LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Ville Kukkonen

HAASTAVIEN POLTTOAINEIDEN PALAMINEN PIENEN KOKOLUOKAN KATTILOISSA

Työn tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen
Tutkimusjohtaja Ari Puurtinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Ville Kukkonen
Haastavien polttoaineiden palaminen pienen kokoluokan kattiloissa

Diplomityö
2017
94 sivua, 21 kuvaa, 20 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen
Tutkimusjohtaja Ari Puurtinen

Ohjaaja: Nuorempi tutkija Valtteri Laine

Hakusanat: leijupetikattila, kuplapetikattila, palaminen, prosessivaihtelut, tutkimuskattila, energiatekniikka

Diplomityön tavoitteena on tutkia prosessivaihteluiden vaikutuksia pienen kokoluokan kattiloissa. Tutkitut prosessivaihtelut liittyvät polttoaineen syöttöön, hiekkapedin paineeroon ja palamisilmansäädön mittaustarkkuuteen. Mainittuja prosessivaihteluita tutkitaan Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilassa.

Diplomityön tutkimuskohteen käsittely aloitetaan lyhyellä katsauksella leijupolttotekniikan historiasta ja teoriasta. Teoriaosuudessa käsitellään kahden eri leijupetitekniikkaan perustuvan kattilan toimintaperiaatteet. Diplomityön teoriaosaa jatketaan käsittelemällä palamisen teoriaa, polttoaineiden ominaisuuksia ja palamisessa muodostuvia päästöjä.

Työssä käsitelty tutkimuskuplapetikattila ei kerennyt valmistua diplomityön puitteissa riittävälle tasolle tarkempien palamiskokeiden toteuttamista varten. Diplomityön aikana tutkimuskuplapetikattilalle toteutettiin ylös- ja alasajojen teoreettinen suunnittelu. Teoreettisia suunnitelmia testattiin käytännössä diplomityön loppupuolella toteutetuissa lämmitys- ja leijutuskokeissa. Tehtyjen koeajojen perusteella teoreettisia suunnitelmia muokattiin parhaiden mahdollisten ylös- ja alasajosuunnitelmien luomiseksi. Prosessivaihteluiden tutkiminen perustuu koelaitteistolla tehtyihin koeajoihin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Energy Technology

Ville Kukkonen
Combustion of difficult fuels in small scale boilers

Master's Thesis
2017
94 pages, 21 figures, 20 tables and 3 appendices

Examiners: Professor Esa Vakkilainen
Research Director Ari Puurtinen

Supervisor: Doctoral Student Valtteri Laine

Keywords: fluidized bed boiler, bubbling fluidized bed boiler, combustion, process variations, research boiler, energy technology

The goal of this thesis is to study process variations in small-scale boilers. Process variations considered in this thesis are related to fuel feeding, fluidized bed pressure difference and adjustment of combustion air. Mentioned process variations are studied in Savonia University of Applied Sciences' Energy Research Center's bubbling fluidized bed boiler.

Investigation of the subject of this thesis begins with a brief overview of the history and theory of fluidized bed technology. The theoretical part represents the operating principles of two fluidized bed boilers types. The theoretical part of this thesis is continued by researching the theory of combustion, fuel properties and emissions related to combustion.

The research boiler used for measurements in this thesis did not complete construction to a sufficient level for more accurate combustion tests within the time scope of thesis. During the thesis work, theoretical design of startup and shutdown plans were carried out on the research boiler. Theoretical plans were tested in heating and fluidizing experiments towards the end of the thesis work. Based on the test runs, the theoretical plans were modified to create better suitable startup and shutdown plans. Examination of process variations are based on heating and fluidizing experiments.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa vuonna 2017. Työ toteutettiin yliopiston Varkauden yksikössä yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa. Diplomityön ohjaajana toimi nuorempi tutkija Valtteri Laine ja tarkastajina toimivat Lappeenrannan teknillisen yliopiston professori Esa Vakkilainen ja Varkauden tutkimusyksikön tutkimusjohtaja Ari Puurtinen.

Kiitos kuuluu Savonia-ammattikorkeakoululle, ammattikorkeakoulun henkilökunnalle ja opiskelijoille, jotka yhdessä mahdollistivat energiatutkimuskeskuksen käytön diplomityössä tehtyjä käytännön tutkimuksia varten. Tahdon kiittää myös ohjaajaani Valtteri Lainetta diplomityön aikana käymistämme ohjaavista ja opettavista keskusteluista.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin perheelleni, läheisilleni ja ystävilleni, jotka ovat auttaneet minua oman alan valinnassani ja tukeneet minua opiskeluideni vaikeina aikoina. Kiitos.

Varkaudessa 5.7.2017

Ville Kukkonen

Ville Kukkonen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO **7**

1 JOHDANTO **9**
1.1 Diplomityön tavoitteet ... 11
1.2 Diplomityön sisältö ... 11
1.3 Diplomityön rajaukset ... 12
1.4 Diplomityön toteutus ... 12

2 LEIJUPOLTTOTEKNIIKKA **13**
2.1 Leijutekniikan teoriaa ... 14
2.2 Kuplapetikattila ... 19
2.3 Kiertopetikattila ... 22

3 PALAMISEN TEORIAA **26**
3.1 Polttoaineen kuivuminen ja pyrolyysi ... 27
3.2 Haihtuvien yhdisteiden syttyminen ja palaminen ... 27
3.3 Jäännöshiilen palaminen ... 28

4 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET **30**
4.1 Kosteus ... 30
4.2 Tuhka ... 31
4.3 Haihtuvat yhdisteet ja hiiltojäännös ... 33
4.4 Alkuainekoostumus ... 33
4.5 Lämpöarvo ... 34
4.5.1 Kalorimetrinen lämpöarvo ... 35
4.5.2 Tehollinen lämpöarvo ... 35
4.5.3 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ... 35

5 HAITALLISET PÄÄSTÖT **37**
5.1 Hiukkaspäästöt (PM2,5/10) ... 38
5.2 Typenoksidit (NO_x) ... 39
5.3 Rikkioksidit (SO_x) ... 41
5.4 Hiilimonoksidi (CO) ... 42
5.5 Raskasmetallipäästöt ... 42
5.6 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ... 43
5.7 Dioksiinit ja furaanit (PCDD/F) ... 44
5.8 Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH) ... 45
5.9 Haitallisten päästöjen päästörajat ... 45

6 KOEPOLTTOLAITOKSEN KUVAUS **48**
6.1 Kuplapetikattila ... 49
6.2 Jätelämpökattila (Lämmöntalteenottokattila) ... 51
6.3 Pumput ... 52
6.4 Puhaltimet ... 53
6.5 Polttoainejärjestelmä ... 53
6.6 Savukaasujen puhdistuslaitteistot ... 55
6.6.1 Sykloni ... 55
6.6.2 Sähkösuodatin ... 56

6.6.3 Letkusuodatin 57
6.7 Materiaalintestauskammio 58

7 TUTKIMUSKATTILAN YLÖS- JA ALASAJO 59
7.1 Kattilan ylösajosuunnitelma 59
7.2 Kattilan alasajosuunnitelma 65

8 KOEAJOT JA TULOSTEN TARKASTELU 67
8.1 Kattilan syttyminen 67
8.2 Polttoaineen annostelu 68
8.3 Kattilakeraamien lämpeneminen ja jäähtyminen 72
8.4 Paine-ero pedissä 74
8.5 Palamisilman säätö 78

9 YHTEENVETO 82

LÄHDELUETTELO 85

Liitteet

Liite I. Tutkimuskuplapetikattilan PI-kaaviot

Liite II. Pelletin alkuainekoostumus ja palamistaulukko

Liite III. Palamisilmavirtamittausten mitta-askel

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

C_d	purkauskerroin	[-]
d	halkaisija	[m]
g	gravitaatiovakio	[m/s^2]
H	pedin korkeus	[m]
l	höyrystymisen entalpian korjauskerroin	[MJ/kg]
m	massa	[kg]
n	lukumäärä	[-]
n_{ilma}	molaarinen palamisilmantarve	[mol/kg$_{pa}$]
P	teho	[kW]
p	paine	[Pa]
q_i	lämpöarvo	[MJ/kg]
q_m	massavirta	]kg/s]
q_v	tilavuusvirta	[m^3/s]
t	aika	[s]
V	tilavuus	[m^3]
V_m	ideaalikaasun moolitilavuus	[m^3/mol]
V_{pi}	palamisilmantarve	[m^3/kg$_{pa}$]
w	pitoisuus	[%]
x	painotuskerroin	[-]

Kreikkalaiset aakkoset

β	halkaisijasuhde	[-]
ε	tulipesän tyhjän tilan osuus	[-]
ε_o	laajenemiskerroin	[-]
ρ	tiheys	[kg/m^3]

Alaindeksit

ash	tuhka
dry	kuiva
g	leijutuskaasu
H_2O	vesi
HHV	kalorimetrinen lämpöarvo (Higher Heating Value)
kip	kuumailmapuhallin
LHV	tehollinen lämpöarvo (Lower Heating Value)
M	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa
p	petimateriaali
pa	polttoaine
pr	primääri-ilma
si	sekundääri-ilma

Lyhenteet

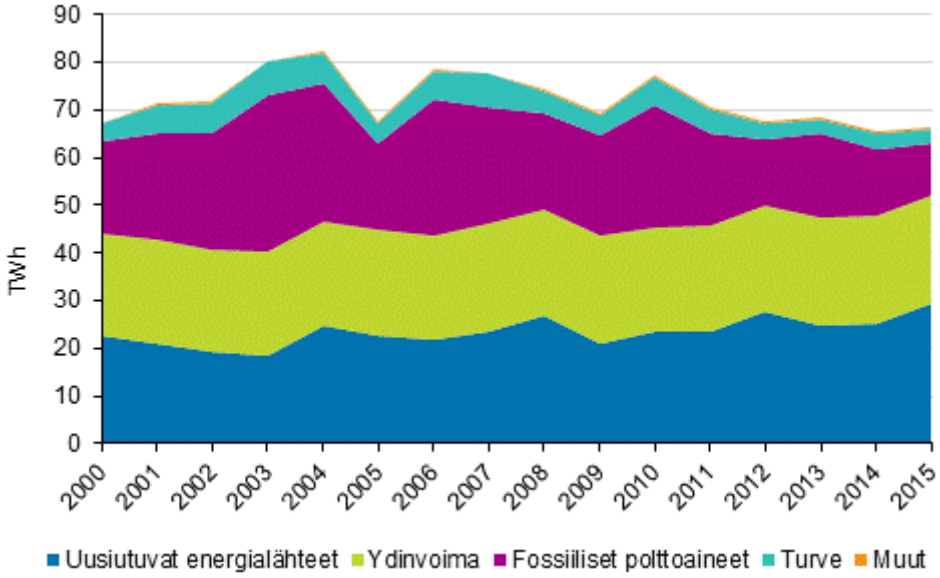
BFB	Kuplapeti (Bubbling Fluidized Bed)
CFB	Kiertoperi (Circulating Fluidized Bed)
PID	Proportional-Integral-Derivative
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compound)
CFBC	Kiertopetipoltto (Circulating Fluidized Bed Combustion)
PFBC	Paineistettu leijupetipoltto (Pressurized Fluidized Bed Combustion)

1 JOHDANTO

Globaali primäärienergian kulutus on ollut viimeisten vuosikymmenten aikana merkittävässä kasvussa. Vuonna 1965 primäärienergian maailmanlaajuinen kulutus oli 3 860 öljyekvivalenttitonnia. Vuoteen 2005 mennessä primäärienergian kulutus oli kasvanut 10 225 öljyekvivalenttitonniin, joka vastaa maailmanlaajuisesti primäärienergian kulutuksessa vuosittaista 2,5 % prosentin kasvua. (Spliethoff. 2010, 1) Maailmanlaajuisen primäärienergian kulutuksen lisääntymisen ja päästörajoituksien kiristymisen seurauksena joutuvat suunnitellut ja olemassa olevat energiantuotantojärjestelmät tulevaisuudessa suureen mullistukseen. Olemassa olevat energiantuotantolaitokset ovat myös riittämättömiä tulevaisuuden kasvavaan energiantarpeeseen, jolloin uusien tehokkaampien polttotekniikoiden kehittäminen on välttämätöntä.

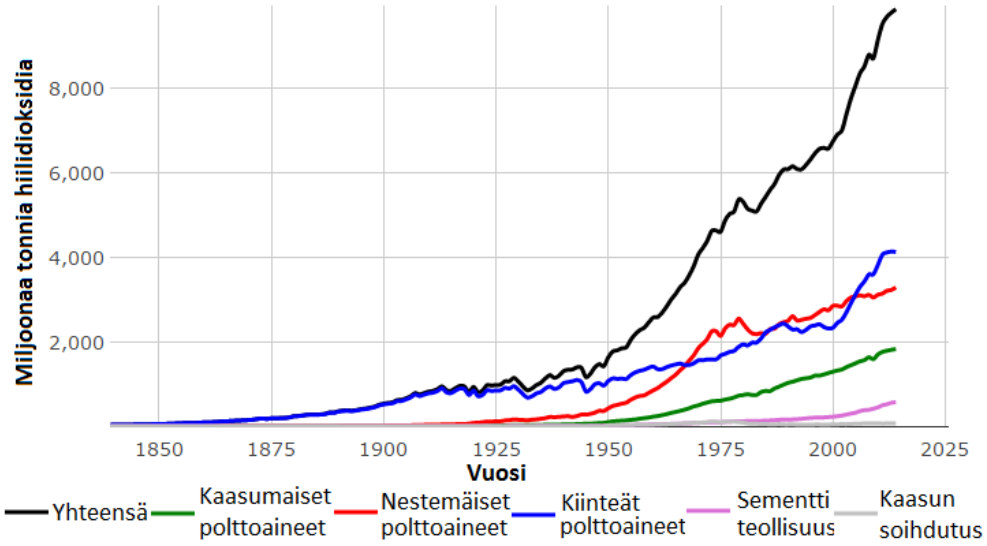
Viime vuosikymmenten aikana saadut kokemukset ovat osoittaneet selvästi, ettei energiantuotantoa voida varmistaa, ilman fossiilisten polttoaineiden käyttöä energiantuotannossa (Bis. 2010, 399). Fossiilisten polttoaineiden kasvavista ympäristöongelmista johtuen, uusia ratkaisuja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen etsitään herkeämättä. Käytettävissä olevista vaihtoehtoisista kasvihuonekaasupäästöjä vähentävistä energialähteistä, kuten biomassasta, vesi-, aurinko- ja tuulivoimasta, biomassa on ainoa hiilipohjainen kestävä vaihtoehto. Niistä tekniikoista, joita voidaan käyttää biomassan polttamiseen, leijupolttotekniikat ovat nousemassa parhaimmiksi vaihtoehdoiksi johtuen niiden hyvästä joustavuudesta ja korkeasta hyötysuhteesta (Khan *et al*. 2009, 21)

Kasvavaan energiantarpeeseen ja kiristyviin päästörajoihin voidaan vastata testaamalla vaihtoehtoisia uusiutuvia polttoaineita ja niiden soveltuvuutta vanhoissa energiantuotantolaitoksissa. Suomen suunta suuria hiilidioksidipäästöjä tuottavissa fossiilisten polttoaineiden käytössä on jo saatu laskuun. Kuvasta 1.1 nähdään, että vaikka sähköntuotanto on pysynyt koko aikajakson samassa suuruusluokassa, on turpeen ja fossiilisten polttoaineiden käyttöä pystytty vähentämään uusiutuvilla energialähteillä.



Kuva 1.1. Sähkön tuotanto Suomessa energialähteittäin. (SVT: Sähkön ja lämmön tuotanto)

Vaikka suunta fossiilisten polttoaineiden vähentämiselle Suomessa on hyvä, voidaan kuvan 1.2 perusteella sanoa, ettei koko maailman tilanne fossiilisista polttoaineista aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen osalta näytä kovin suotuisalta.



Kuva 1.2. Arvio fossiilisten polttoaineiden aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä koko maailmassa (Suomennettu lähteestä: Boden *et al.*)

Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen koko maailman mittakaavassa ei tapahdu hetkessä, vaan vaatii vielä useiden vuosien ponnistelut uusiutuvien energiamuotojen lisäämisessä ja nykyisen polttoprosessien parantamisessa hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskus tarjoaa osaltaan juuri sellaista kehitys-

työtä ja tiedon levittämistä mitä hiilidioksidipäästöjen laskuun tarvitaan. Energiatutkimuskeskus tarjoaa mahdollisuudet tutkia kierrätyspolttoaineen, turpeen, hakkeen ja pyrolyysiöljyn palamista kuplapetikattilassa, arinakattilassa ja pyrolyysipolttimessa ja siten tarjoaa keinoja palamisprosessien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Pian energiatutkimuskeskus tarjoaa myös mahdollisuuden aurinkoenergian tutkimiseen rakenteilla olevan aurinkosähköjärjestelmän myötä.

1.1 Diplomityön tavoitteet

Diplomityön alkuperäisenä tavoitteena oli perehtyä haastavien polttoaineiden palamiseen pienen kokoluokan kattiloissa. Kuitenkin jo pian työn alussa selkeytyi, ettei työssä tutkimukseen käytettävä tutkimuskuplapetikattila kerkeä valmistua riittävälle asteelle tarkkojen palamiskokeiden tekemistä varten. Diplomityön tavoitteeksi muuttuikin pian ylös- ja alasajosuunnitelmien laatiminen tutkimuskuplapetikattilan. Laaditut suunnitelmat perustuvat teoreettiseen tarkasteluun, joita myöhemmin testattiin käytännön kokeilla parhaan lopputuloksen saamiseksi.

Pienen kokoluokan kattilat ovat luonnollisesti herkempiä prosessivaihteluille verrattuna isomman kokoluokan kattiloille. Pienempien kattiloiden huonompi prosessivaihteluiden sietokyky perustuu pienempien kattiloiden varaamaan pienempään energiamäärään, jolloin muutokset prosessissa tapahtuvat nopeammin. Vaihtelut prosessissa asettavat haasteita palamisen ylläpitämisen lisäksi myös puhtaan ja vähäpäästöisen palamisen hallintaan. Diplomityössä tutkitaan niitä ongelmia, jotka aiheuttavat suurinta huolta pienen kokoluokan kattiloille tehokkaan ja vähäpäästöisen palamisen ylläpitämisessä energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilan näkökulmasta.

1.2 Diplomityön sisältö

Diplomityön toisessa luvussa otetaan lyhyt katsaus leijupolttotekniikan historiaan ja yleinen katsaus leijutekniikan teoriaan. Toisen luvun loppupuolella esitellään myös kahden yleisesti käytetyn leijutekniikkaan perustuvan kuplapetikattilan ja kiertopetikattilan toimintaperiaatteet. Diplomityön kolmas luku tarkastelee kiinteän polttoaineen palamisen vaiheita aina polttoaineen kuivumisesta jäännöshiilen palamiseen. Polttoaineen palamisen teorian jälkeen luvussa 4 perehdytään oleellisimpiin kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksiin ja käsitteisiin. Kun perusteet polttoaineen palamisesta ja ominaisuuksista on

käsitelty, on syytä tarkastella polttoaineen palamisessa muodostuvia päästöjä. Luku 5 käsittelee palamisprosessissa tyypillisesti muodostuvia päästöjä ja esittää keinoja päästöjen vähentämiseen. Luvun 5 lopussa katsotaan myös lyhyesti minkälaisia rajoitteita lainsäädäntö asettaa palamisessa muodostuville päästöille.

Diplomityön kuudes, seitsemäs ja kahdeksas luku käsittelee Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilaa. Diplomityön kuudennessa luvussa käsitellään tutkimuskuplapetikattilan normaalin käytön aikaista toimintaperiaatetta, rakennetta ja siihen kuuluvia apulaitteita. Työn seitsemännessä luvussa esitetään tutkimuskuplapetikattilalle teoreettiseen pohdinnan ja käytännön havaintojen perusteella suunnitellut ylös- ja alasajosuunnitelmat. Ylös- ja alasajosuunnitelmassa tehtyjä ratkaisuja perustellaan luvussa kahdeksan käytännön kokeilla todistetuilla mittauksilla. Työssä oli tarkoitus tehdä myös varsinaisia polttokokeita tutkimuspetikattilalla, mutta tutkimuskuplapetikattila ei diplomityön aikataulun puitteissa ollut vielä valmis tarkempia polttokokeita varten. Tutkimuskuplapetikattilalla on kuitenkin pystytty ajamaan petihiekan leijutuskoe ja kaksi lämmityskoetta.

1.3 Diplomityön rajaukset

Diplomityössä polttotekniikan rajataan leijutekniikkaan perustuviin polttotekniikoihin, sillä diplomityössä perehdytään kuplapetikattilan toimintaan. Asetettu rajaus polttotekniikoihin asettaa myös rajauksen diplomityössä käsiteltyihin polttoaineisiin. Esitellyt polttotekniikat käyttävät polttoaineenaan pääsääntöisesti kiinteitä polttoaineita, jolloin myös polttoaineen palamista ja ominaisuuksia käsitellään kiinteiden polttoaineiden näkökulmasta.

1.4 Diplomityön toteutus

Diplomityö on toteutettu Lappeenrannan teknillisen yliopiston Varkauden tutkimusyksikössä yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa. Työn teoriaosa on toteutettu käyttämällä kotimaisten ja ulkomaalaisten kirjallisuusaineistojen lisäksi myös koulutuksen tuomaa osaamista. Työn tutkimusosa on toteutettu yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen henkilökunnan ja tutkimuskuplapetikattilan kanssa.

2 LEIJUPOLTTOTEKNIIKKA

Ennen leijutekniikan käyttöä energiantuotannossa, oli kyseistä tekniikkaa käytetty jo useissa teollisuuden sovelluksissa. Leijutustekniikkaa käytettiin ensimmäisen kerran vuonna 1921, kun saksalainen Fritz Winkler otti käyttöön palamiskaasujen syötön koksi partikkeleita sisältävään sulatusastiaan, kehittäen näin ensimmäisen demonstraation hiilen kaasutuksesta leijupedissä. Winkler huomasi, miten kaasulla leijutetut koksipartikkelit näyttivät kiehuvalta nesteeltä. Tätä koetta voidaan pitää leijutustekniikan alkuna. (Basu. 2006, 1) Sittemmin leijutustekniikkaa on käytetty muun muassa hiilivetyjen krakkauksessa ja reformointiin, hiilen kaasutukseen, Fischer-Tropsch synteesiin, rakeistukseen, vinyylikloridin valmistukseen jätteenpolttoon ja ydinpolttoaineen valmisteluun (Thermopedia). Leijupetipoltto kehitettiin Neuvostoliitossa toisen maailmansodan jälkeen. Kehitystä jatkettiin Kiinassa, jossa arviolta 2000 pientä leijupolttokattilaa oli jo käytössä 1970-luvulla. Samaan aikaan leijupetipolton kaksi potentiaalista etua, polttoainejoustavuus ja alhaiset päästöt, huomattiin myös Yhdysvalloissa ja Länsi-Euroopassa. (Lackner *et al*. 2013, 641)

Alkuun leijupetipolton kehittäminen keskittyi hiilen polttamiseen kuplapedissä. Tyypillisen sen aikaisen ilmakehän paineessa toimivan kuplapetikattilan pedin lämpötila vaihteli 800 ja 900 celsiusasteen välillä, leijutusnopeus noin 2 m/s ja kuplapedin korkeus arviolta yksi metri. Sen aikaiset kuplapetikattilat olivat pieniä teollisuustyyppisiä kattiloita, joiden höyryntuotanto oli alle 50 tonnia tunnissa. Samaan aikaan 1970-luvun lopulla alkoi myös kiertopetikattiloiden kehitys. Kiertopetikattiloille tuhkan ja petihiekan uudelleenkierrätys on luontaista, joka johtaa pitkittyneisiin partikkeleiden viipymisaikoihin, jolloin havaittiin sekä palamisen että rikin talteenoton olevan tehokkaampaa kuplapetikattilaan verrattuna. (Lackner *et al*. 2013, 641 - 642)

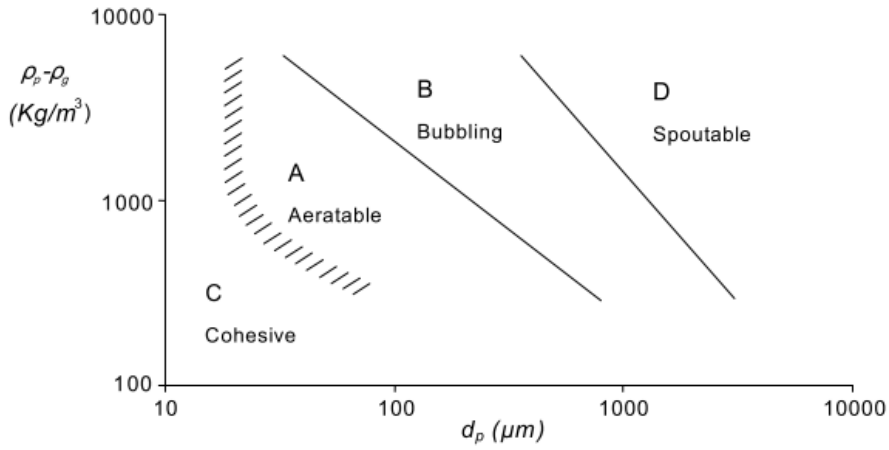
Mahdollisesti ensimmäinen biomassaa polttava leijupetikattila nähtiin vuonna 1982 Intiassa, jonne rakennettiin riisinkuorta 10 tonnia tunnissa polttava leijupetikattila. Ensimmäinen yksinomaan höyryn ja lämmön tuotantoon suunniteltu kiertopetikattila nähtiin Saksan Lünenissa samana vuonna. Ensimmäinen kiertopetikattila käytti polttoaineenaan huonolaatuista hiilijäännöstä kalkkikiven kanssa ja se oli teholtaan 84 megawattia. Merkittävä kehitys kiertopetikattilatekniikassa nähtiin Suomessa, missä Ahlstrom kehitti lei-

jupetikattiloiden suorituskykyä. Yrityksen ponnistuksissa kehittää lietteenpolttoon tarkoitettua leijutuspetikattilaa, tekivät he kokeita lisäämällä laitteistoon syklonin. Leijupedin leijutusnopeus oli kyseisessä kattilassa 3 m/s, jolloin petimateriaalin hienot partikkelit karkasivat savukaasujen mukana. Suunnitellulla syklonilla pystyttiin petimateriaali palauttamaan takaisin petiin. (Basu. 2006, 1 - 3)

2.1 Leijutekniikan teoriaa

Leijutekniikan käyttö on viime vuosikymmeninä yleistynyt runsaasti. Syynä käytön kasvuun voidaan pitää leijutekniikan mahdollistamaa monien eri polttoaineiden ja polttoainelaatujen polttamista samassa kattilassa hyvällä palamishyötysuhteella (Huhtinen *et al.* 2000, 153). Erityisesti leijupolttotekniikka soveltuu huonolaatuisille polttoaineille, joiden poltto ei onnistuisi muilla polttotavoilla (Hyppänen, Raiko. 2002, 490). Leijupoltossa käytetyt palamislämpötilat ovat suhteellisen alhaisia, jolloin myös typenoksidipäästöt jäävät vähäisiksi. Palamislämpötilat leijupoltossa vaihtelevat leijupolttotekniikasta riippuen. Kuplapetikattilassa palamislämpötilat vaihtelevat 700 ja 1200 celsiusasteen välillä, kun taas kiertopetikattilassa lämpötilat jäävät 850 - 950 celsiusasteen väliin. (Huhtinen *et al.* 2000, 153 - 161) Leijupoltossa käytettävän pedin lämpötila vaihtelee 750 ja 950 celsiusasteen välillä. Leijupedin lämpötilaa rajoittaa tuhkan pehmenemislämpötila, sillä petilämpötilan on jäätävä tuhkan pehmenemislämpötilan alapuolelle tuhkan sulamisesta aiheutuvien ongelmien vuoksi (Hyppänen, Raiko. 2002, 490).

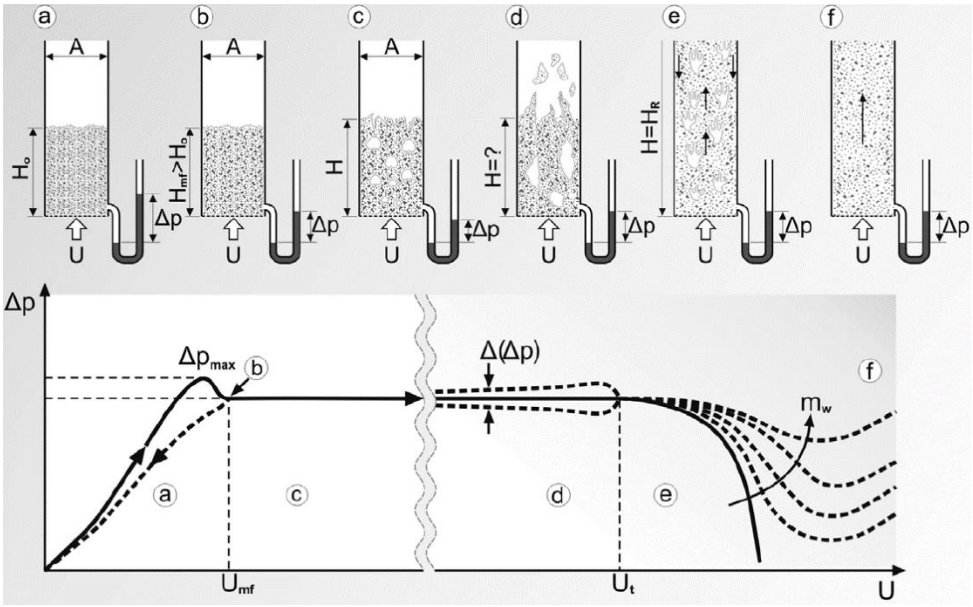
Käytetty petimateriaali, petimateriaalin partikkelikokojakauma, tiheys ja myös leijutuskaasun tiheys ja viskositeetti ovat tärkeitä parametreja, jotka vaikuttavat minimileijutusolosuhteiden lisäksi myös pedin rakenteeseen. Kuvassa 2.1 nähtävä empiirisiin kokeisiin perustuva Geldartin kiinteiden jauheiden luokittelukuvaaja on hyödyllinen työkalu käytännön kiinteiden petimateriaalien leijutusominaisuuksien ennustamiseen. Geldartin kuvaaja kuvaa petimateriaali partikkelin halkaisijan suhdetta petimateriaalin ja leijutuskaasun tiheyseroon. Geldartin luokittelussa on tärkeää tietää, että luokittelu perustuu aineiden käyttäytymiseen, kun niitä leijutetaan kuivalla ilmalla ympäristön paineessa ja lämpötilassa. Kokeissaan Derek Geldart tunnisti neljä eri partikkeliryhmää, jotka käyttäytyivät eri tavalla saavuttaessaan leijutustilan. (Bis. 2010, 413. Millán. 2013, 1)



Kuva 2.1. Geldartin leijudiagrammi (Millán. 2013, 2)

Petimateriaalit on jaettu Geldartin diagrammissa ominaisuuksiensa perusteella neljään ryhmään. Ryhmään A kuuluvat partikkelit viittaavat helposti leijutettaviin partikkeleihin, joiden partikkelikoko on karkeasti 30 - 100 µm. Ryhmän A partikkeleiden leijutilassa kuplat ovat suhteellisen pieniä. Kuplinta ryhmän A partikkeleille alkaa vasta minimileijutusnopeuden ylityttyä merkittävästi. Ryhmän B partikkeleiden partikkelikoko vaihtelee 100 ja 800 mikrometrin välillä. Ryhmän B partikkeleille on myös tyypillistä, että kuplinta alkaa heti minimileijutusnopeuden ylityttyä. Pedissä muodostuvien kuplien koko kasvaa kuplien kohotessa eikä varsinaista maksimikokoa kuplille ole olemassa. Ryhmään B kuuluvat partikkelit ovat käytetyimpiä petimateriaaleja. Ryhmän C partikkelit edustavat hienojen ja jauhemaisten partikkelien ryhmää. Ryhmän partikkelien partikkelikoko on alle 20 mikrometriä. Ryhmän C partikkeleilla ei saada tasaista leijutusta kaasun virratessa pedin lävitse ja ovat siten vaikeasti leijutettavia. Hiukkasten väliset voimat, esimerkiksi van der Waals -voima, hallitsevat pedin hydrodynaamisia voimia. Ryhmään D kuuluvat partikkelit ovat hyvin karkeita ja niiden partikkelikoko on suuremi kuin 1 mm. Ryhmään kuuluvia partikkeleita ei voida leijuttaa, parhaimmillaan ainoastaan partikkeleiden purskumista saadaan aikaan. (Wang, Fan. 2013, 68 - 69. Hyppänen, Raiko. 2002, 494. Bis. 2010, 414)

Leijutustekniikan toimintaperiaate selkeytyy kokeessa, jossa tarkastellaan petimateriaalikerroksen käyttäytymistä, kun pedin läpi puhallettavan ilmavirtauksen nopeutta kasvatetaan. Kuvassa 2.2 voidaan nähdä pedin muodon lisäksi pedin aiheuttama painehäviö eri leijutustiloissa leijutuskaasun nopeuden funktiona.

