

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Valtteri Laine

TUTKIMUSKATTILAN TASELASKENTA

Työn tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen
 Tutkimusjohtaja Ari Puurtinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Valtteri Laine

Tutkimuskattilan taselaskenta

Diplomityö

2016

83 sivua, 26 kuvaa, 17 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen
Tutkimusjohtaja Ari Puurtinen

Hakusanat: tutkimuskattila, kuplapetikattila, leijupetikattila, taselaskenta, säätölaskenta

Diplomityön tavoitteena oli luoda Varkauden energiatutkimuskeskuksen tutkimuskäyttöön tarkoitettua kuplapetikattilan tase- ja säätölaskenta. Työssä on esitelty yleisesti kuplapetikattiloiden teoriaa ja tarkasteltu lyhyesti kuplapetikattilan muodostamaa kokonaisuutta energiantuotannossa.

Työssä käsitelty tutkimuskattila ei ehtinyt valmistua ennen tätä diplomityötä, joten mittauksia käytön ajalta ei voitu suorittaa ja sisällyttää tähän työhön. Lisäksi mahdolliset käytössä havaittavat korjaukset ja parannukset taselaskentaan jäivät tämän työn tarkastelun ulkopuolelle. Taselaskennan muodostamisessa hyödynnettiin kattilan suunnitteluvaiheessa luotuja säätö- ja PI-kaavioita. Säätömekaniikkaa luodessa huomioitiin mahdollisimman tarkasti automaatiojärjestelmän vaatimukset ja suorituskky. Työssä on esitetty suuri määrä kattilalaskennan kannalta keskeisiä yhtälöitä. Prosessia ja säätömekaniikkaa mallinnettiin laskentaperusteisesti, työssä on esitetty yhtälöistä saatavat tulokset kattilaa ajettaessa tyypillisillä arvoilla 100 %:n teholla.

Työn tuloksena tutkimuskattilalle saatiin säätömekaniikka, jolla pystytään arvioimaan viipymäaika kattilassa. Lasketun viipymäajan avulla polttoprosessi kattilassa voidaan suunnitella ja suorittaa tutkimuskäyttöön vaaditulla tarkkuudella ja laissa säädettyjen määräyksien mukaan, mikäli kierrätyspolttoainetta käytetään yli 50 tonnia vuodessa.

ABSTRACT

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

Valtteri Laine

Mass and energy balance calculations for research boiler

Master's thesis

2016

83 pages, 26 figures, 17 tables and 4 appendices

Examiners: Professor Esa Vakkilainen
Research Director Ari Puurtinen

Keywords: boiler, BFB, bubbling fluidized bed, mass and energy balance calculations

This thesis focuses on creating mass and energy balance calculation for bubbling fluidized bed boiler (BFB) in Varkaus Energy Research Center. General theory and background is presented on BFB technology and a short review on energy system based on a BFB boiler.

The research boiler investigated in this thesis did not complete construction before this report was finished, for example online measurements could not be done to the boiler. Due to this, improvements and modifications from operation to the calculations are not included in this work. Mass and energy balance and control calculations are based on P&I and control diagrams created during design phase. Requirements and demands of the automation system were taken into account when creating the calculation. Large number of equations for boiler calculations are presented. The process was modeled based on the calculations, the results from calculations using typical values for operation on 100 % power are included in this work.

As result of this thesis, control mechanics for the boiler were created which can estimate residence time of gases inside the boiler. Using the residence time obtained from the calculations, the combustion process can be designed and executed with precision required for research. Also in case recovered fuel (waste) is used in excess of 50 tons per year, the process can be designed to meet requirements made by the law regarding combustion of waste material (151/2013).

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa vuonna 2016. Työn ohjaajana toimi DI Jukka Huttunen. Työ tehtiin yliopiston Varkauden yksikössä yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa.

Suuri kiitos kuuluu Savonia-ammattikorkeakoululle, joka on rohkeasti vienyt eteenpäin Varkauden energiatutkimuskeskus -hanketta. Kiitän myös ohjaajani Jukka Huttusta, jolta olen aina saanut asiantuntevia neuvoja projektiin liittyen. Kiitokset kuuluvat myös erinomaiselle työyhteisölle niin ammattikorkeakoulun kuin yliopistonkin puolella. Erityinen kiitos Teemu Leppäselle, jonka kanssa on voinut pohtia laskentaan liittyviä fyysisiä ilmiöitä ääneen ja lisäksi suostumisesta työn oikolukijaksi.

Perhettäni haluan kiittää tuesta ja kannustuksesta opiskeluni aikana, rohkaisusta oman alani valitsemiseen ja voimakkaasta läsnäolosta elämässäni. Kiitos.

Varkaudessa 13. huhtikuuta 2016

Valtteri Laine

Valtteri Laine

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	7
1 JOHDANTO	10
1.1 TYÖN TAVOITTEET	14
1.2 TYÖN SISÄLTÖ	14
2 KUPLAPETIKATTILAN TOIMINTAPERIAATE	15
2.1 PÄÄKOMPONENTIT JA RAKENNE	19
2.1.1 Höyry- ja vesivirtaus	20
2.1.2 Ilma- ja savukaasuvirtaus	21
2.1.3 Polttoaine- ja tuhkavirtaus	23
2.1.4 Tukijärjestelmät	23
3 TUTKIMUSKATTILAN TOIMINTAPERIAATE JA MITTAUSJÄRJESTELYT	25
3.1 PÄÄKOMPONENTIT	25
3.1.1 Leijupetikattila	25
3.1.2 Puhaltimet	26
3.1.3 Pumput	28
3.1.4 Jätelämpökattila	29
3.1.5 Savukaasun puhdistusjärjestelmät	30
3.1.6 Polttoaineen syöttöjärjestelmä	32
3.2 SÄÄTÖVENTTIILIT	33
3.3 ANTURIT	34
3.3.1 Lämpötila-anturit	35
3.3.2 Paineanturit	35
3.3.3 Virtaus- ja happimittaukset	36
3.4 PI-KAAVIOT JA PROSESSI	36
3.5 SÄÄTÖPERIAATE JA -KAAVIOT	39
4 TUTKIMUSKATTILAN TASELASKENTA	44
4.1 TEORIA	45
4.1.1 Polttoaineen syötön säätö $f_1(x)$	47
4.1.2 Palamisilmapuhaltimen säätö $f_2(x)$	52
4.1.3 Säätöventtiilien ohjaus $f_3(x)$	53
4.1.4 Savukaasun jäännöshapen säätö $f_4(x)$	54
4.1.5 Derivoiva jäännöshapen säätö $SUM(k-1)$	54

4.2	AUTOMAATION KÄYTTÖLIITTYMÄÄN SYÖTETYT JA ESIMERKKILASKUISSA KÄYTETYT ANTUREIDEN ARVOT	58
5	LASKENTA JA TULOSTEN TARKASTELU	60
5.1	POLTTOAINEEN SYÖTÖN SÄÄTÖ $F1(x)$	61
5.2	PALAMISILMAPUHALTIMEN SÄÄTÖ $F2(x)$	64
5.3	SÄÄTÖVENTTIILIN OHJAUS $F3(x)$	65
5.4	SAVUKAASUN JÄÄNNÖSHAPEN SÄÄTÖ $F4(x)$	66
5.5	DERIVOIVA JÄÄNNÖSHAPEN SÄÄTÖ $SUM(k-1)$	67
5.6	KIERTOKAASU- JA SAVUKAASUPUHALTIMET	71
6	YHTEENVETO	73
	LÄHDELUETTELO	75

Liitteet

Liite I	Leijupetikattilan ja savukaasujen PI-kaaviot
Liite II	Venttiilien virtauksen k- ja Z-arvot
Liite III	Anturit, säätöventtiilit ja laitetunnukset
Liite IV	Laskennassa käytetyt vakiot ja arvot

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	pinta-ala	[m ²]
C	säteily- ja johtumishäviö kerroin	[-]
d	halkaisija	[mm], [m]
dx	muutosnopeus	[-]
F	voima	[N]
\dot{F}	voimavektori	[N]
H	pumpun nostokorkeus	[m]
k	paineen häviökerroin (venttiilille)	[-]
K_{VS}	venttiilin virtauskerroin	[m ³ /h]
L	pituus	[mm], [m]
m	massa	[g], [kg]
M	moolimassa	[g/mol]
n	ainemäärä	[mol]
n_{\max}	suurin pyörimisnopeus	[1/min]
p	paine	[Pa]
P	teho	[W], [kW]
Q	lämpöarvo	[MJ/kg]
q_m	massavirta	[kg/s]
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s], [m ³ /h]
R	moolinen kaasuvakio	[J/mol·K]
t	aika	[s]
T	lämpötila	[°C], [K]
v	nopeus	[m/s]
V	tilavuus	[m ³]
V_m	ideaalikaasun moolitilavuus normaalitilassa	[m ³ /mol]
x	osuus, muuttuja	[%], [-]
z	korjauskerroin	[-]
Z	puristuvuuskerroin (ilmalle)	[-]

Kreikkalaiset kirjaimet

α	kulma	[°]
----------	-------	-----

Δp	paine-ero	[Pa]
λ	ilmakerroin	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
Σ	summa	[-]

Alaindeksit

a1	kattilan ylin segmentti
a2	kattilan 2. ylin segmentti
a3	kattilan 3. ylin segmentti
a4a	kattilasegmentti polttoaineen, hiekan ja kalkinsyötölle
a4b	kattilan hiekkapedin kohdan segmentti
a4c	kattilan alin segmentti, leijutusilma
ai	ali-ilma
dry	kuiva
i	sisä-
jt	jakotukki
ka	keskiarvo
kk	kiertokaasu
LHV	alempi tehollinen lämpöarvo
lt	lämpötila
luvo	ilman esilämmitin
mit	mitattu
NTP	normaalilämpötila ja -paine (293,15 K ; 101 350 Pa)
pa	polttoaine
paj	polttoainejärjestelmä
pi	palamisilma
pt	palotila
s1-4	sekundääri-ilma 1-4. taso
si	sekundääri-ilma
sk	savukaasu
tav	tavoite
wet	kosteus
x	x-suuntainen vektori

xy	x- ja y-suuntaisten vektoreiden summavektori
y	y-suuntainen vektori

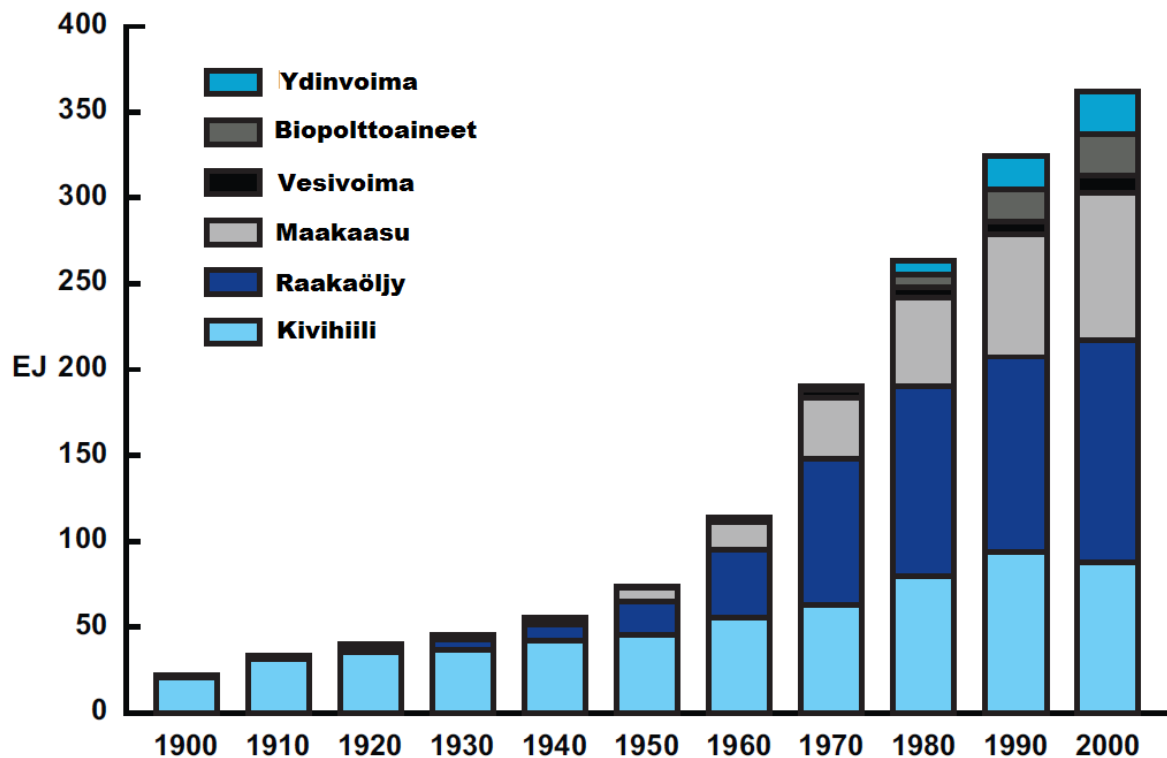
Lyhenteet

bbf	barrel (mittayksikkö, noin 159 litraa)
BFB	Bubbling Fluidized Bed (kuplapeti)
CFB	Circulating Fluidized Bed (kiertopeti)
CSP	Concentrated Solar Power (keskittävä aurinkovoima)
d	day (päivä)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (kansainvälinen paneeli ilmastonmuutoksesta)
ka	keskiarvo
kk	kiertokaasu
luvo	ilman esilämmitin
m-%	massaprosentti
mek	mekaaniset
ORC	Organic Rankine Cycle (orgaaninen Rankine-sykli)
pa	polttoaine
pi	palamisilma
PV	Photovoltaics (aurinkosähkö)
sk	savukaasu

1 JOHDANTO

Energiankulutus maailmassa on moninkertaistunut monta kertaa historian saatossa. Käyttämällä energiaa uusilla tavoilla on kautta historian voitu kasvattaa ihmisten elintasoja ja korvata yksinkertaisia tehtäviä. Aikoinaan lihasvoimin suoritettava siirtotyö on voitu korvata energialähteitä hyödyntävillä koneilla: esimerkiksi höyryturbiineilla ja polttomoottoriautoilla. Kehitys ei pysähtynyt ensimmäiseen höyryveturiin; nykyisin on käytössä magneettiseen levitatioon perustuvia korkeanopeusjunia. Kuvassa 1.1 on esitetty energiankulutus maailmassa vuosien 1900–2000 välillä. Kasvu on ollut suurta johtuen pitkälti kahdesta eri tekijästä: väestönkasvu ja uudet teknologiat.

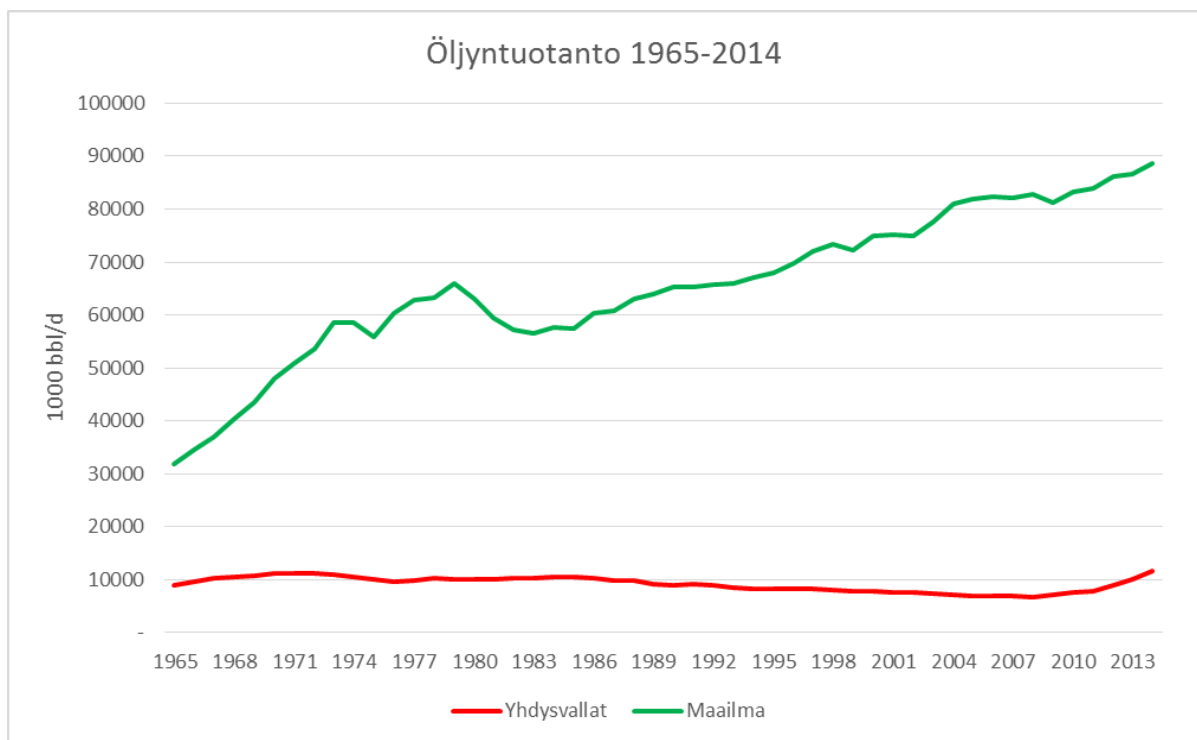
Energialähteet, 1900–2000



Kuva 1.1. Maailman energiankulutus lähteittäin 1900–2000. (Yergin *et al* 2013 s.15).

1900-luvun kasvun energiankulutuksessa mahdollistivat pitkälti fossiiliset energialähteet. Huomattiin, että musta töhnä maan alla sisältää yllättävän paljon energiaa ja on helposti saatavilla. Niinkin helposti, että jo 1956 M. King Hubbert Shell Oil -yhtiöstä epäili

öljyntuotannon saavuttavan huippunsa 1965–1970 Yhdysvalloissa ja vähenevän tasaisesti siitä eteenpäin (Maughan 2015). Kuten kuvasta 1.2 voidaan havaita, Hubbertin ennustus piti osin paikkansa; öljyntuotanto saavutti huippunsa 1972 Yhdysvalloissa ja vähentyi tasaisesti aina vuoteen 2008 asti. Koko maailman tuotannossa öljyn ennustettu loppuminen ei ole näkynyt, uusia varantoja on löydetty ja otettu käyttöön tasaiseen tahtiin. Vähennykset tuotannossa ovat olleet enemmän poliittisia: sotia, öljyntuottajakartelleja ja kauppasaartoja. Öljyhiekka ja liuskeöljy mahdollistivat tuotannon kasvun vuodesta 2008 eteenpäin: 2014 Yhdysvalloissa tuotettiin enemmän öljyä kuin koskaan ennen. Ennustukset öljyn ja muiden fossiilisten polttoaineiden loppumisesta vauhdittivat panostusta uusien teknologioiden kehitykseen, mutta käännekohtana voidaan pitää fossiilisten polttoaineiden palamisen vaikutusten havaitsemista ilmakehästä: ilmastonmuutosta.

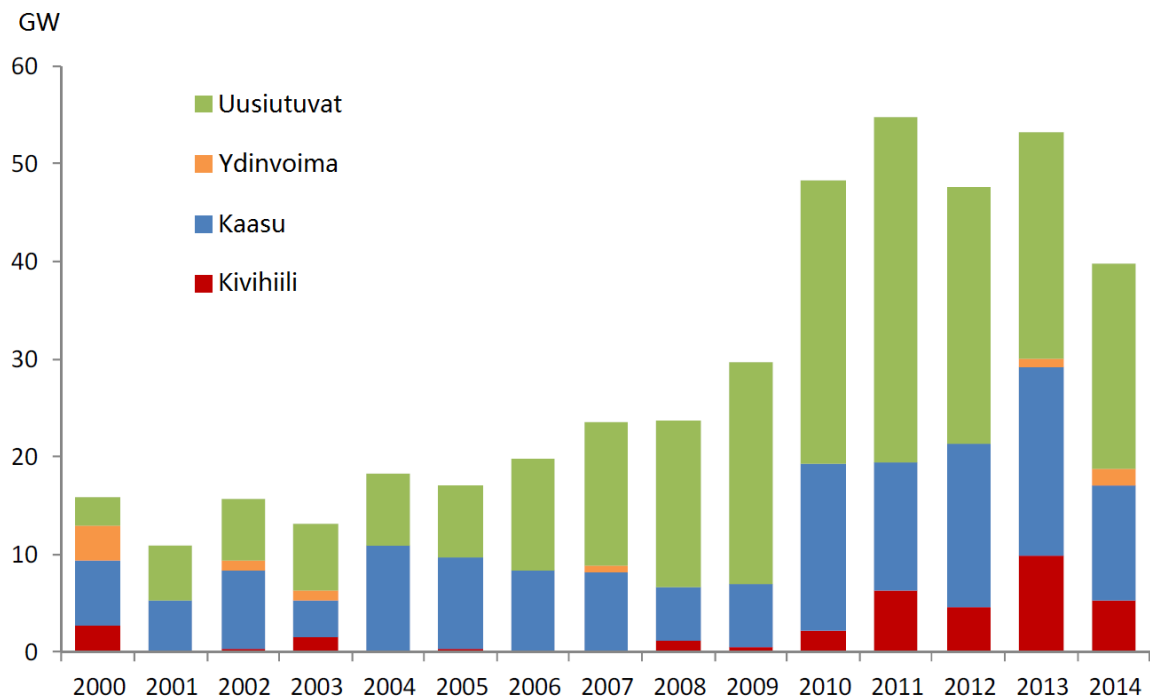


Kuva 1.2. Öljyntuotannon kehitys Yhdysvalloissa ja maailmassa 1965–2014. (BP 2015).

Ilmastonmuutos ja kasvihuoneilmiö eivät olleet uusia asioita vuosituhannen vaihteen lähestyessä. Ruotsalainen kemisti Svante Arrhenius päätteli jo vuonna 1896 teollisen ajan kivihiilen polton vahvistavan maapallon luontaista kasvihuoneilmiötä ja että tulevat sukupolvet mahdollisesti hyötyisivät siitä. Guy Callendar osoitti vuonna 1938, että ilmasto olisi lämmennyt viimeisen vuosisadan aikana ja samaan aikaan ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet olisivat kasvaneet: hän ehdotti ilmaston lämmenneen hiilidioksidin takia. Callendarin teoriaan ei

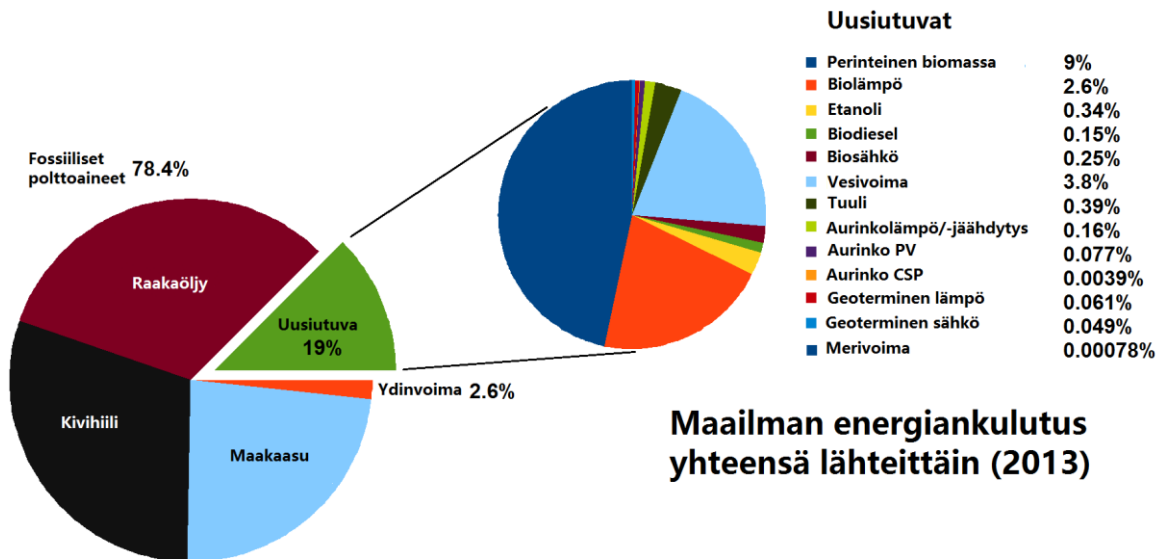
uskottu. Ilmastonmuutokseen ja sen mahdollisiin vaikutuksiin herättiin poliittisesti vasta vuosisadan loppupuolella todisteiden alkaessa kasaantua ja energiankulutuksen päästöjen jatkaessa kasvuaan. Vuonna 1995 kansainvälisen IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) toisessa arviointiraportissa todettiin, että todisteet osoittavat ihmisen toiminnan aiheuttaneen ilmastonmuutoksen. IPCC:n raportti käynnisti kansainväliset talkoot hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi maailmanlaajuisella tasolla; talkoot jotka jatkuvat yhä ja eivätkä välttämättä koskaan loppu. (Black 2013).

Taistelu hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi on alkanut ja kuten kuvasta 1.3 voidaan havaita, että uutta uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa sähkötuotantokapasiteettia on asennettu Euroopassa merkittävästi fossiilisia lähteitä enemmän vuodesta 2006 eteenpäin. Talouskriisi(e)n jälkeisessä Euroopassa investoinnit uusiutuviin vähenivät merkittävästi, 2015 investoinnit tippuivat rahana mitattuna 18 % vuoteen 2014 verrattuna. Koko maailmaa tarkastellessa investoinnit rahana mitattuna kasvoivat 2015 vain 4 % verrattuna vuoteen 2014 – kapasiteetissa mitattuna kasvua tapahtui lähes 30 %. Tuulivoimaa rakennettiin vuonna 2015 64 GW ja aurinko PV:tä 57 GW. (MacDonald 2016).



Kuva 1.3. Uudet investoinnit sähköntuotannon kapasiteettiin Euroopassa 2000–2011, 2012–2014 arvio. (Baritaud 2012 s.34).

Vaikka uusiutuvaan energiaan on maailmanlaajuisesti panostettu merkittäviä summia rahaa, on sen osuus yhä pieni kokonaisenergiankulutuksesta. Kuvassa 1.4 on esitetty maailman energiankulutus lähteittäin vuonna 2013: noin 4/5 fossiilista ja 1/5 uusiutuvaa. Tuulivoiman osuus 0,39 % ja aurinko PV:n 0,077 %.



Kuva 1.4. Maailman energiankulutus lähteittäin 2013. (Wikipedia Commons 2014).

Olemme vielä pitkän matkan päässä täysin tai lähes hiilivapaasta energiajärjestelmästä. Kääntääksemme fossiilisen ja uusiutuvan energian osuudet ympäri emme voi turvautua yksittäisiin uusiutuvan energianlähteisiin: biomassakin on uusiutuvaa vain niin kauan kun hyödynnämme vähemmän kuin uutta kasvua tapahtuu vuositasolla. Tulevaisuuden ympäristöystävällinen energiajärjestelmä on kattava sekoitus eri uusiutuvia energianlähteitä ja tähän Varkauden energiatutkimuskeskus tuo oman panoksensa.

Varkauden energiatutkimuskeskus on Savonia-ammattikorkeakoulun rakentama energia-alan tutkimus-, kehitys- ja testausympäristö. Tutkimuskeskukseen rakennetaan valmiudet tutkia, kehittää ja testata kierrätyspolttoaineiden, hakkeen, turpeen sekä pyrolyysiöljyn palamista arina- ja leijupetikattilaympäristöissä. Lisäksi on mahdollista testata materiaalien korroosioikäytymistä, tutkia palamisesta muodostuvia päästöjä ja niiden hallintaa. Kokonaisuuteen kuuluu myös maalämpöjärjestelmä, lämmöntalteenotto ja -varastointi sekä mahdollisesti tulevaisuudessa sähköntuotantoyksikkö.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena on luoda Varkauden energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilalle toimiva säätö- ja taselaskenta. Laskennassa on huomioitu mahdollisimman tarkasti automaatiojärjestelmän asettamia vaatimuksia ja mahdollisuuksia. Automaatiosta saatavaa anturidataa on käytetty mahdollisimman paljon. Käytetyt oletukset, yksinkertaistukset ja arviot on kirjattu ylös, jotta ne voidaan varmistaa laitoksen käyttöönotossa.

