. 2006. Ruokohelven (*Phalaris arundinacea*) korjuun kustannukset ja energiakäytön kannattavuus briketöitynä Kuortaneella. Seinäjoen ammattikorkeakoulu.

Lindh, T., Paappanen, T., Kallio, E., Flyktman, M., Käyhkö, V., Selin, P. & Huotari, J. 2005. Production of reed canary grass and straw as blended fuel in Finland. VTT Processes.

Luonnonvarainstituutin hankkeet. 2007. Päivitetty 20.6.2007. Viitattu 10.1.2008. Jyväskylän ammattikorkeakoulun kotisivut.

<http://www.jamk.fi/>, Luonnonvarainstituutti, tutkimus ja kehitys, hankkeet.

Lämpöyrittäminen. 2006. Viitattu 2.12.2007. Etelä-Pohjanmaan metsäkeskusten puualan kehittämishankkeiden sivusto.

<http://www.puulakeus.net/index.html>, kotimainen energia, neuvontapalvelut, lämpöyrittäjäys.

Mela, T. 1998. Peltobiomassaa energian raaka-aineeksi. Julkaisussa Ruokohelpiseminaari: Biomassan tuotanto pelloilla ja turvesoilla sekä käyttö energian tuotantoon. Toim. Salo, R. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja: Sarja A 39.

Pahkala, K. & Keskitalo M. 2006. Viljan olki sekä öljy- ja kuitukasvien varret. Julkaisussa Maatilayrityksen bioenergian tuotanto. Toim. Luoma, H., Peltonen, S., Helin, J. & Teräväinen, H. ProAgria Maaseutukeskusten Liitto: Tieto tuottamaan 115. Keuruu: Kirjapaino Otava, 48–52.

Pahkala, K., Pentti, S., Aalto, M., Sahramaa, M., Poikola, J. & Enroth, A. 2006. Ruokohelpi. Julkaisussa Maatilayrityksen bioenergian tuotanto. Toim. Luoma, H., Peltonen, S., Helin, J. & Teräväinen, H. ProAgria Maaseutukeskusten Liitto: Tieto tuottamaan 115. Keuruu: Kirjapaino Otava, 35–42.

Paikalliset polttoaineet, Suomen huoltovarmuuden perusta. 2006. Vapo Oy. Viitattu 3.12.2007. <http://www.vapo.fi/fin/etusivu/?id=2>, Vapo paikalliset polttoaineet

Rahkonen, J. 2006. Varisemistappiot ruokohelpin korjuun kompastuskivenä. Käytännön Maamies 7, 22–25.

Rahkonen, J. 2007. Peltoenergian tuotannon ja käytön monet vaihtoehdot. Käytännön Maamies 1, 17–19.

Sauranen, T. 2007. Ruokohelven koepoltto Kinnulan lämpölaitoksella - raportti. Jyväskylän ammattikorkeakoulun Bioenergiakeskuksen julkaisusarja Nro 29.

Silppurit. 2006. Bio Help Oy:n kotisivut. Viitattu 14.2.2008.

<http://www.netikka.net/honkaniemi/>, lämmitysjärjestelmät, silppurit.

Straw firing systems 200–1500 kW. 2006. LIN-KA Energyn kotisivut. Päivitetty 5.2.2006. Viitattu 13.2.2008. <http://www.linka.dk/Engelsk/index-en.htm>, heating systems, straw system: output 200–1500 kW.

Tanskanen, M. 2006. Lämpöyrittäjäyys. Viitattu 2.12.2007.

[http://www.kunnat.net/k\\_etusivu.asp?path=1](http://www.kunnat.net/k_etusivu.asp?path=1), yhdyskunta, tekniikka ja ympäristö, ilmasto ja energia, energiahuolto.

Tuomisto, H. 2005. Biokaasun ja peltoenergian tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset. Viitattu 18.11.2007. <http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu.html>, julkaisut, työryhmämuistiot, aikaisemmat muistiot.

