

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# KUUMAA VETTÄ TUOTTAVIEN ALLE 5MW LEIJUPETIKATTILOIDEN HYÖTYSUHTEEN LASKENTAOHJELMA

TEKIJÄ    Atro Luukkonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Atro Luukkonen	
Työn nimi Kuumaa vettä tuottavien alle 5 MW leijupetikattiloiden hyötysuhteen laskentaohjelma	
Päiväys 6.4.2022	Sivumäärä/Liitteet 82/2
Toimeksiantaja Savonia-ammattikorkeakoulu	
<p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Savonia-ammattikorkeakoulu ja opinnäytetyö liittyi toimeksiantajan liike-toimintapalveluiden laajennukseen, jossa asiakkaille aletaan tarjoamaan kattiloiden hyötysuhdemäärytyksiä. Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda opinnäytetyön toimeksiantajalle standardin SFS-EN 12952-15 mukainen kuumavesikattilan hyötysuhteen laskentaohjelma ja asiakkaalle annettavat tutkimustodistus sekä tutkimusraportti hyötysuhteen määrittämisestä. Opinnäytetyö rajattiin koskemaan alle 5 MW kuumavesikattiloita, jotka toimivat leijupetiteknikalla ja käyttävät polttoaineena kiinteää polttoainetta.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin selvittämällä, mitä asioita kuuluu kuumavesikattilan hyötysuhteen määrittämiseen standardin SFS-EN 12952-15 mukaisesti ja kuinka laskenta toteutetaan standardin SFS-EN 12952-15 mukaan. Hyötysuhteen standardin mukaista määrittämistä varten suoritettiin koeajo Savonian Energiatutkimuskeskuksella sijaitsevalla 0,3 MW leijupetikattilalla. Koeajon tavoitteena oli määrittää kattilan hyötysuhde standardin mukaisesti 100 %:n teholla, mutta standardista jouduttiin poikkeamaan koeajon kestossa ja näytteenottoväleissä. Koeajo jouduttiin keskeyttämään, koska kattila ei saavuttanut haluttua tehotasoa ja vakaat käyttöolosuhteet menetettiin. Koeajon keskeytymisestä huolimatta pystyttiin selvitettyjen asioiden ja koeajon tulosten pohjalta luomaan laskentaohjelma, tutkimustodistus ja tutkimusraportti.</p> <p>Tuloksena valmistui standardin mukainen hyötysuhteen laskentaohjelma ja hyötysuhteen määrittämisestä asiakkaalle annettavat tutkimustodistus ja tutkimusraportti.</p>	
Avainsanat leijupetikattila, hyötysuhde, kuumavesikattila, SFS-EN 12952-15	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author Atro Luukkonen	
Title of Thesis Efficiency Calculation Program for Fluidized Bed Boilers Producing Less than 5 MW of Hot Water	
Date 6 April 2022	Pages/Appendices 82/2
Client Organisation Savonia University of Applied Sciences	
<p>The client of the thesis was Savonia University of Applied Sciences, and the thesis is related to the extension of the company's business services, where the company's clients will be offered efficiency definitions for boilers. The aim of the thesis was to create a hot water boiler efficiency calculation program in accordance with the standard SFS-EN 12952-15 and a research certificate to be given to the client who has ordered the efficiency calculation, as well as a research report on determining the efficiency. The thesis is limited to hot water boilers of less than 5 MW, which operate with fluidized bed technology and use solid fuel as fuel.</p> <p>The thesis was accomplished by researching what matters are involved in determining the efficiency of a hot water boiler in accordance with the standard SFS-EN 12952-15 and how the calculation is accomplished in accordance with the same standard. To determine the efficiency, a test run was performed with a 0,3 MW fluidized bed boiler at the Savonia Energy Research Center. The aim of the test run was to determine the efficiency of the boiler at 100 % power, but some deviations were needed concerning the duration of the test run, and the sampling intervals. The test run had to be suspended because the boiler did not reach the desired power level and steady-state conditions were lost. Despite the suspension of the test run, a calculation program, a research certificate, and a research report could be created on the basis of the research of the standard and the results of the test run.</p> <p>The result was a standard efficiency calculation program and a research certificate and research report were given to the customer for efficiency determination.</p>	
Keywords Fluidized bed boiler, Efficiency, Hot water boiler, SFS-EN 12952-15	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Käsitteet.....	8
1.2	Lyhenteet ja symbolit .....	12
2	KUUMAA VETTÄ TUOTTAVA LEIJUPETIKATTILA.....	14
2.1	Kuumavesikattila.....	14
2.2	Leijupetikattila .....	15
2.2.1	Palamisilmapuhaltimet .....	17
2.2.2	Kiertokaasupuhallin.....	17
2.2.3	Savukaasupuhallin .....	17
2.2.4	Lentotuhkan erottelu savukaasusta.....	17
3	LEIJUPETIKATTILAN HYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	20
3.1	Prosessin arvojen vaikutus hyötysuhteeseen.....	20
3.1.1	Pedin leijutusnopeus .....	20
3.1.2	Ilmaylimäärä .....	20
3.2	Leijupetikattilan fyysisten ominaisuuksien vaikutus hyötysuhteeseen .....	20
3.2.1	Pedin ja kaasutilan korkeus .....	20
3.2.2	Palamattomien takaisin kierrätys .....	21
3.2.3	Taajuusmuuntajat.....	21
3.2.4	Polttoaineen syöttö .....	21
3.2.5	Sekundääri-ilman syöttö.....	21
3.3	Polttoaineen palamiseen liittyvät häviöt .....	21
3.3.1	Savukaasuhäviö.....	21
3.3.2	Palamattoman kaasun häviö .....	22
3.3.3	Palamattoman kiintoaineen häviö .....	22
3.4	Säteily- ja konvektiohäviö .....	23
4	LEIJUPETITEKNIKALLA TOIMIVAN KUUMAVESIKATTILAN HYÖTYSUHTTEEN MÄÄRITYS .....	24
4.1	Vakaat käyttöolosuhteet .....	24
4.2	Koeajon suorittaminen .....	24
4.2.1	Mittausten ja näytteenoton tiheys .....	24
4.2.2	Sallitut vaihtelut.....	25
4.2.3	Muut koeajon suorittamisessa huomioitavat asiat .....	25

4.3	Mittaaminen ja näytteet .....	25
4.3.1	Kiinteän polttoaineen lämpöarvot.....	25
4.3.2	Kalorimetrinen lämpöarvo .....	27
4.3.3	Tehollinen lämpöarvo.....	27
4.3.4	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa.....	27
4.4	Näytteenotto .....	28
4.4.1	Näytteistä tehtävät analyysit .....	28
4.4.2	Savukaasuanalyysi.....	28
4.5	Lämpötase ja taseraja .....	29
4.6	Kuumavesikattilan hyötysuhteen laskenta .....	31
4.6.1	Kuumavesikattilan hyötyteho.....	31
4.6.2	Kattilaan tuotu lämpöteho .....	32
4.6.3	Muut huomioitavat tehot .....	34
4.6.4	Kattilaan tuodut tehot yhteensä.....	34
4.6.5	Kattilan häviöiden laskenta .....	34
4.6.6	Savukaasuhäviö.....	35
4.6.7	Palamattoman kaasun häviö.....	36
4.6.8	Pohja- ja lentotuhkan palamattomien kiintoaineiden aiheuttamat häviöt.....	36
4.6.9	Säteilystä- ja konvektiosta aiheutuvat häviöt .....	36
4.6.10	Häviöt yhteensä.....	37
4.6.11	Kattilan hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä .....	37
4.6.12	Kattilan hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä.....	38
4.6.13	Mahdolliset muut lisämääritykset .....	38
5	<b>SAVONIAN ENERGIATUTKIMUSKESKUKSEN LEIJUPETIKATTILA .....</b>	<b>39</b>
5.1	Leijupetikattila .....	39
5.2	Puhaltimet.....	40
5.3	Polttoaineen syöttö .....	42
5.4	Savukaasunpuhdistus.....	43
6	<b>SAVONIAN ENERGIATUTKIMUSKESKUKSEN LEIJUPETIKATTILAN HYÖTYSUHTEN MÄÄRITYS .....</b>	<b>45</b>
6.1	Hyötysuhdekoeajon suunnittelu .....	45
6.2	Hyötysuhdekoeajon toteutus .....	46
6.3	Hyötysuhteen laskentaohjelman, tutkimustodistuksen ja tutkimusraportin luonti .....	46

7 POHDINTA.....	51
LÄHTEET .....	53
LIITE 1: HYÖTYSUHTEEN LASKENTAOHJELMA.....	56
LIITE 2: TUTKIMUSTODISTUS JA TUTKIMUSRAPORTTI.....	60

## 1 JOHDANTO

Polttoaineteholtaan alle 5 MW kattilat ovat jääneet ns. harmaalle alueelle päästörajojen säädöksissä ja näille kattiloille ei ole säädetty yleissitovia päästörajoja, joten voidaan olettaa, että palaminen kyseisen koko luokan kattiloilla ei välttämättä ole optimaalista mikä taas näkyy päästöissä ja tässä työssä käsiteltävässä hyötysuhteessa. Kattilan hyötysuhteeseen vaikuttavat polttoaineen kosteus, savukaasun lämpötila, jäännöshappi ja häkäpitoisuus, palamiskelpoisen ainesosan määrä pohja- ja lentotuhkassa sekä kattilan ympäristöön luovuttama lämpö säteilemällä ja johtumalla. (Flyktman ym. 2012, 1, 35)

Hyötysuhdetta voidaan parantaa säätämällä palamisprosessia ja kattilan laitteistoa, jolloin voidaan vaikuttaa hyötysuhteeseen vaikuttaviin asioihin, kuten savukaasun lämpötilaan, jäännöshappi ja häkäpitoisuuteen ja palamiskelpoisen ainesosan määrään tuhkissa.

Hyötysuhde määritetään standardin SFS-EN 12952-15 mukaisesti. Hyötysuhteen määrittämistä varten tehtävien mittausten perusteella voidaan tarkastella kattilan toimivuutta ja suunnitella mahdollisia ajotapojen muutoksia sekä laitteiston kunnossapitotoimenpiteitä. Hyötysuhdemääritykset ovat osa kattilalaitosten energiatehokkuuden seuranta ja määritettyjä arvoja voidaan käyttää tulevaisuudessa tehokkuuden ja kattilan kunnon seurannassa. (Koski ym. 2002, 9)

Opinnäytetyön aiheena on kattilalaitoksen hyötysuhteen määrittäminen standardin SFS-EN 12952-15 mukaisesti. Opinnäytetyön toimeksiantaja ja tilaaja on Savonia-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö liittyy Savonian palveluiden laajennukseen, jossa asiakkaille tarjotaan päästönmittauksien ohella mahdollisuutta määrittää myös kattilalaitoksen hyötysuhde.

Tavoitteena on luoda tilaajalle standardin mukainen hyötysuhteen laskentaohjelma ja asiakkaalle annettava tutkimustodistus sekä tutkimusraportti hyötysuhteen määrittämisestä. Työ on rajattu koskemaan kuumavesikattiloita, jotka toimivat leijupetiteknikalla ja käyttävät polttoaineena kiinteää polttoainetta.

Työ on toteutettu selvittämällä mitä asioita kuuluu kuumavesikattilan hyötysuhteen määrittämiseen standardin SFS-EN 12952-15 mukaisesti ja kuinka laskenta toteutetaan standardin SFS-EN 12952-15 mukaan. Hyötysuhteen standardin mukaista määrittämistä varten suoritetaan koeajo Savonian Energiatutkimuskeskuksella sijaitsevalla leijupetikattilalla. Selvitettyjen asioiden pohjalta luodaan laskentaohjelma, tutkimustodistus ja tutkimusraportti.

## 1.1 Käsitteet

### *Absorptio*

Nesteen tai kaasun imeytyminen kiinteään aineeseen tai nesteeseen (Tieteen termipankki 2014). Tässä työssä absorptiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä veteen.

### *Agglomeroitunut tila*

Tila, missä ainesosat ovat yhteen liimautuneet (Alakangas ym. 2016, 198). Tässä työssä tällä tarkoitetaan pohjatuhkan kiinteää olomuotoa.

### *Arinakattila*

Arinakattilassa polttoaine syötetään syöttösuppiloon, josta se ohjataan tulipesään arinalle. Tulipesässä polttoaine leviää tasaisesti arinalle. Tulipesässä palamisilmaa ohjataan sekä arinalle että sen päälle. Polttoaine kuivaa, palaa ja kaasuuntuu. Muodostuneet palavat kaasut palavat arinan yläpuolella ja hiilijäänökset palavat arinan alaosassa, josta palamaton aines tipahtaa pohjatuhkan poistojärjestelmään. Savukaasut ohjataan arinakattilan lämmöntalteenotto-osaan, jossa savukaasujen lämpöenergia otetaan talteen kattila putkistossa virtaavaan veteen.(Jätelaitosyhdistys ry 2006)

### *Entalpia*

Entalpia on perussuuresta johdettu apusuure. Tässä työssä entalpialla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon lämpöenergiaa sisältyy yhteen kilogrammaan ainetta (kJ/kg).(Raiko ym. 2017, 39)

### *Epäsuora menetelmä*

Eli lämpöhäviö menetelmä, jossa hyötysuhde määritetään lämpöhäviöiden ja polttoaineen lämpötehon kautta.(SFS-EN 12952-15, 2003, 6)

### *Haihtuvat aineet*

Polttoaineen sisältämät 900 °C lämpötilassa kaasuna poistuvat orgaaniset komponentit ja hajoamistuotteet.(Alakangas ym. 2016, 9)

### *Hyötysuhde*

Hyötysuhteella tarkoitetaan hyödyksi saadun energiavirran suhdetta tuotuun energiavirtaan.(Huhtinen ym. 1994, 92)

### *Ilmakerroin*

Käytetyn todellisen ilmamäärän ja teoreettisen ilmamäärän suhteesta käytetään termiä ilmakerroin.(Huhtinen ym. 1994, 77)



### *Kalorimetrinen lämpöarvo*

Eli ylempi lämpöarvo, joka tarkoittaa lämpömäärää, joka vapautuu, kun polttoaine palaa täydellisesti ja polttoaineessa ollut sekä palotapahtumassa syntyvä vesi on palotapahtuman jälkeen nestemäisessä muodossa. Kalorimetrinen lämpöarvo määritetään pommikalorimetrissä ja arvo ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti vakiotilavuudessa. (Alakangas ym. 2016, 10)

### *Kastepistekorroosio*

Savukaasun sisältämän rikkihapon aiheuttama syöpyminen kattilan kylmänpään sisäosissa. Kastepistekorroosiota esiintyy erityisesti, jos savukaasun lämpötila laskee alle tietyn pisteen, joka on riippuvainen polttoaineesta, esim. hakkeella 125 °C. (Flyktman ym. 2012, 18)

### *Katkokäyttösäätö*

Katkokäyttösäädöllä tarkoitetaan säätötapaa, minkä avulla säädetään esim. kattilan tehoa katkokäytämällä polttoaineen syöttö eli polttoainetta syötetään sykleissä kattilaan eikä jatkuvasti.

### *Kattila*

Tässä työssä yleinen nimitys kuumaa vettä tuottavasta kuumavesikattilasta, joka käyttää veden lämmittämiseen tarvittavan kuumen savukaasun tuotantoon polttomenetelmänä leijupetiteknikkaa.

### *Kuumavesikattila*

Voidaan käyttää myös nimitystä vesiputkikattila, joka on kuumen veden tuottamiseen tarkoitettu laitekokonaisuus. (Kauppa- ja teollisuusministeriö 1999; Jalovaara ym. 2003, 22)

### *Leijupetikattila*

Tunnetaan myös nimellä kuplapetikattila, on kattila tyyppi, jonka alaosassa on leijutusarina, jonka päällä on hiekkaa. Kattilan hiekka aluetta kutsutaan nimellä peti. Hiekkapetiä leijutetaan arinan läpi johdettavalla primääri-ilmalla ja polttoaineen palaminen tapahtuu pedissä ja pedin päällä. (Basu 2006, 7)

### *Lentotuhka*

Lentotuhka on polttoaineen polttamisesta syntyvää pienistä hiukkasista koostuvaa tuhkaa, joka poistuu tulipesästä savukaasujen mukana ja se kerätään erilaisilla suodattimilla talteen. (Luke, Tuntematon)

### *Letkusuodatin*

Letkusuodatin on savukaasunpuhdistuslaite, minkä avulla vähennetään kattilan hiukkaspäästöjä. (Helen Oy 2018, 7)

### *Masuunikuona*

Raudan ja teräksen valmistuksessa syntyvä sivutuote, joka syntyy, kun rautaoksidi pelkistetään hiilellä metalliseksi raudaksi. (Lantmännen Agro Oy 2020)

*Palamattomat aineet*

Polttoaine, joka ei ole palanut kattilassa. Voi poistua kattilasta, joko kaasumaisessa muodossa savu- kaasun mukana tai kiinteässä muodossa tuhkan mukana.(Huhtinen ym. 1994, 96)

*Palamisen hyötysuhde*

Palamisen hyötysuhteella tarkoitetaan kattilassa palaneen polttoaineen suhdetta kattilaan syötettyyn polttoaineeseen.(Huhtinen ym. 1994, 96)

*Peti*

Termi, jota käytetään tulipesän alaosassa olevasta hiekasta.

*PI-kaavio*

Prosessi- ja instrumentointi kaavio on suuntaa antava kuvaus prosessista ja sen laitteistosta sekä mittauksista.

*Pohjatuhka*

Kattilassa poltettavan polttoaineen palamisen tuotteena syntyvä raskain tuhka-aine, joka kerääntyy kattilan pohjalle.(Väätäjä 2016)

*Polttoainesuhde*

Polttoaineen kiinteän ainesosan ja haihtuvien ainesosien suhde.(Basu 2006, 117)

*Pommikalorimetri*

Pommikalorimetri on laite, millä voidaan tehdä lämpöarvomäärityksiä kiinteistä ja nestemäisistä polttoaineista.(Oy G.W.Berg & Co Ab, Tuntematon)

*Primääri-ilma*

Kattilan alaosasta arinan läpi syötettävä palamisilma, millä samalla leijutetaan hiekkapetiä

*Sintraantumisen*

Sintraantumisella tarkoitetaan tuhkan ja petihiekan muodostamia kokkareita, joka tapahtuu, kun tuhkan natrium ja kalium reagoi petihiekan sisältämän kvartsin kanssa.(Fescon 2020)

*Sekundääri-ilma*

Eli toisioilma, joka johdetaan hiekkapedin yläpuolelle kattilan yläosiin. Sekundääri-ilman avulla poltetaan suurin osa savukaasuista ja siirretään palamista hiekkapedistä kattilan ylempiin osiin.

*Stoikiometria*

Stoikiometrialla tarkoitetaan täydellisen kemiallisen reaktion tarkastelua ainesuhteiden kautta, jossa otetaan huomioon kuinka paljon lähtöaineita, tulee olla, jotta kemiallinen reaktio tapahtuisi täydellisesti.(Peda.net 2014)

*Suora menetelmä*

Hyötysuhde määritetään veden absorboiman lämmön suhteena lämmöntuontiin. Lämmöntuonti pitää sisällään kattilaan tuodun polttoaineen kemiallisen lämmön ja muut huomioitavat kattilaan tuodut tehot.(SFS-EN 12952-15, 2003, 6)

*Sykloni*

Sykloni on laite, minkä avulla savukaasusta erotetaan kiinteä ainesosa eli lentotuhka (Kaartinen ym. 2007, 16). Syklonilla saadaan talteen partikkeli kooltaan karkea lentotuhka.

*Taajuusmuuttajat*

Taajuusmuuttaja on moottorinohjain, joka ohjaa sähkömoottoria muuttamalla sen tehon syötön taa-juutta ja jännitettä, josta seurauksena on moottorin nopeuden muutos.(Oy Danfoss Ab, Tuntematon)

*Tehollinen lämpöarvo*

Eli alempi lämpöarvo, joka tarkoittaa polttoainetta poltettaessa syntyvää lämpömäärää. Palotapahtuman reaktiotuotteena syntyvä vesi höyrystyy ja jäähtyy alkulämpötilaan pysyen höyrymuodossa. Lämpöarvo ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti.(Alakangas ym. 2016, 18)

*Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa*

Kattilaan syötettävän polttoaineen lämpöarvo eli käyttökostean polttoaineen lämpöarvo, joka laske-taan kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta polttoaineen kosteuden avulla.(Alakangas ym. 2016, 18)

*Tuhkat*

Eli polttojäännökset, jotka ovat joko lentotuhkan muodossa tai pohjatuhkana sulassa tai agglomeroi-tuneessa tilassa. Tuhkiin luetaan mukaan myös niiden sisältämä polttoainejäämä.(SFS-EN 12952-15, 2003, 6)

## 1.2 Lyhenteet ja symbolit

Lyhenne	Määritelmä	Yksikkö
ad	Ilmakuiva	-
ar	Saapumistila	-
b	Kattila	-
C	Hiili	-
CO	Hiilimonoksidi eli häkä	-
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi	-
cosφ	Tehokerroin	-
c <sub>p</sub>	Ominaislämpökapasiteetti	kJ/kg
e	Epäsuora menetelmä	-
f	Korjauskerroin	-
G	Tehollinen	-
H	Lämpöarvo tai Vety	MJ/kg tai kJ/kg
h	Entalpia	kJ/kg
H <sub>2</sub> O	Vesi	-
i	Palamisilma	-
I	Virta	A
in	Sisään/syötettävä	-
ka	Keskiarvo	-
kok	Kokonaisuus	-
l	Palamattoman polttoaineen suhde poltettuun	kg <sub>pal</sub> /kg <sub>pa</sub>
lt	Lentotuhka	-
M	Kosteuspitoisuus	m-%
m	Moottori tai massa	-
ṁ	Massavirta	kg/s
N	Tehollinen	-
N <sub>2</sub>	Typpi	-
O <sub>2</sub>	Happi	-
out	Ulos/saatava	-
P	Sähköteho	W tai kW
pa	Polttoaine	-
pal	Palamaton	-
pt	Pohjatuhka	-
Q	Lämpöteho	kW
q	Häviö	kW tai MW
r	Referenssilämpötila	°C
rc	Säteily ja konvektio	-
s	Suora menetelmä	-
S	Rikki	-
sk	Savukaasu	-
sto	Stoikiometrinen	-
t	Lämpötila	°C tai K
U	Jännite	V

V	Tilavuus tai tilavuusvirta	m <sup>3</sup> , m <sup>3</sup> /s tai m <sup>3</sup> /h
x	Pitoisuus	m-% tai V-%
γ	Pitoisuus	m-% tai V-%
Δ	Muutos tai ero	-
η	Hyötysuhde	%
μ	Suhdeluku	-
v	Tuhkan haihtuvien aineiden pitoisuus	m-%
ρ	Tiheys	kg/m <sup>3</sup>
τ	Koeajon kesto	h

## 2 KUUMAA VETTÄ TUOTTAVA LEIJUPETIKATTILA

Leijupetikattilalla voidaan tuottaa höyryä eri prosesseille tai höyryllä voidaan lämmittää kaukolämpöverkon vettä eli tällöin puhutaan höyrykattilasta. Vaihtoehtoisesti leijupetikattilalla voidaan tuottaa kuumaa vettä eri prosesseille tai kaukolämpöverkkoon, jolloin puhutaan lämmin- tai kuumavesikattilasta. Leijupetikattilassa voidaan polttaa monia erilaisia polttoaineita, kuten esimerkiksi haketta, pellettiä, turvetta, yhdyskuntajätettä, kivihiiltä tai eri polttoaineiden sekoituksia. Tässä työssä käsitellään vain kuumavesikattiloita, joissa lämpö tuotetaan kiinteää puupolttoainetta käyttävällä leijupetikattilalla.

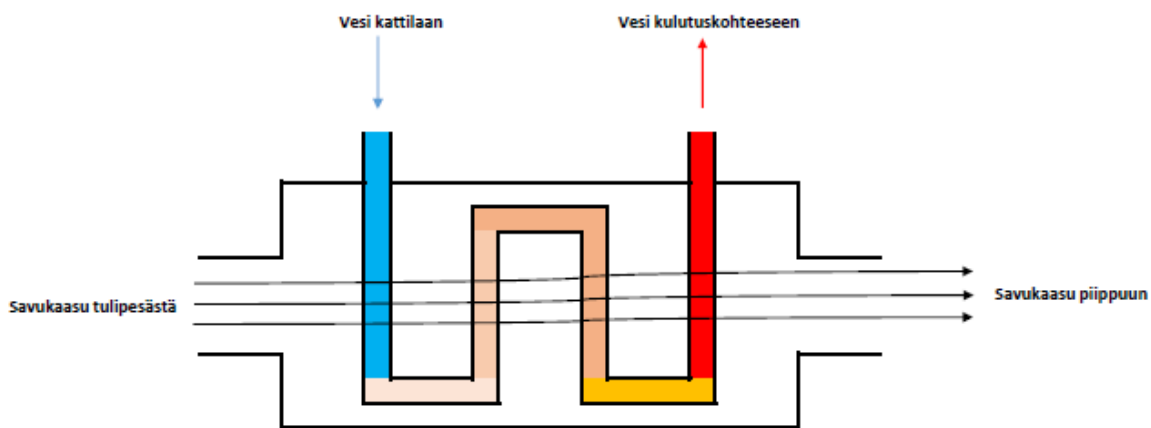
### 2.1 Kuumavesikattila

Kuumavesikattila on laitekokonaisuus, millä tuotetaan lämmintä- tai kuumaa vettä erilaisille prosesseille tai lämmitystarkoitukseen, kuten kaukolämpöverkkoon. Kuumavesikattila voi olla yksi laitekokonaisuus, joka muodostuu tulipesästä, savukaasulla lämmitettävistä vesiputkista ja muista tarvittavista laitteista tai se voi olla tulipesästä erillään oleva kattila, johon savukaasut ohjataan tulipesästä savukaasulinjaa pitkin. Kuumavesikattilassa vesi virtaa putkien sisällä ja vettä lämmittävät savukaasut virtaavat vesiputkien ulkopuolella (Jalovaara ym. 2003, 22).