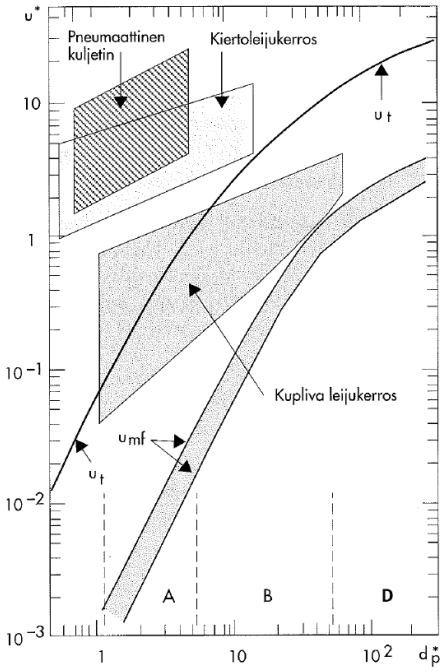


Kuva 2.2 Leijutusnopeuden kasvun vaikutus leijupedin tyyppiin ja pedin paine-eroon. a) Suodatus, b) Leijutuksen alku, c) Kupliva peti, d) Turbulenttinen peti, e) Nopea leijupeti, f) Pneumaattinen kuljetus (Bis. 2010, 415)

Kuvassa 2.2 nähtävästä alueesta a käytetään nimitystä suodatus tai pakattu peti. Suodatus on leijutusta edeltävä tila, jonka ylläpito on tärkeää monissa teollisissa prosesseissa kuten stoker-kattiloissa. Painehäviö suodatuksen alueella riippuu leijutuskaasun nopeuden ja partikkelikoon lisäksi myös pedin partikkelien väliin jäävästä tyhjästä tilasta. Kuvassa 2.2 suodatuksen alueella nähdään kaksi linjaa. Yhtenäinen viiva tarkoittaa painehäviön kasvua leijutuskaasun virtausnopeuden kasvaessa leijutuksen aloitusvaiheessa. Katkoviiva puolestaan esittää irtonaisen pedin tai hidastuvan leijutuskaasun nopeuden muodostamaa painehäviötä. Kohdassa b leijutuskaasun virtausnopeus on kasvanut minimileijutusnopeuteen U_{mf}, jolloin paine-ero on kasvanut petimateriaalikerroksen hydrostaattisen paineen suuruiseksi. Tässä tilanteessa maan vetovoima on yhtä suuri kuin leijutuskaasun kohdistama voima petipartikkeleihin, mikä mahdollistaa pedin leijumisen. Minimileijutusnopeuteen vaikuttavat kaasun dynaaminen viskositeetti, partikkelikoko, sekä kaasun ja partikkelin tiheydet. Alue c kuvaa kuplivan pedin aluetta, jolle ominaista on vakio painehäviö pedin yli eri leijutuskaasun virtausnopeuksilla. Leijutusnopeuden kasvaessa lähelle terminaalinopeutta, muuttuu pedin leijutila turbulenttiseksi. (kohdan d kuvaamalle alue). Terminaalinopeudella tarkoitetaan pienintä leijutuskaasun nopeutta, joka pystyy kuljettamaan mukanansa yksittäisiä partikkeleita hiekkapedistä. Turbulenttisella alueella painehäviömittaus pedin yli vaihtelee intensiivisesti, jolloin painehäviön keskihajonta

Δ(Δp) kasvaa. Painehäviön intensiivinen vaihtelu on seurausta pedin sisältämien kaasukuplien voimakkaasta yhteensulautumisesta pedin sisällä ja niiden hajoamisesta pedin pinnalla. Yhteensulaneiden kuplien hajoaminen pedin pinnalla aiheuttaa petimateriaalin irtautumista pedistä. (Bis. 2010, 409 - 416. Huhtinen *et al*. 2000, 154)

Leijutuskaasun virtausnopeuden kasvaessa yhä suuremmaksi, yhä enemmän petimateriaalia irtaantuu pedistä. Leijutukselle tyypilliset nousevat ja kooltaan kasvavat kuplat korvaantuvat nopealle leijutukselle tyypillisellä leijutuskaasun nostaman petimateriaalin tippumisella leijutuksen vastaiseen suuntaan. Kohdan e nopean leijutuksen aikaan merkittävä osa petimateriaalista irtautuu pedistä leijutuskaasun mukaan, jolloin vakaan tilan saavuttamiseksi noussut petimateriaali täytyy saada erotettua kattilasta poistuvasta kaasuvirrasta ja palautettua takaisin petiin. Leijutusnopeuden kasvaessa suuremmaksi kuin pedin karkeimpien partikkeleiden terminaalinopeus siirtyy peti pneumaattisen kuljetuksen tilaan. (Bis. 2010, 416 - 417) Kuvassa 2.3 nähtävässä kuvaajassa nähdään partikkelikoon ja leijutusnopeuden vaikutus leijutilan tyyppiin. Kuvassa 2.3 u_{mf} tarkoittaa minimileijutusnopeutta ja u_t tarkoittaa terminaalinopeutta.



Kuva 2.3. Partikkelikoon ja leijutusnopeuden vaikutus leijutustilaan (Hyppänen, Raiko. 2002, 495)

Kupla- ja kiertopetikattiloissa käytettävä petimateriaali on rakeista kiintoainetta, kooltaan tyypillisesti 0,1 - 0,3 millimetriin. Petimateriaalit voidaan valmistaa muun muassa hiekasta tai sorasta, kalkkikivestä tai polttoaineiden tuhkasta. Hiekkaa ja soraa käytetään kattiloissa, joissa poltetaan alhaisen tuhkapitoisuuden omaavia polttoaineita. Kalkkikiveä käytetään petimateriaalina silloin, kun poltetaan korkean rikkipitoisuuden omaavia polttoaineita. Tuhkaa voidaan käyttää petimateriaalina silloin, kun polttoaineen tuhkapitoisuus on korkea ja rikin talteenottoa ei tarvita. Esimerkiksi kiertopetikattilassa polttoaineen massa on vain 1 - 3 prosenttia pedin kokonaismassasta. Näin ollen voidaankin olettaa, ettei polttoaineella ei ole suurta vaikutusta pedin hydrodynaamisiin olosuhteisiin. (Basu. 2015, 6)

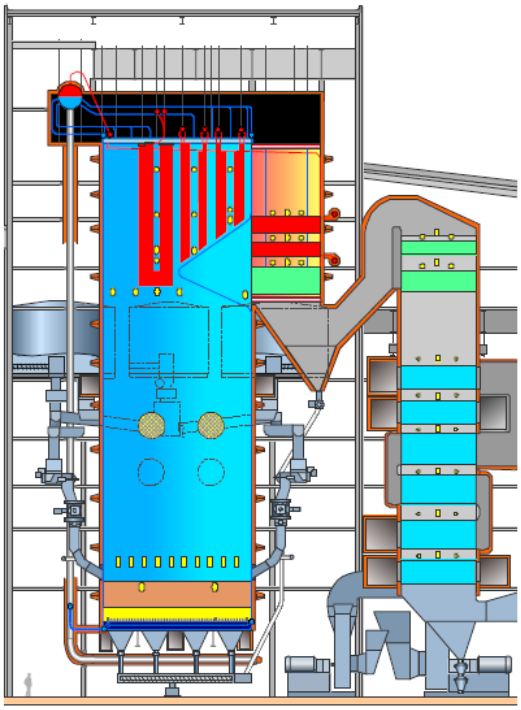
Leijupolttotekniikkassa on kaksi pääasiallista toimintatapaa, kuplapeti ja kiertopeti, jotka voidaan suunnitella toimimaan ilmakehän paineessa tai paineistettuina (Bis. 2010, 399). Polttoaineen palaminen kuplapedissä toteutetaan kuplivassa leijukerroksessa, jossa petimateriaalipartikkelit pysyvät kuplapedissä. Vastaavasti polttoaineen palaminen kiertopedissä edellyttää, että petimateriaalipartikkelit kulkeutuvat leijutusvirran mukana pois leijutustilasta ja palaavat takaisin leijutustilaan kierron säilyttämiseksi. (Hyppänen, Raiko. 2002, 490) Leijutekniikat lyhennetään tyypillisesti vastaavien englanninkielisten sanojen mukaan. Kuplapeti lyhennetään sanoista Bubbling Fluidized Bed (BFB) ja kiertopeti lyhennetään sanoista Circulating Fluidized Bed (CFB). Leijupolttotekniikoilla on runsaasti etuja verrattuna edeltäviin kattilatekniikoihin. Taulukossa 2.1 on esitetty leijupolttotekniikoihin liittyviä etuja ja haittoja.

Taulukko 2.1. Leijupolttotekniikoihin liittyviä etuja ja haittoja (Vamvuka. 2010, 46 - 47)

Leijutekniikan etuja	Leijutekniikan haittoja
Korkea palamis- ja kokonaishyötysuhde	Kaupallisessa käytössä pienemmässä mittakaavassa hiilen pölypolttolaitoksiin verrattuna
Suuresta lämmönsiirrosta johtuva kompakti kattilakoko	Suhteellisen suuri kiinteiden jätteiden muodostuminen, joista jotkin edellyttävät erityistoimenpiteitä hävittämiselle
Kattiloiden vähäisempi likaantuminen ja korroosio johtuen tuhkan sulamislämpötilaa alhaisemmasta palamislämpötilasta	Suuremmat hiilipitoisuudet tuhkassa hiilen pölypolttoon verrattuna
Palaminen tapahtuu merkittävästi alhaisemmassa ja tasaisemmin jakautuneessa lämpötilassa, jonka seurauksena matalammat typpioksidipäästöt	Lisääntynyt dityppioksidin muodostuminen alhaisemman palamislämpötilan seurauksena
Merkittävästi alhaisemmat rikkioksidipäästöt petiin syötettävien lisäaineiden avulla	
Mahdollisuus polttaa huonolaatuisia polttoaineita ja laaja polttoainevalikoima	

2.2 Kuplapetikattila

Kuplapetikattilan käytöllä on oleellinen merkitys hiilen, jätteen ja biomassan polttamisessa ja kaasutuksessa, sillä kuplapetikattilalle on tyypillistä hyvä polttoainevaihtelevuuden sietokyky, alhaiset päästöt, yhtenäiset lämpötilat kattilassa ja taloudellinen käyttö. Kuplapetikattiloiden taloudellinen käyttö mahdollistaa pienten, laajalle hajautettujen ja paikallista biomassaa polttavien kuplapetikattiloiden käytön suurten energiantuotantoyksiköiden sijaan. Kuvassa 2.4 nähdään leikkauskuva kuplapetikattilasta. Kuvan kuplapetikattilan terminen teho on 293 MW, tuorehöyryvirtaus 107 kg/s, höyrynpaine 11,5 MPa ja höyryn lämpötila 541 °C (Vakkilainen. 2012, 10-9).



Kuva 2.4. Leikkauskuva kuplapetikattilasta (Vakkilainen. 2012, 10-9)

Kuplapetikattila voidaan jakaa yksinkertaistetusti tulipesään ja takavetoon. Kuvassa 2.4 tulipesällä tarkoitetaan kuvan keskellä näkyvää sinistä aluetta. Höyrykattilan tulipesän tärkeimpänä tehtävänä on polttoaineen polttaminen niin täydellisesti ja tasaisesti kuin mahdollista (Vakkilainen 2012, 6-4). Tulipesän seinämät on rakennettu vesijäähdytteisistä putkista eli membraaniseinistä. Membraaniseinämiin syötettyä kylläistä vettä höyrystetään tulipesässä tapahtuvan lämmönmuodostumisen vaikutuksesta. Tulipesän pohjalla sijaitsevat ilmansuuttimet ja hiekkapeti. Tulipesään voidaan myös sijoittaa säteily- ja/tai konvektiotulistimia lämmönsiirron tehostamiseksi. Kuvassa 2.4. tulipesässä sijaitsevat tulistimet nähdään tulipesää tarkoittavan sinisen alueen sisällä olevina punaisina alueina.

Kuplapetikattilassa alaosan suuttimista syötettävä primääri-ilma toimii sekä hiekkapedin leijutuskaasuna ja palamisilmana. Suuttimista tuleva, tyypillisesti savukaasuilla esilämmitetty, primääri-ilma ohjataan tulipesän alaosassa sijaitsevien ilmasuutinten avulla tasaisesti koko hiekkapedin alueelle. Ilman virtausnopeus pedin läpi on tyypillisesti 1,2 - 3,7 m/s:n välillä. Kuplapetikattiloissa hiekkapedin paksuus vaihtelee yleensä 0,9 - 1,5 metrin välillä. Hiekkapedin aiheuttama painehäviö vastaa tyypillisesti 1 metrin korkuisen vesipatsaan muodostamaa painetta metriä hiekkapatjan paksuutta kohden. Kymmenen

senttimetrin korkuisen pedin aiheuttama paine-ero on näin ollen noin 1 kPa. Kuplapetikattiloissa petimateriaalin karkaaminen pedistä on hyvin vähäistä, sillä arviolta vain 2 - 4 kilogrammaa petimateriaalia karkaa savukaasujen mukana tonnia poltettua polttoainetta kohden. (UNEP. 20)

Kuplapetikattilan tarvitsema polttoaine sekä mahdollisesti käytettävät adsorbentit voidaan syöttää hiekkapedin ylä- tai alapuolelle. Yläpuolelle syötettäessä polttoaine syötetään tulipesän kyljissä olevista syöttöaukoista pedin päälle mahdollisimman tasaisesti. Pedin yläpuolelle tapahtuvassa syötössä polttoaineen partikkelikoko voi olla suurempi. Kuvan 2.4 kuplapetikattilassa polttoaine syötetään tulipesän sisällä olevien ruskeiden ympyröiden kohdalta. Pedin alle syötettäessä polttoaineen partikkelikoon tulee olla pienempi verrattuna polttoaineen partikkelikokoon pedin päälle syötettäessä. Hienompi polttoaine syötetään pneumaattisesti syöttösuppilosta ilmanjakotukin läpäisevän syöttöputken avulla tulipesään. (UNEP 21)

Tulipesän ja tulistimien jälkeen savukaasut siirtyvät kuplapetikattilan konvektiiviseen osaan eli takavetoon, jossa sijaitsee tulistimet, syöttövedenveden esilämmittimet (ekonomaiseri) ja ilman esilämmittimet (Luftvorwärmer). Syöttöveden esilämmittimet sijaitsevat takavedossa seuraavana tulistinputkien jälkeen. Syöttöveden esilämmittimien tarkoituksena on lämmittää syöttövettä ennen syöttöveden syöttämistä kattilan höyrystimiin. Höyrystämättömissä veden esilämmittimissä veden lämpötila ekonomaiserin ulostulossa on noin 20 celsiusastetta alle kiehumispisteen. (Huhtinen *et al*. 2000, 194 - 195) Veden esilämmittämisen periaate piilee tulistimien jälkeisten savukaasujen lämmön talteenotossa, mikäli tulistimien jälkeisten savukaasujen lämpöä ei otettaisi talteen ekonomaiserissa, tulisi syöttövettä kuitenkin lämmittää jollain samalla energiamäärällä, mikä lisäisi energian kulutusta. Ekonomaiserin putket ovat tyypillisesti rivoitettuja kaasupuolen lämmönsiirtopinta-alan kasvattamiseksi.

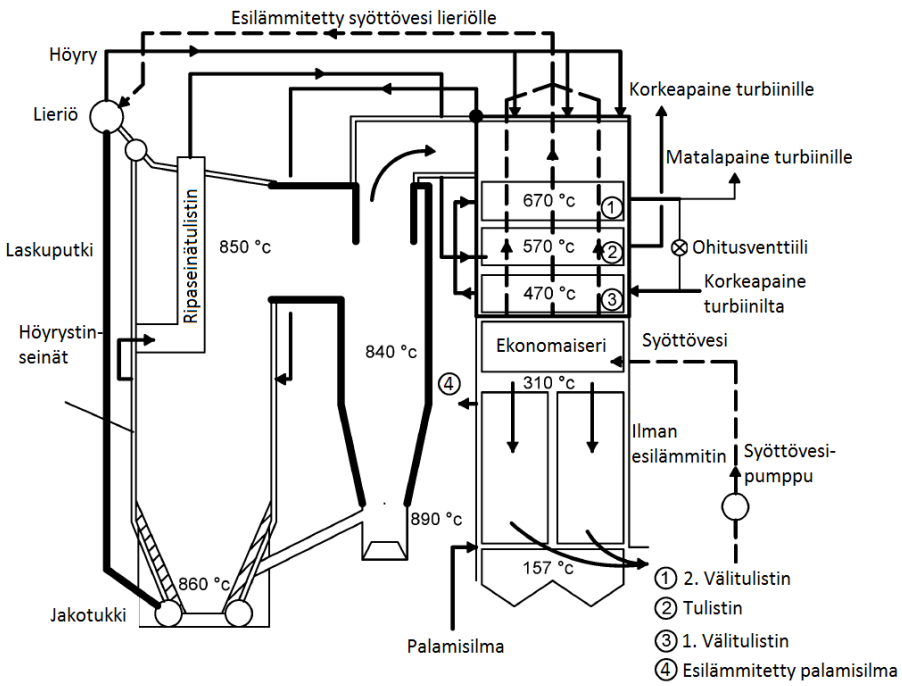
Palamisilman esilämmittimet sijaitsevat takavedossa seuraavana syöttöveden esilämmittimien jälkeen. Palamisilman esilämmityksellä voidaan tehostaan tulipesään syötetyn polttoaineen kuivumista, parantaa polttoaineen syttymistä ja nopeuttaa polttoaineen palamista. Ilman esilämmitin on konvektio-osan viimeinen komponentti. Konvektio-osan jälkeisen savukaasun lämpötila määräytyy savukaasun happokastepisteen mukaan. Ilmanesilämmittimet voidaan jakaa rekuperatiivisiin ja regeneratiivisiin esilämmittimiin.

(Huhtinen *et al*. 2000, 196 - 197) Kuvan 2.4. kuplapetikattilassa ekonomaiserit on piirretty takavetoon vihreällä värillä ja ilman esilämmittimet sinisellä värillä.

Polttoaineen palamaton jää jäljelle palamisen loppupuolella tuhkana. Kuplapetikattilassa pohjatuhkan eli kuplapetikattilan pohjalle hiekkapedin sekaan kertyvän tuhkan määrä on noin 30 - 40 % tuhkan kokonaismäärästä. Pohjatuhkaa poistetaan tasaisesti pienellä virralla pedin korkeuden kasvamisen ehkäisemiseksi. Lentotuhka eli savukaasujen mukaansa tempaama tuhka vastaa loppua tuhkan kokonaismäärästä. Tuhka kulkeutuu savukaasujen mukana kattilan takavedon komponenttien kautta aina savukaasujen puhdistusjärjestelmille asti. (UNEP, 22) Tuhkavirta voi aiheuttaa lämmönsiirrinpintojen likaantumista josta seuraa lämmönsiirron huonontumista.

2.3 Kiertopetikattila

Kiertopetitekniikka on kehittynyt kuplapetitekniikan pohjalta tarkoituksena voittaa kuplapetitekniikkaan liittyviä ongelmia. Kiertopetikattila voidaan jakaa kahteen osaan, petimateriaalin kiertopiiriin ja konvektiiviseen osaan. Petimateriaalin kiertopiiri koostuu tulipesästä, petimateriaalin ja savukaasujen erottimesta, kiertoleijukattilan kaasulukosta ja valinnaisesta ulkoisesta lämmönvaihtimesta. Edellä mainitut komponentit nähdään kuvassa 2.5 kuvan vasemmalla reunalla. Kiertopetikattilan toinen osa, eli konvektiiviseen osaan, kuuluvat höyryn tulistimet, välitulistimet, syöttöveden esilämmitin ja palamisilman esilämmitin. Kuvassa 2.5 edellä mainittu konvektiivinen osa nähdään kuvan oikeassa reunassa. (Basu. 2015, 7)



Kuva 2.5. Yksinkertaistettu kaaviokuva kiertopetikattilasta (Suomennettu lähteestä: Basu. 2015, 4)

Tulipesän seinämät ovat tyypillisesti tehty putkiseinistä, jossa veden höyrystyminen tapahtuu. Tulipesän alaosa on tyypillisesti suippeneva pohjalle päin mentäessä. Suippeneva muoto auttaa hyvän leijutuksen ylläpitämiseksi suuremmillakin hiukkasilla. Tulipesän suippenevan alaosan seinät on myös päällystetty tulenkestävällä massalla sekundääri-ilman syöttöön asti. Suippenevan osan yläpuolelle mentäessä tulenkestävät muuraukset loppuvat ja kattilan poikkipinta-ala muuttuu yhdenmukaiseksi. Kiertopetikattilaan kuuluva petimateriaalin ja savukaasujen erotin sijaitsee tulipesän viereisessä tilassa. Erottimen tarkoituksena on erottaa savukaasuvirtauksen mukanaan tuomat petimateriaalipartikkelit savukaasuista. Erottimena käytetään tyypillisesti syklonia. Erottimen alapuolella nähdään kiertopetikattilan kaasulukko. (Basu. 2015, 7) Kaasulukon tärkeimpinä tehtävinä voidaan pitää petimateriaalin ohjaamista takaisin tulipesään ja kaasuvirtauksen pääsyn estäminen suoraan kiertopetikattilan erotinosaan (Hyppänen, Raiko. 2002, 517). Kiertopetikattilan erotinosa ja kaasulukko ovat tyypillisesti päällystettyjä tulenkestävällä massalla, mutta on myös mahdollista, että niihin on sijoitettu höyrystin- tai tulistinpintoja (Basu. 2015, 7). Kiertopetikattilaan voidaan myös lisätä ripaseinätulistin lämmönsiirron tehostamiseksi tulipesässä.

Kiertopetikattilassa petimateriaalin leijutus aikaansaadaan primääri-ilmalla. Primääri-ilman syöttö toteutetaan tulipesän pohjalla sijaitsevista suuttimista. Palamiseen käytettävästä kokonaisilmamäärästä 60 - 70 prosenttia tuodaan primääri-ilmana (UNEP 23). Polttoaineen täydellinen palaminen varmistetaan sekundääri-ilman syötöllä, joka kiertopetikattilassa tapahtuu tulipesän seiniltä jonkin matkaa primääri-ilmansyötön yläpuolelta. Kiertopetikattilan ilmansyötöillä saavutetaan petimateriaalien hyvä sekoittuminen koko tulipesän alueella. Tällöin myös tulipesän lämpötilat ovat lähes yhtäläiset koko tulipesän alueella. (Basu. 2015, 7)

Polttoaine syötetään kiertopetikattilaan, joko tulipesän alaosasta tai kaasulukosta. Mikäli polttoaine syötetään kiertopetikattilan kaasulukosta, alkaa polttoaine palamaan jo sen sekoittuessa kuuman petimateriaalin kanssa. Rikkidioksidin talteenotossa käytetty kalkkikiven syöttö tapahtuu tulipesän ylemmissä osissa. (Basu. 2015, 7)

Pääosa tulipesästä tulleista partikkeleista erotetaan savukaasuista erottimessa. Erottimena käytetään tyypillisesti syklonia. Partikkeleita sisältävä savukaasuvirta ohjataan sykloniin sykloniosan reunalta. Tällöin partikkelivirta törmää ensimmäisenä sykloniosan reunamiin, jolloin partikkeleiden virtausnopeus laskee. Virtausnopeuden laskun myötä partikkelit eivät enää pysty kulkemaan savukaasuvirtauksen mukana, jolloin partikkelit alkavat valua sykloninosan reunoja pitkin pohjalle. Puolestaan kevyt savukaasuvirta pystyy jatkamaan matkaa kiertopetikattilan konvektiiviseen osaan sykloniosan keskeltä lähtevästä putkesta. Pieni osa partikkeleista pääsee kuitenkin aina karkaamaan savukaasujen mukana kiertopetikattilan konvektiiviseen osaan. Karanneet partikkelit pystytään kuitenkin ottamaan talteen savukaasujen puhdistuslaitteistoilla.

Kiertopetikattilan konvektiivisessa osassa, eli takavedossa, sijaitsevat kiertopetikattilan tulistin ja esilämmityspinnat. Tulistin on periaatteessa nippu kuumankestäviä teräsputkia. Tulistimien tarkoituksena on kuumentaa höyrystimissä muodostunutta höyryä maksimissaan noin 550 celsiusasteeseen. Tulistuslämpötilaa rajoittavat metallien materiaalitekniset rajoitukset. Lämpö siirtyy takavedossa olevien tulistinputkien sisällä virtaavaan höyryyn konvektion eli kosketuksen avulla. (Huhtinen *et al*. 2000, 190 - 191) Syöttöveden ja palamisilman esilämmittimet sijaitsevat kuplapetikattilan tapaan kattilan takavedossa. Myös esilämmittimien järjestys ja rakenne on samanlainen kuin kuplapetikattiloissa. Taulukossa 2.2. on esitelty tyypillisiä toiminta-arvoja kuplapeti- ja kiertopetikattiloille.

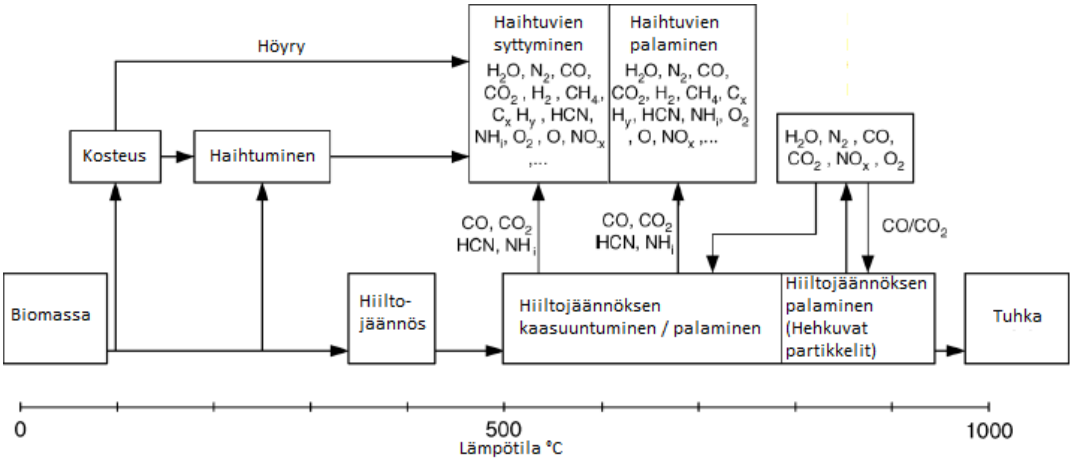
Taulukko 2.2. Kuplapeti- ja kiertopetikattiloiden tyypillisiä toiminta-arvoja (Huhtinen *et al*. 2000, 159 - 161. Basu. 2006. 6.)

	Yksikkö	Kuplapeti	Kiertopeti
Tilavuusrasitus	[MW/m^3]	0,1 - 0,5	0,1 - 0,3
Poikkipintarasitus	[MW/m^2]	0,7 - 3	0,7 - 5
Pedin painehäviö / Kokonaispainehäviö	[kPa]	6 - 12	10 - 15
Leijutusnopeus	[m/s]	0,7 - 2	3 - 10
Pedin korkeus	[m]	0,4 - 0,8	
Primääri-ilman lämpötila	[°C]	20 - 400	20 - 400
Sekundääri-ilman lämpötila	[°C]	20 - 400	20 - 400
Pedin lämpötila	[°C]	700 - 1000	800 - 950
Kaasutilan lämpötila / Loppulämpötila	[°C]	700 - 1200	850 - 950
Sekundääri-ilman osuus	[%]	30 - 70	25 - 65
Ilmakerroin	[-]	1,1 - 1,4	1,1 - 1,3
Pedin tiheys	[kg/m^3]	1000 - 1500	10 - 100
Palamishyötysuhde	[%]	90 - 96	95 - 99,5
Typenoksidit	[ppm]	300 - 400	50 - 200
Rikkidioksidin talteenotto tulipesässä	[%]	80 - 90	80 - 90

Taulukon 2.2 perusteella voidaan karkeasti sanoa kiertopetikattilan olevan parempi vaihtoehto suuremman lämpötehon kattiloissa. Kiertopetikattilan erot korostuvat paremmassa palamishyötysuhteessa ja pienemmissä päästöissä. Kiertopetikattilan tilavuusrasitus on kuitenkin taulukon 2.2 perusteella pienempi verrattuna kuplapetikattilan tilavuusrasitukseen, mikä tarkoittaa fyysisesti suurempaa kattilakokoa.

3 PALAMISEN TEORIAA

Tässä luvussa tarkastellaan ainoastaan kiinteän polttoaineen palamiseen liittyvää teoriaa. Kiinteän polttoaineen palaminen jakautuu eri vaiheisiin. Polttoaineen palamisen alussa polttoaine lämpenee kuivumislämpötilaan ja kuivuu, jolloin polttoaineen sisältämä kosteus haihtuu. Kuivumista seuraa pyrolyysi, jolla tarkoitetaan kiinteiden aineiden muuttumista lämmöntuonnin ansiosta kaasu- tai tervamaiseen muotoon. Seuraavaksi palamisessa syttyvät polttoaineesta haihtuneet yhdisteet. Palamisen viimeisenä vaiheena voidaan pitää jäljelle jääneen jäännöshiilen palamista. On myös mahdollista, että kaikki edellä mainitut palamisen vaiheet tapahtuvat samanaikaisesti. Esimerkiksi puukappaleen palamisessa puukappaleen pinta voi palaa, vaikka kappale on sisältä vielä kostea. (Saastamoinen. 2002, 186) Kuvassa 3.1 nähdään kaaviokuva biomassan palamisen vaiheista lämpötilan funktiona.



Kuva 3.1. Kaaviokuva biomassan palamisen vaiheista (Suomennettu lähteestä Suri & Horio. 2010, 104)

Palamisen jatkuminen edellyttää kolmen vaatimuksen samanaikaista täyttymistä: polttoaineen läsnäolo, palamisen edellyttämä riittävä lämpötila ja palamiseen tarvittavan hapen määrä. Yhdenkin edellytyksen puuttuessa myös palaminen loppuu. Kiinteiden polttoaineiden palamisen nopeus riippuu kuitenkin aineen kemiallisista, rakenteellisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. Kemiallisia ominaisuuksia ovat polttoaineen reaktiivisuus, pyrolysoitumislämpö ja lämpöarvo, rakenteellisia ominaisuuksia ovat vastaavasti polttoaineen tiheys, partikkelikoko ja huokoisuus, fysikaalisiin ominaisuuksiin kuuluvat polttoaineen ominaislämpö ja lämmönjohtavuus. Palamisprosesseissa palamistehon tärkein säätö toteutetaan polttoainevirran muutoksella, vaikka myös hapen tuonnin säädöllä voidaan vaikuttaa palamisprosessiin. (Saastamoinen. 2002, 186)

3.1 Polttoaineen kuivuminen ja pyrolyysi

Vaikka palamisprosessissa palamisen eri vaiheet voivatkin tapahtua samanaikaisesti, tapahtuvat polttoaineen kuivuminen ja pyrolyysireaktiot kuitenkin palamisen ensivaiheessa. Polttoaineen kuivuessa polttoaineeseen sitoutunut vesi höyrystyy lähellä kiehumislämpötilaa. Veden höyrystyminen on endoterminen eli energiaa tarvitseva prosessi, joka hidastaa palamisnopeutta. Mikäli puun kosteus on suurempi kuin 60 massa-%, pudottaa höyrystämiseen tarvittavan energian määrä palamislämpötilaa, siten ettei palamisen ylläpitämiseen tarvittavaa lämpötilaan enää päästä. (Suri & Horio. 2010, 105) Kuvasta 3.1 nähdään biomassan kuivumisen tapahtuvan noin 100 °C:n lämpötilassa.

