

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A1101 Diplomityö

*Jouni Salovaara*

## Jätelämpökattilan ja prosessiuunin mallinnus

Tarkastajat: Professori, TkT Timo Hyppänen

TkT Kari Myöhänen

Ohjaajat: DI Esa Tamminen

DI Esa Lehikoinen

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jouni Salovaara

## **Jätelämpökattilan ja prosessiuunin mallinnus**

Diplomityö

2019

103 sivua, 23 kuvaa, 18 taulukkoa, 67 yhtälöä ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Timo Hyppänen, TkT Kari Myöhänen

Ohjaajat: DI Esa Tamminen, DI Esa Lehikoinen

Hakusanat: jätelämpökattila, prosessiuuni, tasetäsmäys

Tämän diplomityön tavoitteena on tarkastella energia- ja massataseen täsmäystä sekä FCC-prosessiyksikön jätelämpökattilaa ja prosessiuunia tasetäsmäyksen, FRNC5-PC- ja Petro-SIM-simulointiohjelmien avulla. Työn aikana myös selvitettiin erinäisiä ongelmia liittyen työn kohteiden prosessimittauksiin ja prosessien toimintaan.

Jätelämpökattilalle luotiin energia- ja massatasetäsmäysmalli, jonka avulla FRNC5-PC ohjelmalla määritettiin kattilan lämmönsiirtimille keskimääräiset konduktanssit. Keskimääräiset konduktanssit annetaan Petro-SIM-ohjelmalle jätelämpökattilan höyryn tuotannon ennustusmoodia varten. Malleista saatiin hyviä tuloksia ja ne toimivat tarkasti.

Luonnonvedolla toimivalle prosessiuunille ei voitu tehdä tasetäsmäysmallia uunin savukaasujen ja palamisilman virtausmittausten puutteen vuoksi. Prosessiuunin mallinnuksessa FRNC5-ohjelmalla kuitenkin huomattiin, että uunin häviöiden ja vuotoilman tuntemus on tärkeää mallinnuksen ja operoinnin kannalta. Työn tuloksena huomattiin, että tärkeää olisi myös monitoroida säännöllisesti uunin ja jätelämpökattilan toimintaa optimaalisen toiminnan takaamiseksi.

## **ABSTRACT**

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

Jouni Salovaara

### **Modelling of heat recovery steam generator and process furnace**

Master's Thesis

2019

103 pages, 23 figures, 18 tables, 67 equations and 2 appendices

Examiners: Professor, D.Sc Timo Hyppänen, D.Sc Kari Myöhänen

Supervisors: M.Sc Esa Tamminen, M.Sc Esa Lehtikainen

Keywords: heat recovery steam generator, process furnace, data reconciliation,

The aim of this Master's thesis is to examine data reconciliation of energy and mass balances and the FCC process unit's heat recovery steam generator and process furnace with data reconciliation and simulation programs FRNC5-PC and Petro-SIM. During the work, various problems related to process measurements and the operation of processes were also examined and resolved.

An energy and mass balance model was created for the heat recovery steam generator, which was used to determine the average conductances for heat exchangers in the steam generator with the FRNC5-PC program. The average overall conductances of the heat exchangers in the steam generator were given to the Petro-SIM program for predicting the steam production. The models produced good results and worked well.

Due to the lack of furnace flue gas and combustion air flow measurements, the process furnace functioning with natural draft could not be balanced. However, modeling the process furnace with the FRNC5 program recognized that knowledge of furnace losses and leakage air is important for modeling and optimal operation. As a result of the work, it was realized that it would also be important to regularly monitor the operation of the furnace and the heat recovery steam generator to ensure optimal operation.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö valmistui Neste Oyj:n Kilpilahden jalostamolle kesällä 2019. Haluan kiittää Neste Oyj:tä loistavasta mahdollisuudesta suorittaa erittäin mielenkiintoinen ja kehittävä diplomityö.

Haluan esittää suuret kiitokset ohjaajilleni Esa Tammiselle, Esa Lehikoiselle ja Hans-Kristian Hansenille sekä yliopiston puolelle työni tarkastajille professori Timo Hyppäselle ja Kari Myöhäselle, joiden laadukkaan ohjauksen, palautteen ja avun ansiosta työ eteni jouhevasti. Haluan esittää kiitokset myös Nesteen vanhoille työkavereilleni ja kaikille niille työntekijöille, jotka auttoivat minua työn tekemisessä sekä samassa huoneessa istuneille kohtalotovereille.

Kiitokset myös perheelleni, jonka tukemana olen tätä matkaa taivaltanut. Yksi osa elämää on nyt takana ja seuraavat hämmöttävät edessä. Aika yliopistossa vierähti kuin siivillä, jonka vuoksi erityiskiitokset ansaitsevat mahtavat opiskelutoverini. Ilman heidän seuraansa tuskin muistelin opiskeluaikoja kaiholla.

Porvoossa 23.08.2019

Jouni Salovaara

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Alkusanat</b>	<b>4</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>7</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>13</b>
1.1 Työn tausta ja tavoitteet .....	13
1.2 FCC-Prosessi .....	14
1.3 Rakenne ja rajaus.....	15
<b>2 Tasetäsmäys</b>	<b>16</b>
2.1 Periaatteet ja käsitteet .....	16
2.2 Massa- ja energiataseen täsmäyksen matemaattinen ratkaisu .....	18
2.3 Prosessiyksikön rajoiteyhtälöiden muodostaminen.....	22
<b>3 Mittausten epävarmuustekijät</b>	<b>27</b>
3.1 Mittausten epävarmuuden laskennan taustaa .....	27
3.2 Mittausketjun epävarmuus .....	30
3.2.1 Lämpötilamittaus .....	32
3.2.2 Kylmien pintojen vaikutus lämpötilanmittaukseen.....	33
3.2.3 Termoparianturi .....	34
3.2.4 Vastuslämpötila-anturi .....	35
3.2.5 Paineanturi .....	36
3.3 Veden ja vesihöyryn entalpia .....	37
<b>4 Höyrynuohointen toiminta</b>	<b>40</b>
4.1 Toimintaperiaate.....	40
4.2 Nuohouksen vaikutus prosessiin .....	43
4.3 Hyödyt ja haitat .....	45
4.4 Vaihtoehtoisia nuohousmenetelmiä .....	46
<b>5 Jätelämpökattila BF-2401</b>	<b>47</b>
5.1 Jätelämpökattilan mittaukset .....	48
5.2 Taseyhtälöt .....	51
5.3 Karkeiden virheiden poisto .....	54
5.3.1 Virtausmittauksen tiheyskorjaus .....	54
5.3.2 Termisten massavirtausmittausten käyttö .....	55
5.3.3 Ulospuhalluksen arviointi .....	56
5.3.4 Kaasun sisääntulon lämpötilamittauksen korjaus .....	57
5.4 Epävarmuuslaskenta.....	62
5.4.1 Entalpian epävarmuus .....	63
5.5 Ominaislämpökapasiteetin laskenta .....	65
5.6 Energiataseen täsmäys Matlab-ohjelmalla .....	65
5.7 FRNC5-PC-malli.....	73
5.8 Petro-SIM- malli.....	76