Pelkästään lämmityskäyttöön käytetään laajasti kuumavesikattiloita erilaisilla polttotekniikoilla ja polttoaineilla kuten kevyt öljy, maakaasu ja kiinteät polttoaineet. Kuumavesikattilat, jotka käyttävät polttoaineena hiiltä ovat jo harvinaisia Suomessa. Pienimmät kuumavesikattilat teholtaan ovat alle 1 MW ja ne ovat hitsaamalla koottuja levyrakenteisia tai valurautaisia kattiloita. (Perttula 2000, 169–170)

Kun lämpöä otetaan savukaasuista talteen, on kuumavesikattilan käytön kannalta tärkein tekijä savukaasun lämpötila. Käytettäessä puupolttoaineita kuumavesikattilassa virtaavan savukaasun lämpötila ei saa laskea hakkeella alle 125 °C ja pelletillä alle 115 °C, koska jos savukaasun lämpötila laskee alle sallitun lämpötilan, on seurauksena kastepistekorrosio eli kuumavesikattilan sisäosien syöpyminen (Perttula 2000, 79; Flyktman ym. 2012, 18). Kastepistekorrosion lämpötilaan vaikuttavat polttoaineen kosteus ja rikkipitoisuus. Polttoaineen sisältämä rikki muodostaa palaessaan rikkiatrioksidi savukaasuun ja polttoaineen sisältämä vesi siirtyy vesihöyryinä savukaasuun. Mikäli savukaasun lämpötila putoaa savukaasukanavassa alle polttoaineelle ilmoitetun alimman savukaasun lämpötilan, voi savukaasun rikkiatrioksidi ja vesihöyry muodostaa rikkihappoa, joka aiheuttaa syöpymistä savukaasukanavassa. (Huhtinen ym. 1994, 90, 93, 197)

Kuvassa 1 on esitetty kuumavesikattilan toimintaperiaate, missä lämpö otetaan savukaasusta talteen siirtämällä se veteen. Kuumavesikattilaan syötettävä vesi kulkee kattilan sisällä putkiston läpi, josta se siirretään kulutuskohteeseen ja kuuma savukaasu kulkee kattilan läpi kohti savukaasun puhdistusta ja savupiippua, jolloin siinä oleva lämpö lämmittää vesiputkissa kulkevan veden.

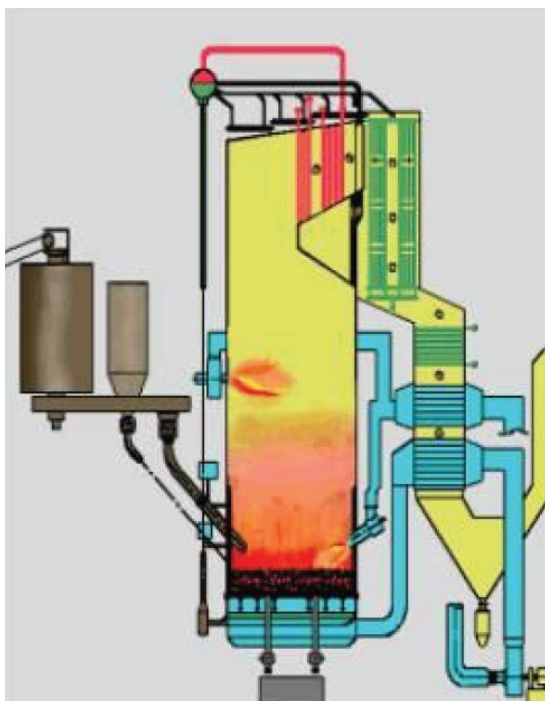


KUVA 1. Kuumavesikattilan toimintaperiaate (Luukkonen 2022)

## 2.2 Leijupetikattila

Leijupetikattila koostuu arinasta, jossa hiekka leijuu arinalle tuotavan palamisilman vaikutuksesta, pedin päällisestä vapaasta tilasta eli kaasutilasta, joka on lämpöä absorboivien vesiputkien ympäröimä ja takavedosta, jossa sijaitsevat mahdolliset ilman- ja syöttöveden esilämmittimet. (Huhtinen ym. 1994, 140; Basu 2006, 7)

Kuvassa 2 on esitetty esimerkki leijupetikattilasta.



KUVA 2. Esimerkki leijupetikattilasta (Hannula & Kurkela 2013, 26)

Leijupetikattilan petinä voidaan käyttää erilaisia hienojakoisia materiaaleja, kuten esim. luonnonhiekkaa ja masuunikuonaa. Suurimmat vaatimukset petimateriaalille asettaa käytettävän materiaalin kuumuuden kesto ja massa. Mikäli petimateriaalin kuumuuden kesto ei ole riittävällä

tasolla, se saattaa sulaa ja mikäli petimateriaalin massa on liian iso voi ongelmaksi muodostua riittämätön pedin leijunta. Leijupetikattilassa käytettävän hiekan keskiraekoko on noin 1–3 mm ja petiä leijutetaan primääri-ilmapuhaltimella tuotettavalla palamisilmalla 0,7–2 m/s nopeudella (Huhtinen ym. 1994, 143).

Kuvassa 3 on esitetty leijupedin leijuntatapa. Voimakkaasti primääri-ilmapuhaltimella puhallettava palamisilma tuodaan pedin alapuolelta, mikä saa hiekkapedin leijumaan ja savukaasut poistuvat kattilan yläosasta takavetoon.



KUVA 3. Leijupedin leijuntatapa (Huhtinen ym. 1994, 141)

Ennen kuin leijupetikattilaan voidaan syöttää kiinteää polttoainetta, tulee hiekkapeti lämmittää sellaiselle tasolle, että kiinteä polttoaine syttyy turvallisesti eli noin 500-600 °C:seen. Hiekkapedin alkulämmitys kohdistetaan, joko suoraan petiin tai heti pedin yläpuolelle. Alkulämmityksessä käytetään usein öljy- tai kaasupolttimia. Leijupetikattilassa polttoaine syötetään polttoainesiilosta sulkusyöttimen kautta kattilaan menevään pudotusputkeen, josta polttoaine putoaa pedin päälle. Koska hiekkapeti omaa suuren lämpökapasiteetin leijupetikattila soveltuu hyvin kosteillekin polttoaineille eikä erillinen polttoaineen kuivain ole välttämätön. Kosteaa polttoainetta sekoittuu kuumaan hiekkapetiin ja kuivaa sekä lämpenee syttymislämpötilaan. Hiekkapedin suuren lämpökapasiteetin ansiosta myös polttoaineen laadun vaihtelut tasoittuvat tehokkaasti. (Huhtinen ym. 1994, 143)

Leijupetikattilassa pohjatuhka poistetaan päästämällä tietty määrä hiekkaa pois kattilasta pohjatuhka yhteen kautta. Pohjatuhka yhde sijaitsee kattilan alaosassa. Poistettu aine seulotaan, jolloin siitä saadaan eroteltua karkea kuona ja puhdas hiekka. Puhdas hiekka palautetaan hiekkasiiloon, josta se pudotetaan takaisin kattilaan. Leijupedissä hienojakoinen tuhka jauhautuu ja poistuu savukaasujen mukana. Tätä tuhkua kutsutaan lentotuhkaksi. Myös hiekka jauhautuu vähän kerrallaan ja poistuu lopulta savukaasujen mukana. Jos poltetaan tuhkapitoisuudeltaan matalaa polttoainetta, tulee kattilaan lisätä hiekkaa jauhautuneen tilalle. (Huhtinen ym. 1994, 143-144)

Leijupetikattilan hiekkapedin lämpötilaa on tarkkailtava ettei se nouse liian korkealle. Liian korkea lämpötila aiheuttaa polttoaineen tuhkan sulamisen tai pehmeämisen, josta seurauksena on, että sula tai pehmeä tuhka ja hiekka sekä polttoaineen mukana tulleet epäpuhtaudet sintraantuvat yhteen.



Pedin lämpötila tulee pitää noin 100 °C tuhkan pehmenemislämpötilan alapuolella. Käytettäessä kotimaisia polttoaineita tämä tarkoittaa yleensä noin 900 °C:n lämpötilaa. Leijupetikattilan pedin lämpötilaa voidaan hallita esim. jäähdyttämällä sitä kiertokaasulla. (Huhtinen ym. 1994, 144)

Leijupetikattilan minimitehoa rajoittaa pedin lämpötila, joka tulisi olla vähintään 700 °C ja pedin leijutusnopeus, koska jos leijutusnopeus on liian alhainen peti ei leiju. Maksimitehoa rajoittaa käytännössä pedin suurin sallittu lämpötila. (Huhtinen ym. 1994, 144)

### 2.2.1 Palamisilmapuhaltimet

Polttoaineen palamiseen vaadittava happi saadaan osittain leijutusilmasta. Tämän lisäksi osa palamisilmasta tuodaan pedin päälle vapaaseen tilaan sekundääri-ilmana (Huhtinen ym. 1994, 144). Primääri- ja sekundääri-ilmat voidaan myös esilämmittää käyttämällä palamisilman esilämmitintä, jossa palamisilma lämmitetään hyödyntämällä savukaasun lämpöä (Basu 2006, 254).

Palamis- ja leijutusilma voidaan tuottaa joko yhdellä puhaltimella tai erillisillä puhaltimilla, jolloin primääri-ilmapuhaltimella tuotetaan arinan läpi puhallettava leijutus- ja palamisilma ja sekundääri-ilmapuhaltimella tuotetaan pedin päälle syötettävä palamisilma. Sekundääri-ilmaa voidaan syöttää usealle eri tasolle kattilan vapaaseen tilaan, joskus myös kattilan ylimpiin osiin. Sekundääri-ilmaa voidaan syöttää myös polttoaineen syöttöön, jolloin varmistetaan polttoaineen tasainen virtaus kattilaan (Basu 2006, 254).

### 2.2.2 Kiertokaasupuhallin

Kiertokaasupuhaltimella kierrätetään savukaasua takaisin kattilaan, jolloin puhutaan kiertokaasusta. Kiertokaasu on vähähappista savukaasua, joka ei osallistu voimakkaasti palamiseen. Kiertokaasua voidaan lisätä esim. arinalle syötettävän primääri-ilman joukkoon, jolloin sillä voidaan hallita pedin lämpötilaa, koska vähähappinen kiertokaasu vähentää palamisreaktiota. Kiertokaasupuhaltimen käytöllä voidaan vähentää syntyvän savukaasun määrää ja savukaasun happipitoisuutta. Lisäksi kiertokaasupuhaltimen käyttö vähentää muiden puhaltimien tehon tarvetta. (Jalovaara ym. 2003, 74)

### 2.2.3 Savukaasupuhallin

Savukaasupuhaltimella luodaan alipaine leijupetikattilan tulipesään, jolloin polttoaineen palamisesta syntyvät savukaasut poistuvat tulipesästä kohti savupiippua. Savukaasupuhallin sijaitsee yleensä lentotuhkan keräyksen ja savupiipun välissä, jolloin sillä voidaan poistaa kattilasta kaasumaiset palamistuotteet savupiipun kautta ulkoilmaan niin, että lentotuhka jää keräimeen (Vasi 2020).

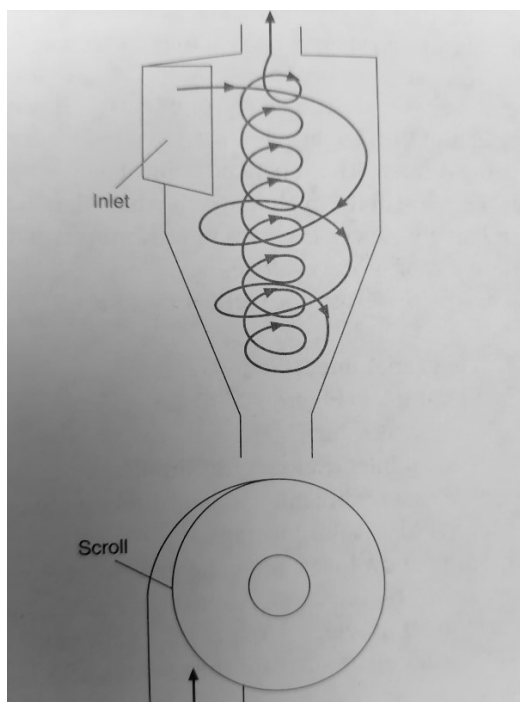
### 2.2.4 Lentotuhkan erottelu savukaasusta

Leijupetikattilan takavedon jälkeen savukaasusta erotellaan lentotuhka. Ensimmäisenä erotellaan karkea lentotuhka kuumasta savukaasusta syklonin avulla ja viileämmästä savukaasusta erotellaan hienojakoisempi lentotuhka letkusuodattimella tai sähkösuodattimella.

Sykloni on rakenteeltaan yksinkertainen, eikä siinä ole liikkuvia osia ja sen erottelu hyötysuhde on hyvä. Syklonin yleisin käytetty rakenne on sylinterimäinen pystymallinen sykloni, jonka pohja on kartion mallinen. Sykloneita käytetään yleensä esierottimena ennen varsinaista erotinta. Syklonin erottelu kyky perustuu keskipakovoiman hyödyntämiseen. Sykloniin syötettävä savukaasu saatetaan

pyörivään liikkeeseen, jolloin keskipakoisvoiman vaikutuksesta lentotuhka ajautuu syklonin seinämälle. Savukaasu kulkee syklonin sisällä spiraalimaisessa liikkeessä kohti pohjaa ja lentotuhka ajautuu seinämille ja sitä kautta syklonin pohjalle. Puhdistunut savukaasu imetään syklonin yläosasta kohti seuraavaa erotinta.(Basu 2006, 381-383; Heinonen ym. 2004)

Kuvassa 4 on esitetty pystymallinen sykloni. Inlet tarkoittaa syklonin sisääntuloa, josta savukaasu tulee syklonin sisälle ja scroll tarkoittaa savukaasun sisääntulon kiertoa, jonka avulla savukaasu laitetaan pyörivään liikkeeseen. Kuvan 4 syklonissa sisääntulo kierto on 90 astetta.

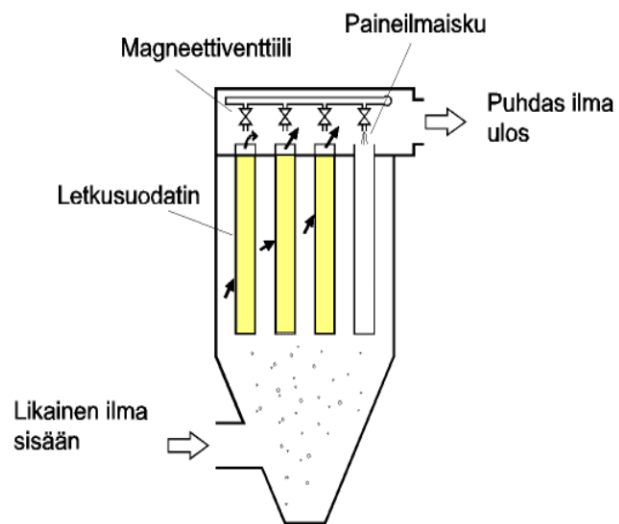


KUVA 4. Pystymallinen sykloni (Basu 2006, 383)

Lentotuhkan hienompi syklonista läpi päässyt osa erotetaan savukaasusta letkusuodattimen tai sähkösuodattimen avulla. Letkusuodattimessa savukaasu kulkee suodatinkankaasta ommeltujen letkujen läpi, jotka on ripustettu kehikkoon letkusuodattimen kattoon. Hienojakoinen lentotuhka jää suodatinkankaan ulkopuolelle kiinni, kun savukaasu kulkee letkun läpi. Letkut puhdistetaan käyttämällä paineilmaa. Letkusuodattimeen syötetään paineilma pulsseja. Paineilmapulssit ravistavat letkuja ja letkuihin kiinnittynyt lentotuhka varisee letkusuodattimen alaosaan, jossa on lentotuhkan keräystä varten siilo.(Basu 2006, 339; Kiertotalous Amk, Tuntematon, 5–6)

Sähkösuodattimessa savukaasuvirrassa kulkevat hiukkaset varataan negatiivisesti ja ne johdetaan voimakkaan sähkökentän läpi, jolloin hiukkaset erottuvat savukaasuvirrasta. Sähkösuodatin koostuu kahdesta elektrodista, joiden välille luodaan suuri jännite, joka aiheuttaa voimakkaan sähkökentän elektrodien väliin.(Huhtinen ym. 1994, 233)

Kuvassa 5 on esitetty esimerkki paineilmalla puhdistettavasta letkusuodattimesta.



KUVA 5. Paineilmalla puhdistettava letkusuodatin (Heinonen ym. 2004)

### 3 LEIJUPETIKATTILAN HYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Leijupetikattilalle tyypillinen palamisen hyötysuhde on yli 90 % ilman lentotuhkan takaisin kierrästyä, jos leijupetikattila on varustettu lentotuhkan takaisin kierrätyksellä, jolloin saadaan vähennettyä palamattomien määrää, voi palamisen hyötysuhde parhaimmillaan nousta 98–99 %. Kokonaisyhyötysuhde leijupetikattilalla vaihtelee välillä 81–91 %. Kokonaisyhyötysuhteeseen vaikuttavat prosessin arvot, leijupetikattilan fyysiset ominaisuudet ja mitat sekä tärkeimpänä polttoaineen palaminen ja siihen liittyvät häviöt. (Basu 2006, 117; Uudenmaan ympäristökeskus 2004, 10; Huhtinen ym. 1994, 95)

#### 3.1 Prosessin arvojen vaikutus hyötysuhteeseen

##### 3.1.1 Pedin leijutusnopeus

Pedin leijutusnopeuden kasvattaminen vaikuttaa hyötysuhteeseen negatiivisesti, koska se nostaa savukaasujen happipitoisuutta ja lisää palamattoman ainesosan määrää, koska suuremman palamisen ilman nopeuden vaikutuksesta kattilasta kulkeutuu enemmän palamatonta ainesosaa pois. Kuitenkin liian pieni leijutusnopeus aiheuttaa pedin sintraantumisen. (Basu 2006, 118)

##### 3.1.2 Ilmaylimäärä

Polttoaineen ja ilman sekoitus ei ole koskaan täydellistä leijupetikattilassa, siksi stoikiometrinen ilmamäärä ei riitä vaan palamiseen tarvitaan lisää happea, jotta polttoaine palais mahdollisimman täydellisesti. Leijupetikattilaan syötetään ylimääräistä happea ylimääräisen ilman avulla. Käytetyn todellisen ilmamäärän ja stoikiometrisen ilmamäärän suhteesta käytetään termiä ilmakerroin. Ilmaylimäärällä tarkoitetaan taas sitä ilmamäärää, mikä syötetään kattilaan stoikiometrisen ilmamäärän lisäksi. Ylimääräisellä ilmalla pystytään parantamaan palamisen tehokkuutta, mutta parannuksen merkittävyys vähenee, kun ilmaylimäärä on yli 20 %. (Huhtinen ym. 1994, 77; Basu 2006, 119)

#### 3.2 Leijupetikattilan fyysisten ominaisuuksien vaikutus hyötysuhteeseen

Pedin korkeus, tulipesän kaasutilan korkeus, palamattomien aineiden takaisin kierrätys kattilaan, polttoaineen syöttö ja sekundääri-ilman syöttö ovat leijupetikattilan fyysisiä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat palamiseen ja hyötysuhteeseen. (Basu 2006, 120)

##### 3.2.1 Pedin ja kaasutilan korkeus

Suuremmalla pedin korkeudella saadaan aikaan parempi palamisen hyötysuhde, koska viipymäaika pitenee, mutta samalla se lisää leijutusilman tarvetta ja leijutusilman lisääminen taas lisää palamattomien aineiden kulkeutumishopeutta. (Basu 2006, 121)

Kaasutilan korkeudella on samanlainen vaikutus kuin pedin korkeudella. Korkea kaasutila lisää palamisen hyötysuhdetta, koska viipymäaika pitenee. Mikäli palaminen kaasutilassa on niin voimakasta, että kaasutilaa joudutaan jäähdyttämään voimakkaasti, on sillä negatiivinen vaikutus hyötysuhteeseen. (Basu 2006, 121)

### 3.2.2 Palamattomien takaisin kierrätys

Lentotuhka sisältää suurimman osan leijupetikattilan palamattomista aineista. Lentotuhkan palamattomien määrä on 3–10 %. Lentotuhka voidaan kierrättää kattilan takavedosta takaisin tulipesään, jolloin palamattomien aineiden palaminen on mahdollista saattaa loppuun. Palamattomien aineiden takaisin kierrätyksellä on positiivinen vaikutus hyötysuhteeseen. (Basu 2006, 120–121)

### 3.2.3 Taajuusmuuntajat

Taajuusmuuntajat mahdollistavat polttoaineen syötön ja puhaltimien jatkuvatoimisen säätämisen, mikä tehostaa palamisen hallintaa. Kun kattilan tehon jatkuvatoimista säätämistä verrataan aiemmin käytössä olleeseen katkokäyttösäätöön, voidaan todeta, että jatkuvatoimisella säätämällä kattilan päästöt ovat pienemmät ja hyötysuhde on korkeampi. (Flyktman ym. 2012, 20)

### 3.2.4 Polttoaineen syöttö

Polttoainesuhde on polttoaineen kiinteän osan ja haihtuvien aineiden suhde. Polttoainesuhteella on merkittävä vaikutus palamisen hyötysuhteeseen. Alhainen polttoainesuhde on usein syynä alhaiseen palamisen hyötysuhteeseen, etenkin leijupetikattiloissa. Polttoaineen syöttö pedin alta antaa paremman hyötysuhteen alhaisen polttoainesuhteen polttoaineilla. Polttoainetta voidaan syöttää pedin alta käyttämällä pneumaattista polttoaineen syöttölaitetta. Vastaavasti polttoaineen syöttö pedin päälle on tehokkaampaa korkeamman polttoainesuhteen polttoaineilla. (Basu 2006, 117, 121, 234)

### 3.2.5 Sekundääri-ilman syöttö

Sekundääri-ilmaa käytetään erityisesti biopolttoaineita käyttävillä leijupetikattiloilla, koska se auttaa polttamaan haihtuvat aineet ja se myös ehkäisee tehokkaammin typenoksideista aiheutuvia päästöjä. Polttoaineilla, joilla on alhainen haihtuvien aineiden osuus, sekundääri-ilma ei välttämättä paranna hyötysuhdetta. (Basu 2006, 121)

## 3.3 Polttoaineen palamiseen liittyvät häviöt

Hyötysuhteen kannalta polttoaineen merkittävin ominaisuus on lämpöarvo. Lämpöarvo ilmaisee polttoaineesta poltettaessa saatavan energian. Polttoaineen kosteus alentaa lämpöarvoa ja kun lämpöarvo alenee, niin samalla alenee myös kattilan hyötysuhde sekä maksimiteho. Polttoaineen laatu vaikuttaa oleellisesti kattilan hyötysuhteeseen, etenkin pienissä teholuokissa. Polttoaineesta ei kuitenkaan saada kaikkea energiaa polttamalla talteen. Se osa mitä ei saada talteen kutsutaan häviöksi. (Huhtinen ym. 1994, 37, 95; Flyktman ym. 2012, 14, 27)

### 3.3.1 Savukaasuhäviö

Savukaasun mukana kattilasta poistuu lämpöenergiaa. Tätä lämpöenergiaa kutsutaan savukaasuhäviöksi, joka on usein suurin kattilan häviöistä. Savukaasuhäviön suuruus riippuu savukaasuvirrasta ja savukaasun lämpötilasta. Savukaasuhäviöitä voidaan pienentää vähentämällä kattilasta poistuvan savukaasun lämpötilaa. Savukaasun minimi lämpötilaa rajoittaa kastepistekorroosion lämpötila. Savukaasuhäviöitä suurentaa myös palamisilman määrä, joka lisää savukaasuvirtaa. Ilmakertoimen tulisikin savukaasuhäviön kannalta olla mahdollisimman lähellä stoikiometristä ilmamäärää. Ilmakertoiminta ei ole kuitenkaan tarkoituksen mukaista laskea liikaa, koska silloin palamisen laatu huononee

ja palamattomien aineiden häviöt kasvavat. Myös kattilan lämpöpinnat on syytä pitää puhtaana, koska likaantuneista lämpöpinnoista seuraa lämmönsiirron heikentyminen, josta taas seuraa savukaasun lämpötilan nousu. (Huhtinen;Kettunen;Nurminen;& Pakkanen, 1994, s. 99)