Tavoitteena on saada aikaan leijupetikattilalle mahdollisimman itsenäinen ja automatisoitu säätömekaniikka, joka mahdollistaisi helpon ja yksinkertaisen käytön. Samaan aikaan haluttiin luoda käyttäjälle mahdollisuus säätää monia parametreja erilaisten palamisen olosuhteiden muodostamiseksi. Työssä luodun säätömekaniikan pohjana toimivat tutkimuskeskuksen PI-kaaviot ja muutamien komponenttien yleistason säätökaaviot.

1.2 Työn sisältö

Työssä on aluksi käsitelty kuplapetikattiloiden yleistä teoriaa ja kuplapetikattiloiden muodostamaa prosessikokonaisuutta energiantuotannossa, huomioiden etenkin Varkauden energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilan erityispiirteet. Luvussa 3 on käsitelty tutkimuskattilan prosessi- ja säätökaavioita, pääkomponentteja ja mittavälineitä. Luvussa 4 on esitetty kattilan massa- ja energiatase, laskennassa käytetyt yhtälöt ja esimerkkilaskuissa käytetyt alkuarvot.

Luvussa 5 on esitelty yhtälöistä saatavat tulokset ajettaessa kattilaa 100 %:n teholla. Luku 6 kokoo edelliset luvut yhteen. Työhön oli tarkoitus sisällyttää laitoksen käynnistyksestä saatavaa dataa säätömekaniikan toimivuudesta ja mahdollisista parannuksista siihen, mutta leijupetikattilan käynnistyksen aikataulu ei suonut mahdollisuutta tähän.

2 KUPLAPETIKATTILAN TOIMINTAPERIAATE

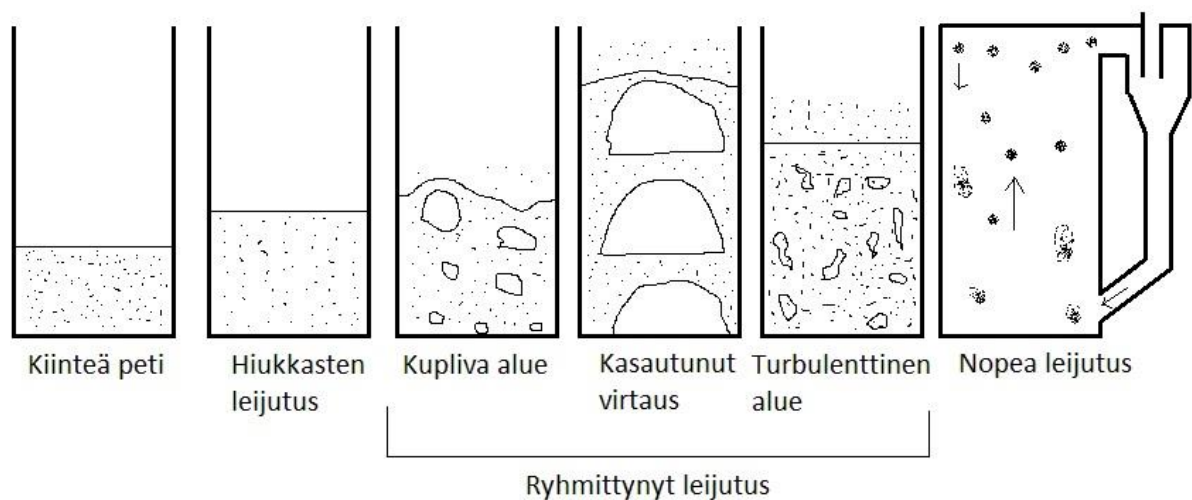
Leijupetien historian voidaan sanoa alkaneen 1921, kun saksalainen Fritz Winkler demonstroi kivihiilen kaasutusta leijupedissä. Kiinteä aines saatiin leijumaan kaasun voimalla lopputuloksen näyttäessä kiehuvalta nesteeltä. Leijuttamalla saatiin kiinteä, rakeinen aines käyttäytymään nesteen tavoin. Kuplapetikattiloiden käyttöä höyryntuotantoon ajoi Douglas Elliott 1960-luvulla, ideana kivihiilen polttaminen kaasuttamisen sijaan. Ensimmäiset BFB-kattilat toimitettiin 1970-luvulla ja ensimmäinen CFB-kattila 1979. (Basu 2006 s.1; Matilainen 2014 s.60).

Leijupetejä on käytetty useisiin tarkoituksiin, kuten esimerkiksi hiilivetyjen krakkaukseen ja reformointiin, kivihiilen koksaukseen ja kaasutukseen, metallimalmin pasutukseen, Fischer-Tropsch synteesiin, polyeteenin valmistukseen, kalkkikiven kalsinointiin, jätteiden polttoon, ydinpolttoaineen käsittelyyn ja useisiin muihin tarkoituksiin. Leijupetien ehdoton etu on saada kiinteä aines käyttäytymään nesteen tavoin, jolloin reaktiopinta-ala ja sekoittuminen pedin sisällä kasvavat aivan omaan luokkaansa verrattuna kiinteisiin peteihin. (Thermopedia).

Leijutuksen peruseriaate on hyvin yksinkertainen. Painovoiman vaikutukselle hiukkaseen luodaan yhtä suuri käänteinen voima alhaalta puhallettavalla kaasulla. Tämä voima saavutetaan minimileijutusnopeudessa, joka on pienin kaasun nopeus millä peti leijuu. Kiinteässä pedissä kiinteät hiukkaset nojaavat toisiinsa, tukivoimat tulevat kontaktista toisiin hiukkasiin. Pedin paino jakautuu tasaisesti kontaktin kautta. Kun minimileijutusnopeus saavutetaan, alkavat hiukkaset leijua ja liikkua satunnaisesti törmäten toisiinsa. Kontaktit ja voimat hiukkasten välillä ovat pieniä ja nopeita – kaasun ja kiinteän seos käyttäytyy nesteen tavoin: leijutus on saavutettu. Kaasun nopeuden kasvaessa keskimääräinen etäisyys hiukkasten välillä myös kasvaa, aiheuttaen pedin laajenemisen. (Thermopedia).

Kun leijutus on saavutettu, paine-ero pedin yli pysyy lähes vakiona kuplivalla alueella vaikka kaasun nopeutta kasvatetaan. Pieni kasvu aiheutuu kasvaneesta kitkasta ja taas pieni lasku saattaa aiheutua kanavoitumisesta, tarkoittaen että petiin muodostuu kaasulle kulkureittejä. Kaasun nopeuden kasvattaminen kuplivalla alueella kasvattaa kuplien kokoa. Jos nopeutta kasvatetaan turbulenttisen alueen yli, paine-ero putoaa johtuen petimateriaalin karkaamisesta kaasun mukaan. (Brown 2008).

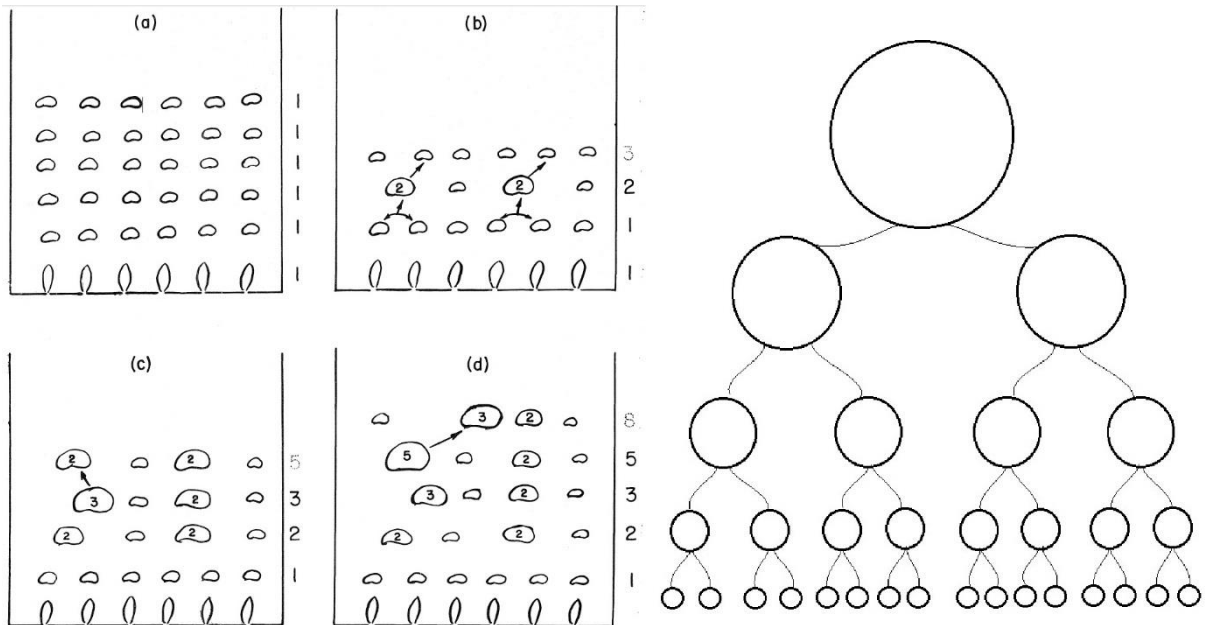
Kuvassa 2.1 on esitetty leijutuksen vaiheet kiinteästä pedistä nopeaan. Kuplapetikattilan kannalta optimaalisimmat virtausalueet ovat kupliva ja turbulenttinen. Kiertopetikattiloissa käytetään nopeaa tai sekoittunutta leijutusta jolloin petimateriaalia karkaa savukaasujen mukana merkittäviä määriä ja sitä täytyy palauttaa takaisin pesään. Kasautuneessa virtauksessa kuplat ovat lähes pesän halkaisijan kokoisia ja ovat haitaksi kattilalle, koska suuret kuplat aiheuttavat arvaamattomia paineiskuja ja huonontunutta kaasun ja kiinteän aineksen kontaktia. (Thermopedia, Kovács 2001).



Kuva 2.1. Leijutuksen vaiheet, kaasun virtausnopeus suurenee vasemmalta oikealle. (Kovács 2001).

Kuplien muodostuminen pedissä on tärkeää petimateriaalin sekoittumisen vuoksi. Kaasukupla työntää yllään ja vetää perävanassaan petimateriaalia ylöspäin pedissä. Perävanan koko on noin 1/3 kuplan koosta. Tästä aiheutuu petimateriaalin laskeutumista pedin muissa osissa. Kuplien kasvulle voidaan esittää kaksi yksinkertaistavaa mallia, Fibonaccin sarjan mukainen ja Daltonin malli. Kuvassa 2.2 on esitetty kuplien kasvu kahden eri mallin mukaan. Todellisuudessa kuplien kasvu on jotain niiden väliltä kuplivalla alueella. Kuplien kasvaessa liian suuriksi ne aiheuttavat paineiskuja. Tältä kasautuneen virtauksen alueelta päästään, jos kaasun nopeutta lasketaan takaisin kuplivalle alueelle tai nostetaan turbulenttiselle. Turbulenttisella alueella kuplien

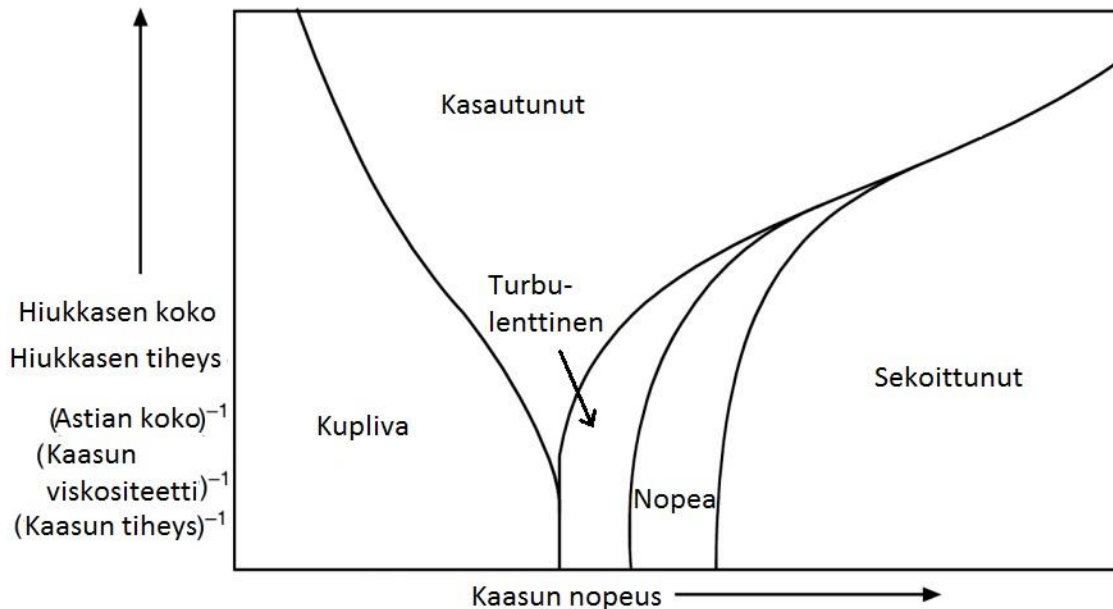
muoto on melko satunnainen, kun taas kuplivalla alueella muotoa kuvaa parhaiten kuvan 2.2 Fibonacci sarjan mukaiset muodot. (Thermopedia).



Kuva 2.2. Vasemmalla kuplien kasvaminen Fibonacci sarjan mukaisesti ja oikealla Daltonin malli.
(Zenz 1978 s.178, Yang 2005 s.73).

Kuvassa 2.3 on esitetty leijutuksen vaiheisiin merkittävästi vaikuttavat ominaisuudet. Yleisin petimateriaali on hiekka ja sen seassa oleva polttoaine palamisen eri vaiheissa. Polttoaineen osuus on tyypillisesti alle kolme massaprosenttia petimateriaalista (Peña 2011 s.8). Lisäksi

petiin on voitu lisätä kalkkia vähentämään esimerkiksi rikin vaikutusta. Kaasun nopeus on tyypillisesti kuplapetikattiloille 1–3 m/s, kierto-leijukattiloille 3–6 m/s. (Khan 2009).



Kuva 2.3. Leijutuksen vaiheisiin vaikuttavat ominaisuudet. (Basu 2006 s.40).

Kattilan koko on vakio, petimateriaalin tiheys pysyy pitkälti samana ja kaasun tiheys ja viskositeetti ovat pitkälti lämpötilasta riippuvaisia. Hiukkasen koko lähtötilanteessa on vakio ja lämpölaajeneminen pientä, mutta kattilassa hiukkasen kokoon voi vaikuttaa merkittävästi pedin lämpötila. Ilmiötä kutsutaan nimellä sintraantuminen, hiukkaset kasaantuvat yhteen pedissä kasvattaen hiukkaskokoa. Sintraantumista esiintyy usealla toisistaan poikkeavalla tavalla. Korkeassa lämpötilassa polttoaineesta syntyvä tuhka saattaa sulaa ja muodostaa lasimaisen faasin hiekan kanssa kasvattaen hiukkaskokoa. Toinen sintraantumisen tapa on emäksisten yhdisteiden sulaminen ja toimiminen sidosaineena hiukkasten välillä, etenkin kalium-, natrium- ja kloori-yhdisteet ja niiden väliset reaktiot voivat aiheuttaa ongelmia kattilassa. (Khan 2009, Peña 2011 s.7).

Käytetyt petilämpötilat vaihtelevat tyypillisesti väliltä 750–900 °C (Crawford 2012), ja yleinen petilämpötila on 850 °C. Korkeampia ja alhaisempia lämpötiloja löytyy, mutta ne ovat valittu huolella polttoaineiden tuhkaominaisuuksien ja käytettävän petimateriaalin mukaan. Lämpötilaerot pedin sisällä ovat alle 2–5 °C, minkä ansiosta saavutetaan leijukattiloiden yksi parhaista ominaisuuksista; tasainen palamislämpötila. Pedin tasaisen lämpötilaprofiilin ja

korkean ominaislämpökapasiteetin takia kuplapetikattiloissa voidaan polttaa merkittävästi huonompilaatuisia polttoaineita kuin perinteisissä arina-tyyppisissä kattiloissa. Polttoaineen ei myöskään tarvitse olla kovin tasalaatuista sillä peti tasoittaa lämpötilaerot tehokkaasti. Verrattuna arinakattiloihin kuplapetikattiloilla saavutetaan pienemmät NO_x -, SO_x ja CO-päästöt johtuen tasaisemmasta ja täydellisemmästä palamisesta, alemmasta palamislämpötilasta ja mahdollisuudesta lisätä kalkkia petiin. Lisäksi biomassaa poltettaessa tuhkan sisältämä kalsium sitoo rikkiyhdisteitä. (Peña 2011 s.7–10, Thermopedia).

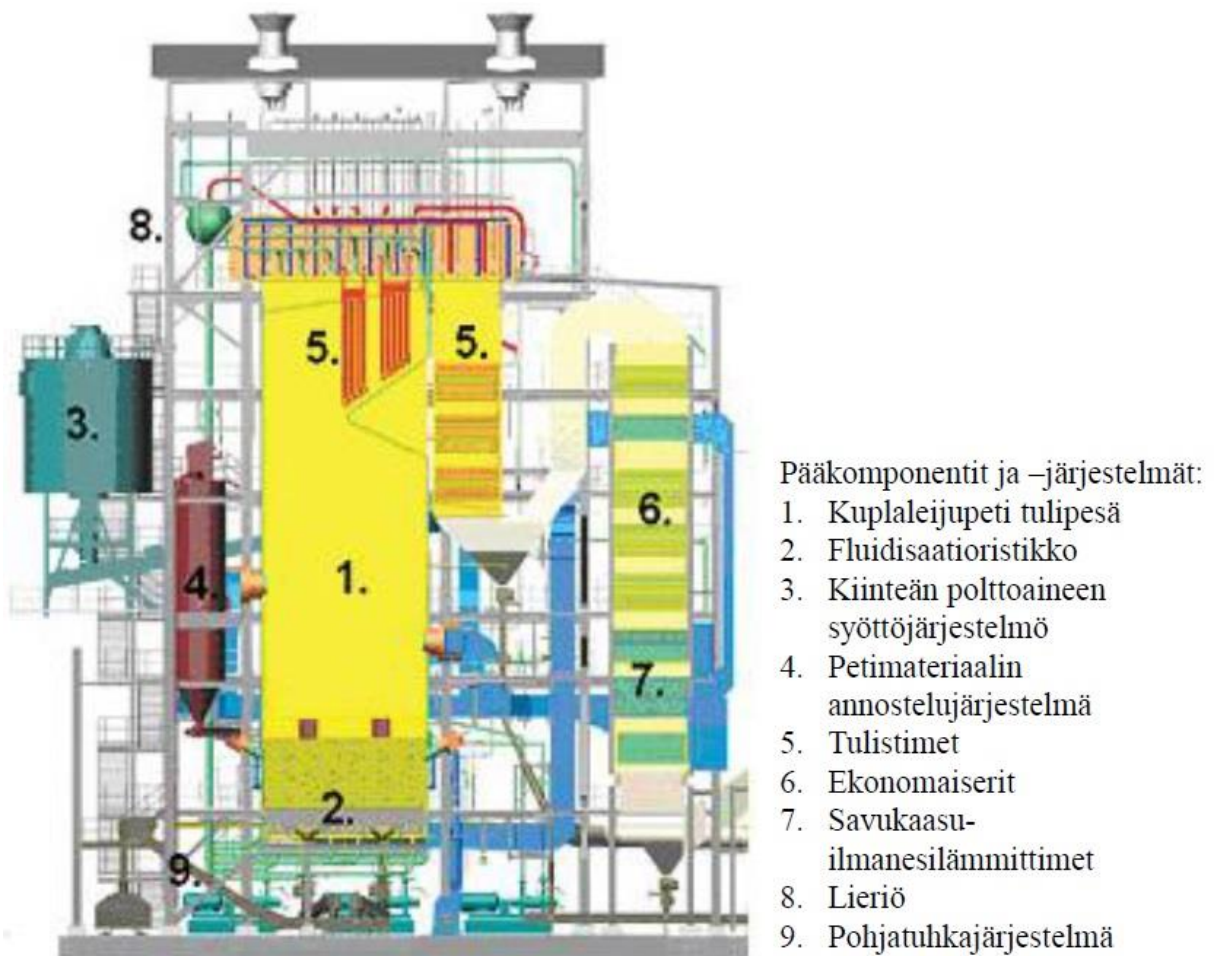
Polttoaineen, petimateriaalin ja kaasun välinen lämmönsiirto pedissä on monimutkainen prosessi. Kaasun ja pedin lämpötilaero pienenee 100-kertaisesti jo 5–10 hiukkasen halkaisijan etäisyydellä pedin alareunasta. Kuplien lämpötila vastaa pedin lämpötilaa jo senttien etäisyydellä pedin alareunasta. Polttoaineen tullessa petiin se lämpenee ja sen sisältämä kosteus ja haihtuvat aineet kaasuuntuvat samanaikaisesti. Tämän jälkeen jäännöshiili palaa ja polttoaine siirtää lämpöenergiaa takaisin petiin. Lämmönsiirto polttoaineen ja pedin välillä tapahtuu kolmella eri tapaa: kaasun ja hiukkasten konvektiolla ja säteilyllä. Säteilyn osuus on pientä, johtuen pienestä lämpötilaerosta polttoaineen, pedin ja kaasun välillä. (Thermopedia).

Kasvattamalla kaasun nopeutta minimileijutusnopeudesta, lämmönsiirto tehostuu koska hiukkaset törmäilevät toisiinsa useammin. Jos kaasun nopeutta kasvatetaan liikaa, hiukkasten konvektiivinen lämmönsiirto vähenee koska hiukkasten väliset etäisyydet kasvavat ja törmäyksiä tapahtuu harvemmin. Silloin kaasun konvektio on hyvin merkittävä osa lämmönsiirrosta. Alle 0,1 mm hiukkasilla (polttoaine ja petimateriaali) 90 % lämmönsiirrosta tapahtuu hiukkasten konvektiolla. Yli 1 mm hiukkasilla vain 20 % lämmönsiirrosta tapahtuu hiukkasten konvektiolla, kaasun konvektio on suuremmassa roolissa. (Thermopedia).

2.1 Pääkomponentit ja rakenne

Kuplapetikattiloiden tarkoitus on yleensä sähkön- ja/tai lämmöntuotanto. Kuvassa 2.4 on esitetty Andritzin biomassan polttoon suunniteltu BFB-kattila, jossa esitetty kuplapetikattilan tärkeitä komponentteja ja järjestelmiä. Kattilaprosessi voidaan jakaa neljään pienempään osaan: höyry- ja vesivirtaus, ilma- ja savukaasuvirtaus, tuhkavirtaus ja polttoainevirtaus (Vakkilainen 2014). Höyry- ja vesivirtaus on lämmön talteenottoa polttoprosessista ja energian muuntamista haluttuun muotoon, kuten esimerkiksi mekaaniseksi voimaksi generaattorille turbiinin avulla.

Ilmavirtaus varmistaa polttoprosessin vaatiman hapen kulkeutumisen tulipesään. Savukaasuvirtaus siirtää polttoprosessissa vapautunutta energiaa lämpöpinnoille ja palaneen, prosessin kannalta inertin kaasun puhdistuslaitteille ja ilmakehään. Polttoainevirtaus siirtää kemiallisiin sidoksiin sitoutunutta energiaa kattilaan lämpöenergiaksi muunnettavaksi palamisessa. Tuhkavirtaus poistaa polttoaineesta jäljelle jääneen kiinteän aineksen pois paloprosessia häiritsemästä.



Kuva 2.4. Andritzin biomassan polttoon suunniteltu BFB-kattila. (Vakkilainen 2014).

2.1.1 Höyry- ja vesivirtaus

Vesihöyrypiiri on energiantuotannon kannalta tärkein osa kuplapetikattilaa. Diplomityössä käsiteltävä kattila on kuitenkin tarkoitettu tutkimuskäyttöön, etenkin palamisen ja korroosion tutkimukseen, jolloin isompien kattiloiden tyypilliset lämmön- ja sähköntuotantolaitteistot olisivat kasvattaneet investointikustannuksia liikaa. Osa lämmöstä saadaan talteen jätelämpökattilalla. Siihen kytketty vesivaraaja lämpenee täydellä teholla arvioiden mukaan

alle 20 minuutissa, joten lämmöntalteenoton osuus kokonaislämpöenergiasta on hyvin pientä. Tutkimuskeskukseen on varattu tilaa sähköntuotantolaitteille, lähinnä pienimuotoiselle ORC-prosessille, mutta silti suurin osa kattilan lämpöenergiasta menee niin sanotusti harakoille prosessiin kytketyn radiaattorin kautta.

Vesi virtaa kattiloissa tulipesän seinillä ja myös mahdollisesti pedissä putkissa; tarkoituksena on veden kiehattaminen höyryksi (UNEP). Vesi- ja höyry erotetaan lieriössä, jonka jälkeen höyry siirretään tulistimille lämpötilan nostoon. Tulistettu höyry johdetaan turbiiniin, jossa se laajenee, lämpötila alenee ja energiaa siirtyy turbiinin siipien liike-energiaksi. Höyryn lauhtuminen vedeksi turbiinissa ei ole toivottu reaktio, sillä matalapaine-puolella turbiinin siivet ovat kookkaita ja kehänopeus suuri jolloin vesipisarot aiheuttavat kulumaa siivissä. Tällöin saatetaan käyttää useitakin välitulistuksia, joilla höyryn lämpötilaa taas nostetaan. Höyryä saatetaan ottaa turbiinista väliottoina esimerkiksi syöttöveden lämmittämiseen tai tehdasalueen prosesseihin, väliottoon voidaan myös yhdistää turbiinissa lauhtuneen veden poisto.

Turbiinista ulostuleva höyryn ja veden seos lauhdutetaan lauhduttimessa, kaukolämpöä tuottavissa yksiköissä höyryn ei anneta laajentua loppuun turbiinissa vaan energiaa otetaan talteen kaukolämmön lämmönsiirtimellä. Lauhdevesi pumpataan lauhdepumpulla syöttövesisäiliön paineeseen. Syöttövesisäiliö ei ole pakollinen komponentti, mutta sen yhteyteen on helppo järjestää kaasunpoisto ja kattilaveden lisäys. Syöttövesisäiliöstä vesi pumpataan syöttövesipumpulla korkeampaan paineeseen ja johdetaan ekonomaiserin läpi, missä veden lämpötilaa nostetaan lähemmäksi höyrystymislämpötilaa. Syöttövesipumppu ei ole pakollinen, sillä vesikierto kattilassa voidaan tehdä myös luonnonkierrolla, mutta se ei sovi korkeamman tehon ja paineen kattiloihin.

2.1.2 Ilma- ja savukaasuvirtaus

Prosessin palamisilma otetaan usein kattilahuoneesta, jolloin osa kattilan johtumis- ja säteilöhäviöstä on siirtynyt palamisilmaan. Palamisilmapuhaltimelta ilma johdetaan ilmanesilämmittimeen, jossa osa savukaasun lämpöenergiasta siirtyy palamisilmaan. Ilmanesilämmittimen toimintaa rajoittaa usein savukaasun koostumus, savukaasun lämpötila ei saa laskea savupiipussakaan rikkihapon kastepisteen alle. Kastepisteessä rikkihappoa lauhtuu putkiston pinnoille, aiheuttaen merkittävää korroosiota.