Vilkkilä, H. 2008. Sivusyöttölaitteen tekniset tiedot. Sähköpostiviesti 19.2.2008. Vastaanottaja J. Sironen.



## Liite 1. 60 kW:n laitteistolla tehtyjen polttokokeiden loki-tiedot

**Ensimmäinen polttokoe**

Klo	Pulssi	Tauko	Huomiot
11.00	4	6	Kokeen aloittaminen. Polttoainetta tuli sytytysvaiheessa todella paljon palopäälle, joten syöttöä piti pienentää.
	2	8	Teho 6 kW.
11.30	1	8	Kattila on edelleen kylmä, eikä palaminen tahdo lähteä kunnolla käyntiin. Teho 6,9 kW.
	2-4	8	
12.00	7 → 12	6 → 4	Palaminen lähtee käyntiin, syöttöä täytyy lisätä. Helpi palaa nopeasti. Palaminen tapahtuu palopään takaosassa, vaarana takapalo. Teho 16 kW.
12.30	12 → 16	4 → 2	Syöttöä edelleen isommalle. Teho 27 kW
13.20	25	0,5	Palaminen vakiintuu hetkeksi, vaikka onkin edelleen nopeaa.
13.35	25	0,5	Kattila meni ylläpidolle, koska lauhdutin ei ollut päällä. Lauhdutin kytkettiin päälle.
13.45	25	0,5	Liekki edelleen palopään takaosassa, ilmamäärien pienentäminen. Ensio 1/2 auki, toisio lähes auki. Teho 53 kW. Piipusta vain pieni väreily.
14.30	25	0,5	Teho 42 kW. Palaminen melko vakiintunutta.
15.00			Tukos syöttöjärjestelmässä. Käsiäjolle siirtyminen. Alasajo.
15.15			Koe lopetettiin

**Toinen polttokoe**

Klo	Pulssi	Tauko	Huomiot
11.00	4	4	Kattila tulille. Ilma-aukot pienellään sytytysvaiheessa.
11.30	4	4	Edelleen käsiajolla. Teho 2,7 kW. Ensiö 1/3 auki, toisio 1/3 auki. Lauhdutin ja kiertovesipumppu pois päältä. Kattilalämpö 20 °C.
11.45	4	4	Ensiö 2/3 auki, toisio 2/3 auki.
12.00	4 → 2	4 → 6	Käsiajolta automaatille. Syöttö liian isolla, takaisin käsiajolle. Ensiö 3/4 auki, toisio 2/3 auki
12.15	2	15	Käsiajolta uudelleen automaatille. Palaminen paremmin käynnissä.
	4	11	
	4	18	
	5,5	15	
	6,5	15	
12.30	7	13	Siilossa kaikki ok. Ei lajittumista tai holvaantumista havaittavissa. Ensiö 3/4 auki, toisio 3/4 auki.
	7	10	
	7	7	
	3	5	
	4,5	5	Ensiö 1/2 auki, toisio 3/4 auki.
12.45	4,5	5	Palaminen tasaantuu. Teho 12 kW, kattilalämpö 30 °C. Kiertovesipumppu päälle.
	5,5	5	
	6,5	4	
13.00	7,5	3	Helpeä ruuville, palo nopeaa.
13.20	13	1,5	Palo tapahtuu palopään takaosassa. Syötön säätäminen isommalle. Ensiö lähes auki, toisio lähes auki. Kattilalämpö 60 °C. Teho 47 kW.
13.30	14	2	Savukaasumittauksen aloittaminen. Mittaus ei onnistunut, koska syötössä ilmeni ongelmia.
14.30	14	2	Palaminen jälleen tasaista. Teho 50 kW. Piipussa vain pieni väreily. Ensimmäisen savukaasumittauksen suorittaminen.
15.00	14	2	Toisen savukaasumittauksen suorittaminen. Teho 52 kW.
15.30			Polttokokeen lopettaminen, alasajovaiheen aloittaminen.
16.30			Nuohous.