Lämpötilan noustessa termisesti epävakaat yhdisteet hajoavat ja haihtuvat polttoaineesta. Haihtuvien yhdisteiden vapautumisen aikana haihtuvien yhdisteiden vapautumien on tyypillisesti niin suurta, ettei happi pääse olemaan yhteydessä polttoainepartikkelin pinnan kanssa. Reaktiota kutsutaan siksi pyrolyysiksi tai lämmitykseksi inertissä kaasussa. Pyrolyysi on tyypillisesti veden höyrystymisen tapaan endoterminen prosessi eli energiaa tarvitseva prosessi. Pyrolysoituvan määrän osuus polttoaineesta riippuu polttoaineesta, kuumennusnopeudesta ja loppulämpötilasta. (Vakkilainen. 2012, 4-7, Saastamoinen. 2002, 193) Biomassassa termisesti epävakaiden yhdisteiden hajoaminen tapahtuu noin 200 celsiusasteen lämpötilassa. Polttoaineen lämpötilan kohotessa yhä 350 celsiusasteeseen asti kaikki haihtuvat yhdisteet ovat haihtuneet ja haihtumisnopeus pienenee. (Suri & Horio. 2010, 105 - 106)

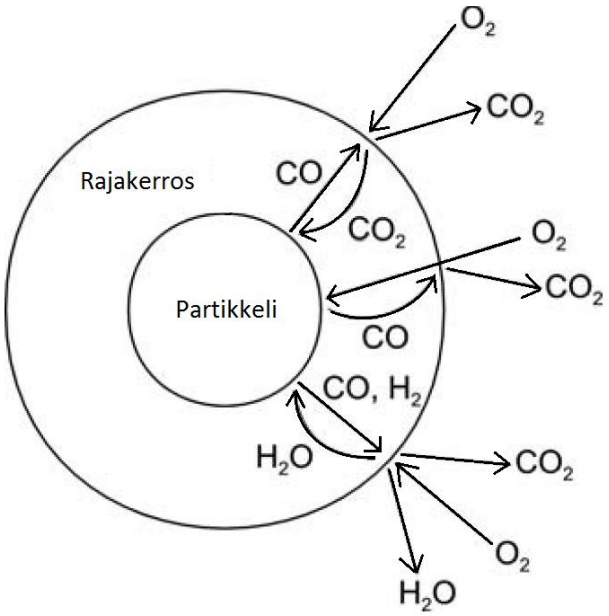
3.2 Haihtuvien yhdisteiden syttyminen ja palaminen

Kiinteän polttoaineen syttyminen voi tapahtua joko heterogeenisesti tai homogeenisesti. Heterogeenisessä syttymisessä kiinteän aineen sytyttyä liekki saattaa irrota polttoainepalan pinnalta voimistuvan pyrolyysin vuoksi. Homogeenisessä syttymisessä pyrolyysissä haihtuneet yhdisteet syttyvät polttoainepalan ulkopuolella. Homogeenisen syttymisen todennäköisyys kasvaa hiukkaskoon kasvun myötä. Haihtuneet yhdisteet voivat syttyä apuenergian avulla tai spontaanisti kuumassa ympäristössä. Apuenergiaa tarvittaessa pyrolyysituotteet sytytetään ulkoisen liekin tai muun apuenergian avulla. Syttymisaikaan vaikuttavat kaasun lämpötila, hiukkaskoko, happipitoisuus ja polttoaineen ominaisuudet. (Saastamoinen. 2002, 192)

Haihtuvien yhdisteiden homogeeniselle palamiselle on ominaista erittäin nopea reaktionopeus. Palamiseen kuluva aika määräytyy olennaisesti yhdisteiden pyrolyysinopeuden ja ilman sekoittumisen mukaan. Haihtuvien yhdisteiden konsentraatio on suurimmillaan lähellä polttoainepartikkelin pintaa ja vähene etäisyyden kasvaessa partikkelista. Haihtuvien yhdisteiden palaminen stabilisoituu diffuusioliekiksi alueilla, jossa palamiseen on saatavilla stoikiometrinen määrä happea. Muodostuneen liekin halkaisija on noin viisinkertainen partikkelin halkaisijaan nähden. (Spliethoff. 2010, 230)

3.3 Jäännöshiilen palaminen

Haihtuvien yhdisteiden vapauduttua kiinteästä polttoainekappaleesta jää jäljelle huokoinen jäännöshiili, joka koostuu lähes ainoastaan hiilestä (C) ja tuhkasta. Jäännöshiilen sisältämä hiili hapettuu riittävän suuressa pintalämpötilassa hapen (O_2), hiilimonoksidin (CO), hiilidioksidin (CO_2) ja vesihöyryn (H_2O) vaikutuksesta. Samassa lämpötilassa jäännöshiilen heterogeenisen palamisen nopeus on huomattavasti hitaampi verrattuna haihtuvien yhdisteiden homogeenisen palamisen nopeuteen, jolloin jäännöshiilen palaminen määrää palamisen kokonaisajan ja on ratkaiseva palamisjärjestelmien suunnittelussa. (Spliethoff. 2010, 230 - 231). Kuvassa 3.2 nähdään yksittäisen jäännöshiilipartikkelin palamisprosessi.



Kuva 3.2. Jäännöshiilipartikkelin palamisprosessi (Suomennettu lähteestä: Spliethoff. 2010, 231)

Kuvan 3.2 jäännöshiilipartikkelin palamista kuvaavassa kaaviokuvassa partikkelin sisällä tai pinnalla tapahtuva heterogeeninen hiilen hapettuminen tapahtuu hapen, hiilidioksidin ja vesihöyryn seurauksesta reaktioyhtälöiden 3.1, 3.2 ja 3.3 esittämällä tavalla. (Spliethoff. 2010, 231).

$$C + ½ O_2 \leftrightarrow 2 CO \tag{3.1}$$

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO \tag{3.2}$$

$$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \tag{3.3}$$

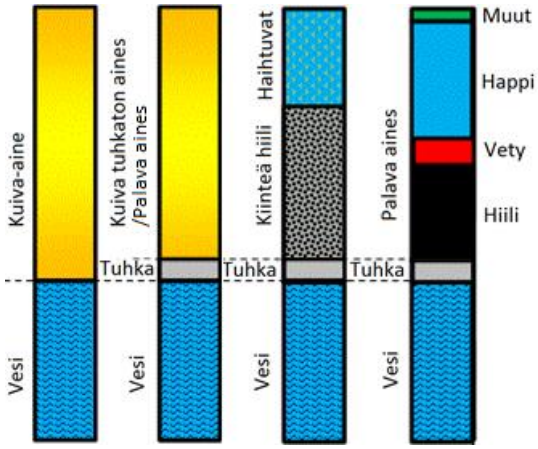
Nykyisin on todistettu, että suoraan partikkelin pinnalla tapahtuu ainoastaan konversiota hiilimonoksidiksi palamisreaktion 3.1 tai kaasutusreaktioiden 3.2 ja 3.3 mukaan. Jäännöshiilipartikkelin ympärille muodostuu kaasukehä eli kuvassa 3.2 nähtävä rajakerros, joka koostuu palamistuotteista eli hiilimonoksidista ja vedystä (H_2) ja hapettimista eli hapesta, hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Hapettimien täytyy diffundoitua laminaarisen rajakerroksen läpi jäännöshiilipartikkelin pinnalle ja palamistuotteiden päinvastoin partikkelin pinnalta ympäristöön. Rajakerroksessa tapahtuvat homogeeniset hapetusreaktiot nähdään yhtälöissä 3.4 ja 3.5. (Spliethoff. 2010, 231).

$$CO + ½ O_2 \leftrightarrow CO_2 \tag{3.4}$$

$$H_2 + ½ O_2 \leftrightarrow H_2O \tag{3.5}$$

4 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET

Tässä luvussa esitetään kiinteiden polttoaineiden perusominaisuuksia ja sitä minkälaisia vaikutuksia niillä on polttoaineen käyttöön. Luvussa esitettyjä perusominaisuuksia verrataan biomassalle tyypillisiin arvoihin. Kuvassa 4.1 on esitetty kiinteiden polttoaineisiin liittyvää terminologiaa, jota on tarkoitus käsitellä tässä luvussa.



Kuva 4.1. Kiinteisiin polttoaineisiin liittyvä terminologiaa (Muokattu lähteestä: Karampinis, Grammelis. 2012, fuel analysis, 2)

4.1 Kosteus

Polttoaineen kosteudella tarkoitetaan polttoaineeseen sitoutuneen veden määrää. Kuvassa 4.1 kosteus tarkoittaa kuvan alareunassa olevia sinisiä palkkeja. Polttoaineen kosteus on mahdollisesti merkittävin polttoaineelle määritetty ominaisuus, koska suuremmalla kosteuspitoisuudella on suora polttoaineen tehollista lämpöarvoa alentava vaikutus (Moilanen *et al*. 2002, 121). Suurempi kosteuspitoisuus tarkoittaa suurempaa energiamäärää, joka tarvitaan veden haihduttamiseen ennen varsinaisten palamisreaktioiden alkamista.

Polttoaineen kosteus voidaan määrittää polttoainenäytettä kuivaamalla 105 °C:n lämpötilassa, jolloin polttoaineeseen sitoutunut kosteus saadaan määritettyä punnitsemalla näytepala ennen ja jälkeen kuivatuksen. Menetelmä sopii ainoastaan termisesti vakaille polttoaineille. jolloin polttoainenäytteet eivät hajoa lämmön vaikutuksesta. (Moilanen *et al*. 2002, 121 - 122) Kosteuspitoisuus ilmoitetaan tyypillisesti massaprosenttina polttoainenäytteen kokonaismassasta. Polttoaineen kosteuspitoisuus ilmoitetaan yleensä yhtälön 4.1 avulla.

$$w_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{pa}} \cdot 100\ \% \qquad (4.1)$$

jossa	w	Kosteuspitoisuus	[m-%]
	m_{H_2O}	Veden massa	[kg]
	m_{pa}	Polttoainenäytteen massa	[kg]

Biomassan kosteuspitoisuus voi vaihdella 10 - 70 massaprosentin välillä. Biomassan poltossa korkea kosteuspitoisuus voi aiheuttaa ongelmia polttoaineen syttymisessä, sekä alentaa palamislämpötilaa. Polttoaineen korkeasta kosteuspitoisuudesta seuraa myös suuret savukaasumäärät. (Khan *et al*. 2009, 26 - 27)

4.2 Tuhka

Tuhkan määrä kiinteässä polttoaineessa tarkoittaa epäorgaanisen aineen massaa, joka jää jäljelle, kun polttoainenäyte poltetaan täydellisesti hapettavissa olosuhteissa. Kuitenkaan jäljelle jäävän tuhkan määrä ei välttämättä vastaa suoraan polttoainenäytteen tuhkapitoisuutta, sillä monet mineraalit voivat hajota tai hapettua polton yhteydessä. (Moilanen *et al*. 2002, 122) Kuvassa 4.1 tuhka nähdään palavan aineksen ja veden väliin jäävänä harmaana osana.

Tuhkapitoisuuden määrittämiseen käytetyt laitteistot ja niiden käyttöominaisuudet ovat standardoitu eri polttoaineille eri organisaatioiden toimesta. Kuitenkin yksi yleisesti käytetty tuhkapitoisuuden määrittämiseen tarkoitettu laitteisto koostuu hehkutusupokkaasta, jota kuumennetaan tietyssä lämpötilassa, tietyllä tuhkausuunin ilmanvaihdolla, jolloin esimerkiksi noin yhden gramman kivihiilinäytettä tuhkataan noin 815 °C ± 10 °C:n lämpötilassa. (Moilanen *et al*. 2002, 122) Tuhkapitoisuus voidaan siten esittää yhtälön 4.2 avulla. Tuhkapitoisuus esitetään tyypillisesti massaprosenttina kuivan aineen massasta.

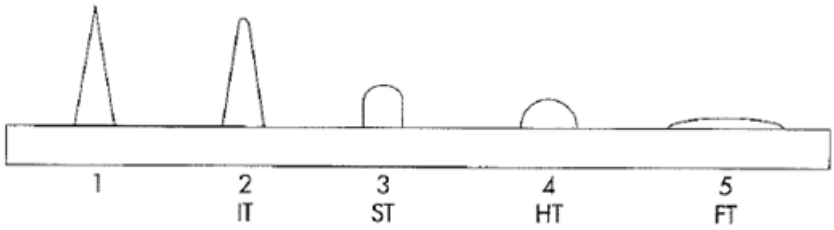
$$w_{ash} = \frac{m_{ash}}{\left(1 - w_{H_2O}\right) \cdot m_{pa}} \cdot 100\ \% \qquad (4.2)$$

jossa	w_{ash}	tuhkapitoisuus	[m-%]
	m_{ash}	tuhkan massa	[kg]

Tuhkan sulamisella on haitallisia vaikutuksia lämmönsiirrinpintojen kerrostumiseen ja sellaisiin polttotekniikoihin, joissa sulanut tuhka pystyy tukkimaan palamisilman syötön. (Moilanen *et al*. 2002, 125 - 126)

Tuhka voidaan jakaa kahteen osaan, pääelementteihin ja vähäisiin elementteihin. Pääelementeillä tarkoitetaan yhdisteitä, jotka eivät niinkään aiheuta ympäristöongelmia vaan puolestaan ovat merkittävässä roolissa tuhkan sulamis-, likaamis- ja korroosiokäyttäytymisten määräytymisessä. Tuhkan pääelementtien komponentteja ovat alumiini (Al), kalsium (Ca), rauta (Fe), magnesium (Mg), fosfori (P), kalium (K), pii (Si), natrium (Na) ja titaani (Ti). Vähäiset elementeillä tarkoitetaan yhdisteitä, joiden pitoisuudet polttoaineessa ovat hyvin vähäisiä. Vähäisten elementtien pitoisuuksien mittaaminen perustuu pääsääntöisesti ympäristöhuoliin. Vähäisten elementtien pääkomponentteja ovat arseeni (As), kadmium (Cd), koboltti (Co), kromi (Cr), kupari (Cu), elohopea (Hg), mangaani (Mn), molybdeeni (Mo), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), antimoni (Sb), vanadiini (V) ja sinkki (Zn). (Karampinis, Grammelis. 2012, Ash analysis page 2)

Tuhkan sulamislämpötilan määrityksessä käytetyt standardit ovat menetelmältään täysin empiirisiä. Tuhkan sulamiskäyttäytymissä käsittelevissä standardimenetelmissä, tuhkasta muodostetaan näytepala, jota kuumennetaan pelkistävässä tai hapettavassa olosuhteissa samalla tarkkailen tuhkanäytteen muodonmuutosta. (Moilanen *et al*. 2002, 125) Kuvassa 4.2 havainnollistetaan tuhkanäytteen muotoa ja sen muutosta kuumennuksen aikana.



Kuva 4.2. Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Moilanen *et al*. 2002, 126)

ISO 540 menetelmässä kuvan 4.2 kohta 2 (IT) eli muodonmuutoslämpötila (deformation temperature) tarkoittaa lämpötilaa, jossa näytekappaleen muodossa havaitaan ensimmäiset pyöristymät. Kohta 4 (HT) eli puolipallolämpötila (hemisphere temperature) tarkoittaa lämpötilaa, jossa näytekappale on levinnyt siten, että pohjan halkaisija on noin kaksinkertainen korkeuteen nähden. Kohta 5 (FT) eli juoksevuuslämpötila (flow tempera-

ture) tarkoittaa lämpötilaa, jossa näytekappaleen korkeus on enää vain kolmasosa näytteen korkeudessa mitä se oli puolipallotilassa. ISO 540 standardi ei käsittele kohtaa 3, mutta esimerkiksi ASTM D-1857 standardissa se tarkoittaa pehmenemislämpötilaa. (Moilanen *et al*. 2002, 126)

4.3 Haihtuvat yhdisteet ja hiiltojäännös

Kiinteän polttoaineen haihtuvilla yhdisteillä tarkoitetaan niitä yhdisteitä polttoaineesta, jotka haihtuvat polttoainetta kuumennettaessa. Haihtuvat yhdisteet voidaan jakaa kevyisiin hiilivetyihin, hiilimonoksidiin, hiilidioksidiin, vetyyn, kosteuteen ja tervoihin. Yhdisteiden haihtumiseen vaikuttavat lämpötila ja pyrolyysin kuumennusnopeus. Polttoaineesta haihtuneet yhdisteet vaikuttavat palamisessa näkyvään liekkiin. Haihtuvilla yhdisteillä on tärkeä merkitys polttoaineen syttymiseen. Polttoaineet, jotka sisältävät runsaasti haihtuvia yhdisteitä, syttyvät matalammissa lämpötiloissa verrattuina polttoaineisiin, joiden haihtuvien yhdisteiden määrä on vähäisempi. Nopeammin syttyvät polttoaineet myös tyypillisesti palavat nopeammin, sekä niiden palaminen on täydellisempää. Haihtuvien yhdisteiden pitoisuus biomassassa on tyypillisesti hyvin suuri, jolloin biomassan massasta jopa 90 prosenttia voi haihtua palamisen ensivaiheessa. Haihtuvien yhdisteiden runsaasta määrästä seuraa, että täydellisen palamisen saavuttamiseksi täytyy palotilassa olla runsaasti tilaa haihtuvien yhdisteiden palamista varten. (Huhtinen *et al*. 2000, 40. Khan *et al*. 2009, 26 - 27)

Hiiltojäännöksellä tarkoitetaan haihtuneiden yhdisteiden jäljelle jättämää osaa polttoaineesta. Hiiltojäännöksen osuudesta kuitenkin tulee muistaa vähentää tuhkan osuus. Kuplapetipoltossa hiiltojäännöksen palaminen tapahtuu kuplapedissä.

4.4 Alkuainekoostumus

Kiinteän polttoaineen rakenne voidaan jakaa edellä mainittujen kosteuden eli veden ja tuhkan lisäksi myös palavaan ainekseen. Polttoaineen palamisen kannalta tärkein osa eli palava aines koostuu hiilestä (C), vedystä (H), hapesta (O), typestä (N) ja rikistä (S). Alla esitetyssä reaktioyhtälöissä esitetään yksinkertaistetut palamisreaktiot mainituille yhdisteille. Todellisuudessa palamisreaktiot ovat monimutkaisempia ja sisältävät välivaiheita.

$$C + O_2 = CO_2 \tag{4.3}$$

$$H_2 + ½ O_2 = H_2O \tag{4.4}$$

$$S + O_2 = SO_2 \tag{4.5}$$

$$N + O_2 = NO_2 \tag{4.6}$$

Palavan aineksen sisältämä hiili ja vety ovat tärkeimmät alkuaineet palamisessa muodostuvan lämmön kannalta. Palavaan ainekseen sisältyvä happi toimii tavallaan hapen lähteenä palamisessa ja siten osaltaan vähentää palamisessa tarvittavaa hapenmäärää. Palavan aineksen typpi ja rikki ovat päästöjen kannalta epäedullisia, sillä palamisolosuhteissa ne voivat muodostaa happamia kaasuja eli typenoksideja ja rikkidioksidia.

Biomassan hiili-, vety ja happipitoisuudet eivät vaihtele paljoa eri biomassalähteiden kesken. Tyypillisesti hiilipitoisuus kuivassa biomassassa vaihtelee 30 - 60 massaprosentin välillä, vastaavasti vetypitoisuus vaihtelee 5 - 6 massaprosentin välillä ja happipitoisuus 30 - 45 massaprosentin välillä. Rikki-, typpi- ja klooripitoisuudet jäävät tyypillisesti alle yhden massaprosentin biomassan kuivasta aineesta. Edellä mainittujen alkuaineiden lisäksi myös kloorilla, kaliumilla ja silikonilla on merkittäviä vaikutuksia polttoaineen laatuun. Mainituista yhdisteistä kloorilla on suurin vaikutus palamiseen liittyviin ongelmiin. Suurin huoli kloorista johtuu kloorin aiheuttamasta korroosiosta tulistinputkiin korkeissa lämpötiloissa. Klooripitoisuudet biomassassa voivat olla hyvinkin korkeat. Korkeat silikonipitoisuudet kaliumin ja kloorin kanssa aiheuttavat kattilassa vakavia ongelmia tuhkan pinttymisessä lämmönsiirtopinnoille kohtalaisissa ja korkeissa lämpötiloissa. (Khan *et al*. 2009, 24) Lämmönsiirtopintojen pinttyminen huonontaa lämmönsiirtoa kattilassa.

4.5 Lämpöarvo

Polttoaineen lämpöarvo ilmaisee polttoaineen täydellisessä palamisessa muodostuvan lämpöenergia. Yleisesti lämpöarvoista keskustellessa käytetään kolmea seuraavaksi tarkasteltavaa lämpöarvoa. Kiinteillä polttoaineilla lämpöarvo ilmoitetaan yleensä kilogrammaa kohti eli muodossa MJ/kg. Kaasumaisten polttoaineiden lämpöarvo ilmoitetaan vastaavasti tilavuusyksikköä kohti eli MJ/m^3.

Biomassan lämpöarvo on tyypillisesti selvästi alhaisempi verrattuna hiilen lämpöarvoon. Biomassan alhaisempaa lämpöarvoa voidaan perustella korkeammalla kosteuspitoisuudella ja alhaisemmalla hiilipitoisuudella. Biomassan ligniinipitoisuus korreloi tyypillisesti hyvin voimakkaasti polttoaineen lämpöarvon kanssa. (Khan *et al*. 2009, 26)

4.5.1 Kalorimetrinen lämpöarvo

Kalorimetrinen lämpöarvo eli niin sanottu ylempi lämpöarvo kuvaa sitä lämpöenergian määrää, joka syntyy poltettavan aine palaa täydellisesti ja muodostuneet palamistuotteet lauhtuvat 25 celsiusasteen lämpötilaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että palamisessa polttoaineen sisältämä kosteus höyrystyy ja lauhtuu palamisen jälkeen takaisin nesteeksi, sekä myös vedyn palamistuotteena syntyvä vesi lauhtuu nesteeksi. (Alakangas *et al*. 2016, 28)

4.5.2 Tehollinen lämpöarvo

Tehollinen lämpöarvo eli niin sanottu alempi lämpöarvo ottaa huomioon palamisen aikana muodostuvan veden höyrystymisenergian. Suomessa käytetyistä lämpöarvoista tehollinen lämpöarvo on käytetyin. Kun polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo on saatu määritetyksi, voidaan yhtälön 4.7 avulla ratkaista polttoaineen tehollinen lämpöarvo. Yhtälössä pitoisuudet on esitetty pitoisuuksina kuivassa polttoaineessa. (Alakangas *et al*. 2016, 28)

$$q_{\mathrm{i,LHV}} = q_{\mathrm{i,HHV}} - 212{,}2 \cdot w_{\mathrm{H_2,dry}} - 0{,}8 \cdot (w_{\mathrm{O_2,dry}} + w_{\mathrm{N_2,dry}}) \tag{4.7}$$

jossa	$q_{\mathrm{i,LHV}}$	Tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
	$q_{\mathrm{i,HHV}}$	Kalorimetrinen lämpöarvo	[MJ/kg]
	w_{dry}	ainepitoisuus kuivassa polttoaineessa	[m-%]

4.5.3 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa

Tehollisella lämpöarvolla saapumistilassa tarkoitetaan lämpöarvoa, joka ottaa huomioon polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen tarvittavan energian. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on myös esitetyistä lämpöar-

voista alin. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa voidaan määrittää alemman lämpöarvon avulla. Tehollisen lämpöarvon määrittäminen on esitetty yhtälössä 4.8. (Alakangas *et al*. 2016, 28 - 29)

$$q_{\mathrm{i,M}} = q_{\mathrm{i,LHV}} \cdot (1 - \mathrm{w}_{\mathrm{H2O}}) - l \cdot w_{\mathrm{H2O}} \tag{4.8}$$

jossa $q_{\mathrm{i,M}}$ Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg]

l Höyrystymisen entalpian korjauskerroin vedelle 25 °C:n lämpötilassa 0,02443 MJ/kg

5 HAITALLISET PÄÄSTÖT

Tässä luvussa on tarkoitus käsitellä palamisprosessissa muodostuvia tyypillisiä päästöjä, niiden vaikutuksia, sekä keinoja vähentää niitä. Polttoaineen palamisessa muodostuvat päästöt voidaan jakaa pääsääntöisesti kahteen luokkaan, palamattoman polttoaineen muodostamiin päästöihin sekä palamisessa muodostuviin päästöihin. Polttoaineen palamisessa muodostuvat päästöt voidaan jakaa toisen luokituksen mukaan myös palamisessa tai ilmakehässä muodostuviin päästöihin. Palamattoman polttoaineen muodostamat päästöt sisältävät hiilimonoksidia (CO), tervaa, polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH), hiilivetyjä ja hiilipartikkeleita. Edellä mainitut päästöt syntyvät tyypillisesti huonon palamisen seurauksena, joka voi johtua liian alhaisesta palamislämpötilasta, riittämättömästä polttoaineen sekoittumisesta palamisilman kanssa tai palavien kaasujen liian lyhyestä ajasta tulipesässä. Palamattoman polttoaineen muodostamia päästöjä syntyy kaikista polttoainetyypeistä, mutta kuitenkin niiden muodostuminen riippuu kattilan suunnittelusta ja kattilan käyttöolosuhteista. Yleensä palamattomien polttoaineiden muodostamia päästöjä voidaan vähentää parantamalla palamishyötysuhdetta tulipesässä. Palamishyötysuhdetta voidaan parantaa paremmalla polttoaineen ja palamiskaasun sekoituksella, korkeammalla palamislämpötilalla ja riittävällä polttoaineen viipymäajalla tulipesässä. Palamisilman vaiheistus on todettu myös hyväksi menetelmäksi varmistaa hyvä palamishyötysuhde. (Khan *et al*. 2009, 31 - 32)

Palamisessa muodostuneet päästöt sisältävät tuhkaa ja typpeen sekä rikkiin liittyviä päästöjä. Mainitut päästöt eivät ole epätäydellisen palamisen tuotteita, vaan päästöt liittyvät kriittisesti polttoaineen ominaisuuksiin ja siten muodostuvat palamisen aikana. Palamisessa muodostuu hiukkasia, typen oksideja (NO_x) ja rikin oksideja (SO_x). Typen oksidipäästöt ovat pääsääntöisesti typpioksidia (NO), typpidioksidia (NO_2) ja dityppioksidia (N_2O), vastaavasti rikin oksidipäästöt muodostuvat pääsääntöisesti rikkidioksidista (SO_2). Happamien kaasujen ja raskasmetallien päästöt ovat myös mahdollisia. Raskasmetalleja voi löytyä korkeina pitoisuuksina kierrätyspolttoaineista, varsinkin jos kierrätyspolttoaineet sisältävät maalattua tai käsiteltyä puuta. Mainittujen yhdisteiden muodostumiseen voidaan vaikuttaa käyttämällä enemmän palamisilmaa kuin stoikiometrinen palamisilmantarve edellyttäisi. (Khan *et al*. 2009, 32)

5.1 Hiukkaspäästöt (PM2,5/10)

Hiukkaspäästöt aiheuttavat näkyvyyden huonontumista savusumun ja usvan seurauksena, rakennusten likaantumista, korroosiota ja eroosiota materiaaleille ja muutoksia paikalliseen säähän. Hiukkaspäästöillä voi olla myös vaikutuksia ihmisten ja eläinten terveyteen, sekä ne voivat hidastaa kasvien kasvamista. Ilman hiukkaspäästöt ovat ihmisen terveydelle haitallisia monellakin tapaa. Jotkin hiukkaspäästöt, kuten torjunta-aineet, lyijy tai arsenikki, voivat olla myrkyllisiä tai karsinogeenisia. Hiukkaset voivat myös adsorboida tiettyjä kemikaaleja vahvistaen näin kemikaalien pysyvyyttä keuhkoissa. (Cooper, Alley. 1986, 31) Pienhiukkasten terveysvaikutukset riippuvat pitkälti hiukkasten kemiallisesta koostumuksesta, sekä niiden kertymispaikasta. Terveydelle haitallisimpia ovat etenkin kaikkein pienimmät hiukkaset (PM1), sillä pienet hiukkaset pystyvät tunkeutumaan syvälle keuhkoihin ja jopa verenkiertoon asti. Hiukkaspäästöjä raportoidaan kokonaismassavirran lisäksi myös partikkelikoon mukaan. PM10 partikkeleilla tarkoitetaan partikkelikooltaan alle 10 mikrometriä olevia partikkeleita ja vastaavasti PM2,5 partikkelien partikkelikoko on alle 2,5. (Vakkilainen. 2012, 15-8 - 15-9)

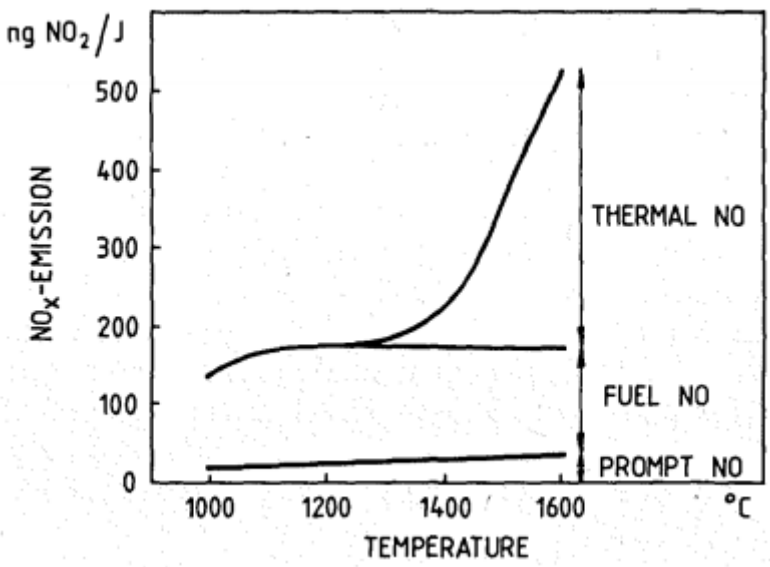
Hiukkaspäästöjen vähentämiseen on olemassa monia erilaisia erotintyyppejä. Voimalaitoksissa tyypillisimpiä hiukkaserottimia ovat sähkösuodattimet, dynaamiset erottimet, kangassuodattimet ja savukaasupesurit. Sähkösuodattimessa savukaasuvirran hiukkaset varataan negatiivisella sähkövarauksella. Varautuneet hiukkaset voidaan siten erottaa voimakkaassa sähkökentässä koronapurkausten avulla savukaasuvirrasta positiivisesti varautuneille erotuselektrodeille. Dynaamisista erottimista voimalaitoskäytössä sykloni on yleisin. Syklonin johtosiipien avulla sisään tuleva savukaasuvirta saatetaan spiraalin muotoiseen liikerataan kohti syklonin pohjaa. Liikeradan ansiosta hiukkaset törmäävät syklonin seiniin ja valuvat syklonin pohjalla olevaan poistoaukkoon. Puhdistunut savukaasuvirta imetään pois syklonin keskeltä nousuputkesta. Kangassuodattimissa savukaasuvirta ohjataan tiheän kankaan läpi. Hiukkaset eivät läpäise tiheää kangasta, vaan jäävät kankaan pinnalle. Suodatinkankaan täyttyessä hiukkasista suodattimen yli mitattu paineero kasvaa. Suodatinkankaita voidaan puhdistaa ravistamalla, paineilmapulsseilla tai ultraäänen avulla. Tyypillisin kangassuodatin on letkusuodatin. Pesurissa savukaasuihin ruiskutetaan pieniä vesipisaroita, jotka agglomeroituvat savukaasuvirran hiukkasten kanssa. Syntyneet pisarat erotetaan pisaranerottimissa. (Huhtinen *et al*. 2000, 233 - 237).

