



Minni Kukkonen

UUSIEN RAAKA-AINEIDEN HYÖDYNNETTÄVYYS PELLETTI- LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN POLTTOAINEENA

UUSIEN RAAKA-AINEIDEN HYÖDYNNETTÄVYYS PELLETTI- LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN POLTTOAINEENA

Minni Kukkonen
Opinnäytetyö
Syksy 2013
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t): Minni Kukkonen

Opinnäytetyön nimi: Uusien raaka-aineiden hyödynnettävyys pellettilämmitysjärjestelmän polttoaineena

Työn ohjaaja(t): Martti Rautiainen, Erkki Kylmänen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: 2013 Sivumäärä: 50 + 8 liitesivua

Työn on toimeksiantanut Oulun seudun ammattikorkeakoulun luonnonvara-alan yksikkö EkoPelletti-T&K -hanketta varten. Hankkeen tavoitteena on laajentaa energiantuotannon raaka-ainepohjaa, ja tutkimusta varten on tuotettu 16 pellettilaata metsä- ja maatalouden ylijäämätuotteita raaka-aineina hyödyntäen. Tavoitteena on ollut selvittää pellettilaatuojen palamisominaisuuksia ja käytettävyyttä pienlaitoksessa sekä pohtia saatujen tulosten ja käyttökokemuksen perusteella jatkojalostuksen kannattavuutta.

Pellettien polttokokeet suoritettiin Oulun seudun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön energialaboratoriossa 20 kW:n nimellistehon kattilalla. Kutakin pellettilaataa pyrittiin polttamaan sekä kattilan nimellisteholla, että puolella teholla. Mittauksia suoritettiin 50 minuutin ajalta tehon ollessa vakiintunut. Tietoja kerättiin digitaalisesti tietokoneelle minuutin välein saadusta tehosta, kattilan meno- ja paluuvien lämpötilasta sekä savukaasujen lämpötilasta ja pitoisuuksista. Manuaalisesti tietoja kerättiin mittauspöytäkirjaan 10 minuutin välein.

Kerätyistä tiedoista laskettiin kullekin pellettilaadulle tehollinen lämpöarvo sekä suora ja epäsuora hyötysuhde. Kerätyistä tiedoista olennaisimmista tehtiin koostetaulukko. Palamistulosten ja käyttökokemuksen perusteella voitiin todeta yli 50 prosenttia olkea sisältävien pellettien palavan pienessä laitoksessa huonosti. Hakepelleteissä ongelmana oli pelletin huono rakenne. Joidenkin pellettilaatuojen palamisessa muodostui klinkkeriä. Muilta osin saadut tulokset tukivat positiivisesti uusien raaka-aineiden käyttöönottoa. Parhaimmat tulokset käytön ja palamisen osalta saavutettiin puru- ja muovi-purupelletillä.

Käyttöön toimitettu pellettimäärä oli toisinaan liian vähäinen eikä pellettiä voitu tällöin polttaa kattilan nimellisteholla, jolloin päästään parhaisiin tuloksiin. Pienellä teholla polttaminen ei anna todellista tietoa pelletin palamisen ominaisuuksista. Saadut tulokset ovat siis pääosin suuntaa-antavia.

Asiasanat: Pellettilämmitys, polttokoe, palaminen, uudet energianlähteet

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	6
2 PALAMISEN TEORIAA	7
2.1 Hyötysuhde	8
2.2 Lämpöarvo	9
3 LAITTEISTON ESITTELY	10
4 TARKASTELLUT PELLETTILAADUT	17
4.1 Puru	19
4.2 Hake	20
4.3 Olki	21
4.4 Ruokohelppi	23
4.5 Turve	24
4.6 Puru 50 % - sanomalehti 50 %	26
4.7 Kauran olki - kaoliini	27
4.8 Hake 25 % - olki 75 %	28
4.9 Hake 80 % - olki 20 %	30
4.10 Hake 60 % - olki 20 % - kaura 20 %	31
4.11 Hake 80 % - ruokohelppi 20 %	32
4.12 Muovi 5 % - puru 95 %	33
4.13 Muovi 5 % - hake 95 %	35
4.14 Muovi-olki-hakepelletit	36
4.14.1 Muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 %	36
4.14.2 Muovi 5 % - olki 45 % - hake 50 %	38
4.14.3 Muovi 10 % - olki 40 % - hake 50 %	39
5 TULOSTEN ANALYSOINTI	43
5.1 Puru	43
5.2 Hake	43
5.3 Olki	43

5.4 Ruokohelpi	44
5.5 Turve	44
5.6 Puru 50 % - sanomalehti 50 %	44
5.7 Kauran olki - kaoliini	45
5.8 Hake 25 % - olki 75 %	45
5.9 Hake 80 % - olki 20 %	45
5.10 Hake 60 % - olki 20 % - kaura 20 %	46
5.11 Hake 80 % - ruokohelpi 20 %	46
5.12 Muovi 5 % - puru 95 %	46
5.13 Muovi 5 % - hake 95 %	47
5.14 Muovi-olki-hakepelletit	47
6 YHTEENVETO	48
LÄHTEET	50
LIITE 1	1
LIITE 2	1

1 JOHDANTO

Työssä perehdytään 16 erilaisen pellettilaadun palamisominaisuuksiin. Pelletit on teettänyt Oulun seudun ammattikorkeakoulun luonnonvara-alan yksikkö hyödyntäen raaka-aineina vaihtelevin sekoitussuhtein muovia, turvetta, sanomalehteä, haketta, purua, olkea sekä ruokohelpeä, pääosin siis maatalousteollisuudessa syntyviä sivutuotteita. Jokaisesta pellettilaadusta analysoidaan palamisessa muodostuneet savukaasujen pitoisuudet, palamisen hyötysuhde ja puhtaus, saatu teho sekä saatu tehollinen lämpöarvo. Lisäksi tarkastellaan ko. pelletin toimivuus pienessä laitoksessa polttokokeiden suorittajien käyttökokeusten perusteella ja täten laajemman tuotannon kannattavuutta.

Ongelmaksi työssä muodostuu toimitettujen pellettien vähäinen määrä. Polttimelle on annettava asetusravot, joilla määritetään muun muassa syötettävän polttoaineen määrä ja syöttötiheys, palamiseen tarvittavan ilman määrä sekä arinan pyöräytysaste ja -aika. Jokaiselle pellettilaadulle on omat ihanteelliset asetusravonsa, mitä tulee pelletin syttymiseen, palamisen puhtauteen ja saatavaan tehoon. Eksoottisempia pellettilaatuja poltettaessa asetusravot täytyy arvata ja niitä voi joutua muuttamaan polton aikana, jolloin pellettiä menee niin sanotusti hukkaan. Myös kattilalämpötilan vakioituminen nelitieventtiiliä säätämällä vie aikaa ja polttoainetta. Mitä vähemmän varsinaiselle polttokokeelle jää poltettavaa materiaalia, sitä suuremmaksi virhemarginaali kasvaa, mikä puolestaan vähentää tulosten arvoa ja luotettavuutta.

Työ on teetetty EkoPelletti-T&K -hanketta varten. Hankkeen tavoitteena on pyrkiä laajentamaan energiatuotannon raaka-ainepohjaa muun muassa kehittämällä metsä- ja peltoperäisten sekä kosteiden raaka-aineiden kuivausta ja pelletointia.

2 PALAMISEN TEORIAA

Palaminen on kemiallinen reaktio, jossa polttoaineen sisältämät alkuaineet reagoivat hapen kanssa vapauttaen lämpöenergiaa ympäristöön. Jotta palamista esiintyy, on oltava polttoainetta, happea ja riittävä lämpötila ja ketjureaktion on oltava esteetön. Jos jokin mainituista tekijöistä poistuu, palaminen loppuu. Kiinteään polttoaineen palamisprosessi koostuu osaprosesseista, joista olennaisimpina palamiseen vaikuttavat lämmön- ja aineensiiro sekä kemiallinen kinetiikka. Hitaimmin tapahtuva osaprosessi määrittää koko palamisprosessin nopeuden. Pääsääntöisesti palamisnopeuteen vaikuttavat kuitenkin polttoaineen kemialliset, rakenteelliset sekä fysikaaliset ominaisuudet. Palamistehoon voidaan vaikuttaa yksinkertaisimmillaan polttoaine- sekä ilmavirtaa säätämällä. (1, s. 101; 2, s. 139.)

Pellettiä poltettaessa on kyse jatkuvatoimisesta palamisesta, missä polttoainetta syötetään tulipesään kevyenä virtana katkeamattomasti. Palamistapahtumassa on havaittavissa neljä päävaihetta: kosteuden poistuminen, pyrolyysi, haihtuvien pyrolyysikaasujen syttyminen sekä palaminen ja jäännöshiilen palaminen. Kappaleessa vaiheet tapahtuvat peräkkäin, mutta tulipesässä voi esiintyä eri vaiheissa olevia kappaleita samanaikaisesti. Pelletti on rakenteeltaan ideaalinen kiinteäksi polttoaineeksi. Sen partikkelikoon ollessa pieni on kokonaispinta-ala suuri, mikä nopeuttaa syttymisvaiheessa tapahtuvaa kosteuden haihtumista ja pyrolyysia. Nämä prosessit kuluttavat lämpöenergiaa ja laskevat täten tulipesän keskimääräistä lämpötilaa. (3, s. 41 - 44; 2, s. 393.)

Pyrolyysi on palamistapahtuman ”porrasvaihe”, joka alkaa endotermisenä, lämpöenergiaa sitovana, reaktiona ja lämpötilan noustessa muuttuu eksotermiseksi, lämpöenergiaa vapauttavaksi, reaktioksi. Pyrolyysissä polttoaineesta haihtuu inerttejä eli reaktiokyvyttömiä sekä palamiskelpoisia kaasuja eli pyrolyysikaasuja. Haihtuvien aineiden määrä kuvaa pyrolyysin merkitystä kokonaisprosessin kannalta - biopolttoaineilla kyseinen määrä kuiva-aineen lämpösisällöstä on 70 prosentin luokkaa. Lämpötilan ja kaasujen pitoisuuden ollessa riittävä ja läm-

möntuoton ylittäessä esiintyvät lämpöhäviöt pyrolyysikaasut polttoaineen ympärillä syttyvät. Syttymiseen vaikuttaa lisäksi kaasu- ja happiseoksen suhde sekä se, onko lähettyvillä ulkopuolista energiaa. Biopolttoaineilla haihtuvien aineiden määrän ollessa suuri ilman tehokkaan sekoittumisen merkitys korostuu. (2, s. 395.)

Tuotettaessa energiaa hyötykäyttöön pyritään mahdollisimman puhtaaseen palamiseen. Tällöin hyötysuhde on hyvä ja päästöt pienet, koska palaminen tuottaa lähinnä hiilidioksidia, sekä pieniä määriä hiilimonoksidia ja rikin ja typen yhdisteitä. Tähän vaikuttavat kaasujen lämpötila tulipesässä, palamisilman määrä ja sekoittuminen, itse tulipesän mitoitus ja seinämateriaali sekä polttoaineen ominaisuudet. Mahdollisimman puhtaaseen palamiseen päästään, kun polttoaine on kuivaa, palamisilmaa on sopiva määrä kussakin palamisen vaiheessa ja polttoaineen lisäys on ajoitettu oikein. (3, s. 44.)

2.1 Hyötysuhde

Polttoaineen lämpöenergiasisällöllä ei ole juurikaan merkitystä, mikäli palaminen tapahtuu huonolla hyötysuhteella. Polttolaitteistolla on tähän suuri vaikutus. Hyötysuhde voidaan palamistapahtumasta määrittää kahdella menetelmällä: suoralla ja epäsuoralla. Suoran menetelmän laskennassa verrataan kattilasta saatua lämpöenergiaa sille syötettyyn lämpöenergian määrään. (Kaava 1.) Epäsuorassa menetelmässä huomioidaan kattilan konvektio- ja säteilylämpöhäviöt, savukaasujen mukana poistuva lämpöenergia sekä häviöt tuhkan muodossa. (Kaava 2.) Täten hyvä hyötysuhde edellyttää mahdollisimman täydellistä palamista ja pieniä lämpöhäviöitä. Suurimmat häviöt tulevatkin savukaasujen mukana poistuvasta energiasta. Polttoaineen ominaisuuksista etenkin kosteudella on suuri merkitys hyötysuhteeseen. (3, s. 46; 4.)

Suora hyötysuhde lasketaan kaavalla 1 (4).

$$\eta = Q_h/Q_s$$

KAAVA 1

Q_h = hyödynnetty energia

Q_s = syötetty energia

Epäsuora hyötysuhde lasketaan kaavalla 2 (4).

$$\eta = 100\% - (q_n + q_p + q_{s/k} + q_{tuhka})$$

KAAVA 2

q_n = vapaan lämmön muodossa tapahtuvat savukaasuhäviöt

q_p = palamattomien kaasujen muodossa tapahtuneet häviöt

$q_{s/k}$ = kattilan konvektio- ja säteilylämpöhäviöt

q_{tuhka} = tuhkan osuus syötetystä polttoainemäärästä

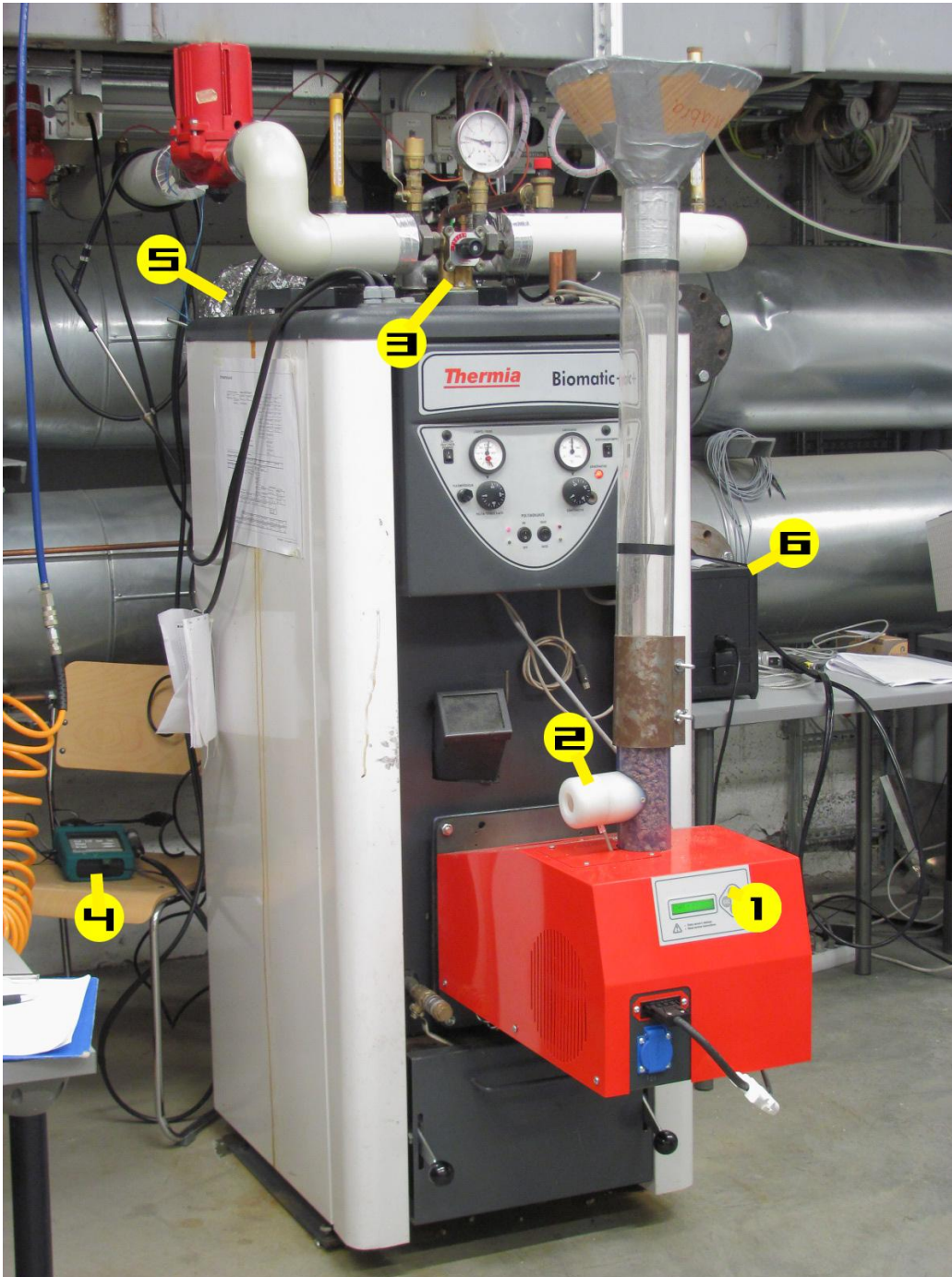
2.2 Lämpöarvo

Lämpöarvo on polttoaineen tärkein ominaisuus, joka ilmaisee aineen sisältämän energiamäärän massayksikköä kohden. Se voidaan ilmoittaa joko kalorimetrisenä eli ylempänä tai tehollisena eli alempana lämpöarvona. Ylempi lämpöarvo määritetään kalorimetrisesti, ja se pitää sisällään sekä polttoaineen sisältämän että palamistuotteena syntyvän veden höyrystymisenergian ilmaisten toisin sanoen polttoaineen potentiaalisen energiasisällön. Alempi lämpöarvo kuvaa energiamäärää, joka saadaan hyödyksi polttoainetta poltettaessa. Siihen ei siis lasketa mukaan veden haihduttamiseen kuluva energia. Näin ollen kalorimetrisen lämpöarvo on lämpöarvoluvuista suurin. (2, s. 93.)