Pienissä nimellistehoaltaan 0,5–2 MW kattiloissa, savukaasun loppulämpötilan suositellaan olevan täydellä teholla minimissään 180 °C ja 2–5 MW kattiloilla 150 °C sekä molemmissa teholuokissa osateholla savukaasun loppulämpötila tulisi olla minimissään 120 °C. Savukaasun jäännöshappipitoisuuden tulisi olla noin 8 %. Suositukset perustuvat lämpötilojen osalta siihen, että niiden tulee olla riittävän korkealla tasolla, ettei rikkihapon kastepiste pääse alittumaan millään tehoalueella savukaasunavissa. Savukaasun jäännöshappipitoisuus suositus perustuu siihen, että 8 %:n jäännöshappipitoisuudella saadaan häkäkaasupitoisuus suositustasolle aiheuttamatta kuitenkaan merkittävää kasvua savukaasuhäviöön.(Flyktman ym. 2012, 33–34)

### 3.3.2 Palamattoman kaasun häviö

Kaikki polttoaine ei pala kattilassa täydellisesti vaan sitä poistuu kattilasta kaasumaisessa ja kiinteässä muodossa vähentäen palamisen hyötysuhdetta. Kaasu tai kaasut, jotka eivät ole palaneet kattilassa ovat lähinnä hiilimonoksidia eli häkää, joka on epätäydellisesti palanutta hiiltä tai sitten erityisesti pienkattiloissa esiintyviä palamattomia hiilivetyjä.(Huhtinen ym. 1994, 96)

Häkäpitoisuuden alentaminen pienissä kattiloissa vaatii usein ilmakertoimen kasvattamista, joka vähentää kokonaishyötysuhdetta enemmän kuin häkäpitoisuuden alentamisesta saatu hyöty on. Päästöjen ja hyötysuhteen kannalta optimaaliset toiminta-arvot ovat pienissä kattiloissa usein kaukana toisistaan. Siispä alle 5 MW kattiloissa tärkeimmät tekijät häkäpitoisuuden osalta ovat vaihteluiden hallinta ja keskimääräinen pitoisuuden alentaminen, koska esim. 0,2 %:n häkäkaasupitoisuus kuivassa savukaasussa heikentää kokonaishyötysuhdetta vain noin 1 %:n verran. Tavoite arvo häkäpitoisuudelle kuivasta savukaasusta mitattuna on alle 0,1 % 5 MW teholuokassa. Palamatta jääneen kaasun vaikutus kattilan hyötysuhteeseen on melko pieni, kun häkäpitoisuus on kohtuullisella tasolla, koska silloin savukaasu sisältää vain vähän palamatonta kaasua.(Flyktman ym. 2012, 33–34, 36)

### 3.3.3 Palamattoman kiintoaineen häviö

Palamatonta kiintoainetta eli käytännössä palamatta jäänyttä polttoainetta poistuu kattilasta lento- ja pohjatuhkan mukana. Palamattoman kiintoaineen osuus tuhkasta saadaan, kun tuhka poltetaan laboratorioissa. Suurin osa kattilasta poistuvasta tuhkasta on lentotuhkaa. Paras kokonaiskuva palamattoman kiintoaineen häviöstä saadaan, kun lento- ja pohjatuhkan aiheuttama häviö määritellään erikseen. Palamattoman kiintoaineen häviön suuruuteen vaikuttaa polttoaine, polttotekniikka, laitteiston kunto ja säädöt. Huonolaatuinen polttoaine voi nostaa palamattoman kiintoaineen häviön suuruuden useisiin prosentteihin.(Huhtinen ym. 1994, 97–98)

Nykyaikaisissa laitoksissa polttotekniikka, laitteisto ja säädöt ovat parantuneet ja palamattomien määrät lento- ja pohjatuhkassa on kohtuullisen pieni. Palamattoman kiintoaineen tavoitetasot leijupetikattilalla ovat kummassakin tuhkassa alle 10 %, jolloin palamisen voidaan olettaa olevan hyvällä tasolla.(Flyktman ym. 2012, 34, 36)

### 3.4 Säteily- ja konvektiohäviö

Lämpöä siirtyy kattilasta sitä ympäröivään tilaan eli kattilahuoneeseen, koska kattilalla on ympäristöä huomattavasti isompi lämpötila. Lämpöä siirtyy siitakin huolimatta, että kattilat ovat yleensä hyvin eristettyjä. Tätä lämpöhäviötä kutsutaan säteily- ja konvektiohäviöksi. Kattilan teho ja ulkoseinämän pinta-ala ei kasva suorassa suhteessa toisiinsa nähden, joten suurempien kattiloiden säteily- ja konvektiohäviö on monesti pienempi kuin pienten kattiloiden. Esimerkiksi alle 1 MW kattiloissa säteily- ja konvektiohäviö voi olla osatehoilla ajettaessa, jopa suurin kattilan häviöistä. Leijupetikattilan säteily- ja konvektiohäviön tarkasta määrittämisestä ei ole julkaistua materiaalia saatavilla ja siksi häviön määrittäminen perustuu yleensä kokemuseräiseen tietoon. On kuitenkin todettava, ettei kaikki kattilan seinämän läpi kattilahuoneeseen siirtynyt lämpö mene hukkaan vaan se lämmittää kattilahuoneen sisäilmaa ja palamisilmaa, joka usein otetaan kattilahuoneen yläosasta. (Huhtinen ym. 1994, 101; Basu 2006, 219; Flyktman ym. 2012, 36)

## 4 LEIJUPETITEKNIKALLA TOIMIVAN KUUMAVESIKATTILAN HYÖTYSUHTTEEN MÄÄRITYS

Tässä työssä kattilan hyötysuhteen määrittämiseen käytetään standardissa SFS-EN 12952-15 esitettyjä menetelmiä ja laskentatapoja, jotka koskevat tai joita voidaan soveltaa kuumavesikattiloille. Kattilan hyötysuhde voidaan määrittää käyttämällä, joko suoraa tai epäsuoraa menetelmää. Suositeltavan menetelmän käyttö riippuu pitkälti käytettävissä olevista teknisistä resursseista. Käytettäessä kiinteää polttoainetta, suurien massavirtojen mittaaminen on vaikeaa tai mahdotonta, tällöin ainoa toimiva menetelmä on epäsuora menetelmä, jota tulee käyttää myös silloin, kun polttoaineen ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Hyötysuhteen määrittämiseen tarvittavat arvot saadaan suorittamalla kattilalaitoksella koeajo. (SFS-EN 12952-15, 2003, 13)

### 4.1 Vakaat käyttöolosuhteet

Ennen varsinaista koeajoa on varmistettava, että kattila on saavuttanut vakaat käyttöolosuhteet eli tilan, jossa kattilaa tuottaa tasaisella teholla lämmintä vettä. Vakaiden käyttöolosuhteiden saavuttamiseen vaadittava aika vaihtelee suuresti kattilan rakenteen mukaan. Normaalisti kattilan tulee olla jatkuvassa käytössä useita päiviä ennen varsinaista koeajoa, jotta vakaat käyttöolosuhteet on varmasti saavutettu. Käyttöolosuhteita seurataan koeajon aikana jatkuvasti seuraamalla mitattavia arvoja, jolloin voidaan todeta, että vakaat käyttöolosuhteet ovat säilyneet. (SFS-EN 12952-15, 2003, 13-14)

Koeajossa käytettävä polttoaine on hyvä koe polttaa testattavalla kattilalaitoksella hyvissä ajoin ennen varsinaista koeajoa, jolloin kattilalaitoksella on riittävästi aikaa tehdä tarvittavat säädöt polttolaitteistoon ja varmistaa, että polttoaineen suhteen saavutetaan vakaat käyttöolosuhteet. (SFS-EN 12952-15, 2003, 14)

### 4.2 Koeajon suorittaminen

Koeajon kesto määräytyy yleensä savukaasu- ja palamattomien kiintoaineiden häviöiden määrittämiseen tarvittavan ajan mukaan. Koeajon suositeltava kesto käytettäessä kiinteää polttoainetta on 4 h. Koeajon alussa ja lopussa mitattavien arvojen tulisi olla mahdollisimman lähellä toisiaan. Leijupetikattilassa paine-eron leijupedin ylitse, palamisolosuhteiden sekä veden virtauksen ja lämpötila arvojen tulisi erityisesti olla mahdollisimman lähellä toisiaan koeajon alussa ja lopussa. Mittausajan on oltava pidempi kuin koeajon todellinen kesto. On suositeltavaa, että edellä mainittuja arvoja seurataan ennen koeajon aloittamista ja sen päätyttyä, jotta voidaan luotettavasti todeta, että vakaat käyttöolosuhteet on koeajon aikana saavutettu. (SFS-EN 12952-15, 2003, 14-15)

#### 4.2.1 Mittausten ja näytteenoton tiheys

Kaikki mittauslukemat on otettava riittävän usein virheiden minimoimiseksi. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä automaattista tiedontallennusta. Tiedot voidaan tallentaa myös manuaalisesti käsin kirjaamalla. Mikäli mittauslukemat kirjataan käsin, voidaan mittaukset suorittaa noudattamalla standardissa esitettyjä näytteenottovälejä, jossa virtausmittaukset luetaan 3 min välein, savukaasuanalyysi 5 min välein, paine- ja lämpötilamittaukset 10 min välein ja näytteenotot polttoaineesta sekä pohja- ja lentotuhkasta otetaan 15 min välein. (SFS-EN 12952-15, 2003, 15)



#### 4.2.2 Sallitut vaihtelut

Koeajon aikana voi kuumavesikattiloissa syntyä tilanne, jossa hyötYTEHO on suurempi tai pienempi kuin lämmitysjärjestelmään syötetty energia. Tähän liittyy asteittainen nousu tai lasku kuuman veden keskilämpötilassa ja sitä kautta myös veden keskilämpötilan muutoksesta kattilassa. Tästä syystä tunti kohtainen lämpötilan muutosnopeus ei saa ylittää seuraavaa arvoa

$$\frac{\Delta t_{\tau}}{\tau} < 0,03 \frac{V_{\text{vesi}}(t_{2,\text{vesi},ka} - t_{1,\text{vesi},ka})}{1,15V_b} \quad (1)$$

$$\Delta t_{\tau} = 0,5 \left( (t_{1,\text{vesi},loppu} + t_{2,\text{vesi},loppu}) - (t_{1,\text{vesi},alku} + t_{2,\text{vesi},alku}) \right) \quad (2)$$

$$t_{1,\text{vesi},ka} = 0,5(t_{1,\text{vesi},loppu} + t_{1,\text{vesi},alku}) \quad (3)$$

$$t_{2,\text{vesi},ka} = 0,5(t_{2,\text{vesi},loppu} + t_{2,\text{vesi},alku}) \quad (4)$$

Missä  $V_{\text{vesi}}$  on koeajon aikana mitattu veden tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),  $V_b$  on kuumavesikattilan vesitilavuus ( $\text{m}^3$ ),  $t_{1,\text{vesi},ka}$  on keskimääräinen veden tulolämpötila koeajon aikana ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_{2,\text{vesi},ka}$  on keskimääräinen veden ulostulolämpötila koeajon aikana ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\tau$  on koeajon kesto (h) ja  $\Delta t_{\tau}$  on kuuman veden keskilämpötilan muutos koeajojakson aikana ( $^{\circ}\text{C}$ ). (SFS-EN 12952-15, 2003, 17)

#### 4.2.3 Muut koeajon suorittamisessa huomioitavat asiat

Koeajon aikana tulee välttää vuotoja putkistoissa ja sulkulaitteissa etenkin vesipuolella. Mahdollisten ohituskäytöiden käyttöä tulee myös välttää, koska käyttö voi aiheuttaa virheitä massa- tai tilavuusvirran mittauksissa. Mittausvirheiden välttämiseksi ohituslinjoihin olisi hyvä asentaa sokeat laipat. Jos ohituslinjojen tukkiminen sokeilla laipoilla ei ole mahdollista tulee linjoja tarkkailla jatkuvasti, ettei niihin pääse syntymään mittauksia häiritseviä vuotoja. Myöskään ulospuhalluksia ei saa tapahtua koeajon aikana. Mikäli ulospuhalluksia ei voida välttää, tulee tyhjennetyn kattilaveden tilavuusmäärä määrittää. Myös nuohointien käyttöä suositellaan vältettäväksi koeajon aikana. (SFS-EN 12952-15, 2003, 17)

#### 4.3 Mittaaminen ja näytteet

Koeajossa on hyvä käyttää sellaisia mittalaitteita, joille on olemassa kalibrointitodistus kuten esimerkiksi standardisoidut mittalaitteet. Muunlaisiakin mittalaitteita voidaan käyttää, jos niiden virherajat ovat tiedossa ja käytöstä on sovittu osapuolten kesken ennen koeajoa. Mittauslaitteistoon ei saa kohdistua merkittäviä muutoksia koeajon aikana. Mittaustiedon tallennus voidaan suorittaa joko manuaalisesti tai automaattisesti. Käytettäessä automaattista tiedontallennusta on hyvä suorittaa mitaustietojen satunnaistarkistuksia, jolloin voidaan varmistua mittauksien oikeellisuudesta. Koeajojakson aikana mitatuista arvoista lasketaan aritmeettiset keskiarvot, joita käytetään koeajon aikaisen hyötysuhteen määrittämiseen. (SFS-EN 12952-15, 2003, 17-18, 70)

##### 4.3.1 Kiinteän polttoaineen lämpöarvot

Hyötysuhteen laskentaa varten tulee tietää polttoaineen lämpöarvo. Lämpöarvon määrittäminen tehdään standardin SFS-EN ISO 14918 mukaisesti.

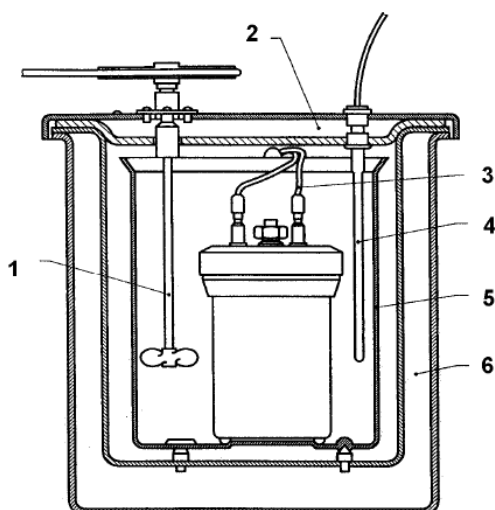
Kiinteiden polttoaineiden lämpöarvot pystytään määrittämään käyttämällä pommikalorimetriä. Laitteen toimintaperiaate perustuu palamiseen. Pommikalorimetrissä poltettava aine palaa vakiotilavuudessa ja luovuttaa lämpöenergiaa sitä ympäröivään veteen, josta aiheutuu veden lämpötilan nousu. Tästä lämpötilan muutoksesta lasketaan tai pommikalorimetri laskee automaattisesti polttoaineen kalorimetrin lämpöarvon. (Kosamo, Tuntematon)

Kuvassa 6 on esitetty Savonian pommikalorimetri. Pommikalorimetriä käytetään kiinteille ja neste-mäisille polttoaineille lämpöarvon määrittämiseen. Mittauksia pystytään tekemään 6–8 kpl/h. (Mikkonen 2021, 5)



KUVA 6. Pommikalorimetri 6200 CLEF (Mikkonen 2021, 5)

Kuvassa 7 on esitetty havainnekuva pommikalorimetrin sisästä. Pommikalorimetri koostuu sekoittimesta (1), termostaatin kannesta (2), sytytysjohdoista (3), lämpömittarista (4), kalorimetriastiasta (5) ja termostaatista (6). (SFS-EN 14918, 2010, 9)



KUVA 7. Havainnekuva pommikalorimetrin sisästä (SFS-EN 14918, 2010, 9)

#### 4.3.2 Kalorimetrinen lämpöarvo

Ylempi eli kalorimetrinen lämpöarvo tarkoittaa lämpömäärää, joka vapautuu, kun massayksikkö polttoainetta palaa täydellisesti ja palaessa syntyvä ja polttoaineessa ollut vesi on palamisen jälkeen nesteenä referenssilämpötilassa (25 °C). Kalorimetrinen lämpöarvo määritetään pommikalorimetrissä ja arvo ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti vakio-tilavuudessa. (SFS-EN 14918, 2010, 5; Alakangas ym. 2016, 10)

Punnittu määrä kiinteään polttoaineeseen näytettä poltetaan pommikalorimetrissä. Pommikalorimetrin lämpökapasiteetti määritetään kalibroinnilla polttaen varmennettua bentsoehappoa. Korjattu lämpötilannousu ottaa huomioon ennen palamisreaktioita, sen aikana ja sen jälkeen havaitut lämpötilat. Pommikalorimetriin lisätään vettä, jotta saadaan aikaan olosuhde, jossa kaikki näytteen sisältämästä vedystä ja kosteudesta muodustunut vesi voidaan olettaa nestemäiseksi. (SFS-EN 14918, 2010, 6)

Kiinteästä polttoaineesta puristetaan pelletti, joka poltetaan pommikalorimetrissä. Yleensä kiinteillä polttoaineilla käytetään 1 g näytettä. Määritettäessä kalorimetristä lämpöarvoa pommikalorimetrillä on tehtävä kaksi rinnakkaismäärittystä, jotka eivät saa erota toisistaan enempää kuin 0,120 MJ/kg. Rinnakkaismäärittämisistä lasketaan keskiarvo, jolloin saadaan laskettua näyte-erän kalorimetrinen lämpöarvo. Polttoaineen kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo saadaan laskettua kaavalla

$$H_G = H_{G;ad} * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (5)$$

Missä  $H_G$  on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg),  $H_{G;ad}$  on ilmakeivan näytteen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg),  $M_{ad}$  on ilmakeivan näytteen kosteuspitoisuus (m-%). (SFS-EN 14918, 2010, 23, 26; Mikkonen 2021, 2–3)

#### 4.3.3 Tehollinen lämpöarvo

Alempi lämpöarvo eli tehollinen lämpöarvo, on lämpömäärä, joka syntyy, kun yksi massayksikkö polttoainetta poltetaan, jolloin palamisen yhteydessä syntynyt vesi höyrystyy ja jäähtyy takaisin alkulämpötilaan pysyen höyrymuodossa. Tehollinen lämpöarvo ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti. (SFS-EN 14918, 2010, 6; Alakangas ym. 2016, 18)

Täydellisesti kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo lasketaan kaavalla

$$H_N = H_G - 0,02441 * M \quad (6)$$

Missä  $H_N$  kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg), 0,02441 on veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjauskerroin (MJ/kg) referenssilämpötilassa (+25 °C) ja  $M$  on vesimäärä, joka syntyy, kun polttoaineen sisältämä vety palaa (m-%). (SFS-EN 14918, 2010, 28; Mikkonen 2021, 3–4)

#### 4.3.4 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa eli toisin sanoen käyttökosteudessa voidaan laskea, kun tiedetään polttoaineen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo ja polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa lasketaan kaavalla

$$H_{N;ar} = H_N * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02441 * M_{ar} \quad (7)$$

Missä  $H_{N;ar}$  on polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg) ja  $M_{ar}$  polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa painotettuna kostean polttoaineen massalla (m-%). (SFS-EN 14918, 2010, 28; Mikkonen 2021, 4)

#### 4.4 Näytteenotto

Kaikkien otettujen näytteiden tulee olla riittävän edustavia koeajon ajalta. Polttoaineen osalta se tarkoittaa, että otettujen näytteiden tulee edustaa riittävästi koeajon aikana poltetun polttoaineen laatua ja koostumusta, etenkin sellaisten polttoaineiden osalta, joiden koostumus ja laatu vaihtelee suuresti. Polttoainenäyte otetaan kattilaan menevästä polttoainevirrasta. (SFS-EN 12952-15, 2003, 20)

Pohjatuhkanäyte otetaan leijupetikattilan alaosasta pohjatuhkayhteen kautta ja lentotuhkanäytteet otetaan kattilalaitoksen lentotuhkalaitteistoista riittävän usein, että ne edustavat riittävällä tasolla koeajon aikaisia pohja- ja lentotuhkan massavirtoja.

##### 4.4.1 Näytteistä tehtävät analyysit

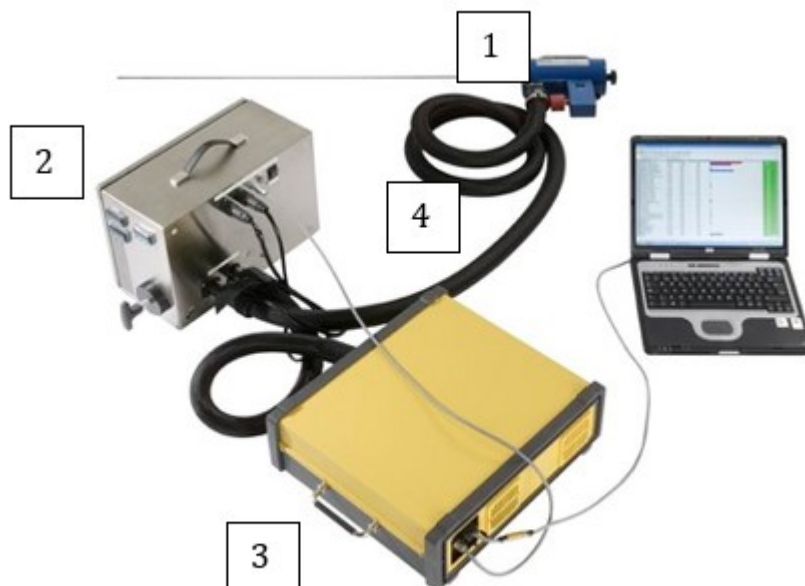
Polttoaineesta määritetään lämpöarvo, kosteuspitoisuus ja tuhkapitoisuus. Tarvittaessa polttoaineen kemiallinen koostumus on myös analysoitava. (SFS-EN 12952-15, 2003, 20)

Palamattomien kiintoaineiden aiheuttaman häviön laskemiseksi määritetään lento- ja pohjatuhkasta lämpöarvo ja tuhkien palamattomat sisällöt. Lämpöarvon osalta hyötysuhdekoeajon osapuolet voivat sopia yksinkertaistetusta menetelmästä, jossa lämpöarvo määritetään polttoaineen hiilipitoisuudesta tai laskennassa voidaan käyttää standardissa esitettyjä yleisiä arvoja tuhkien lämpöarvoista. (SFS-EN 12952-15, 2003, 20)

##### 4.4.2 Savukaasuanalyysi

Savukaasujen koostumus on määritettävä analysointilaitteistolla, joko ajoittain 5 min välein tai jatkuvasti. Käytettäessä automaattisesti toimivia kaasuanalysointilaitteistoja on nolla- ja herkkyys säädöt tehtävät ennen varsinaista koeajoa ja säädöt tarkistetaan esim. testikaasulla. Analysointilaitteen anturin ympäristön lämpötila on pidettävänä vakiona. Tehtäessä hiilidioksidi mittauksia kemiallisilla analysointilaitteistoilla on otettava huomioon, että hiilidioksidi ja rikkidioksidi pitoisuudet on mitattava suhteessa kuiviin savukaasuihin. (SFS-EN 12952-15, 2003, 15, 20)

Kuvassa 8 on esitetty Gasmet DX4000 FTIR savukaasuanalysointilaitteisto. Laitteisto muodostuu näytteenotto-sondista (1), näytteenottojärjestelmästä (2), FTIR analysointilaitteistosta (3) ja näytteenottolinjoista (4). (Savonia-ammattikorkeakoulu, Tuntematon, 5)

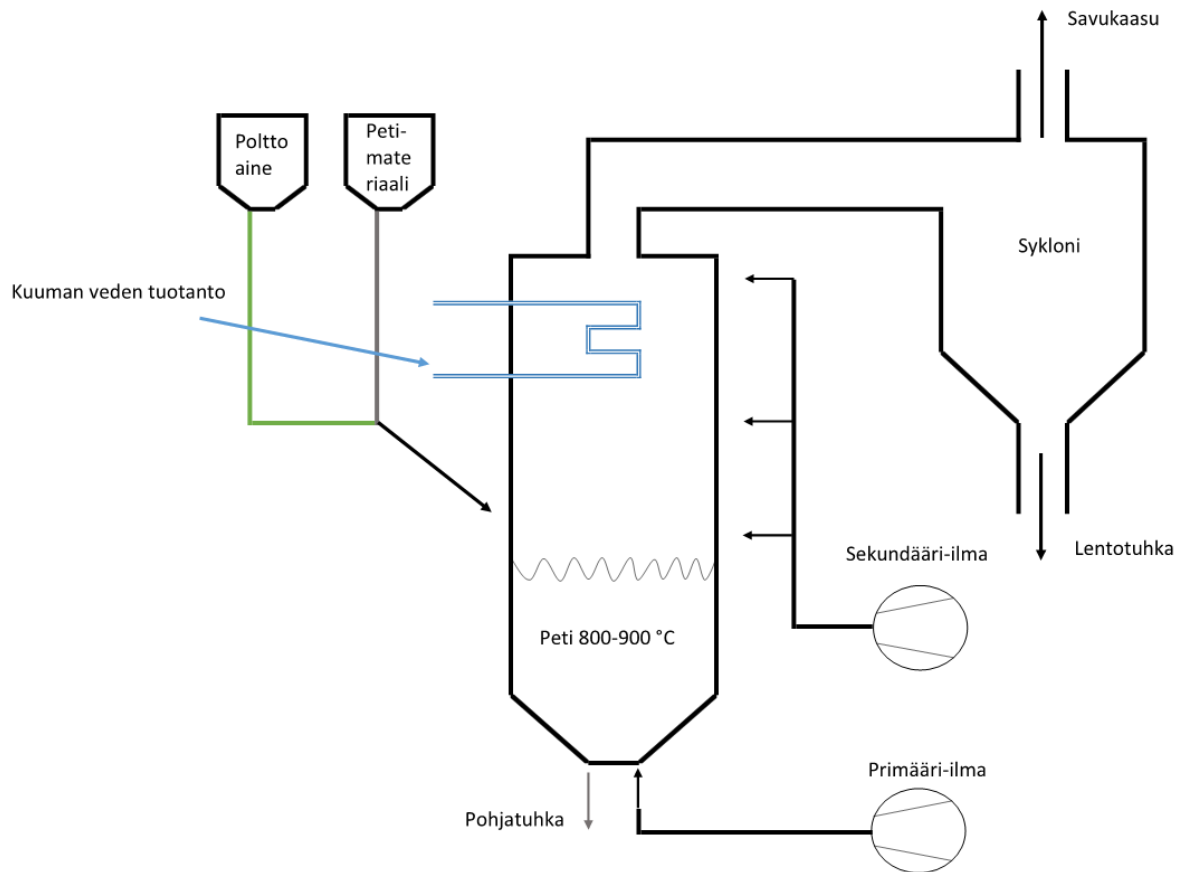


KUVA 8. Gaset DX4000 FTIR savukaasuanalysaattori (Martech 2022)

#### 4.5 Lämpötase ja taseraja

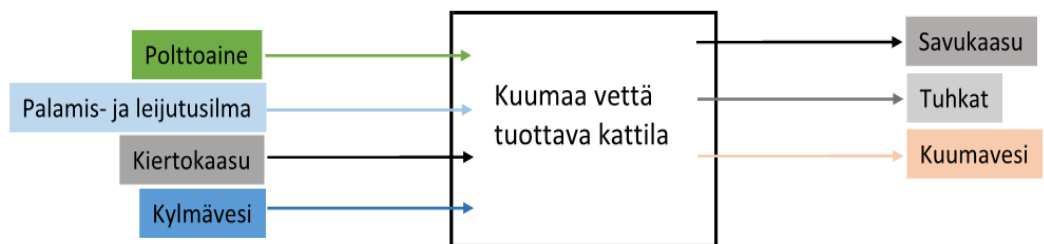
Päädelytys hyötysuhteen laskennalle on taserajan tunnistaminen lämpötaseen määrittämiseksi. Hyötysuhteen määrittämistä varten kattilaan syötetyn lämmön, ulos tulevan lämmön ja häviöiden määrittäminen on oltava mahdollista ja mitattujen tulosten on oltava luotettavia. Mikäli näin ei ole, on taseraja määriteltävä osapuolten kesken uudelleen. Jossain tapauksissa tämä voi vaatia mitattujen arvojen korjaamista taserajalla vallitseviin olosuhteisiin. Normaalisti taseraja kattaa koko vesijärjestelmän pumppuineen, polttojärjestelmän, kiertokaasupuhaltimen ja lentotuhkajärjestelmän. (SFS-EN 12952-15, 2003, 21)

Kuvassa 9 on esitetty esimerkki leijupetikattilasta, joka tuottaa kuumaa vettä ja siinä esiintyvistä energiavirroista. Kattilaan syötetään polttoainetta ja leijutus- ja palamisilmaa. Kattilan seinissä on vesiputket, joilla tuotetaan kuumaa vettä. Tulipesän lämpötila lämmittää syötettävän kylmän veden kuumaksi. Polttoaineen palamisesta syntyviä virtoja on pohjatuhkavirta, lentotuhkavirta ja savukaasuvirta.