5.2 Typenoksidit (NO_x)

Typenoksidit koostuvat typpioksideista, typpidioksideista ja dityppioksideista. Typenoksidien reagoidessa ilmakehän hapen ja veden kanssa muodostuu typpihappoa, josta seuraa happosateiden myötä ympäristön happamoitumista. Typenoksidit läpikäyvät ilmakehässä muunnoksia, josta seuraa hiukkaspäästöjen (PM10 ja PM2,5) muodostumista varsinkin kaupunkialueilla. (de Nevers. 2000, 439 - 440) Typenoksidipäästöt aiheuttavat savusumun muodostumista ja ne ovat haitallisia kasveille, eläimille ja ihmisterveydelle. Lisäksi typenoksidit reagoivat auringon valon läsnä ollessa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kanssa (VOC) muodostaen valokemiallisia hapettimia. (Cooper, Alley. 1986, 35) Valokemiallisista hapettimista merkittävimmän yhdisteen eli otsonin muodostuminen on kuvattu yhtälössä 5.1. (de Nevers. 2000, 443)

$$\mathrm{NO} + \mathrm{HC} + \mathrm{O_2} + \text{auringonva lo} \rightarrow \mathrm{NO_2} + \mathrm{O_3} \tag{5.1}$$

Typenoksidien muodostumiseen nähdään olevan kolme keskeistä muodostumistapaa. Korkean lämpötilan muodostamat typenoksidit (engl. thermal NO_x) muodostuvat vasta tyypillisesti yli 1300 celsiusasteen lämpötilassa. Ilmiö on hyvin nähtävissä kuvassa 5.1. (de Nevers. 2000, 443) Leijupetipolton lämpötilat jäävät tyypillisesti alle 900 celsiusasteen, jolloin korkean lämpötilan seurauksesta muodostuvat typenoksidit jäävät hyvin epätodennäköiseksi. Polttoaineeseen sitoutuneesta typestä muodostuvat typenoksidit (engl. fuel NO_x) muodostuvat polttoaineesta haihtuneen tai jäljelle jäävään hiileen säilyneen typen reagoidessa hapen kanssa. Tässä vaiheessa typpioksidin osuus on huomattavasti suurempi typpidioksidiin nähden. Kattilan takavedon viileämmissä osissa typpioksidilla on kuitenkin taipumus hapettua edelleen typpidioksidiksi. (Khan *et al.* 2009, 36) Nopealla NO_x:lla (engl. Prompt NO_x) tarkoitetaan typenoksideja, jotka muodostuvat hyvin nopeasti typen, hapen ja polttoaineesta olevien aktiivisten hiilivetyjen seurauksena palamisen liekin polttoainerikkaissa osissa. (de Nevers. 2000, 446) Kuvassa 5.1 nähdään hiilen poltossa muodostuvien NO_x-päästöjen jakautuminen lämpötilan funktiona.



Kuva 5.1. NO_x-päästöjen muodostuminen hiilen poltossa lämpötilan funktiona (Hupa *et al*. 1989, 1497)

Typenoksidipäästöjen rajoittamiseen käytetyt menetelmät on jaettu primäärisiin ja sekundäärisiin menetelmiin. Primäärisissä menetelmissä typenoksidipäästöjä vähennetään muokkaamalla palamisprosessia. Käytännössä tämä tarkoittaa palamisprosessissa huippulämpötilan, korkean lämpötilan viipymäajan ja korkean lämpötilan happipitoisuuden alentamista. Käytännön sovelluksissa mainittuja muuttujia voidaan vähentää palamisilman vaiheistuksella, jälkipoltolla tai savukaasujen kierrätyksellä. Palamisilman vaiheistuksella polttoaineen palaminen jaetaan isommalle alalle, jolloin lämpötila ei nouse liian suureksi. Jälkipoltossa palamista tuetaan syöttämällä alhaisen typpipitoisuuden omaavaa polttoainetta tulipesän myöhempiin osiin. Savukaasujen kierrätyksen tarkoituksena on alentaa palamislämpötilaa syöttämällä savukaasuja takaisin tulipesään. Kiertokaasulla laimentaminen alentaa palamislämpötilaa, koska palamisessa vapautunut lämpö jakautuu suurempaan määrään N_2-molekyyliä ja palamistuotteita. Sekundäärisissä menetelmissä typenoksideja vähennetään tulipesän jälkeisten savukaasujen kemiallisella käsittelyllä. Voimalaitoksissa typenoksidipäästöjen vähentämisessä suosituin käytetty kemikaali on ammoniakki. Ammoniakkia käytettäessä typenpoistossa haluttu reaktio nähdään reaktioyhtälöstä 5.2. (de Nevers. 2000, 459 - 462)

$$6\,NO + 4\,NH_3 \rightarrow 5\,N_2 + 6\,H_2O \qquad (5.2)$$

Typenoksidipäästöjen vähentämistä voidaan tehostaa lisäämällä ammoniakin syötön jälkeen katalyyttielementeistä koostuva reaktori. Menetelmästä käytetään lyhennettä SCR (Selective Catalytic Reduction). Vastaavasti edellä mainitusta menetelmästä, jossa ei käytetä katalyyttiä, käytetään lyhennettä SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction). SNCR-menetelmässä typenoksidien erotusaste on noin 30 - 50 % kun taas SCR-menetelmässä erotusaste voi olla jopa 80 - 90 %. (Vakkilainen. 2012, 15-5)

5.3 Rikkioksidit (SO_x)

Kaikki ihmisen käyttämät orgaaniset polttoaineet sisältävät jonkin verran rikkiä. Puuperäiset polttoaineet sisältävät tyypillisesti hyvin vähän rikkiä öljyyn tai hiileen verrattuna. Polttoaineiden sisältämä rikki muodostaa palaessaan pääsääntöisesti rikkidioksidia. (de Nevers. 2000, 397) Typenoksidien tapaan myös rikkidioksidit muodostavat happamia yhdisteitä reagoidessaan ilmakehän hapen ja veden kanssa. Happamat yhdisteet aiheuttavat happosateiden myötä ympäristön happamoitumista. (de Nevers. 2000, 439)

Rikkidioksidipäästöjen pääsemistä ilmakehään voidaan vähentää menetelmissä, joissa rikkidioksidi muutetaan kipsiksi ($CaSO_4 \cdot H_2O$). Tyypillisimmässä menetelmässä rikkidioksidipäästöjen rajoittamiseen käytetään maaperästä laajalti saatavissa olevaa kalkkikiveä ($CaCO_3$). Kalkkikiven reaktio rikkidioksidin kanssa nähdään reaktioyhtälössä 5.3. (de Nevers. 2000, 399)

$$CaCO_3 + SO_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow CaSO_4 + CO_2 \qquad (5.3)$$

Reaktioyhtälöstä nähdään, että rikkidioksidin vapauttamisen sijaan ympäristöön vapautetaan hiilidioksidia. Hiilidioksidin vapauttaminen ympäristöön on suotuisampaa, sillä rikkidioksidin ympäristövaikutukset ovat haitallisempia hiilidioksidiin nähden. (de Nevers. 2000, 399) Kalkkikiven sisältämän kalsiumin hyödyntäminen riippuu suuresti savukaasun lämpötilasta ja partikkelikoosta. Tutkimusten perusteella on huomattu, että kalkkikiven rikinsidonta on tehokkainta savukaasujen lämpötilan ollessa 800 - 850 celsiusasteen välillä. Kalkkikiven suuremman partikkelikokoon on huomattu huonontavan kalkkikiven rikkisidontaa merkittävästi. Hyvissä käyttöolosuhteissa optimimaaliseksi Ca/S-suhteeksi on arvioitu 3/1. (Khan *et al*. 2009, 39) Kuplapetikattilassa kalkinsyötöllä saavutetaan yli

70 % rikinpoistoaste. Vastaavasti kiertopedissä kalkinsyötöllä saavutetaan jopa yli 90 % rikinpoistoaste. (Vakkilainen. 2012, 15-7)

5.4 Hiilimonoksidi (CO)

Hiilimonoksidipäästöillä ei ole olennaisesti vaikutuksia kasvustolle tai materiaaleille, mutta hiilimonoksidilla on vakavia vaikutuksia ihmisterveyteen. Hiilimonoksidi pystyy reagoimaan veren hemoglobiinin kanssa estäen veren hapenkuljetuksen. Hiilimonoksidipitoisuudesta ja vaikutusajasta riippuen vaikutukset ihmisissä vaihtelevat kevyestä päänsärystä pahoinvointiin ja jopa kuolemaan asti. (Cooper, Alley. 1986, 37)

Hiilimonoksidipäästöt ovat pääsääntöisesti seurausta epätäydellisestä palamisesta. Hiilimonoksidia käytetäänkin tyypillisenä mittapuuna palamishyötysuhteelle. Polttoaineen suurella partikkelikoolla ja tuhkapitoisuudella on havaittu olevan vaikutus suurempiin hiilimonoksidipäästöihin. (Khan *et al*. 2009, 35) Hiilimonoksidipäästöjä voi vähentää parantamalla polton aikaista ilman ja polttoaineen sekoitusta, sekä käyttämällä suurempaa ilmakerrointa. (Vakkilainen. 2012, 15-7)

5.5 Raskasmetallipäästöt

Raskasmetalleilla tarkoitetaan metallialkuaineita, joiden tiheys on suurempi kuin 5 g/cm^3 (5000 kg/m^3). Raskasmetalleihin kuuluu yhteensä noin 60 alkuainetta. Vaikka raskasmetallit ovatkin pieninä määrinä elintärkeitä kasveille ja eläimille, ovat ne suurina määrinä myrkyllisiä. Raskasmetallit pystyvät myös kertymään elimistöön tai ravintoketjuihin. Ympäristölle ja eliöille haitallisimpia raskasmetallipäästöjä ovat elohopea-, lyijy ja kadmiumpäästöt. Suurin raskasmetallipäästöjen lähde on metalliteollisuus, josta valtaosa ilmaan päässeistä kromi-, mangaani-, kadmium ja lyijypäästöistä ovat peräisin. Öljyä polttavat voimalaitokset puolestaan tuottavat valtaosan nikkeli- ja vanadiinipäästöistä. (Hakala & Välimäki 2003, 143) Kaikki biopolttoaineet sisältävät jossain määrin raskasmetalleja. Biopolttoaineiden palamisessa raskasmetallit jäävät tuhkan sekaan tai haihtuvat. Raskasmetallit pystyvät myös kiinnittymään ilmakehään vapautuvien partikkelien pinnalle tai jäämään lentotuhkapartikkelien sisään. Saastuneet biopolttoaineet, kuten kyllästetty tai maalattu puu, voivat kuitenkin sisältää huomattavasti suurempia raskasmetallipitoisuuksia. (Suri & Horio. 2010, 118 - 119) Raskasmetallipäästöjä raportoidaan arseenin,

elohopean, kadmiumin, kromin, kuparin, lyijyn, nikkelin, sinkin ja vanadiinin päästöinä. (Suomen ympäristökeskus SYKE. 2015a)

Taulukossa 5.1 nähdään Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU määräämät raskasmetallipäästöjen raja-arvot jätteenpoltossa. Päästöjen raja-arvot on laskettava 273,15 K lämpötilassa ja 101,3 kPa:n paineessa, savukaasujen vesihöyrypitoisuutta koskevien korjausten jälkeen. Savukaasujen sisältämien päästöjen happipitoisuus standardoidaan 11 prosentin happipitoisuuteen. (EUR-Lex 2010/75/EU, 68)

Taulukko 5.1. Raskasmetallipäästöjen raja-arvojen keskiarvot vähintään 30 minuutin ja enintään kahdeksan tunnin näytteenottoajan kuluessa jätteenpoltossa (EUR-Lex 2010/75/EU, 68)

Alkuaine ja sen yhdisteet	Yhteensä [mg/Nm^3]
Kadmium (Cd)	
Tallium (Tl)	Σ 0,05
Elohopea (Hg)	Σ 0,05
Antimoni (Sb)	
Arseeni (As)	
Lyijy (Pb)	
Kromi (Cr)	
Koboltti (Co)	
Kupari (Cu)	
Mangaani (Mn)	
Nikkeli (Ni)	
Vanadiini (V)	Σ 0,05

5.6 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet eli VOC:it (Volatile Organic Compounds) ovat orgaanista hiiltä sisältäviä nestemäisiä tai kiinteitä yhdisteitä, jotka haihtuvat merkittävällä nopeudella. VOC:eihin kuuluu laaja valikoima yhdisteitä, joista osa ovat myrkyllisiä ja karsinogeenisia. Kuitenkin suurin osa VOC-yhdisteistä ei uskota olevan myrkyllisiä ihmisille. Suurin huoli VOC-yhdisteistä aiheutuu VOC:ien taipumuksesta osallistua savusumun ja partikkelien muodostamiseen ilmakehässä. Jotkin VOC:it imevät voimakkaasti infrapunasäteilyä, täten voimistaen ilmaston lämpenemistä. VOC-päästöt ovat pääsääntöisesti peräisin liuottimista ja moottoripolttoaineista. Ainostaan pieni osa VOC-päästöistä on peräisin puun tai hiilen polttamisesta. Palamisessa VOC:it ovat seurausta epätäydellisestä palamisesta. (de Nevers. 2000, 329 - 330)

5.7 Dioksiinit ja furaanit (PCDD/F)

Dioksiineilla ja furaaneilla tarkoitetaan halogenoituja orgaanisia yhdisteitä, jotka tyypillisesti koostuvat polyklooratuista dibentso-para-dioksiineista (PCDD) ja polyklooratuista dibentsofuraaneista (PCDF). Rakenteeltaan PCDD/F-yhdisteet koostuvat kahdesta bentseenirenkaasta, jotka liittyvät toisiinsa yhdellä (furaanit) tai kahdella (dioksiinit) happisillalla. Klooriatomit voivat liittyä mihin tahansa molekyylin vapaista paikoista. Riippuen klooriatomin kulmasta ja sijainnista aromaattisilla renkailla, voi dioksiineilla olla 75 ja furaaneilla 135 eri isomeeriä. Isomeereillä tarkoitetaan molekyylejä, joiden molekyylikaava on sama, mutta rakenne on erilainen. PCDD/F-yhdisteiden käyttäytyminen ympäristössä riippuu paljolti molekyylin fyysisistä ominaisuuksista. PCDD/F-yhdisteitä muodostuu silloin, kun kloori, hiili vety ja happi reagoivat lämmön vaikutuksesta poltto- ja teollisuusprosesseissa. PCDD/F-yhdisteitä ei valmisteta teollisiin tarkoituksiin, vaan ne ovat sitoutuneina epäpuhtauksina muihin kemikaaleihin. (Khan *et al*. 2009, 33 - 34. Suomen ympäristökeskus SYKE. 2015b.)

Jotkin dioksiinien isomeerit tunnetaan myrkyllisimpinä kemikaaleina ja voivat aiheuttaa syöpää tai mutaatioita. Suuri altistuminen dioksiineille voi aiheuttaa myös klooriaknea, vahinkoa immuunijärjestelmälle, syntymävikoja, diabetesta ja maksa- ja kilpirauhassyöpää. (Khan *et al*. 2009, 34)

PCDD/F-yhdisteitä voidaan vähentää tehokkaasti käyttämällä PAH-yhdisteiden poistamissa käytettyjä menetelmiä. Palamishyötysuhteen parantamisen lisäksi PCDD/F-yhdisteitä voidaan vähentää käyttämällä sähkö- ja/tai pussisuodatinta, sekä vähentämällä aikaa, jossa savukaasujen lämpötila on kriittinen (250 - 450 °C) PCDD/F-yhdisteiden muodostumisen kannalta. Mainittujen menetelmien lisäksi myös muiden päästöjen hallintaan käytettyjen kalkkikiven ja ammoniakin käyttö on havaittu tehokkaaksi menetelmäksi vähentää PCDD/F-päästöjä. (Khan *et al*. 2009, 35) Dioksiini- ja furaanipäästöjen raja-arvon keskiarvo on jätteenpoltossa Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU mukaan 0,1 mg/Nm^3 vähintään kuuden tunnin ja enintään kahdeksan tunnin näytteenottoajan kuluessa.

5.8 Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH)

Polyaromaattisia hiilivedyt (PAH) ovat kemiallisia yhdisteitä, jotka koostuvat yhdistyneistä aromaattisista renkaista. Polyaromaattiset hiilivedyt ovat tyypillisesti karsinogeenisia ja aiheuttavat siten keuhkosyöpää. Biomassa sisältää tyypillisesti hyvin vähän polyaromaattisia hiilivety-yhdisteitä. (Khan *et al*. 2009, 32. Ki-Hyun *et al*. 2011, 425 - 427)

Polyaromaattisten hiilivetypäästöjen muodostumiseen nähdään olevan kaksi eri vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa päästöt aiheutuvat epätäydellisen palamisen seurauksena, jolloin polttoaineen sisältämät aromaattiset rakenteet vapautuvat palamisprosessin aikana ja karkaavat palamattomina ulos prosessista. Toisessa vaihtoehdossa päästöt ovat seurausta palamisessa tapahtuvista pyrolyysireaktioista, jolloin polttoaineen kemialliset muutokset palotapahtuman aikana mahdollistavat polysyklisten aromaattisten yhdisteiden muodostumisen polymerisaatioreaktioiden kautta. Polyaromaattisten hiilivetypäästöjen muodostumista voidaan ehkäistä palamishyötysuhdetta lisäävillä tekijöillä. Näitä tekijöitä ovat muun muassa yli-ilman käyttö, riittävä viipymäaika tulipesässä, ilman vaiheistus ja happirikkaat olosuhteet. Joissain tapauksissa myös lisäaineiden käyttöä päästöjen muodostumiseen on ehdotettu. (Khan *et al*. 2009, 32 - 33)

5.9 Haitallisten päästöjen päästörajat

Teollisuuden ilmaan, veteen tai maaperään kohdistuvia päästöjä säädetään Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2010/75/EU. Direktiivi teollisuuden päästöistä yhtenäistää teollisen toiminnan aiheuttamaa ympäristön pilaantumista ja päästöjen vähentämistä. Direktiivissä säädetään myös ilmaan, veteen tai maaperään pääsevien päästöjen ehkäisemisestä tai vähentämisestä, jos päästöjen täydellinen ehkäiseminen ei ole mahdollista ja jätteiden muodostumisen ehkäisemisestä korkean tason ympäristön suojelun saavuttamiseksi. (EUR-lex 2010/75/EU, 22)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU edellyttää ympäristön pilaantumisen ehkäisemisen ja vähentämisen varmistamiseksi laitoksilta luvan laitosten käyttämiseksi. Direktiivin mukaan lupaan tulisi sisällyttää kaikki toimenpiteet korkean tason ympäristönsuojelun toteuttamiseksi. Lupaan tulee myös sisällyttää kaikkia pilaavia aineita koskevat päästörajat. (EUR-lex 2010/75/EU, 18) Direktiivin 2010/75/EU 30 artik-

lan toisen kohdan mukaan kaikissa polttolaitoksissa, jotka ovat käytössä 1 päivän tammikuuta 2016 jälkeen, tulee täyttää direktiivin liitteessä V toisessa osassa asetetut päästörajat.

Direktiivin 2010/75/EU liitteen V toisen osan ensimmäisessä kohdassa kerrotaan, että kaikki päästöjen raja-arvot tulee laskea 0 °C:n (273,15 K:n) lämpötilassa ja 101,3 kPa:n (1 atm:n) paineessa savukaasujen sisältämän vesihöyryn määrän mukaan tehdyn korjauksen jälkeen ja standardoituna happipitoisuutena. Standardoitu happipitoisuus on kiinteiden polttoaineiden osalta 6 prosenttia. Nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita käyttävien polttolaitosten osalta standardoitu happipitoisuus on 3 prosenttia pois lukien kaasuturbiinit ja kaasumoottorit, joiden standardoitu happipitoisuus on 15 prosenttia. Taulukoissa 5.2, 5.3 ja 5.4 on ilmoitettu päästöjen raja-arvot kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita käyttäville polttolaitoksille hiukkas-, typenoksidi- ja rikkidioksidipäästöjen osalta.

Taulukko 5.2. Hiukkaspäästöjen raja-arvot kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita käyttävissä polttolaitoksissa (EUR-Lex 2010/75/EU, 63)

Lämpöteho [MW]	Päästöraja [mg/Nm^3]
50 - 300	20
> 300	10
	Biomassan ja turpeen osalta 20

Taulukko 5.3. Typenoksidipäästöjen raja-arvot (mg/Nm^3) kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita käyttävissä polttolaitoksissa (EUR-Lex 2010/75/EU, 62)

Lämpöteho [MW]	Kivihiili, ruskohiili ja muut kiinteät polttoaineet	Biomassa ja turve	Nestemäiset polttoaineet
50 - 100	300	250	300
	Ruskohiilen pölypolton osalta 400		
100 - 300	200	200	150
> 300	150	150	100
	Ruskohiilen pölypolton osalta 200		

Taulukko 5.4. Rikkidioksidipäästöjen raja-arvot (mg/Nm^3) kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita käyttävissä polttolaitoksissa (EUR-Lex 2010/75/EU, 62)

Lämpöteho [MW]	Kivihiili, ruskohiili ja muut kiinteät polttoaineet	Biomassa	Turve	Nestemäiset polttoaineet
50 - 100	400	200	300	350
100 - 300	200	200	300	200
			Leijupolton osalta 250	
> 300	150	150	150	150
	CFBC ja PFBC osalta 200		Leijupolton osalta 200	

Taulukoissa 5.2, 5.3 ja 5.4 nähtävissä päästörajoissa on tärkeä huomata, ettei alle 50 MW:n kokonaislämpötehon laitoksille ilmoiteta tämän direktiivin yhteydessä päästörajoja. Päästörajat alle 50 MW:n kokonaislämpötehon polttolaitoksille nähdään Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivistä 2015/2193/EU. Direktiivi koskee tiettyjen keskisuurten polttolaitosten ilmansaasteiden rajoittamista. Direktiiviä sovelletaan direktiivin toisen artiklan ensimmäisen kohdan mukaan polttolaitoksiin, polttoaineesta riippumatta, joiden polttoaineteho on vähintään 1 MW, mutta alle 50 MW. Päästörajat uusille keskisuurille polttolaitoksille nähdään taulukosta 5.5 Päästöjen raja-arvot määritetään keskisuurille polttolaitoksille samassa lämpötilassa, paineessa ja standardoidussa happipitoisuudessa kuin edellä on mainittu.

Taulukko 5.5. Päästöjen raja-arvot (mg/Nm^3) uusille keskisuurille polttolaitoksille (EUR-Lex 2015/2193/EU, 16)

Päästö	Kiinteä biomassa	Muut kiinteät	Kaasu-öljy	Muut nestemäiset	Maakaasu	Muut kaasumaiset
Hiukkaset	20	20		20		
NO_x	300	300	200	300	100	200
SO_2	200	400		350		35

Direktiivissä 2015/2193/EU päästörajat ovat määrätty tiukinten ja laajinten jätteenpoltolle. Päästöjen raja-arvot määritetään jätettä polttaville polttolaitoksille samassa lämpötilassa ja paineessa kuin edellä on mainittu. Savukaasun epäpuhtauksien raja-arvot standardoidaan 11 prosentin happipitoisuuteen. Taulukossa 5.6 on esitetty jätteenpolton päästöraja-arvojen vuosikausikeskiarvot.

Taulukko 5.6. Päästöjen raja-arvojen vuorokausikeskiarvot uusille jätteenpolttolaitoksille (EUR-Lex 2010/75/EU, 68)

Päästö	Päästöraja [mg/Nm^3]
Hiukkaset	10
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)	10
Kloorivety (HCl)	10
Fluorivety (HF)	1
Rikkidioksidi (SO2)	50
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO_2) Typpidioksidina uusissa jätteenpolttolaitoksissa	200

Direktiivissä on myös esitetty päästöjen raja-arvoille puolen tunnin keskiarvot. Raskasmetalli-, dioksiini ja furaanipäästöjä koskevat raja-arvoja jätteenpoltolle ovat esitetty kyseisiä päästöjä käsittelevissä luvuissa.

6 KOEPOLTTOLAITOKSEN KUVAUS

Tässä luvussa on tarkoitus käsitellä Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen käyttöön rakennetun tutkimuskuplapetikattilan normaalin käytön aikaista toimintaperiaatetta ja kertoa siihen kuuluvista apulaitteista. Energiatutkimuskeskuksen laitteistoihin kuuluvat myös arinakattila ja pyrolyysipoltin, joihin tässä luvussa ei ole tarkoitus perehtyä syvällisesti.

Tutkimuskuplapetikattila on suunniteltu energiatutkimuskeskuksen projektiryhmän ja Savonian opiskelijoiden opinnäytetöiden tuloksena. Tutkimuskuplapetikattila on teholtaan 250 - 300 kilowattia. Kuplapetikattilan perusidea pohjautuu aikaisemmin toimineeseen Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Imatran Voiman tutkimuslaitosten koepolttolaitokseen. Tutkimuskuplapetikattilan pääpolttoaineena on tarkoitus käyttää kierrätyspolttoainetta ja tukipolttoaineina pellettiä, haketta tai turvetta. (Juutilainen. 2015, 10 - 11)

Polttoaine syötetään kahdesta ulkona sijaitsevasta polttoainekontista kolakuljettimella tutkimuslaitoksen sisällä sijaitsevaan polttoaineen välisiiloon. Välisiilosta polttoainetta syötetään ruuvipurkainten ja sulkusyöttimen avulla tutkimuskuplapetikattilaan. Kuplapetikattilassa tapahtuvassa polttoaineen palamisessa muodostuneet lämpö ja savukaasut ohjataan kattilan takavetoon, jossa suunniteltu ilman esilämmitin sijaitsee. Polttoainejärjestelmän PI-kuva voidaan nähdä liitteen I kuvassa 3 ja vastaavasti tutkimuskuplakattilan PI-kuva liitteen I kuvassa 1. Tutkimuskuplapetikattilan rakenteesta kerrotaan tarkemmin luvussa 6.1 ja polttoainejärjestelmästä luvussa 6.5.

Tutkimuskuplapetikattila ei itsessään sisällä lämmöntalteenottoa, vaan lämmöntalteenotto tapahtuu erillisessä jätelämpökattilassa. Jätelämpökattila, eli lämmöntalteenottokattila, sijaitsee tutkimuskuplapetikattilan takavedon jälkeen ja sen tarkoituksena on siirtää tutkimuskuplapetikattilassa muodostunutta lämpöä omaan vesikiertoonsa mahdollisimman tehokkaasti. Jätelämpökattilasta kerrotaan tarkemmin luvussa 6.4.

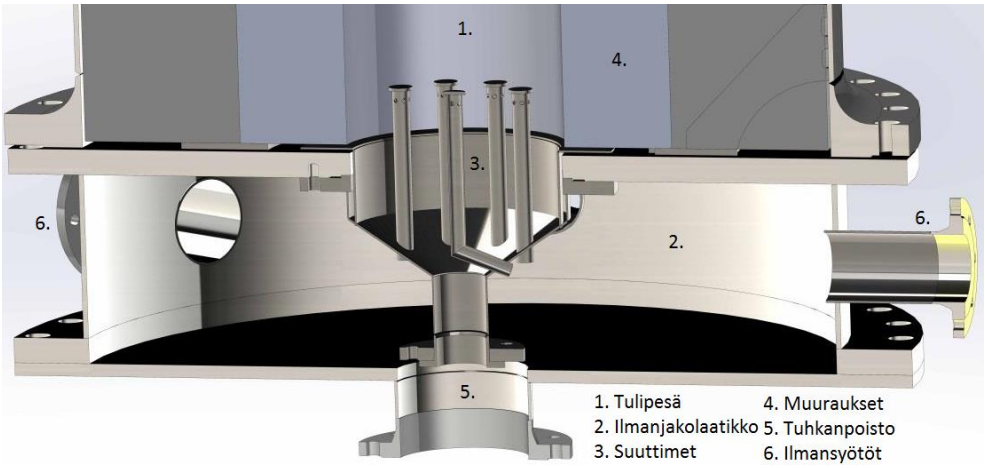
Jätelämpökattilan jälkeen savukaasut ovat viilenneet ja ne pystytään ohjaamaan savukaasujen puhdistuslaitteistoihin. Tutkimuslaitoksella savukaasuja puhdistetaan sähkö- ja hiukkassuodattimilla, sekä syklonilla joka sijaitsee heti takavedon jälkeen ennen lämmön-

talteenottokattilaa. Jätelämpökattila, savukaasukanava ja savukaasujen puhdistuslaitteistojen PI-kuva nähdään liitteen I kuvassa 2. Savukaasujen puhdistuslaitteistoista kerrotaan tarkemmin myöhemmin luvussa 6.6.

Puhdistetut savukaasut ohjataan seuraavaksi savukaasupuhaltimien kautta savupiippuun. Tutkimuslaitoksessa kuplapedissä tapahtuvaa palamista on mahdollista säätää myös kiertokaasun avulla. Kiertokaasu on sisältä vähän happea, jolloin se sopii oivallisesti palamisen säätöön. Kiertokaasua on tarkoitus ottaa savukaasupuhaltimen ja savupiipun välisestä kanavasta.

6.1 Kuplapetikattila

Kuplapetikattila katsotaan koostuvan ilmanjakolaatikosta, tulipesästä ja takavedosta. Kuplapetikattilaan toivotun hiekan leijutustilan saavuttamiseksi leijutukseen käytetty palamisilma eli primääri-ilma syötetään kuplapetikattilan alaosassa sijaitsevaan ilmanjakolaatikkoon. Ilmanjakolaatikosta primääri-ilma siirtyy hiekkapedin paksuuden määrittämällä paineella ilmasuutinten läpi tulipesän puolelle. Primääri-ilman tavoitteena on saada hiekkapeti leijumaan ja toimia hapenlähteenä palamiselle. Suuttimilla aikaansaadaan primääri-ilman tasainen jakaantuminen koko tulipesän alalle. Tutkimuskattilan ilmanjakolaatikko, suuttimet ja tulipesän alaosa nähdään kuvassa 6.1.



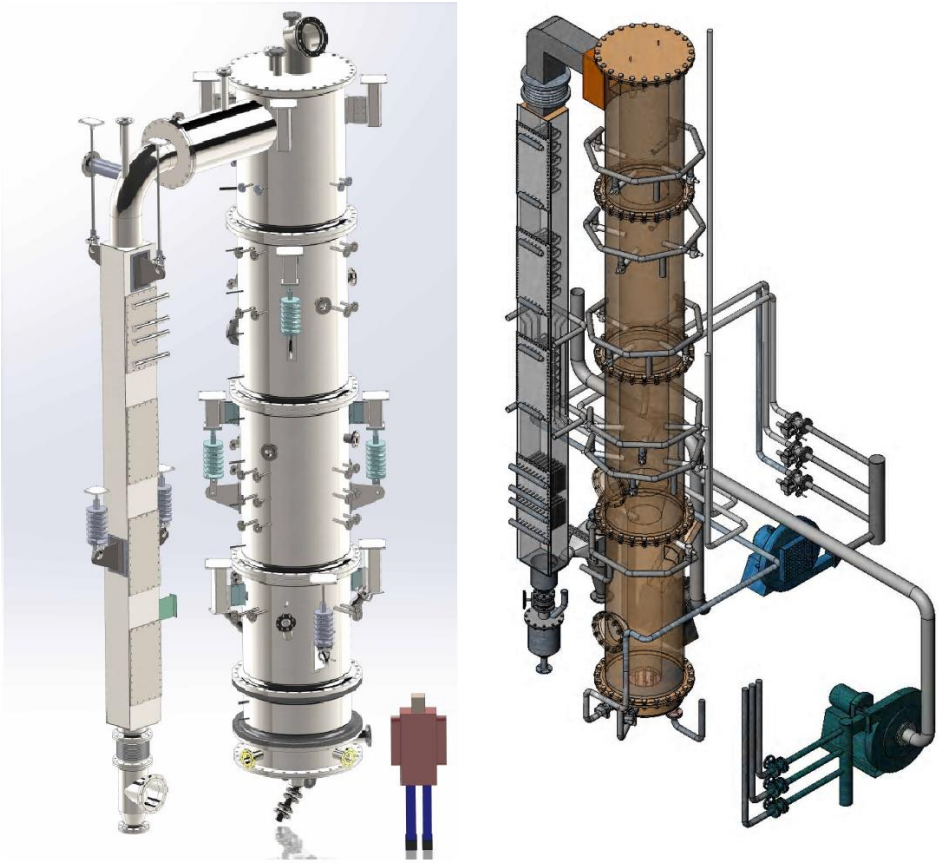
Kuva 6.1. Tutkimuskattilan ala-osan leikkauskuva (Muokattu lähteestä: Juutilainen. 2015, 33)

Tutkimuskuplapetikattilan tulipesä on rakenteeltaan sylinterin muotoinen. Tulipesän halkaisija on tulipesän alaosassa 350 millimetriä. Kahden metrin korkeudella tulipesän poikkipinta-alan halkaisija kasvaa loivasti 494 millimetriin. Kasvavalla sylinterin halkaisijalla

voidaan ehkäistä petimateriaalipartikkelien karkaamista savukaasuvirtaan. Hiekkapedin läpi puhalletun palamisilman nopeus hidastuu suuremman tulipesän halkaisijan alueella, jolloin myös karanneiden petimateriaalipartikkelien on hankalampi pysyä virtauksen mukana. Tulipesän korkeus suuremman tulipesän halkaisijan alueella on noin viisi metriä. Tulipesässä tapahtuneen palamisen seurauksena muodostuneet savukaasut ohjataan tulipesän yläosasta kattilan takavetoon.