3 LAITTEISTON ESITTELY

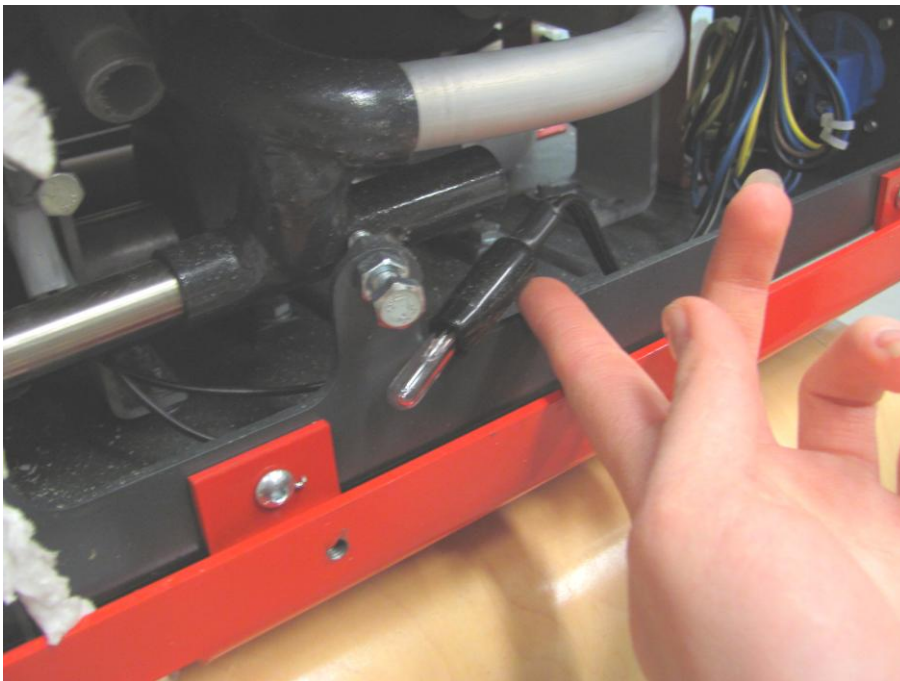
Polttokokeiden kannalta laitteiston tärkeimmät komponentit ovat Thermia Biomatic+ -kattila (nimellisteho 20 kW) sekä Petrojetin Biorobot 30 -poltin. (Kuva 1.) Polttimessa on sisäänrakennettu tietokone, jonka hallintayksikön välityksellä syötetään asetusarvot käynnistys-, käynti- ja pysäytysvaiheelle (start-, run- ja stop-mode). Hallintayksiköllä säädetään kullekin vaiheelle niissä tarvittavaa palamisilman määrää, syötettävän polttoaineen annoskokoa ja annostelun tiheyttä sekä arinan pyöräytysastetta ja pyöräytyksen tiheyttä.

Polttimen polttoaineen tuloaukkoon on kiinnitetty muoviputki, johon pellettiä syötetään. (Kuva 1.) Tavanomaisesti pellettilämmitysjärjestelmässä on käytössä pellettisiilo, josta pelletit kuljetetaan syöttöruuvien välityksellä polttimelle. Laboratorion laitteistoon ei opinnäytetyön polttokokeiden suorituksen aikana kyseisiä osia kuulu, joten pelletit syötetään käsin syöttöputkeen, jossa ne kulkeutuvat painovoimaisesti polttimelle.



KUVA 1. Laitteisto, jolla polttokokeet suoritettiin: 1) polttimen hallintayksikkö-paneeli, 2) pellettivirtaa tarkkaileva sensori, 3) Esben nelitieventtiili, 4) KANE900 Plus -savukaasuanalysaattori, 5) kattilalta lähtevä eristetty savukaasukanava (mittauspiste), 6) Dräger MSI Compact -savukaasuanalysaattori keräämässä mittauksia kattilan oikealla kyljellä olevasta mittauspisteestä

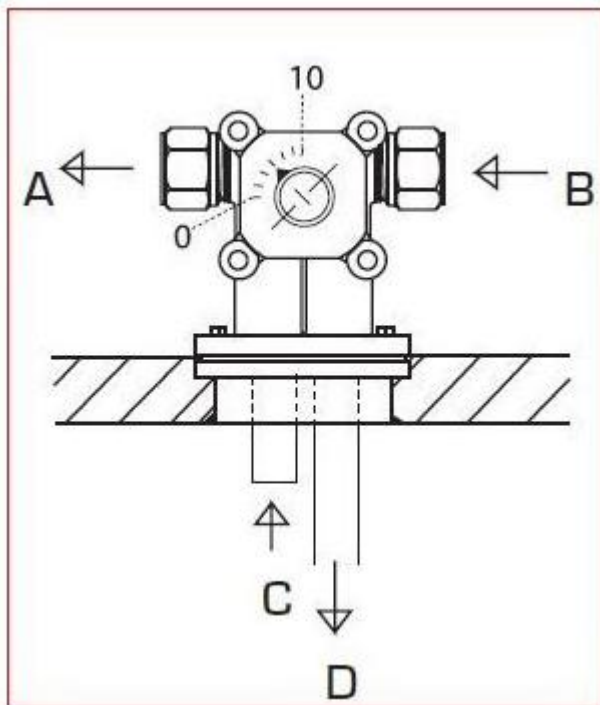
Polttimessa on kiinteänä tulipesän liekkiä tarkkaileva liekkivahti, jonka välittämien tiedon perusteella poltin vaihtaa automaattisesti vaiheelta toiselle. Liekkivahti on LDR-vastus, eli fotovastus. (Kuva 2.) Mikäli liekki on heikko tai sammuu käyntivaiheen aikana, poltin ajaa itsensä takaisin käynnistysvaiheelle. Polttimen polttoaineen tuloaukon kyljessä on pellettivirtaa tarkkaileva sensori. Mikäli sensori havaitsee syöttöputken olevan tyhjä tietyn aikamäärän, se välittää tiedon polttimen tietokoneelle ja poltin asettuu sammutusvaiheelle.



KUVA 2. Polttimen sisällä oleva tulipesän liekkiä tarkkaileva fotovastus

Kattilasta saatavaa tehoa säädetään tässä tapauksessa pääasiassa Esben käsiasäätöisellä nelitieventtiilillä. Venttiilin asento määrää kuinka paljon verkostolta tulevaa vettä päästetään kattilan putkistoon. (Kuva 3.) Suurimmalla asennolla (10) kaikki verkostosta tuleva vesi kiertää kattilan kautta ja 0-asennolla verkoston vesi kulkee venttiilin lävitse kiertämättä kattilan kautta lainkaan. Mitä enemmän vettä kiertää kattilan kautta, sitä enemmän lämpöenergiaa saadaan verkoston veteen, eli toisin sanoen kattilasta saadaan suurempi teho. Venttiilin asento täytyy suhteuttaa syötetyn polttoaineen sisältämän energian määrään. Mikäli asento asetetaan liian suureksi, ei poltettaessa saatava lämpöenergia

riitä lämmittämään kaikkea kattilassa kiertävää vettä, jolloin kattilan lämpötila laskee eikä kattilasta saatava teho vakioidu. Vastaavasti liian pienellä asennolla kattilan lämpötila nousee. Kattilan lämpötilaa seurataan sen etuseinässä olevasta lämpötilamittarista. Ennen polttokokeen aloitusta kattilan vesi lämmitetään sähkövastuksella noin 70-asteiseksi, jottei kattilan lämmitysprosessiin kulutettaisi toimitettuja pellettejä. Polttokokeiden aikana kattilalämpötila pyritään pitämään 80 °C:ssa.



KUVA 3. Nelitieventtiilin toimintakaavio, jossa B on verkostosta venttiilille tuleva vesi, A venttiililtä verkostoon palaava vesi, D venttiililtä kattilalle menevä vesi ja C kattilalta venttiilille palaava vesi (5, haku: "shuntventil" -> Shuntventil-4-vägs-TM20)

Kattilan yhteyteen on asennettu Kamstrupin lämpöenergiamittari, joka asetaan keräämään tietoja saadusta lämpöenergiasta ja tehosta sekä kattilalta palaavan ja sinne menevän veden lämpötilasta minuutin välein. Tiedot kerätään USB-yhteyden kautta tietokoneelle. Savukaasumittausta varten käytössä on kaksi analysaattoria, joilla mittauksia kerätään kattilan sisäisestä savukaasu-

kanavasta kattilan kyljessä olevasta mittauspisteestä sekä kattilalta ulostulevasta savukaasukanavasta kanavan kyljessä olevasta mittauspisteestä.

Drägerin MSI Compact -savukaasuanalysointilaitteella kerätään tietoja kattilan sisällä olevasta savukaasujen poistokanavasta. (Kuva 4.) Analysointilaitteen mittauspää pidetään mittauksia varten tunnin ajan savukaasukanavan sisällä, jolloin mitattuja arvoja pystyy seuraamaan tietokoneen näytöltä reaaliajassa analysointilaitteen ollessa kytkettynä tietokoneeseen. Laitteella asetetaan keräämään dataa minuutin välein muun muassa savukaasujen ja huoneen lämpötilasta, hiilidioksidin, hiilimonoksidin, sekä typenoksidien pitoisuuksista ja hapen määrästä.



KUVA 4. Drägerin MSI Compact –savukaasuanalysointilaitte (6)

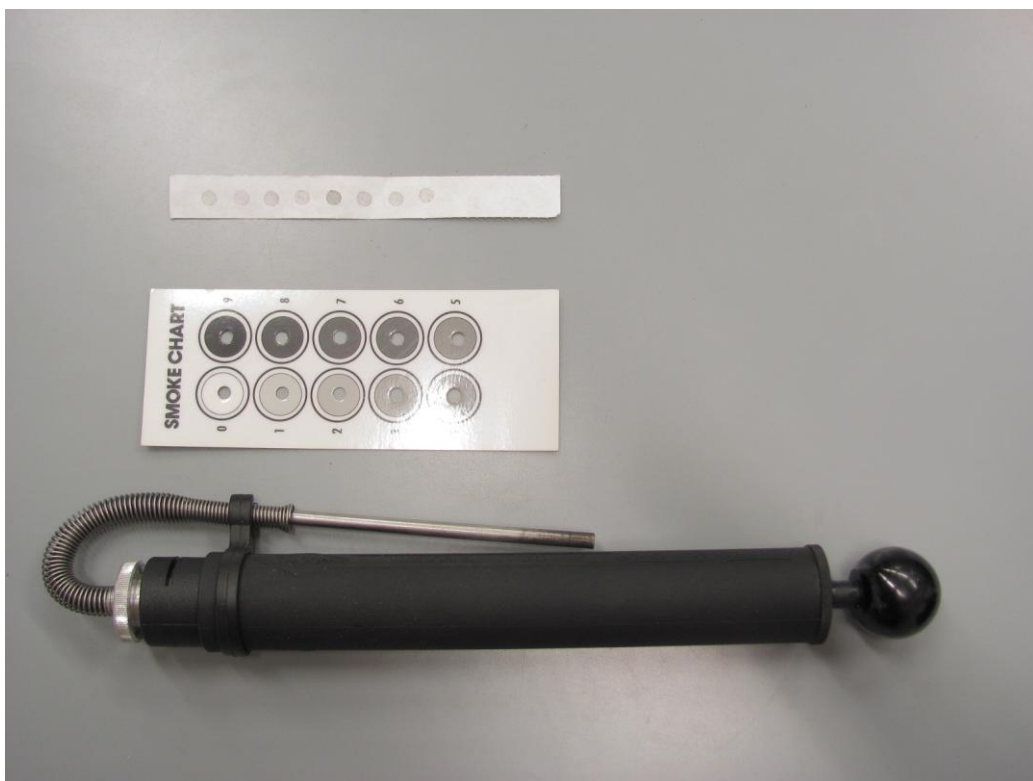
Toinen savukaasuanalysaattori on KANE900 Plus -analysaattori, jolla mitataan kattilalta poistuvan savukaasukanavan kaasujen lämpötilaa ja pitoisuuksia osamittauksina 10 minuutin välein. (Kuva 5.) Mittauspää on poistettava kanavasta osamittauksien välillä. Tulokset kerätään käsin mittauspöytäkirjaan. Samalla kirjataan ylös myös kulunut pellettimäärä grammoina. Analysaattorit antavat toisistaan jokseenkin poikkeavia tuloksia.



KUVA 5. KANE900 Plus –analysaattori (vasemmalla) sekä kanavaan syötettävä mittauspää (7, Test Equipment -> Flue gas analysers -> Kane -> Kane 900Plus flue gas analyser)

Savukaasuista määritetään nokiluku Shellin ja Bacharach Industrial Instrument Co:n yhteistyössä kehittämällä mittalaitteella. Mittalaitteeseen asetetaan valkoinen suodatinpaperi ja pumpulla imetään savukaasua laitteen sisään. Savukaasunäyte kulkeutuu tällöin suodatinpaperin läpi, ja saatua näytettä verrataan asteikkoon, jossa on 10 määritettyä tummuusastetta. (Kuva 6.) Asteikon arvo 0 vastaa suodatinpaperin suhteellista heijastuskykyä ja arvo 9 heijastuskyvyttöä.

Paperille kerääntyvä noki vähentää paperin heijastuskykyä. Mitä parempi heijastuskyky näytteellä on, sen parempaa palaminen on.



KUVA 6. Nokilukumittari, vertailuasteikko sekä suodatinpaperi sisältäen yhden kokeen aikana otetut nokinäytteet (8 näytettä)

4 TARKASTELLUT PELLETTILAADUT

Kokeiden tarkoituksena on ollut tutkia pellettilaatujen soveltuvuutta kotitalouskäyttöön eli niiden käyttö- ja palamisominaisuuksia pienillä (tässä tapauksessa 20 kW:n ja alle) tehoilla poltettaessa. Pelletin tulisi olla rakenteeltaan soveltuva siiloon kuljettamiseen ja siellä säilyttämiseen, eikä pelletti saa aiheuttaa tukkeutumisvaaraa kuljetusruuvissa. Palamisessa voi toisinaan muodostua klinkkeriä, kun hiilen palamisen jälkeen jäänyt palamaton aines kasaantuu kiinteiksi koviksi kokkareiksi. Tavanomaisessa kotitalouden pienessä laitoksessa ei välttämättä ole klinkkerin muodostumisen ehkäisyyn suunniteltuja mekanismeja, joten käytömukavuutta ja puhdistusta ajatellen tulisi pelletin palaa niin puhtaasti, ettei klinkkeriä muodostuisi juuri lainkaan. Kuvat toimitettujen pellettilaatujen rakenteesta sekä niiden polttamisessa muodostuneesta tuhkasta on esitetty liitteessä 1.

Ympäristövaikutuksen osalta on pelletin polton tuottamien haitallisten yhdisteiden, kuten hiilimonoksidin ja typen oksidien, määrän oltava mahdollisimman pieni, eikä palamisessa muodostuva noki saa aiheuttaa esteettistä ongelmaa lähialueen ympäristöön. Kuluttajan näkökulmasta katsoen ensisijaisena kiinnostuksen kohteena on kuitenkin polttoaineen tehollinen, alempi lämpöarvo, joka on selvitetty kokeellisesti kullekin pellettilaadulle. Tarkastellut ominaisuudet suhteutettuna pelletin ostohintaan määrittävät tuotettujen pellettilaatujen jatkojalostuksen kannattavuuden.