<b>6</b>	<b>Prosessiuuni BA-2401</b>	<b>80</b>
6.1	Tasetäsmäysmalli .....	81
6.2	Savukaasulaskut .....	82
6.2.1	Ilman koostumus ja kosteuden määrittäminen .....	82
6.2.2	Polttoaineen määrä .....	84
6.2.3	Palamislaskenta .....	85
6.2.4	Palamisilman määrä .....	87
6.3	FRNC5-PC-malli .....	88
6.4	Petro-SIM- malli .....	93
<b>7</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset</b>	<b>97</b>
7.1	Jätelämpökattila BF-2401 .....	97
7.2	Prosessiuuni BA-2401 .....	98
	<b>Lähdeluettelo</b>	<b>100</b>
	<b>Liitteet</b>	<b>104</b>
	<b>LIITE 1:</b> Matriisi $A_x$ , $A_u$ ja $\Psi$	
	<b>LIITE 2:</b> Täsmäyksen tulokset lopuilta tasepäiviltä	

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

0	nollamatriisi	[-]
A	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
A	rajoitematriisi	[-]
a	mittausinstrumentin valmistajan antama lukema	[-]
a	vakiot yhtälössä 62	[-]
b	peräkkäisen linearisoinnin vektori	[-]
c <sub>p</sub>	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
D	halkaisija	[m]
E	energia	[J]
E <sub>rad</sub>	säteilyteho pinta-alaa kohti	[W/m <sup>2</sup> ]
EA	ilman ylimäärä (excess air)	[%]
F	näkyvyyskerroin	[-]
f	funktio, rajoiteyhtälö	[-]
g	putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
h	ominaisentalpia	[J/kg]
h	konvektiolämmönsiirtokerroin	[W/m <sup>2</sup> °C]
K	palamisilman kaasujen määrä suhteessa happeen	[-]
k	kattavuuskerroin	[-]
k	konvektiolämmönsiirtokerroin	[W/m°C]
L	pituus	[m]

M	moolimassa	[g/mol]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/s, kg/h, t/h]
n	ainemäärä	[mol]
p	paine	[Pa]
Q	QR-hajotelmassa käytettävä matriisi	[-]
q	systemiin tulevat ja lähtevät lämpövirrat, lämpöteho	[W]
R	lämmönvastus	[°C/W]
R	QR-hajotelmassa käytettävä matriisi	[-]
RH%	ilman suhteellinen kosteus	[%]
r	säde	[m]
s	matriisin $A_u$ rank	[-]
T	lämpötila	[K], [°C]
U	sisäenergia	[J]
UA	konduktanssi	[W/°C]
$U_e$	laajennettu epävarmuus	[-]
$u(x_i)$	standardiepävarmuus	[-]
$u_c(y)$	yhdistetty epävarmuus	[-]
$u$	mittaamattomien muuttujien vektori	[-]
$u_i$	aineen tuntuva lämpö massayksikköä kohti	[J/kg]
V	virtaavan aineen nopeus	[m/s]
v	aineen ominaistilavuus	[m <sup>3</sup> /kg]
W	systemin tekemä työ, pumpun akseliteho	[W]

$\dot{W}$	systemiin tehtävän työn teho	[W]
w	massaosuus	[-]
y	mittausinstrumentin antama arvo	[-]
x	suureen todellinen arvo	[-]
x	muuttuja, tekijä	[-]
x	mooliosuus	[%]
z	korkeus	[m]

### Kreikkalaiset aakkoset

$\Delta$	muutos	[-]
$\delta$	standardipoikkeama	[°C]
$\varepsilon$	todellisen ja mitatun suureen ero, emissiviteetti	[-]
$\lambda$	kaasun lämmönjohtuvuus	[W/m]
$\mu$	viskositeetti	[Pa s]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Stefanin-Bolzmännin vakio	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\Psi$	kovarianssimatriisi	[-]
$\emptyset$	lämpöhäviö	[W]
$\vartheta$	$1 - \frac{T}{T_c}$	[-]

### Dimensiottomat luvut

Nu	Nusseltin luku	[-]
Pr	Prandtlin luku	[-]

Re Reynoldsin luku [-]

### **Muut**

$\Pi$  permutaatiomatriisi [-]

$\partial$  osittaisderivaatta [-]

### **Yläindeksit**

T transpoosi

### **Alaindeksit**

1,2,3... matriisin numero, tilapiste

abs absoluuttinen virhe

aut automaatiojärjestelmän näyttämä

c sylinteri, kriittinen

CO<sub>2</sub> hiilidioksidi

conv konvektion avulla siirtynyt lämpöteho

cond konduktiolla siirtynyt lämpöteho

D Reynoldsin luvun yhteydessä putken sisähalkaisija

e laajennettu epävarmuus, ekonomaiseri

f,i sisäpinnan likaantumisvastus

f,o ulkopinnan likaantumisvastus

g kaasu

h entalpia, höyrystin

i aine, komponentti, kattilan osuus, mittauspiste, vakion numero

in sisäpuoli, sisäpinta

kat	kattila
KE	kineettinen energia
mol	mooliosuus
N <sub>2</sub>	typpi
O <sub>2</sub>	happi
out	ulkopuoli, ulkopinta
p	paine, anturi (probe)
p	pumppu
PE	potentiaalienergia
r	rank(A <sub>u</sub> )
RTD	vastuslämpötila-anturi
s	pinta
sk	savukaasu
stök	stökiometrinen
T	lämpötila
t	tulistin
TC	termoparianturi
tod	todellinen, prosessiolosuhteita vastaava
u	mittaamattomat muuttujat
v	vesihöyryn osapaine
v,s	veden höyrynpaine
w	putken seinämä, kylmä seinämä

x mitatut muuttujat

### **Lyhenteet**

dp paine-eron mittaukseen perustuva virtausmittaus  
FCC Fluid Catalytic Cracking, leijukatalyyttinen krakkaus  
FRNC5-PC PFR Engineering- yrityksen simulointiohjelma  
NIST National Institute of Standards and Technology  
Ven Venturi virtausmittaus  
Vor Vortex- virtausmittaus

# 1 JOHDANTO

Teollisuudessa tarkastellaan prosessien toimivuutta ja tehokkuutta seuraamalla yksiköiden prosessiarvoja. Prosessiarvojen seuranta ja sitä kautta toiminnan kehittäminen ja optimointi on yksi tehokkaan teollisuustuotannon painopisteistä. Optimoidulla tuotannolla saavutetaan säästöjä energiankulutuksessa sekä saadaan tuotanto kohdistettua halutulla tavalla.