Tulipesän muuraukset koostuvat kahdesta eri kerroksesta. Sisempi kerros on tulenkestävää muurausta ja ulompi kerros lämpöeristystä. Ilmanjakolaatikkoa tai takavetoa ei ole muurattu tulenkestävillä muurauksilla. Takavedon ympärille kuuluvat eristykset lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Takavedon eristyksiä ei kuitenkaan kirjoitushetkellä ole asennettu. Kuvasta 6.1 on syytä huomata, ettei ilmanjakolaatikkoon ole asennettu eristyksiä.

Tutkimuskuplapetikattilan takavedossa on varattu neljä paikkaa lämmönsiirtimille. Kirjoitushetkellä takavedon lämmönsiirrin paikoista yksi on varattu palamisilman esilämmittimelle. Kuvassa 6.2 vasemmalla voidaan nähdä energiatutkimuskeskuksen kuplapetikattilan 3D-malli, kuvassa oikealla vastaavasti nähdään Lappeenrannan teknillisen yliopiston Biower-hankkeessa toiminut kuplapetikattila.



Kuva 6.2. Savonian energiatutkimuskeskuksen ja LUT Biower -projektin tutkimusleijupetikattilat (Juutilainen. 2015, 11. Meuronen. 2006, 2)

6.2 Jätelämpökattila (Lämmöntalteenottokattila)

Varsinainen tutkimuskuplapetikattila ei sisällä lämmöntalteenottopintoja, jolloin palamisessa muodostunut lämpöenergia otetaan talteen erillisessä jätelämpökattilassa. Jätelämpökattilana tutkimuskeskuksella toimii 500 kW:n biokattila. Biokattila sisältää vesikierrolla varustettuja lämmönsiirtopintoja, joilla savukaasujen lämpöenergia otetaan talteen. Lämmöntalteenotto jätelämpökattilassa on myös tärkeää tutkimuskeskuksen savukaasukanavissa sijaitsevien apulaitteiden kannalta, sillä niiden lämpötilankesto ei ole riittävän suuri kestämään tulipesässä muodostuneiden savukaasujen lämpötilaa. Jätelämpökattilaa on myös muokattu pyrolyysiöljypoltinta varten.

Jätelämpökattilassa kerätty lämpöenergia siirretään pumppujen P-1021 ja P-1022 avulla 3 kuutiometrin lämminvesivaraajaan. Käytön aikana lämminvesivaraajan ylikuumenemista pystytään ehkäisemään siirtämällä lämpöenergiaa pois lämminvesivaraajasta radiaattorin tai maalämpöjärjestelmän avulla. Lämmön poistamiseen käytettävän radiaattorin

voi nähdä kuvassa 6.3 Lämmönsiirtopiirien, lämminvesivaraajan ja radiaattorin PI-kuva nähdään liitteen I kuvasta 4.

6.3 Pumput

Tutkimuskuplapetikattila ei itsessään sisällä lämmöntalteenottoa varten olevaa vesipiiriä, jolloin myöskään tutkimuskuplapetikattilaan ei kuulu pumppuja. Sen sijaan lämmöntalteenotto toteutetaan jätelämpökattilassa. Jätelämpökattilaan kuuluu yksi kiertovesipumppu laitetunnukseltaan P-1021. Jätelämpökattilan vedenkiertopiiriin siirtynyt lämpö siirretään lämmönsiirtimen avulla eteenpäin lämminvesivaraajan vesipiiriin, johon kuuluu kiertovesipumppu P-1022. Varaajasta lämpöä voidaan siirtää eteenpäin radiaattorille pumpun P-1007 avulla. Varaajasta poistettu lämpö siirretään lämmönsiirtimen avulla glykolipiiriin, jossa kiertävää glykolia kierrätetään pumpulla P-1009. Glykoliin siirtynyt lämpö hukataan radiaattorissa. Edellä kuvattujen vesi- ja glykolipiirien PI-kuva nähdään liitteen I kuvassa 4. Taulukossa 6.1 on esitetty pumppujen tehot (P), tilavuusvirrat (q_v), pyörimisnopeudet (n), nostokorkeudet (h), valmistajat ja mallit. Taulukkoon kerätyt tiedot ovat kerätty pumppujen tyyppikilvistä.

Taulukko 6.1. Tutkimuslaitokseen kuuluvien pumppujen oleellisimmat tiedot (Savonia)

Laitteen nimi	Laitetunnus	P [kW]	q_v [m^3/h]	H [m]	n [1/min]	Valmistaja	Malli
Jätelämpökattilan kiertovesipumppu	P-1021	1,1	20,1	10,4	1445	Grundfos	TP 50-130/4 A-F-A-BAQE
Lämminvesivaraajan kiertovesipumppu 1	P-1022	1,5	19,8	15	3000	Kolmeks	LS-50C/2
Lämminvesivaraajan kiertovesipumppu 2	P-1007	1,1	9	25,5	2850	Kolmeks	MVV10 - 30
Glykolipiirin kiertopumppu	P-1009	1,1	9	25,5	2850	Kolmeks	MVV10 - 30
Ammoniakkipumppu	P-8001	1,1	0,3	30	2832	Kolmeks	AE-32/2

Tutkimuskattilaan kuuluvan ammoniakkipumpun tarkoituksena on pumpata ammoniakkia kattilan tulipesään. Tulipesässä ammoniakki reagoi typenoksidien kanssa muodostaen typpi- ja vesimolekyylejä vähentäen näin typpioksidipäästöjä.

6.4 Puhaltimet

Tutkimuskuplapetikattilan apulaitteisiin kuuluvia puhaltimia ovat palamisilmapuhallin, kaksi kappaletta savukaasupuhaltimia, kiertokaasupuhallin, kaksi lämmitysilmapuhallinta ja hätäjäähdytyspuhallin. Kaikki puhaltimet ovat tyypiltään radiaali- eli keskipakopuhaltimia. Savukaasupuhaltimien P-3001 ja P-3002 ja kiertokaasupuhaltimen käyttöä tutkimusympäristössä rajoittaa savukaasujen lämpötila. Savukaasupuhaltimille ja kiertokaasupuhaltimelle suurin sallittu käyttölämpötila jatkuvassa toiminnassa on 300 celsiusastetta (Savonia). Kuplapetikattilassa muodostuneita savukaasuja voidaan viilentää jätelämpökattilassa. Palamisilmapuhaltimen P-2001 käyttölämpötilaväliksi on valmistaja ilmoittanut -20 - 40 celsiusastetta. Taulukossa 6.2 nähtävät oleellisimmat tiedot puhaltimille ovat kerätty puhaltimien tyyppikilvistä.

Taulukko 6.2. Tutkimuslaitokseen kuuluvien puhaltimien oleellisimmat tiedot (Savonia)

Laitteen nimi	Laitetunnus	P [kW]	q_v [m^{3}n/h]	Δp [Pa]	n [1/min]	Valmistaja	Malli
Palamisilmapuhallin	P-2001	8,11	600	15024	5906	Ziehl-Abegg	PR189.217 GA.MR
Savukaasupuhaltimet 1 & 2	P-3001/2	4,38	600	8000	5076	Ziehl-Abegg	PR189.2G7 GB.MR
Kiertokaasupuhallin	P-3003	4	576	9950	5300	Dust Control Systems Oy	DCDS-08-J LG90 Z
Lämmitysilmapuhaltimet	X-2701/3	0,09	114	3700	2790	Leister	G56A2 ID
Hätäjäähdytys-ilmapuhallin	P-3004	1,1	2448	1309	2870	MZ Aspiratori	Type GF310/2

Taulukossa 6.2 mainittu lämmitysilmapuhaltimien teho tarkoittaa puhallintehoa tehoa. Lämmitysilmapuhaltimien lämmitysvastuksen teho on 11 kW.

6.5 Polttoainejärjestelmä

Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen koepolttolaitokseen kuuluva polttoaineen syöttöjärjestelmä koostuu kahdesta lähes identtisestä polttoainekontista, kolakuljettimesta, polttoaineen välisiilosta, sulkusyöttimestä ja pudotusputkesta. Polttoainejärjestelmän PI-kuva voidaan nähdä liitteen I kuvasta 3.

Polttoainetta varastoidaan ensisijaisesti kahteen ulkona sijaitsevaan polttoainekonttiin. Polttoainekontit ovat alkuperältään merikontteja, jotka ovat siten muokattu tutkimuslaitoksen tarpeisiin sopiviksi. Muokkauksessa merikonttien pohjaan valettiin betonipohja, jonka sisälle valun yhteydessä asennettiin lämmitysputkistot. Polttoaine puretaan konteista pohjalla olevien tankopurkainten avulla. Polttoaineiden sekoittamista ja koostumuksen tasoittamista varten polttoainekontit on varustettu repijärullilla. Polttoainekontit ovat yhteistilavuudeltaan 26 m^3. Polttoainekonteista toista on tarkoitus käyttää hankalien ja hyvin heterogeenisten kierrätyspolttoaineiden varastointiin. Toista konttia käytetään tukipolttoaineiden varastointia varten. Tukipolttoaineilla pystytään parantamaan hankalien polttoaineiden palamista tutkimuskuplapetikattilassa. (Juutilainen 2015, 51 - 52)

Polttoainetta puretaan polttoainekonteista muokkauksen yhteydessä asennettujen tankopurkainten avulla kolakuljettimelle. Kolakuljetin nostaa syötetyn polttoaineen rakennuksen sisälle ja lopulta pudottaa polttoaineen kolakuljettimen pudotuspäästä polttoaineen välisiiloon. Polttoaineen välisiilo on varustettu sekoitinrullalla ja kahdella ruuvipurkaimella. Sekoitinrullan tarkoitus on sekoittaa polttoainekonteista tullut polttoaineseos mahdollisimman homogeeniseksi seokseksi. Välisiilon pohjalla on kaksi purkausruuvia, jotka siirtävät polttoainetta eteenpäin ja lopulta tiputtavat polttoaineen sulkusyöttimelle. Välisiilo on asennettu roikkumaan tukirakenteista polttoaineen punnitsemista varten. Välisiilon punnituksessa voidaan välisiilon massa taarata pois, jolloin välisiilossa oleva polttoaineen määrää tai polttoaineen kulumista voidaan havainnoida.

Polttoaine tippuu painovoiman vaikutuksesta välisiilosta sulkusyöttimelle. Sulkusyötin toimii eräänlaisena porttina polttoainelinjan ja palamistilan välillä. Sulkusyötin estää savukaasujen tai palamisen pääsemisen kulkemaan polttoainelinjaston suuntaan. Sulkusyöttimen tuottama maksimitilavuusvirta on valmistajan mukaan 6 m^3/h. Sulkusyötin pudottaa polttoaineen pudotusputkeen, josta polttoaine gravitaation vaikutuksesta tippuu aina tulipesään asti. Pudotusputkeen on tehty liitännät paineilman, kiertokaasun ja palamisilman syöttöä varten. Paineilman syötöllä voidaan pudotusputkea puhdistaa mahdollisten tukosten tai polttoainejäämien varalta. Paineilman syötöllä voi olla kuitenkin vaikutuksia tulipesän palamisolosuhteisiin, jolloin hankalan polttoaineen syöttöä tulipesään voidaan helpottaa kiertokaasun tai palamisilman avulla. Kiertokaasun happipitoisuus on

hyvin vähäinen, jolloin sen käyttö on suotuisaa palamisen ehkäisemiseksi polttoaineen pudotusputkessa. Kiertokaasulla voidaan polttoainetta myös esilämmittää hieman.

6.6 Savukaasujen puhdistuslaitteistot

Energiatutkimuskeskuksen tutkimuslaitteistoon kuuluu myös savukaasujen puhdistuslaitteistoja. Energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilan savukaasuja voidaan puhdistaa kolmella eri savukaasujen puhdistuslaitteistolla. Savukaasuvirran suuntaisesti ensimmäinen savukaasujen puhdistuslaitteisto on sykloni, keskimmäisenä sähkösuodatin ja viimeisenä letkusuodatin. Savukaasulinjassa sähkösuodatin ja letkusuodatin ovat ohitettavissa. Energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilalle ei kuitenkaan ole olemassa varsinaisia päästörajoja, vaikka laitos voidaankin nähdä jätteenpolttolaitoksena tai jätteen rinnakkaispolttolaitoksena. Teollisuuden päästöjä koskevassa Euroopan komission ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU jätteenpolttolaitoksia ja jätteen rinnakkaispolttolaitoksia koskevan luvun IV 42 artiklan toisen kohdan b alakohdan mukaan direktiiviä ei sovelleta tutkimus-, kehitys- ja testaustarkoitukseen käytettävissä koepolttolaitoksissa, joissa jätettä käsitellään alle 50 tonnia vuodessa. Tällöin tutkimuskuplapetikattila ei myöskään tarvitse jätteenpolttolaitoksille tyypillistä lisäpoltinta, jota on käsitelty direktiivin 50 artiklan kohdissa 2 ja 3. Lisäpolttimen tarkoituksena on pitää syntyneen savukaasun lämpötila 850 tai 1100 celsiusasteessa, riippuen halogenoitujen orgaanisten yhdisteiden pitoisuudesta, kahden sekunnin ajan epäedullisimmissakin olosuhteissa. Myöskään Euroopan komission ja neuvoston laatima keskikuurista polttolaitoksista ilmaan joutuvien epäpuhtauspäästöjen rajoittamista koskeva direktiivi 2015/2193/EU ei koske energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilaa, koska toisen artiklan neljännen kohdan mukaan direktiiviä ei sovelleta tutkimukseen, kehittämiseen tai testaukseen liittyviin polttolaitoksiin.

6.6.1 Sykloni

Sykloni on sijoitettu tutkimuskuplapetikattilan takavedon loppupäähän ennen lämmöntalteenottoa jätelämpökattilassa. Syklonissa savukaasut saatetaan pyörivään liikkeeseen, jolloin keskipakoisvoima ja hitausvoimat ohjaavat savukaasuvirtauksen sisältämät hiukkaset syklonin ulkoreunalle, jossa hiukkaset törmäävät syklonin seinämiin ja putoavat

syklonin pohjalle. Puhdistettu savukaasuvirta jatkaa matkaansa eteenpäin savukaasulinjassa syklonin keskellä olevaa nousuputkea pitkin. Syklonin erotusaste on sitä suurempi, mitä suurempi partikkelin aerodynaaminen halkaisija on. Syklonin erotusaste 10 µm:n hiukkasille on tavallisesti noin 90 % (Ohlström *et al*. 2005. 18)

Energiatutkimuskeskukseen kuuluvan syklonin valmistaja on Dust Control Systems Oy ja se on malliltaan DCEKA-63. Sykloni kestää 1100 celsiusasteen lämpötilan ja se on mitoitettu vastaamaan 600 m^3n/h:n savukaasuvirtaa. Leijupetihiekan analyysin perusteella valmistaja on määrittänyt syklonin erotusasteeksi 80 %. (Savonia)

6.6.2 Sähkösuodatin

Sähkösuodatin on voimalaitoksissa yleisin kiinteiden hiukkasten erottamiseen käytetty laite. Sähkösuodattimen etuina ovat pieni painehäviö ja kohtalainen erotusaste myös pienille hiukkasille. Sähkösuodattimet ovat kuitenkin hinnaltaan selvästi korkeampia, sekä niiden tarvitsema tila on myös suuri. Sähkösuodattimeen tulevat savukaasut ohjataan aluksi reikälevyn lävitse, jonka tarkoituksena on jakaa savukaasuvirta tasaisesti koko sähkösuodattimen alueelle. Reikälevyssä savukaasuvirran sisältämät hiukkaset varataan koronavaraajalla. Varatut hiukkaset kerääntyvät sähkösuodattimen sisällä oleviin vastakkaisella varauksella varattujen keräinlevyjen pinnoille. Määrätyin väliajoin keräinlevyt puhdistetaan ravistinvasaroille, jolloin keräinlevyjen pinnoille kertyneet hiukkaset putoavat sähkösuodattimen pohjalla sijaitseviin pohjasiiloihin. Uusista sähkösuodattimista karkaavat päästöt jäävät 15 – 50 mg/m^3n:n välille. Tällöin sähkösuodattimen erotusaste voi olla yli 99,9 % (Ohlström *et al*. 2005. 20 - 21)

Energiatutkimuskeskukseen kuuluvan sähkösuodattimen on valmistanut ECP Group Oy. Sähkösuodatin on mitoitettu vastaamaan 600 m^3n/h:n savukaasuvirtaa ja sen suunnittelukäyttölämpötila on enintään 250 celsiusastetta. Kiinteiden partikkelien pitoisuus ennen sähkösuodatinta on mitoitusvaiheessa ilmoitettu olevan 4 g/m^3n, jolloin sähkösuodattimen valmistaja takaa sähkösuodattimen jälkeisen savukaasuvirtauksen sisältämän kiinteiden hiukkasten pitoisuudeksi maksimissaan 50 mg/m^3n. Sähkösuodatin sijaitsee energiatutkimuskeskuksen pihalla ja on savukaasujen puhdistusjärjestelmässä savukaasun virtaussuunnasta katsottuna keskimmäisenä. Sähkösuodatin on myös mahdollista ohittaa,

mikäli sitä ei haluta tai pystytä käyttämään. (Savonia) Kuvassa 6.3 nähdään energiatutkimuskeskukseen kuuluva sähkösuodatin kuvan oikeassa reunassa.

Kuva 6.3. Energiatutkimuskeskuksen savukaasujen puhdistuslaitteistoja

Kuvassa 6.3 keskellä ja alhaalla voidaan nähdä myös energiatutkimuskeskuksen lämmönvesivaraajaan jäähdyttämiseen käytettävä radiaattori.

6.6.3 Letkusuodatin

Voimalaitoksiin kuuluvat letkusuodattimet ovat rakenteeltaan tyypillisesti kangassuodattimia. Suodatin on rakenteeltaan tyypillisesti pitkä ja ontto sylinteri, jonka sisälle savukaasuvirta ohjataan. Savukaasun virratessa kankaan läpi hiukkaset jäävät hiukkaset kiinni kankaan kuituihin hitausvoiman, pidätyksen ja diffuusion seurauksena. Suurien voimalaitosten suodatinkokonaisuuksissa halkaisijaltaan 12 - 40 cm ja korkeudeltaan 3 - 10 metriä olevia letkuja voi olla jopa tuhansia. Letkusuodattimien ongelmina ovat savukaasujen tarttuvat partikkelit, kankaiden kuluminen, käytön aikana kasvavat painehäviöt ja runsas huollon tarve. Puolestaan kuitusuodattimien erotusaste voi olla yli 99,9 % kaikille partikkelikoille. Vastaava erotusaste tarkoittaa hiukkaspäästöinä 5 - 25 mg/m^{3}n:n päästöä. (Ohlström *et al*. 2005. 24 - 25) Suodatinletkujen likaannuttua, voidaan niitä puhdistaa paineilmahuuhtelulla.

Energiatutkimuskeskukseen kuuluvan Jettex 25-5-1”-mallisen letkusuodattimen on valmistanut Industri-Textil Job Oy. Letkusuodattimeen kuuluu suodatinletkuja yhteensä 25 kappaletta. Suodatinletkujen pituus on 1830 mm ja niiden halkaisija on 152 mm, sekä savukaasujen maksimilämpötila letkusuodattimelle tullessa on 250 celsiusastetta. Kiinteiden partikkelien pitoisuus ennen letkusuodatinta on mitoitusvaiheessa ilmoitettu olevan 1 - 5 g/m^{3}n, jolloin sähkösuodattimen valmistaja takaa sähkösuodattimen jälkeisen savukaasuvirtauksen sisältämän kiinteiden hiukkasten pitoisuuden olevan alle 10 mg/m^{3}n:ia, mikäli palamisprosessi on kunnossa. Letkusuodatin on energiatutkimuskeskuksen savukaasujenpuhdistuslaitteistoista viimeisin. Letkusuodatin voidaan nähdä kuvassa 6.3. vasemmassa reunassa. Myös letkusuodatin on mahdollista ohittaa. (Savonia)

6.7 Materiaalintestauskammio

Energiatutkimuskeskuksen materiaalintestauskammio on rakennettu tutkimusapuvälineeksi tutkimaan tutkimuskuplapetikattilassa tai jätelämpökattilassa muodostuneiden savukaasujen vaikutuksia eri materiaaleille. Materiaalintestauskammio on DN300 kokoluokan teräsputkea, johon liittyy lukuisia yhteitä prosessin eri vaiheista. Materiaalintestauskammioon voidaan savukaasuja ohjata suoraan takavedosta ennen ilman esilämmitintä, esilämmittimen jälkeen ennen jätelämpökattilaa, jätelämpökattilan ensimmäisen, toisen tai kolmannen vedon jälkeen, sekä savukaasukanavasta savukaasupuhaltimien jälkeisestä tilasta. Lukuisat yhteet materiaalintestauskammiossa mahdollistavat materiaalien testauksen useassa eri lämpötilatasossa.

Materiaalintestauskammiossa on mahdollista tutkia kuumakorroosion vaikutusta materiaaleille eri lämpötiloissa. Myös kierrätyspolttoaineen, pyrolyysiöljyn, hakkeen, turpeen, pelletin tai polttoainesekoituksien korroosiotutkimus on mahdollista. Savukaasun lämpötilaa voidaan säätää 200 - 900 celsiusasteen välillä. (Juutilainen 2015, 47)

7 TUTKIMUSKATTILAN YLÖS- JA ALASAJO

Tässä luvussa on tarkoitus perehtyä tutkimuskattilan ylös- ja alasajosuunnitelmaan. Ylös- ja alasajosuunnitelmien alkuperäiset versiot perustuivat tutkimuskattilan ja siihen kuuluvien apulaitteiden teoreettiseen tarkasteluun. Suunniteltujen pohjien huomattiin kuitenkin sisältävän paljon käytännön ongelmakohtia, jolloin alkuperäistä versiota ei voitu käyttää sellaisenaan. Esitetyt ylös- ja alasajosuunnitelmat perustuvat alkuperäisten teoreettisten versioiden ja käytännön kokeiden kautta todettujen hyvien ratkaisujen yhdistämiseen. Luvussa kerrotaan myös, mitkä asiat havaittiin käytännön kokeissa toimivan paremmin kuin alkuperäisessä teoreettisessa tarkastelussa suunniteltiin.

Luvussa käsitellään mitkä kaikki kuplapetikattilaan liittyvät apulaitteet, venttiilit tai pellit ovat käytössä, suljettuina tai avattuina kuplapetikattilan ylös- ja alasajon aikana. Luvussa mainitut venttiilit, pellit, mittaukset ja muut apulaitteet ovat nähtävissä liitteen I PI-kuvista.

7.1 Kattilan ylösajosuunnitelma

Tutkimuskuplapetikattilan ylösajo koostuu kattilan lämmityksestä ja varsinaisesta käynnistämisestä. Kuplapetikattilan kattilakeraamit ja petihiekka on tarkoitus lämmittää kahdella 11 kW:n kuumailmapuhaltimella. Alkuperäisen suunnitelman mukaan kattila oli tarkoitus lämmittää suljettuna, jolloin ensimmäiset savukaasupellit takavedon jälkeen pidetään kiinni. Menetelmä aiheuttaa paineen nousua tulipesässä, jonka nousua voidaan seurata PIC-7009.1/2 paineantureilla. Menetelmän etuna pidettiin vähäistä lämpöhäviötä savukaasukanavaan ja siten pienempiä lämpöhäviötä ulos järjestelmästä. Ongelmaksi menetelmässä kuitenkin huomattiin kuumailmapuhaltimien tuottaman kuuman ilman jämähtäminen tulipesän alla sijaitsevaan eristämättömään ilmanjakolaatikkoon. Suurin osa tuotetusta lämpöenergiasta johtui ilmanjakolaatikon metalliseinämän ja pohjan kautta kattilarakennukseen.

Ongelman syynä pidetään kuumailmapuhaltimien heikkoa puhallustehoa, jolloin puhaltimet eivät jaksaneet puhaltaa tulipesän ilmasuutinten läpi. Ongelma ratkaistiin avaamalla takavedon jälkeinen pelti savukaasukanavassa ja luomalla savukaasupuhaltimella P-3001 pieni alipaine tulipesään. Alipaineen luomisella tulipesän puolelle huomattiin olevan huomattava vaikutus kuuman ilman siirtymiseen ilmanjakolaatikosta tulipesän puolelle.

Tässä vaiheessa jätelämpökattila pidetään kuitenkin vielä ohituksella alipaineen tehostamiseksi.

Taulukkoon 7.1 on kerätty kuplapetikattilan lämmityksen kannalta merkittävät laitteet, venttiilit ja pellit, sekä niiden tila. Primääri-, sekundääri ja kiertokaasuventtiilit pidetään kiinni, vaikka linjastoissa ennen venttiilejä on asennettu takaiskuventtiilit. Venttiilien asennot on päätetty siten, että tarvittava työ tulipesän lämmitystä seuraavaan kattilan käynnistykseen ja käyttöön olisi mahdollisimman vähäinen. Taulukko 7.1 ei sisällä kaikkia tutkimuskeskukseen kuuluvia venttiilejä, peltejä tai apulaitteita. Muut tutkimuskeskuksen venttiilit, pellit ja laitteet pidetään kiinni ja avataan ylösajosuunnitelman myötä.

Taulukko 7.1.Lämmityksessä käytettävät venttiilit, pellit ja apulaitteet (Liite I, kuvat 1, 2 ja 3)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Primääri-ilmaventtiili	FV-2010	Kiinni
Sekundääri-ilmaventtiilit	FV-2012, FV-2014, FV-2016, FV-2018	Kiinni
Kiertokaasuventtiilit	FV-3015, FV-3017, FV-3019, FV-3021	Kiinni
Savukaasukanavassa pellit	HV-3041, HV-3080	Auki
Savukaasukanavassa pellit	HV-3039, HV-3072, V-3040, HV-3078, V-3090	Kiinni
Savukaasupuhallin	P-3001	Päällä
Kuumailmapuhaltimet	X-2701, X-2703	Päällä
Kuumailmapuhaltimien pellit	V-2609, V-2611	Auki
Savukaasujen puhdistuslaitteistojen pellit	HV-3068, HV-3069, HV-3070 ja HV-3071	Ohitukselle
Polttoainelinjan venttiilit	FV-2008, FV-3060 ja HS-4025	Kiinni
Polttoaineen sulkusyötin	C-4005	Kiinni
Sammutusvesijärjestelmän magneettiventtiili	HS-6007	Kiinni
Kalkki- ja hiekkasiiloilta sulkupellit	V-5509 ja V-5511	Kiinni
Kalkki- ja hiekkajärjestelmän paineilmaventtiilit	HS-6004 ja V-6509	Kiinni
Tuhkapelti	V-5505	Kiinni
Materiaalintestauskammio	V-3615	Kiinni

Lämmitys toteutetaan kahdella 11 kW:n kuumailmapuhaltimella. Kuplapetikattilan lämpötilan nousua voidaan seurata tulipesään asennetuista lämpötila-antureista. Kattilakeraamin lämpötilaa mittaavat lämpötila-anturi TIC-7002 on kalibroitu 200 - 1150 °C:n välille,

joka tarkoittaa sitä, että lämpötilan nousua 200 celsiusasteen alta ei pystytä suoraan mittaamaan. Muut tulipesän lämpötila-anturit on kalibroitu 400 - 1150 °C:n välille, lukuun ottamatta kattilan yläosassa sijaitsevaa TIC-7015 anturia, joka on kalibroitu 0 - 1150 °C:n välille. Lämpötilan nousun seuranta on oleellista, sillä liian nopea lämpötilan nousu voi vaurioittaa kattilakeraameja. Kattilakeramiikkojen maksimilämpenemisnopeus on valmistajan mukaan 75 °C /h (1,25 °C/min) (Savonia). Tulipesän muihin kuin keramiikan lämpötilaa mittaaviin lämpötilamittauksiin täytyy suhtautua varauksella, sillä ne ovat suunniteltu mittaamaan kaasutilan lämpötilaa, ei varsinaisen keramiikan lämpötilaa.

Alkuperäisen suunnitelman mukaan kattilakeraamien lämmitys aloitettaisiin hyvin alhaisella kuumailmapuhaltimien teholla. Käytännön kokeiden ja muurausten lämpötilaa mittaavan erillisen lämpötilamittauksen myötä todettiin, etteivät kuumailmapuhaltimet alhaisella teholla pysty tuottamaan merkittävää lämpötilan nousua kattilakeraameissa. Suuremmilla tehoilla kuumailmapuhaltimilla huomattiin ikävä taipumus ylikuumentua, koska puhaltimet eivät pystyneet alipaineesta huolimatta vieläkään tuottamaan tarpeeksi virtausta sähkövastusten viilentämiseksi. Kuumailmapuhaltimien maksimi puhalluslämpötila on 650 celsiusastetta. Käytännön kokeiden perusteella parhaaksi ratkaisuksi havaittiin savukaasupuhaltimien asettaminen ylläpitämään pientä alipainetta tulipesässä ja kuumailmapuhaltimet toimimaan 70 % teholla maksimitehostaan, joka vastaa 15,4 kW:n lämpötehoa.

Alkuperäisessä kattilan lämmitystä koskevassa suunnitelmassa kattilakeraamien lämmitys oletettiin valmiiksi, silloin kun kattilakeramiikan lämpötilaa mittaava TIC-7002 anturi näyttää lämmitysilmapuhaltimien puhaltaman ilman lämpötilaa. Käytännön kokeissa kuitenkin huomattiin, ettei ilmajakolaatikon lämpötila noussut lähellekään kuumailmapuhaltimien 650 celsiusasteen maksimilämpötilaa. Kuumailmapuhaltimia ajettaessa tilanteen sallimalla maksimiteholla ilmajakolaatikon lämpötila jäi alle 300 celsiusasteen. Ilmanjakolaatikon suuresta lämpöhäviöstä johtuvan alhaisen lämmitysilman lämpötilan perusteella pääteltiin, etteivät kuumailmapuhaltimet yksinään pysty lämmittämään kuplapetikattilaa riittävästi. Parhaaksi vaihtoehdoksi kattilan loppulämmityksen toteuttamiseksi nähdään helposti syttyvän polttoaineen polttaminen pienellä teholla suoraan suutinten päällä. Esitetty polttotapa edellyttää, että petihiekkaa ajetaan kattilaan siten, että ilma-

suuttimet peittyvät puhallusreikiin asti. Ilmasuutinten puhallusreiät voidaan nähdä kuvassa 6.1. aivan suutinputkien yläosassa. Näin ollen tutkimuskattilan käytön alkuvaiheessa tuhkanpoiston ensimmäiset poistot sisältävät ainoastaan petihiekkaa. Kyseinen ratkaisu myös yhdistää teoreettisen version lämmitys- ja käynnistysvaiheet yhdeksi jatkuvaksi vaiheeksi.