Mittauksista saadut tarkemmat tulokset on esitetty taulukoituna liitteessä 2. Taulukossa ilmoitetaan kerätyistä tiedoista tärkeimmät. Kuudelle pellettilaadulle ei ollut saatavilla kalorimetristä lämpöarvoa, joten palamisen hyötysuhdetta ei ole pystytty laskemaan. Osassa kokeista ei ollut käytettävissä pintalämpömittaria kattilan pintalämpötilojen lukemista varten, joten suoritettujen mittausten perusteella muodostettiin yhtälö, jonka mukaan kaikkien kokeiden kattilahäviöt on laskettu. Savukaasuja mitattiin kahdella mittarilla, ja taulukkoon on esitetty mittarien antamat keskiarvot seuraaville suureille:

- savukaasujen lämpötila [°C]
- huonelämpötila [°C]
- CO-pitoisuus [ppm]
- NO_x-pitoisuus [ppm]
- O₂-pitoisuus [%]
- CO₂-pitoisuus [%]

Savukaasujen ilmakerroin eli lambda-arvo on laskettu jäännöshapen osuudesta kaavalla 3, jossa 21 % kuvastaa ilmassa olevan hapen osuutta (4).

$$\lambda = 21\% / (21\% - O_2)$$

KAAVA 3

O₂ = savukaasuista mitatun hapen prosentuaalinen osuus

Tehollinen lämpöarvo lasketaan kertomalla mittauksen ajan saatu teho siihen kuluneella aikamäärällä ja jaetaan se sitten syötetyllä pellettimäärällä. Mittausajat vaihtelivat kuitenkin 20:sta 50 minuuttiin, joten taulukon yhdenmukaistamiseksi on siihen laskettu tunnissa kuluneen pellettimäärän massa kertomalla 10 minuutin aikana kulunut polttoaineen massa kuudella. (Kaava 4.)

$$\text{Tehollinen lämpöarvo} = (\varphi * 1h) / (m_{p10min} * 6)$$

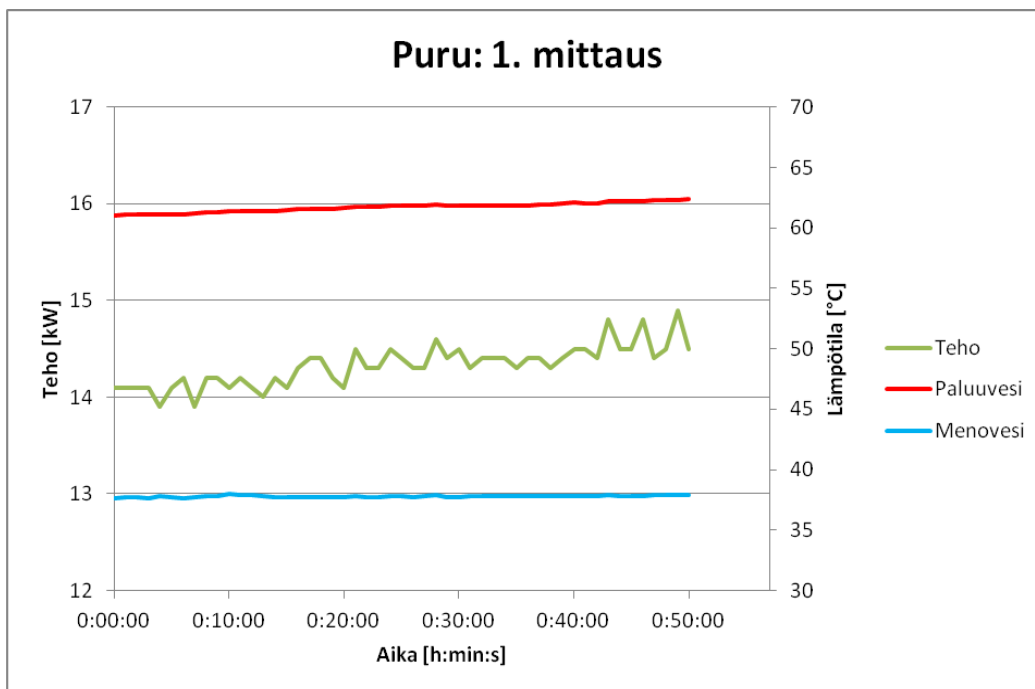
KAAVA 4

φ = kattilasta saatu teho mittauksen aikana [kW]

m_{p10min} = 10 minuutin aikana kuluneen pelletin massa [kg]

4.1 Puru

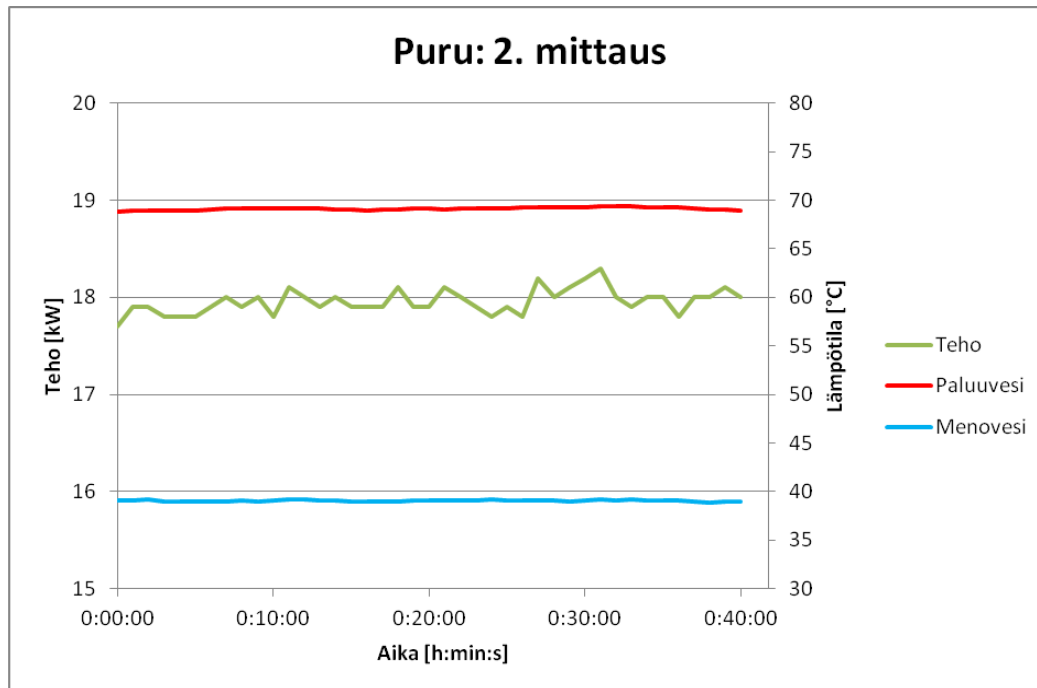
Purupelletti oli rakenteeltaan kiinteää ja erä tasalaatuinen. Täyden pellettisäkin paino oli 15,3 kg, josta 6 kg kului ennen ensimmäistä mittausta sytytyksessä sekä tehon vakiintumisessa. Ensimmäisen mittaus suoritettiin 50 minuutin ajalta keskimäärin 14 kW:n teholla, jolloin teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 3,74 kWh/kg. Mittauksen aikana todettiin nelitieventtiin asennon jääneen liian pieneksi, sillä kattilalta palaavan veden lämpötila sekä saatu teho nousivat. (Kuva 7.)



KUVA 7. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana purupellettiä poltettaessa

Matalammalla teholla tulipesän kaasut eivät savukaasujen matalan lämpötilan vuoksi sekoittuneet kunnolla, jolloin ilmaylimäärä oli 1,7 ja kokonaishyötysuhde 79 %. Toisessa mittauksessa saavutettiin 40 minuutin aikana vakiona pysynyt 18 kW:n teho, jolloin savukaasujen lämpötila oli 170 °C ja palamisen ilmaylimäärä jäi pienemmäksi. (Kuva 8.) Kokonaishyötysuhde nousi noin 81 %:iin ja tehollinen lämpöarvo oli 3,95 kWh/kg. Savukaasupäästöt olivat hiilimonoksidin

ja typen oksidien osalta ensimmäisessä mittauksessa hieman pienemmät toiseen mittaukseen verrattuna. Muodostunut tuhka oli hienojakoista ja määrältään vähäistä, eikä se liannut laitosta merkittävästi. Tuhkajäännösprosentti oli 0,41.

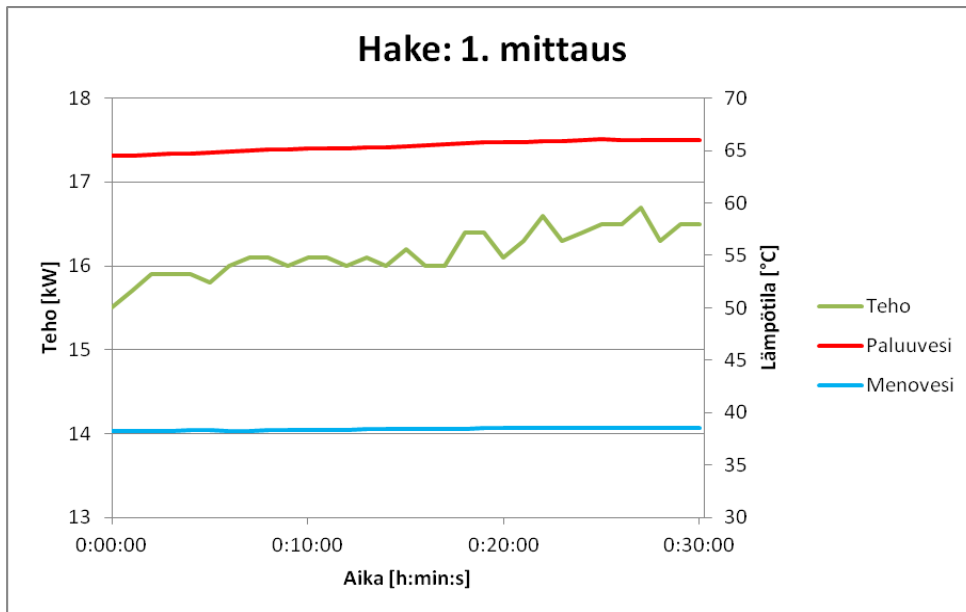


KUVA 8. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluueden lämpötila ajan funktiona toisen mittauksen aikana purupellettiä poltettaessa

4.2 Hake

Hakepellettiä toimitettiin koetta varten 15,1 kg, josta sytytysvaiheeseen sekä polttoaineelle sopivien polttimen asetusarvojen kohdilleen saamiseen kului 9,6 kg. Kappaleiden rakenne hankaloitti asetusarvojen löytämistä. Pelletti mureni herkästi, ja syöttöputkessa havaittiin raekooltaan hyvin pientä ainesta, sekä normaalikokoista pellettiä kerroksittain. Laadun epätasaisuuden vuoksi polttoainetta syötettiin polttimelle tiheään suurina annoksina, mutta kattilalta saatu teho oli syötettyyn määrään suhteessa liian pieni. Kun syöttöä lisättiin, liekki tukautui ja laitos sammui. Toisella yrittämällä saavutettiin suurempi teho, mutta pelletin vähäisen määrän vuoksi tehon tasaantumista ei ehditty odottaa, ja 30 minuutin mittauksen aikana teho nousikin 1 kW:n verran. (Kuva 9.) Palamisessa ei muo-

dostunut likaavaa nokea, mutta CO- ja NO_x-pitoisuudet savukaasuissa olivat suhteellisen korkeita ilmakertoimella 1,7. Kokonaishyötysuhde mittauksen ajalta oli noin 77 % ja tehollinen lämpöarvo 3,73 kWh/kg. Palamisesta ei aiheutunut merkittävää laitoksen likaantumista ja muodostunut tuhka oli koostumukseltaan hienoa. Poltetusta määrästä tuhkaksi muodostui noin 1 %.



KUVA 9. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana hakepellettiä poltettaessa

4.3 Olki

Olkipellettiä oli toimitettu 15,2 kg:n erä. Rakenteeltaan pelletti oli kiinteää ja erittäin tiivistä. Pellettien pituus vaihteli 1 – 7 cm:n välillä. Pelletin sytytyksessä ei ollut ongelmia ja palamisessa oli havaittava liekki. Sopivien asetusarvojen löytäminen oli kuitenkin haasteellista. Tehoa ei saatu vakiintumaan useista yrityksistä huolimatta, mikä johtui syötön pienestä määrästä. Syöttöä ei kuitenkaan voinut asettaa liian suureksi, sillä laitos antoi tällöin sammumisen merkkejä. Kertaalleen laitos jouduttiinkin käynnistämään uudelleen huonon palamisen vuoksi.

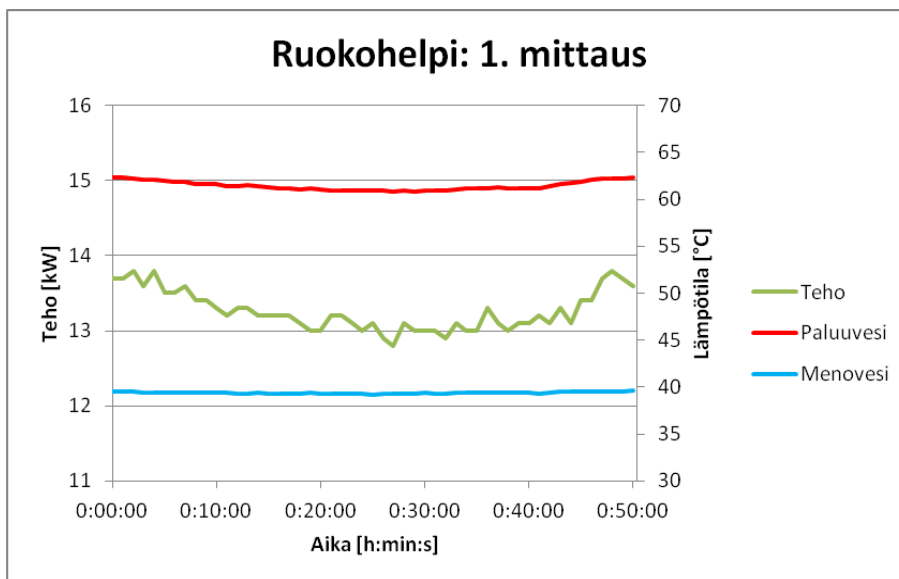
Kaasut eivät sekoittuneet tulipesässä kunnolla ja ilmaylimäärä oli huomattavan suuri. Ilmaylimäärästä huolimatta CO-pitoisuus kohosi yli 2000 ppm:n. Varsinaisia mittauksia ei olkipelletille voitu suorittaa tehon epävakaisuuden vuoksi. 20 minuutin ajalta kerättiin suuntaa-antavat savukaasumittaukset. Palaminen tuotti nokea, joka aiheutti huomattavaa laitoksen likaantumista. Tulipesä oli polton jälkeen peittynyt kauttaaltaan valkoisella pölykerroksella ja polttimen suuaukolle sekä tuhka-astiaan oli kerääntynyt klinkkeriä (kuva 10).



Kuva 10. Olkipellettiä poltettaessa muodostunut valkea tomu ja klinkkeri

4.4 Ruokohelpi

Ruokohelpipellettiä oli käytössä 15,5 kg, josta 6,7 kg kului alkuvaiheisiin ennen varsinaista mittausta. Pellettisäkkiin oli päässyt kosteutta; säkistä tuli tunkkainen haju ja osassa pelleteistä havaittiin hometta. Pellettien rakenne oli hyvä: kappa- leiden pituudessa ei ollut suurta hajontaa ja pelletti oli sopivan kiinteää ja tiivistä. Palamisessa esiintyi selkeä liekki, tosin pidempään poltettaessa liekki näytti ilmaantuvan vain tulipesän oikealla reunalla. Syy havaittiin laitosta puhdistetta- essa: polttimen sisälle oli kerääntynyt kiinteä klinkkeripaakku, joka oli tukkinut polttimen suuaukon osittain. Ensimmäisen mittauksen (50 minuuttia) aikana teho oli keskimäärin 13,2 kW, hajonnalla 0,5 kW. (Kuva 11.)



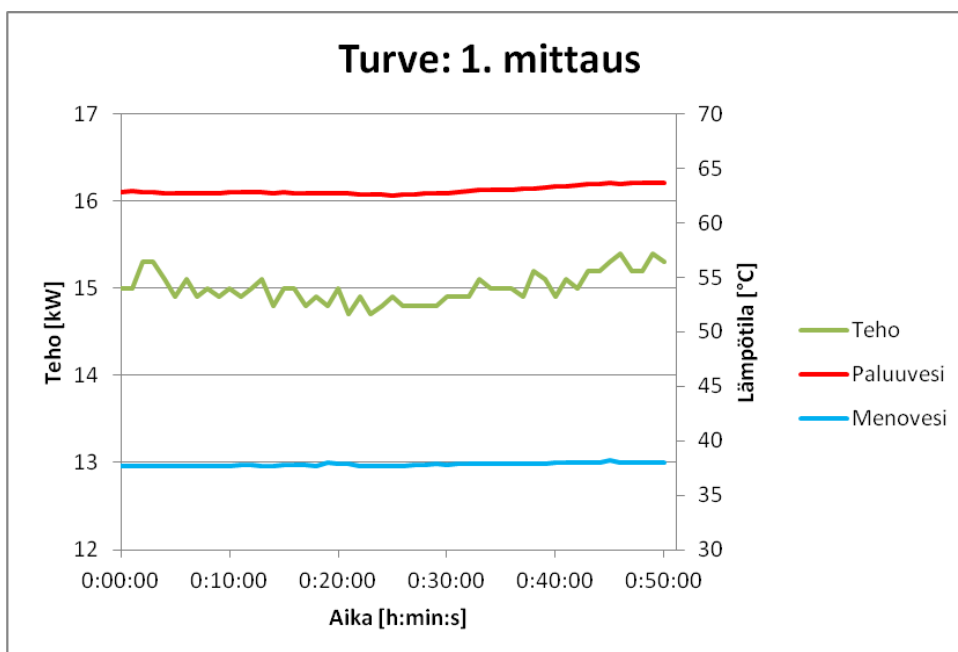
KUVA 11. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana ruokohelpipellettiä poltettaessa

Pienen tehon vuoksi savukaasujen lämpötila jäi matalaksi ja ilmaylimäärä suu- reksi, mikä vaikutti saatavaan kokonaishyötysuhteeseen (76 %). Teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 3,28 kWh/kg. Toinen mittaus suoritettiin 20 minuutin ajalta noin 20 kW:n teholla, jolloin savukaasujen lämpötila oli korkea ja kaasut pääsi- vät sekoittumaan tulipesässä kunnolla, ilmaylimäärän ollessa 1,6. Tehon lähen- nellessä kattilan nimellistehoa kokonaishyötysuhteeksi saatiin 80 % ja tehollis-

seksi lämpöarvoksi 3,71 kWh/kg. Savukaasupäästöt lisääntyivät hieman tehon noston myötä. Polton aikana muodostui klinkkeriä, jota kertyi myös polttimen sisälle. Tuhkajäännösprosentti oli tästä syystä 4.