Optimoinnin kannalta tärkeää on, että prosessin mittaukset ovat kunnossa, jotta niiden avulla voidaan muodostaa tarkka tase prosessiyksiköstä. Kuitenkaan mittausten perusteella yksiköstä laskettava tase ei käytännössä yleensä täsmää, vaan siinä on virhettä. Tasevirheen vähentämiseksi ja taseen täsmäämiseksi on olemassa simulointimalleja, joita hyödyntämällä voidaan yksikön optimoinnista saada tarkempaa ja saadut tulokset ovat luotettavampia.

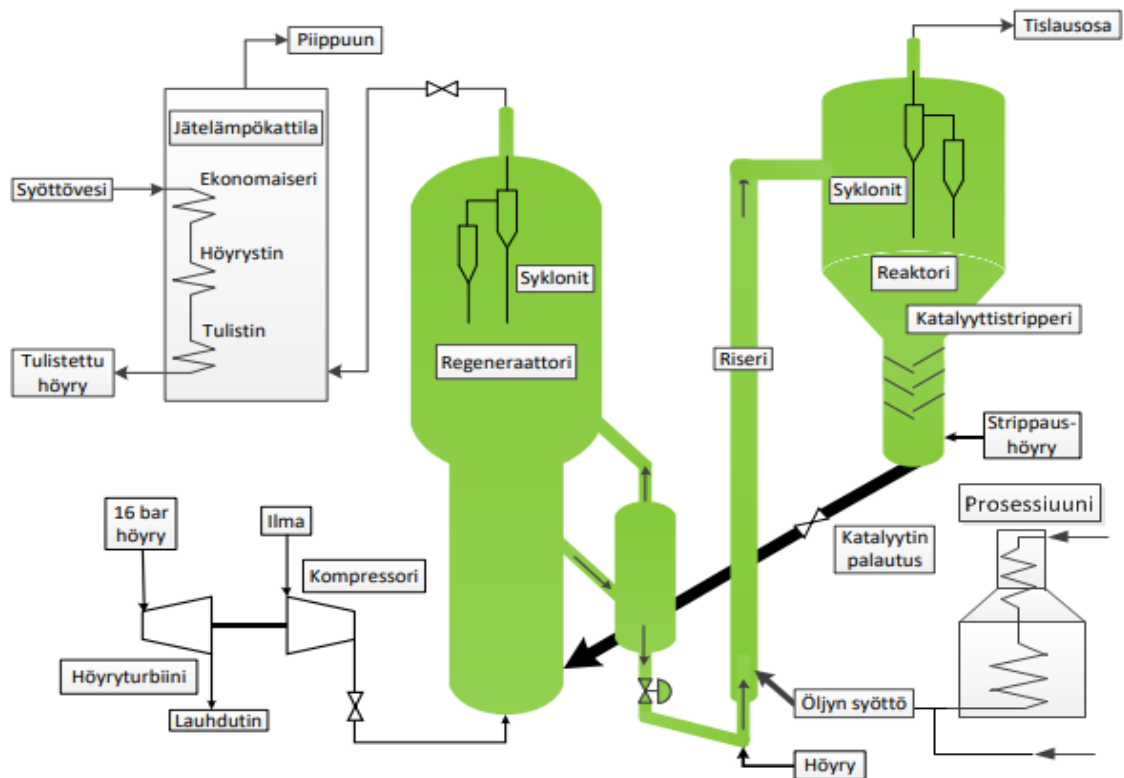
## 1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Neste Oyj:n jalostamolla Porvoon Kilpilahdessa yksi kehityksen osa-alueista on parantaa prosessiyksiköiden toiminnan seuranta. Seuranta suoritetaan tarkastelemalla prosessiarvoja sekä käyttämällä seurantaan luotuja tasetyökaluja ja simulointimalleja. Energian käytön osalta seurataan käyttöhyödykekulutusta. Lisäksi jalostamon prosessiuuneille on luotu uunisimulointimalleja, joita hyödyntämällä voidaan tarkastella uunien toimintaa.

Tässä työssä tarkastellaan massa- ja energiataseen täsmäämiseen liittyviä asioita ja ongelmia. Tavoitteena on myös luoda energiatasemäysmalli FCC-yksikön (Fluid Catalytic Cracking) jätelämpökattilalle ja prosessiuunille. Näiden energiatasemallien avulla tarkistetaan ja viritetään FRNC-5PC-uunisimulointiohjelman uunimallit, joiden avulla luodaan kattilasta ja uunista mallit olemassa olevaan FCC-prosessioptimointimalliin. Näiden mallien avulla voidaan tarkentaa olemassa olevaa prosessioptimointimallia sekä yksikön käyttöhyödykekulutusta ja -tuotantoa sekä niihin liittyviä kustannuksia. Malleilla voi myös löytää prosessista vikatiloja, jos malli antaa prosessin mittauksista suuresti poikkeavia tuloksia.

## 1.2 FCC-Prosessi

Työn kohteena oleva jätelämpökattila sekä prosessiuuni ovat osa jalostamon FCC-yksikköä. Prosessiuunin tehtävä on sekä lämmittää että höyrystää riseriputkeen menevää hiilivetysyöttöä. Riseriputkeen syötetään hiilivedyn lisäksi myös höyryä ja katalyyttiä. Riserissa hiilivetysyöttö höyrystyy ja krakkaantuu katalyytin vaikutuksesta lyhyemmiksi hiilivetyketjuiksi. Riserista seos kulkeutuu reaktoriin, jossa käytetty kiinteä katalyytti ja kaasumaiset hiilivedyt erotetaan toisistaan sykloneiden avulla. Hiilivedyt jatkavat tislaukseen ja katalyytti putoaa reaktorin pohjalle, josta se johdetaan regeneraattoriin. Regeneraattorissa katalyytin pinnalle krakkaantumisessa muodostunut koksi poltetaan ilman avulla pois, ja regeneroitu katalyytti johdetaan riseriin uudelleen käytettäväksi. Regeneraattorista koksipolton kaasut johdetaan pölynpoiston kautta jätelämpökattilaan, jossa kaasujen lämmön avulla kehitetään höyryä. Kaasujen mukana kattilaan kulkeutuu katalyyttipölyä ja hiukkasia, jotka kerääntyvät kattilan lämpöpinnoille, ja heikentävät lämmönsiirtoa. Tämän vuoksi jätelämpökattila on varustettu höyrynuohoimilla, joilla lämpöpintoja voidaan puhdistaa ja kattilan lämmönsiirto saadaan pidettyä tasaisena. Kuvassa yksi on kuvattu pääpiirteittäin prosessin kulku.