Helposti palavan polttoaineen käyttäminen lämmityksessä edellyttää jätelämpökattilan ja polttoainejärjestelmän käyttöönottoa. Sytytyksessä muodostuvat savukaasut ohjataan jätelämpökattilaan, jossa savukaasujen sisältämä lämpöenergia siirretään veteen, joka ohjataan lämmönsiirtimeen. Lämmönsiirtimessä lämpö siirtyy lämminvesivaraajan vesipiiriin. Lämminvesivarajaa kuumenee käytön aikana, jolloin sitä täytyy pystyä jäähdyttämään. Laitteistossa jäähdytys voidaan toteuttaa radiaattorin tai maalämpöpumpun avulla. Jätelämpökattilassa tapahtuvalla lämmöntalteenotolla ehkäistään liian kuuman savukaasun aiheuttamat vauriot savukaasujen puhdistuslaitteistoille ja savukaasupuhaltimille. Radiaattoria käytettäessä asetetaan liitteen I kuvassa 4 nähtävät venttiilit ja pumput taulukon 7.2 mukaisesti.

Taulukko 7.2.Jätelämpökattilan vesipiiri (Liite I, kuva 4)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Kattilavesi	V-1203, V-1207, V-1209, V-1211, V-1213, V-1215, V-1024	Auki
Lämminvesivaraajan 1. kiertopiiri	V-1251, V-1255, V-1257, V-1259, V-1261, V-1263, V-1030, V-1102, V-1104	Auki
Lämminvesivaraajan 2. kiertopiiri	V-1305, TV-1018, V-1151, V-1161, V-1153, V-1157, V-1159, V-1307	Auki
Glykolipiiri	V-1101, TV-1015, V-1106, V-1105, V-1107, V-1109, V-1111, V-1113	Auki
Kattilavesi	P-1021	Käyntiin
Lämminvesivaraajan 1. kiertopiiri	P-1022	Käyntiin
Lämminvesivaraajan 2. kiertopiiri	P-1007	Käyntiin
Glykolipiiri	P-1009	Käyntiin
Lämminvesivaraaja	V-1264, V-1262, V-1260, V-1265	Kiinni

Kun jätelämpökattila vesikierto on saatu päälle, voidaan savukaasut ohjata jätelämpökattilaan. Avataan savukaasukanavan peltejä siten, että kattilan kaasujen virtaus kulkee jätelämpökattilan läpi ja ohittaa savukaasujen puhdistuslaitteistot. Säädetään savukaasukanavan peltejä taulukon 7.3 mukaisesti.

Taulukko 7.3. Savukaasukanavan pellit (Liite I, kuva 2)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Savukaasukanavassa pellit	HV-3039, HV-3076, V-3040, HV-3080	Auki
Savukaasukanavassa pellit	HV-3041, HV-3038, HV-3529, HV-3078, HV-3072	Kiinni
Savukaasukanavassa pellit	HV-3068, HV-3069, HV-3070, HV-3071	Ohitukselle

Jätelämpökattilan käyttöönoton jälkeen voidaan polttoaineen syöttö tulipesään aloittaa. Polttoaineen syttymislämpötilaa ja tulipesään syötettävän polttoaineen määrää perehdytään tarkemmin seuraavassa luvussa. Polttoainetta syötetään ainoastaan lämmitysilmapuhaltimien tuottaman palamisilmamäärän verran. Taulukossa 7.4. nähdään tehtävät toimenpiteet.

Taulukko 7.4. Polttoaineen syöttö (Liite I, kuva 3)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Sulkusyötin	C-4005	Käyntiin
Ruuvipurkain	C-8009	Käyntiin

Kun polttoaineen palaminen tulipesässä on saatu jatkuvaksi ja tulipesän alimpiin keraameihin lämpöä riittävästi varatuksi, voidaan aloittaa siirtymävaihe kuumailmapuhaltimilta varsinaiselle primääri-ilmalle. Tässä vaiheessa palamisen seuranta tutkimuskattilan näkölaseista ja mittauksista on tärkeää, sillä tulipesässä tapahtuva palaminen on vielä herkkä sammumaan johtuen vähäisestä lämpöä varaavan petimateriaalin määrästä. Siirtymävaihe aloitetaan sammuttamalla kuumailmapuhaltimien lämmitysvastukset, kuitenkin jättäen puhaltimet päälle. Näin varmistetaan kuumailmapuhaltimien kuumien lämmitysvastusten viilentyminen ja ehkäistään mahdolliset vauriot ylikuumentumisesta. Palamista ylläpidetään vielä kuumailmapuhaltimien avulla käytännön kokemuksiin perustuvan ajan verran. Siirtyminen primääri-ilmalle toteutetaan asettamalla primääri-ilmapuhallin ylläpitämään kuumailmapuhaltimien ilmantuottoa suurempi ilmamäärä. Näin mahdollistetaan haluttaessa suurempi polttoaineen syöttö tulipesään. Primääri-ilmaventtiilin

avaamisen ja primääri-ilmapuhaltimen käyttöönoton jälkeen voidaan kuumailmapuhaltimet pikaisesti pysäyttää ja sulkea kuumailmapuhaltimet eristävät pellit. Taulukossa 7.5 nähdään suoritettavat toimenpiteet.

Taulukko 7.5. Primääri-ilmavaihdoksen oleelliset laitteet (Liite I, kuva 1)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Primääri-ilmaventtiili	FV-2010	Auki
Primääri-ilmapuhallin	P-2001	Päälle
Kuumailmapuhaltimet	X-2701, X-2703	Pysäytys
Kuumailmapuhaltimien pellit	V-2609, V-2611	Kiinni

Mikäli palaminen on saatu pysymään yllä primääri-ilmavaihdoksen ajan, voidaan petimateriaalin lisääminen tulipesään aloittaa. Petihiekkaa annostellaan tutkimuskattilan hiekkasiilosta. Alkuun puhaltimen tuottama paine-ero on huomattavasti suurempi kuin ensimmäisten petihiekkalisäysten kuplimiseen tarvittava paine-ero. Hiekkamäärän ollessa alkutilanteessa vähäistä hiekan pöllyäminen tulipesässä on myös suurta. Petihiekkaa annostellaan rauhallisesti palamisen ylläpitämisen varmistamiseksi niin kauan, kunnes tulipesän näkölasista ja mittauksista saatujen havaintojen perusteella hiekkapeti on saatu kuplivaksi. Mikäli hiekkapedin kuplintaa ei näytä tapahtuvan, voidaan palamisilmapuhaltimen säädöllä vaikuttaa pedin yli muodostuvaan paine-eroon. Tarkemmin petimateriaalin lisäämistä tarkastellaan seuraavan luvun pedin paine-eroa käsittelevässä kohdassa.

Polttoainevirtaa voidaan lisätä niin kauan, kunnes haluttuun polttoainetehoon on päästy (esim. 200 kW). Polttoainetehoa voidaan seurata polttoainesiilon massavähenemästä. Kirjoitushetkellä tutkimuskattilan takaveto on vielä eristämättä, jolloin lämpötehoa ei voida luotettavasti määrittää jätelämpökattilan lämmönsiirron myötä. Polttoainelisäyksen tarvitsema lisääntynyt ilmantarve tuodaan sekundääri-ilmalla, mikäli palamisilman tarvetta ei voida kattaa primääri-ilmalla. Sekundääri-ilman käyttöä tarkastellaan seuraavan luvun sekundääri-ilmaa käsittelevässä luvussa. Kattilan käynnistyksen lopuksi kiertokaasun jakotukki voidaan paineistaa. Paineistaminen on tarkoitus toteuttaa kiertokaasu puhaltimen P-3003 PID-säädöllä (Proportional-Integral-Derivative-säädin). PID-säädössä jakotukin halutuksi asetetaan haluttu paine, jolloin PID-säätö ohjaa kiertokaasupuhallinta ylläpitämään asetetun paineen kiertokaasun jakotukissa.

Tutkimuskattilaan kuuluvan sähkösuodattimen eristin- ja pohjasuppilolämmitysvastukset tulee valmistajan mukaan kytkeä päälle vähintään 24 tuntia ennen käyttöä. Kyseinen aika tulee huomioida ennen sähkösuodattimen ottamista käyttöön.

7.2 Kattilan alasajosuunnitelma

Kattilan alasajon ensimmäinen vaihe on polttoainesyötön pysäyttäminen. Polttoaineen syöttö tulipesään estetään pysäyttämällä polttoainevälisiilon ruuvipurkain C-8009. Ruuvipurkaimen pysäyttämisen jälkeen sulkusyötin C-4005 voidaan pysäyttää pienellä viiveellä (esim. 5 minuuttia). Vaihtoehtoisesti polttoainesiilo voidaan ajaa tyhjäksi. Siilon tyhjentymiseen kuluva aika riippuu suuresti polttoaineesta ja polttoaineen määrästä. Polttoaineensyötön loputtua voidaan sulkea myös mahdollisesti auki olevat polttoaineen syötön avustukseen käytettävät polttoaineensyöttöputken palamisilma- ja kiertokaasuventtiilit. Tehtävät toimenpiteet nähdään taulukossa 7.6.

Taulukko 7.6. Polttoainejärjestelmän pysäytys (Liite I, kuvat 1 ja 3)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Ruuvipurkain	C-8009	Pysäytetään
Sulkusyötin	C-4005	Pysäytetään
Polttoaineen-syöttöputki	FV-2008, FV-3060	Kiinni
Polttoaineen-syöttöputki	HS-4025	Syöttöputken puhdistus

Ruuvipurkaimen ja sulkusyöttimen pysähdyttyä kattilaan tulevan polttoaineen massavirta tyrehtyy. Kun palava polttoaine loppuu, loppuu samalla myös tulipesässä tapahtuva lämmön ja savukaasujen muodostuminen. Tutkimuskattilaa huuhdellaan palamisilmalla sopivan ajan verran loppuun palamisen varmistamiseksi. Huuhtelun aikana on myös hyvä aika ottaa savukaasujen puhdistuslaitteistot pois käytöstä ja asettaa ohitukselle. Ohitusten jälkeen savukaasujen puhdistuslaitteistot voidaan kytkeä myös pois päältä. Savukaasujen puhdistuslaitteistoon tehtävät tarvittavat toimenpiteet voidaan nähdä taulukosta 7.7.

Taulukko 7.7. Savukaasujen puhdistusjärjestelmien ohitus (Liite I, kuva 2)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Savukaasukanava	HV-3068, HV-3069, HV-3070, HV-3071	Ohitukselle
Savukaasujen puhdistuslaitteistot	Sähkösuodatin, pussisuodatin	Pois päältä

Huuhtelun jälkeen palamisilmapuhallin P-2001 ja kiertokaasupuhallin P-3003 voidaan pysäyttää samanaikaisesti. Palamisilma- ja kiertokaasuventtiilien ollessa auki saadaan palamisilman ja kiertokaasun paine jakotukeissa putoamaan. Paineen pudottua jakotukeissa ympäristön paineen tasolle voidaan myös palamisilma- ja kiertokaasuventtiilit sulkea.

Taulukko 7.8. Palamisilma- ja kiertokaasujärjestelmien pysäytys (Liite I, kuvat 1 ja 2)

Sijainti	Laitetunnus	Tila
Palamisilmapuhallin	P-2001	Pysäytetään
Kiertokaasupuhallin	P-3003	Pysäytetään
Kiertokaasupuhallin	V-3523	Kiinni
Palamisilmaventtiilit	FV-2010, FV-2012, FV-2014, FV-2016, FV-2018	Kiinni
Kiertokaasuventtilit	FV-3015, FV-3017, FV-3019, FV-3021, FV-3023	Kiinni

Palamisilma- ja kiertokaasupuhaltimien pysähtymisen jälkeen kaasuvirrat laitteistossa vähenevät merkittävästi. Vähäisempien savukaasuvirtausten myötä myös jätelämpökattila voidaan tässä vaiheessa asettaa ohitukselle ja pysäyttää. Palamisilma- ja kiertokaasupuhaltimien pysähdyttyä savukaasupuhallin pitää yllä pientä alipainetta tutkimuskattilassa. Savukaasupuhaltimella on tarkoitus puhaltaa järjestelmästä ulos vielä jäljelle jääneet savukaasut. Savukaasupuhallin pysäytetään, kun viimeisetkin savukaasut ovat poistuneet järjestelmästä.

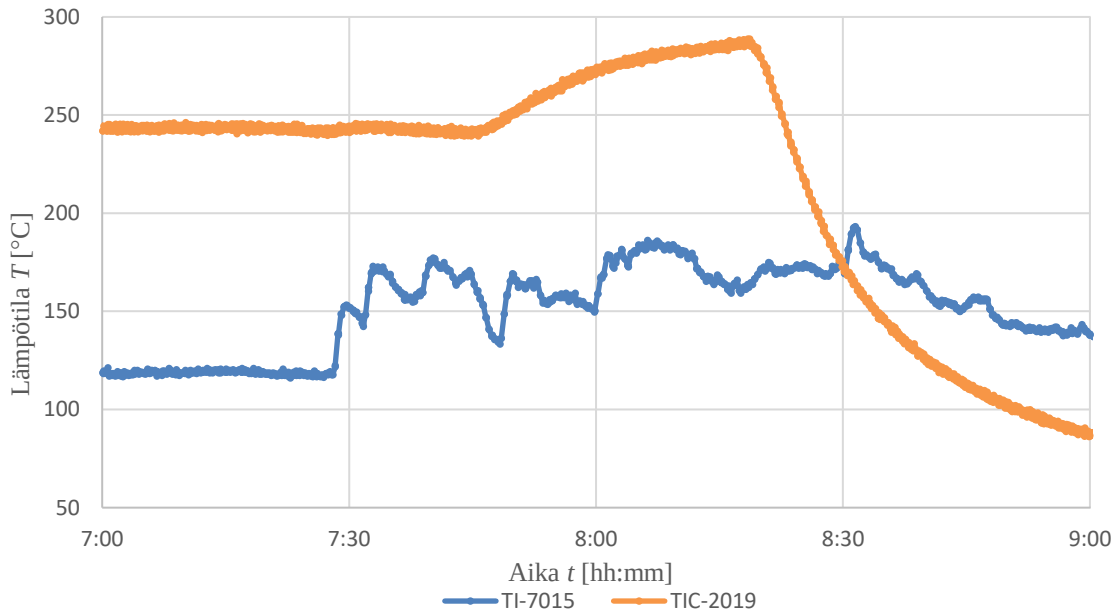
Savukaasukanava jätetään savukaasupuhaltimen pysähdyttyä auki. Kattilakeramiikat ovat tässä kohtaa vielä kuumat, jolloin niiden jäähtymistä tulee tarkkailla vaurioiden ehkäisemiseksi. Kattilakeramiikkojen maksimi jäähtymisnopeus on 1,25 °C/min eli 75 °C/h. Jäähtyminen 1000 celsiusasteesta 100 celsiusasteeseen kestää tällöin maksimi jäähtymisnopeudella 13 tuntia. Kattilakeraamien jäähtymistä tarkastellaan käytännön mittauksiin perustuen seuraavan luvun kattilakeraamien jäähtymistä käsittelevässä luvussa.

8 KOEAJOT JA TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa on tarkoitus käsitellä tutkimuskattilan koeajoissa kerättyä tietoa ja tarkastella miten kerättyä tietoa voidaan käyttää hyväksi tulevissa ajoissa. Tutkimusdatan perusteella on luvussa osoitettu myös ongelmakohtia, joita voidaan rinnastaa myös muihinkin pienen kokoluokan polttolaitoksiin. Työn aikana tutkimuskattilalla on toteutettu petimateriaalin leijutuskokeita ja ajettu kaksi varsinaista lämmitys- ja polttokoetta.

8.1 Kattilan syttyminen

Kattilan sytytys on tutkimuslaitoksessa tehdyissä kokeissa toteutettu käyttämällä pellettiä polttoaineena. Ennen varsinaista sytyttämistä tutkimuskattilaa on lämmitetty yön yli kahdella kuumailmapuhaltimella 15,4 kW:n teholla. Kuvassa 8.1 nähdään tilanne syttymishetkellä kahden kattilan lämpötilamittauksen avulla. Kuvassa oranssilla nähdään ilmanjakolaatikon lämpötilamittaus TIC-2019, joka on yön yli kestäneessä lämmityksessä tasaantunut hieman alle 250 celsiusasteen lämpötilaan. Kuvassa sinisellä nähdään tutkimuskattilan tulipesän ylimmällä tasolla oleva kaasutilan lämpötilamittaus TI-7015. Ylimmän tason lämpötilamittaus on kuvan perusteella tasaantunut yön yli kestäneessä lämmityksessä noin 125 celsiusasteeseen. Ylintä lämpötilamittausta käytetään suotuisan kalibrointivälin takia.



Kuva 8.1. Tutkimuskattilan syttymishetkeä kuvaavat lämpötilat.

Tulipesän sytytys toteutetaan lisäämällä polttoainetta suoraan primääri-ilmasuutinten päälle. Kattilan sytytys aloitettiin hieman ennen puoli kahdeksaa, jolloin kuvassa 8.1 nähdään piikki TI-7015 lämpötilan noususssa. Primääri-ilmasuuttimista tulevan ilman lämpötila on kuitenkin oltava ilmanjakolaatikon lämpötilamittausta huomattavasti suurempi, sillä aikaisemmin esitetyn kuvan 3.1 mukaan biomassan haihtuvien yhdisteinen syttyminen tapahtuu vasta hieman alle 500 celsiusasteen.

Lämpötilamittauksessa TI-7015 nähtävä vaihtelu johtuu polttoaineen syötössä käytetystä syklityksestä, johon perehdytään tämän luvun kohdassa 8.2 Pian syttymisen jälkeen myös ilmanjakolaatikon lämpötilamittauksessa TIC-2019 nähdään tasaista nousua. Tasainen lämpötilan nousu johtuu todennäköisesti lämmön johtumisesta tulipesästä ilmanjakolaatikkoon. Käynnistyssuunnitelman mukaisesti kuumailmapuhaltimien lämmitysvastukset on ohjattu pois päältä pian syttymisen jälkeen. Kuvassa 8.1 tämä näkyy nopeana lämpötilan laskuna TIC-2019 mittauksessa. Tässä tilanteessa polttoaineen palaminen on vaarassa pysähtyä, jos polttoaineen palamiseen tarvittavaa lämpöä ei ole tarpeeksi.

8.2 Polttoaineen annostelu

Polttoaineen annostelu tulipesään huomattiin jo alkuvaiheen tarkastelussa ongelmalliseksi johtuen polttoainesiilon purkuruuvin ja sulkusyöttimen ylimitoituksesta. Polttoainejärjestelmällä tehtyjen pelletin pudotuskokeiden perusteella huomattiin, että polttoaineen annostelun säädössä käytettävä ruuvipurkain annostelee pienimmilläkin pyörimisnopeuksilla liikaa polttoainetta kattilaan. Ruuvipurkaimella huomattiin myös ikävä taipumus annostella suurempia annoksia polttoainetta riippuen ruuvin asennosta. Tutkimuslaitoksella käytetystä pelletistä ei teetetty alkuaineanalyysia, jolloin käytetyn pelletin alkuaineanalyysiä approksimoidaan Phyllis2-tietokannasta kerätyn 44 pellettinäytteiden keskiarvon perusteella. Liitteen II taulukoissa 1 ja 2 on esitetty Phyllis2-tietokannasta kerätyt pellettinäytteiden aineominaisuudet, joiden perusteella on laskettu pelletin tehollinen lämpöarvo saapumistilassa.

Yhtälöissä 8.1 ja 8.2 on laskettu suurin pelletin massavirta tulipesään tapauksessa, jossa kuumailmapuhaltimet tuottavat tarvittavan palamisilman. Lämmityspuhaltimet tuottavat valmistajan mukaan lämmitysilmaa yhteensä 114 m^3n/h. Yhtälössä 8.1 nähtävä molaarinen palamisilmantarve on laskettu liitteessä II nähtävän taulukon 3 palamistaulukossa.

Laskettu palamisilmantarve tarkoittaa palamisilmakertoimella 1,2 tarvittavaa palamisilmantarvetta. Alla olevan laskun perusteella selviää palamisilmantarve kiloa polttoaineseosta kohti. Moolitilavuutena on käytetty ideaalikaasun moolitilavuutta NTP-olosuhteissa.

$$V_{\mathrm{pi}} = n_{\mathrm{ilma}} \cdot V_{\mathrm{m}} = 190{,}23\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{kg_{pa}}} \cdot 0{,}022414\,\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{mol}} = 3{,}92\,\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{kg_{pa}}} \tag{8.1}$$

jossa	V_{pi}	Palamisilmantarve	[m^3/kg_{pa}]
	n_{ilma}	Molaarinen palamisilmantarve	[mol/kg_{pa}]
	V_{m}	Ideaalikaasun moolitilavuus	[m^3/mol]

Kuumailmapuhaltimilla suurin polttoaineen massavirta saadaan jakamalla lämmityspuhaltimien ilmantuotto polttoaineen palamisen tarvittavalla ilmamäärällä yhtälön 8.2 osoittamalla tavalla.

$$q_{m,\mathrm{pa}} = \frac{q_{V,\mathrm{kip}}}{V_{\mathrm{p}i}} = \frac{114\ \mathrm{m^3/h}}{3{,}92\ \mathrm{m^3/kg_{pa}}} = 29{,}08\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}} = 8{,}08\,\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{s}} \tag{8.2}$$

jossa	$q_{m,\mathrm{pa}}$	Polttoaineen massavirta	[g/s]
	$q_{v,\mathrm{kip}}$	Kuumailmapuhaltimen ilmantuotto	[m^3/h]

Polttoaineteholtaan yhtälössä 8.2 laskettu suurin kuumailmapuhaltimien ilmantuottoa vastaava polttoaineen massavirta on laskettu yhtälössä 8.3 Pelletin lämpöarvona on käytetty liitteen II taulukossa 1 esitettyä polttoaineen tehollista lämpöarvoa saapumistilassa.

$$P_{\mathrm{pa}} = q_{\mathrm{i,M}} \cdot q_{m,\mathrm{pa}} = 17{,}71\,\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}} \cdot 0{,}00808\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}} = 143\ \mathrm{kW} \tag{8.3}$$

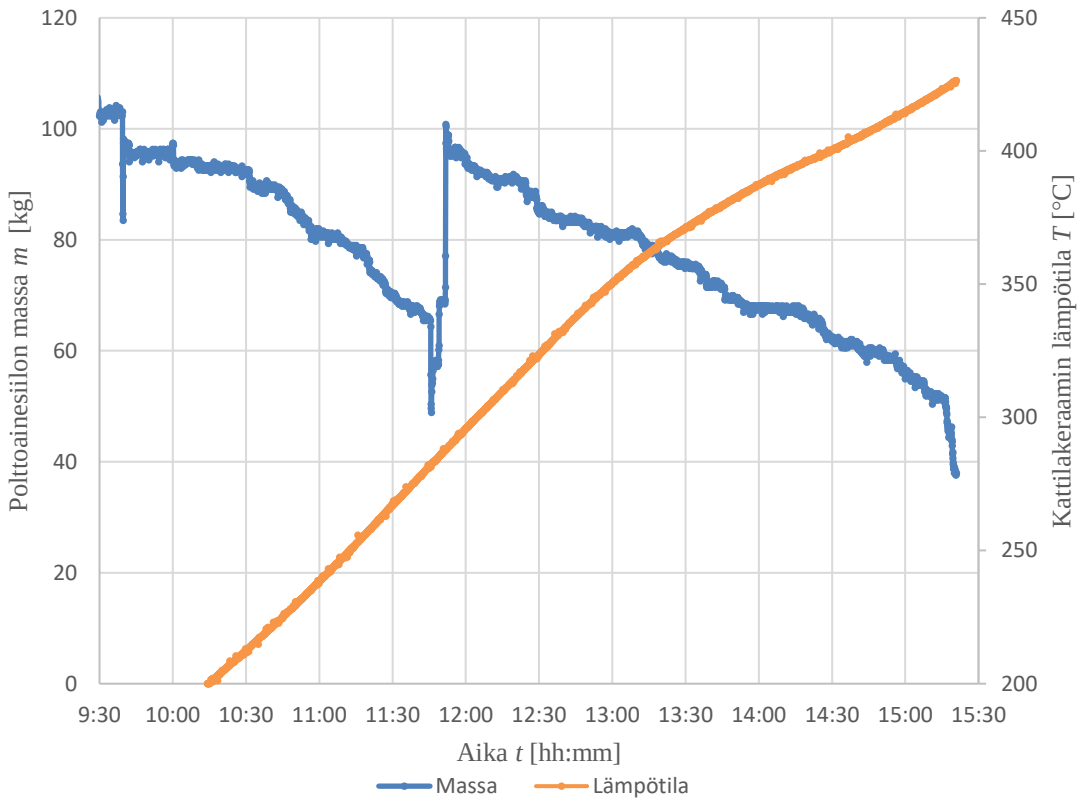
Polttoaineen syötössä käytettyä ruuvipurkainta testattiin käyttämällä pellettejä. Pellettejä lastattiin polttoaineen välisiiloon, siten että polttoainesiilon pohjalla sijaitsevat ruuvipurkaimet peittyivät. Polttoaineen välisiilo roikkuu rakenteista massa-anturin varassa, jolloin sen massa ennen ja jälkeen pellettien lisäyksen pystyttiin mittaamaan. Sulkusyötin asetettiin pyörimään 30 % teholla maksimikuormasta, jottei sulkusyöttimestä aiheutuisi pullonkaulaa. Sulkusyöttimen ei ole tarkoitus toimia polttoaineen annosteluun käytettävänä apulaitteena, vaan ainoastaan porttina polttoainesiilon ja tulipesän välillä. Ruuvipurkain

asetettiin pyörimään 10 % teholla maksimikuormasta. Koetilanteessa laitteistoa ajettiin esitetyillä arvoilla 10 minuutin ajan. Alkuhetkellä pellettien massaksi mitattiin 137 kilogrammaa ja loppuhetkellä 101 kilogrammaa. Polttoaineen massavirraksi saadaan näin yhtälössä 8.4 esitetty karkea arvio.

$$q_{m,\mathrm{pa}} = \frac{\Delta m_{\mathrm{pa}}}{\Delta t} = \frac{(137 - 101)\,\mathrm{kg}}{600\ \mathrm{s}} = 0{,}06\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}} = 60\,\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{s}} \tag{8.4}$$

Yhtälön 8.2 ja 8.4 perusteella voidaan sanoa, ettei polttoainetta voida syöttää tulipesään ruuvipurkaimen 10 prosentin teholla, koska ruuvipurkaimen tuottama massavirta on moninkertainen kuumailmapuhaltimien ilmantuottoa vastaavaan polttoaineen massavirtaan nähden. Tästä seuraa, että polttoaineen massavirran säätelyyn käytettävää ruuvipurkainta ei voida käyttää jatkuvatoimisesti, vaan polttoaineen ruuvipurkaimen toiminta tulee syklittää. Sopiva syklitys polttoaineelle määritettiin käytännön kokeessa toisen koeajon yhteydessä. Polttoaineen syöttöä rajoittavana tekijänä voidaan pitää myös kattilakeraaminen lämpenemisnopeutta.

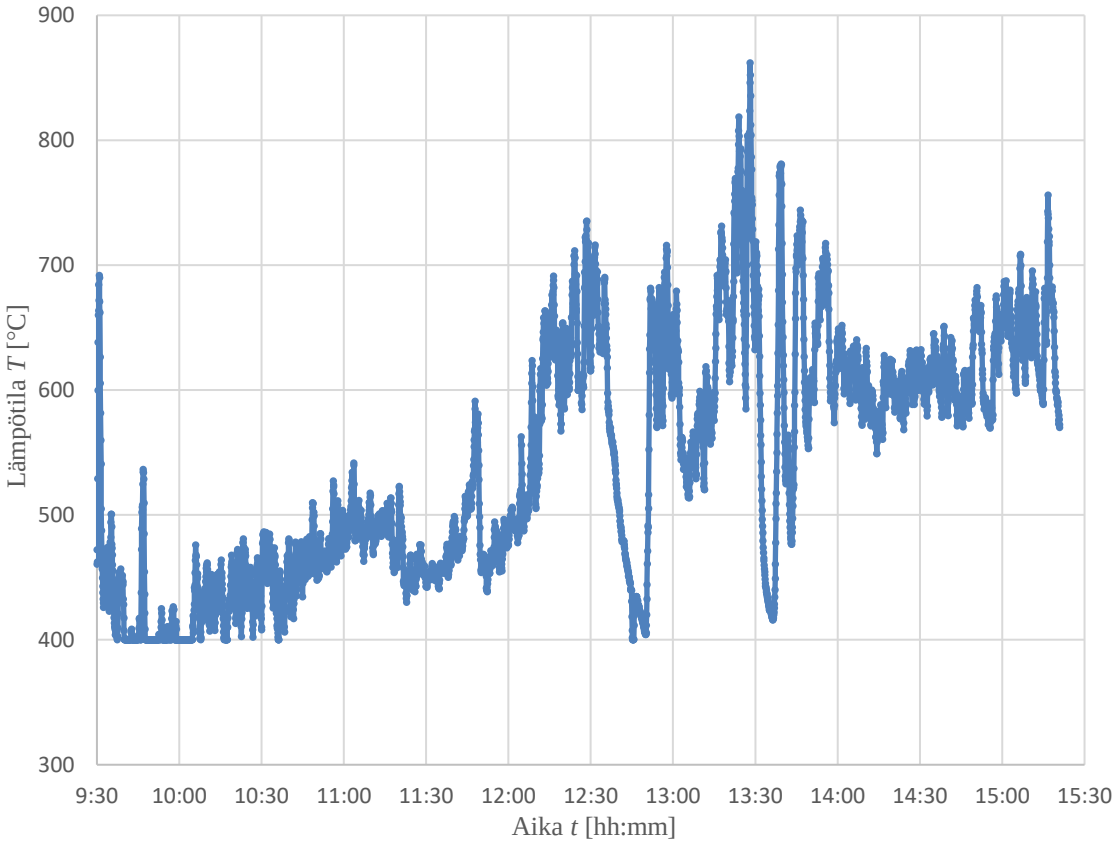
Ennen syklityskokeiden aloittamista, tutkimuskattila ajettiin kuumailmapuhaltimilla lämpimäksi ja sytytettiin. Polttoainetta annosteliin tulipesään ruuvipurkaimen käsikäytöllä. Syklityskoe aloitettiin hyvin varovaisella polttoaineen annostelulla. Annostelussa käytettiin automaatiojärjestelmän ohjelmaa, jossa annosteluaikaa ja odotusaikaa pystyttiin helposti muuttamaan. Ensimmäinen syklitys, joka tutkimuskattilassa toteutettiin, oli 3 sekunnin ajan kestävä ruuvipurkaimen käyttö ja 57 sekuntia kestävä odotus seuraavaan annosteluun. Ruuvipurkaimen maksimitehoksi asetettiin 10 prosenttia maksimitehostaan, vaikkakin kokeen edetessä huomattiin, ettei ruuvipurkain kerkeä kolmen sekunnin aikana kiihtyä asetettuun tehoon. Kolme sekuntia kestävä käyttö ei myöskään ota huomioon ruuvin pysähtymisen aikana tapahtuvaa ruuvin pyörimistä. Kolmen sekunnin syklin aikana tapahtunutta siilon massavähenemää voidaan katsoa kuvasta 8.2 aikavälillä 9:45 - 10:30. Kuvasta 8.2 luettuna polttoainetta kului noin viisi kiloa 45 minuuttia kestäneen koejakson aikana. Polttoaineen massavirta on näin ollen 1,86 grammaa sekunnissa, mikä vastaa pellettiä käytettäessä noin 33 kilowatin polttoainetehoa.