4.5 Turve

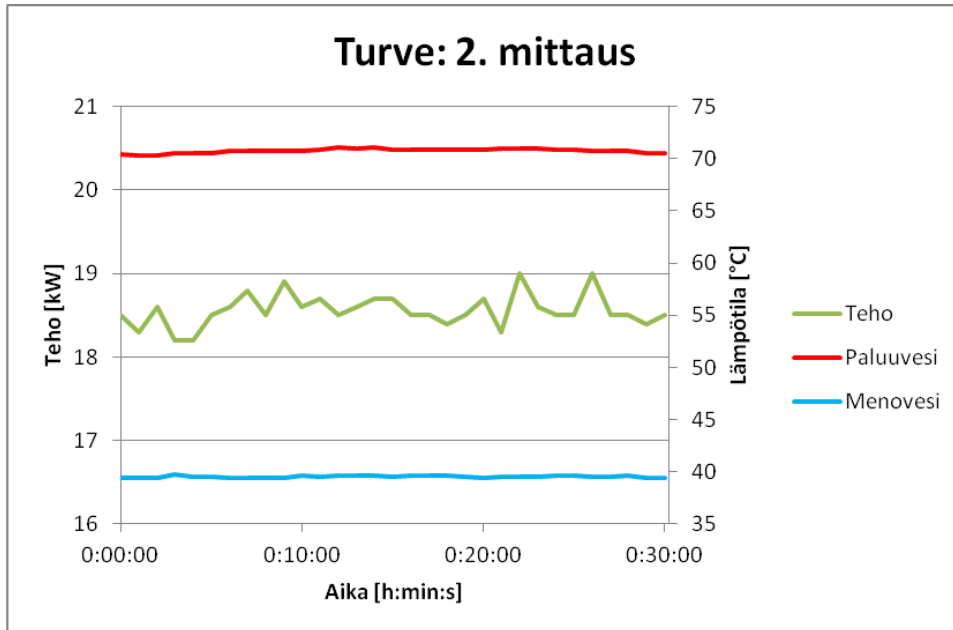
Turvellettiä oli toimitettu noin 15 kg, josta 6,2 kg kului sytytysvaiheessa ja asetusten hakemisessa. Rakenteeltaan pelletti oli kiinteää ja tiivistä. Turvelletin sytytyksessä ei ollut ongelmia ja halutun tehon saavuttamiseksi asetetut syötön arvot saatiin nopeasti kohdilleen. 15 kW:n teholla polttoaine paloi 50 minuutin ajan suhteellisen tasaisesti: suurta hajontaa ei ilmennyt. (Kuva 12.) Savukaasujen lämpötilaksi mitattiin keskimäärin 157 °C, jolloin ilmakerroin tulipesässä oli 1,8 ja saatu kokonaishyötysuhde 77 %.



KUVA 12. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluueden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana turvellettiä poltettaessa

Nostettaessa tehoa 18 kW:iin ilmakerroin parani, savukaasujen lämpötila nousi noin kymmenellä asteella ja hyötysuhteeksi saatiin 80 %. Pelletin vähäisen

määrän vuoksi suuremmalla teholla pystyttiin suorittamaan mittauksia vain 30 minuutin ajalta. (Kuva 13.) Tehollinen lämpöarvo oli matalammalla teholla poltettaessa 3,77 kWh/kg ja korkeammalla 4,07 kWh/kg.



KUVA 13. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona toisen mittauksen aikana turvepellettiä poltettaessa

Turvepellettiä poltettaessa muodostuvien typenoksidien määrä oli verrattain suuri, mutta hiilimonoksidin määrä jäi vähäiseksi. Kummallakaan teholla poltettaessa ei juuri muodostunut nokea. Palamisessa muodostui metallimaista klinkeriä, jota kertyi myös polttimen sisään, ja kokeen aikana arinan pyörähtäessä saattoi kuulla metallin hiertymisen ääniä. (Kuva 14.) Tuhkajäännösprosentti oli 3,2.

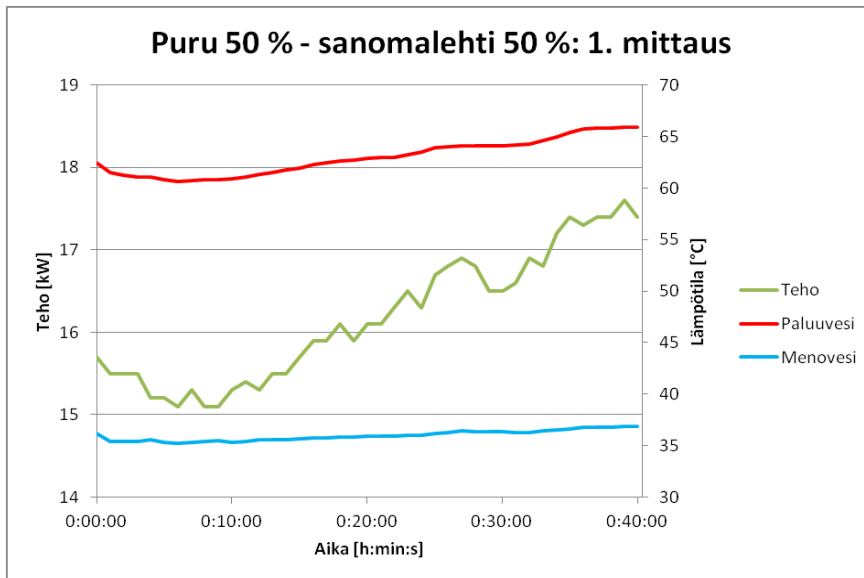


Kuva 14. Polttimen sisään kertynyttä metallimaista klinkkeriä

4.6 Puru 50 % - sanomalehti 50 %

Puru-sanomalehtipelletin rakenne oli hyvä ja tiivis, mutta kappaleiden pituudessa oli 1 - 2 cm hajontaa. Toimitettu erä oli massaltaan 15 kg, josta 8,6 kg kului ennen varsinaista mittausta. Sytyttyään polttoaine paloi selkeällä liekillä ja teho saatiin hiljalleen tasaantumaan 18 kW:iin. Hiilimonoksidipitoisuus lähti kuitenkin tuntemattomasta syystä äkillisesti nousuun ja hapen määrä putosi alle 1 tilavuusprosentin. Hapen määrää lisättiin ja savukaasuimurin tehoa nostettiin, mikä huononsi saatavaa tehoa. Pelletti vaikutti loppuvan kesken, joten pyydettyä tehoa oli pienennettävä 16 kW:iin. Teho vaikutti vakiintuvan ja mittauksia suoritettiin 40 minuutin ajan. Tänä aikana kattilan lämpötila kuitenkin nousi 80 asteesta 87 asteeseen ja teho muuttui 2 kW:n verran. (Kuva 15.) Keskimääräinen teho mittauksen ajalta oli 16 kW ilmaylimäärällä 1,6, jolloin kokonaishyötysuhteeksi saatiin 78 %. Teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 3,77 kWh/kg. Pellettiä poltetta-

essa muodostui kohtuullisesti nokea (nokiluku vaihteli arvovälillä 1 - 6) ja tuh-
kaksi poltetusta määrästä päätyi 4,2 %.

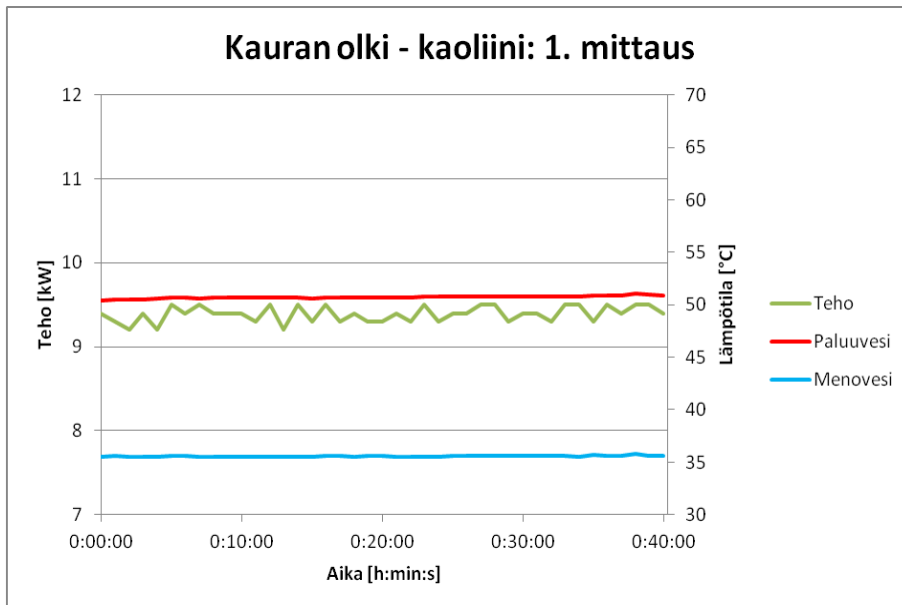


KUVA 15. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuv veden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana puru-sanomalehtipellettiä poltettaessa

4.7 Kauran olki - kaoliini

Koe aloitettiin 15 kg:n määrällä kauranolki-kaoliinipellettiä. Kun pellettiä oli poltettu noin 3 kg, jouduttiin koe keskeyttämään kattilan lämpötilan noustessa kylmävesivirran suurentamisesta huolimatta yli 90 asteiseksi. Syyksi todettiin kylmänveden toimituskatkos, mistä ei oltu ilmoitettu mittaajille. Uusi koe aloitettiin 12 kilolla polttoainetta. Rakenteeltaan pelletti oli tiivistä, mutta kappaleet pitkähköjä (2 – 5 cm). Polttimelle annettiin samat asetukset kuin aikaisemmin suoritettussa olkipelletin polttokokeessa, jolloin saatu teho jäi pieneksi. Täten tulipesän kaasut eivät sekoittuneet kunnolla ja ilmakerroin olikin keskimäärin 3,2. Sytykseen ja tehon tasaantumiseen kului noin 6 kg pellettiä, jolloin mittausta varten jäljelle jäi 5,6 kg. Mittaukset suoritettiin 40 minuutin ajalta, jona aikana teho pysyi vakiona noin 9,5 kW:ssa. (Kuva 16.) Teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 2,92 kWh/kg. CO-pitoisuus oli savukaasuissa 200 – 900 ppm typen oksidien

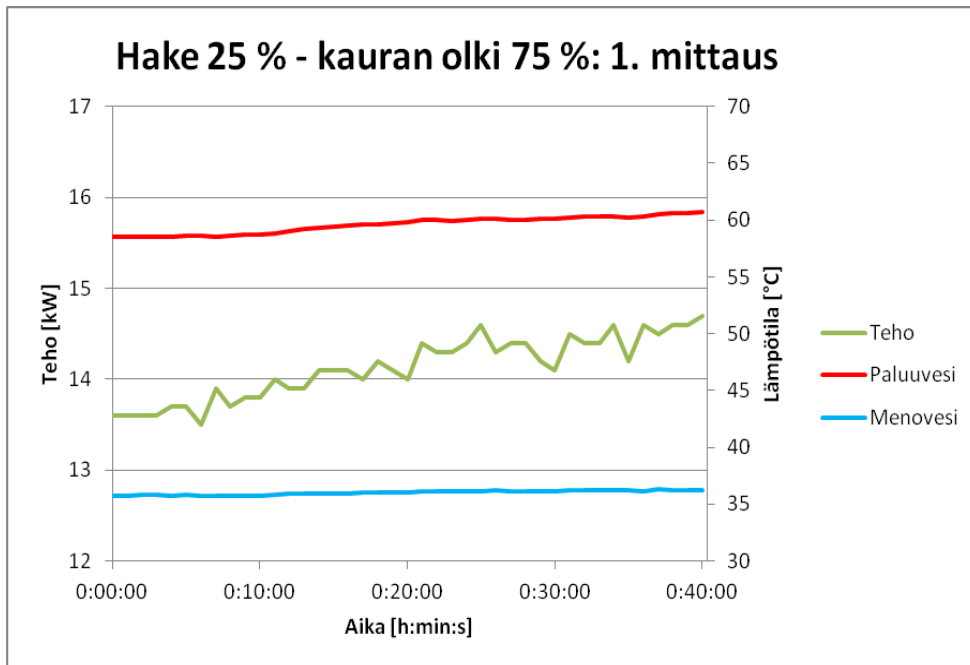
pitoisuuden ollessa keskimäärin 90 ppm:n luokkaa. Palamisessa muodostui runsaasti klinkkeriä, ja tuhkajäännösprosentti olikin 5,12.



KUVA 16. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana kauranolki-kaoliinipellettiä poltettaessa

4.8 Hake 25 % - olki 75 %

Hake-olkipellettiä oli toimitettu 9,2 kg, josta 5,8 kg kului sytyttämiseen ja palamistilanteen tasaantumiseen. Pelletin vähäisen määrän vuoksi mittaukset suoritettiin vain yhdellä, pienellä teholla. Hake-olkipellettisekoitus oli rakenteeltaan hyvä ja tiivis, eivätkä kappaleet murentuneet merkittävästi. Aloitettaessa mittaukset teho oli vakioitunut, mutta mittausten aikana teho lähtikin hiljalleen nousuun, nousten 40 minuutin aikana 1 kW:n verran. (Kuva 17.)



KUVA 17. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana hake-kauranolkipellettiä poltettaessa

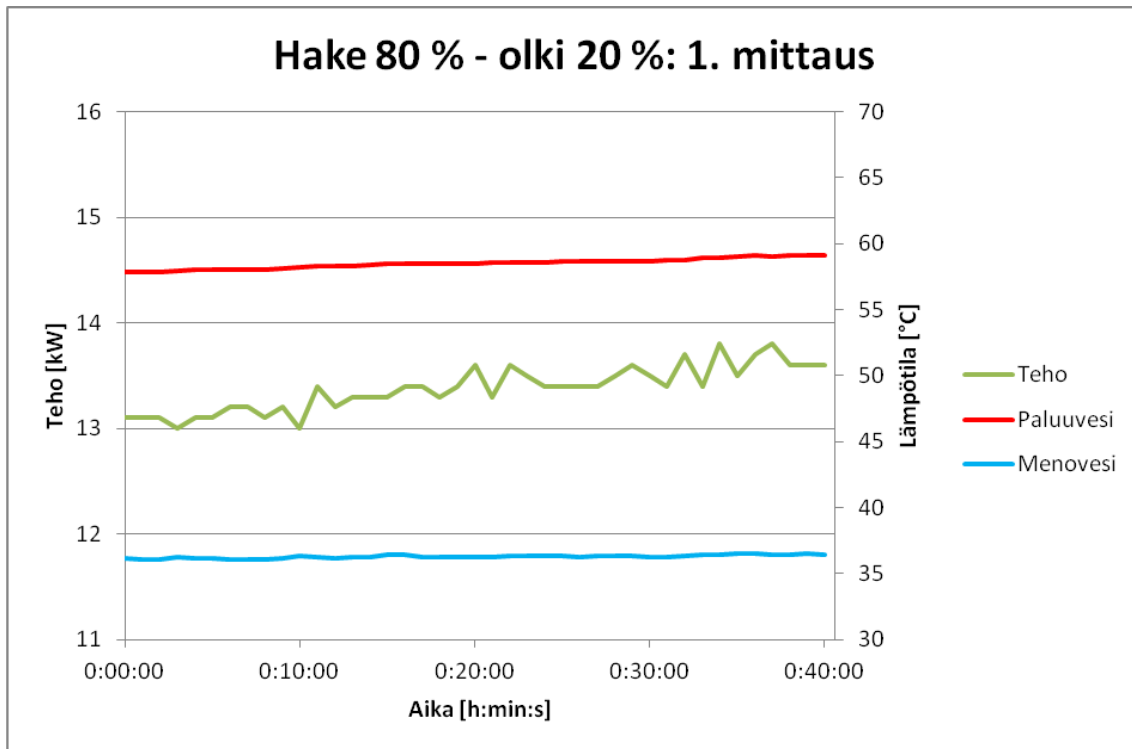
Teho oli keskimäärin 14 kW, jolloin palamisen kokonaishyötysuhde oli 76 % ja ilmaylimäärä 1,8. Teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 3,31 kWh/kg, jolloin suora hyötysuhde oli 69 %. Palamisessa muodostui klinkkeriä, jota oli kertynyt kattilan suuaukolle. (Kuva 18.) Myös tuhka-astiassa oli suuri määrä klinkkeriä ja tuhka-jäännösprosentti oli noin 2,5 %.



Kuva 18 Kattilan suuaukolle kertynyt klinkkerimuodostuma

4.9 Hake 80 % - olki 20 %

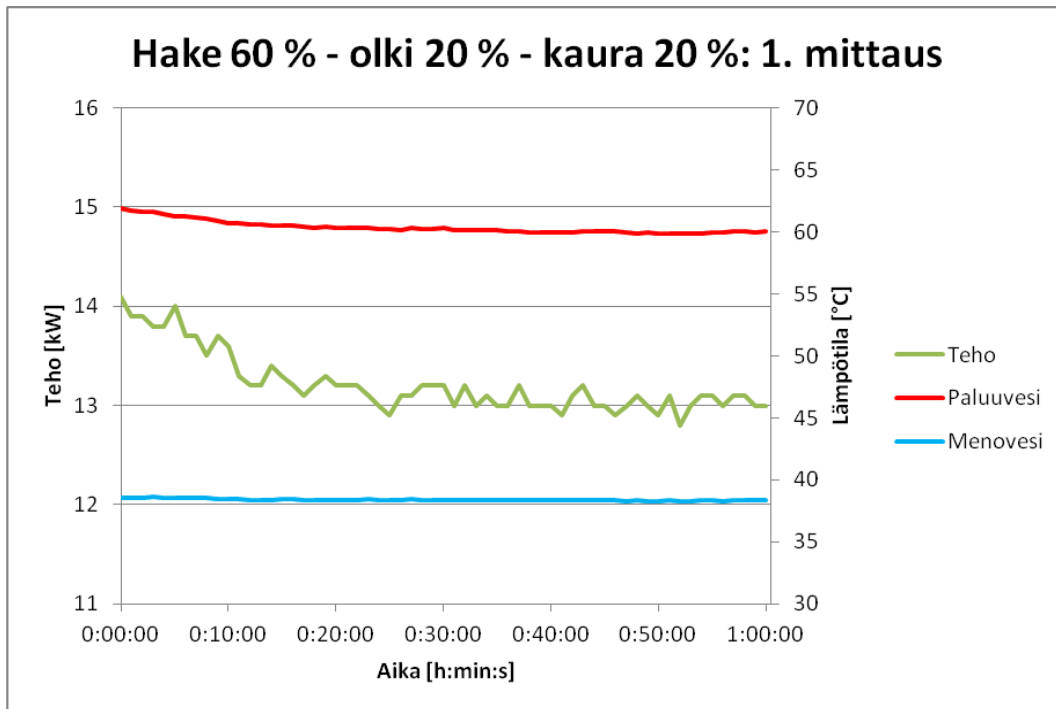
Toimitettu hake-olkipellettierä oli massaltaan noin 9 kg. Sytytykseen ja tehon tasaantumisvaiheeseen kului 6,3 kg pellettiä, joten itse mittausta varten jäi ai-noastaan 2,7 kg pellettiä. Syöttöä ei voinut saatavilla olevan pellettimäärän vuoksi asettaa kovin suureksi, joten mittauksia suoritettiin 40 minuutin ajalta keskimäärin 13 kW:n teholla. (Kuva 19.) Tällöin tehollinen lämpöarvo oli 3,6 kWh/kg ja kokonaishyötysuhde noin 77 %. Poltto ei noennut merkittävästi, mutta tuhkissa esiintyi jonkin verran klinkkeriä tuhkajäännösprosentin ollessa 1,6.