Kuva 1: Periaatekuva FCC-prosessista

### 1.3 Rakenne ja raja

Työ on jaettu kirjallisuus- ja soveltavaan osaan. Kirjallisuusosassa keskitytään avaamaan työn kannalta tärkeitä käsitteitä sekä aihealueita liittyen energiataseen täsmäykseen ja taseen muodostamiseen sekä prosessimittauksiin. Lisäksi kirjallisuusosassa käydään läpi jätelämpökattilan höyrynuohointen toimintaa. Soveltavassa osassa tarkastetaan työn kohteena olevan yksikön jätelämpökattilalle ja prosessiuunille luodut FRNC-5PC-uunimallit, viritetään kyseiset mallit vertaamalla mallien laskentaa tasehetkinä kerättyyn ja täsmättyyn prosessimittausdataan ja luodaan näiden mallien avulla Petro-SIM-prosessimallinnusohjelmaan uudet uunimallit.

Työssä tehdään työn laajuuden rajaamiseksi tiettyjä oletuksia taseen täsmäämisen kannalta. Käytettävän mittausdatan osalta vaatimuksena on prosessin stationääritila, eikä työssä käsitellä tarkemmin tämän vaatimuksen todentamista. Kuitenkin mittausdata tarkastetaan aina siten, että kerättävänä aikana prosessi on ollut vakaassa tilassa, eikä sinä aikana ole ollut häiriöitä tai suurta muutosta. Käytettävä mittaustieto kerätään ennalta sovittuna tasehetkenä. Tässä tapauksessa mittaustieto on tietyn tunnin ajalta kyseisen tunnin jokaisen minuutin ensimmäisestä arvosta keskiarvo. Jätelämpökattilaa nuohotaan neljän tunnin välein, ja tasehetki alkaa aina noin kaksi tuntia nuohouksen jälkeen, joten kattilasta kerättävän datan voidaan olettaa olevan keskiarvoistamalla stationääritilassa.

## 2 TASETÄSMÄYS

Prosessin tilan ja toiminnan seuraamiseksi prosessista mitataan sen kannalta olennaisia suureita. Prosessin ollessa stationääritilassa mittausdatan oletetaan toteuttavan prosessin taseyhtälöt. Käytännössä prosessin mittauksissa on kuitenkin mittausvirhettä, jolloin taseyhtälöt eivät toteudu. Tällöin muodostuu epävarmuus siitä, että mikä on prosessin todellinen tila. Tämän ongelman selvittämiseen voidaan käyttää apuna tasetäsmäystä. Tässä kappaleessa käsitellään tasetäsmäystä, sekä siihen liittyviä käsitteitä ja periaatteita. Lisäksi käsitellään yleinen matemaattinen ratkaisu epälineaarille tasetäsmäysoongelmalle, jossa on mukana mitattuja sekä mittaamattomia arvoja.

### 2.1 Periaatteet ja käsitteet

Tasetäsmäyksessä tavoitteena on sovittaa yhteen prosessin mittaustulokset siten, että taseyhtälöt toteutuvat. Keskeisessä osassa taseen täsmäystä ovat mittausvirheet. Mittausvirheellä tarkoitetaan instrumentin ja siihen liittyvän kokonaisuuden mittausravon ja mitattavan suureen todellisen arvon erotusta, jota voidaan havainnollistaa yhtälöllä (1) (Narasimhan & Jordache 2000, 12):

$$y = x + \varepsilon \quad (1)$$

,missä  $y$  = mittausinstrumentin antama arvo

$x$  = suureen todellinen arvo

$\varepsilon$  = todellisen ja mitatun suureen erotus, mittausvirhe

Mittausvirhettä on kahta eri tyyppiä: systemaattinen ja satunnainen virhe. Systemaattisella virheellä tarkoitetaan sellaista virhettä, joka toistuu jokaisessa mittauksessa yhtä suurena ja vääristää mittausravoa, eikä poistu mittaustuloksesta ennen kuin se poistetaan, esimerkiksi instrumentin huono asennus, anturin valmistusvirhe tai impulssiputkiin kertynyt lika. Satunnaisvirheellä tarkoitetaan virhettä, joka esiintyy satunnaisesti, sen suuntaa tai suuruutta ei voi ennustaa. Toistettaessa mittaus samoissa olosuhteissa satunnaisvirhe voi olla eri jokaisella kerralla. Tasetäsmäyksessä yksi perusoletuksista on, että systemaattisia virheitä ei ole tai ne on onnistuttu poistamaan,

jolloin täsmäyksessä keskitytään parantamaan mittausten tarkkuutta minimoimalla satunnaisvirheen vaikutusta mittaustuloksiin. Tasetäsmäyksessä yhtälön (1) mittausrvirheellä  $\epsilon$  tarkoitetaan mittauksen satunnaisvirhettä. (Narasimhan & Jordache 2000, 12-21)

Jotta prosessin tase olisi täsmättävissä, kahden ehdon täytyy toteutua. Prosessista on oltava käytettävissä taseyhtälö, jollaisiksi soveltuvat esimerkiksi aineen tai energian säilymisen lait, sillä esimerkiksi korrelaatiot eivät ole täysin eksakteja ja muodostavat yhden virhelähteen lisää. Lisäksi prosessista on oltava mitattuna riittävä määrä muuttujia. Kun mitattuja muuttujia on riittävä määrä, puhutaan redundanssista (redundancy). Redundanssilla tarkoitetaan sitä, että vaikka kyseisen muuttujan kohdalta poistetaan mittaus, tämän muuttujan arvo on silti pääteltävissä muiden mittausten sekä taseyhtälöiden avulla. Näitä muuttujia voi kutsua myös korvautuviksi (redundant) muuttujiksi, ja ainoastaan korvautuvat muuttujat voidaan täsmätä. Jotta redundanssi toteutuu, on mitattuja muuttujia oltava enemmän kuin korvautuvia muuttujia. Prosessissa voi olla myös mitattuja muuttujia, jotka ovat korvautumattomia (nonredundant), eli niitä ei voi selvittää taseyhtälöiden tai muiden mittausten perusteella. Tällaista muuttujaa ei voi täsmätä. (Narasimhan & Jordache 2000, 69-72 & Neste 2018)