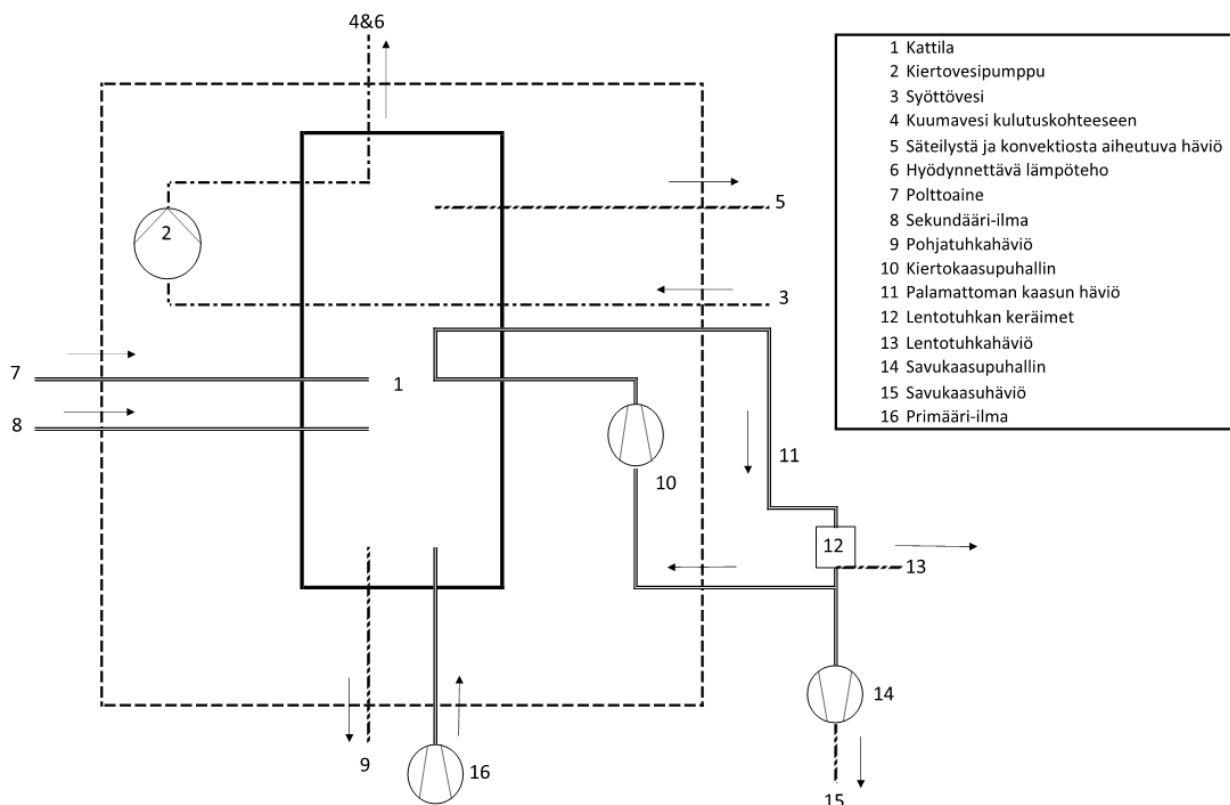
KUVA 9. Kuumaa vettä tuottavan leijupetikattilan energiavirtoja (Luukkonen 2022)

Kuvassa 10 on esitetty kuumavesikattilan lämpötase, joka on yksinkertaistettu kaavio kuvasta 9.



KUVA 10. Kuumavesi kattilan energiatase (Luukkonen 2022)

Kuvassa 11 on esitetty esimerkki kuumavesikattilan taserajasta.



KUVA 11. Esimerkki kuumavesikattilan taserajasta (Luukkonen 2022)

#### 4.6 Kuumavesikattilan hyötysuhteen laskenta

Kuumavesikattilan hyötysuhteen laskennassa käytetään referenssi- eli vertailulämpötilana 25 °C:ta. Koska paineen vaikutus savukaasupuolen massavirtojen entalpioihin käyttöpaineolosuhteissa on minimaalinen, riittää tässä tapauksessa pelkkä referenssilämpötilan tarkentaminen. (SFS-EN 12952-15, 2003, 27)

Hyötysuhteen laskenta aloitetaan määrittämällä kuumavesikattilan hyötyteho, jonka jälkeen lasetaan kattilaan tuotu teho. Hyötysuhde voidaan laskea suoralla menetelmällä hyötytehon ja tuodun tehon suhteen. Epäsuoraa menetelmää käytettäessä, tulee määrittää myös kattilan häviöt, jotta hyötysuhde voidaan laskea.

##### 4.6.1 Kuumavesikattilan hyötyteho

Kuumavesikattilan hyötyteho saadaan määritettyä, kun tiedetään kuuman veden massavirta ja entalpiaero lähtevän ja palaavan veden suhteen. Hyötyteho voidaan laskea käyttämällä kaavaa

$$Q_{out} = \dot{m}_{vesi}(h_2 - h_1) \quad (8)$$

Missä  $Q_{out}$  on vakaisissa käyttöolosuhteissa kattilasta saatava lämpöteho (kW),  $\dot{m}_{vesi}$  on kuuman veden massavirta (kg/s),  $h_1$  on veden entalpia sisääntulon keskiarvo lämpötilassa (kJ/kg) ja  $h_2$  on veden entalpia ulostulon keskiarvo lämpötilassa (kJ/kg). (SFS-EN 12952-15, 2003, 29)

Mikäli kuumavesikattilalta on mitattu tilavuusvirta massavirran sijaan, voidaan se muuntaa massavirraksi kaavalla

$$\dot{m}_{vesi} = \rho_{vesi} V_{vesi} \quad (9)$$

Missä  $\rho_{vesi}$  on veden tiheys 997 kg/m<sup>3</sup> referenssilämpötilassa. (Tammertekniikka 2018, 99; Maol ry 2013, 81)

Veden keskiarvo entalpiaero, voidaan johtaa veden ominaislämpökapasiteetin ja koeajon keskiarvo lämpötilaeron kautta, jolloin kuumavesikattilan tuottaman hyötytehon kaava saadaan muotoon

$$Q_{out} = (\rho_{vesi} V_{vesi}) * (c_{p,vesi} * (t_{2,vesi;\tau;ka} - t_{1,vesi;\tau;ka})) \quad (10)$$

Missä  $c_{p,vesi}$  on veden ominaislämpökapasiteetti 4,19 kJ/kgK. (Tammertekniikka 2018, 107; Maol ry 2013, 78; Stack Overflow Ltd. 2017)

Mikäli veden lämpötilan muutos on suurempi kuin kaavassa 1 on esitetty, tulee kattilasta saatava hyötyteho laskea kaavalla

$$Q_{out} = \dot{m}_{vesi} (h_2 - h_1) * (1 + f) \quad (11)$$

$$f = \frac{V_b}{V_{vesi}} \frac{1,15}{(t_{2,vesi;ka} - t_{1,vesi;ka})} \frac{\Delta t_r}{\tau} \quad (12)$$

Missä  $f$  on korjauskerroin ja muut termit on kerrottu kaavan 1 yhteydessä. (SFS-EN 12952-15, 2003, 29)

#### 4.6.2 Kattilaan tuotu lämpöteho

Lämmöntuotto on verrannollinen poltettuun polttoaineeseen. Tämä voidaan esittää seuraavalla yhtälöllä

$$Q_{in} = \dot{m}_{pa} \left[ \left( \frac{(H_{N,ar} + h_{pa})}{(1 - l_{pal})} \right) + h_i \right] \quad (13)$$

Missä  $Q_{in}$  on kattilaan tuotu lämpöteho (kW),  $\dot{m}_{pa}$  on polttoaineen massavirta (kg/s),  $H_{N,ar}$  on polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (kJ/kg),  $h_{pa}$  on polttoaineen entalpia (kJ/kg),  $l_{pal}$  on palamattoman polttoaineen suhde syötettyyn polttoaineeseen (kg<sub>pal</sub>/kg<sub>pa</sub>) ja  $h_i$  on palamisilman entalpia (kJ/kg). (SFS-EN 12952-15, 2003, 30)

Polttoaineen entalpialla tarkoitetaan kattilaan polttoaineen mukana tuotua lämpöä esim. polttoaineen esilämmitys voidaan huomioida laskennassa käyttämällä polttoaineen entalpiaa. Polttoaineen entalpia voidaan laskea kaavalla

$$h_{pa} = \bar{c}_{p,pa} (t_{pa} - t_r) \quad (14)$$

Missä  $c_{p,pa}$  on polttoaineen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK),  $t_{pa}$  on polttoaineen lämpötila (°C) ja  $t_r$  on referenssilämpötila. (SFS-EN 12952-15, 2003, 30; Huhtinen ym. 1994, 94)

Palamattoman polttoaineen suhde syötettyyn polttoaineeseen voidaan laskea seuraavalla kaavalla, kun on mitattu pohja- ja lentotuhkan massavirrat

$$l_{pal} = \frac{\gamma_{tuhka}(1-\nu)}{1-\gamma_{tuhka}-\gamma_{vesi}} * \frac{\dot{m}_{pt}\mu_{pt} + \dot{m}_{lt}\mu_{lt}}{\dot{m}_{pt}(1-\mu_{pt}) + \dot{m}_{lt}(1-\mu_{lt})} \quad (15)$$



Missä  $\gamma_{\text{tuhka}}$  on polttoaineen tuhkapitoisuus (m-%),  $v$  on tuhkan haihtuvien aineiden pitoisuus (leijupetikattilassa voidaan käyttää arvoa 0 (m-%), koska tuhkan haihtuvat aineet palavat leijupetikattilan yläosissa),  $\gamma_{\text{vesi}}$  on polttoaineen kosteuspitoisuus (m-%),  $\dot{m}_{\text{pt}}$  on pohjatuhkan massavirta (kg/s),  $\mu_{\text{pt}}$  on palamattomien aineiden määrä pohjatuhkassa (kg<sub>pal</sub>/kg<sub>pt</sub>),  $\dot{m}_{\text{lt}}$  on lentotuhkan massavirta (kg/s) ja  $\mu_{\text{lt}}$  on palamattomien määrä lentotuhkassa (kg<sub>pal</sub>/kg<sub>lt</sub>). (SFS-EN 12952-15, 2003, 35-37)

Palamisilman entalpia tarkoitetaan palamisilman mukana kattilaan tuotua lämpöä, joka saadaan esim. kattilahuoneesta tai palamisilman esilämmittimestä. Palamisilman entalpia lasketaan kaavalla

$$h_i = \mu_i \bar{c}_{p,i} (t_i - t_r) \quad (16)$$

Missä  $\mu_i$  on tarvittavan palamisilman massan suhde polttoaineen massaan käyttökosteudessa eli toisin sanoen kuinka paljon palamisilmaa tarvitaan, kun 1 kg polttoainetta poltetaan (kg<sub>i</sub>/kg<sub>pa</sub>),  $c_{p,i}$  on palamisilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK), jolle voidaan käyttää arvoa 1,011 kJ/kgK ja  $t_i$  on palamisilman lämpötila (°C). (SFS-EN 12952-15, 2003, 11, 30)

Tarvittavan palamisilman massan suhde polttoaineen massaan käyttökosteudessa voidaan laskea kaavalla

$$\mu_i = \mu_{i,\text{kuiva}} (1 + x_{\text{H}_2\text{O},i}) \quad (17)$$

Missä  $\mu_{i,\text{kuiva}}$  on kuivan palamisilman massan suhde polttoaineen massaan eli kuinka paljon tarvitaan kuivaa palamisilmaa, että 1 kg polttoainetta palaa (kg<sub>i,kuiva</sub>/kg<sub>pa</sub>) ja  $x_{\text{H}_2\text{O},i}$  on palamisilmankosteuspitoisuus (m-%). Ilman kosteuspitoisuus lisää palamisilman määrää vain noin 0,1-1 %, joten käytännön laskuissa se voidaan jättää huomioimatta. (SFS-EN 12952-15, 2003, 40-42; Huhtinen ym. 1994, 76)

Kuivan palamisilman massan suhde polttoaineen massaan saadaan laskettua kaavalla

$$\mu_{i,\text{kuiva}} = \mu_{i,\text{sto}} + \rho_i V_{\text{sk;sto}} \frac{\gamma_{\text{O}_2,\text{sk;kuiva}}}{\gamma_{\text{O}_2,i,\text{kuiva}} - \gamma_{\text{O}_2,\text{sk;kuiva}}} \quad (18)$$

Missä  $\mu_{i,\text{sto}}$  on stoikiometrinen palamisilman massan suhde polttoaineen massaan eli kuinka paljon palamisilmaa teoriassa tarvitaan, että 1 kg polttoainetta palaa täydellisesti (kg<sub>i</sub>/kg<sub>pa</sub>),  $\rho_i$  on kuivan palamisilman standardi tiheys 1,293 (kg/m<sup>3</sup>),  $V_{\text{sk;sto}}$  on savukaasun stoikiometrinen tilavuus eli kuinka paljon savukaasua teoriassa syntyy, kun 1 kg polttoainetta palaa täydellisesti (m<sup>3</sup><sub>sk</sub>/kg<sub>pa</sub>),  $\gamma_{\text{O}_2,\text{sk;kuiva}}$  on kuivan savukaasun happipitoisuus (m<sup>3</sup><sub>O<sub>2</sub></sub>/m<sup>3</sup><sub>sk;kuiva</sub>) ja  $\gamma_{\text{O}_2,i,\text{kuiva}}$  on kuivan palamisilman happipitoisuus 0,20938 (m<sup>3</sup><sub>O<sub>2</sub></sub>/m<sup>3</sup><sub>i,kuiva</sub>). (SFS-EN 12952-15, 2003, 41-42)

Stoikiometrinen palamisilman massan suhde polttoaineen massaan saadaan laskettua kaavalla

$$\mu_{i,\text{sto}} = 11,5122\gamma_C + 34,2974\gamma_H + 4,3129\gamma_S - 4,3212\gamma_O \quad (19)$$

Missä  $\gamma$  on polttoaineen alkuainepitoisuus (kg<sub>C,H,S,O</sub>/kg<sub>pa</sub>), C on hiili, H on vety, S on rikki ja O on happi. Polttoaineen koostumuksen summa mukaan lukien polttoaineen kosteus ja tuhkapitoisuus tulee olla yhtä kuin 1. (SFS-EN 12952-15, 2003, 42)

Savukaasun stoikiometrinen tilavuus saadaan laskettua kaavalla

$$V_{\text{sk;sto}} = 8,8930\gamma_C + 20,9724\gamma_H + 3,3190\gamma_S - 2,6424\gamma_O + 0,7997\gamma_N \quad (20)$$

Missä  $\gamma_N$  on polttoaineen tyypipitoisuus ( $\text{kg}_N/\text{kg}_{pa}$ ). (SFS-EN 12952-15, 2003, 41-42)

#### 4.6.3 Muut huomioitavat tehot

Muilla huomioitavilla tehoilla tarkoitetaan muunlaisia tehoja kuin polttoaineen kemiallisesta lämmöstä saatavaa lämpötehoa. Tällaisia tehoja on esim. kiertokaasupuhaltimen teho, kiertovesipumpujen tehot ja muiden laskennassa mahdollisesti huomioitavien käyttömoottorien tehot. Hyötysuhteen määrittämisessä huomioitavien moottoreiden kattilaan tuottamat tehot saadaan laskemalla ne yhteen

$$Q_{muut} = \sum P_m \quad (21)$$

Missä  $Q_{muut}$  on muut laskennassa huomioitavat tehot (kW) ja  $\sum P_m$  on summa huomioitavien moottoreiden tehoista (kW). (SFS-EN 12952-15, 2003, 32)

Huomioitavien tehojen määrittämisessä tulee ottaa moottorin hyötysuhde huomioon. Apumoottoreiden tehot ovat yleensä pieniä, joten ne voidaan jättää huomioimatta hyötysuhteen määrittämisessä (SFS-EN 12952-15, 2003, 32). Huomioitavien moottoreiden tehot voidaan laskea käyttämällä seuraavaa kaavaa, kun tiedetään moottorin jännite, tehokerroin, hyötysuhde ja mitataan moottorin käyttämä virta koeajojakson aikana

$$P_{syöttö} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{1000} \quad (22)$$

Missä  $P_{syöttö}$  on moottorin kattilaan tuottama teho (kW),  $U$  on jännite (V),  $I$  on virta (A),  $\cos \varphi$  on tehokerroin ja  $\eta$  on moottorin hyötysuhde. (SKS Group, Tuntematon)

Moottorin hyötysuhde saadaan laskettua, kun tiedetään edellä mainittujen moottorin arvojen lisäksi moottorin lähtöteho eli nimellisteho. Moottorin hyötysuhde lasketaan kaavalla

$$\eta = \frac{P_{lähtö}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \quad (23)$$

Missä  $P_{lähtö}$  on moottorin lähtö- eli nimellisteho (W). Jännitteen, virran ja tehokertoimen arvoina hyötysuhteen laskennassa käytetään valmistajan ilmoittamia nimellisarvoja. (ABB Industry Oy 2001, 14)

#### 4.6.4 Kattilaan tuodut tehot yhteensä

Kattilaan tuodut tehot kokonaisuudessaan saadaan tuodun lämpötehon ja muiden kattilaan tuotujen tehojen summana kaavalla

$$Q_{in;kok} = Q_{in} + Q_{muut} \quad (24)$$

Missä  $Q_{in;kok}$  on kaikki kattilaan tuodut tehot yhteensä. (SFS-EN 12952-15, 2003, 33)

#### 4.6.5 Kattilan häviöiden laskenta

Epäsuoraa menetelmää käytettäessä kattilan hyötysuhteen määrittämiseen, on kattilan häviöt määrittävä. Epäsuora menetelmä antaa suoraa menetelmää paremman kuvan siitä millä kattilan osalla on mahdollisesti ongelmia ja antaa näin kattilalaitokselle tietoa siitä, mitä laitteita on optimoitava eli säädettävä tai mitkä laitteet vaativat kunnossapitoa. Hyötysuhteeseen vaikuttavat häviöt on esitelty aiemmin luvussa 3.

## 4.6.6 Savukaasuhäviö

Savukaasuhäviö lasketaan kaavalla

$$q_{sk} = \dot{m}_{pa} \mu_{sk} \bar{c}_{p;sk} (t_{sk} - t_r) \quad (25)$$

Missä  $q_{sk}$  on savukaasuhäviö (kW),  $\mu_{sk}$  on savukaasun massan suhde polttoaineen massaan ( $\text{kg}_{sk}/\text{kg}_{pa}$ ),  $\bar{c}_{p;sk}$  on savukaasun ominaislämpökapasiteetti ( $\text{kJ}/\text{kgK}$ ) ja  $t_{sk}$  on savukaasun lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ). (SFS-EN 12952-15, 2003, 33-34)

Savukaasun massan suhde polttoaineen massaan lasketaan kaavalla

$$\mu_{sk} = \mu_i + 1 - y_{tuhka} (1 - \nu) \quad (26)$$

(SFS-EN 12952-15, 2003, 41)

Savukaasun ominaislämpökapasiteetti voidaan laskea seuraavaksi esitetyllä tavalla, käyttämällä standardissa esitettyjä polynomiyhtälöitä ja kertoimia. Kertoimet on esitetty taulukossa 1.

$$\bar{c}_{p;sk} = \bar{c}_{p;i;kuiva} + P_1 x_{H_2O;sk} + P_2 x_{CO_2;sk} \quad (27)$$

$$\bar{c}_{p;i;kuiva} = a + \frac{b}{2} t_i + \frac{c}{3} t_i^2 + \frac{d}{4} t_i^3 + \frac{e}{5} t_i^4 + \frac{f}{6} t_i^5 \quad (28)$$

$$P_1 = a_1 + \frac{b_1}{2} t_{sk} + \frac{c_1}{3} t_{sk}^2 + \frac{d_1}{4} t_{sk}^3 + \frac{e_1}{5} t_{sk}^4 \quad (29)$$

$$P_2 = a_2 + \frac{b_2}{2} t_{sk} + \frac{c_2}{3} t_{sk}^2 + \frac{d_2}{4} t_{sk}^3 + \frac{e_2}{5} t_{sk}^4 \quad (30)$$

Missä  $\bar{c}_{p;i;kuiva}$  on kuivan palamisilman ominaislämpökapasiteetti ( $\text{kJ}/\text{kgK}$ ),  $P_1$  ja  $P_2$  ovat polynomiyhtälöitä,  $x_{H_2O;sk}$  on savukaasun kosteuspitoisuus ( $\text{kg}_{H_2O}/\text{kg}_{sk}$ ) ja  $x_{CO_2;sk}$  on savukaasun hiilidioksidi pitoisuus ( $\text{kg}_{CO_2}/\text{kg}_{sk}$ ). (SFS-EN 12952-15, 2003, 44-46)

TAULUKKO 1. Palamisilman ja savukaasun polynomikertoimet (SFS-EN 12952-15, 2003, 45)

Palamisilman ja savukaasun ominaislämpökapasiteettien laskennan polynomikertoimet					
$c_{p;i}$		$P_1$		$P_2$	
a	0,1004	$a_1$	0,8555	$a_2$	-0,1002
b	737,0722	$b_1$	118,4850	$b_2$	2,2233
c	24,1098	$c_1$	107,9081	$c_2$	1,5865
d	-24,4274	$d_1$	-95117,1556	$d_2$	306,4197
e	579177,9336	$e_1$	1733,6730	$e_2$	341842968337,8450
f	8668,0729				

## 4.6.7 Palamattoman kaasun häviö

Palamattoman kaasun häviö saadaan laskettua kaavalla

$$q_{CO} = \dot{m}_{pa} V_{sk;kuiva} \gamma_{CO;kuiva} H_{CO} \quad (31)$$

Missä  $q_{CO}$  on palamattoman kaasun häviö (MW),  $V_{sk;kuiva}$  on kuivan savukaasun tilavuus eli kuinka paljon kuivaa savukaasua syntyy, kun 1 kg polttoainetta poltetaan ( $m^3_{sk;kuiva}/kg_{pa}$ ),  $\gamma_{CO;kuiva}$  on hiilimonoksidin eli häkäkaasun pitoisuus kuivassa savukaasussa ( $m^3_{CO}/m^3_{sk}$ ),  $H_{CO}$  on häkäkaasun lämpöarvo ( $MJ/m^3$ ). Standardissa on ilmoitettu häkäkaasun lämpöarvoksi 12,633  $MJ/m^3$ . (SFS-EN 12952-15, 2003, 11, 35)

Kuivan savukaasun tilavuus lasketaan kaavalla

$$V_{sk;kuiva} = V_{sk;sto} + V_{sk;sto} \frac{\gamma_{O2;sk;kuiva}}{\gamma_{O2;i;kuiva} - \gamma_{O2;sk;kuiva}} \quad (32)$$

(SFS-EN 12952-15, 2003, 40-42)

## 4.6.8 Pohja- ja lentotuhkan palamattomien kiintoaineiden aiheuttamat häviöt

Pohjatuhkan palamattomien kiintoaineiden aiheuttama häviö voidaan laskea kaavalla

$$q_{pt} = \dot{m}_{pt} [\bar{c}_{p;pt} (t_{pt} - t_r) + \mu_{pt} H_{pal}] \quad (33)$$

Missä  $q_{pt}$  on pohjatuhkahäviö (MW),  $c_{p;pt}$  on pohjatuhkan ominaislämpökapasiteetti ( $kJ/kgK$ ),  $t_{pt}$  on pohjatuhkan lämpötila ( $^{\circ}C$ ) ja  $H_{pal}$  on palamattoman kiintoaineen lämpöarvo pohjatuhkassa ( $kJ/kg$ ). Pohjatuhkan ominaislämpökapasiteetiksi on ilmoitettu standardissa 1,0  $kJ/kgK$  ja palamattoman kiintoaineen (ruskahiili) lämpöarvoksi 27,2  $MJ/kg$ . Ruskohiilen lämpöarvon voidaan katsoa olevan lähimpänä puupolttoaineen palamatonta kiintoainetta, sillä ruskohiilestä on vielä erotettavissa puunrakenne. (SFS-EN 12952-15, 2003, 11, 35-37; Alakangas ym. 2016, 13)

Ja vastaavasti lentotuhkahäviö lasketaan kaavalla

$$q_{lt} = \dot{m}_{lt} [\bar{c}_{p;lt} (t_{sk} - t_r) + \mu_{lt} H_{pal}] \quad (34)$$

Missä  $q_{lt}$  on lentotuhkahäviö (MW),  $c_{p;lt}$  on lentotuhkan ominaislämpökapasiteetti. Lentotuhkan ominaislämpökapasiteetiksi on ilmoitettu standardissa 0,84  $kJ/kgK$ . (SFS-EN 12952-15, 2003, 11, 35-37). Mikäli lentotuhkaa kerätään usealla laitteella, tulee lentotuhkan aiheuttama häviö määrittää, jokaiselle pisteelle erikseen. Tällöin laskennassa käytettäväksi savukaasun lämpötilaksi otetaan lentotuhkan keräyspisteessä vallitseva savukaasun lämpötila.