Ilmanesilämmitimeltä ilma johdetaan jakotukille, joka on käytännössä putkenpätkä, josta on lähdöt eri ilmatasoille. Säätoventtiilit ohjaavat automaatiojärjestelmän käskyjen mukaisesti ilman kulkua tulipesään. Kuplapetikattiloissa merkittävä osa ilmasta johdetaan pedin alle suuttimilla leijutuksen saavuttamiseksi. Tärkeää on että ali-ilman osuus ei ole liian pieni, jolloin leijutusta ei tapahdu, eikä liian suuri jolloin petimateriaalia karkaa savukaasun mukana. Loput palamisilmasta syötetään sekundääri- ja tertiääri-ilmatasoille. Tavoitteena on tasainen ja täydellinen palaminen mahdollisimman pienellä ilmakertoimella. Ilmakertoimen nosto kasvattaa savukaasuhäviötä ja NO_x-päästöjä, ilmakertoimen vähennys taas kasvattaa CO-päästöjä ja palamattoman polttoaineen häviötä. Kuplapetikattiloissa on mahdollista käyttää merkittävästi pienempää ilmakerrointa kuin arinakattiloissa. (Khan 2009).

Palamisessa syntynyt savukaasu johdetaan kattilan yläosassa sijaitsevien tulistimien läpi savukaasukanavaan, jossa sijaitsee ekonomaiseri ja ilmanesilämmitin. Lämmönsiirtimien jälkeen savukaasu johdetaan puhdistimille. Tyypillisiä puhdistimia hiukkasille ovat sähkö-, pussi- ja letkusuodatin, sekä sykloni. Usein suodattimia on kytketty sarjaan erotuskyvyn parantamiseksi. BFB-kattiloissa rikkioksidien muodostumista voidaan vähentää lisäämällä kalkkia petimateriaalin ja vaiheistetun palamisen takia NO_x-päästöt ovat pieniä. Näin vältetään kalliilta rikin- ja typenoksidin puhdistuslaitteistoilta. (Khan 2009, UNEP).

Savukaasupuhallin (kutsutaan myös savukaasuimuriksi) puhaltaa puhdistetun kaasun savupiipun kautta ilmakehään. Savupiipun tarkoitus on laimentaa savukaasua ennen sen päätymistä paikallisen eläimistön hengitettäväksi, sillä laimentamattomana se sisältää epäterveellisiä määriä hiilidioksidia ja muita palamisessa muodostuneita kaasuja. Savukaasun sisältämä vesihöyry lauhtuu kontaktissa ilman kanssa, muodostaen näkyvyyttä häiritsevän sumupilven, joka etenkin tehdasalueen maanpinnalla voi aiheuttaa vaaratilanteita näkyvyyden heikentyessä. Osa savukaasusta voidaan johtaa takaisin tulipesään; niillä voidaan tasoittaa lämpötiloja palovyöhykkeitä siirtämällä.

Ilmaa ja savukaasua voidaan johtaa myös kattilaprosessin muille osille parantamaan toimivuutta. Myös paineilmaa käytetään esimerkiksi lämmönsiirtopintojen nuohoukseen, tukkeumien aukaisemiseen polttoaineen-, tuhkan- ja hiekansyöttöjärjestelmissä.

2.1.3 Polttoaine- ja tuhkavirtaus

Polttoainetta voidaan syöttää petiin ala- tai yläpuolelta. Alapuolelta syöttö sopii pienikokoiselle polttoainejakeelle, jolloin ali-ilma kuljettaa sen petiin. Yläpuolelta syöttö taas sopii isokokoisemmalle jakeelle, jonka partikkelit eivät karkaa ilman mukana ylöspäin. Epätasaiselle jakeelle ylhäältä syöttö on parempi, sillä pienimmät partikkelit ehtivät palaa kattilan ylemmissä osissa ja isommat tippuvat petiin. Alhaalta syötössä isommat partikkelit saattaisivat tippua ilmasuuttimien ohi tuhkanpoistojärjestelmään. (UNEP).

Polttoainetta usein käsitellään ennen polttoa esimerkiksi kuivaamalla, murskaamalla ja hakettamalla. Polttoainejärjestelmään sisältyy myös varastointi tehdasalueella, välivarastot ja -siilot, vastaanotto- ja kuljetinjärjestelmät. Polttoaineen käsittelyn tarkoituksena on luoda kustannustehokkain ja polttokelpoinen jae kokonaiskustannuksien kannalta, esimerkkinä kattilan hyötysuhteen alenema kosteasta polttoaineesta verrattuna kuivauksen ja varastoinnin kuluihin. Varastointi ja välisiilot varmistavat polttoaineen tasaisen saatavuuden poltettavaksi eivätkä häiriöt tai katkot polttoaineentoimituksessa merkittävästi häiritse polttoprosessia. (Vakkilainen 2014).

Tuhka poistuu pedin alta pohjatuhkana ja savukaasun mukana lentotuhkana. Yhden arvion mukaan pohjatuhkan osuus on noin 30–40 % (UNEP) kaikesta tuhkasta, kun taas toisen arvion mukaan lähes 100 % poistuu lentotuhkana (Charlson 1999 s.6). Polttoaineen ja tuhkan ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi pohja- ja lentotuhkan osuuksiin. Pohjatuhkan mukana poistuu lämpöenergiaa, jonka osuus saattaa olla merkittäväkin ja lämmöntalteenotto siitä saattaa olla kannattavaa. Myös palamatonta polttoainetta voi poistua pohjatuhkan mukana. Lentotuhka saattaa kerääntyä lämmönsiirtimille ennen sen talteenottoa savukaasunpuhdistusjärjestelmissä. Tuhkaa usein pidetään ongelmajätteenä sen sisältämien epäpuhtauksien, kuten raskasmetallien, takia ja sille on haastavaa löytää käyttökohdetta. (Khan 2009, UNEP).

2.1.4 Tukijärjestelmät

Kuplapetikattilassa on polttoaineen lisäksi omat siilot petimateriaalille ja mahdollisesti petiin lisättävälle kalkille. Petimateriaalia, kalkkia ja mahdollisia muita kiinteitä lisäaineita on mahdollista syöttää saman järjestelmän kautta. Petimateriaali kuluu; sitä poistuu savukaasun ja

pohjatuhkan mukana joten sitä täytyy lisätä säännöllisesti. Lisätty kalkki reagoi polttoaineen rikin kanssa, joten myös sitäkin täytyy lisätä säännöllisesti. Kuplapetikattiloissakin saatetaan käyttää ammoniakkin sumutusta pesään, tarkoituksena NO_x -päästöjen vähennys. Ammoniakki reagoi typenoksidien kanssa muodostaen typpeä ja vesihöyryä. Typenoksidit eivät yleensä ole ongelma kuplapedeillä, mutta jos polttoaine sisältää korkean määrän typpeä typenoksideja saattaa muodostua. (Charlson 1999 s.3–6, Khan 2009).

Kattilan ylösajoa varten tarvitaan polttimia tai muita keinoja lämmittää kattilan rakenteita hitaasti ennen varsinaista käynnistystä. Hidas lämmitys vähentää äkillisestä lämpökuormasta aiheutuvaa rasitusta kattilan rakenteen materiaaleille. Usein polttimessa käytetään raskasta tai kevyttä polttoöljyä, neste-, bio- tai maakaasua. Polttimilla saadaan tulipesään ja petimateriaaliin vaadittava lämpöenergia, jotta primäärisen polttoaineen poltto voidaan aloittaa. Työssä käsitellyssä tutkimuskattilassa ylösajon lämmitys suoritetaan kahdella lisäpuhaltimella, joissa on tehokkaat sähkövastukset tarvittavan lämpötilan saavuttamiseksi.

Jätteenpoltoa koskeva laki vaatii automaattisen lisäpolttimen jätettä polttaville kattiloille. Lisäpolttimen täytyy käynnistyä automaattisesti jos savukaasun lämpötila laskee alle $850\text{ }^\circ\text{C}$:n tai $1100\text{ }^\circ\text{C}$:n tulipesän viimeisen ilmasyötön jälkeen kattilan sisällä, riippuen jätteen klooripitoisuudesta. Lisäksi laki vaatii savukaasun saavuttavan edellä mainitun lämpötilan vähintään kahdeksi sekunniksi kaikkein epäedullisimmissakin olosuhteissa. Laki sallii poikkeuksen säädöksiin, jos kyseessä on koelaitos ja poltettava jätteen määrä on alle 50 tonnia vuodessa. Diplomityön leijukattilaan ei asennettu poltinta, sillä poltettavan jätteen määrä suunniteltiin pidettävän alle 50 tonnissa vuodessa. (Finlex 151/2013).

3 TUTKIMUSKATTILAN TOIMINTAPERIAATE JA MITTAUSJÄRJESTELYT

Kattilan säätötapaa suunniteltaessa on tärkeää tuntee prosessiin vaikuttavat yksittäiset laitteet sekä niiden toiminta-arvot ja -parametrit. Puhaltimien, pumppujen ja venttiilien maksimi- ja minimivirtaukset asettavat omia rajoituksia prosessin säädölle, mutta niin myös käytettyjen mittalaitteiden kestävyys korkeissa lämpötiloissa. Yksittäisten mittalaitteiden mittausvirhe on tärkeä tietää; niillä voi olla suuri vaikutus prosessin säädössä. Laitoksen toimintaperiaatteesta enemmän luvussa 3.4 PI-kaaviot.

3.1 Pääkomponentit

Varkauden energiatutkimuskeskukseen on suunniteltu monipuolinen tutkimusympäristö, joka koostuu lukuisista eri laitteista ja prosesseista. Tässä kappaleessa on käyty läpi lähinnä vain tutkimuskeskuksen leijupetikattila-prosessiin keskeisesti liittyviä laitteita.

3.1.1 Leijupetikattila

Energiatutkimuskeskuksen leijupetikattila on suunniteltu Savonia-ammattikorkeakoulussa. Suunnittelussa otettiin huomioon kattilan valmistus, asennus ja kunnossapito. Lopputuloksena syntynyt kattila koostuu useasta segmentistä, jotka ovat kiinnitetty toisiinsa pulttiliitoksilla. Arvioitu teho kattilalle on 250–300 kW, rajoittavana tekijänä prosessin muiden osien lämpötilan kesto. Savukaasukanavaan on tehty neljä paikkaa mahdollisille lämmönsiirtimille, mutta käyttöönoton yhteydessä lämpöä saadaan talteen vain jätelämpökattilalla ja palamisilman esilämmittimellä. Kuvassa 3.1 on esitetty leijupetikattilan 3D-mallista otettu kuva ja vieressä kuva rakennetusta kattilasta. (Juutilainen 2015).



Kuva 3.1. Leijupetikattila teoriassa ja käytännössä. (Juutilainen 2015).

3.1.2 Puhaltimet

Taulukkoon 3.1 on koottu prosessin kannalta keskeisimmät puhaltimet ja niiden toiminta-arvot. Kaikki puhaltimet ovat radiaali- eli keskipakopuhaltimia. Tiedot on luettu laitteiden kilvistä ja varmistettu valmistajan sivuilta tai muista toimitetuista dokumenteista. Ympäristön lämpötilaksi Ziehl-Abeggin tuulettimet toivovat -20 – 40 °C, muissa puhaltimissa ei ilmoitettu tai väli on suurempi. Alalämpötilat eivät ole ongelma, sillä kaikki puhaltimet sijaitsevat sisällä lämmitetyssä tutkimushallissa, mutta ylälämpötila voi muodostua ongelmaksi jos kattilahuone lämpiää liiaksi käytön yhteydessä. Savukaasupuhaltimien P-3001 ja P-3002 suurin sallittu savukaasun lämpötila on 300 °C, kiertokaasupuhaltimen P-3003 250 °C jatkuvassa käytössä.

Taulukko 3.1. Prosessipuhaltimien keskeiset tiedot.

Funktio	Laitetunnus	Valmistaja	Tyyppi	Q_{vmax} [m ³ n/h]	P [kW]	n_{max} [1/min]	Δp [Pa]
Palamisilma	P-2001	Ziehl-Abegg	PR189.217.GA.MR	600	8,11	5906	15024
Savukaasu I&II	P-3001, P-3002	Ziehl-Abegg	PR189.2G7.GB.MR	600	4,38	4889	8000
Kiertokaasu	P-3003	Dust Control Systems Oy	DCDS-08-JLG90Z	300	4	5301	9950
Hätäjäähdytys	P-3004	MZ Aspiratori	GF310/2	2450	1,1	2870	1309
Lämmitys	X-2701, X-2703	Leister	G56A219	57	11	2790	4000

Leisterin valmistamat puhaltimet eivät ole puhallusteholtaan 11 kW, vaan se on laitteiden lämmityselementin teho. Puhallusteho on noin 130 W ja ulostulevan ilman suurin lämpötila 650 °C. Kahdella lämmityspuhaltimella voidaan lämmittää kattilan keraamiset rakenteet, saada peti leijumaan ja teoriassa saavuttaa riittävä lämpötila hyvälaatuisen polttoaineen syttymiseksi. Kuvassa 3.2 on esitetty savukaasupuhaltimet P-3001 ja P-3002.

**Kuva 3.2.** Savukaasupuhaltimet P-3001 ja P-3002.

3.1.3 Pumput

Leijupetikattilalla ei ole omaa vesipiiriä, mutta savukaasujen lämpöenergiaa voidaan ottaa talteen ajamalla savukaasut jätelämpökattilaan. Kattilalla on yksi vesipiiri ja yksi pumppu, P-1021. Kattilan vesipiiristä lämpö siirretään eteenpäin lämmönsiirtimellä varaajan vesipiiriin pumpulla P-1022. Varaajan vesipiiriin on liitetty maalämpöjärjestelmä ja radiaattori, radiaattorin glykolipiiriin lämpöä siirretään pumpulla P-1007. Radiaattorin glykolipiirillä on oma pumppu P-1009. Pumppujen tiedot on koottu taulukkoon 3.2.

Taulukko 3.2. Pumppujen keskeiset tiedot.

Funktio	Laitetunnus	Valmistaja	Tyyppi	Q_{vmax} [l/s]	P [kW]	n_{max} [1/min]	H [m]
Kattilaveden sekoitus	P-1021	Grundfos	MG90SB4-24FF165-H3	5,58	1,1	1460	10,4
Varaaja-kattila	P-1022	Kolmeks	LS-65B/2	5,5	1,5	3000	15
Varaaja-radiaattori	P-1007	Kolmeks	MVV 10-30TCG	1,7	1,1	2850	25
Radiaattori, glykoli	P-1009	Kolmeks	MVV 10-30	1,8	1,1	2850	25
Ammoniakki	P-8001	Kolmeks	AE-32/2	0,083	1,1	3600	30

Kattilaveden sekoituspumppu P-1021 sisältyi arinakattilan toimitukseen. Toimitetut sähkökuvat ja niiden perusteella tehty sähkö- ja automaatiokaappi olivat 2-vaiheiselle sähkölle ja itse pumppu vaatii 3-vaihetta. Kaapin kytkentöjä ei pumpun osalta haluttu muuttaa tai ottaa muilta laitteilta ilman konsultointia kattilatoimittajan kanssa, sillä sekoituspumppu tarvitsee oman erillisen sähkönsyötön. Tällöin mahdollisissa vikatilanteissa arina-/jätelämpökattilan vesipiiristä saataisiin lämpöä siirrettyä eteenpäin, eikä lämpötila ja paine kasvaisi vaarallisen suuriksi. Automaatiojärjestelmässä kattilaveden sekoituspumppu ja savukaasupuhaltimet ovat tehty manuaalisesti sammutettavaksi, niiden sammutus on mahdollista vasta kun alasajo on suoritettu onnistuneesti. Kuvassa 3.3 on esitetty varaajan ja kattilan välisen vesipiirin pumppu P-1022.



Kuva 3.3. Pumppu P-1022, työmaa kesken.

3.1.4 Jätelämpökattila

Leijupetikattilan vesikierron puutteesta johtuen kattilasta ja savukaasukanavasta poistuvat kaasut ovat kuumia ja esimerkiksi savukaasupuhaltimet kestävät ainoastaan 300 °C. Savukaasujen lämpötilaa on alennettava, joten leijupetikattila-prosessin jätelämpökattilana toimii 500 kW:n biokattila, jolla on oma vesikierto. Biokattilassa on liikkuva arina ja oma polttoaine- ja ilmansyöttö, lisäksi biokattilaan on tarkoitus asentaa pyrolyysiöljypoltin. Arinasta, leijupedistä ja pyrolyysiöljypoltimesta vain yhtä voidaan käyttää kerrallaan.

Vesivaraaja

Jätelämpökattilan vesipiiristä lämpö siirretään varaajan vesipiiriin lämmönvaihtimella. Varaaja on eristetty ja tilavuudeltaan 3 m³. Varaajasta lämpöä voidaan siirtää radiaattorin glykolipiiriin

ja maalämpöjärjestelmään. Valmistajan, Gebwell, ilmoittama käyttölämpötila varaajalle on 5–95 °C ja korkein paine 1,5 bar. Automaation puolella varaajaa yritetään pitää alle 80 °C:ssa, jotta lämmönsiirto kattilan vesipiiristä ei alene johtuen pienentyneestä lämpötilaerosta. Varaaja sisältää kaksi 9 kW:n sähkövastusta. (Savonia).

Radiaattori

Radiaattori on Alfa Lavalin valmistama, mallia SCAG-122-09-06N5-H-22-1DN50. Radiaattorin piirissä käytetty neste on 50 % etyleeniglykolia ja 50 % vettä. Puhaltimia radiaattorissa on kaksi, kokonaisilmavirta 15,6 m³/s ja teho 3,2 kW/puhallin. Valmistajan ilmoittama jäähdytysteho on 85,1 kW, kun sisään- ja ulostulevan jäähdytysnesteen lämpötilaero on 6,5 °C. Kasvattamalla lämpötilaeroa radiaattorin jäähdytysteho nousee, 600 kW:n jäähdytysteho vaatii noin 50 °C lämpötilaeron. Radiaattori sijaitsee ulkona, joten jäähdyttävän ilman lämpötilassa voi käytössä olla suuriakin eroja. (Savonia).

3.1.5 Savukaasun puhdistusjärjestelmät

Asennetut savukaasun puhdistusjärjestelmät laitoksella keskittyvät lähinnä kiinteän aineksen poistoon savukaasusta. Savukaasujen koostumukseen taas pyritään vaikuttamaan jo tulipesässä kalkin ja ammoniakkin syötöllä. Energiatutkimuskeskuksen leijukattila on polttoaineteholtaan alle 1 MW, joten valtioneuvoston asetusta 445/2010 ei sovelleta ja laitokselle ei ole päästörajoja. (Finlex 445/2010).

Sykloni

Sykloni on sijoitettu prosessiin liitteen I kuvan I mukaisesti palamisilman esilämmittimen jälkeen savukaasupuolella. Sykloni poistaa savukaasuvirrasta kiinteää ainesta, lähinnä lentotuhkaa ja petimateriaalia, pyörteen avulla. Raskaammat hiukkaset törmäävät syklonin seiniin ja valuvat syklonin pohjalle poistoa varten. Syklonin on valmistanut Dust Control Systems Oy ja se on mallia DCEKA-63. Valmistajalle toimitetun leijupetihiekan analyysin perusteella erotusasteeksi hiukkasille on luvattu noin 80 %. Sykloni kestää 1100 °C:n lämpötilaa ja mitoitusvirtaus syklonin läpi 600 m³n/h. (Zevenhoven 2001 5-16).

Sähkösuodatin

Sähkösuodatin on sijoitettu prosessissa jätelämpökattilan jälkeen ennen letkusuodatinta liitteen I kuvan II mukaisesti. Sähkösuodatin erottaa savukaasuvirrasta varautuneita hiukkasia luomalla kahden levyn väliin suuren jännite-eron. Varautuneet hiukkaset kiinnittyvät sähkökentässä toiseen levyistä, levyistä hiukkaset irrotetaan ravistimilla ja poistetaan prosessista. Energiatutkimuskeskuksen sähkösuodattimen on valmistanut ECP Group Oy. Savukaasuvirta suodattimen läpi on $600 \text{ m}^3/\text{h}$, lämpötila korkeimmillaan $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulostuleva virtaus sisältää kiinteää ainesta maksimissaan $50 \text{ mg}/\text{m}^3$. Jännite suodattimessa on 70 kV , erotuspinta-ala $17,6 \text{ m}^2$ ja suodattimen sähkönkulutus maksimissaan noin $8,9 \text{ kW}$, sähkökentän osuus noin $4,3 \text{ kW}$. Kuvassa 3.4 on esitetty tutkimuskeskuksen sähkösuodatin. (Zevenhoven 2001 5-21).



Kuva 3.4. Sähkösuodatin odottamassa kytkentää.

Letkusuodatin

Tutkimuskeskuksen letkusuodattimen on valmistanut Industri-Textil Job Oy ja se on mallia Jettex 25-5-1". Prosessissa se sijaitsee liitteen I kuvan II mukaisesti sähkösuodattimen jälkeen ennen savukaasupuhaltimia. Fyysisesti laite on sijoitettu sähkösuodattimen kuvan 3.4 kulman

taakse ulos. Letkusuodattimen toimintaperiaate on yksinkertainen: hiukkasia sisältävä savukaasu johdetaan tekstiilistä tehdyn letkun läpi. Hiukkaset jäävät letkun toiselle puolelle ja savukaasu jatkaa matkaa. Säännöllisin välein letkuja puhdistetaan paineilmalla ja otetaan kiinteä aines talteen. Suurin sallittu lämpötila savukaasulle on 200 °C, johtuen tekstiilin käytöstä suodatinmateriaalina ja syttymisen mahdollisuudesta. Letku- ja sähkösuodattimille on rakennettu ohituslinjat, savukaasun lämpötilan kasvaessa puhdistuslaite voidaan kytkeä pois prosessista laitetta vahingoittamatta. Valmistajan arvio hiukkaspäästöille suodattimen jälkeen on alle 10 mg/m³n polttoprosessin ollessa kunnossa. (Zevenhoven 2001 5-33).

3.1.6 Polttoaineen syöttöjärjestelmä

Polttoaineen syöttöjärjestelmään haluttiin joustoa tutkimuskeskuksen vaihtelevien tarpeiden mukaan. Käytössä on 2 polttoainekonttia, jotka on varustettu lämmityspiireillä kuivausta ja jäätyminenestoa varten. Molemmissa konteissa on myös repijärullat polttoaineelle, toisessa repijärullan rakenteessa on huomioitu kierrätyspolttoaineen ominaisuudet ja toisen repijärulla soveltuu paremmin turpeelle ja hakkeelle. Konteista polttoaine poistuu kolakuljettimelle tankopurkaimien avulla, myöhemmin esitetyn, kuvan 3.7 mukaisesti. Molemmat kontit on sijoitettu ulos ja niiden täyttöä varten on oma kuljetin. Kontit on toimittanut MJ-Compitex Oy.

Kolakuljetin on Ferroplan Oy:n valmistama. Kolakuljettimen pohja on lämmitetty ja siirtokapasiteetti on reilusti yli energiatutkimuskeskuksen tarpeiden. Kolakuljetin siirtää polttoaineen konteilta välisiiloon, välistä on mahdollista ottaa myös arinakattilalle polttoainetta.

Välisiilon tilavuus on noin 2 m³ ja se on varustettu lapasekoittimella. Välisiilo roikkuu ketjuilla tutkimushallin rakenteista ja on varustettu punnituksella siilon polttoainetilanteen määrittämiseksi. Välisiilosta polttoaine siirretään eteenpäin kaksoisruuvikuljettimella sulkusyöttimelle. Sulkusyötin on kiinnitetty välisiilorakenteeseen joustavalla paljeella, minkä ansiosta se ei vaikuta välisiilossa tapahtuvaan polttoaineen punnitsemiseen. Sulkusyöttimen kapasiteetti on 6 m³/h ja se toimii palotilan ja polttoainevaraston välisenä fyysisenä esteenä. Välisiilon, siihen liittyvät laitteet ja sulkusyöttimen on toimittanut MJ-Compitex Oy.

3.2 Säätöventtiilit

Kuplapetikattiloissa palamisilman säätö ja hallinta on erittäin tärkeää, jopa tärkeämpää kuin arina- tai kiertopetikattiloissa. Palamisilman säädöllä on kaksi kattilan kannalta tärkeää tavoitetta: pedin leijutus ja vaiheistettu palaminen. Pedin alle on tuotava sopiva määrä ilmaa leijutukseen, säätöperusteena pedin yli mitattava paine-ero. Jos ilmaa tuodaan liikaa, peti siirtyy kasautuneen virtauksen alueelle (katso kuva 2.1) ja sen jälkeen petimateriaalia karkaa merkittäviä määriä tulipesästä. Jos ilmaa tuodaan liian vähän, leijutusta ei tapahdu ja peti toimii lähinnä virtauksen esteenä.

Vaiheistettu palaminen vaikuttaa savukaasujen lämpötilaan, kattilan hyötysuhteeseen ja päästöjen muodostumiseen; kaikki merkittäviä parametreja kattilan ajon kannalta. Palamisilman syöttöä hallitsemalla voidaan määrätä, missä osassa kattilaa on tarpeeksi happea palamisen tapahtumiseksi. Kiertokaasun syötöllä voidaan hallita vaiheistettua palamista kattilassa: kiertokaasu on jo kerran palanut kattilassa ja sisältää vain vähän happea (olettaen että ilmavuotoja ei ole merkittävästi). Kiertokaasun syöttö yhdelle ilmatasolle siirtää palovyöhykettä kattilassa ylöspäin, sen avulla voidaan yrittää estää kuumien pisteiden muodostuminen kattilan sisään. Liitteen III taulukosta III löytyy tutkimuskeskuksen säätöventtiileiden tunnuksot ja funktiot.

Kuvassa 3.5 on esitetty palamisilman sekundääri-ilmatasojen säätöventtiilit FV-2012–2018 (keskellä edessä) ja kiertokaasun säätöventtiilit FV-3017–3023 (oikealla takana). Sekundääri-ilmatasojen venttiilit sijaitsevat prosessissa liitteen I kuvan I mukaisesti palamisilman esilämmittimen jälkeen jakotukin välittömässä läheisyydessä lähellä laitoksen lattiatasoa. Tutkimuskeskuksen venttiilit toimitti Econosto Oy, valmistaja ARI-Armaturen. Venttiileitä säädetään toimilaitteilla, joita ohjataan pääautomaatiojärjestelmästä.



Kuva 3.5. Palamisilman sekundääri-ilmatasojen säätöventtiilit.

3.3 Anturit

Automaatiojärjestelmä tarvitsee kattilan ajoa varten kattavan valikoiman erilaisia mittatietoja: lämpötilaa, painetta, paine-eroa, virtausta ja happea. Tutkimuskäyttöön tarkoitetusta kattilasta ei voi mitata liikaa tietoa, kunhan anturit eivät häiritse itse prosessia. Varkauden energiatutkimuskeskuksen kokonaisuuteen kuuluu reilusti yli 150 anturia liitettynä automaatiojärjestelmään, niiden lisäksi myös useampi sata erilaista sijainti- ja asentotietoa. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty vain tase- ja säätölaskennan kannalta tärkeimmät anturit, joita on noin 30.

Suurin osa tutkimuskeskuksen antureista lähettää analogista signaalia väliltä 4–20 mA. Vain pieni osa kommunikoi käyttäen korkeamman tason protokollia, kuten Modbus® tai PROFINET®. Kaikki tase- ja säätölaskennassa käytetyt anturit käyttävät virtaviestiä 4–20 mA. Automaatiojärjestelmän analogiset kortit tulkitsevat virtaviestin ja muuttavat sen digitaaliseen muotoon, välejä 4–20 mA ja 0–10 V edustavat luvut 0–27648. Signaalin digitaalinen muoto käsitellään ohjelmallisesti haluttuun yksikköön anturin kalibrointivälin mukaisesti.