Tasetäsmäykseen liittyy myös olennaisesti taseyhtälöiden kautta muuttujat, joita ei ole esimerkiksi kustannussyistä mitattu. Tällöin puhutaan tasetäsmäyksen kannalta mittaamattomista muuttujista. Näiden muuttujien kohdalla on olennaista se, että onko mittaamaton muuttuja määriteltävissä vai ei. Määriteltävä (observable) mittaamaton muuttuja voidaan määrittellä ainoastaan muiden mitattujen muuttujien avulla, määrittelemätöntä (unobservable) ei voi selvittää. Tasetäsmäyksen seurauksena määriteltäville mittaamattomille muuttujille saadaan estimaatti. (Romagnoli & Sanchez 2000, 28-29)

Tasetäsmäystehtävässä mittausrvirheen  $\epsilon$  arvo voidaan saada kahdella tavalla: joko mittaustuloksia käsittelemällä tilastollisesti tai sitten mittausrinstrumenteille määritettyjen epävarmuuksien avulla. Tässä työssä käytetään jälkimmäistä tapaa, ja kappaleessa kolme kerrotaan lisää epävarmuuksien määrittämisestä.

Kuten aiemmin mainittiin, tasetäsmäyksessä sovitetaan mittaustuloksia taseyhtälöiden toteuttamiseksi. Sovitus tapahtuu edellä mainittujen kullekin mittaukselle määritettyjen

epävarmuuksien avulla. Epävarmuus antaa suuren arvolle vaihteluvälin, ja jokainen mitattu suure täsmätään taseyhtälöön sopivaksi. Ongelmaksi muodostuu se, että yhtälö voi toteutua useilla suureiden eri arvoilla. Tämä ongelma tunnetaan yleisesti yhtälörajoitettuna painotetun pienimmän neliösumman optimointitehtävänä. Optimointitehtävän tavoitteena on mittausten epävarmuuksien avulla muokata mittaustuloksia, jotta taseyhtälöt toteutuvat. Muokattujen mittaustulosten arvot muodostuvat siten, että ne ovat mahdollisimman todennäköisiä. Optimointitehtävän matemaattista ratkaisua käsitellään seuraavassa kappaleessa. (Narasimhan ja Jordache 2000, 7-8)

## 2.2 Massa- ja energiataseen täsmäyksen matemaattinen ratkaisu

Tasetäsmäystehtävä, jossa täsmätään vain massatasea, on luonteeltaan lineaarinen, sillä sen käyttäytyminen on ilmaistavissa yhtälöä kuvaavien muuttujien summana. Tässä työssä tavoitteena on täsmätä massataseen lisäksi myös energiatasea, joiden rajoiteyhtälöt ovat luonnostaan epälineaarisia, jolloin tällaisen tasetäsmäystehtävän ratkaisemiseen on luonnollista käyttää epälineaariin ratkaisuihin perustuvia menetelmiä. Näiden menetelmien käyttö antaa rajoiteyhtälöille mahdollisuuden olla myös epäyhtälöitä, jolloin voidaan täsmätä monimutkaisempia kokonaisuuksia. Tässä osiossa käsitellään kuitenkin vain yleistä tapausta, jossa ei ole käytössä epäyhtälöt. Yleensä prosessiyksiköissä ei kaikkia muuttujia mitata, sillä se on kallista ja lisää työn määrää. Tämän vuoksi valittiin yleinen malli, jossa kaikki muuttujat eivät ole mitattuja. (Narasimhan ja Jordache 2000, 119-126) (Romagnoli ja Sanchez 2000, 77-84)

Yhtälörajoitettua pienimmän neliösumman optimointitehtävää voidaan yleisesti kuvata kaavalla (2), jonka täytyy toteuttaa rajoiteyhtälöt (3):

$$\min_{x,u} [(y - x)^T \Psi^{-1} (y - x)] \quad (2)$$

$$f(x, u) = 0 \quad (3)$$

missä  $\Psi$  = kovarianssimatriisi

$f$  = rajoiteyhtälö

$u$  = rajoiteyhtälön mittaamattomien muuttujien vektori

Kovarianssimatriisi on diagonaalimatriisi, jossa diagonaalille sijoitetaan jokaisen mitatun muuttujan epävarmuuksien neliö (varianssi), ja muut alkioit ovat nolliä, kun oletetaan, että muuttujat ovat riippumattomia toisistaan. Virheiden oletetaan olevan normaalijakautuneita, jolloin yhtälön (2) ratkaisu antaa muuttujille suurimman todennäköisyyden estimaatin.

Osittain mitatun yleisen systeemin muuttujia voidaan kuvata kahden vektorin avulla. Vektori  $x$  koostuu mitatuista muuttujista ja vektori  $u$  mittaamattomista muuttujista. Systeemin rajoiteyhtälöt voidaan kirjoittaa mainittujen vektorien ja rajoiteyhtälöistä muodostettujen rajoitematriisien avulla muodossa (4):

$$f(x, u) = A_x x + A_u u = 0 \quad (4)$$

missä  $A_x = (n \times m)$  rajoitematriisi mitattujen muuttujien kertoimille

$x = (m \times 1)$  vektori mitatuista muuttujista

$A_u = (n \times p)$  rajoitematriisi mittaamattomien muuttujien kertoimille

$u = (p \times 1)$  vektori mittaamattomista muuttujista

$A_x$  ja  $A_u$  ovat rajoitematriiseja, joissa matriisin  $n$  rivi vastaa  $n$  rajoiteyhtälön muuttujien kertoimia sen suhteen, kumpaan suuntaan taseessa muuttuja kulkee, esimerkiksi tuleva virta on 1 ja lähtevä virta -1. Rajoitematriisissa on oltava  $n$  kappaletta rivejä.

Epälineaarille tasetäsmäystehtävälle on olemassa useita ratkaisumalleja. Tässä työssä kuvataan niistä yksi, jota kutsutaan peräkkäiseksi linearisoinniksi. Tässä ratkaisumallissa rajoiteyhtälöt voidaan linearisoida käyttämällä ensimmäisen asteen Taylorin sarjakehitelmää. Tällöin rajoiteyhtälöille pätee (5):

$$A_x x + A_u u = b \quad (5)$$

missä

$$A_x = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_i u_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_u = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{x_i u_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_p} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$b$  on vektori, jolle pätee (8):

$$b = A_x x + A_u u - f(x, u), \quad (8)$$

Jotta mitatuille muuttujille voidaan laskea yhtälön (2) mukaiset estimaatit todellisille arvoille, täytyy rajoiteyhtälöiden termeissä mitatut muuttujat erotella mittaamattomista.