## 4.6.9 Säteilystä- ja konvektiosta aiheutuvat häviöt

Säteilystä ja konvektiosta aiheutuvia häviöitä ei ole mahdollista määrittää mittaamalla tai se on äärimmäisen vaikeaa. Siksi häviöiden määrittämiseen käytetään yleisiä arvoja, jotka pätevät yleisimmille kattilamalleille. Säteilystä- ja konvektiosta aiheutuvat häviöt voidaan arvioida käyttämällä kaavaa

$$q_{rc} = C Q_{out}^{0,7} \quad (35)$$

Missä  $q_{rc}$  on säteilystä- ja konvektiosta aiheutuvat häviöt (MW), C on leijupetikattilaa vastaava kerroin 0,0315 ja  $Q_{out}$  lasketaan kaavalla 8.(SFS-EN 12952-15, 2003, 38-39)

#### 4.6.10 Häviöt yhteensä

Kun kaikki häviöt on saatu määritettyä, voidaan ne laskea yhteen, jolloin saadaan kattilan kokonaisu-häviöt lasketuksi. Kokonaisu-häviö lasketaan kaavalla

$$Q_{häviö} = q_{sk} + q_{CO} + q_{pt} + q_{lt} + q_{rc} \quad (36)$$

Missä  $Q_{häviö}$  on summa kaikista kattilan häviöistä.(SFS-EN 12952-15, 2003, 40)

#### 4.6.11 Kattilan hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä

Kattilan hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä perustuu kattilasta hyödyksi saatavan lämpöenergiavirran määrittämiseen (Huhtinen ym. 1994, 92). Taulukossa 2 on esitetty tiedot, jotka kattilalta tulee yleensä määrittää tai mitata, jotta hyötysuhde voidaan laskea käyttämällä suoraa me-  
netelmää.

TAULUKKO 2. Hyötysuhteen määrittämiseen tarvittavat mittaustiedot eri menetelmille (SFS-EN 12952-15, 2003, 54-55)

	Suora menetelmä	Epäsuora menetelmä
<b>Vesi</b>		
	Massavirta	Massavirta
	Lämpötila ennen ja jälkeen kattilan	Lämpötila ennen ja jälkeen kattilan
<b>Polttoaine</b>		
	Massavirta	
	Lämpöarvo	Lämpöarvo
	Tuhkapitoisuus	Tuhkapitoisuus
	Kosteuspitoisuus	Kosteuspitoisuus
	Lämpötila	Lämpötila
<b>Palamisilma</b>		
	Lämpötila	Lämpötila
	Kosteuspitoisuus	Kosteuspitoisuus
<b>Savukaasu</b>		
	O <sub>2</sub> -pitoisuus	O <sub>2</sub> -pitoisuus
	CO-pitoisuus	CO-pitoisuus
	CO <sub>2</sub> -pitoisuus	CO <sub>2</sub> -pitoisuus
	Lämpötila	Lämpötila
<b>Tuhka</b>		
		Pohjatuhkan lämpötila
		Pohjatuhkan massavirta
		Palamattomien määrä pohjatuhkassa
		Lentotuhkan massavirta
	Palamattomien määrä lentotuhkassa	

Kattilan hyötysuhde suoralla menetelmällä lasketaan kaavalla

$$\eta_s = \frac{Q_{out}}{Q_{in;kok}} \quad (37)$$

Missä  $\eta_s$  on kattilan hyötysuhde suoralla menetelmällä. (SFS-EN 12952-15, 2003, 54)

#### 4.6.12 Kattilan hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä

Epäsuorassa menetelmässä kattilan hyötysuhde määritetään määrittämällä kattilan häviöt ja määritys tapahtuu häviöiden kautta (Huhtinen ym. 1994, 92). Taulukosta 3 nähdään kattilalta yleensä tarvittavat tiedot, jotta hyötysuhde voidaan määrittää epäsuoralla menetelmällä. Hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä lasketaan kaavalla

$$\eta_e = 1 - \frac{Q_{häviö}}{Q_{out} + Q_{häviö}} \quad (38)$$

Missä  $\eta_e$  on kattilan hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä. (SFS-EN 12952-15, 2003, 53, 55-56)

#### 4.6.13 Mahdolliset muut lisämääritykset

Standardi SFS-EN 12952-15 antaa myös määrittämissuhteet ja laskentakaavat, joiden mukaan on mahdollista määrittää lentotuhkakeräimen hyötysuhde ja savukaasun sisältämän rikin poiston hyötysuhde. Hyötysuhdemäärityksen mittausepävarmuuden määrittämiseen standardi antaa myös ohjeet ja laskentakaavat, joiden mukaan toimitaan, kun mittausepävarmuutta hyötysuhdemääritykselle määritetään. Edellä mainittuja lisämäärityksiä ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.

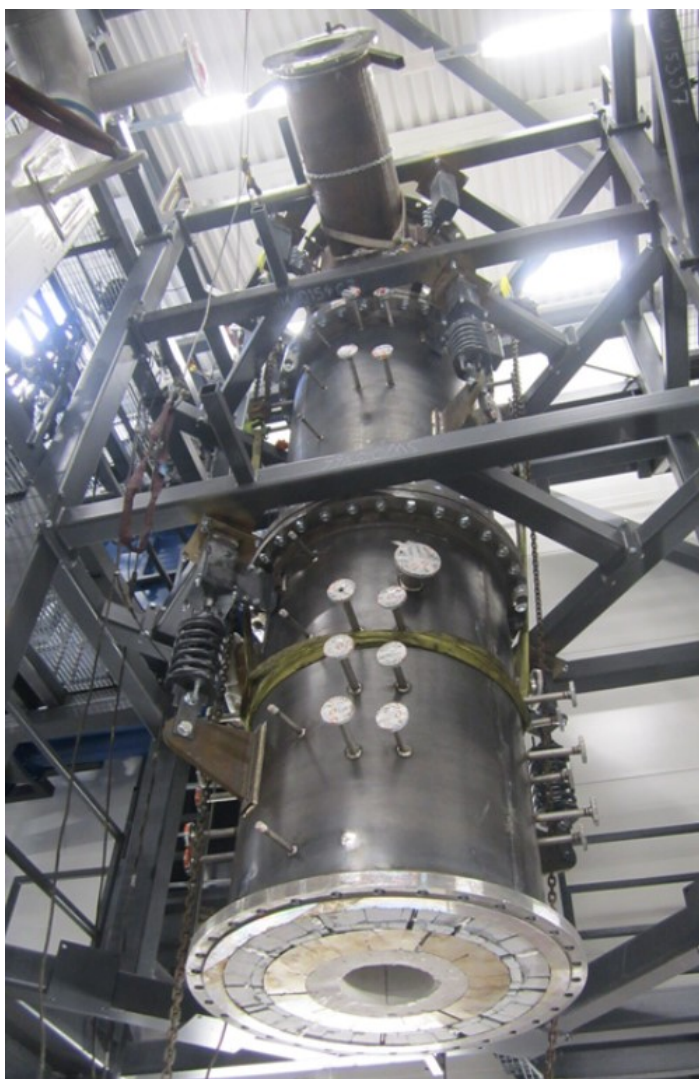
## 5 SAVONIAN ENERGIATUTKIMUSKESKUKSEN LEIJUPETIKATTILA

Savonian energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilalla voidaan tehdä erilaisia tutkimuksia liittyen leijupetiteknikkaan mm. erilaisten polttoaineiden palamiseen ja niistä syntyviin savukaasuihin sekä tutkimuksia ilmansyöttö tasojen vaihtelusta ja kiertokaasun vaikutuksista palamisprosessiin. Leijupetikattila sisältää myös paljon lämpötilan mittausyhteitä, joita voidaan käyttää lämpötilan käyttäytymisen tutkimiseen leijupetikattilan eri osissa palotapahtuman aikana.(Energiatutkimuskeskus 2022)

### 5.1 Leijupetikattila

Leijupetikattila koostuu neljästä eri segmentistä sekä takavedosta. Kattila on lämpöteholtaan maksimissaan 0,3 MW. Kattilan tulipesän halkaisija on noin 0,5 m ja arinalla olevan hiekkapedin korkeus on noin 0,5 m, jolloin pedissä olevan hiekan määrä on noin 120 kg. Korkeutta kattilalla on 8 m. Leijupetikattilan rinnalla toimii arinakattila, jonka avulla otetaan savukaasun sisältämä lämpöenergia talteen.(Energiatutkimuskeskus 2022)

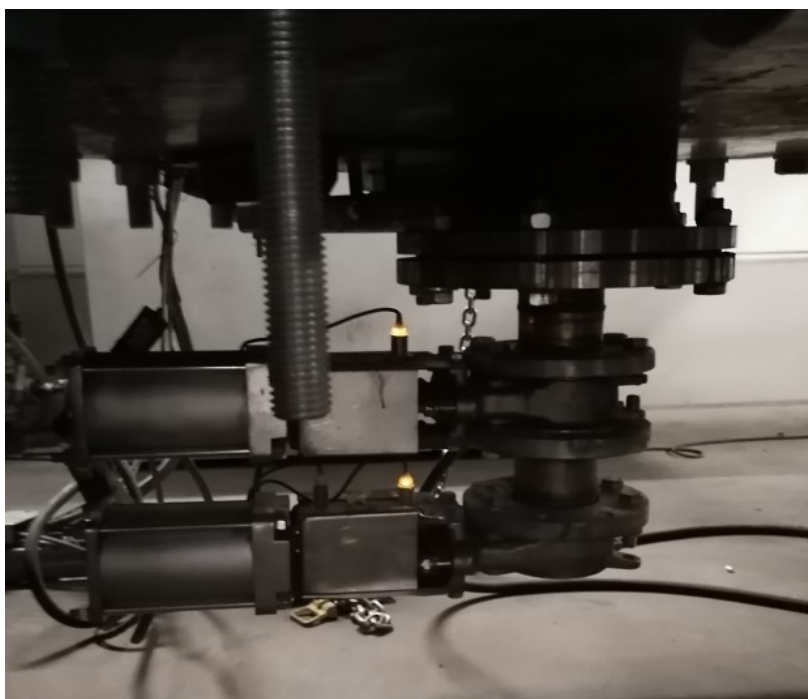
Kuvassa 12 on esitetty Savonian energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilan kuva rakennusvaiheessa.



KUVA 12. Savonian energiatutkimuskeskuksen leijupetikattila rakennusvaiheessa (Energiatutkimuskeskus 2022)

Pohjatuhkan poisto leijupetikattilasta tapahtuu pohjatuhkan poistoyhteen kautta. Pohjatuhkayhde koostuu kahdesta paineilmakäyttöisestä levyluistiventtiilistä. Pohjatuhkaa saadaan poistettua kattilasta käynnistämällä venttiileiden ohjaussequenssi. Ohjaussequenssi ajaa venttiileitä niin, että ensin ylempi aukeaa, petihiekka pääsee valumaan ”välitaskuun”, ylempi sulkeutuu ja alempi aukeaa, päästäten petihiekan valumaan pois venttiilin alla olevaan astiaan. Poistettu petihiekka seulotaan, jolloin siitä saadaan erotettua palamaton kiintoaines ja sintraantunut petihiekka. Seulonnan läpäissyt petihiekka palautetaan hiekkasiilon kautta takaisin kattilaan.

Kuvassa 13 on esitetty pohjatuhkayhde.



KUVA 13. Leijupetikattilan pohjatuhkayhde (Luukkonen 2022)

## 5.2 Puhaltimet

Leijupetikattilan palamis- ja leijutusilma tuotetaan yhdellä palamisilmapuhaltimella. Pedin alapuolelta ohjataan kattilaan leijutus- ja palamisilmaa. Palamisilmaa voidaan ohjata myös pedin yläpuolelle neljään eri tasoon, jolloin palamista voidaan siirtää kattilan alaosista ylemmäksi ja tehostaa palamista sekä hallita petilämpötiloja.

Kuvassa 14 on esitetty palamisilmapuhallin.





KUVA 14. Palamisilmapuhallin (Luukkonen 2022)

Pedin lämpötilaa, palamista ja savukaasun jäännöshappea voidaan hallita käyttämällä kiertokaasua, joka ohjataan kattilaan käyttämällä kiertokaasupuhallinta. Kiertokaasua voidaan ottaa, joko savukaasun puhdistuksen jälkeen letkusuodattimen takaa tai arinakattilan jälkeen. Kiertokaasua voidaan ohjata arinan lisäksi neljälle eri tasolle pedin yläpuolelle.

Kuvassa 15 on esitetty kiertokaasupuhallin



KUVA 15. Kiertokaasupuhallin (Luukkonen 2022)

Leijupetikattilassa palamisesta syntyvä savukaasu imetään kattilasta kohti savukaasun puhdistusta ja savupiippua savukaasupuhaltimella. Lisäksi savukaasupuhallin tuottaa kattilaan tarvittavan alipai-  
neen. Savukaasupuhallin on kahdennettu eli toinen savukaasupuhallin on varalla, jos toinen vikaan-  
tuu.

Savukaasupuhaltimet on esitetty kuvassa 16.



KUVA 16. Savukaasupuhaltimet (Luukkonen 2022)

### 5.3 Polttoaineen syöttö

Polttoaineen syöttö leijupetikattilaan tapahtuu kolakuljettimella, polttoaineen syöttöruuvilla ja sulkusyöttimellä. Polttoaine syötetään polttoainekatoksessa kolakuljettimelle, joka toimittaa polttoaineen välisiiloon. Polttoaineen syöttöruuvi syöttää polttoaineen välisiilosta sulkusyöttimelle, joka syöttää polttoaineen pudostusputkeen, joka johtaa leijupetikattilan tulipesään.

Kuvassa 17 on esitetty polttoaineen syöttöruuvi ja sulkusyötin.



KUVA 17. Polttoaineen syöttöruuvi ja sulkusyötin (Luukkonen 2022)

#### 5.4 Savukaasunpuhdistus

Leijupetikattilassa polttoaineen palamisesta syntyvästä savukaasusta puhdistetaan karkeat lentotuhka partikkelit syklonilla ja hienommat partikkelit letkusuodattimella. Leijupetikattilan kaasutilasta savukaasu kulkee takavetoon. Heti takavedon jälkeen karkeat lentotuhkapartikkelit erotellaan savukaasusta syklonissa. Syklonin jälkeen savukaasu kulkee arinakattilan läpi luovuttaen lämpöenergiaa arinakattilan putkistossa kulkevaan veteen. Arinakattilan jälkeen lämpöenergian luovuttanut savukaasu on riittävän viileä, jotta se voidaan ohjata letkusuodattimelle, jossa hienot lentotuhkapartikkelit erotellaan savukaasusta. Letkusuodattimen jälkeen savukaasu jatkaa kohti savupiippua ja ulkoilmaa.

Kuvassa 18 on esitetty sykloni. Sykloni näkyy kuvassa vasemmalla. Kuvan taka-alalla näkyy takavedon alaosa ja oikealla näkyy FTIR savukaasuanalysointilaite.



KUVA 18. Sykloni, takaveto ja FTIR savukaasuanalysaattori (Luukkonen 2022)

Kuvassa 19 on esitetty letkusuodatin.



KUVA 19. Letkusuodatin (Luukkonen 2022)

## 6 SAVONIAN ENERGIATUTKIMUSKESKUKSEN LEIJUPETIKATTILAN HYÖTYSUHTEN MÄÄRITYS

Hyötysuhteen laskentaohjelman, tutkimustodistuksen ja tutkimusraportin luomiseksi järjestettiin hyötysuhdekoeajo Savonian energiatutkimuskeskuksella. Hyötysuhdekoeajo suunniteltiin standardin SFS-EN 12952-15:n mukaiseksi.

### 6.1 Hyötysuhdekoeajon suunnittelu

Hyötysuhdekoeajo suunniteltiin toteutettavaksi Savonian energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilalla. Koeajon tarkoituksena oli suorittaa referenssijajo 100 %:n teholla, hyötysuhteen standardin SFS-EN 12952-15:n mukaista määrittämistä varten. Koeajosta oli tarkoitus saada tarvittavat tiedot laskentaohjelman, tutkimustodistuksen ja tutkimusraportin luomiseksi. Koeajon kestoksi suunniteltiin 4 h.

Suunnittelu aloitettiin keräämällä laskentaan tarvittavia tietoja standardista SFS-EN 12952-15. Kerätyt tiedot koostettiin taulukoksi, jonka mukaan tutkittiin Savonian energiatutkimuskeskuksen PI-kaavioita, joista etsittiin mittaukset, joiden tietoja tarvitaan hyötysuhteen määrittämiseen. PI-kaavioiden mittaukset varmistettiin etsimällä niiden fyysiset sijainnit energiatutkimuskeskukselta ja varmistamalla mittalaitteiden toimivuus tutkimalla valvomonäyttöjä. Lisäksi tarkistettiin, että mittaustiedot tallentuvat automaattiseen tiedonkeräykseen.

Polttoaineen lämpötilamittausta ei ollut laitoksella valmiina, joten se toteutettiin siirtämällä yksi ylimääräinen lämpötilamittausanturi polttoaineen välisiiloon. Asennus tehtiin välisiiloon niin, että anturi jäi hiukan ruuvin yläpuolelle, jolloin sen läpi kulkisi jatkuvasti tasainen polttoainevirta.

Polttoaineen massavirralle ei myöskään ollut omaa varsinaista mittalaitetta, joten polttoaineen massavirta päätettiin arvoida polttoainesiihon massan muutoksesta. Arvointi suunniteltiin tehtäväksi niin, että siilon massan muutosta tarkastellaan sellaisen jakson aikana, jolloin polttoaine siiloon ei kohdistu polttoaineen lisäystä tai muita tekijöitä, jotka voisivat häiritä siilon massan mittausta. Massan muutosta tarkasteltaisiin tunnin jaksossa, jolloin saadaan polttoaineen massavirta tunnissa selville, josta voidaan sitten massavirta muuntaa muotoon kg/s.

Kattilaveden tilavuusvirta mittauksen havaittiin puuttuvan automaattisesta tiedonkeruusta ja huomattiin myös, että sen lisäys ei onnistu, joten tilavuusvirtaus lukema päätettiin kirjata manuaalisesti mittalaitteen näytöltä. Standardin 3 min lukemaväliin suunniteltiin poikkeama ja mittauksen lukuväliksi päätettiin 15 min, koska tiheämpi lukemaväli olisi sitonut yhden työntekijän tilavuusvirtaus mittauksen lukemiseen ja tähän ei olisi ollut riittävästi henkilöresursseja.

Näytteenotto suunniteltiin tapahtuvaksi letkusuodatinta lukuunottamatta standardin SFS-EN 12952-15:n mukaisesti eli 15 min välein. Kokemus on osoittanut, että energiatutkimuskeskuksen letkusuodattimelle kertyy erittäin vähän tuhkaa 3 h aikana, joten näytteenottoväliksi suunniteltiin 4h. Näytteenottosuunnitelmaan sisällytettiin myös ohjeistus, jossa ennen koeajoa otettaisiin pohjatuhkanäyte ja sykloni sekä letkusuodatin tyhjennettäisiin, jolloin voitaisiin todeta varmasti, että koeajon aikana otetut näytteet ovat koeajon ajalta.

Savukaasuanalyysi suunniteltiin toteutettavaksi käyttämällä kuvassa 8 esitettyä FTIR-savukaasuanalysointia. Polttoaine- ja tuhkanäytteistä tehtävät määritykset suunniteltiin tehtäväksi Savonian polttotekniikan laboratoriossa.

Kiertokaasupuhaltimen arvot suunniteltiin käsin kirjattaviksi niin, että aina puhaltimen arvoa muutettaessa, otettaisiin valvomonäytöltä puhaltimen lukema ylös ja samalla käytäisiin taajuusmuuntaja huoneessa ottamassa kiertokaasupuhaltimen tajuusmuuntajan näytöltä lukemat ylös.

## 6.2 Hyötysuhdekoeajon toteutus

Tutkimuskeskuksella järjestettiin koeajo leijupetikattilalla 25.–28.1.2022, jonka yhteyteen suunniteltiin tehtäväksi myös hyötysuhdekoeajo. Ajankohdaksi valittiin 26.1.2022 klo 22:00–27.1.2022 klo 02:00, jolloin kattila olisi saavuttanut vakaat käyttöolosuhteet. Polttoaineena koeajoissa käytettiin metsätähdehaketta.

Aloitusta ajankohtaa jouduttiin siirtämään, koska toisen koeajon testit olivat vielä kesken alkuperäisen aloitusajankohdan aikaan. Toisessa koeajossa ei tarvittu ottaa lämpöenergiaa savukaasusta veteen talteen, joten vesikierrossa kiertävän veden lämpötila ennen ja jälkeen kattilan olivat lähes samat. Koska kattilassa kiertävän veden tilavuusvirta säilyy lähes muuttomattomana, on kattilan teho suoraan verrannollinen vallitsevaan lämpötilaeroon eli lämpötilaeron ollessa lähellä nollaa, on myös kattilan teho nollassa. Tarvittavaa lämpötilaeroa päästiin ajamaan klo 03:00. Nopeasti huomattiin ettei koeajon myöhästymisestä ja käytettävissä olevasta ajasta johtuen kattilasta tultais saamaan täysiä tehoja, joten hyötysuhdekoeajo päätettiin aloittaa osateholla klo 04:15. Tässä vaiheessa oli jo todettu, ettei letkusuodatinta saada käyttöön, koska savukaasun lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen oli liian alhainen eli alle 100 °C, joten letkusuodatin päätettiin rajata pois hyötysuhteen määrittämisestä. Syklonituhkan näytteenotossa ilmeni myös ongelmia ja suurin osa näytteestä menetettiin, koska 15 min kertyvä näytemäärä oli massaltaan niin pieni, että kun näytteenotto yhde aukaistiin, niin ilmaa alkoi imeytyä sykloniin ja savukaasukanavaan näytteenottoyhteen kautta, jolloin ilmavirta tempaisi kevyen näytteen näyteastiasta savukaasukanavaan.