KUVA 19. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana hake-olkipellettiä poltettaessa

4.10 Hake 60 % - olki 20 % - kaura 20 %

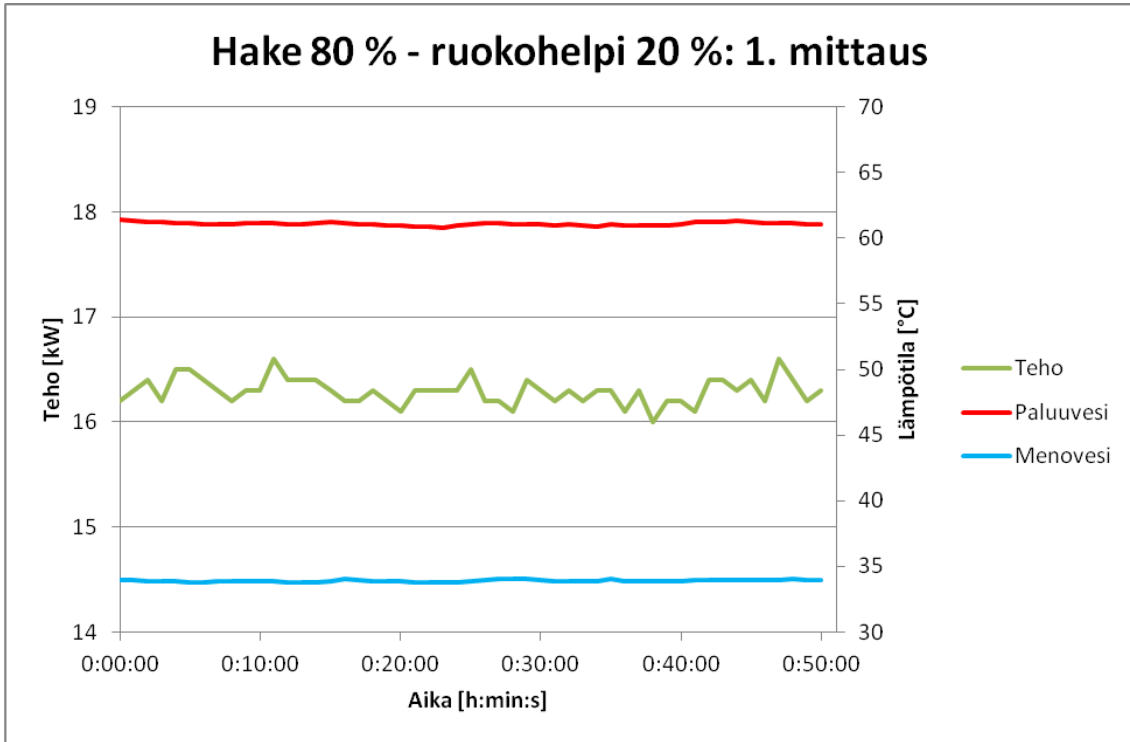
Hake-olki-kaurapelletti oli koostumukseltaan pehmeää ja helposti murenevaa. Suuri osa pelleteistä oli hajonnut murusiksi vaikuttaen polttoaineen tiheyteen ja polttimelle kulkeutuvaan aineksen määrään. Toimitetusta 9,3 kg erästä 3,8 kg jäi mittauksia varten, joita suoritettiin 60 minuutin ajalta. (Kuva 20.) Mittausten aikana teho tasaantui 13 kW:iin, jolloin kokonaishyötysuhde oli noin 78 % ja saatu tehollinen lämpöarvo 3,6 kWh/kg. Polttoprosessissa muodostui jonkin verran nokea. Tuhkajäännösprosentti oli noin 2,5, ja muodostunut tuhka oli suurimmaksi osaksi hienojakoista. Jonkin verran klinkkeriä oli palamisessa myös muodostunut.



KUVA 20. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana hake-olki-kaurapellettiä poltettaessa

4.11 Hake 80 % - ruokohelppi 20 %

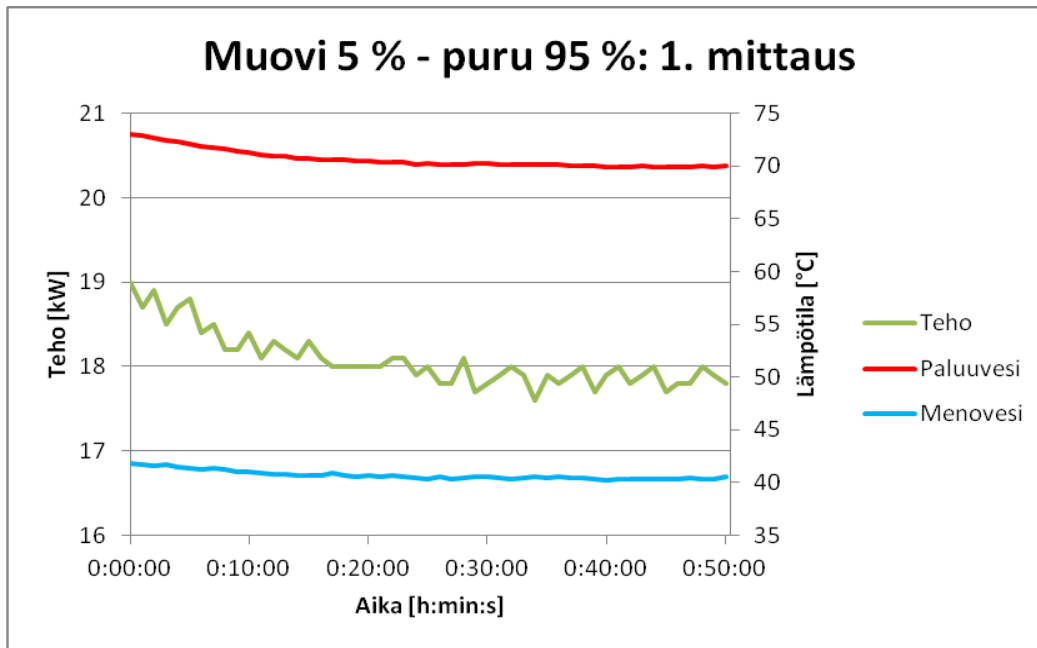
Hake-ruokohelpipellettien koostumus oli hyvä: jokseenkin pehmeä, muttei mureneva. Pellettiä oli toimitettu noin 15 kg, josta 7 kg kului sytytyksessä ja asetusarvojen kohdilleen säätämisessä. Polttoaine syttyi ongelmitta ja palamisessa havaittiin selkeä liekki. Ensimmäiset mittaukset otettiin 50 minuutin ajalta tehon vakiintuessa noin 16 kW:iin. (Kuva 21.) Toiset mittaukset otettiin 10 minuutin ajalta 18 kW:n teholla. Pienemmällä teholla poltettaessa saatiin teholliseksi lämpöarvoksi 3,54 kWh/kg ja kokonaishyötysuhteeksi 76 %. Suuremmalla teholla ilmakerroin parani, mutta tehollinen lämpöarvo huononi 3,34 kilowattituntiin kilolle, samoin kokonaishyötysuhde laski 74 %:iin. Muodostunut tuhka (1,2 % syötetystä pellettimäärästä) oli suurimmaksi osaksi hienojakoista, mutta vähäinen määrä klinkkeriä oli myös muodostunut.



KUVA 21. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana hake-ruokohelpipellettiä poltettaessa

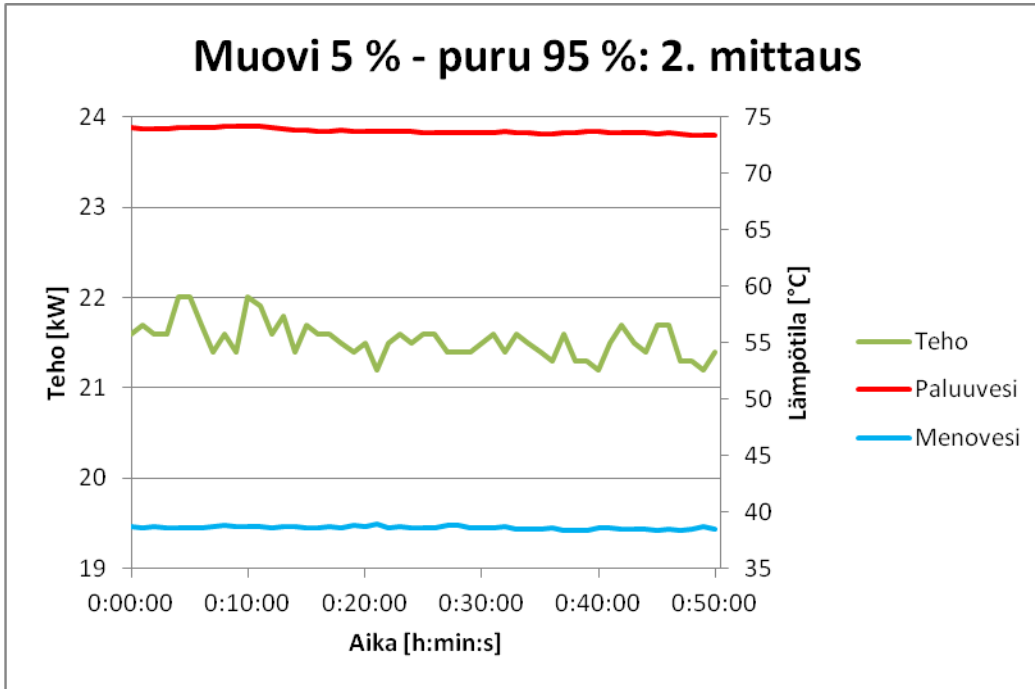
4.12 Muovi 5 % - puru 95 %

Rakenteeltaan muovi-purupelletti oli hieman pehmeä, mutta kappaleet eivät murentuneet merkittävästi. Pelletin kulkeutumista syöttöputkessa täytyi tarkkailla, sillä aines ei välillä kulkeutunut syöttöputkessa painovoimaisesti polttimelle. Toimitetusta 16,6 kg:n määrästä 5,124 kului sytyttämiseen ja tehon tasaantumiseen. Tehon näyttäessä tasaantuneen 19 kW:iin aloitettiin ensimmäiset mittaukset. Mittauksia suoritettiin 50 minuutin ajalta, jona aikana teho tasaantui 18 kW:iin. (Kuva 22.) Kokonaishyötysuhde oli noin 82 % ja teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 4,17 kWh/kg.



KUVA 22. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana muovi-purupellettiä poltettaessa

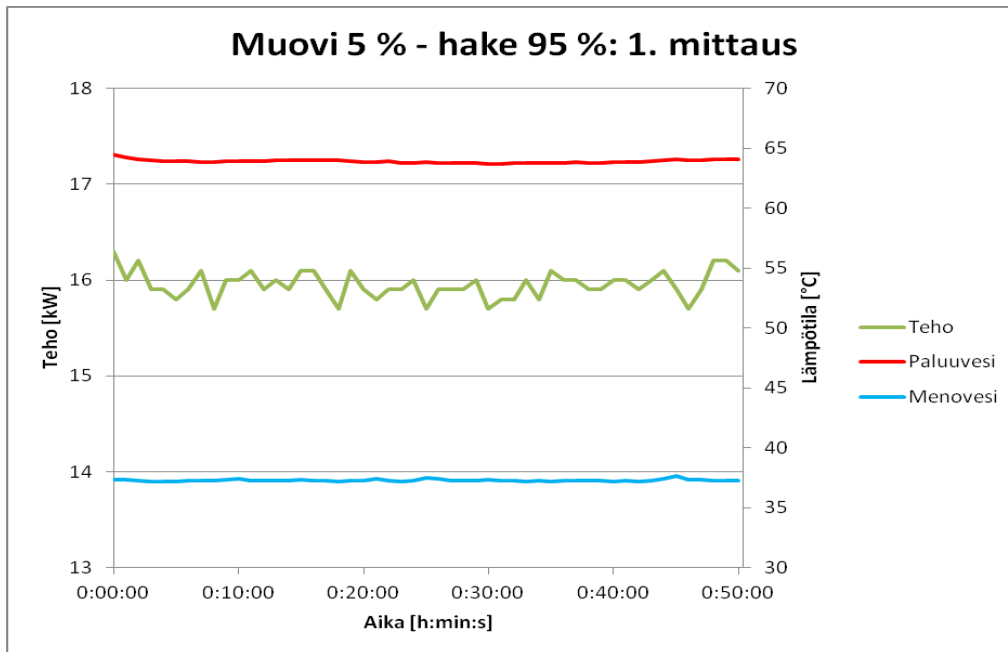
Toista mittaukseen varten teho oli tavoitteena nostaa 20 kW:iin, mutta teho tasan-
 tui lopulta 21,5 kW:iin. (Kuva 23.) Teho ylitti kattilan nimellistehon, joten suora
 hyötysuhde laski noin kahdella prosentilla ja tehollinen lämpöarvo putosi 4,10
 kilowattituntiin kilogrammalle. Muovi-purusekoitepelletti ei tuottanut huomattavia
 päästöjä. Tuhkaksi muodostui noin 1 % poltetusta kokonaispellettimäärästä,
 eikä sen puhdistaminen tuottanut ongelmia. Koostumukseltaan tuhka oli osittain
 hienojakoista, osittain rakeista. Pelletin poltossa ei muodostunut nokea juuri
 lainkaan.



KUVA 23. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuv veden lämpötila ajan funktiona toisen mittauksen aikana muovi-purupellettiä poltettaessa

4.13 Muovi 5 % - hake 95 %

Muovi-hakepelletti oli löysärakenteista ja helposti murenevaa. Toimitetussa erässä oli havaittavissa normaalikokoista pellettiä, pieniä muruja sekä muovi-rihmaa. Aineksen jumiutuminen syöttöputkeen oli jokseenkin ongelmallista. Toimitetusta 14,9 kg:sta 6,1 kg kului ennen ensimmäisen mittauksen aloitusta. Ensimmäiset mittaukset otettiin 50 minuutin ajalta tehon ollessa noin 16 kW. (Kuva 24.) Tällöin lämpöarvo oli 3,83 kWh/kg ja kokonaishyötysuhde 78 %. Seuraavia mittauksia varten teho nostettiin 20 kW:iin, mutta pelletin vähäisen määrän vuoksi mittauksia suoritettiin vain 20 minuutin ajalta. Lämpöarvoksi saatiin 3,80 kWh/kg ja kokonaishyötysuhteeksi 78 %. Saadun energian kannalta tulokset huononivat, mutta päästöjen osalta suuremmalla teholla poltettaessa haitallisten yhdisteiden pitoisuudet pieneivät suhteessa. Savukaasujen lämpötila nousi tehon muutoksen myötä noin 16 astetta ja ilmakerroin parani. Tuhkajäännösprosentti muovihakesekoitepelletillä oli 1,7, ja tuhka oli koostumukseltaan osittain hienoa, osittain rakeista.