Kuva 8.2. Polttoainesiilon massan muutos ja kattilakeraamin lämpötilan nousu koeajon aikana

Ensimmäisen syklin perusteella päätettiin, että syklityksessä polttoaineen purkuruuvin käyttöaikaa voidaan lisätä. Käyttöaika nostettiin viiteen sekuntiin ja odotusaika 55 sekuntiin. Syklitystä jatkettiin minuutin jaksoissa. Kuvassa 8.2 pystytään huomaamaan hienoinen jyrkentyminen polttoainesiilon massan muutoksessa. Samaan aikaan huomattiin myös kattilakeraamin lämpötilaa mittaavan TIC-7002 anturin herääminen lämpötilan muutokseen. Lämpötila-anturin kalibrointivälistä johtuen lämpötila-anturi pystyy mittaamaan lämpötilaa vasta 200 celsiusasteesta ylöspäin. Tasaisen lämpötilan nousun johdosta koeajo päätettiin ajaa loppuun jälkimmäisellä syklityksellä. Kuvasta 8.2 pystytään kattilakeraamin lämpötilan nousuksi lukemaan jyrkimmältä kohtaa 0,93 °C/min. Mitattu lämpötilan nousu on alle kattilakeraamivalmistajan ilmoittaman 1,25 °C/min maksimilämpötilan nousun. Kuvasta 8.2 luettuna saadaan 12:00 ja 13:45 välillä tapahtuneen polttoaineen massavähenemäksi 21,46 kiloa, joka vastaa polttoaineen massavirtana 3,4 g/s ja polttoainetehona 60 kW. Kuvassa 8.2 näkyvä polttoaineen massan kasvupiikki johtuu pelletin lisäämisestä polttoainesiiloon.

Polttoaineen syöttäminen kattilan tulipesään sykleissä aiheuttaa piikkejä lämpötilannousussa ja vaikeuttaa hetkellisen palamisilmantarpeen määrittämistä. Polttoaineen syklityksestä aiheutuvia nopeita lämpötilan muutoksia voidaan tarkastella kuvasta 8.3. Nopeat lämpötilan muutokset voivat lyhentää kattilakeraamien kestoikää lämpötilan muutoksista aiheutuvien lämpölaajenemisrasitusten seurauksena. Kuvassa 8.3 on esitetty tulipesän yläpuolella sijaitsevan TI-7012 mittaustuloksia päivän koeajon ajalta.



Kuva 8.3. Lämpötilan vaihteluita tulipesän yläpuolelta mitattuna polttoaineen syklityksessä

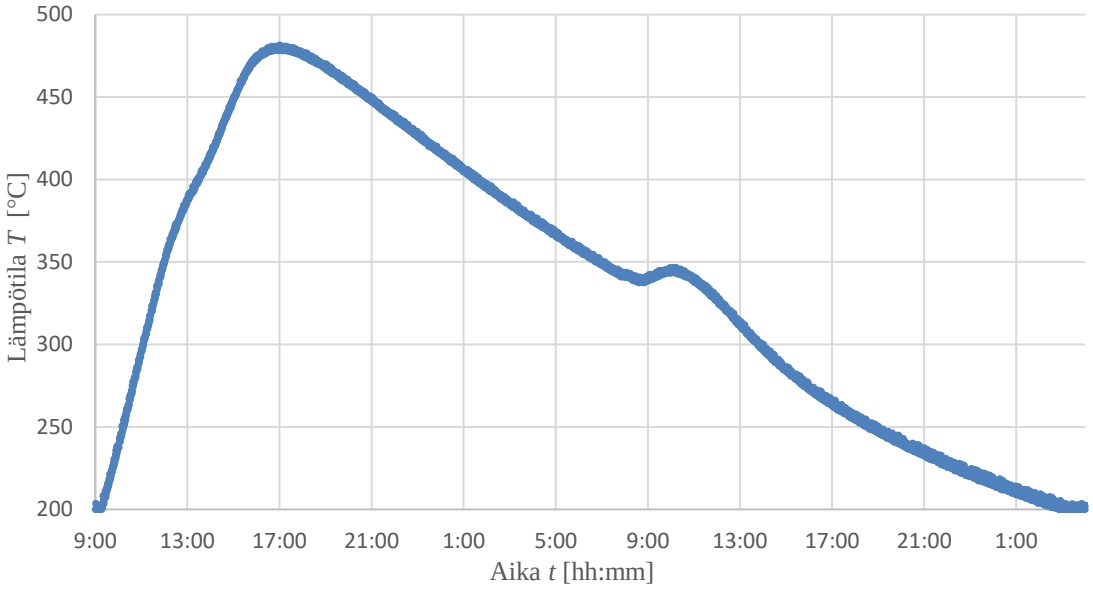
Parhaimpana ratkaisuna nopeiden lämpötilan muutoksien ehkäisyyn voidaan pitää polttoaineen syöttämistä tasaisella massavirralla. Pienen kokoluokan kattiloissa tämä tarkoittaa myös riittävän pienen mittakaavan polttoainejärjestelmän hankintaa.

8.3 Kattilakeraamien lämpeneminen ja jäähtyminen

Kattilakeraamien lämpenemis- ja jäähtymisnopeudet ovat tärkeitä tietää, sillä liian nopeista lämpötilamuutoksista aiheutuva nopea lämpölaajeneminen aiheuttaa kuormituksia kattilakeraameihin seurauksena keraamien epätasaisesta laajenemisesta tai kutistumi-

sesta. Liian suurista kuormituksista kattilakeraameihin voi seurata kattilakeraamien lohkeilua ja hajoamista. Kattilakeraamien lohkeilua voidaan minimoida keraamien asianmukaisella suunnittelulla ja asennuksella, sekä hallitulla kattilan käytöllä. (Harbison-Walker. 2005, PR-11)

Kattilakeraamin lämpötilaa mittaava lämpötila-anturi TIC-7002 sijaitsee hiekkapedin korkeudella. Tutkimuskattilan kattilakeraamien lämpenemisnopeudeksi määritettiin asetetulla polttoaineen koeajon yhteydessä 0,93 °C/min. Lämpenemisnopeuden lisäksi, on myös oleellista tietää, etteivät kattilakeraamit myöskään jäähdy valmistajan ilmoittamaa lämpötilan muutosnopeutta nopeammin. Kuvassa 8.4 nähdään koeajon aikana tapahtunut lämpötilan nousu ja koeajon jälkeinen lämpötilan lasku kokonaisuudessaan. Jo kuvan 8.4 perusteella voidaan sanoa, ettei kattilakeraamin jäähtymisen aikana tapahtuva lämpötilan muutosnopeus ylitä kattilakeraamin valmistajan ilmoittamaa 1,25 °C/min ylärajaa. Kuvasta 8.3 luettuna aikavälillä 18:30 ja seuraavan aamun 7:30 välillä lämpötila on laskenut noin 130 astetta, joka vasta lämpötilan muutosnopeutena 0,14 °C/min.



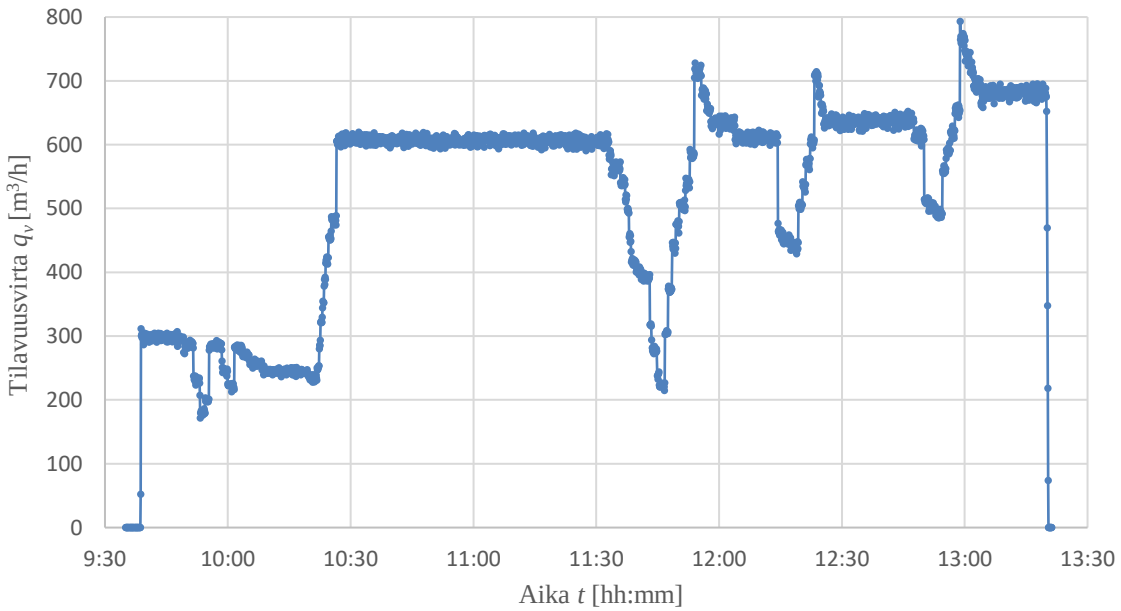
Kuva 8.4. Koeajon aikainen lämpötilan nousu ja koeajon jälkeinen lämpötilan lasku

Kuvassa 8.4 nähtävä pieni nyppylä lämpötilan nousussa liittyy toiseen kokeeseen, jossa kokeiltiin tutkimuskattilan käynnistymistä yön pysähdyksissä olon jälkeen. Kuten lämpötilan noususta voidaan päätellä, kattila saatiin syttymään kattilan varaamalla lämmöllä yön pysähdyksissä olon jälkeen.

8.4 Paine-ero pedissä

Hiekkapedin muodostamaa paine-eroa mitattiin leijutuskokeessa. Leijutuskokeen tarkoituksena on määrittää kyseiselle kattilalle ja käytetylle petihiekalle petikorkeus paine-eroa kohden. Leijutuskoe aloitettiin tilanteessa, jossa tutkimuskattilassa ei ole vielä lainkaan hiekkaa ja kattilakeraamit ovat kylmillään. Hiekkapedin muodostamaa paine-eroa tarkastellaan kuvien 8.5 ja 8.6 avulla. Kuvissa käsitellyt muuttujat ovat paine-eromittaus, primääri-ilman tilavuusvirta ja hiekkasiilon massavähenemä eli annostellun hiekan määrä.

Leijutuskoe aloitettiin asettamalla savukaasulinjaston pellit auki ja savukaasupuhallin ylläpitämään pientä alipainetta tulipesässä. Palamisilmapuhallin asetettiin pienelle teholle ja primääri-ilmaa säätelevä säätöventtiili FV-2010 täysin auki. Alkuhetkellä tilavuusvirta asettui 300 m^3/h tilavuusvirran kohdalle. Hiekkaa ryhdyttiin annostelemaan tulipesään niin kauan, kunnes primääri-ilman tilavuusvirtamittaus reagoi ensimmäisen kerran. Kyseisenä hetkenä petihiekka on täyttänyt tulipesän pohjan primääri-ilmasuutinten ilmanjakoreikiin asti. Syötetyn hiekan annostelukerrat voidaan lukea kuvasta 8.6 nähtävän hiekkasiilon massavähenemän portaista. Kuvien 8.5 ja 8.6 perusteella ajanhetkellä 9:53 tapahtunut ensimmäisen primääri-ilman tilavuusvirtamittauksen tipahtaminen tapahtui kymmenennen petihiekan annostelukerran kohdalla. Tulevaisuuden kokeita varten, joissa petihiekkaa halutaan lisätä juuri ilmanjakosuutinten puhallusreikiin asti, voidaan hiekkaa annostella yhdeksän kertaa.



Kuva 8.5. Primääri-ilman tilavuusvirta leijutuskokeen aikana

Leijutuskoetta jatkettiin lisäämällä petihiekkaa kattilaan. Petihiekan lisäyskertojen myötä myös primääri-ilman kulku tulipesään hankaloituu. Tilavuusvirran vähenemistä kompensoitiin lisäämällä palamisilmapuhaltimen tehoa. Petihiekan annostelua lisättiin kattilaan, kunnes paine-eromittauksessa havaittiin ensimmäinen kasvupiikki. Kuvasta 8.6 luettuna ensimmäinen kasvupiikki tapahtui kuudennentoista annostelukerran kohdalla. Tilanteessa, jossa tutkimuskattila halutaan täyttää aivan paine-eromittauksen alarajalle asti, tarvitaan tulipesään annostella petihiekan annostelutaskuja 15 kertaa. Ajanhetkellä 10:10 tapahtunut hiekkasiilon massan kasvupyrähdykset johtuivat hiekan lisäämisestä hiekkasiiloon.

Petihiekkaa annosteliin vielä kaksi taskullista, jotta hiekkapeti näkyisi tutkimuskattilan näkölasista. Molemmat annostelukerrat näkyvät kuvan 8.6 pedin paine-erokuvaajassa kasvuportaina. Hiekkapedin näkyessä näkölasista hiekan leijuttaminen aloitettiin kasvattamalla puhallintehoa rauhallisesti. Puhallintehon kasvaessa myös hiekkapedin paine-ero kasvaa, kunnes primääri-ilman virtausnopeus on kasvanut minimileijutusnopeuden U_{mf} yli. Tässä tilanteessa maan vetovoima on yhtä suuri tai pienempi kuin primääri-ilman kohdistama voima petipartikkeleihin. Näkölasista katsottuna hiekkapedin kupliminen näytti voimakkaalta, jolloin puhallintehoa laskettiin. Puhallintehoa laskettiin, kunnes maltillinen pedin kupliminen saavutettiin. Leijutuskoe toistettiin vielä kolmella leijutuskokeella, joiden jokaisen välissä annosteltiin kaksi petihiekan annostelutaskua. Petihiekan annostelukertojen jälkeen havaittiin tulipesän näkölasista petihiekan erikoinen käyttäytyminen. Petihiekan kuplimisen havaittiin käyttäytyvän erikoisesti hiekan annostelukertojen jälkeen. Petihiekan lisäys lannisti pedin lähes kokonaan jättäen vain pienen pulputusmaisen kuplinnan tulipesän ulkoreunojen läheisyyteen. Tarkempaa syytä ilmiölle ei pystytty selvittämään.

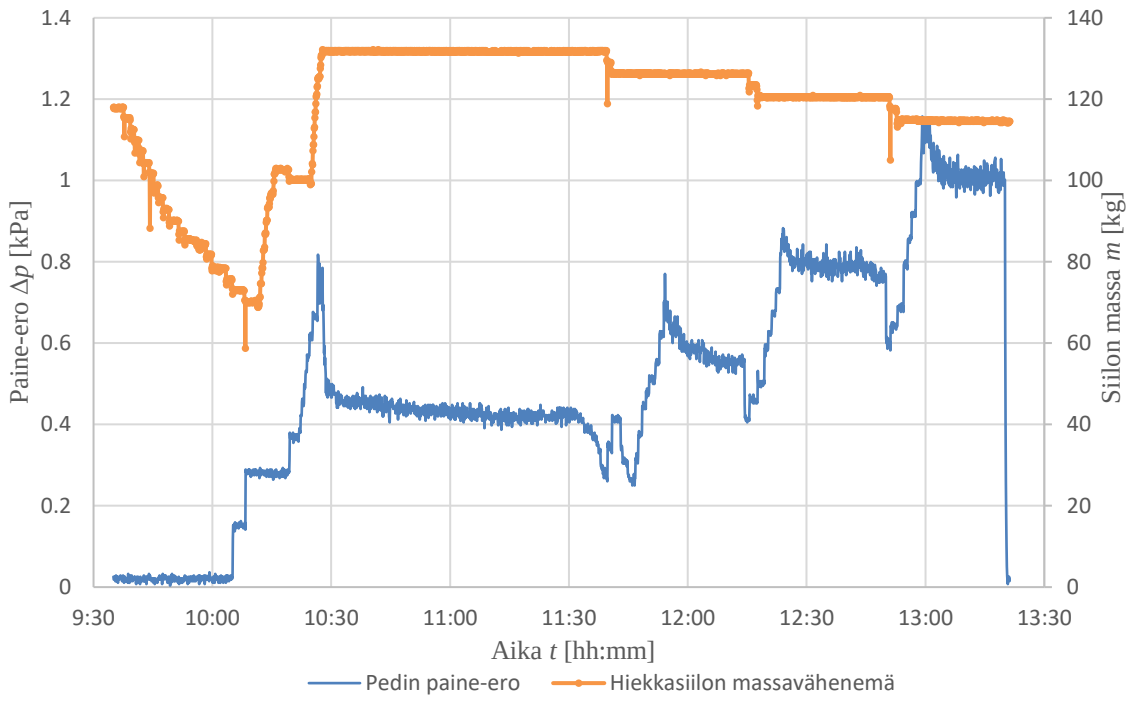
Kuvien 8.5 ja 8.6 avulla voidaan määrittää leijutusilman nopeudet tulipesässä kokeen eri vaiheissa. Katsotaan kuvasta 8.6 voimakkaiden ja maltillisten kuplintojen kohdilta vastaavat aikavälit, joiden perusteella kuvasta 8.5 voidaan katsoa keskimääräisiä tilavuusvirtoja kuplintojen aikana. Leijutusilman nopeus voidaan laskea jakamalla primääri-ilman tilavuusvirta tulipesän poikkipinta-alalla. Tulipesän halkaisija hiekkapedin alueella on 30 millimetriä. Tuntemattomasta syystä kuvassa 8.5 ensimmäisen voimakkaan kuplinnan kohdalla ei näy vastaavanlaista tilavuusvirta piikkiä kuin kolmen muun kokeen aikana

havaitut. Taulukossa 8.1 alaindeksi 1 tarkoittaa tilannetta voimakkaan kuplinnan aikana ja alaindeksi 2 maltillisen kuplinnan aikana

Taulukko 8.1. Leijutuskaasun virtausnopeuksia leijutuskokeen eri aikoina

Tilavuusvirta $q_{v,1}$ [m3/h]	Tilavuusvirta $q_{v,1}$ [m3/s]	Virtausnopeus v_1 [m/s]	Tilavuusvirta $q_{v,2}$ [m3/h]	Tilavuusvirta $q_{v,2}$ [m3/s]	Virtausnopeus v_2 [m/s]
-	-	-	606,53	0,17	1,75
713,27	0,20	2,06	610,79	0,17	1,76
707,98	0,20	2,04	635,60	0,18	1,84
755,25	0,21	2,18	680,98	0,19	1,97

Lasketut virtausnopeudet vastaavat hyvin toisen luvun taulukossa 2.2 esitettyjä tyypillisiä arvoja leijutuskaasun virtausnopeudelle kuplapetikattilassa. Taulukossa tyypillisiksi virtausnopeuksiksi esitettiin 0,7 - 2,0 m/s. Voimakkaan kuplinnan avulla lasketut virtausnopeudet ylittivät juuri 2 m/s:n virtausnopeuden, jolloin leijutuskokeen yhteydessä tehty virtausnopeuden alentaminen oli aiheellista. Maltillisen kuplinnan alueella virtausnopeudet jäivät esitetyn 2 m/s:n ylärajan alapuolelle.



Kuva 8.6. Pedin paine-ero ja hiekkasiilon massavähenemä ajan funktiona

Leijutuskokeessa keskimääräinen paine-ero kerättiin ylös neljän eri paksuisen kuplivan pedin alueelta. Kuvassa 8.6 sinisellä nähtävässä pedin paine-eroa esittävässä kuvaajassa on syytä huomata paine-eron nopeat kasvupiikit ennen kuplinnan alkamista. Paine-eron

nopeaa kasvua kompensoitiin alentamalla puhallintehoa, jolloin kuplinta pysyi yllä rauhallisempana. Ilmiötä voidaan perustella pedin pakkaantumisella. Ennen kuplinnan alkamista hiekkapeti on asettunut tiiviisti tulipesän pohjalle, jolloin leijutusilman puhaltaminen hiekkapedin lävitse on työlästä. Kasvattamalla puhallustehoa riittävästi, hiekkapeti fluidisoituu ja ilman läpikulku hiekkapedin läpi helpottuu. Puhallintehoa voidaan laskea, sillä fluidisoidun pedin muodostama paine-ero on alhaisempi kiinteän pedin paine-eroon nähden. Hiekkapedin korkeudet leijutuskokeen eri aikoina voidaan laskea yhtälön 8.5 avulla (Huhtinen *et al*. 2000, 153).

$$\begin{aligned} &\Delta p = (\rho_\mathrm{p} - \rho_\mathrm{g}) \cdot (1-\varepsilon) \cdot g \cdot H \\ &\Rightarrow H = \frac{\Delta p}{(\rho_\mathrm{p} - \rho_\mathrm{g}) \cdot (1-\varepsilon) \cdot g} \end{aligned} \tag{8.5}$$

jossa	Δp	Paine-ero	[Pa]
	ρ_p	Petimateriaalin tiheys	[kg/m^3]
	ρ_g	Leijutuskaasun tiheys	[kg/m^3]
	ε	Tulipesän tyhjän tilan osuus (Leijupedille 0,5)	
	g	Gravitaatiovakio (9,81 m/s^2)	[m/s^2]
	H	Leijupedin korkeus	[m]

Taulukossa 8.2 on esitetty leijutuskokeissa mitatut paine-erot ja niiden avulla yhtälöstä 8.5 laskettu vastaavat hiekkapetien korkeudet. Petihiekan tiheydeksi on mitattu 1500 kg/m^3 ja leijutuskaasun eli ilman tiheydeksi on oletettu 1,2 kg/m^3. Taulukossa 8.2 n_1 tarkoittaa annostelukertojen määrää alkuhetkestä, n_2 annostelukertojen määrää ensimmäisestä tilavuusvirran muutoksesta ja n_3 annostelukertojen määrää ensimmäisestä paine-eron muutoksesta.

Taulukko 8.2. Leijutuskokeessa mitattuja paine-eroja vastaavat pedin korkeudet.

n_1	n_2	n_3	Mitattu paine-ero [kPa]	Pedin korkeus [cm]
18	9	3	0,43	5,81
20	11	5	0,55	7,52
22	13	7	0,79	10,74
24	15	9	1,01	13,72

Leijutuskokeessa muodostettujen hiekkapetien todellisen korkeudet ovat kuitenkin todellisuudessa korkeampia, sillä paine-eromittaus ei ota huomioon paine-eromittauksen ja primääri-ilmasuutinten väliin muodostuvan hiekkapedin paksuutta. Primääri-ilmasuutinten ja paine-eromittauksen alayhteen väliin jää kuuden petihiekan annostelutaskun väli.

Hiekkasiilonsiilon massavähenemää ei voida käyttää suoraan, sillä siilon massa-anturin huomattiin leijutuskokeen yhteydessä näyttävän liian vähän todelliseen siiloon lisättyyn hiekan määrään nähden. Massa-anturivirhe johtuu luultavasti hiekkasiilon nojaamisesta ripustuksiin, jolloin riiputukseen perustuvan massa-anturin tulos on virheellinen. Petihiekan annostelutaskun antaman hiekan massa mitattiin käytännön kokeessa. Kuuden petihiekan annostelutaskun keskiarvoksi mitattiin 3460 grammaa. Petihiekan tiheyden ollessa 1500 kg/m^3 jää suutinten ja paine-eromittauksen väliin yhtälön 8.6 avulla laskettu määrä.

$$V_{\text{väli}} = n_{\text{tasku}} \cdot \frac{m_{\text{tasku}}}{\rho_{\text{p}}} = 6 \cdot \frac{3{,}460\ \text{kg}}{1500\ \text{kg/m}^3} = 0{,}014\ \text{m}^3 = 14\ \text{litraa} \tag{8.6}$$

jossa n_{tasku} Väliin jäävien annostelutaskujen lkm

Tulipesän halkaisija leijupedin alueella on 350 millimetriä, jolloin suutinten ja paine-eromittauksen väliin jäävän hiekkapedin paksuutta voidaan arvioida yhtälön 8.7 avulla.

$$H_{\text{väli}} = \frac{V_{\text{väli}}}{A_{\text{tulipesä}}} = \frac{0{,}014\ \text{m}^3}{\left(\frac{0{,}350\ \text{m}}{2}\right)^2 \cdot \pi} = 0{,}15\ \text{m} = 15\ \text{cm} \tag{8.7}$$

Vastaavasti väliin jäävän hiekkapatsaasta aiheutuva paine-ero voidaan laskea aikaisemmin esitetyllä paine-eron yhtälöllä (Huhtinen *et al*. 2000, 153). Paine-ero on laskettu yhtälössä 8.8.

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{väli}} &= (\rho_{\text{p}} - \rho_{\text{g}}) \cdot (1-\varepsilon) \cdot g \cdot H_{\text{väli}} \\ \Delta p_{\text{väli}} &= (1500 - 1{,}2)\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (1-0{,}5) \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}15\text{m} = 1{,}07\ \text{kPa} \end{aligned} \tag{8.8}$$

8.5 Palamisilman säätö

Polttoaineen palamisessa palamisilman säädöllä on erittäin suuri vaikutus tehokkaan ja vähäpäästöisen palamisen onnistumiseen. Polttoaineen palamiselle liian vähäinen palamisilman määrä aiheuttaa tulipesässä epätäydellistä palamista ja siten lisää palamisessa muodostuvia päästöjä. Puolestaan liian runsaalla palamisilman syötöllä aikaansaadaan suurempia savukaasuhäviöitä. Pienen kokoluokan kattiloissa oikean palamisilmanmäärän

säätämisessä haastetta lisää tarve tarkemmista ilmamäärämittauksista. Pienen kokoluokan kattiloissa polttoaineen massavirran ollessa suurempiin polttolaitoksiin verrattuna huomattavasti pienempi, tulee myös palamisilman mittaukset pystyä toteuttamaan pienemmässä mittakaavassa hyvällä tarkkuudella. Mittausten tarkkuus on etenkin oleellista energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilalle luotettavien tutkimustulosten saamiseksi. Palamisilman säätö ei ole myöskään tutkimuskuplapetikattilalle aivan helppo toteuttaa johtuen polttoaineensyötön syklityksestä.

Palamisilman säätö toteutetaan tutkimuskuplapetikattilassa takavedossa sijaitsevan happimittauksen perusteella. Happimittarin mittaamaksi happipitoisuudeksi asetetaan tutkimuskuplapetikattilan ajossa jokin toivottu happipitoisuus, esimerkiksi 6 %. Happimittarin mittaama happipitoisuus kuvaa jäännöshapen määrää savukaasuissa. Palamisilman säädölle on oleellista määrittää aina kullekin käytetylle polttoaineelle oma palamisilman tarve. Liitteen II taulukossa 3 palamisilman tarve on määritetty Phyllis2-tietokannasta kerätyille pellettinäytteille. Palamisilmataulukossa toivottuun happipitoisuuteen voidaan päästä muuttamalla ilmakerrointa (lambda λ). Liitteen II taulukossa 3 nähtävä palamisilmantarve tarkoittaa palamisilmantarvetta tilanteessa, jossa palamisilmakertoimeksi on asetettu 1,2. Kyseisellä palamisilmakertoimella taulukon avulla on happipitoisuudeksi laskettu 3,21. Palamisilmakerrointa voidaan siis muuttaa tällöin isommaksi, jolloin päästään toivottuun happipitoisuuteen. Palamistaulukon tarkempaan periaatteeseen ei tutustuta tässä työssä tarkemmin.

Palamisilmakerrointa muutettaessa myös palamisen ilmantarve muuttuu. Palamiseen tarvittava palamisilman tilavuusvirta voidaan laskea kertomalla ilmantarve polttoaineen massavirralla. Palamiseen tarvittava palamisilma jakautuu tutkimuskuplapetikattilassa primääri-ilman ja neljän sekundääri-ilmatason kesken. Primääri-ilmalla ei varsinaisesti säädetä palamisilman tarpeen muutosta, vaan ainoastaan pidetään yllä hiekkapedin muodostamaa paine-eroa. Sekundääri-ilmoille menevät ilmamäärät lasketaan palamistaulukon ja polttoaineen massavirran avulla lasketun palamisilman tarpeen ja primääri-ilmalle menevän tilavuusvirran erotuksesta. Yhtälössä 8.9 on esitetty tapa, miten ilmaa voidaan jakaa alimmalle sekundääri-ilmalle.

$$q_{v,si1} = (V_{\mathrm{pi}} \cdot q_{m,\mathrm{pa}} - q_{\mathrm{v,pr}}) \cdot x_{si1} \tag{8.9}$$

jossa	$q_{\mathrm{v,si1}}$	alimman sekundääri-ilman tilavuusvirta	[m^3/h]
	x_{si1}	painotuskerroin (0 - 1)	[-]

Kaikille sekundääri-ilmatasoille asetetaan oma painotuskerroin. Painotuskertointen summan tulee olla 1. Pienillä polttoaineen massavirroilla myös primääri- tai sekundääri-ilmojen kesken jakautuvat palamisilmat jäävät pieniksi, jolloin hankaluuksia muodostuu pienten virtausnopeuksien pienien muutoksen hallinnasta.

Virtausmittaukset tutkimuskeskuksella on toteutettu käyttämällä kuristuslaippoja. Kuristuslaipan toimintaperiaate perustuu kuristuslaipan kuristusosan muodostaman virtausesteen muodostamaan staattisen paine-eroon kuristuslaipan eri puolille. Kuristuslaipan muodostaman staattisen paine-eron perusteella tilavuusvirta voidaan määrittää yhtälön 8.10 avulla. (Reader-Harris 2015, 6)

$$q_v = \frac{\dfrac{C_{\mathrm{d}}\varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \dfrac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot \Delta p}}{\rho_1} \tag{8.10}$$

jossa	C_{d}	purkauskerroin	[-]
	ε_{o}	laajenemiskerroin	[-]
	β	halkaisijasuhde	[-]
	d	kuristusosan halkaisija	[m]
	ρ_1	virtaavan aineen tiheys sisääntulossa	[kg/m^3]
	Δp	staattinen paine-ero	[Pa]

Kuristuslaippojen muodostamaa paine-eroa mitataan halutulle mittavälille kalibroiduilla paine-erolähettimillä. Paine-erolähettimet lähettävät mittatietonsa 4 - 20 mA:n virtasignaalina automaatiojärjestelmälle, joka muuntaa virtaviestin skaalausvälille 0 - 27678. Automaatiojärjestelmän skaalausväli linearisoidaan suoraan paine-erolähetinten kalibroidulle mittavälille. Liitteessä III on laskettu tilavuusvirtamittausten pienimpiä mahdollisia mittavälejä. Laskussa on käytetty yhtälöä 8.10, johon staattisen paine-eron paikalle on asetettu paine-erokalibroinnin maksimiarvon ja automaatioskaalauksen maksimiarvon osamäärä. Liitteen III laskuista huomataan, että primääri-ilmamittauksen FIC-2009 mitta-

askel on suurin. Suuresta mitta-askeleesta on haittaa tarkkojen tilavuusvirtojen määrittämisessä. Mitta-askelta voidaan pienentää kaventamalla paine-erolähettimen kalibrointiväliä, joskin kalibroinnin muuttaminen kaventaa mittauksen pienintä ja suurinta arvoa.

Lisäepävarmuutta FIC-2009 mittauksessa aiheuttaa kuristuslaippojen turvaetäisyyksien huomiotta ottaminen. Kuristuslaippojen suunnittelijan mukaan turvaetäisyys lähimmästä täysin auki olevasta venttiilistä sisääntulopuolella tulee olla 1,87 metriä. Käytännössä turve-etäisyyden tulisi olla mainittua turvaetäisyyttä suurempi, sillä käytön aikana primääri-ilman säätöventtiili on jatkuvasti osittain auki, joka lisää virtauksen turbulenttisuutta ja mittausvirhettä kuristuslaipassa. Pienen kokoluokan kattiloissa haastetta lisää tarpeeksi ison tilan löytäminen virtausmittausten turvaetäisyyksille.

9 YHTEENVETO

Tulevaisuuden kasvava energiantarve ja kiristyvät päästörajat polttoprosesseille luo kasvavissa määrin paineita olemassa olevien ja kokonaan uusien polttoprosessien tehostamiseen ja kehittämiseen. Fossiilisten polttoaineiden aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen jatkuva kasvun pysäyttämiseksi tulee myös miettiä sellaisia vaihtoehtoja, joissa fossiiliset polttoaineet pystyttäisiin korvaamaan uusiutuvilla polttoaineilla. Työssä käsitelty Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattila antaa oman panoksensa polttoaineiden kehitystyölle.