Veden lämpötilaero ennen ja jälkeen kattilan tasoittui noin 5 °C:seen. Lämpötilojen välille ei pystytty ajamaan suurempaa eroa. Hyötysuhdekoeajo päätettiin keskeyttää klo 5:15 ilmenneiden ongelmien ja aikataulu syistä johtuen. Hyötysuhdekoeajoa ei toteutettu suunnitellusti, joten sen todettiin epäonnistuneen.

## 6.3 Hyötysuhteen laskentaohjelman, tutkimustodistuksen ja tutkimusraportin luonti

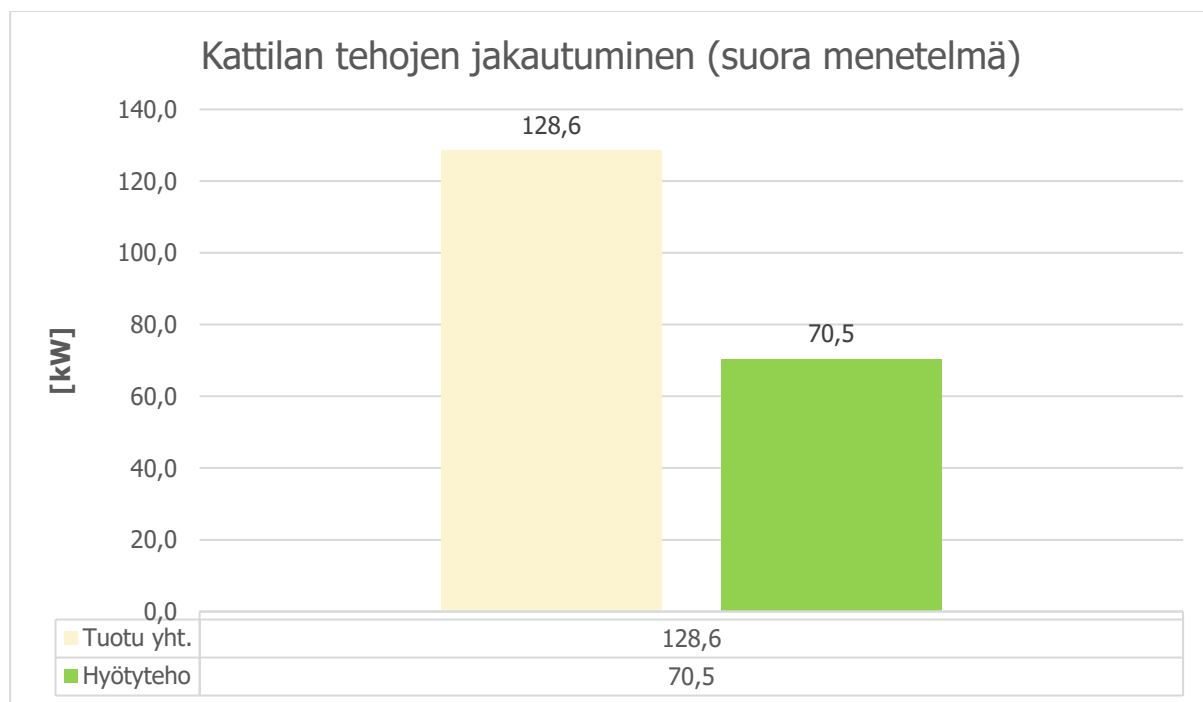
Hyötysuhteen laskentaohjelma päätettiin luoda käyttämällä mittaustietoja osateholla ajatulta tunnin jaksolta. Lentotuhkan massavirran osalta käytettiin toisen koeajon aikana kerättyä tietoa, jossa syklonilta oli onnistuttu keräämään 3 h aikana 1,175 kg näytettä. Polttoaineen ominaisuuksien määrityksissä käytettiin taulukko arvoja, jotka otettiin VTT:n tutkimuksesta Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016). Polttoaineen lämpöarvo ja kosteus- sekä tuhkapitoisuus otettiin koeajoja varten tehdystä kokoomänäytteestä, joka oli tutkittu Savonian polttotekniikan

laboratoriossa. Pohjatuhan massavirta määritettiin hyötysuhdekoeajon näytteistä. Pohja- ja lentotuhan palamattomat sisällöt määritettiin Savonian polttotekniikan laboratoriossa. Hyötysuhteen laskentaohjelma luotiin käyttämällä luvussa 4 esitettyjä kaavoja.

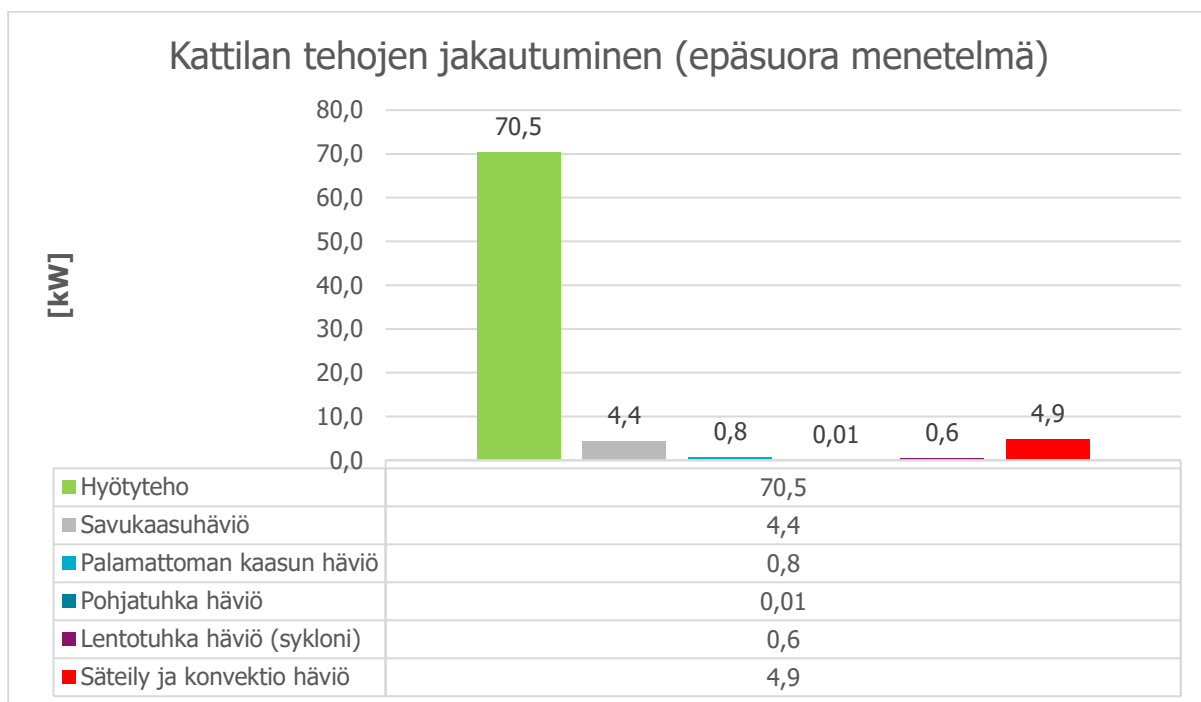
Koeajon aikaan kattilan teho jäi 23 %:iin eli 70,5 kW. Kattilaan tuotu lämpöteho oli 124,8 kW ja kun otetaan huomioon kiertokaasupuhaltimen tuoma teho, saadaan kattilaan tuotujen tehojen summaksi 128,6 kW, jolloin kattilan hyötysuhde 23 %:n teholla suoralla menetelmällä on 54,8 %.

Kattilan savukaasuhäviöksi saatiin 4,4 kW, palamattoman kaasun häviöksi 0,8 kW, pohjatuhan häviöksi 0,01 kW, lentotuhan häviöksi 0,55 kW sekä säteily- ja konvektiohäviöksi 4,9 kW. Yhteensä häviöitä kattilalla syntyy siis 10,7 kW ja kun sitä verrataan epäsuoralla menetelmällä kattilasta hyödyksi saatuun tehoon, saadaan kattilan hyötysuhteeksi 86,8 %.

Kuvassa 20 on esitetty kaavio kattilan tehojen jakautumisesta suoralla menetelmällä, kuvassa 21 on esitetty kaavio kattilan tehojen jakautumisesta epäsuoralla menetelmällä ja taulukossa 3 on esitetty mittaustulokset koeajojaksolta.



KUVA 20. Kattilan tehojen jakautumien suoralla menetelmällä (Luukkonen 2022)



KUVA 21. Kattilan tehojen jakautuminen epäsuoralla menetelmällä (Luukkonen 2022)



TAULUKKO 3. Koeajojakson mittaustulokset

Paikka	Savonia energiatutkimuskeskus	
Aika	27.1.2022	
Kattila	Leijupetikattila	
Nimellisteho	0,3 MW	
Teho alue	23 %	
Kesto	1	
Tunnus	HS_Savonia_1/2022	
Polttoaine	Metsätähdehake	
Referenssilämpötila	25 °C	
<b>Hyötyteho</b>		
Palaavan veden lämpötila	76,7	°C
Lähtevän veden lämpötila	81,7	°C
Veden massavirta	3,4	kg/s
Hyötyteho	70,5	kW
<b>Tuotu lämpöteho</b>		
Jäännöshappi (O <sub>2</sub> ;kuiva)	4,9 %	
Ilmakerroin	1,3	
Palamisilman lämpötila	40,4	°C
Palamisilman entalpia	87,3	kJ/kg
Polttoaineen lämpötila	18,2	°C
Polttoaineen entalpia	-8,2	kJ/kg
Polttoaineen massavirta	0,01	kg/s
Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	12,6	MJ/kg
Tuotu lämpöteho	124,8	kW
<b>Tuotu kokonaisteho</b>		
Kiertokaasupuhallin	3,8	kW
Kiertovesipumppu	0	kW
Tuotu yht.	128,6	kW
<b>Savukaasuhäviö</b>		
X <sub>H<sub>2</sub>O,s,k</sub>	15,4 %	
X <sub>CO<sub>2</sub>,s,k</sub>	12,9 %	
Savukaasun lämpötila	85,5	°C
Savukaasun ominaislämpökapasiteetti	1,1	kJ/kgK
Savukaasuhäviö	4,4	kW
<b>Palamattoman kaasun häviö</b>		
Häkäpitoisuus (Co <sub>kuiva</sub> )	1510	ppm
Palamattoman kaasun häviö	0,8	kW
<b>Palamattomien kiintoaineiden häviö</b>		
Pohjatuhkan lämpötila	818,8	°C
Pohjatuhkan massavirta	0,000004	kg/s
Pohjatuhka häviö	0,01	kW
Lentotuhkan lämpötila (sykloni)	588,4	°C
Lentotuhkan massavirta (sykloni)	0,0001	kg/s
Lentotuhka häviö (sykloni)	0,6	kW
Lentotuhka lämpötila (letkusuodin)	86,4	°C
Lentotuhka massavirta (letkusuodin)	0	kg/s
Lentotuhka häviö (letkusuodin)	0,00	kW
<b>Säteily ja konvektiohäviö</b>		
Säteily ja konvektio häviö	4,9	kW
<b>Häviöt yhteensä</b>		
Häviöt yht.	10,7	kW
<b>Hyötysuhde</b>		
Suora menetelmä	54,8 %	±
Epäsuora menetelmä	86,8 %	±

Hyötysuhdelaskentaohjelman lisäksi luotiin hyötysuhdemäärittämisestä tutkimustodistus ja tutkimusraportti. Tutkimustodistus luotiin hyödyntämällä Savonian polttotekniikan laboratorion polttoaineen tutkimustodistusohjelmia ja tutkimusraportti luotiin hyödyntämällä päästönmittaus raportointiohjelmaa, jolloin hyötysuhde määrityksien raportointi on samassa linjassa yrityksen muiden tutkimusraporttien kanssa.

Hyötysuhteen laskentaohjelma on esitetty liitteessä 1, tutkimustodistus ja tutkimusraportti liitteessä 2.

## 7 POHDINTA

Hyötysuhdemittauksessa saatuja tuloksia verrattiin Ympäristöministeriön vuonna 2012 teettämässä tutkimusraportissa "Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta" esitettyihin suositus arvoihin (Flyktman ym. 2012).

Mikäli polttoaine sisältäisi rikkiä tai rikkiä syötettäisiin kattilaan erikseen estämään tulipesän korroosioita, savukaasun lämpötila ei saisi laskea alle 125 °C:n, koska mentäessä alle tämän lämpötilan on vaarana, että savukaasun rikkitrioksidi ja vesi reagoivat, muodostaen rikkihappoa, joka voi aiheuttaa kastepistekorroosiota niihin kattilan osiin, missä savukaasu liikkuu. Koska koeajo polttoaineena käytettiin haketta, mikä ei käytännössä sisällä rikkiä ollenkaan, ei rikkihapon aiheuttamaa kastepistekorroosion vaaraa tässä tapauksessa ollut. Hyötysuhdemäärityksen aikainen savukaasun keskilämpötila lämmöntalteenoton jälkeen oli 85,5 °C.

Jäännöshapen suositus pitoisuus alle 5 MW kattiloissa on noin 8 % kuivassa savukaasussa. Jäännöshappi suositus perustuu siihen, että savukaasun häkäpitoisuus säilyy tavoite tasolla. Hyötysuhdemäärityksen aikana jäännöshappi pitoisuuden keskiarvo oli 4,9 %, mikä jää alle suosituksen.

Alhainen savukaasun lämpötila ja jäännöshappi näkyvät positiivisena vaikutuksena, kun tarkastellaan asiaa savukaasuhäviön kannalta. Hyötysuhdemäärityksen aikainen savukaasuhäviö oli 4,4 kW eli n. 4 % kattilaan tuodusta polttoainetehosta menetetään savukaasuhäviönä.

Palamattoman kaasun eli häkäkaasu pitoisuuden suositus arvo pienillä kattiloilla on alle 1000 mg/m<sup>3</sup> kuivassa savukaasussa redusoituna 6 %:n jäännöshappi tasoon. Hyötysuhde määrityksen aikainen keskiarvo häkäkaasu pitoisuudelle oli 1510 ppm (1753 mg/m<sup>3</sup> red. 6 % O<sub>2</sub>), jonka voidaan olettaa johtuvan liian alhaisesta jäännöshappi pitoisuudesta. Palamattoman kaasun häviö jää kuitenkin näillä arvoilla hyvin pieneksi 0,8 kW eli vain 0,6 % polttoainetehosta menee hukkaan häkäkaasun mukana.

Pohja- ja lentotuhkan palamiskelpoisen aineen tavoite massa osuudet leijupetipoltossa ovat alle 10 %. Hyötysuhde määrityksen aikainen pohjatuhkan palamiskelpoisen aineen osuus oli 12,2 % ja lentotuhkalla osuus oli 16,9 %. Tuhkien palamiskelpoisen aineen mukana menetettävä teho oli 0,6 kW eli 0,5 % syötetystä polttoainetehosta menetetään tuhkien mukana.

Arvio säteily ja konvektio häviöstä hyötysuhde määrityksen ajalta oli 4,9 kW eli 4 % lämpötehoa häviää säteilyn ja konvektion kautta. Häviöstä muodostui kattilan isoin häviö.

Kattilan hyötysuhde osateholla 23 % nimellistehosta suoralla menetelmällä oli 54,8 % ja epäsuoralla menetelmällä 86,6 %. Menetelmien välinen ero, johtuu siitä, että standardin mukainen laskenta ei välttämättä anna oikeanlaista arviota säteily- ja konvektio häviöstä tällä kattilalla, koska kattilaa ei ole eristetty ja näin ollen todellinen säteily- ja konvektio häviö on huomattavasti suurempi kuin, mitä standardin mukainen arvio laskenta antaa tulokseksi.

Mittaustulosten tarkastelun lopputuloksena on, että kattilalla ei saada lämpöä siirtymään veteen, joka näkyy etenkin suoralla menetelmällä lasketussa hyötysuhteessa. Lämmönsiirto pinnat tulisi puhdistaa ja lämmöntalteenottokattilan konvektio-osan säädöt tulisi tarkistaa. Hyötysuhdetta voitaisiin parantaa kierrättämällä lentotuhkaa takaisin kattilaan tai kasvattamalla lentotuhkan viipymäaikaa

kattilassa, pienentämällä savukaasupuhaltimen kierroksia, jolloin lentotuhkan palamattomien osuus jäisi pienemmäksi.

Mikäli vastaavanlainen hyötysuhteen määrittäminen kyseisellä kattilalla uudestaan, tulisi koeajo suorittaa täysin omana ajonaan ja yllä mainitut huoltotoimenpiteet tulisi tehdä etukäteen. Huoltotoimenpiteiden jälkeen olisi hyvä kokeilla ennen varsinaista hyötysuhde koeajoa, että tehdyillä huoltotoimenpiteillä saavutetaan haluttu vaikutus ja kattilalla saadaan lämpö siirtymään veteen. Lisäksi savukaasun lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen tulisi saada reilusti yli 100 asteen ja se tulisi saada säilymään vakiona. Kun savukaasu saataisiin riittävän lämpimälle tasolle, voitaisiin letkusuodatin ottaa käyttöön, jolloin syklonilta menetettävä lentotuhka saataisiin letkusuodattimelta talteen. Syklonin näytteenottoa tulisi myös parantaa, ettei näytettä pääsisi imeytymään savukaasukanavaan näytteenoton yhteydessä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda tilaajalle standardin mukainen hyötysuhteen laskentaohjelma ja asiakkaalle annettava tutkimustodistus sekä tutkimusraportti hyötysuhteen määrittämisestä. Epäonnistuneesta koeajosta huolimatta, toteutuneesta koeajo jaksosta saatiin riittävästi tarvittavia tietoja, jotta laskentaohjelma voitiin luoda käyttäen standardissa esitettyjä laskenta tapoja. Laskentaohjelmalla saatujen tulosten pohjalta pystyttiin luomaan sekä tutkimustodistus että tutkimusraportti. Opinnäytetyön kaikki tavoitteet saavutettiin.

Opinnäytetyön tilaaja otti opinnäytetyön tuloksena syntyneet tuotokset käyttöön kevät talvella 2022 ja liitti ne yhdeksi osaksi Savonian palveluliiketoimintaa. Opinnäytetyön tilaaja sai tilauksen hyötysuhteen määrittämisestä 1 MW kattilalaitokselta, joka tuottaa kuumaa vettä. Hyötysuhteen määrittämisessä otettiin käyttöön tämän työn tuotokset ja lisäksi laskentaohjelmaa parannettiin lisäämällä siihen mittausepävarmuuden laskenta.

## LÄHTEET

- ABB Industry Oy. (2001). *Tekninen opas nro 7 - Sähkökäytön mitoitus*. Helsinki: ABB Industry Oy. Haettu 1.2.2022 osoitteesta  
[https://library.e.abb.com/public/b11dafa92973be93c1256d2800415027/Tekninen\\_opasnro7.pdf](https://library.e.abb.com/public/b11dafa92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf)
- Alakangas, E.;Hurskainen, M.;Laatikainen-Luntama, J.;& Korhonen, J. (2016). *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. Tampere: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.
- Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*. Halifax, Nova Scotia, Kanada: Taylor & Francis Group.
- Energiatutkimuskeskus. (2022). *Energiatutkimuskeskus*. (Savonia) Haettu 16.2.2022 osoitteesta  
<https://energiatutkimus.savonia.fi/fi/tilat-ja-laitteet/leijupetikattilaympaeristoe>
- Fescon. (31.8.2020). *Fescon.fi*. Haettu 12.1.2022 osoitteesta  
<https://www.fescon.fi/ajankohtaista/2020/08/31/leijupetikattilan-kayttomenetelma-patentoitiin>
- Flyktman , M.;Impola, R.;& Linna, V. (2012). *Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta*. Jyväskylä: Ympäristöministeriö. Haettu 9.1.2022 osoitteesta  
<https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC1EA01A4-C78E-4152-A601-3AE51323EDEB%7D/119826>
- Hannula, I.;& Kurkela, E. (2013). *Liquid transportation fuels via large-scale fluidised-bed gasification of lignocellulosic biomass*. Kuopio: VTT. Haettu 10.1.2022 osoitteesta  
[https://www.researchgate.net/profile/Ilkka-Hannula/publication/303309834\\_Liquid\\_transportation\\_fuels\\_via\\_large-scale\\_fluidised-bed\\_gasification\\_of\\_lignocellulosic\\_biomass/links/573c44f708aea45ee84164f6/Liquid-transportation-fuels-via-large-scale-fluidised](https://www.researchgate.net/profile/Ilkka-Hannula/publication/303309834_Liquid_transportation_fuels_via_large-scale_fluidised-bed_gasification_of_lignocellulosic_biomass/links/573c44f708aea45ee84164f6/Liquid-transportation-fuels-via-large-scale-fluidised)
- Heinonen, K.;Riipinen, H.;Säämänen, A.;& Welling, I. (31.1.2004). *Tietoverkko pölytorjunnan avuksi*. Haettu 14.1.2022 osoitteesta [http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/kpl\\_6\\_6.htm](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/kpl_6_6.htm)
- Helen Oy. (2018). *Parhaan käytettävissä olevan tekniikan soveltaminen Salmisaaren voimalaitoksessa*. Helsinki: Helen Oy. Noudettu osoitteesta  
<https://dev.hel.fi/paatokset/media/att/12/124e3ed2452901f3aa6e44ab4e29d044241b82e4.pdf>
- Huhtinen, M.;Kettunen, A.;Nurminen, P.;& Pakkanen, H. (1994). *Höyrykattilatekniikka*. Helsinki: Opetushallitus.
- Jalovaara, J.;Aho, J.;Hietämäki, E.;& Hyytiä, H. (2003). *Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Haettu 9.1.2022 osoitteesta  
[https://www.motiva.fi/files/8707/Paras\\_kayttavissa\\_oleva\\_tekniikka\\_\(BAT\)\\_5-50\\_MWn\\_polttolaitoksissa\\_Suomessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/8707/Paras_kayttavissa_oleva_tekniikka_(BAT)_5-50_MWn_polttolaitoksissa_Suomessa.pdf)
- Jätelaitosyhdistys ry. (2006). *jly.fi*. (Jätelaitosyhdistys ry) Haettu 16.2.2022 osoitteesta  
<http://vanha.jly.fi/energia31.php?treeviewid=tree3&nodeid=31>

- Kaartinen, T.;Laine-Ylijoki, J.;& Wahlström, M. (2007). *Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet*. Espoo: VTT. Haettu 8.1.2022 osoitteesta <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2007/T2411.pdf>
- Kauppa- ja teollisuusministeriö. (1999). Laki. *Kauppa- ja teollisuusministeriön päätö painelaiteturvallisuudesta(953/1999)*. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö. Noudettu osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990953>
- Kiertotalous Amk. (Tuntematon). *Avointen oppimateriaalien kirjasto*. Haettu 14.1.2022 osoitteesta <https://aoe.fi/api/download/12suodattimet-1605862411429.pdf>
- Kosamo, J. (Tuntematon). *aoe.fi*. Haettu 25.1.2022 osoitteesta <https://aoe.fi/api/download/lampoarvojakalorimetri-1607940253989.pptx>
- Koski, P.;Timonen, T.;Kohtamäki, K.;& Suominen, M. (2002). *Voimalaitoksen energia-analyysi*. Helsinki: Motiva Oy. Haettu 1.3.2022 osoitteesta [http://www.motiva.fi/files/7932/Voimalaitoksen\\_energia-analyysi.pdf](http://www.motiva.fi/files/7932/Voimalaitoksen_energia-analyysi.pdf)
- Lantmännen Agro Oy. (2020). *lantmannenagro.fi*. Haettu 16.2.2022 osoitteesta <https://www.lantmannenagro.fi/ajankohtaista/2020/kuona-parantaa-maata/>
- Luke. (Tuntematon). *Luke.fi*. (Luonnonvarakeskus) Haettu 8.1.2022 osoitteesta <https://projects.luke.fi/biomassa-atlas/biomassojen-kuvaukset/tuhka/>
- Luukkonen, A. (2022). Itse otetut ja tuotetut kuvat. Varkaus: Luukkonen Atro.
- Maol ry. (2013). *Maol taulukot*. Helsinki: Maol ry.
- Martech. (30.1.2022). *martechcontrols.com*. Haettu 30.1.2022 osoitteesta [https://martechcontrols.com/wp-content/uploads/Gasmet\\_DX4000.jpg](https://martechcontrols.com/wp-content/uploads/Gasmet_DX4000.jpg)
- Mikkonen, A. (2021). *Polttotekniikan laboraatiot kurssimateriaalit*. Haettu 25.1.2022 osoitteesta [https://moodle.savonia.fi/pluginfile.php/1271614/mod\\_resource/content/1/L%C3%A4mp%C3%B6arvon%20m%C3%A4%C3%A4ritys%20ohje.pdf](https://moodle.savonia.fi/pluginfile.php/1271614/mod_resource/content/1/L%C3%A4mp%C3%B6arvon%20m%C3%A4%C3%A4ritys%20ohje.pdf)
- Oy Danfoss Ab. (Tuntematon). *danfoss.com*. Haettu 19.1.2022 osoitteesta <https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/>
- Oy G.W.Berg & Co Ab. (Tuntematon). *gwb.fi*. Haettu 8.1.2022 osoitteesta <https://www.gwb.fi/fi/tuote/v196843848/pommikalorimetrit/parr-pommikalorimetrit/192959514/1>
- Peda.net. (2014). *Peda.net*. Haettu 8.1.2022 osoitteesta <https://peda.net/p/RiikkaKotiranta/k7uo/kemia-79-v1/1/7/tjer>
- Perttula, J. (2000). *Energiatekniikka*. Helsinki: WSOY.
- Raiko, R.;Kirvelä, K.;Tolvanen, H.;& Pääkkönen, A. (2017). *Energiatekniikan perusteet*. Tampereen teknillinen yliopisto, Voimalaitos- ja polttotekniikka. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Haettu 16.2.2022 osoitteesta <https://tuppu.fi/wp-content/uploads/2017/02/Energiatekniikan-perusteet.pdf>