Automaatiojärjestelmän kuormitusta voidaan merkittävästi vähentää tai kasvattaa säätämällä signaalinkäsittelyn aikaväliä.

3.3.1 Lämpötila-anturit

Taulukossa 3.3 on esitetty taselaskennan kannalta tärkeimmät lämpötila-anturit. Anturitunnuksien selitteet löytyvät liitteen III taulukosta II. Korkeille lämpötiloille on käytetty K-tyypin termopareja ja alemmille Pt100-tyyppisiä antureita. Taulukossa esitetyt T_{\min} ja T_{\max} ovat antureille kalibroitu mittaväli. Ilmoitettu tarkkuus on otettu kalibrointitodistuksesta tai valmistajan ilmoittama; siinä ei ole huomioitu hystereesiä, muutoksia ympäristön olosuhteissa tai ajan vaikutusta anturin sähköisiin ominaisuuksiin. Todellinen mittavirhe on siis todennäköisesti suurempi kuin taulukossa 3.3 ilmoitettu tarkkuus, mutta taselaskennan kannalta parin asteen heitto mittauksessa ei vaikuta merkittävästi. (Savonia).

Taulukko 3.3. Taselaskennassa käytettyjen lämpötila-antureiden tiedot.

Tunnus	Valmistaja	Malli	Tyyppi	T_{\min} [°C]	T_{\max} [°C]	Tarkkuus
TIC-2002, TI-2020–2023	Aplisens S.A.	CT GN1	Pt100	-30	400	± 1 °C
TIC-2019	Aplisens S.A.	CT U1	K	0	700	$\pm 1,5$ °C
TI-2025	Aplisens S.A.	CT GN1	Pt100	-50	100	$\pm 0,35$ °C
TI-3005, 3007, 7003–7014	Honeywell	STT173-BS	K	400	1150	± 1 °C
TI-3031	Aplisens S.A.	CT GN1	Pt100	0	400	± 1 °C
TIC-4028, TI-5003	Honeywell	STT173-BS	K	0	800	± 1 °C
TIC-7002	Honeywell	STT173-BS	K	200	1150	± 1 °C
TI-7015	Honeywell	STT173-BS	K	0	1150	$\pm 1,15$ °C
TI-9002, 9003	Aplisens S.A.	CT Z1	Pt100	-50	100	$\pm 0,35$ °C

3.3.2 Paineanturit

Taulukossa 3.4 on esitetty taselaskennan kannalta tärkeimmät paineanturit. Anturitunnuksien selitteet löytyvät liitteen III taulukosta II. Ympäristön absoluuttista painetta mittaava anturi ei ole taulukossa, koska sitä ei ole vielä hankittu ja anturitunnusta määrätty. Kaikki taselaskennassa käytetyt paineanturit perustuvat pietsoresistiiviseen ilmiöön. Taulukossa esitetty virhe perustuu kalibrointitodistukseen tai valmistajan ilmoittamaan arvoon; tarkkuuteen vaikuttavat samat ilmiöt kuin edellisessä kappaleessa. (Savonia).

Taulukko 3.4. Käytetyt paineanturit tietoineen.

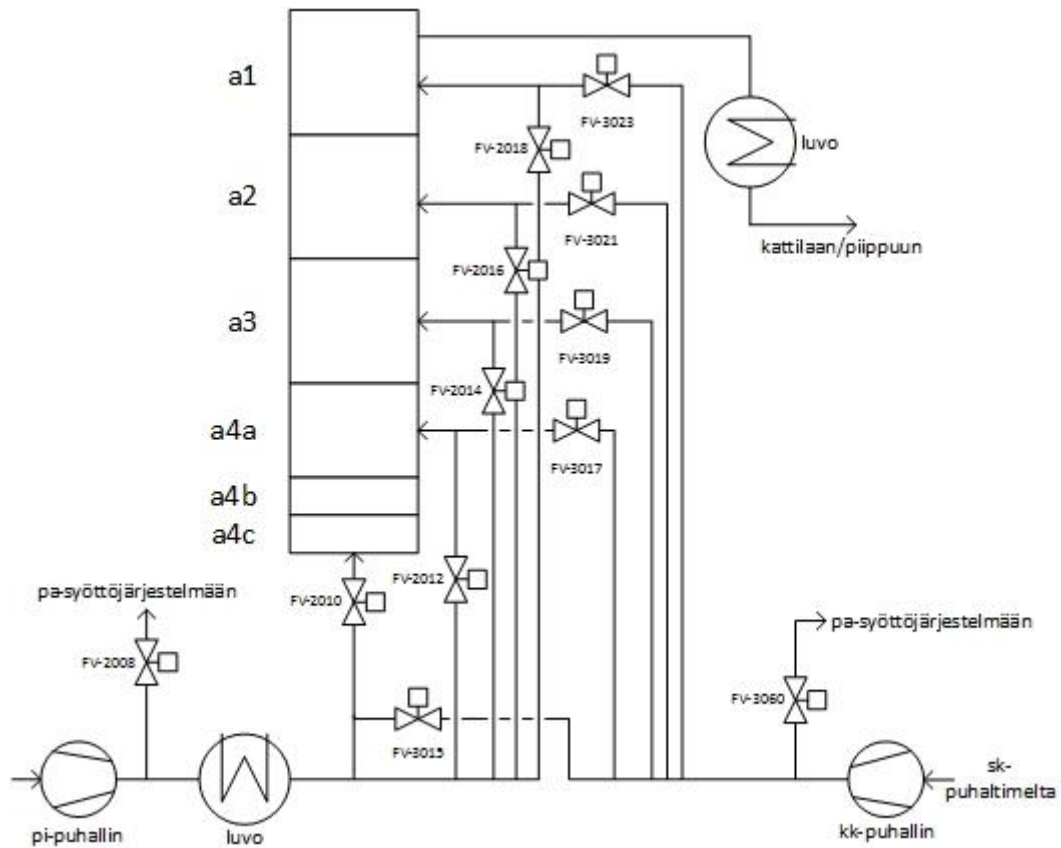
Tunnus	Valmistaja	Malli	Tyyppi	p_{\min} [kPa]	p_{\max} [kPa]	Virhe
PIC-2003	Aplisens S.A.	PCE-28	Pietsoresistiivinen	0	20	0,30 %
PDI-2024	Honeywell	STD720	Pietsoresistiivinen	0	20	0,05 %
PIC-3033	Aplisens S.A.	PCE-28	Pietsoresistiivinen	0	20	0,30 %
PDI-7001	Siemens	SITRANS P DS III	Pietsoresistiivinen	0	12,5	0,07 %
PIC-7009.1-2	Aplisens S.A.	PCE-28 Smart	Pietsoresistiivinen	-10	12	0,10 %

3.3.3 Virtaus- ja happimittaukset

Muut tase- ja säätölaskennan kannalta tärkeitä prosessisuureiden mittaukset ovat tilavuusvirta- ja happimittaukset. Virtausmittauksissa on käytetty Honeywellin STD720-tyyppistä anturia, joka laskee painehäviön perusteella tilavuusvirran. Virtausanturit eroavat toisistaan vain kalibrointiväliltään, pienin väli FIC-3022 0–58 m³n/h ja suurin FIC-2007 0–1890 m³n/h. Kalibrointitodistuksissa ilmoitettu virhe vaihteli välillä 0,50–0,69 %. Leijupedin savukaasujen happipitoisuus mitataan ABB:n valmistamalla AZ25-mallin anturilla. Mittaväli anturille on 0–25 %. Anturin mittakärki kestää jopa 1400 °C, mutta toisaalta anturin tulos on luotettava vasta yli 600 °C lämpötilassa. Ilmoitettu tarkkuus on $\pm 0,2$ O₂-% ja mittavirhe 2,0 %. (Savonia).

3.4 PI-kaaviot ja prosessi

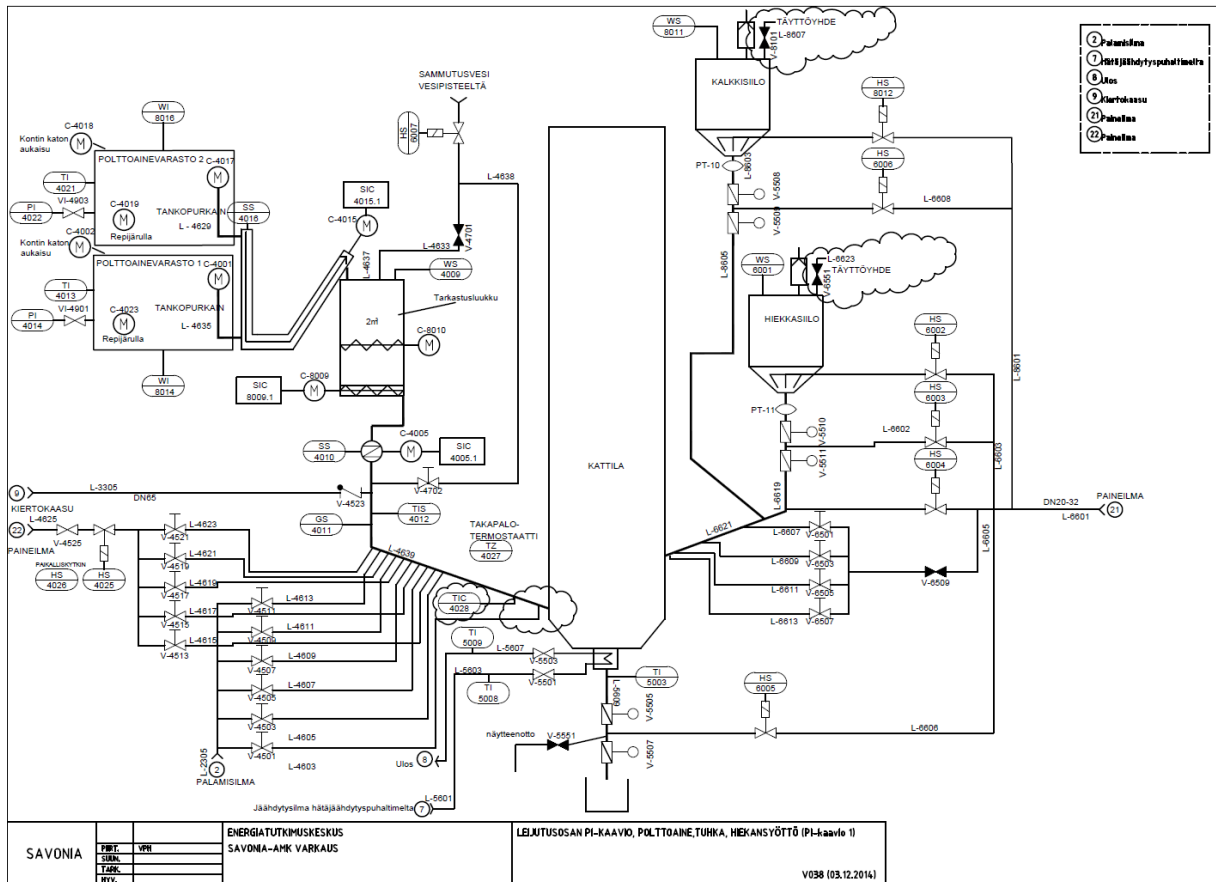
Ilman ja savukaasun osalta täydellisemmät PI-kaaviot on esitetty liitteessä I, sisältäen huomattavan määrän venttiileitä, putkikokoja, antureiden sijainteja ja laitetunnuksia, jotka eivät kaavion yksityiskohtaisuuden takia mahdu selkeään kuvaan. Yksinkertaistettu palamisilman ja savukaasun PI-kaavio on esitetty kuvassa 3.6. Palamisilma otetaan prosessiin kattilahuoneesta palamisilmapuhaltimella ja ennen ilman esilämmitintä on mahdollista syöttää palamisilmaa polttoaineensyöttöjärjestelmään helpottamaan polttoaineen kulkeutumista, tarkemmin kuvassa 3.7. Ilman esilämmitin on mahdollista ohittaa prosessissa kokonaan. Ohituksen yhteyteen on liitetty säätöventtiili, jolla voidaan säätää palamisilman lämpötilaa esilämmitin jälkeen. Liitteen III taulukossa III on selitetty säätöventtiilien tunnuksat ja paikat. Säätöventtiilien jälkeen on virtausmittaus.



Kuva 3.6. Kattilan yksinkertaistettu PI-kaavio palamisilmalle ja kiertokaasulle.

Liitteessä I on todennukaisemmin hahmoteltu säätöventtiilien sijainti, joka on välittömästi jakotukin jälkeen. Palamisilma ja kiertokaasu sekoittuvat ennen kattilaa putkistoissa. Kattilan segmentissä a4b on kuplapedin paikka ja segmentissä a4c on leijutusilman suuttimet. Kattilan osassa a4a on 1. sekundääri-ilman taso, a3:ssa 2. ja niin edelleen. Lisäksi palamisilmaa ja kiertokaasua päätyy kattilaan polttoaineensyöttöjärjestelmästä. Sekundääri-ilmalle on kattilan suunnittelussa tehty useita yhteitä eri korkeustasoille, joista voidaan valita käytettäväksi 4 eri korkeustasoa kerrallaan. Jokaisella sekundääri-ilman korkeustasolla ilmansyöttö jakautuu neljään osaan, jolloin ilma syötetään tasaisesti kattilan kehältä. Vaihtoehtoina on syöttää ilma kohtisuorasti kattilan keskustaa päin eli ristivirtauksella tai kattilan kehää pitkin eli pyörrevirtauksella. Pyörrevirtaus ajateltiin hyväksi ominaisuudeksi kattilalle sen pienen koon ja jätteenpoltto-option takia, jota varten tarvitaan tavallista pidempää viipymäaikaa.

Kuvassa 3.7 on esitetty polttoaine-, tuhka- ja hiekkajärjestelmän PI-kaavio. Polttoaine kulkeutuu prosessiin ulkoa kahdesta polttoainekontista tankopurkaimella kolakuljetinta pitkin. Välisiilossa polttoaineet sekoittuvat ja sieltä polttoaine kulkeutuu sulkusyöttimelle. Sulkusyöttimestä polttoaine putoaa pudotusputken kautta kattilaan.



Kuva 3.7. Polttoainejärjestelmän, tuhkan ja hiekan PI-kaavio. (Savonia).

Palamisilmaa, kiertokaasua ja paineilmaa voidaan käyttää parantamaan polttoaineen kulkeutumista pudotusputkessa ja lisäksi avaamaan mahdollisia tukoksia. Paineilman syöttöä tulisi välttää, sillä se saattaa kattilan pienen koon vuoksi häiritä palamisprosessia. Pudotusputkeen ja välisiiloon on lisäksi mahdollista syöttää sammutusvettä palamisen levitessä palotilasta taaksepäin. Kuplapetikattilassa petimateriaalina toimii hiekka, jota pitää säännöllisesti uusia. Palotilaan voidaan syöttää hiekkaa ja kalkkia omasta putkestaan. Tuhkan ja hiekan seos poistuu kattilasta a4c-segmentin kautta. Leijutusilma ja erillinen ilmalla toimiva jäähdytyslaatikko viilentää tuhkan ja hiekan seosta näytteenottoa ja erilliseen säiliöön keräämistä varten.

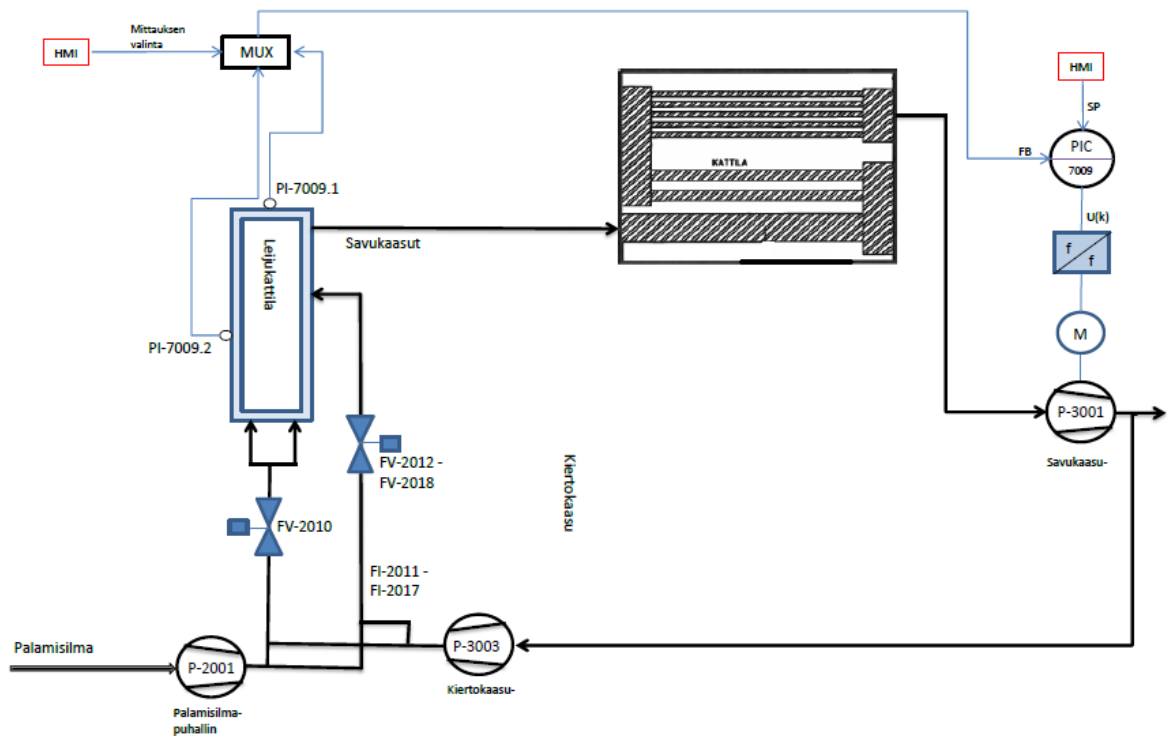
Kuplapetikattilalta savukaasu on palamisilman esilämmittimen jälkeen mahdollista johtaa jätelämpökattilaan, jossa osa lämmöstä saadaan talteen veteen. Savukaasujen puhdistukseen on letku- ja sähkösuodattimet. Ennen savupiippua osa savukaasusta voidaan johtaa kiertokaasupuhaltimella takaisin prosessiin palamislämpötiloja alentamaan. Laitteistokokonaisuuteen kuuluu lisäksi materiaalintestauskammio, johon voidaan johtaa

savukaasua useasta prosessin vaiheesta: ennen ja jälkeen ilman esilämmityksen, jätelämpökattilan 1., 2. ja 3. vedon jälkeen ja lisäksi ennen savupiippua. Materiaalintestauskammiolta voidaan savukaasu johtaa takaisin kuplapetikattilan alaosaan tai savupiipulle. Savukaasujen tarkka PI-kaavio löytyy liitteen I kuvasta II.

3.5 Säätöperiaate ja -kaaviot

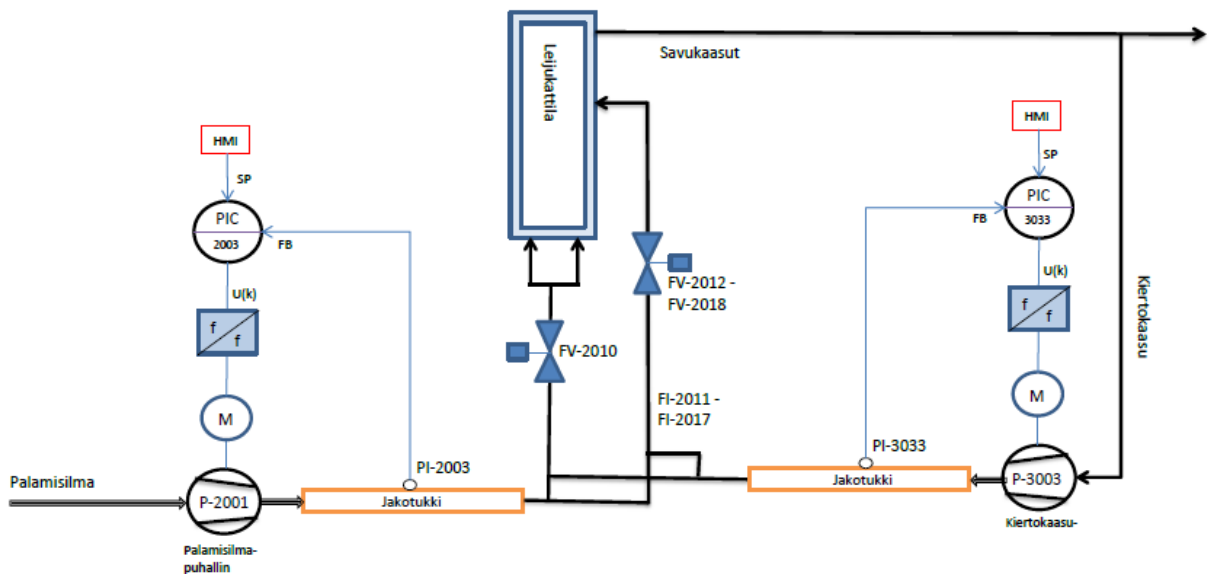
Prosessi koostuu monesta yksittäisestä laitteesta, jotka on tärkeää saada toimimaan yhdessä prosessin ajoa varten. Laitteiden säätö kuplapetikattilan osalta voidaan esittää kolmella yksinkertaistetulla kuvalla 3.8 – 3.10 Laskentafunktiot yhdistyvät automaatiojärjestelmässä järkeväksi kokonaisuudeksi, jolloin muutokset yhdessä säätökaavion funktion arvossa välittyvät toisille ja säätö on käytännössä jatkuvaa. Yhdeksi ominaisuudeksi kattilaprosessiin haluttiin derivoiva säätömekaniikka, jonka tarkoituksena on laskea säädön muutosnopeutta ja laskea aika jolloin asetettu tavoite parametrille saavutetaan. Tällöin voidaan huomioida säädön viive ja lukita säätö ennen kuin tavoite on saavutettu. Tarkoituksena on vähentää jatkuvasta säädöstä aiheutuvaa siniaaltoisuutta prosessin toiminta-arvoissa mahdollistaen tasainen palaminen kattilassa. Ennen kattilan käyttöönottoa arvioitiin tarpeelliseksi luoda derivoiva säätömekaniikka palamisilman ja kiertokaasun syötölle kattilaan, mahdollisimman tasaisen savukaasun happipitoisuuden saavuttamiseksi. Käytöstä saatavan datan perusteella arvioidaan uudelleen tarvetta lisätä derivoivaa säätömekaniikkaa eri laitteille.

Kuvassa 3.8 on esitetty yksinkertaistetusti savukaasupuhaltimen säätöperiaate. Tavoitteena on pitää jatkuvasti alipaine kuplapetikattilan palotilassa, jotta savukaasu virtaa putkissa suunniteltuun suuntaan ja kattila ei työnnä savukaasuja mahdollisista vuodoista kattilahuoneeseen. Automaation käyttöliittymästä valitaan haluttu tavoite alipaineelle ja sitä verrataan jatkuvasti antureista saatuun dataan. Tavoitteen ja mitatun paineen suhde muodostaa korjauskertoimen savukaasupuhaltimelle syötettyyn nopeusarvoon.



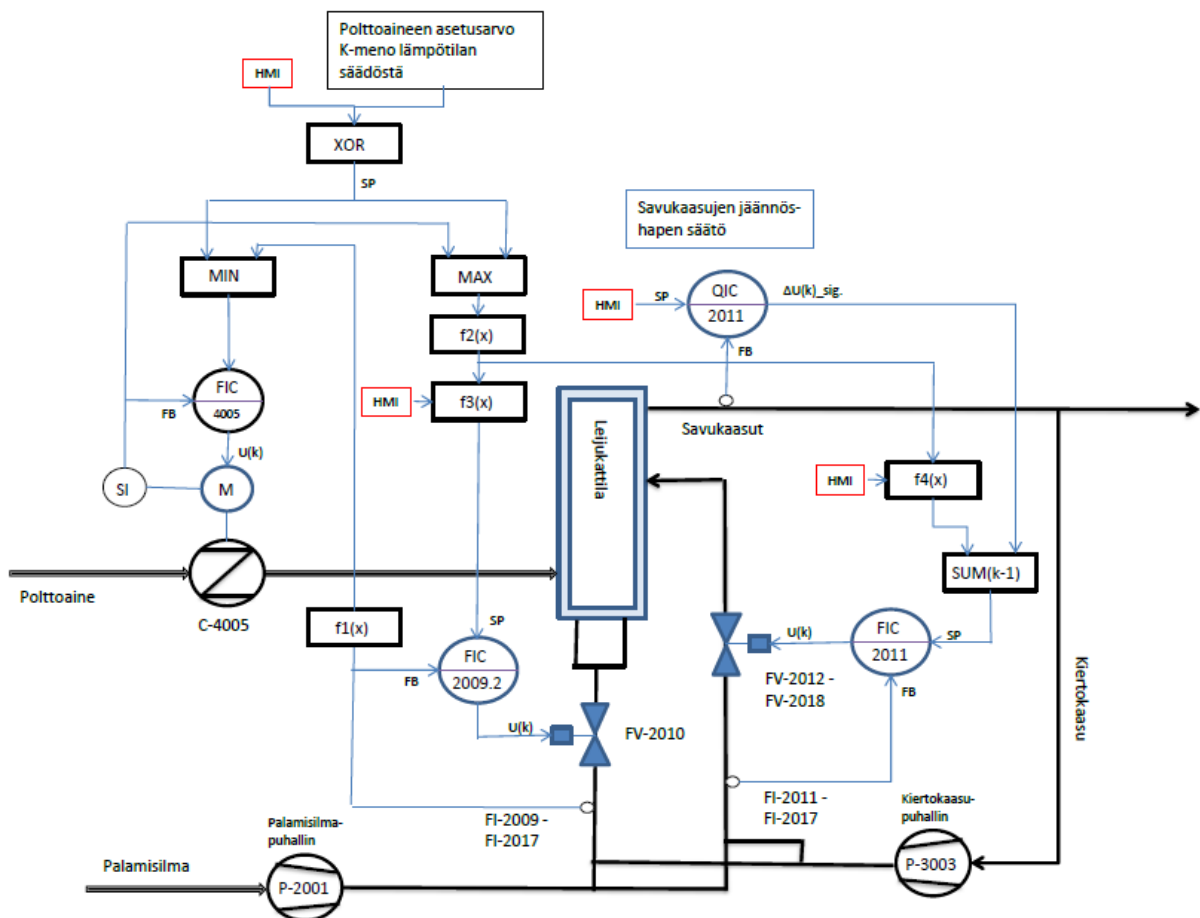
Kuva 3.8. Savukaasupuhaltimen säätökaavio. (Savonia).

Kuvassa 3.9 on esitetty palamisilma- ja kiertokaasupuhaltimien säätöperiaate. Jakotukki on kaikessa yksinkertaisuudessaan puhaltimien jälkeinen putkenosa, josta on lähdöt eri ilmatasoille. Jakotukissa pyritään pitämään automaation käyttöliittymästä valittu ylipaine. Ylipaineen tarkoituksena on, että yksittäisen säätöventtiilin toiminta ei merkittävästi häiritse muiden säätöventtiileiden toimintaa. Tavoitteen ja mitatun paineen suhde muodostaa korjauskertoimen puhaltimille syötettyihin nopeusarvoihin.



Kuva 3.9. Palamisilma- ja kiertokaasupuhaltimien säätökaavio. (Savonia).