Tämä voidaan toteuttaa matriisille  $A_u$  tehtävän QR-hajotelman avulla (9):

$$A_u \Pi = QR \quad (9)$$

missä  $\Pi$  = permutaatiomatriisi

$Q = n \times n$  matriisi

$R = n \times p$  matriisi

Matriisit  $Q$  ja  $R$  voidaan jakaa osiin (10) ja (11):

$$Q = [Q_1 \quad Q_2] \quad (10)$$

missä  $Q_1 = n \times p$  matriisi

$Q_2 = n \times n - p$  matriisi

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

missä  $R_1 = s \times s$  matriisi

$R_2 = s \times n - s$  matriisi

$s = \text{rank}(A_u)$

$0 = n - p \times n$  nollamatriisi

Vektori  $u$  voidaan hajottaa myös osiin permutaatiomatriisin avulla (12):

$$\Pi^T u = \begin{bmatrix} u_{r_u} \\ u_{n-r_u} \end{bmatrix} \quad (12)$$

missä  $r_u = \text{rank}(A_u) = \text{rank}(R_1)$

$n =$  mittaamattomien muuttujien määrä

Kun kerrotaan linearisoidut rajoiteyhtälöt (5) tekijällä  $Q^T = Q^{-1}$ , saadaan yhtälöt (13) ja (14):

$$Q_1^T A_x x + R_1 u_{r_u} + R_2 u_{n-r_u} = 0 \quad (13)$$

$$Q_2^T A_x x = 0 \quad (14)$$

Hajotelman avulla rajoiteyhtälöille pätee (15):

$$Q_2^T A_x x = Q_2^T b \quad (15)$$

Täsmätyt arvot (todellisten arvojen estimaatit) sekä mittaamattomien muuttujien estimaatit voidaan ratkaista yhtälöiden (16) ja (17) avulla:

$$\hat{x} = y - \Psi(Q_2^T A_x)^T [(Q_2^T A_x) \Psi(Q_2^T A_x)^T]^{-1} (Q_2^T A_x y - Q_2^T b) \quad (16)$$

$$\hat{u} = R_1^{-1} Q_1^T b + R_1^{-1} Q_1^T A_x \hat{x} - R_1^{-1} R_2 u_{n-r_u} \quad (17)$$

missä  $\hat{x}$  = mitattujen muuttujien täsmätyjen arvojen vektori

$\hat{u}$  = mittaamattomien muuttujien uudet estimaatit

On huomattava, että tilanteessa, jossa  $A_u$ :n sarakkeet ovat lineaarisesti riippumattomia, jolloin  $R_2$  ei ole olemassa, yhtälön (17) viimeinen termi jää pois. Tällöin myös  $u_{n-r_u}$  jää nolllaksi.

Peräkkäisen linearisaation tavoitteena on, että yhtälöillä (16) ja (17) saadaan alkuperäisille rajoiteyhtälöiden vektoreille  $x$  ja  $u$  uudet estimaatit, jonka jälkeen tehdään uusi iteraatio. Iteraatiota tehdään, kunnes täsmätyille muuttujille saadaan sellaiset arvot, jotka ovat halutun vaihteluvälin sisällä tai muuttujat eivät enää muutu paljoa iteroinnin seurauksena. (Romagnoli & Sanchez 2000, 85)

### 2.3 Prosessiyksikön rajoiteyhtälöiden muodostaminen

Tasetaismäystehtävän rajoiteyhtälöt voidaan muodostaa yksikön massa- ja energiataseiden avulla. Taseet perustuvat aineen ja energian häviämättömyyslakeihin. Rajoiteyhtälöinä käytettävät energia- ja massataseet voidaan johtaa suljetun systeemin energiayhtälöstä (18) (Incropera et al. 2011, 13):

$$\Delta E_{tot} = Q - W \quad (18)$$

missä  $\Delta E_{tot}$  = systeemiin varastoituneen kokonaisenergian muutos

$Q$  = systeemiin siirtyvä lämpö [J]

$W$  = systeemin tekemä työ [J]

Systeemiin varastoitunut kokonaisenergia voidaan myös kirjoittaa muodossa:

$$E_{tot} = E_{KE} + E_{PE} + E_U \quad (19)$$

missä  $E_{KE}$  = kineettinen energia [J]

$E_{PE}$  = potentiaalienergia [J]

$E_U$  = sisäenergia [J]

Kun oletetaan tasapainotila, jossa systeemin rajan yli virtaa ainetta sekä reaktioita ja faasimuutosta ei tapahdu (sisäenergia koostuu vain tuntuvasta lämmöstä), voidaan yhtälö (19) kirjoittaa muodossa (20) (Incropera et al. 2011, 16):

$$\begin{aligned} & \dot{m} \left( u_i + pv + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{in} - \\ & \dot{m} \left( u_i + pv + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{out} + q - \dot{W} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

missä  $\dot{m}$  = massavirta [kg/s]

$u_i$  = aineen tuntuva lämpö massayksikköä kohti [J/kg]

$p$  = paine tietyssä kohdassa [Pa]

$v$  = ominaistilavuus [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$V$  = virtaavan aineen nopeus [m/s]

$g$  = putoamiskiihtyvyys [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$z$  = korkeus [m]

$q$  = systeemin tulevat ja lähtevät muut lämpövirrat [W]

$\dot{W}$  = systeemiin tehtävän työn teho [W]

Yhtälössä (20) termillä  $p v$  kuvataan virtauksen tekemää työtä. Suluissa sisällä olevat termit ovat ominaissuureita, jolloin niillä kuvataan sisään- ja ulosvirtauksen sen hetkistä tilaa massayksikköä kohden.

Aineen tuntuva lämpö sekä virtauksen tekemä työ voidaan kuvailla myös ominaisentalpian avulla (21):

$$h_i = u_i + p v \quad (21)$$

$h_i$  = ominaisentalpia tietyssä pisteessä [J/kg]

Tästä eteenpäin, kun työssä puhutaan entalpiasta, sillä tarkoitetaan ominaisentalpiaa. Kun oletetaan, että systeemissä ei ole vuotoja ja potentiaali ( $gz$ )- sekä kineettisen ( $\frac{1}{2}V^2$ ) energian muutokset oletetaan vähäisinä merkityksettömiksi, voidaan energiataase esittää muodossa (22):

$$\dot{m}(h_{in} - h_{out}) + q - \dot{W} = 0 \quad (22)$$

Tilanteessa, jossa systeemiin ei tuoda tai systeemistä ei viedä energiaa ulkoisen työn avulla, voidaan yhtälön 22 viimeinen termi  $\dot{W}$  jättää pois.