- Savonia–ammattikorkeakoulu. (Tuntematon). *Päästönmittaus testausselostepohja*. Varkaus: Savonia–ammattikorkeakoulu. Haettu 30.1.2022
- SKS Group. (Tuntematon). *sks.fi*. Haettu 1.2.2022 osoitteesta <https://www.sks.fi/suunnittelijalle/laskurit/kolmivaihemoottorin-teho>
- Stack Overflow Ltd. (7.12.2017). *physics.stackexchange.com*. Haettu 30.1.2022 osoitteesta <https://physics.stackexchange.com/questions/203605/delta-h-c-p-delta-t>
- SFS–EN 12952-15. (2003). *Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 15: Vastaanottokokeet*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
- SFS–EN 14918. (2010). *Solid biofuels. Determination of calorific value*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
- Tammertekniikka. (2018). *Tekniikan kaavasto*. Porvoo: Amk kustannus Oy.
- Tieteen termipankki. (2014). *Tieteen termipankki*. Haettu 7.1.2022 osoitteesta <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:absorptio>
- Uudenmaan ympäristökeskus. (2004). *Ympäristölupapäätös*. Helsinki: Uudenmaan ympäristökeskus. Haettu 17.1.2022 osoitteesta <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B6CC28D90-959C-4591-A5E6-024A40809532%7D/78938>
- Vasi, M. (20.8.2020). *blowerfab.com*. Haettu 13.1.2022 osoitteesta <https://blowerfab.com/2020/04/20/centrifugal-fans-used-in-power-plant/>
- Vääätäjä, S. (19.12.2016). *helen.fi*. (Helen Oy) Haettu 8.1.2022 osoitteesta <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2014/tuhkia-tutkimassa>

## LIITE 1: HYÖTYSUHTEEN LASKENTAOHJELMA

Kuumavesikattilan hyötysuhteen laskenta-ohjelma						
Paikka	Savonia energiatutkimuskeskus					
Aika	27.1.2022					
Kattila	Leijupetikattila					
Nimellisteho	0,3	MW				
Kesto	1	h				
Tunnus	HS_Savonia_1/2022					
Polttoaine	Metsätähdehake					
Referenssilämpötila	t <sub>r</sub>	25	°C			
Koeajon sallitut vaihtelut						
t <sub>1,vesi</sub>	Alku	87,93	°C	Alussa ja lopussa keskiarvo		
	Loppu	67,84	°C			
t <sub>2,vesi</sub>	Alku	90,11	°C	t <sub>1,vesi;ka</sub>	77,89	°C
	Loppu	72,52	°C	t <sub>2,vesi;ka</sub>	81,31	°C
Δt <sub>τ</sub>		-18,84	°C	Koeajon aikainen keskiarvo		
τ		1	h			
V <sub>vesi</sub>		12,29	m <sup>3</sup> /h	t <sub>1,τ</sub>	76,73	°C
V <sub>b</sub>		1,83	m <sup>3</sup>	t <sub>2,τ</sub>	81,68	°C
$\frac{\Delta t_{\tau}}{\tau} < 0,03 \frac{V_{vesi}(t_{2,vesi;ka} - t_{1,vesi;ka})}{1,15V_b}$						
-18,84153258	<	0,600293052	°C/h			
Hyväksytty		-				
f	0	f	-0,942			



Kattilaan tuotu lämpöteho					
Polttoaineen koostumus			Kuiva-aineessa		
$Y_c$	0,354	kg/kg <sub>pa</sub>	C	51,30 %	
$Y_h$	0,042	kg/kg <sub>pa</sub>	H	6,10 %	
$Y_s$	0,00014	kg/kg <sub>pa</sub>	S	0,02 %	
$Y_o$	0,282	kg/kg <sub>pa</sub>	O	40,8 %	
$Y_n$	0,003	kg/kg <sub>pa</sub>	N	0,4 %	
$Y_{Cl}$	0,00005	kg/kg <sub>pa</sub>	Cl	0,0076 %	
$Y_{vesi}$	0,309	kg/kg <sub>pa</sub>	Polttoaineen koostumuksen (mukaan lukien vesi ja tuhka) tulee olla 1,0		
$Y_{kuiva}$	0,691	kg/kg <sub>pa</sub>			
$Y_{tuhka}$	0,0041	kg/kg <sub>pa</sub>			
Yht.	1,0	kg			
Teoreettinen palamisilman tarve			Teoreettinen savukaasun tilavuus		
$\mu_{i,sto}$	4,31	kg <sub>i</sub> /kg <sub>pa</sub>	$V_{sk,sto}$	3,29	m <sup>3</sup> <sub>sk</sub> /kg <sub>pa</sub>
Kuivan palamisilman tarve					
$\rho_i$	1,293	kg/m <sup>3</sup>			
$Y_{O_2;sk;kuiva}$	0,0485	m <sup>3</sup> <sub>O<sub>2</sub></sub> /m <sup>3</sup> <sub>sk;kuiva</sub>	4,85 %		
$Y_{O_2;i;kuiva}$	0,2094	m <sup>3</sup> <sub>O<sub>2</sub></sub> /m <sup>3</sup> <sub>i;kuiva</sub>	20,94 %		
$\mu_{i;kuiva}$	5,59	kg <sub>i</sub> /kg <sub>pa</sub>			
Palamisilman tarve käyttökosteudessa					
$X_{H_2O;i}$	0	m-%	Jos ei huomioida -> käytä arvoa 0		
$\mu_i$	5,59	kg <sub>i</sub> /kg <sub>pa</sub>			
Palamisilman entalpia			Polttoaineen entalpia		
$t_i$	40,43	°C	$t_{pa}$	18,19	°C
$c_{p,i}$	1,011	kJ/kgK	$c_{p,pa}$	1,2	kJ/kgK
$h_i$	87,26	kJ/kg	$h_{pa}$	-8,17	kJ/kg
Jos palamisilman ja polttoaineen mukana tuotua lämpöä ei huomioida laskennassa (ei luovaa/pa:n esilämmitystä) voidaan lämpötilojen kohdalla käyttää referenssi lämpötilaa.					
Palamattoman polttoaineen suhde syötettyyn polttoaineeseen					
$v$	0	m-%	Leijupoltossa 0 % Arina 5%		
$\dot{m}_{pt}$	0,0000036	kg/s			
$\mu_{pt}$	0,12	kg <sub>pal</sub> /kg <sub>pt</sub>			
$\dot{m}_{lt;sykl}$	0,0001	kg/s			
$\mu_{lt;sykl}$	0,17	kg <sub>pal</sub> /kg <sub>lt</sub>			
$\dot{m}_{lt;letku}$	0	kg/s			
$\mu_{lt;letku}$	0	kg <sub>pal</sub> /kg <sub>lt</sub>			
$l_{pal}$	0,001215	kg <sub>pal</sub> /kg <sub>pa</sub>			
Kattilaan tuotu lämpöteho					
$\dot{m}_{pa}$	0,01	kg/s			
$H_{N,ar}$	12610	kJ/kg			
$Q_{in}$	124,79	kW			

Muut huomioitavat tehot					
Kiertokaasupuhallin					
U	400	V			
I	14,5	A	I <sub>mitattu</sub>	7,35	A
cos( $\phi$ )	0,84				
P <sub>läh</sub> tö	7,5	kW		7500	W
$\eta$	88,9 %				
P <sub>syöttö</sub>	3,80	kW			
Kiertovesipumppu					
U	0	V			
I	0	A	I <sub>mitattu</sub>	0	A
cos( $\phi$ )	0				
P <sub>läh</sub> tö	0	kW		0	W
$\eta$	#JAKO/0!				
P <sub>syöttö</sub>	#JAKO/0!	kW			
Q <sub>muut</sub>	3,80	kW	Jos laitetta ei ole/huomioida jätetään se summasta pois		
Kattilaan tuodut tehot yhteensä					
Q <sub>in,kok</sub>	128,59	kW			
Savukaasuhäviö					
Palamisilman ja savukaasun ominaislämpökapasiteettien laskennan polynomikertoimet					
C <sub>p,i</sub>		P <sub>1</sub>		P <sub>2</sub>	
a	1,00E+00	a <sub>1</sub>	8,55E-01	a <sub>2</sub>	-1,00E-01
b	1,92E-05	b <sub>1</sub>	2,04E-04	b <sub>2</sub>	7,66E-04
c	5,88E-07	c <sub>1</sub>	4,58E-07	c <sub>2</sub>	-9,26E-06
d	-7,01E-10	d <sub>1</sub>	-2,80E-10	d <sub>2</sub>	5,29E-10
e	3,31E-13	e <sub>1</sub>	5,63E-14	e <sub>2</sub>	-1,09E-13
f	-5,67E-17				
Savukaasun ominaislämpökapasiteetti					
t <sub>i</sub>	40,43	°C	313,58	K	
t <sub>s,k</sub>	85,51	°C	358,66	K	
C <sub>p,i;kuiva</sub>	1,04E+00				
P <sub>1</sub>	0,91				
P <sub>2</sub>	-3,54E-01				
X <sub>H2O;s,k</sub>	15 %				
X <sub>CO2;s,k</sub>	13 %				
C <sub>p;s,k</sub>	1,13	kJ/kgK			
Savukaasunmassansuhde polttoaineen massa					
$\mu_{s,k}$	6,59	kg <sub>s,k</sub> /kg <sub>pa</sub>			
Savukaasuhäviö					
Q <sub>s,k</sub>	4,43	kW			

Palamattoman kaasun häviö			
Kuivan savukaasuntilavuus			
$V_{sk;kuiva}$	4,29	$m^3_{sk;kuiva}/kg_{pa}$	
Palamattoman kaasun häviö			
$Y_{CO;kuiva}$	0,0015	$m^3_{CO}/m^3_{sk;kuiva}$	
$H_{CO}$	12,63	$MJ/m^3$	
$q_{CO}$	0,80	kW	
Palamattomien kiintoaineiden häviöt			
Pohjatuhka			
$C_{p;pt}$	1,0	$kJ/kgK$	
$t_{pt}$	818,84	$^{\circ}C$	
$H_{pal}$	27,2	$MJ/kg$	
$q_{pt}$	0,01	kW	
Lentotuhka (sykloni)			
$C_{p;lt}$	0,84	$kJ/kgK$	
$t_{lt;sykl}$	588,43	$^{\circ}C$	
$H_{pal}$	27,2	$MJ/kg$	
$q_{lt;sykl}$	0,55	kW	
Lentotuhka (letkusuodin)			
$C_{p;lt}$	0,84	$kJ/kgK$	
$t_{lt;letku}$	86,40	$^{\circ}C$	
$H_{pal}$	27,2	$MJ/kg$	
$q_{lt;letku}$	0,00	kW	
Säteily- ja konvektiohäviö			
$C$	0,0315		
$q_{rc}$	4,92	kW	
Häviöt yhteensä			
$Q_{häviö}$	10,72	kW	
Hyötysuhde			
Suora menetelmä		Epäsuora menetelmä	
$\eta_s$	54,8 % $\pm$	$\eta_e$	86,8 % $\pm$

## LIITE 2: TUTKIMUSTODISTUS JA TUTKIMUSRAPORTTI



## Tutkimustodistus

Opiskelijankatu 3

78211 Varkaus

Petteri Heino/Tutkimushalli

Opiskelijankatu 3

78211 Varkaus



## Asiakas vastaa laitoksen mittalaitteiston toimivuudesta ja kalibroinnista

Asiakkaan näytetunnus: HS\_Savonia\_1/2022

Koeajon suoritus 27.1.2022

Koeajon analysointi päivä 10.2.2022

Tutkimusnumero: ENE22-Tutkimushalli-22\_HS\_Sav\_1/2022

Kattila Leijupetikattila 0,3 MW

Polttoaine Metsätähdehake

Kesto 1 h

Tehoalue 23 %

Määrittäminen	Tulos	Yksikkö
Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	12,6	MJ/kg
Polttoaineen kokonaiskosteus	30,9	m- %
Polttoaineen kuiva-aineen tuhkapitoisuus	0,6	m- %
Polttoaineen koostumus (C; H; S; O; N; Cl)	51,3 % 6,1 % 0,02 % 40,8 % 0,4 % 0,0076 %	m- %
Savukaasuanalyysi (O <sub>2</sub> ;kuiva;CO <sub>kuiva</sub> ;H <sub>2</sub> O;CO <sub>2</sub> ;kosteaa)	4,85 % 0,15 % 15,4 % 12,87 %	v- %
Palamaton kiintoaine pohjatuhkassa	12,2	m- %
Palamaton kiintoaine lentotuhkassa (sykloni)	16,9	m- %
Hyötysuhde suora menetelmä	54,8 %	-
Hyötysuhde epäsuora menetelmä	86,8 %	-

Määrittäminen	Analysointi pvm	Menetelmä
Lämpöarvo	24.1-25.1.2022	SFS-EN ISO 14918*
Kosteuspitoisuus	24.1-25.1.2022	SFS-EN ISO 18134-2
Tuhkapitoisuus	24.1-25.1.2022	SFS-EN ISO 18122**
Palamattomat kiintoaineet		SFS-EN ISO 18122**
Polttoaine-analyysi	-	Taulukkoarvot
Savukaasuanalyysi	27.1.2022	SFS-EN ISO 12039 & CEN/TS 17337
Hyötysuhdelaskenta	10.2.2022	SFS-EN 12952-15

\*Tehollisen lämpöarvon laskemisessa näytteen vetypitoisuutena käytetty arvoa 6,00 %.

Jauhetun näytteen partikkelikoko &lt; 1 mm.

\*\* Tuhkamäärittäyksessä lämpötilat ISO 1171:n mukaiset.

Savonia-ammattikorkeakoulu Varkaus

Opiskelijat

Atro Luukkonen

Projektityöntekijä

# HYÖTYSUHDE TESTAUSSELOSTE 27.01.2022

SAVONIA, VARKAUS

# SISÄLTÖ

SISÄLTÖ .....	2
YHTEENVETO .....	3
1 JOHDANTO .....	4
2 MITTAUSMENETELMÄT .....	5
3 MITTAUSLAITTEISTOT .....	6
3.1. Pommikalorimetri 6200CLEF .....	6
3.2. Vacucell 55 kuivausuuni .....	7
3.3. Lämpökäsittelyuuni Rohde ME 17-13SG .....	8
3.4. Muut polttoaine ja tuhka määrityksiin liittyvät laitteet .....	9
3.5. Gasmets DX4000 .....	12
4 SUORITETUT MITTAUKSET .....	13
4.1. Hyötysuhteen määrittäminen .....	13
4.2. Savukaasun mittauskohde .....	14
4.3. Savukaasumittaus: mittaus- ja analyysiasetukset .....	14
4.4. Näytteenotto .....	14
4.5. Mittaustulokset .....	15
5 TULOSTEN TARKASTELU .....	18
5.1. Savukaasun lämpötila, jäännöshappi ja savukaasuhäviö .....	18
5.2. Palamattoman kaasun häviö .....	18
5.3. Palamattoman kiintoaineen häviö .....	19
5.4. Muut huomiot .....	19

Liite 1. Tutkimustodistus

Liite 2. Savukaasu trendit

## YHTEENVETO

Tilaaaja: Markku Huhtinen  
Koulutusvastuupäällikkö  
Savonia energiatutkimuskeskus  
Opiskelijankatu 3, 78210 Varkaus

Tehtävä: Määritetään kuumavesikattilan hyötysuhde 100 % teholla. Hyötysuhteen määrittämistä varten otetaan näytteitä polttoaineesta, pohjatuhkasta, lentotuhkasta ja savukaasusta. Lämpötila- ja virtausmittaukset toteutetaan laitoksen omalla mittalaitteistolla.

Aika: 27.1.2022

Varkaudessa 27.3.2022

---

Atro Luukkonen  
Projektityöntekijä

---

Markku Huhtinen  
Koulutusvastuupäällikkö

# 1 JOHDANTO

Savonian energiatutkimuskeskuksen 0,3 MW:n kiinteän polttoaineen leijupetikattilalla oli tarkoituksena määrittää hyötysuhde 27.01.2022 klo 22:00 – 02:00 100 % teholla. Koeajo päästiin aloittamaan osateholla klo 04:15 ja koeajo lopetettiin klo 05:15, koska kattilan teho alue jäi 23 %:n. Lämpötilamittauksiin käytettiin kattilalaitoksen mittalaitteita. Veden virtausmittaukseen käytettiin kattilalaitoksen virtausmittausta. Hyötysuhde määrittäessä huomioon otettiin kiertokaasupuhaltimen virran käyttö mittauksiin käytettiin kattilalaitoksen mittalaitetta. Kattilan polttoainevirrasta otettiin näyte 15 min välein. Polttoaineen massavirta määritettiin polttoainesiilon massan muutoksesta. Pohjatuhka näyte otettiin 15 min välein pohjatuhka yhteestä ja lentotuhka näyte otettiin syklonista koeajon lopussa. Letkusuodatinta ei voitu ottaa käyttöön, johtuen savukaasun alhaisesta lämpötilasta. Otetuista näytteistä muodostettiin kokoomanäytteet. Kattilan savukaasuista mitattiin jatkuvatoimisesti happi- ( $O_2$ ), hiilidioksidi- ( $CO_2$ ), häkä- ( $CO$ ), ja vesipitoisuudet ( $H_2O$ ).

Käytettävä polttoaine oli metsätähdehake. Polttoainenäytteistä muodostettiin kokoomanäyte, josta määritettiin polttoaineen lämpöarvo, kosteuspitoisuus ja kuiva-aineen tuhkapitoisuus. Polttoaineen lämpöarvonmäärittäminen suoritettiin Savonian polttotekniikan laboratoriossa käyttämällä 6200CLEF pommikalorimetriä. Kosteuspitoisuus määritettiin käyttämällä Vacucell 55 kuivausuunia (vakuumi) ja kuiva-aineen tuhkapitoisuus määritettiin käyttämällä Rohde ME 17-13SG lämpökäsittelyuunia.

Polttoaineen alkuainekoostumus arvot katsottiin taulukosta.

Pohja- ja lentotuhka näytteistä määritettiin tuhkien massavirrat. Pohja- ja lentotuhka näytteistä muodostettiin kokoomanäytteet, joista määritettiin niiden palamattomat kiintoainesisällöt Savonian polttotekniikan laboratoriossa. Tuhkien palamattomat kiintoainesisällöt määritettiin käyttämällä Rohde ME 17-13SG lämpökäsittelyuunia.

Savukaasumittaukset suoritettiin Gasmeter DX4000 FTIR savukaasuanalysaattorilla.

Savonian energiatutkimuskeskuksen 0,3 MW:n kiinteän polttoaineen leijupetikattilan hyötysuhde määritettiin soveltaen standardia SFS-EN 12952-15.

Mittaajina olivat Atro Luukkonen, Raquel Mier Gónzales ja Petteri Heino.



## 2 MITTAUSMENETELMÄT

Savonian polttotekniikan laboratorio on Savonia ammattikorkeakoululla sijaitseva testauslaboratorio, jossa voidaan määrittää polttoaineesta partikkelikokojakauma, lämpöarvo, tuhkapitoisuus ja kosteuspitoisuus. Tuhkasta voidaan määrittää palamattomien aineiden osuus. Määritykset suoritetaan SFS-EN standardien mukaisesti. Määrityksessä ja raportoinnissa käytettiin taulukossa 1 mainittuja laitteistoja, menetelmiä ja standardeja.

**Taulukko 1. Käytetyt menetelmät polttoaineelle ja tuhalle.**

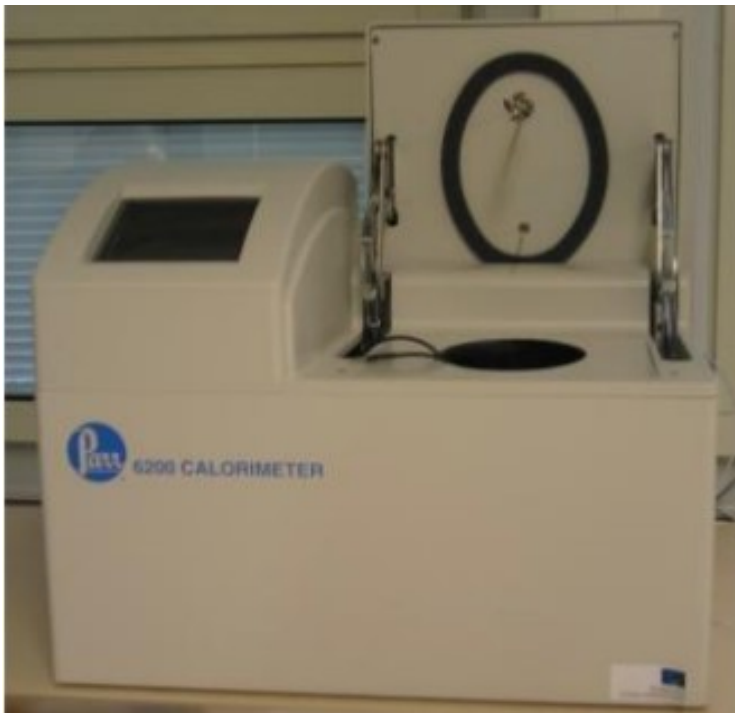
Polttoaine ja tuhka				
Komp.	Laite	Testityyppi	Testausmenetelmä	
H <sub>net,ar</sub>	6200CLEF pommikalorimetri	Lämpöarvo	SFS-EN ISO 14918	
M <sub>ar</sub>	Vacucell 55 kuivausuuni (vakuumi)	Kosteuspitoisuus	SFS-EN ISO 18134-2	
Y <sub>tuhka</sub>	Rohde ME 17-13SG lämpökäsittelyuuni	Tuhkapitoisuus	SFS-EN ISO 18122	
H <sub>pal</sub>	Rohde ME 17-13SG lämpökäsittelyuuni	Palamaton kiintoaine tuhkassa	SFS-EN ISO 18122	
Savukaasu				
Komp.	Laite	Testityyppi	Pätevyysalue	Testausmenetelmä
O <sub>2</sub>	Gasmet DX4000	Zirkoniumoksidikenno	0,5-21 til-%	ISO 12039:2019
CO <sub>2</sub>	Gasmet DX4000	FTIR	0,5-20 til-%	CEN/TS 17337:2019
CO	Gasmet DX4000	FTIR	10-3000 ppm	CEN/TS 17337:2019
H <sub>2</sub> O	Gasmet DX4000	FTIR	0,5-30 til-%	CEN/TS 17337:2019

### 3 MITTAUSLAITTEISTOT

#### 3.1. Pommikalorimetri 6200CLEF

Polttoaineen lämpöarvon määrittäminen suoritettiin 6200CLEF pommikalorimetrillä, joka on kuvattu kuvassa 1. Pommikalorimetrin toimintaperiaate perustuu palamiseen. Polttoainenäyte jauhetaan ja siitä puristetaan pelletti, joka poltetaan pommikalorimetrissä. Pommikalorimetrissä poltettava aine palaa vakio-tilavuudessa ja luovuttaa lämpöenergiaa sitä ympäröivään veteen, josta aiheutuu veden lämpötilan nousu, joka mitataan ja muutoksesta lasketaan polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo, josta voidaan laskea polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa eli käyttökosteudessa.

**Kuva 1. Pommikalorimetri 6200CLEF**



### 3.2. Vacucell 55 kuivausuuni

Polttoaineen kosteuspitoisuusmääritys suoritettiin uunikuivausmenetelmällä käyttämällä Vacucell 55 kuivausuunia (vakuumi), joka on kuvattu kuvassa 2. Uunikuivausmenetelmä perustuu polttoaineen sisältämän veden haihduttamiseen. Kosteaa polttoainenäytettä punnitaan ja siirretään sen jälkeen kuivausuuniin kuivumaan 105 °C lämpötilaan. Näytettä punnitaan kuivauksen aikana ja kun näytteen massa ei enää muutu, on polttoaineen sisältämä vesi haihtunut ja jäljellä on polttoaineen sisältämä kuiva-aine. Massan muutoksesta saadaan laskettua polttoainenäytteen kosteuspitoisuus.

**Kuva 2. Vacucell 55 kuivausuuni (vakuumi)**



### 3.3. Lämpökäsittelyuuni Rohde ME 17-13SG

Polttoaineen tuhkapitoisuuden määrittäminen ja palamattomien kiintoaineiden osuus tuhkassa määrittäminen suoritettiin polttamalla näyte Rohde ME 17-13SG lämpökäsittelyuunissa, joka on esitetty kuvassa 3. Menetelmä perustuu palamiseen. Määritettävä näyte siirretään lämmönkestävään astiaan, punnitaan ja siirretään lämpökäsittely uuniin, jonka lämpötilaa nostetaan tasaisesti 500 °C:n nousunopeudella 8 °C/min. Lämpötilan nostoa jatketaan nousunopeudella 5,25 °C/min 815 °C:n asti, jonka jälkeen lämpötilaa pidetään yllä vähintään 1 h ajan. Näyte punnitaan ja massan muutoksesta saadaan laskettua polttoaineen tuhkapitoisuus tai vastaavasti palamattoman kiintoaineen osuus tuhkassa.