Kuvassa 3.10 on esitetty polttoaineensyötön ja säätöventtiilien säätöperiaate. Kuvassa $f_1(x)$ on laskentafunktio polttoaineen määrälle, joka määräytyy käyttöliittymästä valitun tehon ja sinne syötetyn polttoaineen arvojen mukaan. Funktiolle korjauskerroin tulee valitun tehon ja kattilasta ulostulevan tehon suhteesta, joka tulee käyttöön vasta normaaliajossa. Häviöt pyritään ottamaan huomioon mahdollisimman tarkasti, mutta osalle niistä saadaan tarkkoja arvoja vasta käytöstä mitatun datan perusteella, kuten esimerkiksi lämpöhäviö.



Kuva 3.10. Polttoaineensyötön ja säätöventtiilien säätökaavio. (Savonia).

Polttainemäärän ja -ominaisuuksien mukaan lasketaan tarve palamisilmalle, funktio $f_2(x)$. Funktio antaa karkean arvon palamisilmapuhaltimelle ja korjauskerroin hoitaa tarkemman säädön jakotukin paineen mukaan. Käyttöliittymään syötetään haluttu palamisilman jakautuminen eri korkeustasojille, sekä kiertokaasun suhde palamisilman määrään. Funktion $f_2(x)$ ja syötettyjen suhteiden ja osuuksien perusteella laskentafunktio $f_3(x)$ laskee tavoitteen eri tasojen tilavuusvirroille. Saatua arvoa verrataan säätöventtiilin maksimivirtaukseen ja tilavuusvirta-anturin tulokseen ja lähetetään käsky säätöventtiilille väliltä 0–100 %.

Leijutusilman säätöventtiilille korjauskerroin muodostuu paine-eron tavoitteesta pedin yli mitattuun paine-eroon, tarkoituksena pitää peti leijumassa. Lisäksi leijutusilmalle määritetään minimitilavuusvirta, jolla peti pysyy ilmassa.

Laskentafunktio $f_4(x)$ vertaa käyttöliittymään syötettyä tavoitetta O_2 -pitoisuudelle mitattuun savukaasujen O_2 -pitoisuuteen ja laskee uuden tavoitteen sekundääri-ilmojen määrälle. Toimii muuten samalla tavalla kuin $f_3(x)$, mutta tarkoituksena on ottaa $f_4(x)$ laskentalogiikka käyttöön vasta normaaliajossa. Kuvassa 3.10 funktio SUM(k-1) laskee palamisilman matka-aikaa O_2 -pitoisuuden säätöön osallistuvilta venttiileiltä happimittarille. Funktio vertaa matka-aikaa O_2 -pitoisuuden muutosnopeudesta saatavaan aikaan, jolloin tavoite saavutetaan. Jos muutosnopeudesta saatu aika alittaa palamisilman matka-ajan, lukitsee funktio säätöventtiilit sen hetkiseen asentoon muutosnopeudesta saaduksi ajaksi. Venttiilien säätö vapautuu, jos mitattu O_2 -pitoisuus ei enää lähesty tavoitetta.

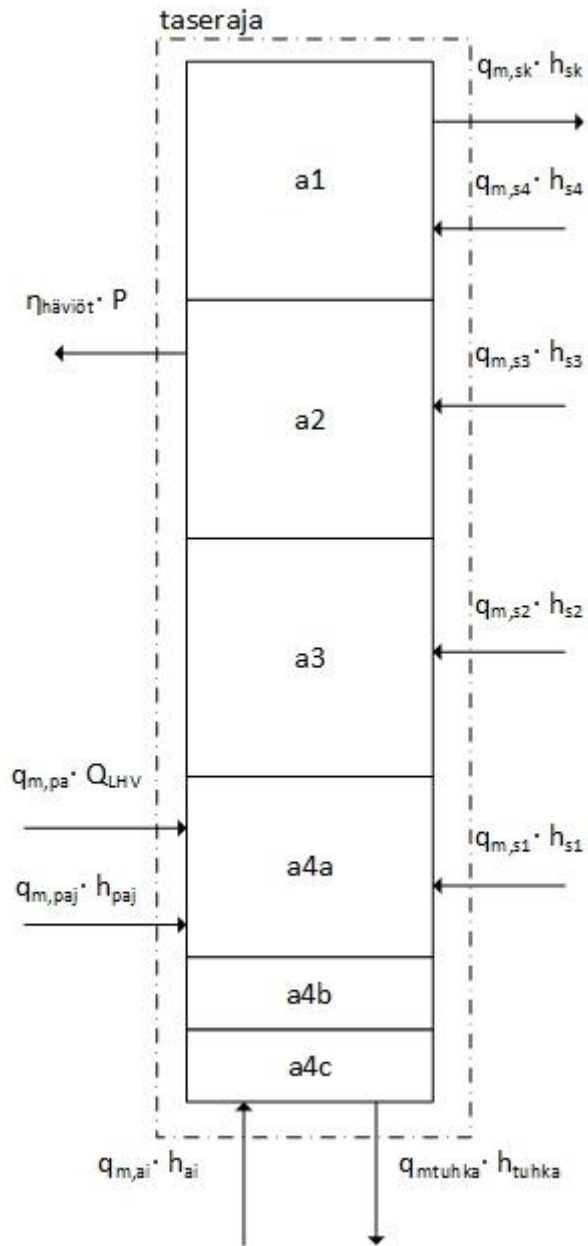
SUM(k-1)-funktioita vastaavaa laskentalogiikkaa suunniteltiin myös savukaasupuhaltimelle ja polttoaineensyöttöjärjestelmälle, mutta päädyttiin odottamaan käytöstä saatavaa dataa ja siitä mahdollisesti ilmenevää siniaaltoisuutta. Palamisilman viipymäajalle kattilassa kehitettiin karkea laskentalogiikka, ja jos lasketut arvot eivät vastaa todellisuutta, suunniteltiin viipymäajan määrittämiseksi koejärjestelyä, jossa kattilan eri korkeustasoilla olevista mittayhteistä syötettäisiin esimerkiksi argonia ja savukaasuanalysaattorilla tutkitaan milloin argon-pitoisuus kaasussa nousee.

4 TUTKIMUSKATTILAN TASELASKENTA

Työn tavoitteena on luoda Varkauden energiatutkimuskeskuksen leijukattilalle toimiva tase- ja säätölaskenta. Syntynyt laskentamalli on tarkoitus koodata automaatiojärjestelmään ja malli toimii perustana laitosta ajettaessa tulevaisuudessa. Tässä kappaleessa on esitetty tase- ja säätölaskennassa tarvittavat yhtälöt, korrelaatiot ja sovitteet, sekä lisäksi muodostettu taseraja tarkasteltavalle leijukattilaprosessille.

Liitteessä III on selitetty anturi-, säätöventtiili- ja laitetunnukset, joita käytetään alaindekseinä. Käytetyt yksinkertaistukset, oletukset ja arviot on esitetty yhtälön esityksen yhteydessä tai kappaleen 5 laskujen yhteydessä.

Kuvassa 4.1 on esitetty kuplapetikattilan energia- ja massatase. Taserajan sisälle tulevat massavirrat ovat palamisilma eri tasoilta, kiertokaasu eri tasoilta ja polttoaine. Siinä ei oteta huomioon hiekan, kalkin tai paineilman massavirtoja, sillä niiden syöttö on epäsäännöllistä ja niille ei löydy suoraa anturidataa. Polttoaineen entalpia oletetaan pieneksi johtuen sen pienestä massavirrasta, vaikka sitä saatetaan esilämmittää kiertokaasulla. Poistuvat massavirrat ovat savukaasu ja tuhka. Tuhka saattaa sisältää merkittäviä määriä hiekkaa ja kalkkia. Tuhkan kokonaismäärä on arvioitu pieneksi, jolloin sen vaikutus taseeseen on myös pieni. Taseesta myös poistuu säteily- ja johtumishäviöiden kautta jonkin verran energiaa, joka on suoraan verrannollinen kattilan lämpötehoon.



Kuva 4.1. Kuplapetikattilan energia- ja massatase.

4.1 Teoria

Tase- ja säätölaskenta on tarkoitus suorittaa jatkuvatoimisena automaatiojärjestelmässä. Tästä syystä eri taulukkoarvoista on tehty sovitteita ja korrelaatioita. Automaatiojärjestelmän laskenta- ja signaalinkäsittelykyky ei ollut selvillä taselaskentaa luodessa, joten laskuista on yritetty tehdä yksinkertaisia ja kevyitä. Korrelaatiot ja sovitteet on tehty pääosin lineaarisiksi, joita on kevyempi laskea kuin useamman asteen polynomi-sovitteita. Linearisovitteista

syntyvä virhe on arvioitu pieneksi ja jos virheet häiritsevät säätöä, voidaan ne korvata korkeamman asteen polynomisovitteilla. Laskennassa käytetyt arvot ovat joko vakioita, tulevat antureilta tai ne on syötetty automaation käyttöliittymään, kuten esimerkiksi käytetyn polttoaineen tiedot. Osalle laskennassa käytetyille arvoille ei ole saatavilla anturidataa, joten ne on arvioitu. Jos arvioiduista luvuista aiheutuu merkittävää häiriötä käytössä, ne voidaan käytön aikana mitata tai arvioida uudelleen. Iteroivaa laskutapaa on yritetty käyttää mahdollisimman vähän, ainoastaan savukaasulaskut vaativat sitä. Automaatiojärjestelmän kuormitusta on mahdollista vähentää säätämällä anturidatan päivityksen aikaväliä. Laskennan kuormitukseen vaikuttaa merkittävästi aikaväli, kuinka usein automaatiojärjestelmän tarvitsee laskea säätöjä ja tasetta.

Yhtälöstä 4.1 saadaan polttoaineen massavirta q_m jakamalla kattilan teho P polttoaineen alemmalla tehollisella lämpöarvolla Q_{LHV} , polttoaineseoksen tapauksessa käytetään massaosuuksien mukaista keskiarvoa lämpöarvolle

$$q_m = \frac{P}{Q_{LHV}}. \quad (4.1)$$

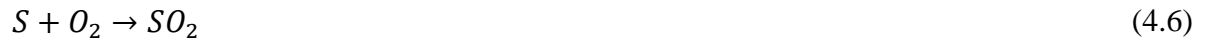
Yhtälöstä 4.2 saadaan polttoaineelle tilavuusvirta q_v jakamalla massavirta tiheydellä ρ , polttoaineseoksille käytetään keskimääräistä tiheyttä

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}. \quad (4.2)$$

Ainemäärä n voidaan selvittää jakamalla aineen massa m moolimassalla M yhtälön 4.3 mukaisesti

$$n = \frac{m}{M}. \quad (4.3)$$

Kattilassa tapahtuvat palamisreaktiot on esitetty yksinkertaistetusti yhtälöissä 4.4 – 4.7. Todellisuudessa palaminen ei ole näin yksinkertaista ja palaminen ei välttämättä tapahdu täydellisesti, kattilan eri korkeustasoilla ja savukaasuissakin saattaa esiintyä häkää CO ja typenoksideja NO_x . Myös kattilaan syötetty kalkki ja hiekka saattavat reagoida palamiskaasujen kanssa. Suurin osa palamisenergiasta kattilassa on peräisin hiilen ja vedyn reaktioista hapen kanssa.



Ilmakerroin λ saadaan jakamalla savukaasujen jäännöshappi savukaasujen ainemäärällä yhtälön 4.8 mukaisesti

$$\lambda = 1 + \frac{n_{O_2}}{n_{sk}}. \quad (4.8)$$

Savukaasujen moolimassa saadaan yhtälöstä 4.9 summaamalla jokaisen komponentin moolimassa kerrottuna komponentin osuudella kokonaisainemäärästä

$$M_{sk} = \sum_i \frac{n_i \cdot M_i}{n_{sk}}. \quad (4.9)$$

4.1.1 Polttoaineen syötön säätö $f_1(x)$

$f_1(x)$ funktion tarkoituksena on säätää polttoaineen syöttöä tulipesään aiemmin esitettyjen säätökaavioiden mukaan. Polttoaineen sulkusyöttimelle C-4005 syötettävä prosenttiluku x väliltä 0–100 % saadaan jakamalla polttoaineen tilavuusvirta sulkusyöttimen maksimivirralla $q_{v100\%}$ yhtälöstä 4.10

$$x_{C-4005} = \frac{q_{vpa}}{q_{v100\%}}. \quad (4.10)$$

Korjauskerroin z sulkusyöttimelle saadaan jakamalla automaatioon syötetty tavoite teholla lasketulla teholla yhtälön 4.11 mukaisesti

$$z_{C-4005} = \frac{P_{tavoite}}{P_{laskettu}}. \quad (4.11)$$

Palamisilmalle massavirta saadaan yhtälön 4.2 mukaisesti kertomalla anturilta saatava tilavuusvirta ilman tiheydellä. Kiertokaasun massavirta saadaan yhdistämällä kaasun

ainemäärän yhtälö yhtälöön 4.3 ja korvaamalla massa ja tilavuus massa- ja tilavuusvirralla yhtälön 4.12 mukaisesti

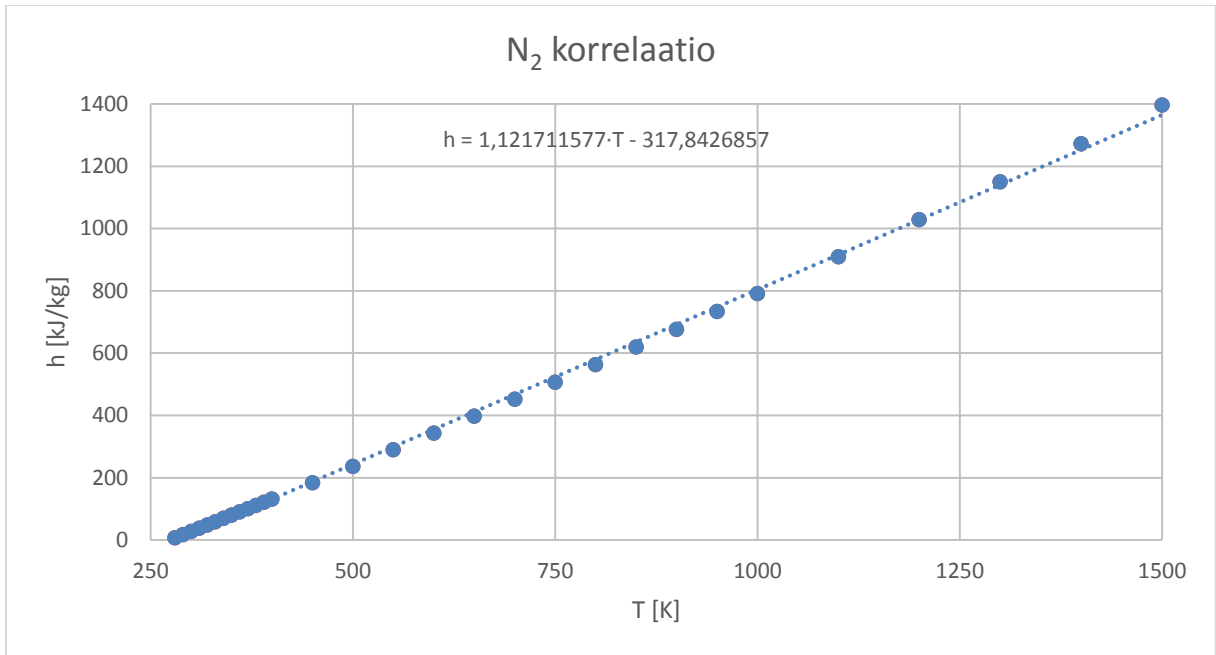
$$n = \frac{V}{V_m} \rightarrow m = \frac{V}{V_m} \cdot M \rightarrow q_{mkk} = \frac{q_v \cdot M_{sk}}{V_m}, \quad (4.12)$$

jossa V_m on ideaalikaasun moolitilavuus normaalitilassa.

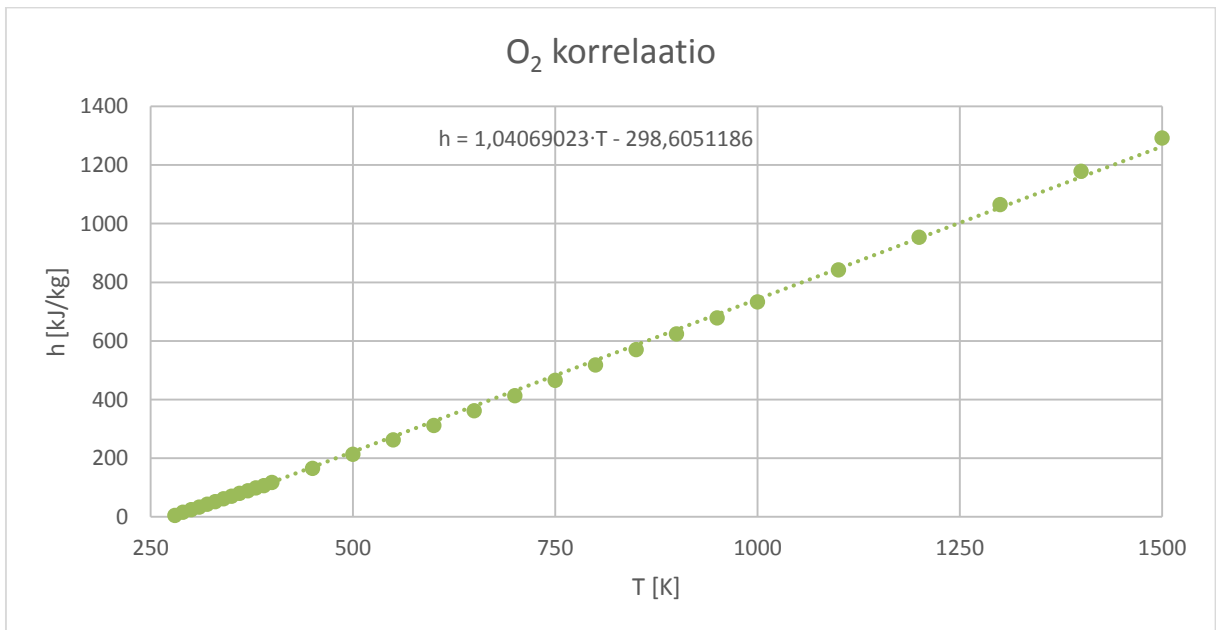
Savukaasujen massavirta saadaan yhtälöstä 4.13 kertomalla palamisesta muodostuvien savukaasujen ainemäärä yksikössä mol/kg_{pa} savukaasujen moolimassalla ja polttoaineen massavirralla. Tuloon lisätään kiertokaasun massavirta

$$q_{msk} = n_{sk} \cdot M_{sk} \cdot q_{mpa} + q_{mkk}. \quad (4.13)$$

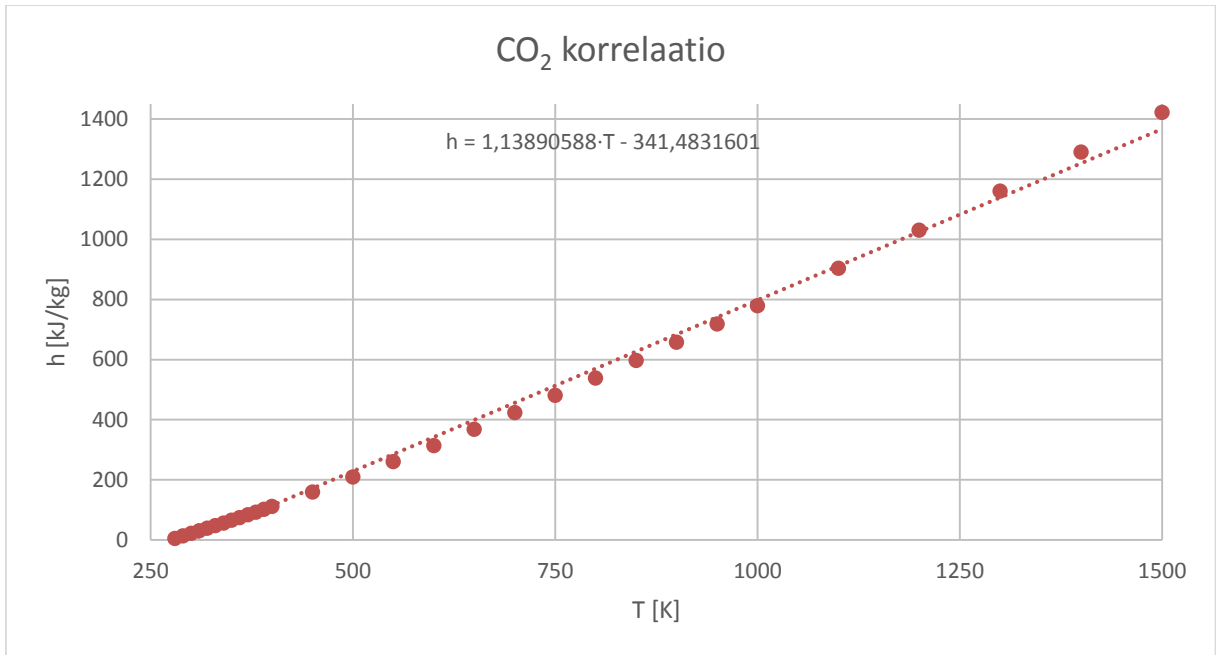
Laskettuun tehoon kattilalle tarvitaan kaasujen entalpioita h vaihtelevissa lämpötiloissa. Automaation kyky käsitellä suuria matriiseja ei ole tiedossa, tästä johtuen luotiin Termodynamiikan taulukot, taulukko 4.1, datan perusteella lineaariset sovitteet typen, hapen, hiilidioksidin, vesihöyryn ja ilman entalpialle. Käytetyt entalpiat olivat paineessa 1 bar ja väliltä 270–1500 K. Paine saattaa prosessin osasta riippuen olla hieman korkeampi tai pienempi kuin 1 bar, mutta aiheutuva virhe on arvioitu pieneksi. Prosessin kaasujen lämpötilat pyritään pitämään alle 1100 °C:ssa antureiden kestävyuden ja NO_x muodostumisen vuoksi. Palamisilma otetaan prosessiin kattilahuoneesta, jolloin sen lämpötila on kaikissa tilanteissa yli 0 °C. Sovitteet luotiin Excelin Trendline-ominaisuutta hyödyntäen, joka laskee sovitteen pienimmän neliösumman menetelmällä. Saadut korrelaatiot datapisteineen on esitetty kuvissa 4.2 – 4.6.



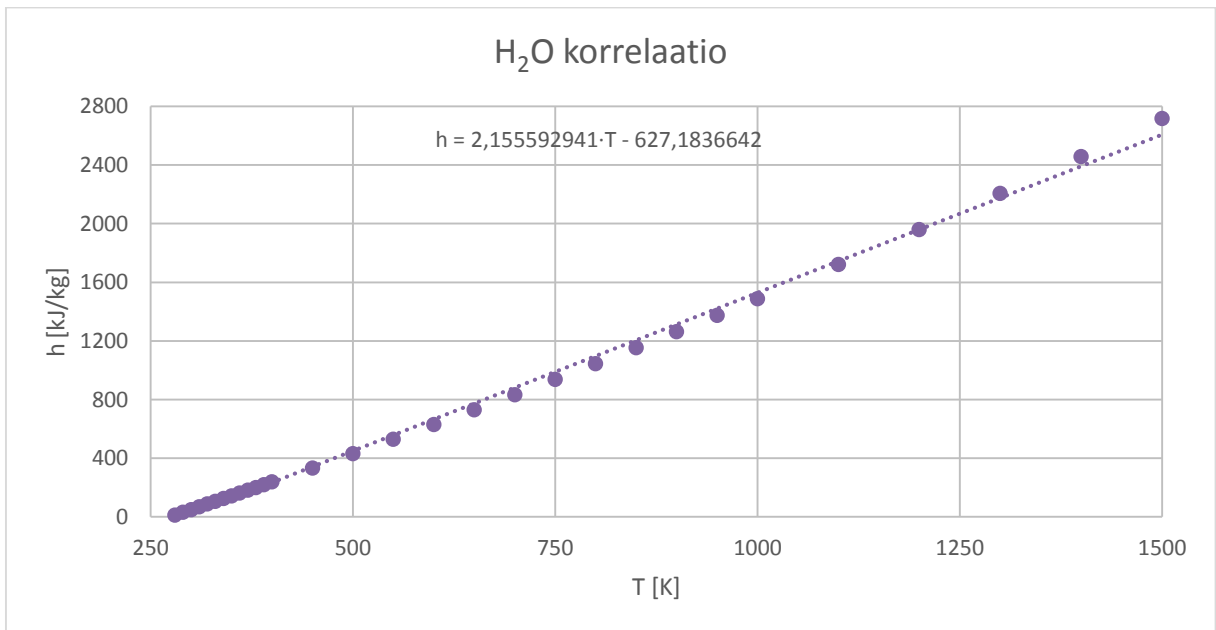
Kuva 4.2. Typen entalpian korrelaatio lämpötilan funktiona paineessa 1 bar.



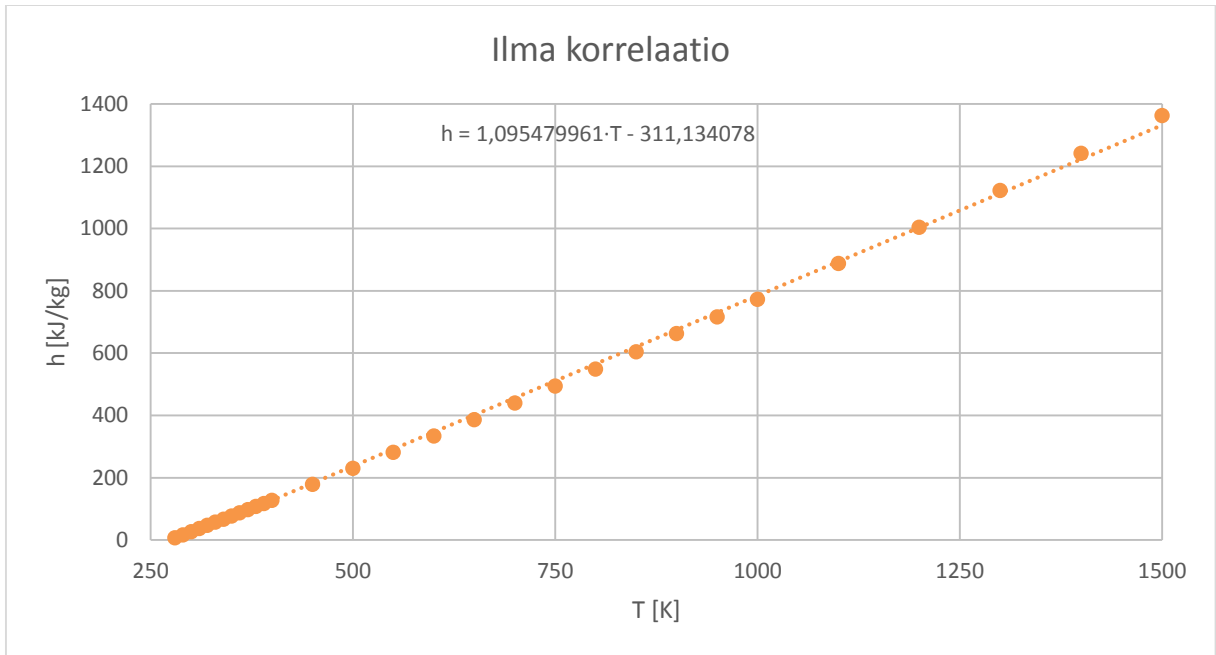
Kuva 4.3. Hapen entalpian korrelaatio lämpötilan funktiona paineessa 1 bar.



Kuva 4.4. Hiilidioksidin entalpiain korrelaatio lämpötilan funktiona paineessa 1 bar.



Kuva 4.5. Vesihöyryn entalpiain korrelaatio lämpötilan funktiona paineessa 1 bar.



Kuva 4.6. Ilman entalpian korrelaatio lämpötilan funktiona paineessa 1 bar.