### Kolmas polttokoe

Klo	Pulssi	Tauko	Huomiot
9.00			Kattila tulille, laitteiston lämmittäminen hakkeella.
10.30	3 → 4	15 → 10	Helpi-hake-seosta siiloon. Ensiö 3/4, toisio 3/4 auki. Teho 8 kW.
	6	6	
10.45	8	4	Teho 13 kW. Syötön isontaminen, helpeä ruuvilta palopäälle. Ensiö 2/3, toisio 2/3 auki. Teho 23 kW. Kattilalämpö 40 °C.
11.00	8	4	Lauhdutin päälle.
11.15	8	4	Kattilalämpö 50 °C. Teho 59 kW. Ensiö 3/4 auki, toisio lähes auki.
11.30	8	4	Teho 57 kW. Kattilalämpö 60 °C. Palo vakiintunut.
11.45	8	4	Polttoaineseos pakkaantunut siilon laidoille, sekoitettava käsin.
12.15	8	4	1. savukaasuanalyysi.
12.25	6	4	Liekki lähes sammui, kun polttoainevirta tyrehtyi. Teho 30 kW. Ensiö 1/4, toisio 2/3 auki.
12.35			2. savukaasuanalyysi. Polttoainevirrassa katkoksia.
13.00	6 → 5	4	Teho 45 kW. Kattilalämpö 50 °C.
	4	4	Ensiö 3/4, toisio 3/4 auki.
13.30			3. savukaasuanalyysi epäonnistui laitevirian takia.
14.30			Polttokokeen lopettaminen, alajovaiheen aloittaminen.
15.30			Nuohous.

## Liite 2. 200 kW:n laitteistolla tehtyjen polttokokeiden loki-tiedot

**Ensimmäinen polttokoe**

Pvm	Klo	Huomiot
28.12.	9.00	Kattila tulille. Ei vielä helpeä palopäälle.
	12.40	Helpeä hieman syöttösuppilossa. Teho 148 kW. Tehokäynti 2,9. Kattilalämpö 99,5 °C.
	13.30	1. ja 2. savukaasumittaus. Palaminen tasaista, ei ongelmia. Kattilalämpö 100 °C. Tehokäynti 2,9.
	21.20	Helpeä hakkeen joukossa tasaisesti. Ei ongelmia syöttölaitteissa. Laavaantumista jonkin verran. Teho 156 kW. Kattilalämpö 100 °C. Tehokäynti 3,2. Lambda 6,5. Ensio 69 %, toisio 53,7 %.
29.12	8.30	Polttoaineseos melko tasainen. Siilossa pinta laskenut tasaisesti. Teho 141 kW. Kattilalämpö 99,5 °C. Tehokäynti 2,9.
	12.30	3. savukaasumittaus. Laavaa palopäällä. Helpeä paljon poltossa. Teho 130 kW. Kattilalämpö 96 °C. Tehokäynti 4. Ei takapalon vaaraa. Siilossa havaittavissa lajittumista, tasoitettiin käsin.
	13.40	Kattilalämpö 100 °C. Tehokäynti 3,1. Edelleen paljon helpeä poltossa.
	20.00	4. savukaasumittaus. Palo tasaista, helpeä edelleen melko paljon hakkeen joukossa. Teho 139 kW. Kattilalämpö 100 °C. Tehokäynti 2,8. Lambda 7. Ensio 60 %, toisio 45 %.
30.12	7.30	Helpeä paljon suppilossa ja ruuvilla, palo kuitenkin tasaista. Teho 130 kW. Kattilalämpö 98 °C. Tehokäynti 4. Ensio 90,2 %, toisio 35,3 %. Polttoaine holvaantunut siilossa, sekoitettiin käsin. Lajittumista myös havaittavissa.
	14.15	5. savukaasumittaus. Paljon laavaa palopäällä. Teho 120 kW. Kattilalämpö 86 °C. Tehokäynti 4. Lambda 6,9. Siilossa jäljellä paljon helpeä, haketta huomattavasti vähemmän. Polttoaineseosta sekoitettiin käsin.
	15.10	Teho 153 kW. Seos siilossa epätasainen. Tehokäynti 4.
	16.00	Helpeä huomattavan paljon siilossa.
	21.30	Helpeä pakkaantunut siilon laidoille, sekoitettiin käsin. Teho 155 kW. Kattilalämpö 99,5 °C. Tehokäynti 4. Lambda 6,8.
31.12	7.00	Alasajovaiheen aloittaminen. Teho 86 kW. Kattilalämpö 75 °C Polttoaine siilossa lähes yksinomaan helpeä. Seosta sekoitettiin käsin siilossa, jolloin polttoon saatiin myös haketta. Hakkeen myötä tehot ja lämmöt nousivat ylös.
	7.30	Teho 125 kW.
	12.20	Kokeen lopettaminen ja nuohous.