Työn alussa esitelty leijupolttotekniikan teoria- ja toimintaperiaatekatsaukset antavat hyvän käsityksen miksi juuri leijupolttotekniikkaa voidaan pitää yhtenä parhaimmista polttoprosesseista päästöjen vähentämiseen ja uusien polttoaineiden käyttämiseen. Leijupolttotekniikan kenties merkittävimpänä etuna on erittäin laaja polttoainevalikoima ja kyky polttaa huonojakin polttoaineita hyvällä palamishyötysuhteella. Korkeasta palamishyötysuhteesta johtuen polttoaineen epätäydellinen palaminen jää vähäisemmäksi, eikä näin ollen aiheuta palamattoman polttoaineen päästöjä. Leijupolttotekniikan alhaisesta palamislämpötilasta johtuen palamisessa muodostuvat typenoksidipäästöt jäävät vähäisiksi. Palamisessa muodostuvia rikkioksidipäästöjä pystytään vastaavasti leijupoltossa vähentämään suhteellisen helposti tulipesään syötettävien lisäaineiden avulla.

Leijupolttotekniikoiden esittelyiden jälkeen työssä kerrottiin perusteet kiinteän polttoaineen palamiselle aina polttoaineen kuivumisesta jäännöshiilen palamiseen. Palamisen teoriaa käsittelevässä luvussa palamista tarkastellaan etenkin biomassan näkökulmasta. Palamista käsittelevän luvun jälkeen työssä kerrottiin polttoaineiden oleellisimmista ominaisuuksista. Oleellisimpia polttoaineiden ominaisuuksia ovat polttoaineen kosteus- ja tuhkapitoisuus, haihtuvien yhdisteiden määrä, alkuainekoostumus ja lämpöarvo. Mahdollisesti merkittävin polttoaineelle määritettävä ominaisuus on kosteuspitoisuus. Suuresta kosteuspitoisuudesta johtuvan alhaisemman tehollisen lämpöarvon lisäksi, suuri kosteuspitoisuus aiheuttaa myös ongelmia polttoaineen syttymisessä, alentaa palamislämpötilaa, sekä lisää savukaasumääriä.

Työssä on myös käsitelty laajasti polttamisessa muodostuvia päästöjä ja esitetty keinoja miten mainittuja päästöjä voidaan rajoittaa. Polttoaineen palamisessa muodostuvat päästöt voidaan jakaa palamattoman polttoaineen tai palamisen muodostaviin päästöihin. Palamattoman polttoaineen muodostamat päästöt ovat seurausta epätäydellisestä palamisesta, kun taas palamisessa muodostuvat päästöt liittyvät kriittisesti polttoaineen ominaisuuksiin. Palamattoman polttoaineen muodostamiin päästöihin voidaan pääsääntöisesti puuttua parantamalla palamishyötysuhdetta. Palamisessa muodostuviin päästöihin pystytään vaikuttamaan käyttämällä enemmän palamisilmaa kuin stoikiometrinen palamisilmantarve edellyttäisi. Palamisessa muodostuvien päästöjen määrää rajoittavat Euroopan unionin asettamat direktiivit. Työssä on esitetty teollisuuden ilmaan, veteen tai maaperään kohdistuvia päästöjä käsittelevän direktiivin ja jätteenpolttoa käsittelevän direktiivin asettamia päästörajoja.

Työssä tehty tutkimus keskittyi Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen kuplapetikattilaan. Työn ohessa on kerrottu kattavasti energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilasta ja siihen kuuluvista apulaitteista. Yhtenä työn tavoitteista oli muodostaa teoreettiset suunnitelmat tutkimuskuplapetikattilan käynnistämiseksi ja pysäyttämiseksi. Muodostettuja suunnitelmia testattiin sittemmin käytännössä, jolloin teoreettisella tarkastelulla saatu tieto pystyttiin yhdistämään käytännön kokeilla saadun tiedon kanssa. Käytännön kokeita tutkimuskuplapetikattilla ajettiin yhteensä kolme kappaletta, yksi hiekkapedin leijutuskoe ja kaksi lämmityskoetta. Työn tuloksena saatiin tutkimuskuplapetikattilan käynnistämiselle ja alasajolle mahdollisimman kattava teoreettiseen tarkasteluun käytännön tietoon nojaavat suunnitelmat.

Tutkimuspetikattilalla käytännön kokeiden aikana tutkittiin tulipesän syttymistä, polttoaineen annostelua tulipesään, kattilakeraamien lämpenemis- ja jäähtymisnopeuksia, hiekkapedin muodostamaa paine-eroa ja palamisilman säätöä. Tulipesän syttymistä varten kerätty tieto osoittautui hyödylliseksi tiedoksi tutkimuskuplapetikattilalla tulevaisuudessa tehtäviä ajoja varten. Polttoaineen annosteluun liittyvässä tutkiskelussa huomattiin merkittävä ongelma polttoaineen syöttöjärjestelmän ylimitoituksessa. Ylimitoituksen seurauksena polttoaineen syöttö tulipesään toteutetaan pienissä sykleissä, joka vaikeuttaa huomattavasti tehokkaan ja vähäpäästöisen palamisen ylläpitämistä. Lämmityskokeen yhteydessä polttoaineen annostelua muuttamalla määritettiin sopiva polttoaineen annos-

telu- ja odotusaika, joka vastaa sopivaa kattilakeraamien lämpenemisnopeutta. Keraamien lämpötilan muutosnopeus on oleellista tietää muurausten eliniän maksimoimiseksi. Kattilakeraamien jäähtymisnopeus ei osoittautunut liian suureksi lämmityskoetta seuranneessa kattilan jäähtymisessä. Hiekkapedin muodostamaa paine-eroa varten tehdyssä leijutuskokeessa selvitettiin pedin muodostamia paine-eroja, leijutusilman virtausnopeuksia ja hiekan annostelutaskujen määriä kokeen aikana. Mittausten perusteella leijutusilman virtausnopeus asettui hyvin kirjallisuudessa mainittuihin arvoihin. Palamisilman säätöä tutkivassa kohdassa esitettiin menetelmä palamisilman säätöön, palamisilman jakamiseen primääri- ja sekundääri-ilmojen välille ja lopuksi tutkittiin vielä palamisilmamittausten mitta-askelia. Kaikki diplomityön aikana toteutetut kokeet ovat tärkeitä tutkimuskuplapetikattilan käyttämisen jatkoa varten.

Työssä haastavimmaksi osuudeksi muodostui käytännön kokeiden avulla havaittu pienen kokoluokan kattiloiden säätöherkkyys. Polttoaineen jatkuva palaminen ja leijutusolosuhteiden pitkäkestoinen ja vakaa ylläpitäminen havaittiin haastavaksi energiatutkimuskeskuksen tutkimuskuplapetikattilassa. Suurimman ongelman aiheutti ylimitoitetusta polttoaineen syöttöjärjestelmästä seurannut polttoaineen syklitys. Polttoaineen syklitys aiheutti voimakkaita lämpötilanmuutoksia tulipesässä, josta on palamisen hallinnan lisäksi harmia myös kattilakeraamien kestävyydelle. Toisena merkittävänä ongelman havaittiin palamisilmamittausten suuresta mitta-askeleesta johtuva heikko säätötarkkuus. Pienen kokoluokan kattiloissa säätötarkkuuden tulee vastata pienemmän kokoluokan edellyttämiä pienempiä virtauksia.

Kaiken kaikkiaan työ luo hyvän pohjan tutkimuskuplapetikattilan käytön jatkamiselle ja toteutettujen koeajojen perusteella työ antaa myös hyviä viitteitä tutkimuskeskuksen puutteista. Työn aikataulun puitteissa tutkimuskuplapetikattilalla ei keretty toteuttamaan tarkempia polttokokeita johtuen tutkimuskeskuksen valmiusasteesta.

LÄHDELUETTELO

Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J. & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. Espoo. ISBN: 978-951-38-8419-2

Basu P. 2006. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Taylor & Francis Group. ISBN: 978-0-8493-3396-5

Basu P. 2015. Circulating Fluidized Bed Boilers Design, Operation and Maintenance. Springer. ISBN: 978-3-319-06173-3

Bis Z. 2010. Handbook of Combustion, Volume 4: Solid Fuels, Fluidized Beds. Wiley-VCH. ISBN: 978-3-527-32449-1

Boden, T.A., G. Marland & R.J. Andres. 2017. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center. U.S. Department of Energy. Yhdysvallat. [Internetjulkaisu], Viitattu 25.6.2017. Saatavilla: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/glo_2014.html#

Cooper C. D. & Alley F. C. 1986. Air Pollution Control, A Design Approach. Waveland Press, Inc. ISBN: 0-88133-521-5

de Nevers N. 2000. Air Pollution Control Engineering. Second Edition. McGraw-Hill Companies. Singapore. ISBN: 0-07-116207-0

EUR-Lex. 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU, annettu 24 päivänä marraskuuta 2010, teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen) [Internetjulkaisu], Viitattu 14.6.2017. Saatavilla: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32010L0075

EUR-Lex. 2015. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2015/2193/EU, annettu 25 päivänä marraskuuta 2015, tiettyjen keskisuurista polttolaitoksista ilmaan joutuvien epäpuhtauspäästöjen rajoittamisesta [Internetjulkaisu], Viitattu 14.6.2017. Saatavilla: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193

Hakala Harri, Välimäki Jari. 2003. Ympäristön tila ja suojelu Suomessa. Suomen ympäristökeskus. Gaudeamus. Helsinki. ISBN:951-662-875-3

Harbison-Walker. 2005. Handbook of Refractory Practice. Properties of Refractories. Harbison-Walker Refractories Company. [Internetjulkaisu], Viitattu 24.6.2017. Saatavilla: http://www.somitmurni.com/Handbook.pdf

Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P. & Pakkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka. Viides uusittu painos. Edita Oy. Helsinki. ISBN: 951-37-3360-2

Hupa M., Backman R. & Boström S. 1989. Nitrogen Oxide Emissions of Boilers in Filnand. Air & Waste Management Association. Volume 39. No. 11. ISSN: 0894-0630 Viitattu: 27.2.2017. Saatavilla: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/08940630.1989.10466644

Hyppänen T. & Raiko R. 2002. Poltto ja Palaminen: Leijupoltto. Toinen täydennetty painos. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. ISBN: 951-666-604-3

Juutilainen O. 2015. Tutkimusleijupetikattilan suunnittelu, kilpailutus ja käyttöönotto. Insinöörin lopputyö. Savonia-ammattikorkeakoulu, energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 31.1.2017. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93584/Juutilainen_Olli.pdf

Khan A.A., de Jong W., Jansens P.J & Spliethoff H. 2008. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology, Volume 90, Issue 1. Elsevier.

Karampinis E. & Grammelis P. 2012. The Bioenergy System Planners Handbook. [Internetjulkaisu], Viitattu 24.1.2017. Saatavilla: http://bisyplan.bioenarea.eu/

Ki-Hyun K., Shamim A. & Ehsanul K. 2011. A review of diseases associated with household air pollution due to the use of biomass fuels. Volume 192, Issue 2. Elsevier.

Lackner M., Palotás Á. & Winter F. 2013. Combustion: From Basics to Applications. First edition. Wiley-VCH. ISBN: 978-3-527-33376-9

Meuronen V. 2006. Biower-koeajo 25. - 28.9.2006. Työraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Millán J. 2013. Fluidization of Fine Powders. Cohesive versus Dynamical Aggregation. Springer. ISBN: 978-94-007-5587-1

Moilanen A., Nieminen M. & Alén R. 2002. Poltto ja Palaminen: Polttoaineiden ominaisuudet ja luokittelu. Toinen täydennetty painos. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. ISBN: 951-666-604-3

Ohlström M., Tsupari E., Lehtilä A. & Raunemaa T. 2005. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT). Espoo. ISBN: 951-38-6721-8

Reader-Harris, Michael. 2015. Orifice Plates and Venturi Tubes. Sveitsi. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-16880-7

Saastamoinen J. 2002. Poltto ja Palaminen: Leijupoltto. Toinen täydennetty painos. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. ISBN: 951-666-604-3

Savonia-ammattikorkeakoulu. Varkauden energiatutkimuskeskuksen materiaalit. Tavarantoimittajien toimittamat materiaalit hankinnoista. Savonian sisäinen verkkolevy. (Savonia)

Spliethoff H. 2010. Power Generation from Solid Fuels. Springer. Berliini. ISBN: 978-3-642-02856-4

Suomen ympäristökeskus SYKE. 2015a. Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa. [Internet julkaisu] Viitattu 28.3.2017. Saatavissa: https://goo.gl/NmhA7y

Suomen ympäristökeskus SYKE. 2015b. Pysyvät orgaaniset yhdisteet (POP): Dioksiinit ja furaanit, PCDD/F-yhdisteet. [Internet julkaisu] Viitattu 28.3.2017. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B023F2743-DD13-4DAC-8C34-23E22542BE64%7D/94311

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2015. Sähkön ja lämmön tuotanto. Tilastokeskus. Helsinki. ISSN=1798-5072 [Internetjulkaisu] Viitattu: 25.6.2017.

Suri A. & Horio M. 2010. Handbook of Combustion Volume 4: Solid Fuels, Solid Biomass Combustion. Wiley-VCH. ISBN: 978-3-527-32449-1

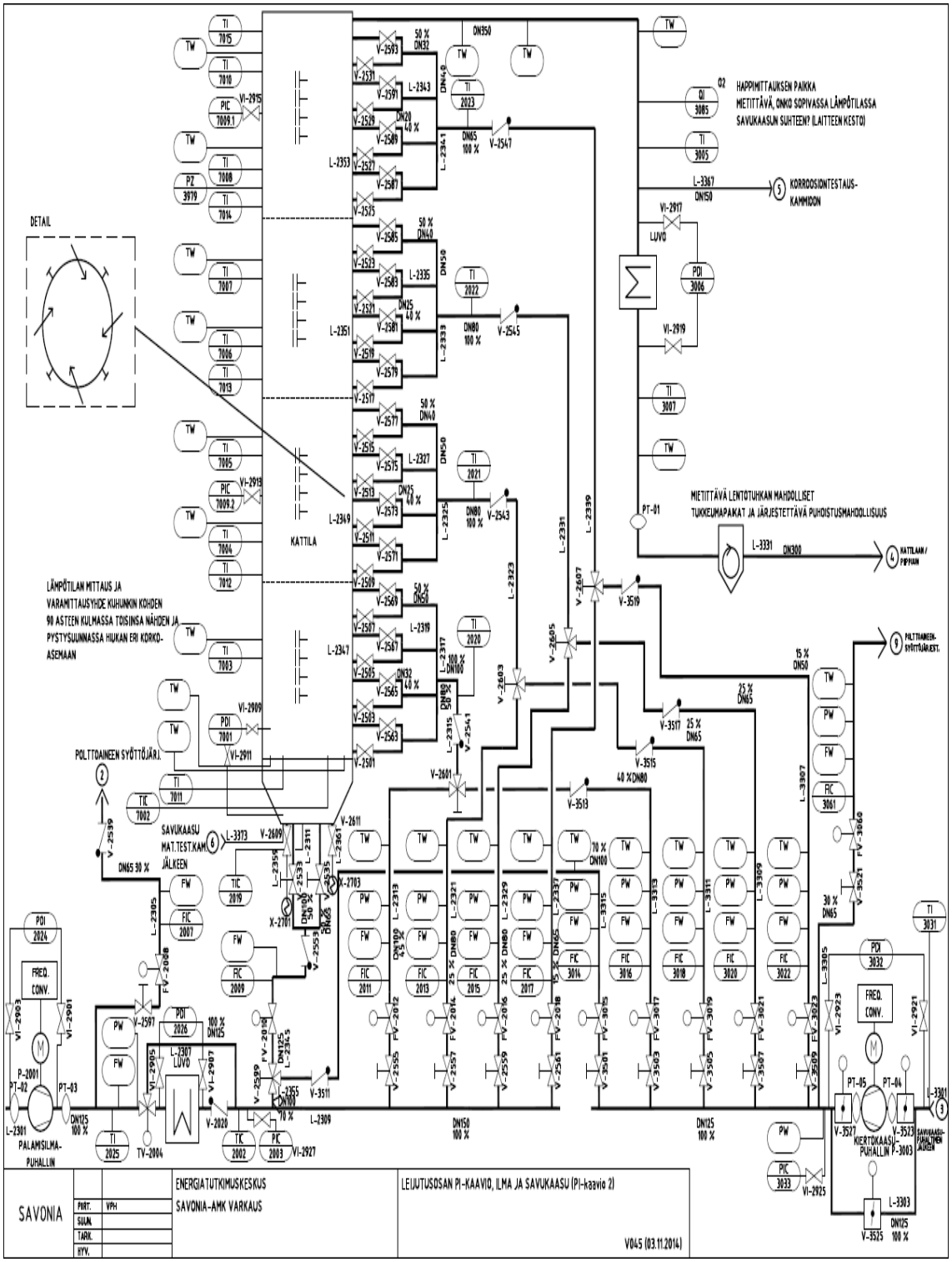
Thermopedia. 2011. Fluidized bed. Viitattu 2.2.2017. Saatavilla: http://www.thermopedia.com/content/46/

UNEP (United Nations Environment Programme). Technical Study Report on Biomass Fired Fluidized Bed Combustion Boiler Technology For Cogeneration. [Internetjulkaisu], viitattu 21.3.2017.

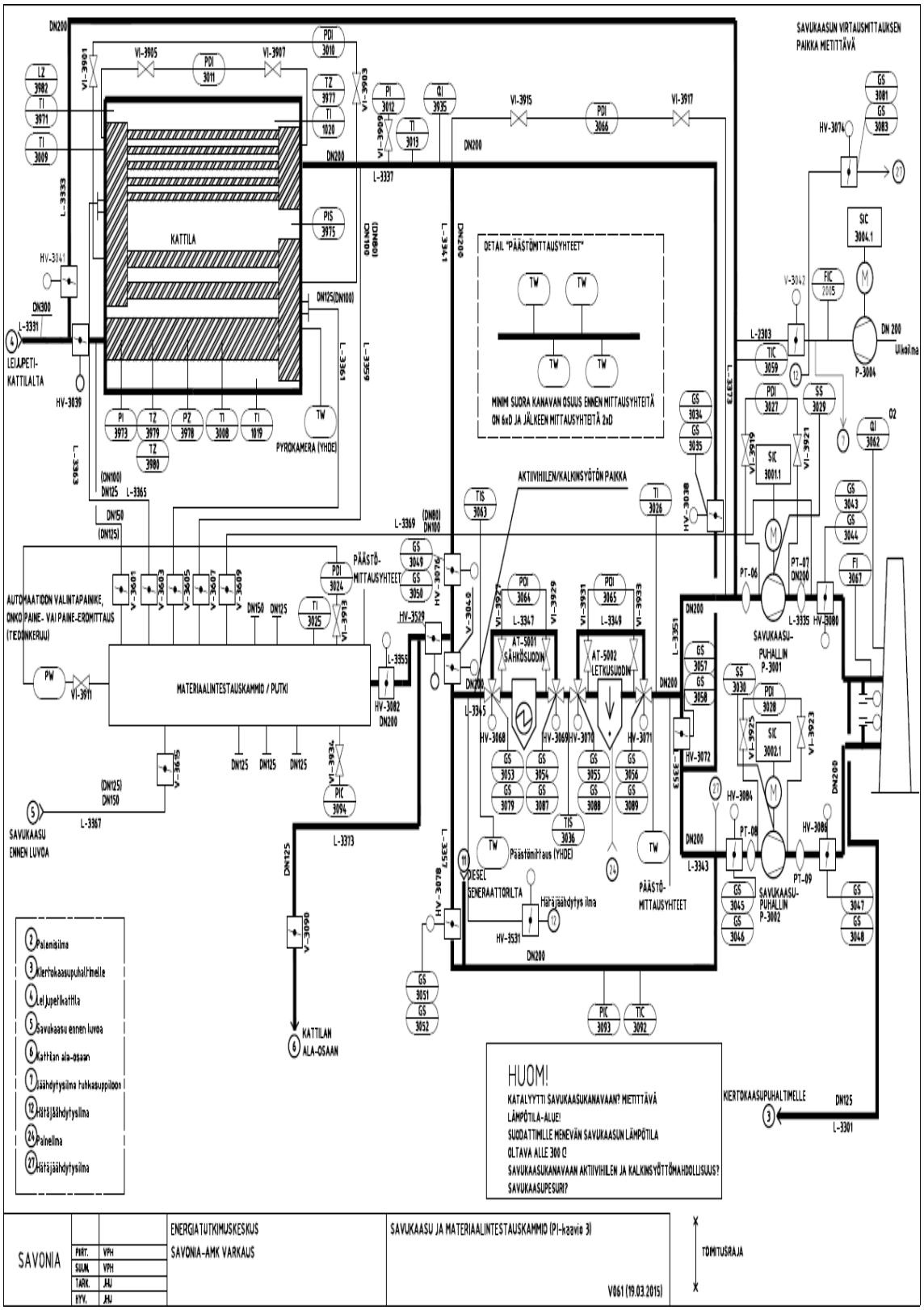
Vamvuka D. 2010. Handbook of Combustion, Volume 4: Solid Fuels, Overview of Solid Fuels Combustion Technologies. Wiley-VCH. ISBN: 978-3-527-32449-1

Vakkilainen E. 2012. Höyryn kehitys biomassalla. BH50A0800 Höyrykattilatekniikka - luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

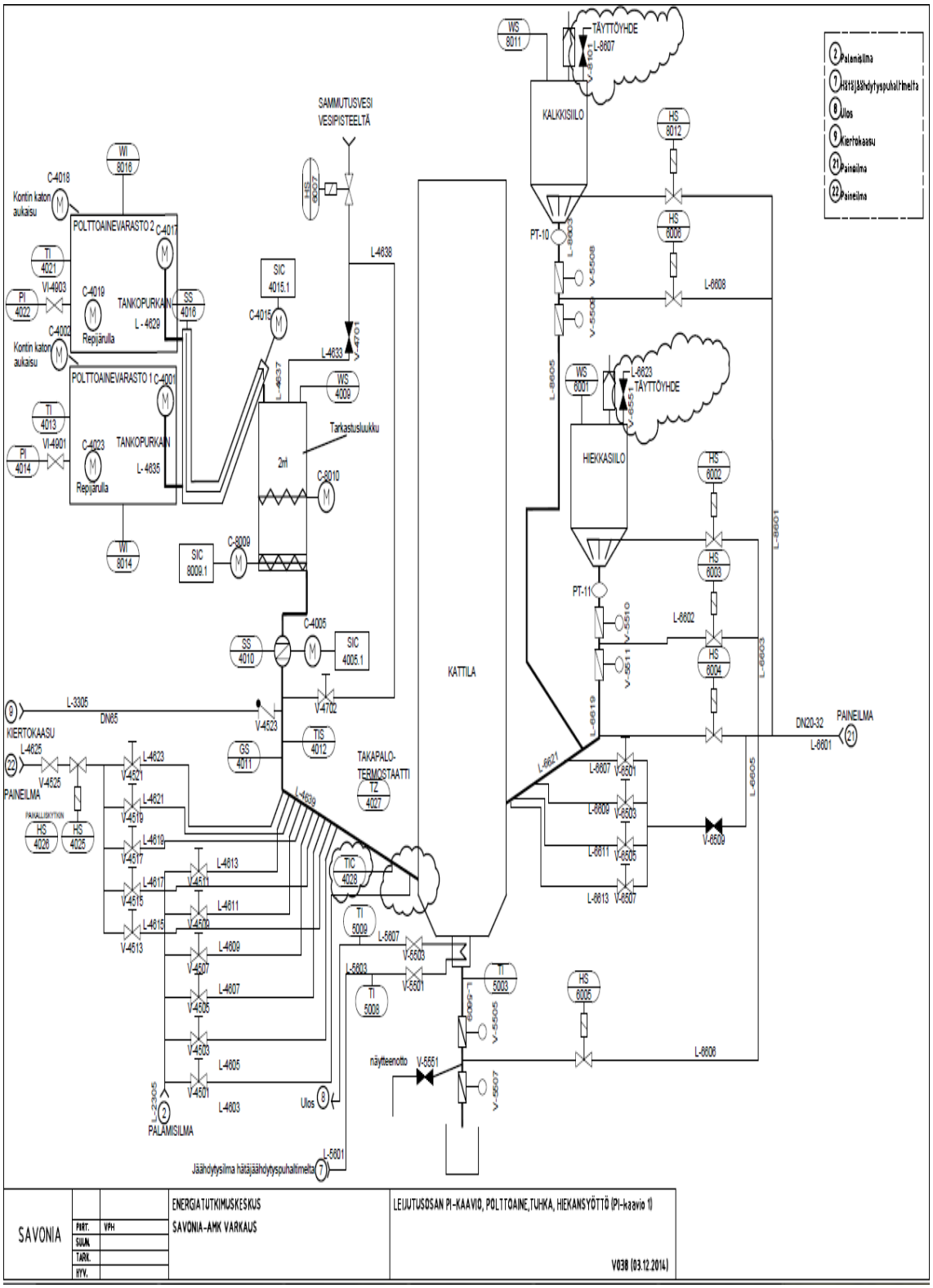
LIITE I. TUTKIMUSKUPLAPETIKATTILAN PI-KAAVIOT



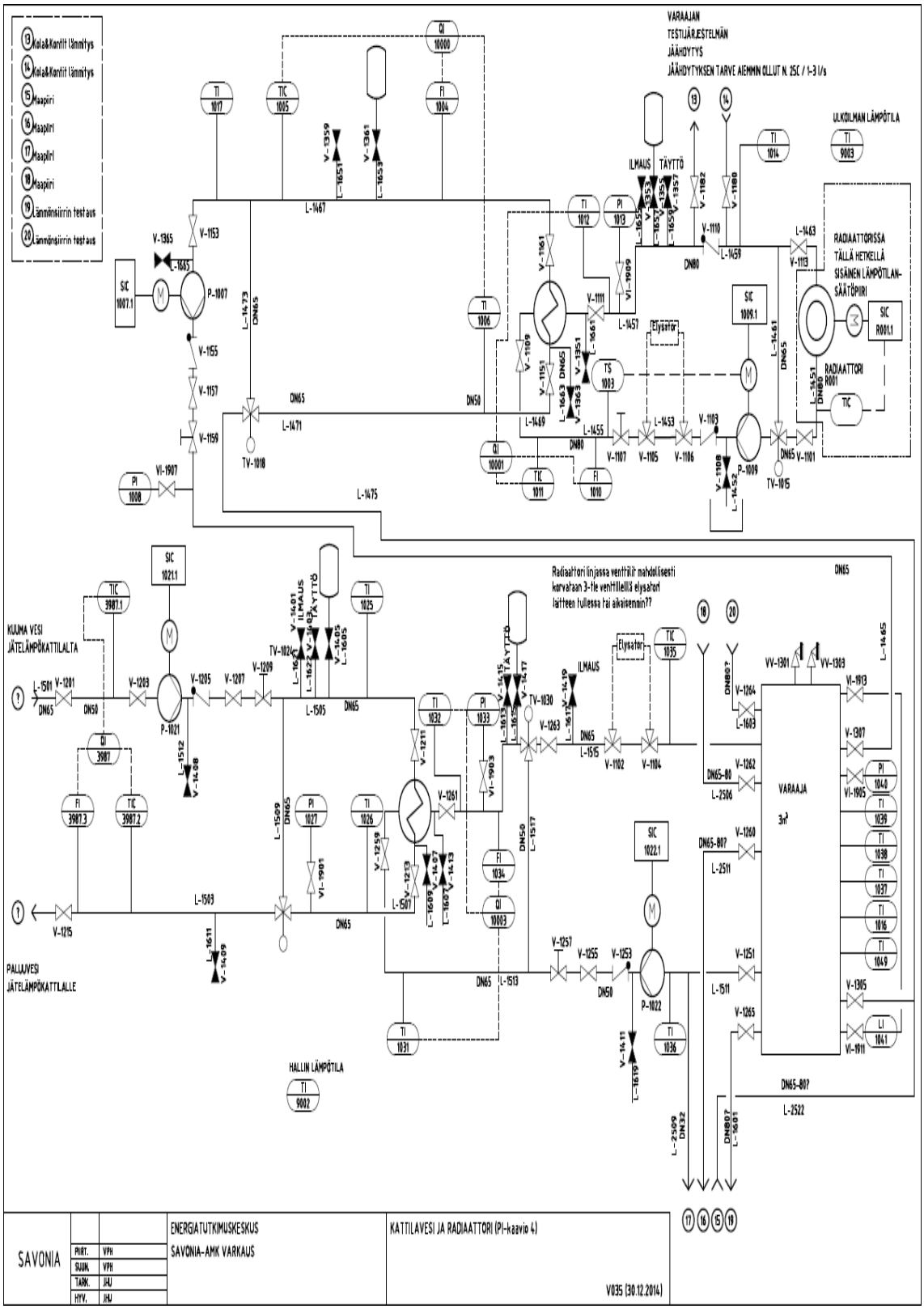
Kuva 1. Tutkimuskuplapetikattilan ilmansyöttöjen ja kiertokaasun PI-kaavio (Savonia)



Kuva 2. Tutkimuskuplapetikattilan savukaasukanavan PI-kaavio (Savonia)



Kuva 3. Tutkimuskuplapetikattilan polttoaineen, tuhkan ja kalkin syöttöjen PI-kaavio (Savonia)



Kuva 4. Jätelämpökattilaveden, lämmönvaraajan ja radiaattorin PI-kaavio (Savonia)

LIITE II. PELLETIN ALKUAINEKOOSTUMUS JA PALAMISTAULUKKO

Taulukko 1. Pellettien aineominaisuuksia ja lämpöarvoja

Keskiarvo 44 puupelletti näytteen perusteelta (Phyllis2)		
Moisture content wt% (ar)	7,27	%
Ash content wt% (dry)	0,51	%
Volatile matter wt% (daf)	84,73	%
Fixed carbon wt% (daf)	15,27	%
Net calorific heating value (daf)	19,39	MJ/kg
Net calorific heating value (dry)	19,29	MJ/kg
Net calorific heating value (ar)	17,71	MJ/kg

Taulukko 2. Pellettien alkuaineanalyysi

Carbon wt% (daf)	51,25	%
Hydrogen wt% (daf)	6,50	%
Nitrogen wt% (daf)	0,11	%
Sulphur wt% (daf)	0,01	%
Oxygen wt% (daf)	42,12	%
Total wt% (daf)	100,00	%
Molar volume V_m	0,022414	m^3/mol

Taulukko 3. Pelletin palamistaulukko 1 kilogrammaa polttoainetta kohden

	massa [g]	mooli-massa [g/mol]	aine-määrä [mol]	O_2-tarve [mol]	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	SO_2 [mol]	
C	424,01	12,01	35,30	35,30	35,30				
H_2	50,67	2,02	25,13	12,57		25,13			
N_2	1,76	78,09	0,02				0,02		
S	0,59	32,07	0,02	0,02				0,02	
O_2	363,01	20,95	17,33	-17,33					
H_2O	151,90	18,02	8,43			8,43			
Tuhka	8,06								
Yhteensä	1000,00			30,56	35,30	33,57	0,02	0,02	
			Ilmasta	0,00	0,00	0,00	115,21	0,00	
			Yli-ilma	6,11			23,04		**Yht.**
			Yhteensä	6,11	35,30	33,57	115,23	0,02	**190,23**
				174,93	mol/kg_{pa}				
			Palamisilman tarve	**3,92**	**m3/kg_{pa}**				

Lambda	1,20
Happipitoisuus	3,21 %

LIITE III. PALAMISILMAVIRTAMITTAUSTEN MITTA-ASKEL

Taulukko 1. Automaation mittausväli ja valmistajan antamat ominaisuudet kuristuslaipoille (Savonia)

Lähettimen lähetystieto

4	20	mA

Automaation skaalaus

0	27678

	FIC-2009	FIC-2011	FIC-2013/15	FIC-2017
C_d	0,61	0,61	0,61	0,61
β	0,52	0,49	0,48	0,44
ε	0,99	0,99	0,99	0,99
d [m]	0,07	0,05	0,04	0,03
ρ [kg/m^3]	1,2	1,2	1,2	1,2
Δp_{min} [Pa]	0	0	0	0
Δp_{max} [Pa]	4000	3500	3500	3500
Δp [kPa]	0,15	0,13	0,13	0,13
$\Delta q_{v,min}$ [m^3/h]	**4,13**	**2,27**	**1,27**	**0,77**