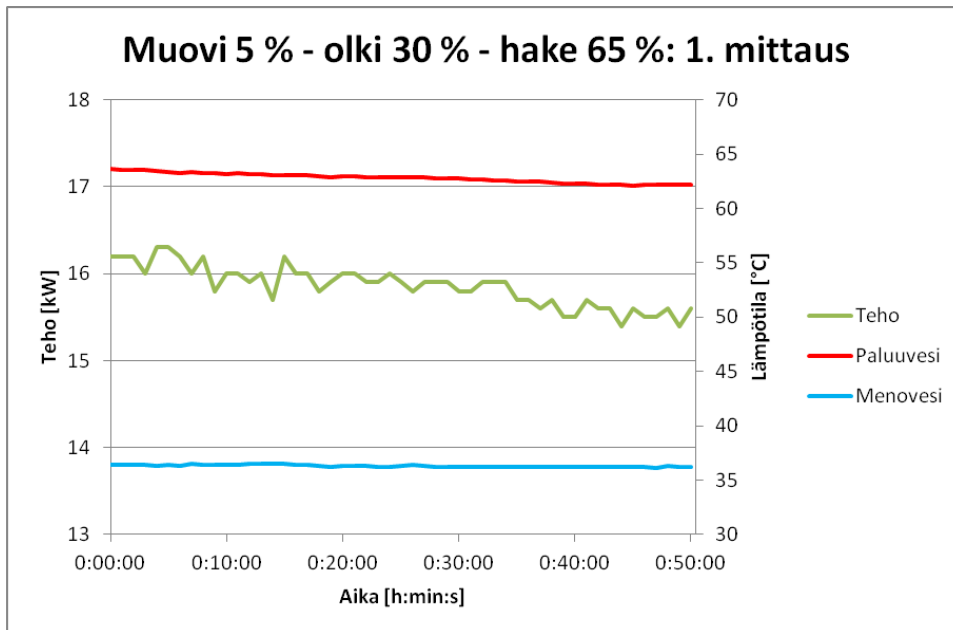


KUVA 24. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuv veden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana muovi-hakepellettiä poltettaessa

4.14 Muovi-olki-hakepelletit

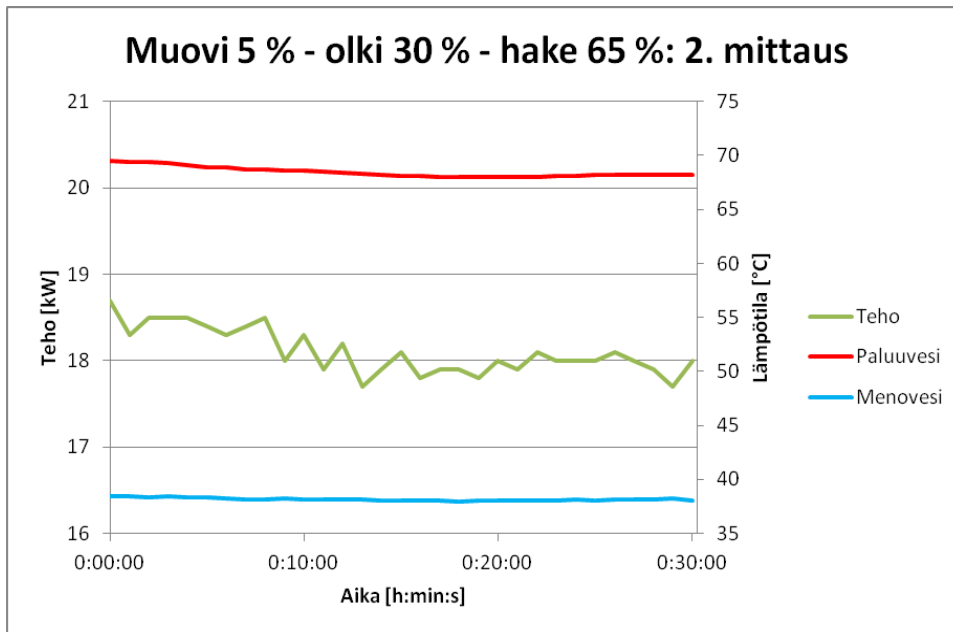
4.14.1 Muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 %

Muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 % -pelletti oli rakenteeltaan pehmeä, mutta toimitettu erä oli tasalaatuinen eikä pellettien murentuminen ollut merkittävä ongelma. Toimitetusta 15 kg:sta 6,9 kg kului sytytyksessä ja sopivien asetusrvojen löytämisessä. Pelletti syttyi hyvin, mutta polttimen vaihdettua käyntivaiheelle liekki hiipui näkymättömiin, jolloin syöttöä pienennettiin mahdollisen tukahtumisen välttämiseksi. Ensimmäiset mittaukset suoritettiin 50 minuutin ajalta, jolloin saatu teho oli keskimäärin noin 16 kW ja tehollinen lämpöarvo 4,10 kWh/kg. (Kuva 25.)



KUVA 25. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 % -pellettiä poltettaessa

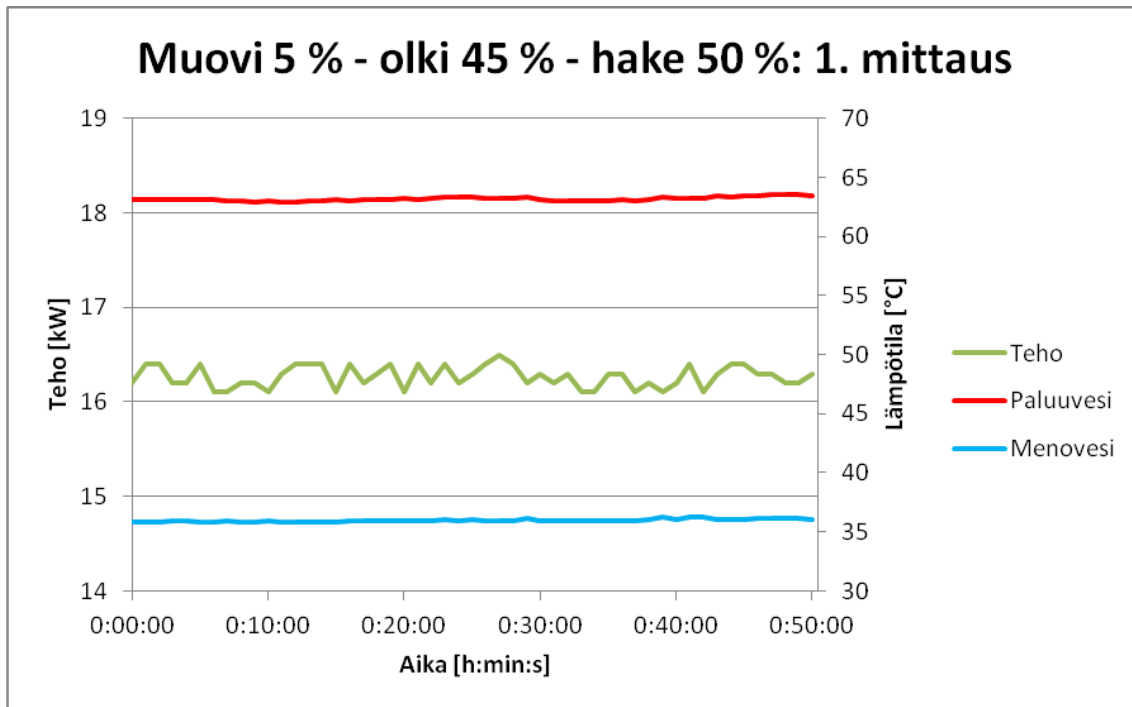
Syöttöä suurennettiin tavoitteena 20 kW:n teho, mutta palaminen tukahtui ja poltin ajoi itsensä sammutustilaan. Tilanne saatiin palautettua ja lopulta toista mittausta varten pellettiä oli jäljellä 2,2 kg, joka riitti 30 minuutin ajalle 18 kW:n tehoa otettaessa. (Kuva 26.) Lämpöarvo oli tällöin 4,16 kWh/kg. CO-pitoisuus oli molemmissa mittauksissa alle 100 ppm, mutta NOx-pitoisuus lähenteli 300 ppm:ää. Tuhkaksi muodostui 1,7 % toimitetusta materiaalista, ja se oli koostukseltaan jokseenkin karkeaa.



KUVA 26. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona toisen mittauksen aikana muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 % - pellettiä poltettaessa

4.14.2 Muovi 5 % - olki 45 % - hake 50 %

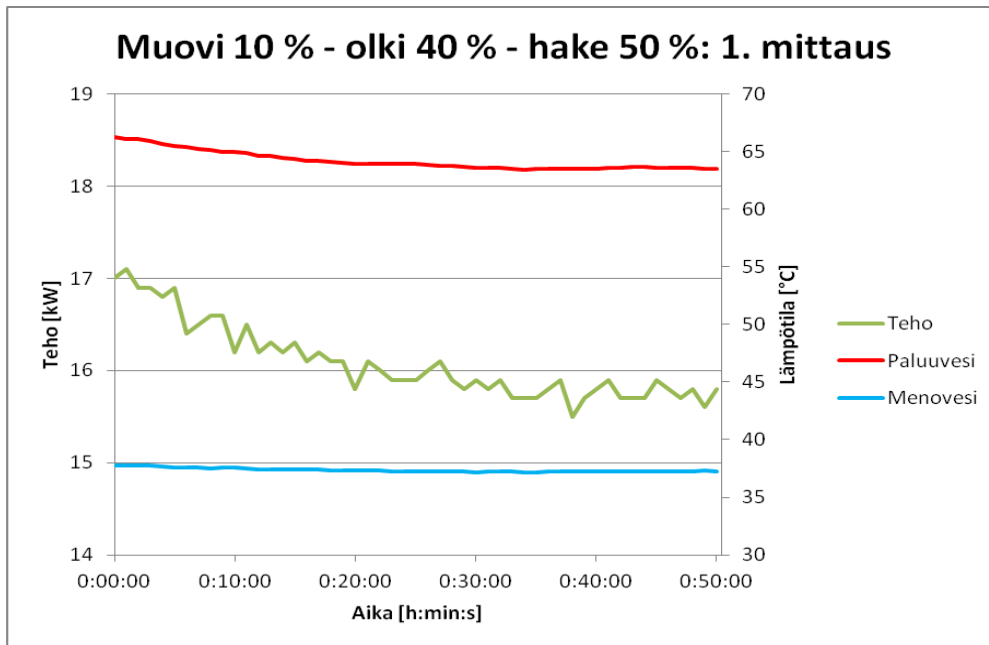
Rakenteeltaan muovi 5 % - olki 45 % - hake 50 % -pelletti oli jokseenkin kiinteää, eivätkä kappaleet murentuneet merkittävästi. Toimitettu erä oli massaltaan 15 kg, josta 6,4 kg kului ennen ensimmäistä mittausta. Pelletin syttyä palamisessa havaittiin selkeä liekki, eikä tukahtumisen merkkejä ollut havaittavissa. Tehon tasaannuttua noin 16 kW:iin, suoritettiin mittauksia 50 minuutin ajan. (Kuva 27.) Teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 3,83 kWh/kg. Nostettaessa syöttöä liekki tukahtui ja poltin ajoi itsensä sammutusvaiheeseen. Käynnistettäessä poltin uudelleen ei tilannetta saatu kuitenkaan tasaantumaan ennen pellettien loppumista. Tuhkajäännösprosentti oli vain noin 0,5, ja tuhka koostumukseltaan karkeahkoa.



KUVA 27. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana muovi 5 % - olki 45 % - hake 50 % -pellettiä poltettaessa

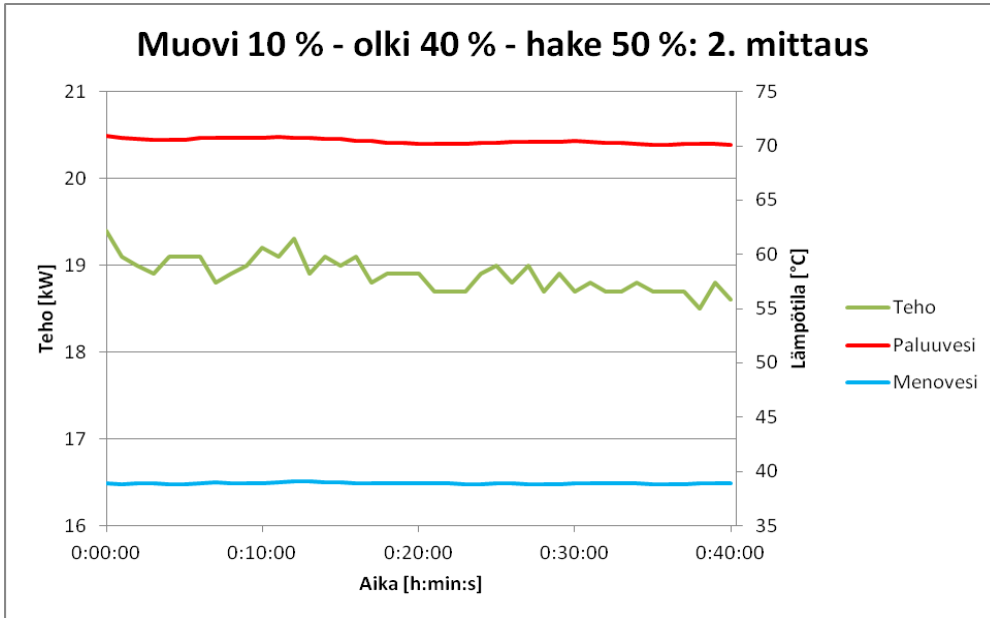
4.14.3 Muovi 10 % - olki 40 % - hake 50 %

Muovi 10 % - olki 40 % - hake 50 % -pelletti oli rakenteeltaan pehmeää, mutta se ei jumiutunut merkittävästi syöttöputkeen. Toimitettu erä oli 15 kg, josta 5,2 kg kului ennen mittauksia sytyttämiseen ja tehon tasaantumiseen. Polttimen asetusarvoja säätämällä saatiin alussa heikosti ilmennyt liekki vahvistumaan. Tehon ollessa keskimäärin 16 kW suoritettiin mittauksia 50 minuutin ajalta. (Kuva 28.) Tuolloin tehollinen lämpöarvo oli 4,03 kWh/kg ilmaylimäärällä 1,7.



KUVA 28. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona ensimmäisen mittauksen aikana muovi 10 % - olki 40 % - hake 50 % -pellettiä poltettaessa

Tehoa muutettiin portaittain suuremmaksi, jotta välttyttiin polttimen sammumiselta. Tehon asetuttua noin 19 kW:iin suoritettiin toiset mittaukset 40 minuutin ajalta, jolloin teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 4,23 kWh/kg ilmaylimäärällä 1,6. (Kuva 29.)



KUVA 29. Kattilasta saatu teho sekä kattilan meno- ja paluuveden lämpötila ajan funktiona toisen mittauksen aikana muovi 10 % - olki 40 % - hake 50% - pellettiä poltettaessa

Tuhkajäännös oli noin 5 % palamisessa muodostuneen suuren klinkkerimäärän vuoksi. Klinkkeriä ja tuhkaa oli kertynyt runsaasti myös polttimen suuaukolle. (Kuva 30.)



KUVA 30. Polttimen ja kattilan yhtymäkohtaan kertynyt klinkkeri ja tuhka

5 TULOSTEN ANALYSOINTI

Saatuja palamistuloksia ja käyttökokemuksia tarkastellaan suhteuttamalla niitä kaikkiin 16 polttokokeesta saatuihin tuloksiin.

5.1 Puru

Kokeen perusteella purupelletti on erinomainen polttoaine kotitalouskäyttöön. Pelletin rakenne kestää kuljetusta ja säilytystä, eikä materiaalia poltettaessa muodostu klinkkeriä, jolloin laitteisto ei vaadi lisäkomponentteja eikä puhdistus ole ongelmallista. Suuremmalla teholla poltettaessa purupelletti sijoittuu toiseksi parhaaksi tehollisen lämpöarvon ja kokonaishyötysuhteen osalta, mikäli muovisekoitepelletit jätetään huomioimatta. Palamistulokset ovat siis vertailussa erittäin kilpailukykyisiä ja käyttäjän kannalta purupelletti on helppokäyttöinen.

5.2 Hake

Hakepelletin tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon mittaukseen kulunut aika. 30 minuutin otos palamisesta ei anna luotettavia tuloksia, etenkin kun teho ei tänä aikana ollut vakioitunut, vaan nousussa. Pelletin löysä rakenne voi kuitenkin olla ongelmallinen polttoaineen kuljetusta, siilosäilytystä ja laitoksen tukkeutumista ajatellen. Asiakkaalle toimittaminen esimerkiksi puhallusautolla olisi hakepelletin kyseessä ollessa todennäköisesti mahdotonta kappaleiden murenemisen vuoksi. Aines pakkautuu tiiviimmin raekoon ollessa pieni, minkä vuoksi polttimelle kulkeutuva polttoaineen määrä vaihtelee, aiheuttaen myös saatavan tehon epävakautta. Palamisominaisuuksiltaan hakepelletti on hyvä polttoaine, joskin CO-pitoisuus on vertailussa suurin.

5.3 Oiki

Okipelletin kosteuspitoisuus on vertailua varten toimitetuista pelleteistä suurin. Kokeen aikana havaitusta palamiskäyttäytymisestä päätellen tulipesä oli liian pieni suhteessa polttoaineen kosteuspitoisuuteen, minkä vuoksi koe epäonnistui. Runsaan klinkkerimäärän muodostumisen vuoksi olisi laitteiston osattava

myös käsitellä klinkkeriä. Muita pellettilaatuja poltettaessa ei ollut vastaavan mittakaavan ongelmia, joten olkipelletin soveltuvuus kotitalouskäyttöön on kyseenalaistettava.

5.4 Ruokohelppi

Tulosten perusteella ruokohelpipelletti on vertailussa kilpailukykyinen, sillä kattilan nimellisteholla poltettaessa on suora hyötysuhde vertailussa paras. Suurimmat häviöt epäsuoraa hyötysuhdetta ajatellen aiheutuivat syntyneen tuhkan (klinkkerin) runsaasta määrästä, mikä todennäköisesti muodostui pienellä teholla poltettaessa. Kokonaishyötysuhteenkin osalta ruokohelpipelletti sijoittuu kolmen parhaan joukkoon. Käyttömukavuudeltaan pelletti on helppokäyttöinen, sillä sen säilytyksessä tai polttimelle syötettäessä ei kohdattu ongelmia. Klinkkerin muodostumisen syyn selvittämiseksi ruokohelpipelletin polttokoe olisi hyvä uusida suuremmalla teholla. Mikäli klinkkeriä vielä kattilan nimellisteholla poltettaessa muodostuu, vaatii ruokohelpipelletti lisälaitteistoja klinkkerin käsittelyä varten. Pelletin ostohinnan tulisi tällöin kompensoida laitteiston lisäkustannuksia.

5.5 Turve

Turvepelletti on mittauksista saatujen tuloksien perusteella varteenotettava vaihtoehto polttoaineeksi pellettilämmitysjärjestelmään. Rakenteeltaan turvepelletti kestää asiakkaalle kuljetuksen ja säilytyksen, eikä pelletin käsittely ollut ongelmallista. Saavutettu tehollinen lämpöarvo on turvepelletillä erinomainen. Eri-tyistä huomiota tulee kuitenkin kiinnittää typen oksidien määrään (18 kW:n teholla yli 300 ppm) ja muodostuvaan metallimaiseen klinkkeriin, joka saattaa aiheuttaa ongelmia polttimessa ja laitosta puhdistettaessa. On myös aiheellista pohtia, onko turve uusiutuva luonnonvara.