Mikäli kyseessä oleva fluidi on kaasua, paine ei prosessissa muutu merkittävästi sen osalta, kaasu ei tee työtä, se voidaan approksimoida ideaalikaasuksi (paine on pieni ja lämpötila korkea), ja voidaan olettaa, että virtaava aine on vakiopaineessa, voidaan

kaasun entalpian muutos kahden pisteen välillä ilmaista ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilaeron avulla (23) (Incropera et al. 2011, 17):

$$h_{in} - h_{out} = c_p (T_{in} - T_{out}) \quad (23)$$

missä  $c_p$  = ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]

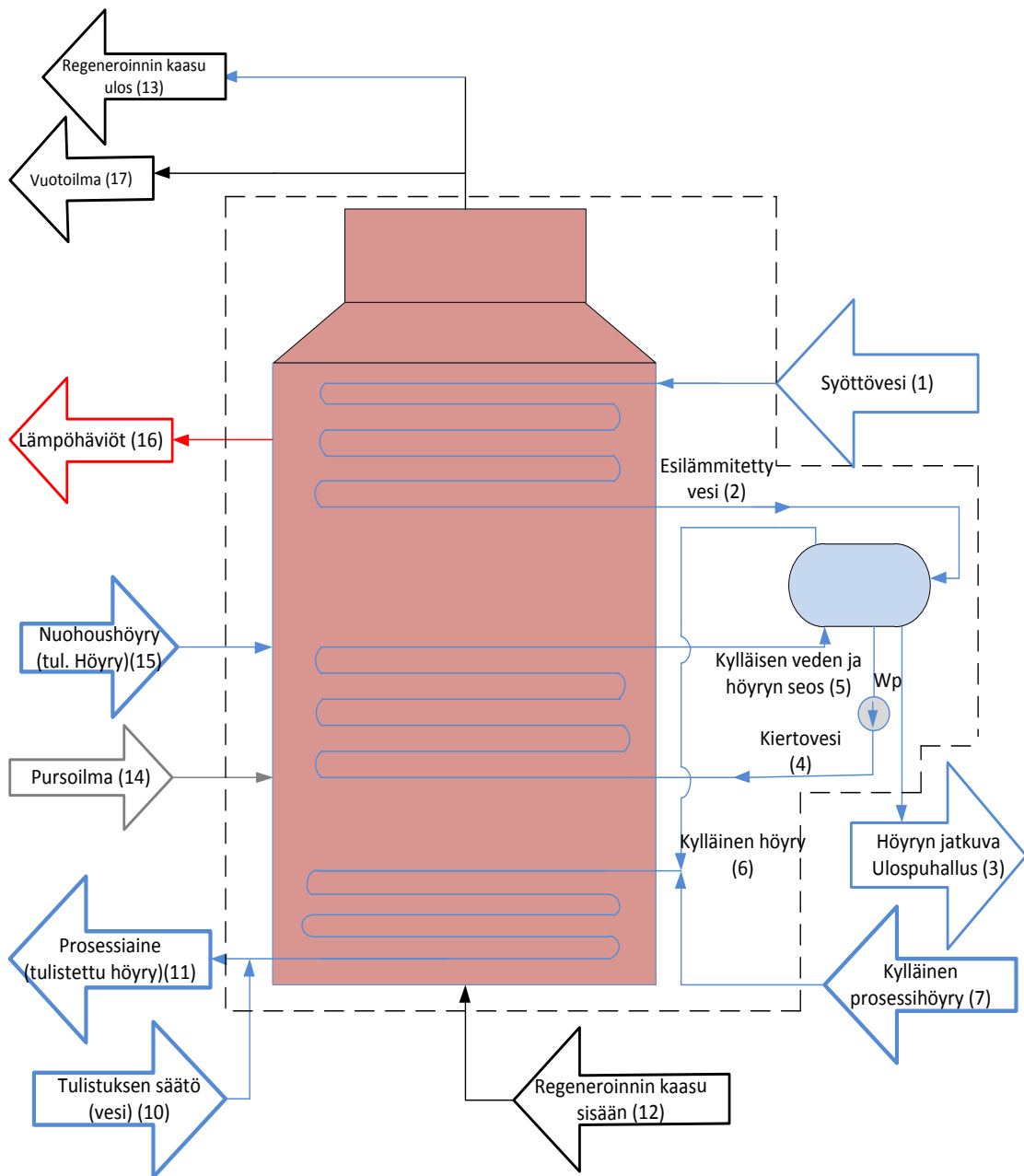
Edellä mainituin oletuksin energiatase voidaan ilmaista muodossa (24):

$$q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (24)$$

Tasapainotilassa yleisesti prosessiyksikön massatasea voidaan kuvata kaavalla (25):

$$\dot{m}_{sisään} - \dot{m}_{ulos} = 0 \quad (25)$$

Prosessiyksikössä on yleensä useita erilaisia virtoja, sekä myös lämpöhäviöitä. Kuvassa kaksi havainnollistetaan FCC- yksikön jätelämpökattilan virtoja.



Kuva 2: Havainnekuva kohteen jätelämpökattilan mukaisesta massa- ja energiataseesta.

Kuvassa kaksi on havainnollistettu työn kohteen mukaisen jätelämpökattilan massa- ja energiatasetta. Taseyhtälön muodostamiseksi eri taserajan ylittävät virrat sekä sisäiset virrat on numeroitu. Yhtälön (22) avulla voidaan muodostaa kattilalle energiatase taserajan yli (26):

$$\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_7 h_7 + W_p + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{12} h_{12} -$$

$$\dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{14}h_{14} + \dot{m}_{15}h_{15} - \dot{\Phi}_{16} - \dot{m}_{17}h_{17} = 0 \quad (26)$$

missä  $\dot{\Phi}_{16}$  = Lämpöhäviö [W]

$W_p$  = Pumpun akseliteho [W]

Jätelämpökattilan koko tase on rajoiteyhtälönä laaja, joten siitä voidaan muodostaa myös pienempiä osakokonaisuuksia rajoiteyhtälöiksi. Täsmäyksen rajoiteyhtälöiksi kannattaa muodostaa myös pelkkiä massataseita täsmäyksen tarkkuuden parantamiseksi. Kuvan kattilasta voidaan muodostaa esimerkiksi veden ja höyryn massatase taserajan yli (27):

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_3 + \dot{m}_7 + \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} = 0 \quad (27)$$