Tuhkan vaikutus energiataaseeseen haluttiin ottaa huomioon ja kirjallisuudesta sille löydettiin lämpötilan T suhteen korrelaatio, esitetty yhtälössä 4.12 (Song 2013). Korrelaation muodostamiseen oli käytetty tilastotietoa 86 biomassan ja 78 kivihiilen tuhkasta. Keskimääräinen virhe korrelaatiolle on 0,65 %, joskin pesään lisätty hiekka ja kalkki saattavat aiheuttaa tavallista suurempaa virhettä. Lämpötilaväli 400–1400 K on sopiva, sillä liian korkeita lämpötiloja pedissä pyritään välttämään sintraantumisen takia.

$$h = 0,0002155 \cdot T^2 + 0,7618 \cdot T - 254,2 \quad (4.12)$$

Kuvan 4.1 taserajaan tulevat ja poistuvat energiavirrat saadaan yhtälöllä 4.13. Palamisilmalle käytettiin ilman entalpian korrelaatiota, kun taas kiertokaasun aineominaisuuksien oletettiin vastaavan savukaasua. Kiertokaasun entalpia laskettiin aineosuuksien mukaan eri komponenteille ja summattiin yhteen, argonin ja rikkioksidin osuudet pyöristettiin muille komponenteille.

$$P = q_m \cdot h \quad (4.13)$$

Kattilan säteily- ja johtumishäviötä voidaan arvioida yhtälöllä 4.14 (Vakkilainen 2014)

$$P_{\text{häviö}} = C \cdot P^{0,7}, \quad (4.14)$$

jossa C on säteily- ja johtumishäviökerroin.

Kattilan laskettu lämpöteho saadaan summaamalla taserajasta poistuvat virrat ja vähentämällä sisään tulevat virrat yhtälön 4.15 mukaan

$$P_{\text{laskettu}} = q_{\text{msk}} \cdot h + q_{\text{mtuhka}} \cdot h + P_{\text{häviö}} - \sum q_{\text{mpi}} \cdot h - \sum q_{\text{mkk}} \cdot h. \quad (4.15)$$

4.1.2 Palamisilmapuhaltimen säätö $f_2(x)$

$F_2(x)$ funktion on tarkoitus säätää palamisilmapuhaltimen toimintaa aiemmin esitettyjen säätökaavioiden mukaan. Palamisilmapuhaltimelle P-2001 tuleva ilman ainemäärä kiloa polttoainetta kohden saadaan yhtälöstä 4.16 kertomalla yhtälöstä 4.8 saatu ilmakerroin stökiömetriseen palamiseen vaaditun hapen ainemäärän kanssa ja liitteen IV taulukon IV palamisilman ominaisuuksista saatavalla luvulla

$$n_{\text{pi}} = \lambda \cdot n_{\text{O}_2} \cdot 4,77. \quad (4.16)$$

Tilavuusvirta puhaltimelle saadaan kertomalla yhtälöstä 4.16 saatu arvo polttoaineen massavirralla ja ideaalikaasun moolitilavuudella normaalitilassa yhtälön 4.17 mukaisesti

$$q_{\text{vpiNTP}} = n_{\text{pi}} \cdot q_{\text{mpa}} \cdot V_m. \quad (4.17)$$

Puhaltimelle syötettävä prosenttiluku väliltä 0–100 % saadaan yhtälön 4.10 mukaisesti jakamalla puhaltimen virtaus maksimivirralla. Puhallin pitää yllä käyttöliittymään asetettua ylipainetta p palamisilman jakotukissa ja korjauskerroin muodostuu yhtälön 4.18 mukaisesti jakamalla asetettu tavoitepaine anturin PIC-2003 mittaamalla paineella

$$z_{\text{P-2001}} = \frac{p_{\text{jtpi}}}{p_{\text{PIC-2003}}}. \quad (4.18)$$

Samalla periaatteella säädetään savukaasu- ja kiertokaasupuhaltimia. Savukaasupuhaltimelle P-3001 tilavuusvirta saadaan savukaasulaskuista ja funktiosta $f_3(x)$. Kiertokaasupuhaltimelle P-3003 haluttu tilavuusvirta saadaan funktiosta $f_3(x)$. Savukaasupuhaltimen korjauskerroin muodostuu halutusta alipaineesta pesässä jaettuna anturin PIC-7009.1-2 mittaamaan arvoon. Kiertokaasulla on oma jakotukkinsa, jonka ylipaineesta muodostuu korjauskerroin puhaltimelle palamisilmapuhaltimen tavoin.

4.1.3 Säätoventtiilien ohjaus f3(x)

F3(x) funktion tehtävä on huolehtia säätoventtiilien toiminnasta aiemmin esitettyjen säätokaavioiden mukaan. Yhdistämällä yhtälössä 4.12 esitetty kaasun ainemäärän yhtälö yhtälöön 4.3 saadaan savukaasun tiheydelle normaalitilassa yhtälö 4.19

$$\rho = \frac{M}{V_m} \quad (NTP). \quad (4.19)$$

Massavirta (kg/h) säätoventtiilin läpi saadaan kertomalla venttiilin virtauskerroin K_{VS} , paineen häviökerroin k ja puristuvuuskerroin Z yhtälön 4.20 mukaisesti (Samson). Liitteen II taulukossa I on esitetty taulukot häviö- ja puristuvuuskerroimelle. Automaatiota varten luotiin lineaarisovite välille 1,0–1,1 bar, 0–300 °C ja p_2/p_1 0,95–0,99. Kiertokaasulle käytettiin samaa taulukkoa. Säätoventtiilien painehäviöksi arvioitiin 3 kPa, sillä sille ei löydy anturidataa.

$$q_m = K_{VS} \cdot k \cdot Z \quad (4.20)$$

Yhtälöstä 4.20 saatu massavirta jaetaan yhtälön 4.2 mukaisesti tiheydellä, josta saadaan maksimivirtaus venttiilin läpi muodossa $m^3/n/h$. Säätoventtiilille lähtevä komento x (0–100 %) saadaan yhtälöstä 4.21 kertomalla yhtälöstä 4.17 saatu tilavuusvirta automaation käyttöliittymään asetetulla ilmatason osuudella x kokonaistilavuusvirrasta ja jakamalla tulo venttiilin maksimivirtauksella

$$x_{FV-2012} = \frac{q_{vpiNTP} \cdot x_{s1}}{q_{v100\%}} = \frac{q_{vpiNTPs1f3(x)}}{q_{v100\%}}. \quad (4.21)$$

Korjauskerroin yhtälöön 4.21 saadaan yhtälöstä 4.22 jakamalla tavoite tilavuusvirta ilmatasolle virtausmittauksen tuloksella

$$z_{s1} = \frac{q_{vpiNTPs1f3(x)}}{q_{vFIC-2011}}. \quad (4.22)$$

Alailman säätoventtiilin tarkoituksena on pitää peti leijumassa ja se onnistuu valitsemalla sopiva paine-ero pedin yli automaation käyttöjärjestelmään. Sopiva paine-ero riippuu petimateriaalista ja halutusta pedin paksuudesta. Korjauskerroin säätoventtiilille FV-2010 saadaan yhtälöstä 4.23 jakamalla haluttu paine-ero Δp anturin PDI-7001 mittaamalla arvolla

$$z_{ai} = \frac{\Delta p_{\text{peti}}}{\Delta p_{\text{PDI-7001}}}. \quad (4.23)$$

4.1.4 Savukaasun jäännöshapen säätö f4(x)

F4(x) funktion tarkoitus on säätää savukaasun jäännöshapetta halutuksi aiemmin esitettyjen säätökaavioiden mukaan. Palamisilman sekundääri-ilmatasojen säätöventtiilit osallistuvat säätöön, alailman tarkoitus on pitää peti leijumassa ja polttoaineen syöttöjärjestelmään syötettävä ilma varmistaa polttoaineen sujuvan liikkumisen pudotusputkessa. Kiertokaasu sisältää teoriassa savukaasuja vastaavan määrän happea, joten sen vaikutus happipitoisuuden säädössä on pieni. Funktio otetaan käyttöön automaatiossa vasta normaaliajossa, sillä se ei toimi ylös- tai alasajossa. Yhtälön 4.8 mukaisesti lasketaan ilmakerroin O₂-pitoisuuden tavoitteelle ja mitatulle arvolle ja käytetään sitä korjauskertoimena f3(x) funktiosta saatuun tilavuusvirtaan yhtälössä 4.24. Saatu tulos lasketaan yhtälöiden 4.21 ja 4.22 mukaisesti säätöventtiilille lähetettäväksi komennoksi väliltä 0–100 %.

$$q_{\text{vpiNTPs1f4(x)}} = \frac{\lambda_{\text{tavoite}}}{\lambda_{\text{mitattu}}} \cdot q_{\text{vpiNTPs1f3(x)}} \quad (4.24)$$

4.1.5 Derivoiva jäännöshapen säätö SUM(k-1)

SUM(k-1) funktion tarkoitus f4(x):n kanssa on säätää jäännöshapen määrää aiemmin esitettyjen säätökaavioiden mukaan. Tarkoituksena on laskea happipitoisuuden muutosnopeuden kautta aikaa, jolloin asetettu tavoite hapenpitoisuudelle saavutetaan ja verrata sitä keskimääräiseen palamisilman matka-aikaan säätöventtiililtä happimittarille. Jos tavoite saavutetaan nopeammin mitä keskimääräinen matka-aika on, funktio lukitsee säätöventtiilit sen hetkiseen asentoon muutosnopeudesta saaduksi ajaksi.

Ideaalikaasun tilanyhtälö saadaan yhtälön 4.25 muotoon sijoittamalla ainemäärän ja tilavuuden tilalle tiheys ja moolimassa

$$\rho = \frac{p \cdot M}{T \cdot R}, \quad (4.25)$$

jossa R on moolinen kaasuvakio.

Koska pV/T on vakio, saadaan kahden tilan välisestä suhteesta yhtälö 4.26 tilavuusvirralle

$$q_v = \frac{q_{vNTP} \cdot p_{NTP} \cdot T}{T_{NTP} \cdot p}. \quad (4.26)$$

Virtauksen nopeudelle v putkistossa pätee yhtälö 4.27, missä virtauksen tilavuusvirta jaetaan putken poikkipinta-alalla A

$$v = \frac{q_v}{A}. \quad (4.27)$$

Matka-aika t virtaukselle saadaan jakamalla sen kulkema etäisyys L yhtälöstä 4.26 saadulla nopeudella yhtälön 4.28 mukaan

$$t = \frac{L}{v}. \quad (4.28)$$

Voimalle F pätee riippuvuus massasta ja kiihtyvyydestä, josta saadaan yhtälöllä 4.29 voimavektori \vec{F}

$$\vec{F} = q_m \cdot \vec{v} = q_v \cdot \rho \cdot \vec{v}. \quad (4.29)$$

2-ulotteisessa avaruudessa saadaan voimavektorin pituus yhtälöllä 4.30

$$|\vec{F}_{xy}| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad (4.30)$$

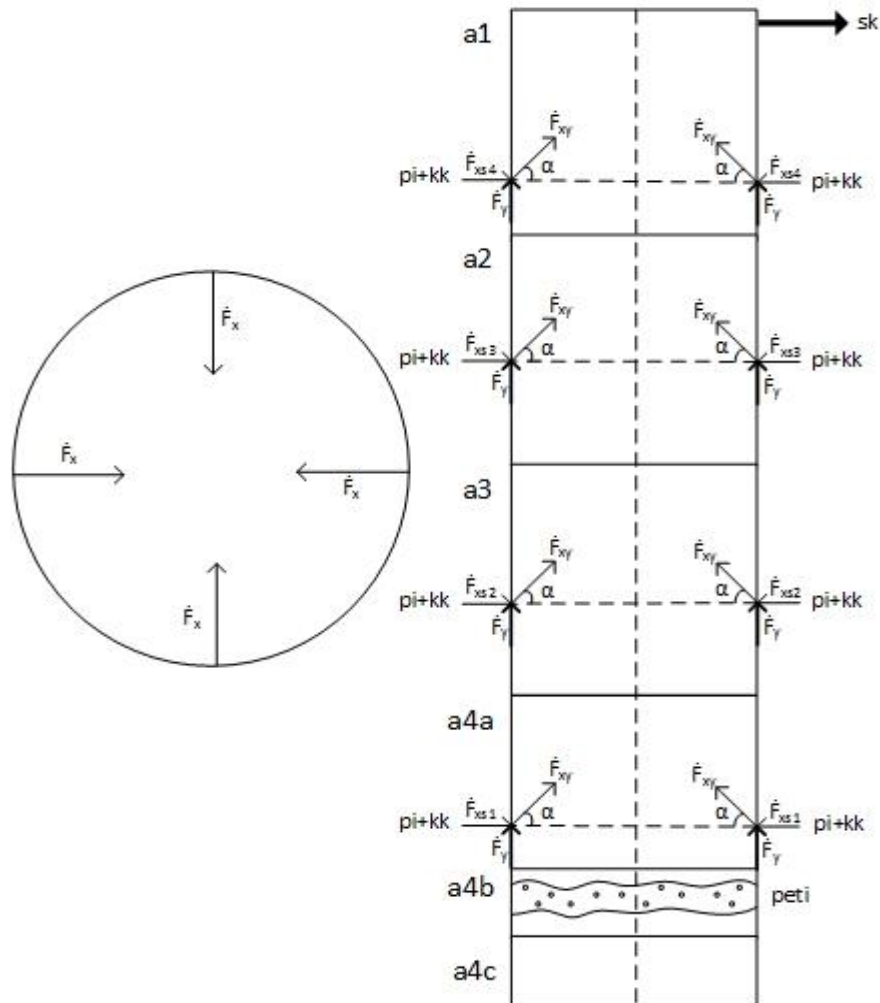
jossa F_x on kattilan kehältä saapuva virtaus ja F_y on kattilan virtaus korkeussuunnassa.

Yhtälöllä 4.31 saadaan kattilan kehältä saapuvan sekundääri-ilman ja kiertokaasun virtauksen kulma α , kun virtaus on sekoittunut pystysuoraan savukaasuvirtaukseen. Saadun kulman avulla voidaan arvioida risti- ja pyörrevirtauksesta aiheutuvaa viipymää verrattuna yhtälöllä 4.28 laskettuun aikaan kattilassa

$$\sin(\alpha) = \frac{|\vec{F}_y|}{|\vec{F}_{xy}|}. \quad (4.31)$$

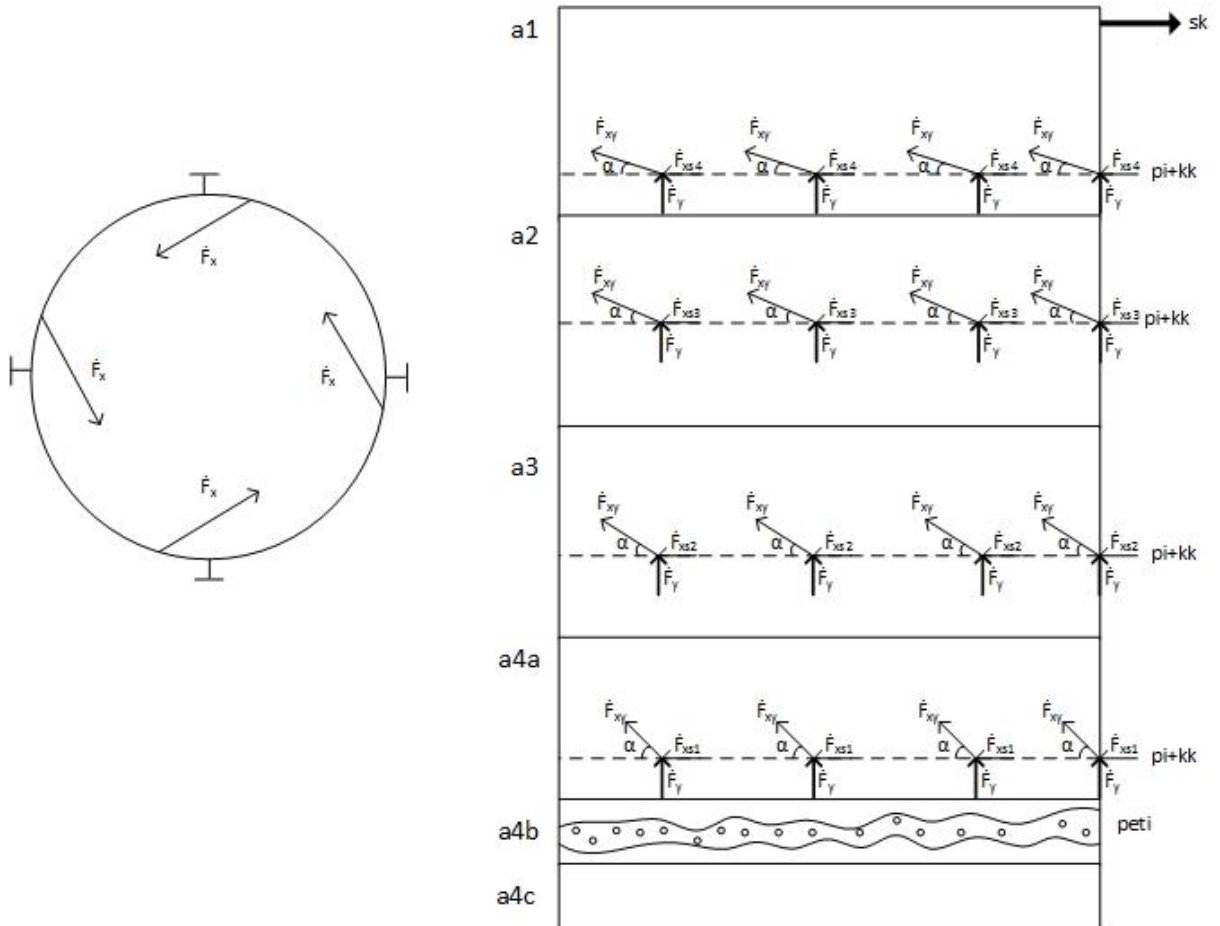
Kuvassa 4.7 on esitetty ristivirtauksen voimavektorit kattilan poikkileikkauksessa. Laskennassa ei huomioida polttoaineensyöttöjärjestelmästä tulevan virtauksen x-suuntaista voimavektoria,

eikä savukaasun poistumisesta aiheutuvaa häiriötä. Y-suuntainen vektori muodostuu palamisesta johtuvasta lämpötilan noususta ja siitä johtuvasta tiheyden pienenemisestä. X-suuntainen virtaus kohtaa keskellä toisesta reunasta tulleen virtauksen ja nollaantuu, yksinkertaistetusti ajatellen.



Kuva 4.7. Kattilan ristivirtauksen voimavektorit, poikkileikkaus.

Kuvassa 4.8 on esitetty pyörrevirtauksen voimavektorit kattilasyylinteri avattuna. Sekundääri-ilmatasoilta virtaus tulee kehää pitkin, mistä johtuen se ei kohtaa toisesta reunasta saapuvaa virtausta ja nollaannu. X-suuntaista voimaa hidastaisi ainoastaan kitka, jota ei oteta huomioon laskuissa. Tästä seuraa että kulma α pienenee jokaisella sekundääri-ilmatasolla ja kattilassa virtaavan kaasun kulkema matka pitenee.



Kuva 4.8. Pyörrevirtauksen voimavektorit kattilasylinteri avattuna.

Savukaasujen happipitoisuuden muutosnopeudelle dx pätee yhtälö 4.32, jossa ajanhetken $t=1$ O_2 -pitoisuudesta vähennetään ajanhetken $t=0$ O_2 -pitoisuus ja jaetaan se ajanmuutoksella dt

$$dx = \frac{O_{2,t=1} - O_{2,t=0}}{dt}. \quad (4.32)$$

Aika t , jolloin O_2 -pitoisuuden tavoite saavutetaan, saadaan yhtälöstä 4.33 laskemalla tavoitteen ja mitatun absoluuttinen ero ja jakamalla se O_2 -pitoisuuden muutosnopeudella

$$t = \frac{|O_{2,t=1} - O_{2,tavoite}|}{dx}. \quad (4.33)$$

Jos yhtälöstä 4.33 saatu aika on suurempi kuin nolla ja pienempi kuin yhtälön 4.31 avulla saatu aika yhtälöstä 4.28, lukitsee automaatio säätöventtiilit sen hetkiseen asentoon yhtälön 4.33 mukaiseksi ajaksi.

4.2 Automaation käyttöliittymään syötetyt ja esimerkkilaskuissa käytetyt antureiden arvot

Taulukossa 4.1 on esitetty käyttöliittymään syötettävät arvot, joita on käytetty esimerkkilaskuissa. Ne vastaavat melko tarkasti käytön aikaisia arvoja ajettaessa kattilaa 100 %:n teholla.

Taulukko 4.1. Käyttöliittymään syötettävät ja esimerkkilaskuissa käytetyt asetukset.

P_{teho}	250 [kW]	
O_2 -tavoite	3,5 [%]	
kk_{ai}	40 [%]	suhde p_i :n NTP-virtaan
kk_{si}	50 [%]	suhde p_i :n NTP-virtaan
kk_{paj}	60 [%]	suhde p_i :n NTP-virtaan
$p_{i\text{ai}}$	40 [%]	Osuus p_i :n NTP-virrasta (MAX 70%)
$p_{i\text{s1}}$	20 [%]	(MAX 45%)
$p_{i\text{s2}}$	15 [%]	(MAX 25%)
$p_{i\text{s3}}$	10 [%]	(MAX 25%)
$p_{i\text{s4}}$	10 [%]	(MAX 15%)
$p_{i\text{paj}}$	5 [%]	(MAX 30%)
Δp_{peti}	5000 [Pa]	Paine-ero pedin yli
p_{pt}	250 [Pa]	Kattilan alipaine
p_{jtpi}	9000 [Pa]	p_i jakotukin paine
p_{jtkk}	9000 [Pa]	kk jakotukin paine

Taulukossa 4.2 on esitetty käyttöliittymään syötettävät tiedot polttoaineelle ja käytettävälle polttoaineiden seokselle. Polttoaine 1 vastaa ominaisuuksiltaan jätettä, 2 turvetta, 3 haketta ja 4 pellettejä. Kattilan käyttöönoton aikaan käytettävissä on vain 2 polttoainekonttia, mutta kuljettimelle on mahdollista asentaa lisää kontteja ja tukipolttoainetta on mahdollista syöttää polttoaineseoksen sekaan. Esimerkkilaskuissa on käytetty jätteen ja turpeen 60–40 sekoitusta.

Taulukko 4.2. Polttoaineelle syötettävät tiedot.

	X_{mpa} [%]	ρ_{pa} [kg/m ³]	X_{wet} [%]	Q_{LHV} [MJ/kg]	C [%]	H ₂ [%]	S [%]	O ₂ [%]	N ₂ [%]	H ₂ O [%]	tuhka	mek. epäpuht.
pa1	60	165	45	9	60	8,6	0,17	22,29	0,75	0	8	0,19
pa2	40	140	48,5	9,7	54,5	5,58	0,19	32,6	2,01	0	5	0,12
pa3	0	500	30	11,31	51,8	6,1	0,01	41,19	0,3	0	0,5	0,1
pa4	0	110	15	17	55	7,5	0,15	29,35	1	0	7	0
Σ, ka	100	155	46,4	9,28	57,8	7,39	0,18	26,41	1,25	0	6,8	0,16

Taulukossa 4.3 on esimerkkilaskuissa käytetyt anturit ja niiden antamat arvot. Käyttötilanteessa niiden arvot vaihtelevat jatkuvasti ja toimivat säädön perusteena. Anturitunnukset ja -selitteet löytyvät liitteen III taulukosta II. Kattilan lämpötilaa saattaa samalla korkeudella mitata kaksikin anturia, jolloin automaatiojärjestelmässä käytetään niiden keskiarvoa. Ympäristön paineena käytettiin esimerkkilaskuissa 101350 Pa, sillä sitä mittaava anturi ei ollut vielä varmistunut.

Taulukko 4.3. Esimerkkilaskuissa käytetty anturidata.

Paine:		Lämpötila:	
PIC-2003	8900 [Pa]	TIC-2019	140 [°C]
PDI-2024	5000 [Pa]	TI-2020	150 [°C]
PIC-3033	8800 [Pa]	TI-2021	145 [°C]
PDI-7001	4900 [Pa]	TI-2022	140 [°C]
PIC-7009.1-2	240 [Pa]	TI-2023	135 [°C]
Happi:		TI-2025	20 [°C]
QI-3085	4,5 [%]	TI-3005	1000 [°C]
Virtaus:		TI-3031	250 [°C]
FIC-2007	12 [m ³ n/h]	TIC-4028	120 [°C]
FIC-2009	170 [m ³ n/h]	TI-5003	500 [°C]
FIC-2011	85 [m ³ n/h]	TI-7003	870 [°C]
FIC-2013	64 [m ³ n/h]	TI-7004	920 [°C]
FIC-2015	43 [m ³ n/h]	TI-7005	930 [°C]
FIC-2017	42 [m ³ n/h]	TI-7006	950 [°C]
FIC-3014	68 [m ³ n/h]	TI-7007	970 [°C]
FIC-3016	43 [m ³ n/h]	TI-7008	990 [°C]
FIC-3018	32 [m ³ n/h]	TI-7010	1000 [°C]
FIC-3020	21 [m ³ n/h]	TI-7011	850 [°C]
FIC-3022	22 [m ³ n/h]		
FIC-3061	12 [m ³ n/h]		

5 LASKENTA JA TULOSTEN TARKASTELU

Edellisessä kappaleessa esitetyt yksinkertaistukset, oletukset ja arviot pätevät esitettyihin laskuihin. Lisäksi laskennan yhteydessä on esitetty tulokseen vaikuttavat yksinkertaistukset ja oletukset.

Lasketaan yhtälön 4.1 mukaisesti polttoaineen massavirta taulukon 4.1 ja 4.2 teholla ja polttoaineen keskimääräisellä alemmalla tehollisella lämpöarvolla

$$q_{\text{mpa}} = \frac{0,25 \text{ MW}}{9,28 \text{ MJ/kg}} = 0,0269 \text{ kg/s} .$$

Tulokseen sisältyy oletus, että polttoaine sekoittuu lähes täydellisesti välisiilossa ja käyttäjän antama lämpöarvo vastaa todellista lämpöarvoa (polttoaine ei ole kuivunut tai kerännyt kosteutta).

Yhtälöllä 4.2 saadaan polttoaineelle tilavuusvirta käyttäen taulukon 4.2 keskimääräistä tiheyttä polttoaineelle

$$q_{\text{vpa}} = \frac{0,0269 \text{ kg/s}}{155 \text{ kg/m}^3} = 0,174 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} .$$

Käyttäjän ilmoittama tiheys vaikuttaa saatuun tulokseen merkittävästi. Polttoaine voi puristua kasaan esimerkiksi välisiilossa ja tiheys kasvaa, toisaalta polttoainekonttien repijärullat ja välisiilon lapasekoitin voivat pienentää tiheyttä ilmoitetusta.

Otetaan kilo märkää polttoaineseosta, lasketaan taulukon 4.2 mukaisen keskimääräisen alkuainekoostumuksen ainemäärät yhtälöllä 4.3 ja lasketaan palamisen vaatima happi palamisyhtälöiden 4.4 – 4.6 stökiometriselle palamiselle. Palamisilman koostumukselle on käytetty liitteen IV taulukkoa IV. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Stökiometrisen palamisen savukaasutaulukko.