5.6 Puru 50 % - sanomalehti 50 %

Koska kattilalämpötila ei pysynyt vakiona mittauksen ajan, eivät puru- sanomalehtipelletin tulokset ole täysin luotettavia ja koe olisi hyvä uusida. Käyttä-

jän kannalta pelletti on kuitenkin helposti käsiteltävä, eikä palamistilanteen yhtä äkkinen järkkyminen todennäköisesti johtunut käytetystä polttoaineesta. Hiili-monoksidi- ja typenoksidipäästöt ovat vertailun pienimmästä päästä. Tuhkaa muodostui tilavuudellisesti paljon verrattaessa esimerkiksi purupellettiin, mikä voi muodostua ongelmaksi pidempiaikaisessa poltossa, sillä laitos täytyy puhdistaa tiheämmin.

5.7 Kauran olki - kaoliini

Kauranolki-kaoliinipellettiä poltettiin varovaisesti pienellä teholla aiemmin olkipelletin polttokokeessa todettujen ongelmien vuoksi. Syöttöä olisi voinut hiljalleen nostaa, mutta polttoainetta ei riittänyt tarpeeksi. Voidaan kuitenkin todeta kaoliinin parantavan olkipelletin palamista siinä määrin, että olkea voitaisiin pienessäkin laitoksessa hyödyntää. Koe olisi hyvä suorittaa uudelleen kattilan nimellisteholla, jotta materiaalin todellinen potentiaali saataisiin selville. Pelletin rakenne kestää kuljetuksen ja säilytyksen, eikä se tuottanut ongelmia koetta suoritettaessa.

5.8 Hake 25 % - olki 75 %

Kyseistä hake-olkipellettilaatu tulisi polttaa suuremmalla teholla parempien tulosten aikaansaamiseksi. Oljen polttamisen aiheuttamiin ongelmiin, kuten suuren kosteuspitoisuuden aiheuttamaan tulipesän lämpötilan laskuun, tulisi kuitenkin varautua. Olkisekoitepellettejä vertailtaessa on ko. sekoitussuhteen pelletti kilpailukykyinen: sen päästöt ovat pienimmät ja kokeen suorittamisessa oli vähiten ongelmia.

5.9 Hake 80 % - olki 20 %

Mittaukset tulisi hake 80 % - olki 20 % -pelletille suorittaa uudelleen suuremmalla teholla, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisempia. Tuloksista voi kuitenkin tehdä muutamia huomioita verrattaessa niitä esimerkiksi hakepelletin tuloksiin. Rakenteeltaan hake-olkisekoitepelletti pysyy kasassa paremmin ja on tasalaa-

tuisempi kuin hakepelletti. Suora hyötysuhde oli hieman parempi hakepellettiin verrattaessa, ja CO- sekä NOx -päästöt olivat huomattavasti pienempiä.

5.10 Hake 60 % - olki 20 % - kaura 20 %

Vertailukelpoisempien tulosten saavuttamiseksi olisi hake-olki-kaurapelletin polttokoe hyvä suorittaa uudestaan kattilan nimellisteholla. Verrattaessa muihin hake-olkisekoitepelletteihin on ko. pellettisekoitus palamisen tuloksien perusteella varteenotettavin vaihtoehto selkeästi parhaimman suoran hyötysuhteen perusteella. Rakenteeltaan ko. sekoitepelletti ei ollut juurikaan hakepellettiä parempi helposti murenevan rakenteensa ja tästä johtuvan polttoaineen epätasalaatuisuuden vuoksi. Pelletin rakenne voi olla ongelmallinen tehdastuotantoa ajatellen, sillä tasaista laatua voi olla vaikea saada toimitettua asiakkaalle pellettien murentuessa viimeistään asiakkaalle kuljetettaessa. Tästä syystä kyseisen sekoitussuhteen pellettilaatua ei tällaisenaan voi suositella jatkojalostettavaksi.

5.11 Hake 80 % - ruokohelppi 20 %

Vertailtaessa hake-ruokohelpisekoitepelletin palamistuloksia täyshake- ja täysruokohelpipelletin tuloksiin on todettava sekoituksen menestyneen kolmikosta heikoimmin. Ruokohelppi parantaa hakepelletin rakennetta kiinteyttämällä sitä, mistä syystä käytettävyydeltään sekoite on puhdasta hakepellettiä parempi vaihtoehto. Sekoitetta poltettaessa palamisen kokonaishyötysuhde on hieman huonompi. Klinkkerin muodostumisen osalta hake-ruokohelpipelletti on parempi vaihtoehto kuin puhdas ruokohelpipelletti, sillä klinkkeriä muodostuu huomattavasti vähemmän. Hake-ruokohelpipelletissä on potentiaalia, ja suhteutettaessa palamisominaisuuksia käytettävyyteen voidaan todeta sekoitteen olevan parempi vaihtoehto kuin puhtaan hakepelletin.

5.12 Muovi 5 % - puru 95 %

Muovi-purusekoitepelletti paloi parhaimmalla kokonaishyötysuhteella tutkimuksen kohteena olleista pellettilaaduista. Päästöjenkin osalta ko. pellettilaatu pärjää vertailussa kiitettävästi. Muovi heikentää jonkin verran purupelletin rakennet-

ta ja muovi-purupelletti murenee herkemmin kuin purupelletti. Kokeessa oli käytössä poikkeuksellinen pelletinsyöttöputki, missä pelletti ei kulkeutunut kunnolla painovoimaisesti vaan aiheutti jonkin verran tukkeutumia. Normaalissa pellettilämmitysjärjestelmässä on käytössä kuljetusruuvi, joka kuljettaa pellettiaineksen polttimelle, jolloin muovi-purupelletti ei todennäköisesti jumiudu syöttöputkeen. Kokonaisuutena tarkasteltu pellettilaatu on vartenotettava vaihtoehto polttoaineksi kotitalouksille.

5.13 Muovi 5 % - hake 95 %

Muovi-hakesekoitepelletissä suurin ongelmakohta on pelletin löysä rakenne. Hakepelletti itsessään on herkästi hajoavaa ja muovin lisääminen heikentää rakennetta ennestään. Kuten puhtaalla hakepelletillä, myös muovihakepelletillä CO-pitoisuus on poikkeuksellisen suuri verrattaessa muihin tarkasteltuihin pellettilaatuihin. Tasalaatuisen polttoaineen toimittaminen asiakkaalle olisi todennäköisesti mahdotonta, eikä ko. pellettilaataa voi täten suositella tehdasvalmistukseen.

5.14 Muovi-olki-hakepelletit

Muovi-olki-hakepellettilaatuja keskenään vertailtaessa voidaan kokonaisuutta katsoen parhaimmaksi todeta muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 % - sekoitussuhde. Saaduissa tuloksissa ei ollut suuria eroja laatumuunnosten välillä. Hyödyksi saatua energiaa tarkasteltaessa muovi-olki-hakepelletin tulokset ovat erinomaisia vertailtaessa kaikkien 16 pellettilaadun tuloksia. Typenoksideja muodostui enemmän kuin useimmissa laaduissa. Käytettävyydessä suurin ongelma on lähinnä tehon muuttaminen, joka täytyy kokeiden perusteella suorittaa hiljalleen syöttöä lisäämällä, jottei palaminen tukahdu. Muovia 10 % sisältävällä laadulla myös klinkkerin muodostuminen voi olla ongelma.

6 YHTEENVETO

Työn päätarkoituksena oli selvittää pellettiteollisuuden raaka-ainepohjan laajentamisen potentiaalia. Toimitetusta 16 erilaisesta pellettilaadusta selvitettiin niiden palamisen ominaisuuksia sekä käytettävyyttä 20 kW:n laitteistossa, ja tulosten valossa jatkotuotannon kannattavuutta.

Kokeista saadut tulokset ovat pääosin suuntaa-antavia. Tulosten perusteella voi pohtia tiettyjen pellettilaatujen jatkojalostuksen kannattavuutta ja potentiaalisimmista laaduista kokeet olisi hyvä suorittaa uudelleen. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui poltettavan materiaalin määrä. Toimitetusta erästä pääsääntöisesti kolmasosa, toisinaan jopa puolet, kului sytytykseen ja tehon tasaantumisesta odotellessa. Parhaimpiin tuloksiin päästiin kun pellettiä poltettiin noin 20 kW:n teholla, mutta osassa kokeista tähän ei voitu pyrkiä pelletin vähäisen määrän ollessa rajoitteena. Jatkossa suoritettavia vastaavia polttokokeita varten tulisi pellettierän olla vähintään 20 kilogrammaa.

Kokonaisuutta tarkasteltaessa palamisen osalta sopimattomimmaksi polttoaineksi pienlämmityslaitokseen osoittautui suuria määriä olkea sisältävät pellettilaadut. Oljen käyttö polttoaineena vaatisi laitteiston muutoksia, joilla huomioitaisiin suuri kosteuspitoisuus ja klinkkerin muodostuminen. Huomioiden oljen kalorimetrinen lämpöarvo, joka oli vertailussa olleissa pellettilaaduista huonoin, ei olkipelletin käyttö polttoaineena todennäköisesti olisi lisälaitteiston investointikustannuksiin nähden edullista. Olkea voidaan kuitenkin hyödyntää pellettipolttoaineissa pieninä määrinä, esimerkiksi hakkeen kanssa sekoitteena.

Hakepelletin löysästä rakenteesta johtuen polttoaineen tiheys vaihteli. Tällöin polttimelle kulkeutuvan massan määrä vaihteli ja aiheutti epätasaisuutta saatavaan tehoon sekä ajoittaista ilmavajetta, mikä näkyi CO-pitoisuuden nousuna. Tehdastuotannon kannalta löysärakenteisen pelletin tuotanto olisi vähintäänkin ongelmallista ja mahdollisesti epäkannattavaa, sillä tuotannossa pyritään tasalaatuisen polttoaineeseen. Tehtaalla pelletin varastointivaiheessa sekä säilytyksessä löysärakenteisen pelletin laatu todennäköisesti kärsisi, mikä tuottaisi

häviöitä tehtaalle ja tyytymättömyyttä asiakkaissa. Polttoaineen laadun epätaisuus aiheutti ongelmia seuraavilla näytteillä: hake, muovi-hake, hake-kauran olki-kaura.

Klinkkerin muodostuminen on myös huomionarvoinen ominaisuus peruskäyttäjän kannalta katsoen. Klinkkeriä muodostui lähinnä olkea ja ruokohelpeä sisältävissä pelleteissä. Myös turvepelletillä klinkkeriä muodostui. Polttokokeet suoritettiin osittain tai kokonaan matalalla teholla, mikä saattoi osaltaan vaikuttaa klinkkerin muodostumiseen. Kokeiden perusteella muovin lisääminen vähentää klinkkerin muodostumista olkea sisältävissä pellettilaaduissa, kun muovin osuus seoksesta on 5 %.

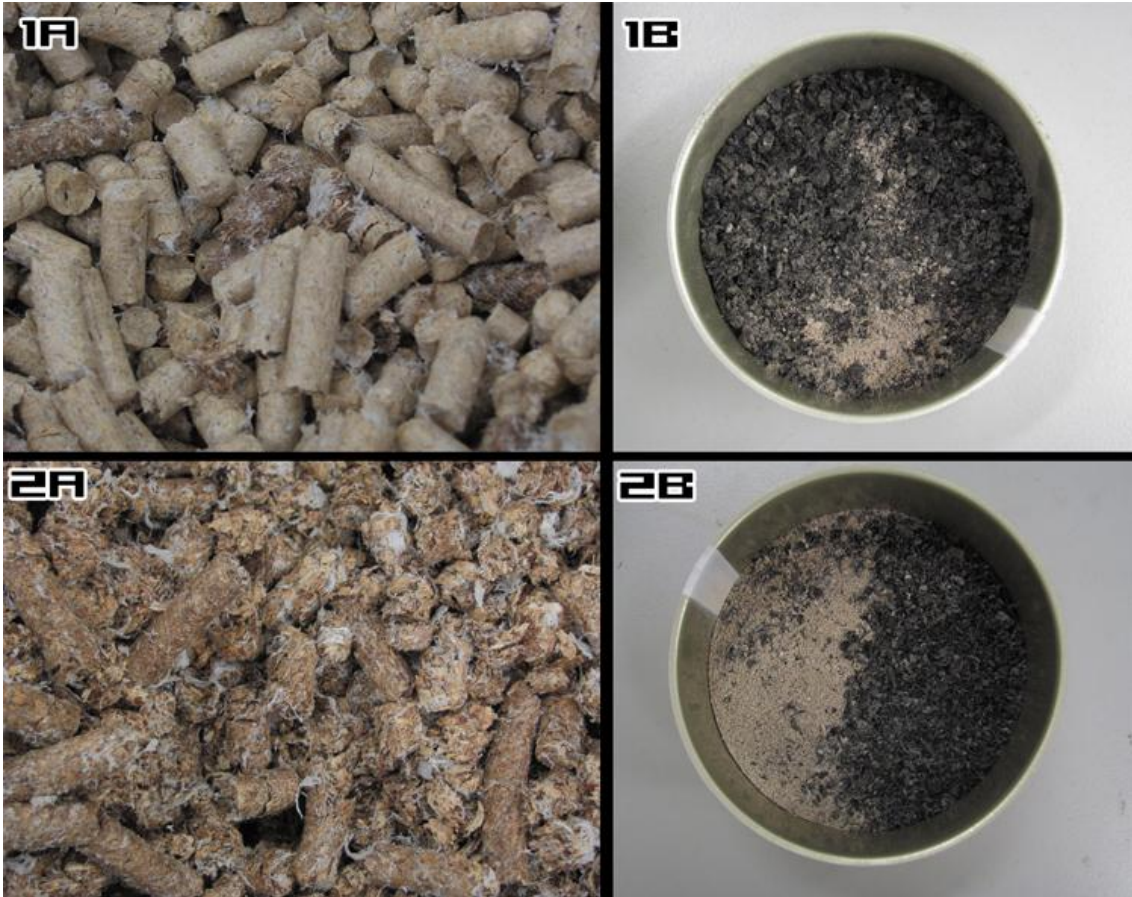
Epäonnistuneita kokeita lukuun ottamatta yksikään pellettilaatu ei tuottanut merkittäviä päästöjä. Polttokokeissa havaittu nokeaminenkin jäi vähäiseksi, eikä se aiheuttaisi ympäristöön merkittäviä kosmeettisia ongelmia. Pienhiukkasten muodostumista ei tässä työssä ollut mahdollista tutkia, joten myös pienhiukkaspäästöt tulisi selvittää ennen pellettilaadun laajempaan tuotantoon ottoa.

Kokeissa havaitut ongelmat ovat suurimmilta osin ratkaistavissa. Ottaen huomioon uusiutuvien energianlähteiden tarpeen on raaka-ainepohjan laajentaminen saatujen tulosten perusteella täysin mahdollista ja kannattavaakin. Laajempaa tutkimusta kaipaavatkin potentiaalisten laatuojen pienhiukkaspäästöt, tehdastuotanto sekä kustannustehokkuus.

LÄHTEET

1. Antila, Anna-Maija – Karppinen, Maarit – Leskelä, Markku - Mölsä, Heini - Pohjakallio, Maija 1999. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita.
2. Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari – Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus
3. Alakangas, Eija – Erkkilä, Ari – Oravainen, Heikki 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf>. Hakupäivä 16.11.2013.
4. Niskala, Mikko 2012. T620403 LVI-laitosten mittaukset 2 3 op. Opintojaksion luentomateriaali syksyllä 2012. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
5. Mr Pellets, verkkokauppa. Saatavissa: <http://mrpellets.se>. Hakupäivä 23.11.2013
6. Instruction Manual Dräger MSI Compact NT-S and Dräger MSI Compact NT-D. 2010. Ohjekirja. Dräger Safety MSI GmbH.
7. JMW Limited, verkkokauppa. Saatavissa: <http://www.jmwlimited.co.uk/>. Hakupäivä 2.12.2013.