**Kuva 3. Lämpökäsittelyuuni Rohde ME17-13SG**



### 3.4. Muut polttoaine ja tuhka määrittämiin liittyvät laitteet

Yläkuppivaaka PB-3002-S/PH Mettler-Toledo on kuvattu kuvassa 4. Yläkuppivaakaa käytetään esim. kosteuspitoisuusmäärittämissä näytteen massan muutosten toteamiseen. Lukematarkkuus 0,01 g ja punnitusalue on 0–3100 g.

**Kuva 4. Yläkuppivaaka PB-3002-S/PH Mettler-Toledo**



Analyysivaaka Mettler-Toledo AB 104-S/PH on kuvattu kuvassa 5. Analyysivaakaa käytetään erityisesti tarkkuutta vaativiin punnituksiin. Lukematarkkuus 0,1 mg ja punnitusalue 0–110 g.

**Kuva 5. Analyysivaaka Mettler-Toledo AB 104-S/PH**



Pellettiprässit on kuvattu kuvissa 6 ja 7. Pellettiprässejä käytetään jauhetun polttoainäytteen puristamiseen pelletiksi.

**Kuva 6. Pellettiprässi 2811**



**Kuva 7. Pellettiprässi T51201**



Kosteusanalyssaattori A&D MS-70 on kuvattu kuvassa 8. Kosteusanalyssaattoria käytetään polttoaineiden pikakosteusmäärittäisiin. Lukematarkkuus on 0,0001–0,1 % ja lämpötila-alue on 50–200 °C.

**Kuva 8. Kosteusanalyssaattori A&D MS-70**



Leikkaava mylly Retsch SM100 on kuvattu kuvassa 9. Leikkaavaa myllyä käytetään kiinteiden polttoaineiden jauhamiseen. Mylly soveltuu pehmeiden, keskikovien, kimmoisten ja kuitupitoisten materiaalien leikkaamiseen.

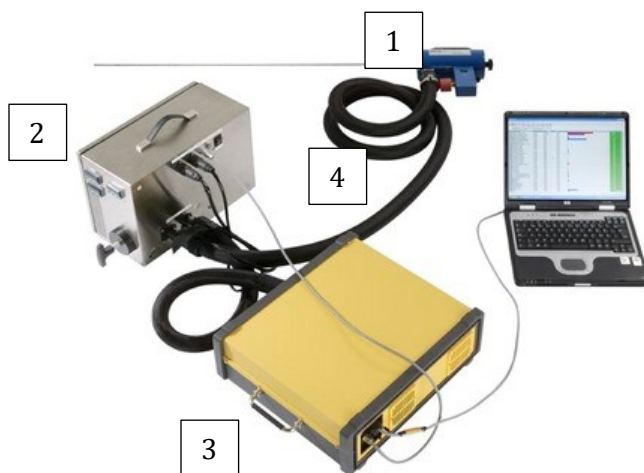
**Kuva 9. Leikkaava mylly Retsch SM100**



### 3.5. Gaset DX4000

Mittaukset suoritettiin Gaset DX4000 FTIR savukaasuanalysaattorilla, joka on kuvattu kuvassa 10. Laitteisto koostuu (1) näytteenotto-sondista, (2) näytteenottojärjestelmästä, (3) FTIR analysaattorista sekä (4) näytteenottolinjoista. Kaasuanalysaattori on Fourier-muunnosinfrapuna-tekniikkaan perustuva päästömittausjärjestelmä, joka pystyy mittaamaan jopa 50 eri kaasua yhtä aikaa. Näytteenottojärjestelmä käyttää kuuma-märkä-mittausperiaatetta (ei kuivausta tai laimennusta). Näytteenottoyksikössä on asennettuna zirkoniumoksidikenno, jolla mitataan happi. Muut kaasut määritetään kaasuseoksen IR-spektristä käyttäen puhtaiden kaasujen spektrikirjastoa. Näytteenottoyksikkö sisältää myös näytteenotto-pumpun sekä näytteenottolinjojen lämmittimen. Näytteenottolinjat lämmitetään 180 °C:een, jotta estetään kaasumaisten komponenttien kondensoituminen näytteenottolinjoihin. Mittaustulosten tiedonkeruu ja analysointi tapahtuvat tietokoneella. Tietokoneen kommunikointi analysaattorin kanssa tapahtuu sarjaportin (RS232) kautta. Analysaattorin huuhteluun ennen näytteenoton aloitusta ja näytteenoton jälkeen sekä nollakohdan kalibrointiin käytetään typpikaasua. (<https://www.gasmet.com/fi/tuotteet/category/kannettavat-kaasuanalysaattorit/dx4000/>)

**Kuva 10. Gaset DX4000 savukaasumittauslaitteisto** (<https://martechcontrols.com/wp-content/uploads/Gaset DX4000.jpg>).





## 4 SUORITETUT MITTAUKSET

### 4.1. Hyötysuhteen määrittäminen

Savonian energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilan nimellisteho on 0,3 MW ja mittaus suunniteltiin suoritettavan yhdellä tehotasolla 100 % nimellistehosta. Mittausjakson pituudeksi oli suunniteltu 4 h. Kattilan polttoaineena oli metsätähdehake, jonka kosteus oli 30,9 %. Tehotasoa ei saavutettu vaan kattilan teho jäi 23 % nimellistehosta ja mittausjakso oli 1 h. Kattila oli toiminnassa 44 h ennen hyötysuhteen määrittäystä niin että kattilan meno ja paluu vesi olivat samassa lämpötilassa eli kattilan teho oli 0 %. Kattila ei saavuttanut vakaita käyttöolosuhteita tehotasolla 23 %. Vakait käyttöolosuhteet hyötysuhteen määrittäyksen aikana eivät säilyneet tehotasolla 23 %. Kattilalta mitattavat tiedot kerättiin käyttämällä automaattista tiedonkeruuta ja virtausmittauksen tulokset kirjattiin käsin 15 min välein. Polttoaineesta sekä pohjatuhkasta otettiin näyte 15 min välein ja lentotuhkasta otettiin syklo-nilta näyte koeajon lopussa. Letkusuodatinta ei koeajon aikana saatu käyttöön, koska savukaasun lämpötila oli liian alhainen. Lentotuhkan osalta näytteenottovälit ei noudattanut standardia SFS-EN 12952-15.

Mittausjakson aikana kattilalla ei havaittu vuotoja putkistoissa tai sulkulaitteissa, mitkä voisivat vaikuttaa mitattaviin arvoihin ja kattilan hyötysuhteeseen. Mittausjakson aikana kattilalla ei tapahtunut ulospuhalluksia. Mittausjakson aikana ei käytetty nuohouslaitteistoja. Mittausjakson olosuhteet olivat standardin SFS-EN 12952-15 mukaiset ja kattilan hyötysuhde pystyttiin määrittämään standardin SFS-EN 12952-15 mukaisesti. Kattilan hyötysuhde laskettiin käyttämällä suoraa ja epäsuoraa menetelmää.

**Kuva 11. Savonia energiatutkimuskeskus.**



## 4.2. Savukaasun mittauskohde

Mittaukset tehtiin poistokaasukanavasta syklonin jälkeen ennen savupiippua. Kanavan halkaisija ( $d_h$ ) on 300 mm. Mittausyhteen jälkeen kanavassa on suoraa osuutta  $1,7 \cdot d_h$  ja ennen mittausyhdetä suoraa osuutta  $1,3 \cdot d_h$ . Mittaustasossa ei täyttynyt standardissa SFS-EN 15259 suositukset häiriöttömistä etäisyyksistä. Mittaussondi tiivistettiin kankaalla tiiviisti kanavassa olevaan laippa-yhteeseen.

## 4.3. Savukaasumittaus: mittaus- ja analyysiasetukset

Suoritettu mittausjakso oli noin 1 tunnin kestoinen jatkuva mittaus (04:15 – 05:15). Jatkuvien mittausten näytteenotto väliksi oli määritelty 1 minuutti. Calcmets -ohjelmistossa käytössä olleet kaasukomponentit ovat: vesi ( $H_2O$ ), hiilidioksidi ( $CO_2$ ), hiilimonoksidi ( $CO$ ) ja happi ( $O_2$ ). Savukaasu analyysin trendit on esitetty liitteessä 2.

Mittausten aikana havaitut epävarmuustekijät ja niiden vaikutus mittauksen luotettavuuteen: Calcmets -mittausohjelmisto ei ilmoittanut mittausten aikana häiriöistä tai liian korkeista jäännösarvoista analyysissä, eli mittauksia voidaan pitää luotettavina.

## 4.4. Näytteenotto

Polttoaineesta sekä pohjatuhkasta otettiin näytteet 15 min välein ja lentotuhkasta otettiin näyte koeajon lopussa. Polttoainenäyte otettiin kattilaan menevästä polttoainevirrasta. Pohjatuhkanäyte otettiin pohjatuhka yhteen kautta. Lentotuhkanäyte otettiin syklonista. Näytteistä muodostettiin kokoomanäytteet, jotka käsiteltiin Savonian polttotekniikanlaboratoriossa.

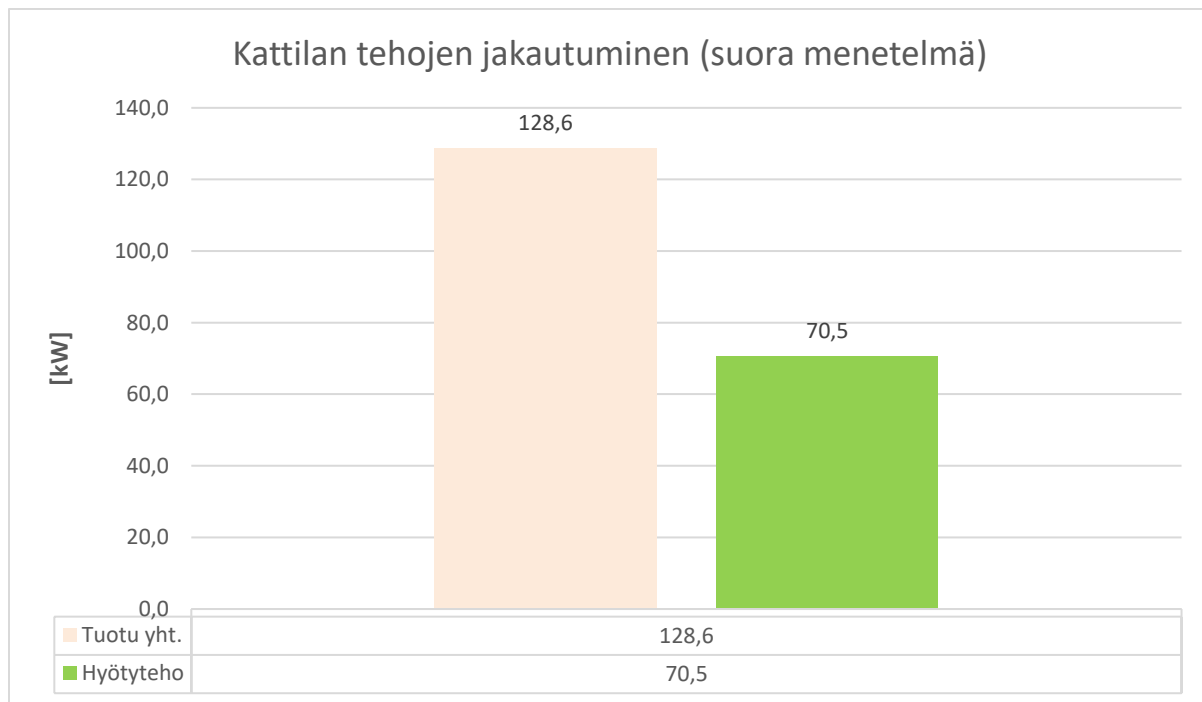
Polttoaineesta määritettiin lämpöarvo sekä kosteus- ja tuhkapitoisuus. Polttoaineesta tehdyt määritykset on esitetty liitteessä 1. Polttoaineen alkuainekoostumus määritettiin käytämällä taulukkoarvoja.

Pohja- ja lentotuhkanäytteistä määritettiin palamattomat osuudet. Tuhka määrityksien tulokset on esitetty liitteessä 1.

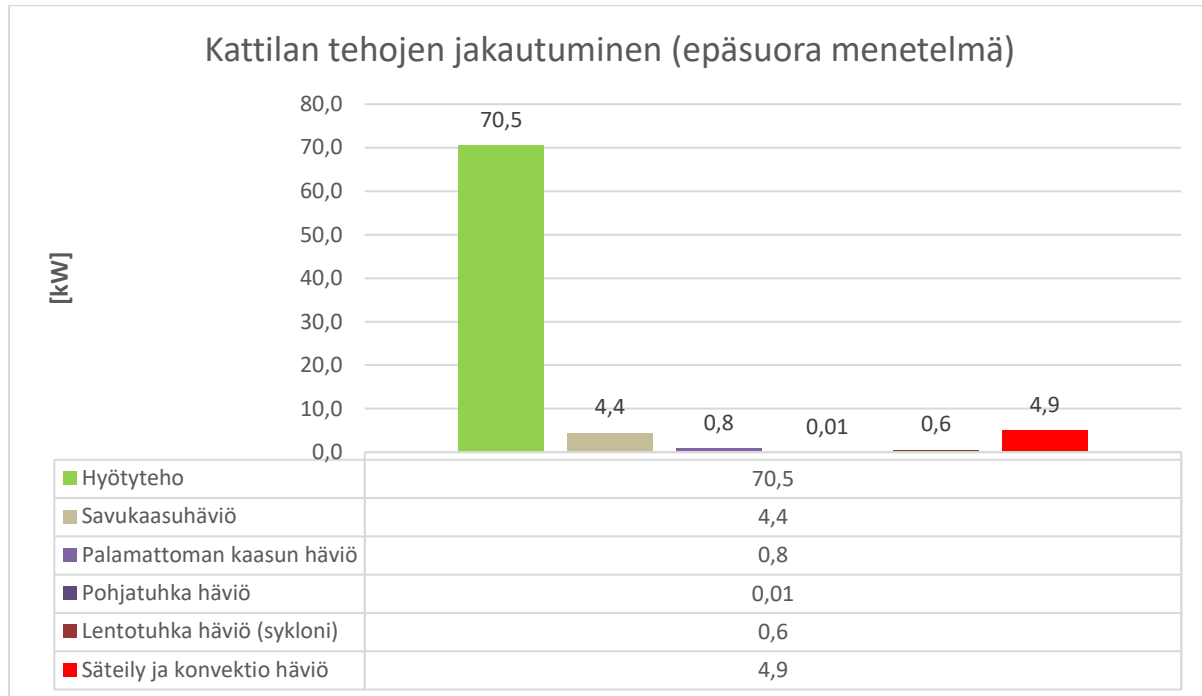
## 4.5. Mittaustulokset

Tulokset määritettiin tarkoitukseen laaditulla Excel-laskentaohjelmalla. Laskentaohjelma on luotu käyttämällä standardissa SFS-EN 12952-15 esitettyjä laskenta kaavoja ja tapoja. Taulukossa 2 esitetyt arvot ovat mittausjakson keskiarvoja. Kaaviossa 1 on esitetty kattilan tehojen jakautuminen suoralla menetelmällä ja kaaviossa 2 on esitetty kattilan tehojen jakautuminen epäsuoralla menetelmällä. Tulosten pohjalta luotiin tutkimustodistus, joka on esitetty liitteessä 1.

**Kaavio 1. Kattilan tehojen jakautuminen suoralla menetelmällä tehotasolla 23 %.**



**Kaavio 2. Kattilan tehojen jakautuminen epäsuoralla menetelmällä tehotasolla 23 %.**



Taulukko 2. Mittaustulokset 23 % teholla.

Mittaus numero	HS_Savonia_1_2022		Lentotuhkanäyte syklonista koeajon lopussa		
Päivämäärä	27.01.2022				
Mittausjaksonkesto	1	h			
Näytteenottoväli	15	min			
Referenssilämpötila	25	°C			
Vesi (paluu)	76,7	°C			
Vesi (lähtevä)	81,7	°C			
Veden massavirta	3,4	kg/s	Hyötyteho	70,5	kW
O <sub>2</sub> -pitoisuus, kuiva	4,9	%			
Ilmankerroin	1,3	-			
Palamisilman lämpötila	40,4	°C			
Palamisilman entalpia	87,3	kJ/kg			
Polttoaineen lämpötila	18,2	°C			
Polttoaineen entalpia	-8,2	kJ/kg			
Polttoaineen massavirta	0,01	kg/s			
Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	12,6	MJ/kg	Tuotu lämpöteho	124,8	kW
Kiertokaasupuhallin	3,8	kW			
			Tuotu kokonaisteho	128,6	kW
H <sub>2</sub> O-pitoisuus (kosteus)	15,4	%			
CO <sub>2</sub> -pitoisuus, kuiva	12,9	%			
Savukaasun lämpötila	85,5	°C			
Savukaasun ominaislämpökapasiteetti	1,1	kJ/kgK	Savukaasuhäviö	4,4	kW
CO-pitoisuus, kuiva	1510	ppm	Palamattoman kaasun häviö	0,8	kW
Pohjatuhkan lämpötila	818,8	°C			
Pohjatuhkan massavirta	0,000004	kg/s	Pohjatukahäviö	0,01	kW
Lt lämpötila (sykl)	588,4	°C			
Lt massavirta (sykl)	0,0001	kg/s	Lentotukahäviö (sykl)	0,6	kW
			Säteily ja konvektio häviö	4,9	kW
			<b>Häviöt yht.</b>	10,7	kW
			<b>Hyötysuhde</b>		
			Suora menetelmä	54,8	%
			Epäsuora menetelmä	86,6	%

## 5 TULOSTEN TARKASTELU

Hyötysuhteen mittauksesta saatuja tuloksia verrataan Ympäristöministeriön vuonna 2012 teettämässä Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta tutkimusraportissa esitettyihin suositus arvoihin.

### 5.1. Savukaasun lämpötila, jäännöshappi ja savukaasuhäviö

Mikäli polttoaine sisältäisi rikkiä tai rikkiä syötettäisiin kattilaan erikseen estämään tulipesän korroosioita, savukaasun lämpötila ei saisi laskea alle 125 °C, koska mentäessä alle tämän lämpötilan on vaarana, että savukaasun rikkitrioksidi ja vesi reagoivat, muodostaen rikkihappoa, joka voi aiheuttaa kastepistekorroosiota niihin kattilan osiin, missä savukaasu liikkuu. Koska koeajo polttoaineena käytettiin haketta, mikä ei käytännössä sisällä rikkiä ollenkaan, ei rikkihapon aiheuttamaa kastepistekorroosion vaaraa tässä tapauksessa ollut. Hyötysuhdemäärityksen aikainen savukaasun keskilämpötila lämmöntalteenoton jälkeen oli 85,5 °C.

Jäännöshapen suositus pitoisuus alle 5 MW kattiloissa on noin 8 % kuivassa savukaasussa. Jäännöshappi suositus perustuu siihen, että savukaasun häkäpitoisuus säilyy tavoite tasolla. Hyötysuhde määrityksen aikainen keskiarvo jäännöshappi pitoisuudelle oli 4,9 %, mikä on alle suosituksen.

Alhainen savukaasun lämpötila ja jäännöshappi näkyvät positiivisena vaikutuksena, kun tarkastellaan savukaasuhäviötä. Hyötysuhde määrityksen aikainen savukaasuhäviö oli 4,4 kW eli n. 4 % kattilaan tuodusta polttoainetehosta menee savukaasun mukana häviöksi.

### 5.2. Palamattoman kaasun häviö

Palamattoman kaasun eli häkäkaasu pitoisuuden suositus arvo pienillä kattiloilla on alle 1000 mg/m<sup>3</sup> kuivassa savukaasussa redusoituna 6 % jäännöshappi tasoon. Hyötysuhde määrityksen aikainen keskiarvo häkäkaasu pitoisuudelle oli 1510 ppm (1753 mg/m<sup>3</sup> red. 6 % O<sub>2</sub>), jonka voidaan olettaa johtuvan liian alhaisesta jäännöshappi pitoisuudesta. Palamattoman kaasun häviö jää kuitenkin näillä arvoilla hyvin pieneksi 0,8 kW eli vain 0,6 % tehoa menee hukkaan häkäkaasun mukana.

### 5.3. Palamattoman kiintoaineen häviö

Pohja- ja lentotuhkan palamiskelpoisen aineen tavoite massa osuudet leijupetipoltossa ovat alle 10 %. Hyötysuhde määrittämisen aikainen pohjatuhkan palamiskelpoisen aineen osuus oli 12,2 % ja lentotuhkalla osuus oli 16,9 %. Tuhkien palamiskelpoisen aineen mukana menetettävä teho oli 0,6 kW eli 0,5 % syötetystä polttoainetehosta menetetään tuhkien mukana.

### 5.4. Muut huomiot

Arvio säteily ja konvektio häviöstä hyötysuhde määrittämisen ajalta oli 4,9 kW eli 4 % lämpötehoa häviää säteilyn ja konvektion kautta. Häviöstä muodostui kattilan suurin häviö.

Kattilan hyötysuhde osateholla 23 % nimellistehosta suoralla menetelmällä oli 54,8 % ja epäsuoralla menetelmällä 86,6 %. Menetelmien välinen ero, johtuu siitä, että standardin mukainen laskenta ei välttämättä anna oikeanlaista arviota säteily- ja konvektio häviöstä tällä kattilalla, koska kattilaa ei ole eristetty ja näin ollen todellinen säteily- ja konvektio häviö on huomattavasti suurempi kuin, mitä standardin mukainen arvio laskenta antaa tulokseksi.

Kattilalla ei saada lämpöä siirtymään veteen, joka näkyy etenkin suoralla menetelmällä lasketussa hyötysuhteessa. Lämmönsiirtopinnat tulisi puhdistaa ja lämmöntalteenottokattilan konvektio-osan säädöt tulisi tarkistaa. Hyötysuhdetta voitaisiin parantaa kierrättämällä lentotuhkaa takaisin kattilaan tai kasvattamalla lentotuhkan viipymä aikaa kattilassa, jolloin lentotuhkan palamattomien osuus jäisi pienemmäksi.

Kun merkittävimmät hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät ovat korjattu voidaan alkaa optimoimaan itse palamista ja suorittaa tarvittaessa hyötysuhde määrittäminen uudelleen

Liite 1. Tutkimustodistus

Tutkimustodistus

Opiskelijankatu 3  
78211 Varkaus  
Petteri Heino/Tutkimushalli

Opiskelijankatu 3  
78211 Varkaus

Asiakas vastaa laitoksen mittalaitteiston toimivuudesta ja kalibroinnista

Asiakkaan näytetunnus: HS\_Savonia\_1/2022  
Koeajon suoritus 27.1.2022  
Koeajon analysointi päivä 10.2.2022  
Tutkimusnumero: ENE22-Tutkimushalli-22\_HS\_Sav\_1/2022  
Kattila Leijupetikattila 0,3 MW  
Polttoaine Metsätähdehake  
Kesto 1 h  
Tehoalue 23 %



Määrittäminen	Tulos	Yksikkö
Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	12,6	MJ/kg
Polttoaineen kokonaiskosteus	30,9	m- %
Polttoaineen kuiva-aineen tuhkapitoisuus	0,6	m- %
Polttoaineen koostumus (C; H; S; O; N; Cl)	51,3 % 6,1 % 0,02 % 40,8 % 0,4 % 0,0076 %	m- %
Savukaasuanalyysi (O <sub>2</sub> :kuiva; CO <sub>kuiva</sub> ; H <sub>2</sub> O; CO <sub>2</sub> :kosteaa)	4,85 % 0,15 % 15,4 % 12,87 %	v- %
Palamaton kiintoaine pohjatuhkassa	12,2	m- %
Palamaton kiintoaine lentotuhkassa (sykloni)	16,9	m- %
Hyötysuhde suora menetelmä	54,8 %	-
Hyötysuhde epäsuora menetelmä	86,8 %	-

Määrittäminen	Analysointi pvm	Menetelmä
Lämpöarvo	24.1-25.1.2022	SFS-EN ISO 14918*
Kosteuspitoisuus	24.1-25.1.2022	SFS-EN ISO 18134-2
Tuhkapitoisuus	24.1-25.1.2022	SFS-EN ISO 18122**
Palamattomat kiintoaineet		SFS-EN ISO 18122**
Polttoaine-analyysi	-	Taulukkoarvot
Savukaasuanalyysi	27.1.2022	SFS-EN ISO 12039 & CEN/TS 17337
Hyötysuhdelaskenta	10.2.2022	SFS-EN 12952-15

\*Tehollisen lämpöarvon laskemisessa näytteen vetypitoisuutena käytetty arvoa 6,00 %.

Jauhetun näytteen partikkelikoko < 1 mm.

\*\* Tuhkamäärittäyksessä lämpötilat ISO 1171:n mukaiset.

Savonia-ammattikorkeakoulu Varkaus  
Atro Luukkonen  
Projektityöntekijä

Opiskelijat



Liite 2. Savukaasu trendit