## Toinen polttokoe

Klo	Huomiot
8.45	Poltossa pelkästään haketta. Laitteisto pakotettu käyttämään tehokäynnin asetus- ta 3.
9.00	1. savukaasumittaus pelkällä hakkeella. Teho 154 kW. Kattilalämpö 93,5 °C. Lambda 6,6. Ensiö 65,1 %, toisio 71,4 %.
10.00	2. savukaasumittaus pelkällä hakkeella. Teho 167 kW. Kattilalämpö 93 °C. Lamb- da 7. Ensiö 65 %, toisio 61,4 %.
10.45	3. savukaasumittaus pelkällä hakkeella. Teho 156 kW. Kattilalämpö 90 °C. Lamb- da 6,7. Ensiö 65,1 %, toisio 77,3 %.
11.00	Sivusyöttölaitteen kytkeminen päälle. Helpeä ei tule suppiloon.
12.30	Helpeä ei edelleenkaan tule suppiloon, vaikka sivusyöttölaitteen ruuvia käytetään pakkosyötöllä.
13.00	Helpi pahasti holvaantunut sivusyöttölaitteen siilossa. Rassattava käsin, jotta helpi saataisiin liikkumaan.
13.18	Helpeä suppiloon. Polttokokeen aloittaminen.
13.40	1. savukaasumittaus seoksella. Teho 152 kW. Kattilalämpö 86 °C. Lambda 6,7. Ensiö 65,1 %, toisio 28,2 %.
14.05	Helpeä runsaasti suppilossa. Teho 123 kW. Kattilalämpö 79 °C. Lambda 7,7. En- siö 65,1 %, toisio 26,3 %.
14.16	Sivusyöttölaitteen ruuvilta tulee suppiloon isoja tukkoja helpeä. Palopäälle on muodostunut hehkuvia "heinäpesäkkeitä". Teho 120 kW. Kattilalämpö 78,5 °C. Lambda 8. Ensiö 65 %, toisio 65 %.
14.30	2. savukaasumittaus seoksella. Teho 134 kW. Kattilalämpö 80 °C. Lambda 7. Ensiö 65,1 %, toisio 43,2 %. Helpeä poltossa vaihtelevasti.
15.00	Helpeä suppiloon todella paljon. Silppu tulee tiiviinä pötkönä sivusyöttölaitteen ruuvilta.
15.30	3. savukaasumittaus seoksella. Teho 143,4 kW. Kattilalämpö 85 °C. Lambda 7. Ensiö 65,1 %, toisio 52,2 %. Helpeä poltossa vaihtelevasti, silpun syöttö suppiloon takeltelee.
16.00	Kokeen lopettaminen. Helpisilppu holvaantunut siiloon, polttoainesyöttö suppiloon katkennut.