LIITE 1

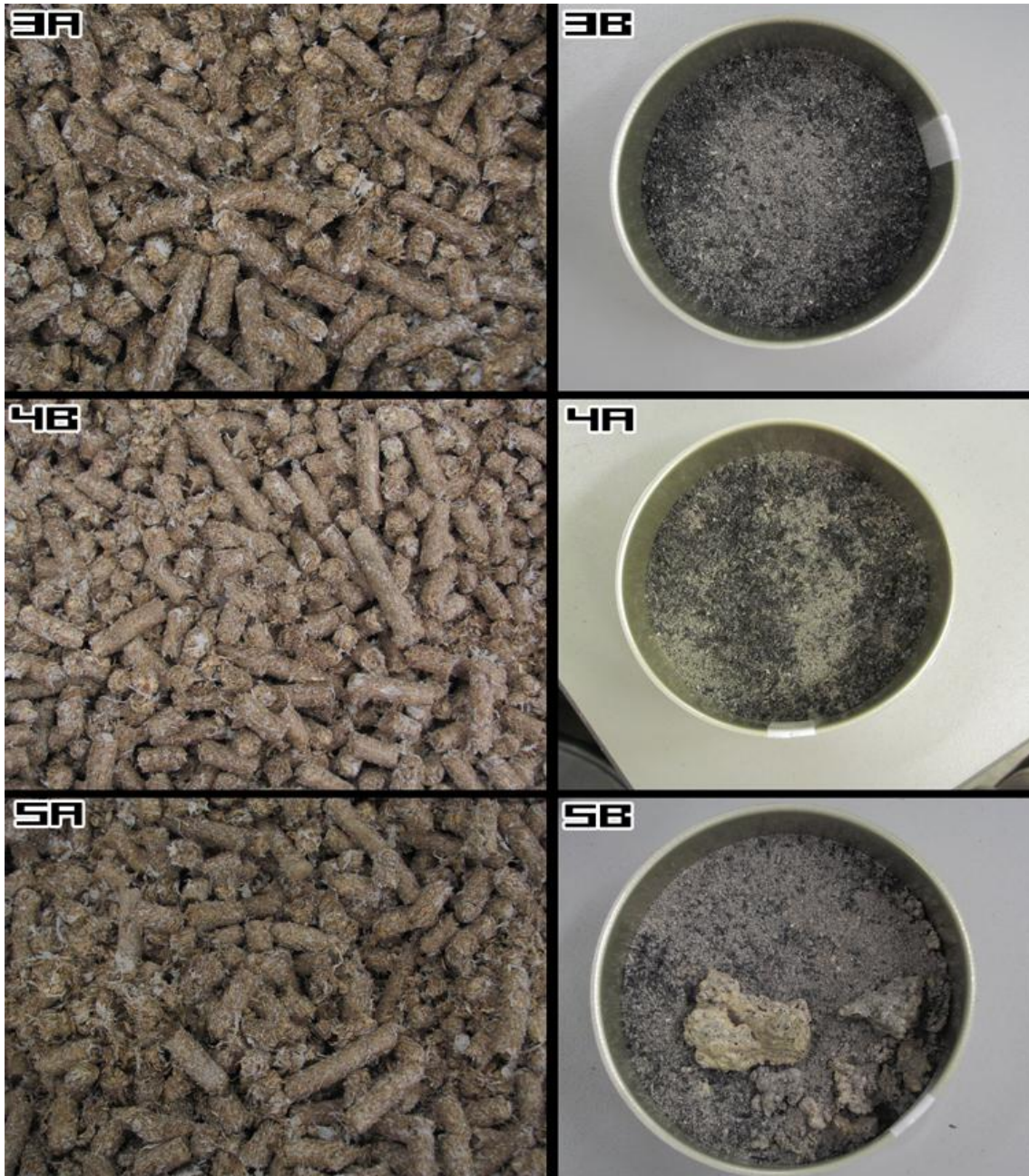


1A: Muovi 5 % - puru 95 % - pelletti

1B: Muovi 5 % - puru 95 % - pelletin tuhkanäyte

2A: Muovi 5 % - hake 95 % - pelletti

2B: Muovi 5 % - hake 95 % - pelletin tuhkanäyte



3A: Muovi 5 % - olki 45 % - hake 50 % - pelletti

3B: Muovi 5 % - olki 45 % - hake 50 % - pelletin tuhkanäyte

4A: Muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 % - pelletti

4B: Muovi 5 % - olki 30 % - hake 65 % - pelletin tuhkanäyte

5A: Muovi 10 % - olki 40 % - hake 50 % - pelletti

5B: Muovi 10 % - olki 40 % - hake 50 % - pelletin tuhkanäyte



6A: Puru 50 % - sanomalehti 50 % - pelletti

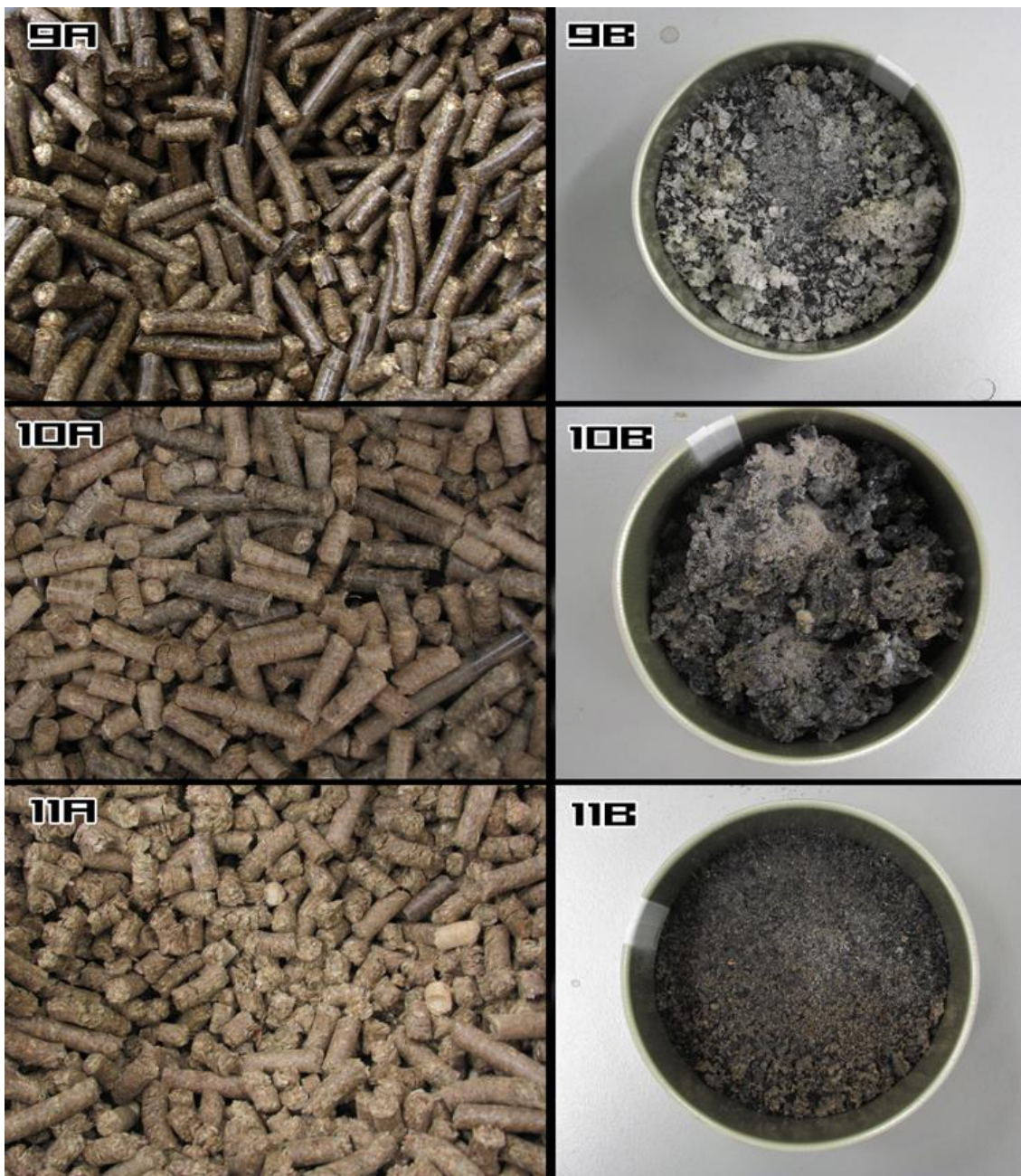
6B: Puru 50 % - sanomalehti 50 % - pelletin tuhkanäyte

7A: Turvepelletti

7B: Turvepelletin tuhkanäyte

8A: Purupelletti

8B: Purupelletin tuhkanäyte



9A: Olki – kaoliini –pelletti

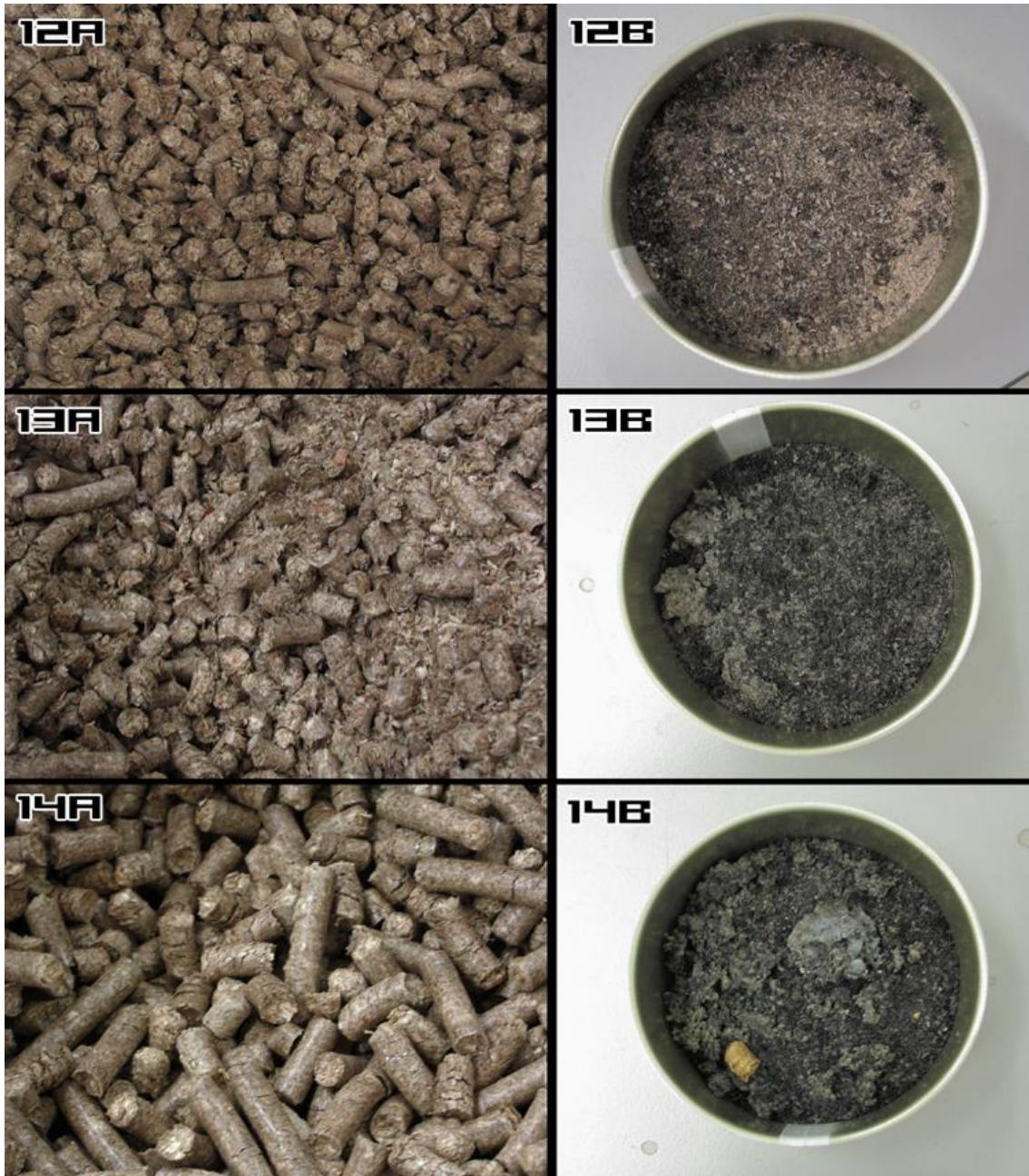
9B: Olki – kaoliini –pelletin tuhkanäyte

10A: Olkipelletti

10B: Olkipelletin tuhkanäyte

11A: Hake 80 % - ohran olki 20 % -pelletti

11B: Hake 80 % - ohran olki 20 % -pelletin tuhkanäyte



12A: Hakepelletti

12B: Hakepelletin tuhkanäyte

13A: Hake 60 % - kauran olki 20 % - kaura 20 % -pelletti

13B: Hake 60 % - kauran olki 20 % - kaura 20 % -pelletin tuhkanäyte

14A: Hake 25 % - kauran olki 75 % -pelletti

14B: Hake 25 % - kauran olki 75 % -pelletin tuhkanäyte



15A: Ruokohelpipelletti

15B: Ruokohelpipelletin tuhkanäyte

16A: Hake 80 % - ruokohelpi 20 % -pelletti

16B: Hake 80 % - ruokohelpi 20 % -pelletin tuhkanäyte

LIITE 2

Pellettilaatu	Teho	m	Lämpöarvo	E _{pa}	Tehollinen lämpöarvo	Q _{grutto}	Q _{netto}	Suora hyötysuhde	Epäsuora hyötysuhde	Kokonais- hyötysuhde
	kW	kg	kWh/kg	MJ	kWh/kg	kWh	kWh	%	%	%
Puru	14,33	3,84	5,21	71,99	3,74	20,00	14,33	71,64	86,33	78,99
	17,96	4,54	5,21	85,23	3,95	23,68	17,96	75,84	85,68	80,76
Kauran olki	-	-	4,46	-	-	-	-	-	-	-
Hake 25%/Kauran olki 75%	14,13	4,28	4,77	73,44	3,31	20,40	14,13	69,26	83,70	76,48
Hake 60%/Kauran olki 20%/Kaura 20%	13,22	3,69	4,94	65,60	3,59	18,22	13,22	72,53	83,34	77,94
Hake	16,16	4,33	5,28	82,38	3,73	22,89	16,16	70,60	83,91	77,25
Hake 80%/Ohran olki 20%	13,38	3,71	5,10	68,14	3,61	18,93	13,38	70,67	83,26	76,97
Hake 80%/Ruokohelppi 20%	16,29	4,60	5,21	86,27	3,54	23,96	16,29	67,99	83,80	75,90
Hake 80%/Ruokohelppi 20%	18,09	5,42	5,21	101,64	3,34	28,24	18,09	64,07	84,30	74,18
Turve	15,00	3,98	5,23	74,98	3,77	20,83	15,00	72,03	82,35	77,19
Turve	18,56	4,56	5,23	85,86	4,07	23,85	18,56	77,81	82,20	80,00
Ruokohelppi	13,26	4,05	4,58	66,77	3,28	18,55	13,26	71,50	81,19	76,34
Ruokohelppi	19,66	5,30	4,58	87,47	3,71	24,30	19,66	80,92	79,42	80,17
Sanomalehtipaperi 50%/Puru 50%	16,18	4,29	5,10	78,84	3,77	21,90	16,18	73,85	82,64	78,24
Muovi 5%/Hake 95%	15,95	4,16	5,25	78,67	3,83	21,86	15,95	72,98	83,46	78,22
Muovi 5%/Hake 95%	20,22	5,33	5,25	100,75	3,80	27,99	20,22	72,26	83,80	78,03
Muovi 5%/Puru 95%	18,08	4,34	5,40	84,37	4,17	23,44	18,08	77,13	86,31	81,72
Muovi 5%/Puru 95%	21,53	5,25	5,40	102,21	4,10	28,39	21,53	75,84	83,73	79,78
Muovi 5%/Olki 45%/Hake 50%	16,27	4,25	-	-	3,83	-	-	-	-	-
Muovi 5%/Olki 30%/Hake 65%	15,85	3,87	-	-	4,10	-	-	-	-	-
Muovi 5%/Olki 30%/Hake 65%	18,11	4,36	-	-	4,16	-	-	-	-	-
Muovi 10%/Olki 40%/Hake 50%	16,08	3,99	-	-	4,03	-	-	-	-	-
Muovi 10%/Olki 40%/Hake 50%	18,90	4,47	-	-	4,23	-	-	-	-	-
Olki/Kaoliini	9,39	3,22	-	-	2,92	-	-	-	-	-

Pellettilaatu	T _{savukaasu} °C	T _{huone} °C	O ₂ %	CO ppm	CO ₂ %	NO ppm	NO _x ppm	Ilmakerroin λ	Nokiluku
Puru	157,8	24,4	8,7	52	12,0	70	70	1,7	0
	170,3	25,5	6,6	60	13,9	87	87	1,5	1
Kauran olki	146,0	18,9	13,7	3148	7,1	180	180	2,9	3
Hake 25%/Kauran olki 75%	156,8	23,4	9,6	59	11,0	207	209	1,8	2
Hake 60%/Kauran olki 20%/Kaura 20%	160,6	21,9	10,9	93	9,4	212	217	2,1	1
Hake	173,6	20,9	8,7	160	11,8	247	252	1,7	0
Hake 80%/Ohran olki 20%	160,2	22,8	10,9	56	9,6	189	192	2,1	0
Hake 80%/Ruokohelpi 20%	180,0	24,1	8,6	29	12,0	206	207	1,7	1
Hake 80%/Ruokohelpi 20%	186,5	25,1	7,3	28	13,1	230	231	1,5	2
Turve	156,7	21,1	9,4	33	11,2	279	282	1,8	1
Turve	168,7	22,5	6,7	30	13,8	333	335	1,5	1
Ruokohelpi	157,0	22,6	10,2	57	10,4	292	296	2,0	1
Ruokohelpi	182,2	23,9	8,0	68	13,1	310	312	1,6	2
Sanomalehtipaperi 50%/Puru 50%	162,0	22,5	7,8	49	12,7	79	79	1,6	3
Muovi 5%/Hake 95%	156,3	18,7	9,9	188	10,8	225	236	1,9	0
Muovi 5%/Hake 95%	173,6	19,6	6,2	112	14,1	265	270	1,4	1
Muovi 5%/Puru 95%	156,4	21,8	6,5	35	14,1	135	136	1,5	1
Muovi 5%/Puru 95%	183,3	22,9	6,8	46	13,7	149	150	1,5	0
Muovi 5%/Olki 45%/Hake 50%	159,3	21,6	7,9	66	12,5	315	317	1,6	2
Muovi 5%/Olki 30%/Hake 65%	158,0	20,7	8,9	80	11,7	275	277	1,7	1
Muovi 5%/Olki 30%/Hake 65%	170,4	21,7	8,1	93	12,4	296	298	1,6	1
Muovi 10%/Olki 40%/Hake 50%	160,6	20,3	8,4	88	12,1	271	272	1,7	3
Muovi 10%/Olki 40%/Hake 50%	178,1	21,7	7,6	93	12,9	307	308	1,6	2
Olki/Kaoliini	154,3	22,9	14,5	514	6,3	166	173	3,2	1