	X_{kadry} [%]	X_{kawet} [%]	m [g/kg _{pa}]	n [mol/kg _{pa}]	O ₂ -tarve	Savukaasut					n_{Ar} [mol]	Σ [mol]
					n_{O_2} [mol]	n_{CO_2} [mol]	n_{SO_2} [mol]	n_{N_2} [mol]	n_{H_2O} [mol]			
C	57,8	30,98	309,81	25,79	25,79	25,79	-	-	-	-	-	-
H ₂	7,39	3,96	39,62	19,65	9,83	-	-	-	9,83	-	-	-
S	0,18	0,10	0,95	0,03	0,03	-	0,03	-	-	-	-	-
O ₂	26,41	14,16	141,58	4,42	-4,42	-	-	-	-	-	-	-
N ₂	1,25	0,67	6,72	0,24	-	-	-	0,24	-	-	-	-
H ₂ O	0	46,4	464	25,76	-	-	-	-	25,76	-	-	-
tuhka	6,8	3,64	36,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
mek. epäpuht.	0,16	0,09	0,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ	100	100	1000	$n_{i, stokio}$ [mol]	31,23	0,04	-	116,39	-	1,39	149,05	
				$n_{sk, stokio}$ [mol]		25,84	0,03	116,63	35,58	1,39	179,47	

Lasketaan taulukon 5.1 savukaasun ainemäärää vastaava hapen määrä O₂-tavoitteelle ja anturilta QI-3085 mitatulle pitoisuudelle. Lasketaan yhtälön 4.8 mukaisesti ilmakerroin ja kerrotaan palamisilmasta savukaasuihin tuleva tyyppi, hiilidioksidi ja argon ilmakertoimella. Tulokset iteroituvat kätevästi Excelillä taulukon 5.2 muotoon. Lopuksi lasketaan savukaasujen moolimassa yhtälöllä 4.9. Tulokseen vaikuttaa merkittävästi happimittarin tarkkuus. ABB:n toimittaman materiaalin mukaan happimittarin mittausvirhe on 2,0 % tuloksesta ja tarkkuus muuttuu kuukautta kohden tavallisesti alle 0,2 %. Anturin käyttöiäksi on arvioitu 2-3 vuotta, joten loppua kohden anturista aiheutuva mittavirhe voi vaikuttaa hyvinkin paljon laskettuihin arvoihin.

Taulukko 5.2. O₂-tavoitteen ja -mitatun mukainen savukaasun koostumus.

	n_{O_2} [mol]	n_{CO_2} [mol]	n_{SO_2} [mol]	n_{N_2} [mol]	n_{H_2O} [mol]	n_{Ar} [mol]	n_{sk} [mol]
$n_{tavoite}$	7,54	25,85	0,03	144,74	35,58	1,72	215,47
$n_{mitattu}$	10,29	25,85	0,03	154,97	35,58	1,84	228,56
$\lambda_{tavoite}$	1,24 [-]						
$M_{tavoite}$	28,52 [g/mol]						
$\lambda_{mitattu}$	1,33 [-]						
$M_{mitattu}$	28,55 [g/mol]						

5.1 Polttoaineen syötön säätö $f_1(x)$

Funktion $f_1(x)$ tarkoitus on säätää polttoaineen syöttöä kattilaan ja laskea savukaasuista kattilan lämpötehoa. Polttoaineen sulkusyöttimen maksimitilavuusvirta on 6 m³/h eli $\sim 1,67 \cdot 10^{-3}$ m³/s.

Yhtälön 4.10 mukaisesti sulkusyöttimelle syötettävä teho (0–100 %) ennen korjauskertoimen käyttöönottoa

$$x_{C-4005} = \frac{0,174 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1,667 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \cdot 100 \% = 10,43 \%$$

Sulkusyötintä ohjataan taajuusmuuttajalla ja taajuusmuuttajalle syötettävän arvon suositellaan olevan väliltä 10–100 %. Jos polttoaineen syöttöä säädetään sulkusyöttimellä ja kattilalle halutaan pienempää tehoa, tulisi sulkusyötintä pulssittaa. Pulssitus todennäköisesti lisäisi epätarkkuutta polttoaineen syötössä. Toinen vaihtoehto on käyttää välisiilon varastoruuveja polttoaineen syötön säätelyyn.

Korjauskerroin polttoaineensyöttimelle muodostuu tasekuvan 4.1 mukaisesti lasketusta tehosta. Taulukossa 5.3 on esitetty massavirrat, entalpiat ja tehot taserajaan tuleville ja poistuville virroille. Palamisilman massavirta saadaan yhtälöllä 4.2, kiertokaasun massavirta yhtälöllä 4.12 ja savukaasun yhtälöllä 4.13. Tuhkan massavirtaan oletetaan sisältyvän myös mekaaniset epäpuhtaudet savukaasutaulukosta 5.1 ja tuhkan oletettiin poistuvan kattilasta alakautta, jolloin TI-5003 anturilta saadaan tietoa tuhkan lämpötilasta. Todellisuudessa merkittävä osa tuhkasta voi poistua savukaasujen mukana kattilan yläpäästä. Petimateriaalina toimivan hiekan ja kalkin vaikutus energiataseeseen arvioitiin pieneksi, ne poistuvat prosessista tuhkan kanssa ja määrälle ei ole mittausta. Entalpiat laskettiin kuvien 4.2 – 4.6 mukaisilla korrelaatioilla, kiertokaasun koostumus oletettiin savukaasuja vastaavaksi. Argonin ja rikkioksidin osuudet pyöristettiin muille aineille. Tuhkan entalpia laskettiin yhtälöllä 4.12. Tehot saatiin yhtälöstä 4.13. Säteily- ja johtumishäviöt saatiin yhtälöstä 4.14, johon syötettiin käyttöliittymään valittu teho yksikössä MW ja C oli 11,57, sama jota oli käytetty kattilan mitoituslaskennassa. Laskennallinen lämpöteho yhtälön 4.15 mukaan.

Taulukko 5.3. Taserajasta laskettu lämpöteho.

	q_m [kg/s]	h [kJ/kg]	P [kW]
pi_{ai}	0,057	141,5	8,0
pi_{s1}	0,028	152,4	4,3
pi_{s2}	0,021	146,9	3,1
pi_{s3}	0,014	141,5	2,0
pi_{s4}	0,014	136,0	1,9
pi_{paj}	0,004	119,6	0,5
kk_{ai}	0,024	161,6	3,9
kk_{s1}	0,015	174,4	2,7
kk_{s2}	0,011	168,0	1,9
kk_{s3}	0,007	161,6	1,2
kk_{s4}	0,008	155,1	1,2
kk_{paj}	0,004	135,9	0,6
savukaasu	0,246	1264,3	310,8
tuhka	0,001	463,6	0,5
häviöt			4,4
P			284,3

Suurimmat virheet taselaskennassa arvioitiin liittyvän lämpötila-antureiden tarkkuuteen, mahdollisiin ilmapuotoihin ja säteily- ja johtumishäviön arviointiin kaavalla. Lämpötila-antureiden tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä keskiarvoa silloin kun usea anturi mittaa samaa arvoa (esimerkiksi TI-7004 ja TI-7012). Mahdolliset kuumat pisteet kattilan sisällä voivat vaikuttaa mittaustulokseen merkittävästi. Säteily- ja johtumishäviöiden vaikutusta voidaan pienentää eristämällä kattila hyvin ja käyttämällä lämpökameraa mahdollisten vuotokohtien havaitsemiseksi. Ilmapuotojen määrä tulisi arvioida käytöstä saatavan datan perusteella ja mahdolliset vuotokohtat tukkia, mikäli vuotoa on paljon.

Korjauskerroin yhtälön 4.11 mukaisesti

$$z_{C-4005} = \frac{250 \text{ kW}}{284,3 \text{ kW}} = 0,879.$$

Korjauskerroin otetaan huomioon vasta kun funktiot $f4(x)$ ja $SUM(k-1)$ ovat käytössä ja silloin syöttimelle lähetettävä teho

$$x_{C-4005} = \frac{0,174 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1,667 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \cdot 0,879 \cdot 100 \% = 9,17 \% .$$

5.2 Palamisilmapuhaltimen säätö f2(x)

Funktion f2(x) tarkoitus on säätää palamisilman määrää prosessiin ja ylläpitää palamisilman jakotukille valittu ylipaine. Palamisilman ainemäärä polttoainekiloa kohden yhtälön 4.16 mukaisesti käyttäen ilmakertoimelle taulukon 5.2 tavoitearvoa ja hapen ainemäärälle taulukon 5.1 stökiometrisen palamisen arvoa

$$n_{\text{pi}} = 1,24 \cdot 31,23 \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{pa}}} \cdot 4,77 = 185,04 \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{pa}}} .$$

Muutetaan yhtälön 4.16 tulos palamisilman NTP-tilavuusvirraksi yhtälön 4.17 mukaisesti

$$q_{\text{vpiNTP}} = 185,04 \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{pa}}} \cdot 0,0269 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,0224 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} = 0,11 \text{ m}^3/\text{s} .$$

Lasketaan yhtälön 4.18 mukaisesti korjauskerroin puhaltimelle syötettävälle teholle

$$z_{\text{P-2001}} = \frac{9000 \text{ Pa}}{8900 \text{ Pa}} = 1,01 .$$

Yhtälön 4.10 mukaisesti jaetaan laskettu tilavuusvirta puhaltimen maksimitilavuusvirralla ja huomioidaan korjauskerroin

$$x_{\text{P-2001}} = \frac{0,11 \frac{\text{m}^3/\text{n}}{\text{s}}}{0,167 \frac{\text{m}^3/\text{n}}{\text{s}}} \cdot 1,01 = 67,79 \% .$$

5.3 Säätöventtiilien ohjaus $f_3(x)$

Funktion $f_3(x)$ tarkoitus on ohjata säätöventtiilien toimintaa. Maksimivirtaus venttiilin läpi riippuu valmistajan ilmoittamasta K_{VS} arvosta, virtaavan aineen ominaisuuksista ja paine-erosta venttiilin yli. Painehäviölle venttiilin yli ei ole saatavilla anturidataa, joten sen arvioitiin olevan 3 kPa. Liitteen II taulukosta I tehtiin lineaarisovite k :lle ja Z :lle välille 1,0–1,1 bar, 0–300 °C ja p_2/p_1 0,95–0,99 ja tehtiin oletus, että taulukko pätee likimäärin myös kiertokaasulle. Yhtälön 4.20 mukaisesti laskettiin maksimimassavirta venttiilin läpi ja jaettiin se kaasun NTP-tiheydellä ja tulokseksi saatiin venttiilien maksimitilavuusvirta taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. Säätöventtiilien maksimivirtaus.

	K_{VS} [m ³ /h]	k [-]	Z [-]	q_m [kg/h]	$q_{v100\%}$ [m ³ n/h]
FV-2008	40	0,317	17,82	225,79	187,5
FV-2010	160	0,311	16,15	802,65	666,6
FV-2012	100	0,311	16,15	501,66	416,6
FV-2014	63	0,311	16,15	316,04	262,5
FV-2016	63	0,311	16,15	316,04	262,5
FV-2018	40	0,311	16,15	200,66	166,6
FV-3015	100	0,311	13,99	434,90	341,5
FV-3017	63	0,311	13,99	273,99	215,1
FV-3019	40	0,311	13,99	173,96	136,6
FV-3021	40	0,311	13,99	173,96	136,6
FV-3023	40	0,311	13,99	173,96	136,6
FV-3060	40	0,311	13,99	173,96	136,6

Taulukossa 5.5 on esitetty säätöventtiileille lähtevät komennot (0–100 %). Tilavuusvirran tavoite on laskettu käyttöliittymään asetetun palamisilman jakautumisen ilmatasolle ja kiertokaasun suhde palamisilmaan mukaan, hyödyntäen funktiosta $f_2(x)$ saatavaa palamisilman tilavuusvirtaa. Tavoite on jaettu säätöventtiilin maksimivirtauksella yhtälön 4.21 mukaan ja korjauskerroin saatu yhtälön 4.22 avulla vertaamalla tavoitetta anturin mittaamaan virtaukseen. FV-2010 venttiili vastaa ali-ilman syöttämisestä pedin alle ja pedin leijuttamisesta, sille korjauskerroin yhtälöstä 4.23. FV-2010 korjauskertoimen tarkoitus on pitää paine-ero pedin yli vakiona.

Taulukko 5.5. Säätoventtiilien ohjaus.

	tavoite		korjaus	
	q_{vNTP} [m ³ n/h]	x [%]	z [-]	venttiilille x [%]
FV-2010	160,90	33,79	1,02	34,48
FV-2012	80,45	19,31	0,95	18,28
FV-2014	60,34	22,99	0,94	21,67
FV-2016	40,22	15,33	0,94	14,34
FV-2018	40,22	24,14	0,96	23,12
FV-2008	20,11	10,73	1,68	17,98
FV-3015	64,36	18,85	0,95	17,84
FV-3017	40,22	18,70	0,94	17,49
FV-3019	30,17	22,09	0,94	20,82
FV-3021	20,11	14,72	0,96	14,10
FV-3023	20,11	14,72	0,91	13,46
FV-3060	12,07	8,83	1,01	8,88

Säätoventtiileille lähtevien arvojen ei tarvitse olla kovin tarkkoja sillä säätö on käytännössä jatkuvatoimista ja lähtevä komento iteroituu sopivaksi ajan kuluessa. Käytettyä arviota 3 kPa:n painehäviöstä voidaan joutua muuttamaan tarkemmaksi käytöstä saatavan datan perusteella.

5.4 Savukaasun jäännöshapen säätö f4(x)

Funktion f4(x) tavoite on säätää savukaasun jäännöshappi asetettuun tavoitteeseen. Ainoastaan sekundääri-ilmatasojen säätoventtiilit osallistuvat säätöön. Funktio otetaan käyttöön vasta kun ylösajo on suoritettu. Funktion f3(x) tavoite tilavuusvirralle kerrotaan mitatun ilmakertoimen ja tavoitteen suhteella yhtälön 4.24 mukaisesti. Korjauskerroin ja komento venttiilille (0–100 %) lasketaan samalla tavalla kuin funktiossa f3(x). Taulukossa 5.6 on esitetty jäännöshapen säätöön osallistuvien venttiilien komennot.

Taulukko 5.6. Jäännöshapen optimointi säätoventtiileillä.

	uusi tavoite		korjaus	
	$\lambda_{tav}/\lambda_{mit}$ [-]	q_{vNTP} [m ³ n/h]	z [-]	venttiilille [%]
FV-2012	0,93	75,13	0,88	15,94
FV-2014	0,93	56,35	0,88	18,90
FV-2016	0,93	37,57	0,87	12,50
FV-2018	0,93	37,57	0,89	20,16
FV-3017	0,93	37,57	0,87	15,25
FV-3019	0,93	28,17	0,88	18,16
FV-3021	0,93	18,78	0,89	12,30
FV-3023	0,93	18,78	0,85	11,74

5.5 Derivoiva jäännöshapen säätö SUM(k-1)

SUM(k-1) funktion tarkoitus on laskea keskimääräistä aikaa, joka kestää kaasulta kulkea jäännöshapen optimointiin osallistuvilta säätöventtiileiltä savukaasujen happimittarille QI-3085. Tarkkaan tulokseen vaadittaisiin monimutkaisia 3D-mallinnuksia, säätöautomaatiolle arvioitiin riittäväksi yksinkertaistetulla mallilla saatu approksimaatio, jota voidaan käytöstä saatavan datan perusteella muokata. Jos happipitoisuuden muutosnopeudesta saatu aika on pienempi kuin laskettu keskimääräinen matka-aika kaasulle, funktio lukitsee säätöventtiilit sen hetkiseen asentoon yhtälöstä 4.33 saaduksi ajaksi. Lasketaan yhtälön 4.32 mukaisesti savukaasujen jäännöshapen muutosnopeus

$$dx = \frac{(4,5 - 4,35)\%}{1 \text{ s}} = 0,15 \frac{\%}{\text{s}} .$$

Yhtälön 4.33 mukaisesti laskettu aika jolloin jäännöshapen tavoite saavutetaan

$$t = \frac{|4,35 - 3,5| \%}{0,15 \frac{\%}{\text{s}}} = 5,67 \text{ s} .$$

Tuloksiin vaikuttaa merkittävästi happimittarin tarkkuus ja mittauksen kohina. Tarvittaessa happimittarin tuloksia voidaan keskiarvoistaa käyttäen pidempää aikaväliä kuin 1 sekunti ja ottaa huomioon mittauksen viive.

Taulukossa 5.7 on esitetty savukaasun viipymäaika eri segmenteissä ilman x-suuntaisia voimia. Myöskään kaasun hidastumista pedissä ei ole huomioitu, eikä kitkaa. Savukaasun ja palamisilman moolimassat ovat melko lähellä toisiaan ja kattilan yläosaa lähestyttäessä kaasun koostumus on lähes ainoastaan savukaasua, joten tiheyden laskemiseen on käytetty savukaasulaskujen mukaista, mittauksista laskettua moolimassaa. Tiheys saadaan yhtälöstä 4.25. Tilavuusvirta laskettiin yhtälöllä 4.26, kaasun nopeus kattilassa yhtälöllä 4.27 ja viipymäaika kattilasegmenttiä kohden yhtälöllä 4.28.

Taulukko 5.7. Savukaasun viipymäaika kattilasegmenteissä pelkkänä y-suuntaisena virtana.

	a4b	a4a	s1	a3	s2	a2	s3	a1	s4
L [mm]	600	828	612	1388	612	1388	612	788	538
ρ [kg/m ³]	0,317	0,304	0,304	0,291	0,289	0,284	0,279	0,275	0,273
q_{vNTP} [m ³ n/s]	0,047	0,054	0,089	0,089	0,116	0,116	0,134	0,134	0,152
q_v [m ³ /s]	0,177	0,211	0,350	0,365	0,478	0,486	0,569	0,578	0,660
v [m/s]	1,84	2,19	3,63	1,90	2,49	2,53	2,97	3,02	3,44
t [s]	0,33	0,38	0,17	0,73	0,25	0,55	0,21	0,26	0,16

Saadut nopeudet kaasulle ovat melko pieniä, joten myös kitka olisi pieni. Jos käytöstä saatava data eroaa merkittävästi teoreettisesta, tulisi kitka sisällyttää malliin sillä xy-suuntainen nopeus on jonkin verran pelkkää y-suuntaista nopeutta suurempi.

Taulukossa 5.8 on esitetty kaasun viipymäaika kattilassa ristivirtauksessa. Aiemmin esitetyssä kuvassa 4.7 on havainnollistettu ristivirtauksen vektorit. Ali-ilmassa on myös huomioitu palamisilman ja kiertokaasun virtaus polttoaineensyöttöjärjestelmästä. Sekundääri-ilmatasojen tiheydet, tilavuusvirrat ja nopeudet on laskettu syöttöputkissa kattilan kehältä yhtälöiden 4.25 – 4.27 mukaan. Voimavektorit laskettiin yhtälöillä 4.29 ja 4.30. X-suuntainen voimavektori jaettiin kahdella, koska virtaukset kohtaavat keskellä ja x-suuntainen voima nollaantuu, yksinkertaistetusti ajatellen. Todellisuudessa virtausten kohtaaminen aiheuttaisi turbulenssia ja pyörrettä kattilan keskiosassa. Summavektorin ja x-suuntaisen vektorin välinen kulma saatiin yhtälöstä 4.31. Aika saatiin jakamalla taulukossa 5.7 esitetyt viipymäajat segmentille lasketulla kulmalla. Kokonaisviipymäajaksi kattilassa ristivirtauksella saatiin 4,67 s.

Taulukko 5.8. Viipymäajat kattilassa ristivirtauksella.

	ai	s1	s2	s3	s4
ρ [kg/m ³]	0,304	0,820	0,830	0,840	0,851
q_v [m ³ /s]	0,211	0,051	0,038	0,025	0,025
v [m/s]	2,19	11,78	14,87	9,80	15,81
\dot{F}_x [N]	-	0,247	0,234	0,103	0,166
\dot{F}_y [N]	0,140	0,140	0,202	0,349	0,479
\dot{F}_{xy} [N]	-	0,284	0,309	0,364	0,507
$\sin(\alpha)$	-	0,473	0,608	0,819	0,810
t [s]	0,70	1,90	1,31	0,57	0,19

Taulukossa 5.9 on esitetty kaasun viipymäaika kattilassa pyörrevirtauksessa. Kuvan 4.8 mukaisesti x-suuntaiset voimavektorit eivät kohtaa ja nollaannu; jokainen ilmansyöttötaso vahvistaa pyörrevirtausta ja seurauksena syntyy huomattavasti pidempi viipymäaika: 10,11 s.

Taulukko 5.9. Viipymäajat kattilassa pyörrevirtauksella.

	ai	s1	s2	s3	s4
\dot{F}_y [N]	0,140	0,140	0,202	0,349	0,479
\dot{F}_x [N]	-	0,495	0,963	1,169	1,501
\dot{F}_{xy} [N]	-	0,514	0,984	1,220	1,576
$\sin(\alpha)$	-	0,269	0,204	0,282	0,300
t [s]	0,70	3,34	3,89	1,66	0,52

Pyörrevirtausta käyttäessä kitkan vaikutus tulokseen on suurempi kuin ristivirtauksella. Mikäli laskettu tulos eroaa havainnoista käytöstä, tulisi kitka sisällyttää malliin.

Kattilan viipymäajan lisäksi tarvitaan aika, joka kuluu matkassa säätöventtiililtä kattilaan ja kattilasta happimittarille QI-3085. Liitteen IV taulukossa VII on esitetty kaasun kulkema keskimääräinen matka putkistossa. Pituudet on mitattu pääosin polttolaitoksen 3D-mallista ja muutama puuttuva putken osa käsin itse laitokselta. Keskimääräisellä pituudella tarkoitetaan syöttöputken jakautuessa neljään osaan kattilan kehälle, keskiarvoa kaasun kulkemasta matkasta. Taulukossa 5.10 on esitetty kaasun nopeus putkessa ja matka-aika, jotka on laskettu yhtälöillä 4.27 ja 4.28. Lisäksi on laskettu savukaasun matka-aika kattilasta happimittarille. Putkitunnukset löytyvät liitteen I kuvasta I.

Taulukko 5.10. Palamisilman ja kiertokaasun viipymääajat putkistossa.

						Σ [s]
$pi_{ai}+kk$	L-2311 DN100 L-2345 DN125					
v [m/s]	3,32	4,36				
t [s]	0,84	0,20				1,04
$pi_{s1}+kk$	L-2347 DN32	L-2319 DN50	L-2317 DN80	L-2315 DN100	L-2313 DN100	
v [m/s]	11,78	5,49	4,79	5,56	3,40	
t [s]	0,12	0,50	0,15	0,20	1,19	2,16
$pi_{s2}+kk$	L-2349 DN25	L-2327 DN40	L-2325 DN50	L-2323 DN80	L-2321 DN80	
v [m/s]	14,87	6,50	8,13	7,10	4,36	
t [s]	0,06	0,39	0,24	0,36	0,82	1,86
$pi_{s3}+kk$	L-2351 DN25	L-2335 DN40	L-2333 DN50	L-2331 DN80	L-2329 DN80	
v [m/s]	9,80	4,28	5,36	4,68	2,89	
t [s]	0,09	0,54	0,13	1,00	1,67	3,43
$pi_{s4}+kk$	L-2353 DN20	L-2343 DN32	L-2341 DN40	L-2339 DN65	L-2337 DN65	
v [m/s]	15,81	5,68	8,46	6,36	3,85	
t [s]	0,07	0,38	0,08	1,01	1,34	2,87
sk	Kattilasta QI-3085 DN350					
v [m/s]	6,96					
t [s]	0,11					0,11

Laskettuun nopeuteen vaikuttaa kaasun paine putkistossa. Yksinkertaistuksena paineena käytettiin ympäristön painetta lisättynä jakotukin ylipaineella palamisilmalle. Palamisilman ja kiertokaasun seokselle käytettiin tilavuusvirtaa taulukosta 5.8. Kaasu kulkee usean venttiilin ja mutkan läpi, joten todellisuudessa kaasun paine on laskennassa käytettyä pienempi.

Hapen säätöön osallistuvien venttiilien kaasuvirtaus ei kulje koko kattilan läpi, ainoastaan sekundääri-ilmatasoilta ylöspäin. Jokaiselle sekundääri-ilmatason virtaukselle laskettiin aika säätöventtiililtä happimittarille ja saaduista ajoista laskettiin painotettu keskiarvo, painotuksena käytettiin palamisilman jakautumista eri ilmatasolle. Keskimääräinen matka-aika säätöventtiileiltä FV-2012–2018 happimittarille on tällöin ristivirtauksella noin 4,73 s ja pyörrevirtauksella 8,1 s. Pyörrevirtauksen tapauksessa funktio $SUM(k-1)$ lukitsee säätöventtiilit sen hetkiseen asentoon 5,67 sekunniksi, koska jäännöshapen muutosnopeudesta saatu aika $5,67\text{ s} < 8,1\text{ s}$. Ristivirtauksella säätö vielä jatkuisi.

5.6 Kiertokaasu- ja savukaasupuhaltimet

Kiertokaasupuhaltimen P-3003 säätö tapahtuu samalla tavalla kuin palamisilmapuhaltimen funktiossa $f_2(x)$. Kiertokaasupuhaltimella on oma jakotukki, johon voidaan valita haluttu ylipaine käyttöliittymästä. Puhaltimen maksimitilavuusvirta on noin $0,083 \text{ m}^3\text{n/s}$. Tilavuusvirta saadaan funktiosta $f_3(x)$ summaamalla taulukon 5.5 kiertokaasun tilavuusvirrat yhteen. Kiertokaasu-puhaltimelle lähtevä käsky on silloin

$$x_{P-3003} = \frac{0,052 \frac{\text{m}^3\text{n}}{\text{s}}}{0,083 \frac{\text{m}^3\text{n}}{\text{s}}} \cdot \frac{9000 \text{ Pa}}{8800 \text{ Pa}} = 63,77 \%$$

Savukaasupuhallin P-3001 vastaa valitun alipaineen ylläpitämisestä kattilassa. Alipaineen tarkoitus on varmistaa savukaasun virtaavan suunniteltuun suuntaan ja estää savukaasua pääsemästä kattilahuoneeseen mahdollisista vuodoista. Savukaasupuhaltimen maksimitilavuusvirta on sama kuin palamisilmapuhaltimella, eli $0,167 \text{ m}^3\text{n/s}$. Tilavuusvirta saadaan yhtälön 4.17 mukaisesti käyttäen savukaasutaulukossa laskettua savukaasun ainemäärää polttoainekiloa kohden. Puhaltimelle lähtevä käsky (0-100 %) on silloin

$$x_{P-3001} = \frac{(228,6 \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{pa}}} \cdot 0,0269 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,0224 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} + 187,04 \frac{\text{m}^3\text{n}}{\text{h}}) \cdot 250 \text{ Pa}}{0,167 \frac{\text{m}^3\text{n}}{\text{s}} \cdot 240 \text{ Pa}} = 100,0 \%$$

Saatu tulos laskusta oli 118,73 %, mikä tarkoittaa että savukaasupuhaltimien mitoituksessa tai alkuarvojen valinnassa on tapahtunut virhe. Savukaasupuhaltimia on kaksi samanlaista. Toisen, P-3002:n, tarkoituksena on toimia prosessin muiden osien virtauksen säätäjänä kuten esimerkiksi materiaalintestauskammion. P-3001 puhaltimen tarkoitus on toimia primäärisenä savukaasupuhaltimena, jolla säädetään alipainetta pesässä. Pientämällä taulukossa 4.1 esitellyt, automaation käyttöliittymään valitut arvot kiertokaasulle 20 %:iin, saavutetaan P-3001 puhaltimelle lähtevä käsky väliltä 0–100 %.

Mahdollisuuksia korjata ongelma on useita. Yksi on koodata automaatiojärjestelmään puhallin P-3002 käynnistymään kun P-3001 saavuttaa 100 %:n, mikä taas vaikuttaisi negatiivisesti prosessin muiden osien säädettävyyteen. Toinen on muuttaa prosessia siten, että kiertokaasupuhallin ottaisi kaasun ennen savukaasupuhaltimia. Haittana olisi tällöin häiriö

kattilan alipaineen säädölle, sillä kiertokaasupuhallin säätää vain ylipainetta kiertokaasun jakotukissa. Yksi vaihtoehto olisi ajaa kiertokaasupuhallinta suuremmalla teholla pienentäen P-3001 puhaltimen jättöpuolen painetta ja kasvattaen tilavuusvirtaa yli toiminta-arvojen mukaisen maksimin. Haittana olisi tällöin merkittävästi suurempi kuristussäädön tarve kiertokaasun säätöventtiileillä ja mahdollinen käyttöiän aleneminen savukaasu- ja kiertokaasupuhaltimille. Viimeinen vaihtoehto olisi taas koodata automaatiojärjestelmään kiertokaasun maksimivirtausta rajoittava laskentafunktio, joka laskisi polttoaineen ominaisuuksien ja halutun jäännöshapen perusteella suurimman mahdollisen kiertokaasun suhteen palamisilmasta. Haittapuolena olisi että 100 % teholla ja ~1,3 ilmakertoimella suhde olisi maksimissaan noin 20 %, mikä merkittävästi rajoittaisi kiertokaasun käyttämistä lämpötilan säätöön kattilan sisällä.

6 YHTEENVETO

Ilmastonmuutoksen edetessä ja yleisen ympäristötietouden lisääntyessä, maailmalla on keskitetty enemmän huomiota energiantuotannon päästöihin kuin ennen. Suurin osa maailman käytetystä energiasta tuotetaan palamisprosesseilla, joista vapautuu hiilidioksidia ilmakehään. Isossa kokoluokassa poltto tapahtuu usein kattiloissa, jotka voidaan jakaa perinteisempään arinatekniikkaan ja uudempaan leijupetitekniikkaan.

Leijupetikattilat tarjoavat perinteisiin arinakattiloihin verrattuna useita etuja. Leijutettu kuplapeti, petimateriaalina usein hiekka, käyttäytyy nesteen tavoin jolloin reaktiopinta-ala ja sekoittuminen pedin sisällä ovat aivan omaa luokkaansa verrattuna kiinteisiin peteihin. Pienemmät NO_x- ja CO-päästöt saavutetaan vaiheistetun polton ja tasaisen palamislämpötilan ansiosta. Vähentyneet SO_x-päästöt johtuvat kalkin lisäyksestä petimateriaalin sekaan ja tuhkan sisältämän kalsiumin reaktioista rikkiyhdisteiden kanssa. Leijukattiloissa on mahdollista polttaa huono- ja vaihtelevalaatuisia polttoaineita, sillä merkittävä osa prosessin lämpöenergiasta on varastoitunut petimateriaaliin. Petimateriaali toimii tehokkaana lämmöntasaajana, kuplapetikattiloissa pedin sisäiset lämpötilaerot ovat tyypillisesti 2–5 °C. (Peña 2011, Thermopedia).

Työssä on käyty läpi Savonia-ammattikorkeakoulun rakentaman Varkauden energiatutkimuskeskuksen kuplapetikattilan prosessia, komponentteja ja mittausjärjestelyä. Työssä tutkitun leijukattilan erityispiirre on kattilan oman vesipiirin puute; tutkimuskattilalla ei ole mahdollista tuottaa höyryä ja lämpöä saadaan talteen ainoastaan jätelämpökattilalla. Mahdollisesti tulevaisuudessa leijukattilan savukaasujen lämpöenergialla pyritetään ORC-prosessia sähköntuotantoon. Varkauden energiatutkimuskeskuksen tutkimusympäristöön kuuluu myös arinakattila, pyrolyysiöljyn poltin, materiaalintestauskammio ja maalämpöjärjestelmä.

Diplomityön tavoitteena oli luoda mahdollisimman pitkälle automatisoitu säätö- ja taselaskenta leijukattilalle, joka vaatii käyttäjältä ainoastaan alkuarvojen syötön halutun palotapahtuman turvaamiseksi. Säätö- ja taselaskennan pohjana toimivat laitoksen PI-kaaviot ja muutama yleistason säätökaavio. Työssä on esitetty suuri määrä kattilan taselaskentaan liittyviä yhtälöitä ja niiden käyttöön liittyviä oletuksia ja yksinkertaistuksia. Työssä esitettyjen korrelaatioiden ja taulukkoarvojen soviteiden muodostamisessa on otettu huomioon prosessin toiminta-arvot.

Suurin haaste laskennassa oli luoda approksimaatiomalli kaasun viipymääjälle kattilassa. Viipymääjällä on suuri merkitys savukaasujen jäännöshapen säädössä, mikäli säädössä halutaan huomioida happipitoisuuden muutosnopeus ja hyödyntää sitä parametrin siniaaltoisuuden vähentämiseksi. Vastaavaa muutosnopeuden huomiointia suunniteltiin myös puhaltimien ja polttoaineen syötön säädölle, mutta varsinainen tarve pystytään arvioimaan vasta käytössä. Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta asettaa omat vaatimukset viipymääjälle kattilassa; approksimaatiomallilla palotapahtuman voidaan varmistaa täyttävän lain vaatimukset kaikissa ajotilanteissa, jos kattilassa suunnitellaan poltettavan enemmän jätettä kuin 50 tonnia vuodessa. (Finlex 151/2013).

Työn tuloksena syntynyt säätö- ja laskentamalli on käännettävissä automaatiojärjestelmään ja toimii pohjana laitosta ajettaessa tulevaisuudessa. Työssä oli myös tarkoitus käsitellä laitoksen käynnistyksestä saatavaa tietoa säätömekaniikan toimivuudesta ja mahdollisista parannuksista siihen, mutta leijupetikattilan käynnistyksen aikataulu ei suonut mahdollisuutta tähän. Jatkotutkimuksen tarve liittyykin lähinnä luodun säätömallin varmentamiseen käytössä ja parantamalla mallia käytöstä saatavan tiedon perusteella. Muilta osin työn tavoitteet saavutettiin.

Työssä on esitelty laskennasta saatavia tuloksia tyypillisillä, ajonaikaisilla arvoilla ajettaessa kattilaa 100 %:n teholla. Saatujen tulosten tarkkuutta ja niihin vaikuttaneita tekijöitä on arvioitu ja käytetyt yksinkertaistukset, oletukset ja arviot on esitelty laskennan ja teoriaosan yhteydessä. Laskennassa kävi ilmi, että savukaasupuhaltimien mitoituksessa ei mahdollisesti huomioitu suurten kiertokaasun osuuksien vaikutusta savukaasun tilavuusvirtaan. Ongelmaan ehdotettiin muutamia ratkaisuja, joista yksinkertaisin on rajoittaa kiertokaasun suhde palamisilman virtaan noin 20 %:iin.

LÄHDELUETTELO

Baritaud M. 2012. Securing Power during the Transition: Generation Investment and Operation Issues in Electricity Markets with Low-Carbon Policies. International Energy Agency Insight Series 2012

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

Black R. 2013. A brief history of climate change. BBC. Viitattu 9.3.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/v9cMCL>

BP. 2015. Statistical Review of World Energy 2015. Statistical Review – Data workbook. Viitattu 8.3.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/AhCVyD>

Brown L. & Fogler H. 2008. 12. Diffusion and Reaction in Porous Catalysts – 12.3 Fluidized Bed Reactors. University of Michigan. Viitattu 5.1.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/s8s6Ok>

Charlson S. & Taylor B. 1999. Bubbling Fluidized Bed Installation Capitalizes on Sludge. TAPPI Engineering Conference, Anaheim, California, U.S.A., 12.–16.9.1999. [Verkkodokumentti], viitattu 7.1.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/65wU3q>

Crawford M. 2012. Fluidized-Bed Combustors for Biomass Boilers. Viitattu 5.1.2016. Saatavilla: <https://goo.gl/0ZSVE0>

Finlex. 151/2013. Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta. Saatavilla: <http://goo.gl/a7fw0U>

Finlex. 445/2010. Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista. Saatavilla: <http://goo.gl/v0683E>

Hälvä H. 1996. Termodynamiikan taulukot. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan osasto. Lappeenranta. (Termodynamiikan taulukot)

Juutilainen O. 2015. Tutkimusleijupetikattilan suunnittelu, kilpailutus ja käyttöönotto. Insinöörin lopputyö. Savonia-ammattikorkeakoulu, energiatekniikan koulutusohjelma. Saatavilla: <https://goo.gl/VB84za>

Khan A., de Jong W., Jansens P. & Spliethoff H. 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, Vol. 90, No. 1, 21–50.

Kovács J. 2001. *IFRF Combustion Handbook. 1. Principles of Fluidisation*. Viitattu 4.1.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/BJkLdB>

MacDonald J. 2016. Clean energy defies fossil fuel price crash to attract record \$329bn global investment in 2015. *Bloomberg New Energy Finance*. Viitattu 9.3.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/XutPoh>

Matilainen M. 2014. Kiertopetitekniiikan (CFB) kehitysnäkymät suuren kokoluokan voimalaitoksissa. *Energiakongressi, Tampereen Messu- ja Urheilukeskus, 29.10.2014*. 56–70. [Verkkodokumentti], viitattu 5.1.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/lxuSnQ>

Maughan J. 2015. *A Brief History Of Peak Oil*. Viitattu 8.3.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/9kxT3X>

Peña J. 2011. *Bubbling Fluidized Bed (BFB), When to use this technology? Industrial Fluidization South Africa*. Johannesburg, 15.–17.11.2011. [Verkkodokumentti], viitattu 5.1.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/UkeJIy>

Samson. 2012. *Application Notes for Valve Sizing, Sizing examples, AB 04 EN*. [Verkkodokumentti], viitattu 16.12.2015. Saatavilla: <https://goo.gl/ATzVke>

Savonia-ammattikorkeakoulu. Varkauden energiätutkimuskeskuksen suunnittelumateriaali. Hankintojen yhteydessä valmistajien toimittama materiaali. Savonian sisäinen verkkolevy. (Savonia)

Seppänen R., Kervinen M., Parkkila I., Karkela L. & Meriläinen P. 2005. *Maol-taulukot*. 5. painos. Otava. Helsinki. ISBN: 978-951-1-20607-1. (Maol)

Song G., Shen L., Xiao J. & Chen L. 2013. Estimation of Specific Enthalpy and Exergy of Biomass and Coal Ash. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, Vol. 35, No. 9, 809–816

Thermopedia. 2011. Fluidized bed. Viitattu 4.1.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/Oxngr6>

United Nations Environment Programme (UNEP). Technical Study Report on Biomass Fired Fluidized Bed Combustion Boiler Technology For Cogeneration. [Verkkodokumentti], viitattu 7.1.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/vxPaeX>

Vakkilainen E. 2014. BH50A0800 Höyrykattilatekniikka, luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Wikipedia Commons. 2014. Total World Energy Consumption by Source 2013. Viitattu 9.3.2016. Saatavilla: <https://goo.gl/2qTCTT>

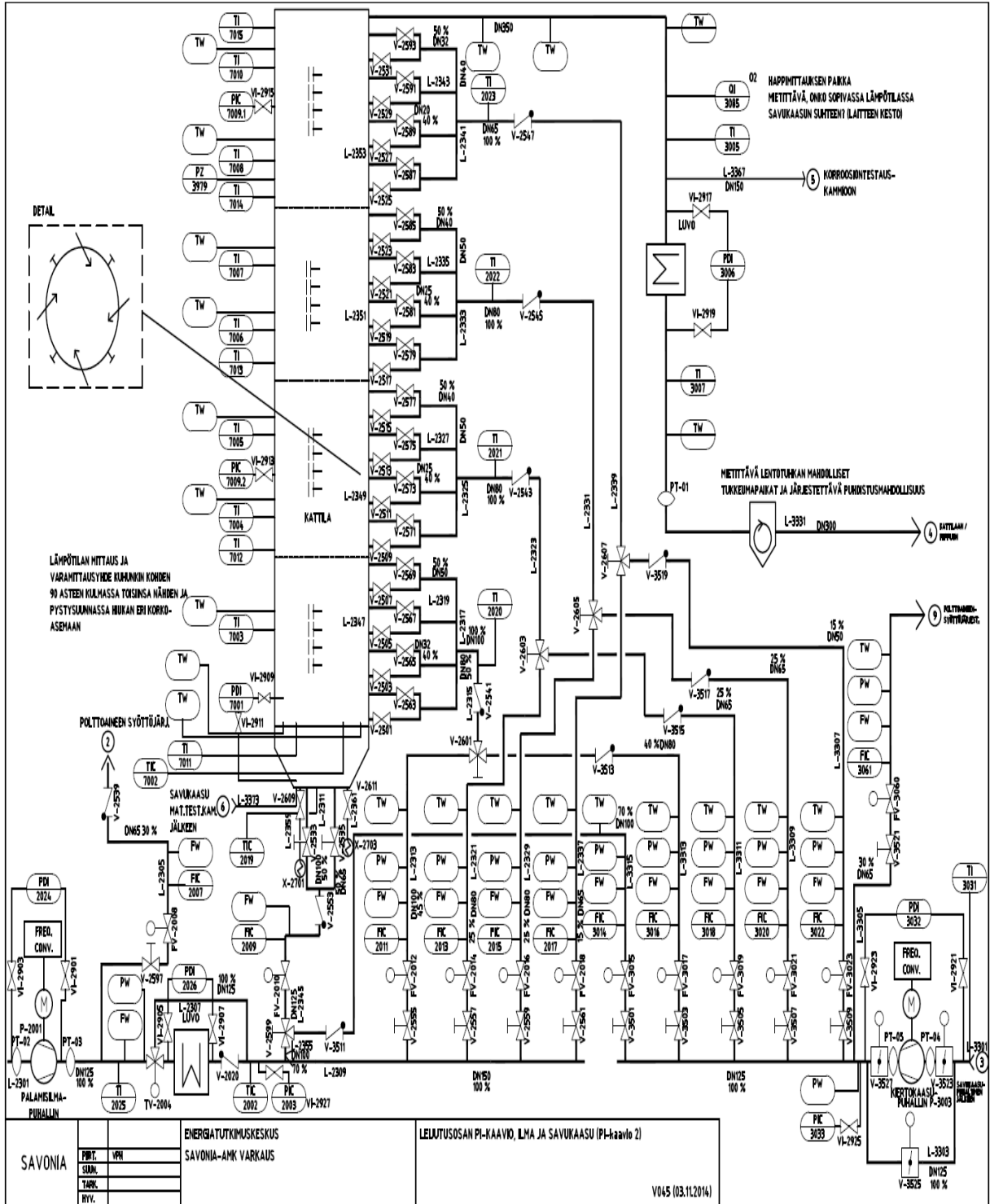
Yang W. 2005. Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems. Taylor & Francis e-Library. ISBN: 0-203-91274-8.

Yergin D., Gross S., Meyer N. & Tillemann-Dick L. 2013. Energy Vision 2013, Energy transitions: Past and Future. [Verkkodokumentti], viitattu 8.3.2016. Saatavilla: <http://goo.gl/BamdOF>

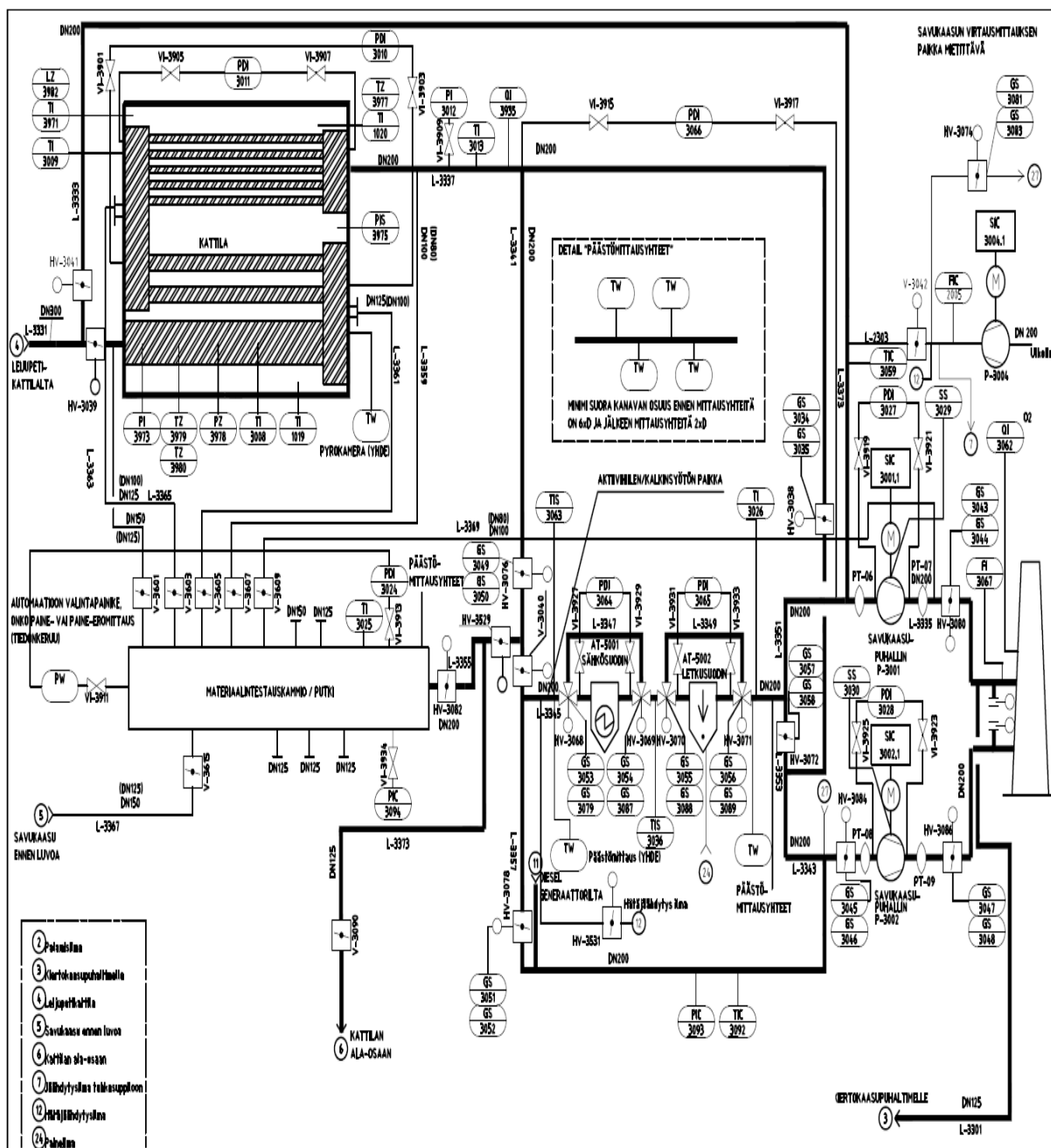
Zenz F. 1978. The Fluid Mechanics of Bubbling Beds. Fibonacci Quarterly, Vol.16, No.2, 171–183.

Zevehoven R. & Kilpinen P. 2001. Control of Pollutants in Flue Gases and Fuel Gases. Helsinki University of Technology (Aalto University). ISBN 951-22-5527-8.

Liite I Leijupetikattilan ja savukaasujen PI-kaaviot



Kuva I. Palamisilman ja savukaasun tarkka PI-kaavio. (Savonia).



Kuva II. Savukaasun tarkka PI-kaavio. (Savonia).

Liite II Venttiilien virtauksen k- ja Z-arvot

Taulukko I. Säätöventtiilien maksimivirtauksen laskennassa käytetyt k- ja Z-arvot. (Samson).

Table 3 · Pressure loss coefficient k as a function of p_2/p_1

Pressure ratio p_2/p_1	0.527	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.99
Pressure loss coefficient k	1	0.982	0.978	0.935	0.884	0.818	0.730	0.623	0.448	0.207

Table 4 · Compressibility factor Z for air · All pressures stated as absolute pressures in bar

Compressibility factor Z for ...		Dry air for following temperatures ...							
P_1 in bar	0° C	20° C	50° C	100° C	150° C	200° C	250° C	300° C	
0.1	1.71	1.65	1.57	1.47	1.38	1.30	1.24	1.18	
0.2	3.42	3.30	3.15	2.93	2.77	2.60	2.47	2.31	
0.3	5.13	4.96	4.74	4.39	4.13	3.89	3.71	3.55	
0.4	6.84	6.61	6.29	5.85	5.50	5.20	4.95	4.72	
0.5	8.55	8.26	7.87	7.32	6.88	6.50	6.18	5.92	
0.6	10.26	9.90	9.42	8.79	8.24	7.79	7.42	7.09	
0.7	11.97	11.56	11.00	10.22	9.61	9.09	8.64	8.27	
0.8	13.68	13.22	12.58	11.72	11.00	10.40	9.79	9.45	
0.9	15.40	14.86	14.15	13.18	12.36	11.69	11.12	10.62	
1.0	17.10	16.50	15.72	14.65	13.75	13.00	12.35	11.81	
1.1	18.83	18.15	17.30	16.07	15.10	14.32	13.60	13.00	
1.2	20.50	19.80	18.20	17.52	16.50	15.60	14.70	14.12	

Liite III Anturit, säätöventtiilit ja laitetunnukset

Taulukko II. Anturitunnukset ja paikat.

Anturit:	
Paine:	Lämpötila:
PIC-2003 Palamisilma esilämmittimen jälkeen	TIC-2002 Palamisilma esilämmittimen jälkeen
PDI-2024 Paine-ero palamisilma-puhaltimen yli	TIC-2019 Palamisilma a4c segmentissä
PDI-2026 Palamisilman paine-ero esilämmittimen yli	TI-2020 Palamisilma ja kiertokaasu sek. ilma 1. taso
PDI-3006 Savukaasun paine-ero esilämmittimen yli	TI-2021 Palamisilma ja kiertokaasu sek. ilma 2. taso
PDI-3032 Paine-ero kiertokaasu-puhaltimen yli	TI-2022 Palamisilma ja kiertokaasu sek. ilma 3. taso
PIC-3033 Kiertokaasun paine kiertokaasu-puhaltimen jälkeen	TI-2023 Palamisilma ja kiertokaasu sek. ilma 4. taso
PDI-7001 Pedin paine-ero	TI-2025 Palamisilma ennen esilämmitintä
PIC-7009.1-2 Tulipesän paine	TI-3005 Savukaasu ennen esilämmitintä
Happi:	TI-3007 Savukaasu esilämmittimen jälkeen
QI-3085 Savukaasun happipitoisuus	TI-3031 Kiertokaasu ennen kiertokaasu-puhallinta
Virtaus:	TIC-4028 Polttoaineen pudotusputki
FIC-2007 Palamisilma pa-syöttöjärjestelmään	TI-5003 Poistettava tuhka
FIC-2009 Palamisilma arinalle	TIC-7002 Petilämpötila
FIC-2011 Palamisilma sek. ilma 1. taso	TI-7003 Tulipesän sek. ilma 1. taso
FIC-2013 Palamisilma sek. ilma 2. taso	TI-7004, TI-7012 Tulipesän sek. ilma 1. taso jälkeen
FIC-2015 Palamisilma sek. ilma 3. taso	TI-7005 Tulipesän sek. ilma 2. taso
FIC-2017 Palamisilma sek. ilma 4. taso	TI-7006, TI-7013 Tulipesän sek. ilma 2. taso jälkeen
FIC-3014 Kiertokaasu arinalle	TI-7007 Tulipesän sek. ilma 3. taso
FIC-3016 Kiertokaasu sek. ilma 1. taso	TI-7008, TI-7014 Tulipesän sek. ilma 3. taso jälkeen
FIC-3018 Kiertokaasu sek. ilma 2. taso	TI-7010 Tulipesän sek. ilma 4. taso
FIC-3020 Kiertokaasu sek. ilma 3. taso	TI-7011 Petilämpötila
FIC-3022 Kiertokaasu sek. ilma 4. taso	TI-7015 Tulipesän sek. ilma 4. taso jälkeen
FIC-3061 Kiertokaasu pa-syöttöjärjestelmään	TI-9002 Ulkoilma
	TI-9003 Kattilahuone

Taulukko III. Säätöventtiilit ja laitetunnukset.

Säätöventtiilit:		Laitteet:	
FV-2008	Palamisilma pa-syöttöjärjestelmään	C-4005	Polttoaineen sulkusyötin
FV-2010	Palamisilma ja kiertokaasu arinalle	P-2001	Palamisilmapuhallin
FV-2012	Palamisilma sek. ilma 1. taso	P-3001	Savukaasupuhallin I
FV-2014	Palamisilma sek. ilma 2. taso	P-3002	Savukaasupuhallin II
FV-2016	Palamisilma sek. ilma 3. taso	P-3003	Kiertokaasupuhallin
FV-2018	Palamisilma sek. ilma 4. taso		
FV-3015	Kiertokaasu arinalle		
FV-3017	Kiertokaasu sek. ilma 1. taso		
FV-3019	Kiertokaasu sek. ilma 2. taso		
FV-3021	Kiertokaasu sek. ilma 3. taso		
FV-3023	Kiertokaasu sek. ilma 4. taso		
FV-3060	Kiertokaasu pa-syöttöjärjestelmään		

Liite IV Laskennassa käytetyt vakiot ja arvot

Taulukko IV. Aineominaisuuksia. (Maol, Termodynamiikan taulukot).

Palamisilman ominaisuudet			
	M [g/mol]	[%]	X/O ₂ [-]
N ₂	28,01	78,09	3,73
O ₂	32,00	20,95	1,00
Ar	39,95	0,93	0,04
CO ₂	44,01	0,03	0,00
Σ	28,96	100,00	4,77
C	12,01		
H ₂	2,02		
S	32,07		
H ₂ O	18,02		
SO ₂	64,07		

Taulukko V. Käytetyt vakiot. (Maol).

R	8,3145 [J/mol*K]
V _m	0,0224 [m ³ /mol]
d _{pt}	494 [mm] (palotilan halkaisija ylemmät osiot)
A _{pt}	0,1917 [m ²] (palotilan ala ylemmät osiot)
d _{peti}	350 [mm] (pedin halkaisija)
A _{peti}	0,0962 [m ²] (palotilan pedin ala)
g	9,807 [m/s ²]
T _{NTP}	293,15 [K] (20°C)
ρ _{NTP}	101350 [Pa]
T	273,15 [K] (0°C)
ρ _{INTP}	1,204 [kg/m ³] (ilman tiheys 20°C)

Taulukko VI. Käytetyt putkikoot.

Putkikoko d_i [mm] A [m ²]	
DN20	22,3 0,0004
DN25	28,5 0,0006
DN32	37,2 0,0011
DN40	43,1 0,0015
DN50	54,5 0,0023
DN65	70,3 0,0039
DN80	82,5 0,0053
DN100	108,3 0,0092
DN125	133,7 0,0140
DN150	160,3 0,0202
DN350	347,6 0,0949

Taulukko VII. Palamisilman keskimääräinen matka säätöventtiililtä kattilaan.

pi_{ai} [m]	L-2311 DN100 L-2345 DN125	2,80	0,87			
pi_{s1} [m]	L-2347 DN32 L-2319 DN50 L-2317 DN80 L-2315 DN100 L-2313 DN100	1,41	2,75	0,74	1,09	4,05
pi_{s2} [m]	L-2349 DN25 L-2327 DN40 L-2325 DN50 L-2323 DN80 L-2321 DN80	0,84	2,52	1,94	2,54	3,58
pi_{s3} [m]	L-2351 DN25 L-2335 DN40 L-2333 DN50 L-2331 DN80 L-2329 DN80	0,84	2,31	0,70	4,65	4,85
pi_{s4} [m]	L-2353 DN20 L-2343 DN32 L-2341 DN40 L-2339 DN65 L-2337 DN65	1,04	2,15	0,71	6,41	5,15
sk [m]	Pesästä QI-3085 DN350	0,8				