Soveltamalla yhtälöitä (20), (24) ja (25) voidaan muodostaa soveltavassa osassa tarvittavat rajoiteyhtälöt. Tasetäsmäystehtävän rajoiteyhtälöissä voi olla mittaamattomia muuttujia. Rajoiteyhtälöiden muodostamisessa hyvä periaate on, että helpoin tapa käsitellä mittaamattomia muuttujia on valita sellaiset taseyhtälöt, joissa tällaisia muuttujia esiintyy mahdollisimman vähän. Tämä pienentää taseyhtälöiden sekä muuttujien määrää, jolloin tehtävän koko pienenee ja sen ratkaiseminen helpottuu. Tätä periaatetta sovelletaan työn soveltavassa osassa. Mikäli rajoiteyhtälöt voidaan valita siten, että mittaamattomia muuttujia ei ole ollenkaan, kappaleen tehtävän matemaattinen ratkaisu helpottuu huomattavasti, kun mittaamattomia muuttujia ei tarvitse eliminoida. (Narasimhan & Jordache 2000, 14-15)

### 3 MITTAUSTEN EPÄVARMUUSTEKIJÄT

Käytännössä prosessista mitatulla datalla suoritettava laskenta ei toteuta taseyhtälöä, jossa yksikköön tulevien syöttöjen ja sieltä lähtevien tuotteiden summa on nolla. Tämä johtuu mittausinstrumenttien satunnaisista ja systemaattisista virheistä sekä esimerkiksi mahdollisista ainevuodoista, kuten ilmavuoto. Vuonna 2018 samalle yritykselle tehdyssä diplomityössä ”Kiertokaasukompressorin monitorointi simulointimallilla” Tea Mäkelä on selventänyt virtausmittausten osalta samoja asioita, joten tässä työssä virtausmittaukset rajataan pois kirjallisuudesta. Tässä kappaleessa tarkastellaan käsitteitä liittyen mittausten epävarmuuteen, mittausketjun mittausinstrumenttien ja -antureiden epävarmuuksien syitä sekä mittausten avulla määritettäviä suureita, kuten entalpiaa. Epävarmuuksien syitä on useita, ja tässä kappaleessa keskitytään satunnaisvirheisiin. Lämpötila- ja paineantureista käsitellään vain työn kohteessa käytettäviä antureita, jotka esitellään myöhemmin kappaleessa. Osiossa 3.2 sekä niiden alaosissa keskitytään enimmäkseen antureiden ja lähettimien tuottamaan satunnaisvirheeseen.

#### 3.1 Mittausten epävarmuuden laskennan taustaa

Instrumentteja ja mittaustuloksia tarkastellessa puhutaan yleensä tarkkuudesta. Termillä ”tarkkuus” viitataan yleensä instrumentille ilmoitettuun mittaustulosten vaihteluväliin, toleranssiin. Tämän vaihteluvälin määrittää instrumentin mittauksen epävarmuus (uncertainty), joka johtuu mittauksen satunnaisvirheestä ja koostuu yhdestä tai useammasta tekijästä. Instrumenttien epävarmuutta arvioitaessa on tärkeä tietää näistä tekijöistä, mitä jakaumaa epävarmuus noudattaa, sekä sen varianssi tai keskihajonta. Tätä keskihajontaa voidaan kutsua myös standardiepävarmuudeksi, ja sille voidaan käyttää myös symbolia  $u(x_i)$ . (JCGM 2008, 11-12)

Standardiepävarmuuksien (standard uncertainty) avulla voidaan laskea mittaukselle yhdistetty epävarmuus (combined uncertainty). Tilanteelle, jossa epävarmuustekijät ovat riippumattomia sekä satunnaisia, kuten suoralle mittaukselle, (esim. paine) yhdistetty epävarmuus voidaan laskea juurrettuna neliösummana kaavalla (28):

$$u_c(y) = \pm \sqrt{u(x_1)^2 + \dots + u(x_i)^2} \quad (28)$$

missä  $u_c(y)$  = tuloksen  $y$  yhdistetty epävarmuus

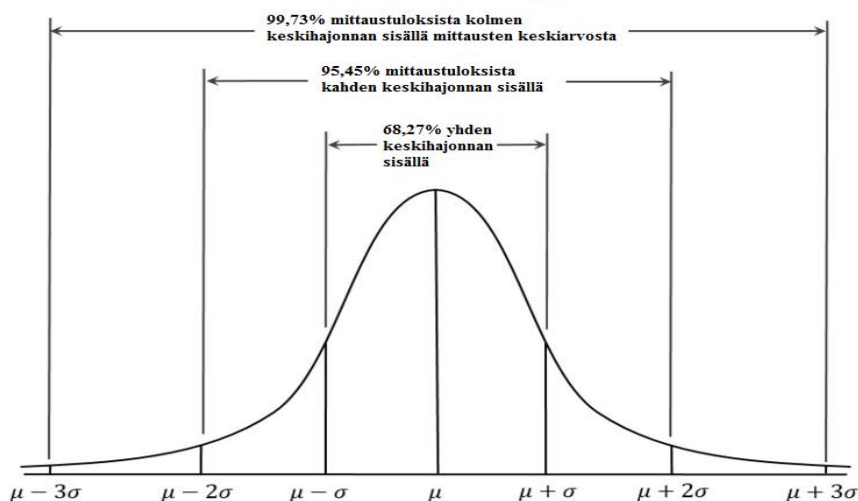
$u(x_i)$  = standardiepävarmuus tekijälle  $x_i$

Mittaustulos voidaan kuitenkin saada usean muuttujan funktiona laskentakaavan kautta, jolloin epävarmuustekijöille täytyy ottaa huomioon herkkyyskerroimet. Herkkyyskerroin voidaan laskea funktion osittaisderivaattana epävarmuustekijän suhteen. Tässä tapauksessa yhdistetty epävarmuus voidaan laskea kaavalla (Taylor 1997, 60-61) (29):

$$u_c(y) = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i)\right)^2} \quad (29)$$

missä  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  = herkkyyskerroin epävarmuustekijälle  $x_i$

Yhdistetty epävarmuus tarvitaan laajennetun epävarmuuden (expanded uncertainty) laskentaan. Kun oletetaan tulosten olevan normaalijakautuneita, laajennetulla epävarmuudella  $U_e$  tarkoitetaan epävarmuutta, joka määrittää mittaustulokselle sellaisen luottamusvälin (confidence interval), jonka sisällä mittauksen todellinen arvo tietyllä luottamustasolla (confidence level) on.



Kuva 3: Normaalijakauma ja luottamusvälit. (Kernler 2014)

Kuvalla 3 voidaan havainnollistaa laajennetun epävarmuuden käsitettä. Kuvassa kahden keskihajonnan erotuksella keskiarvosta tarkoitetaan luottamustasoa 95,45 prosenttia.

Lukua, joka kertoo, monenko keskihajonnan päässä keskiarvosta luottamusväli sijaitsee tai mitä luottamustasoa käytetään, kutsutaan kattavuuskertoimeksi (coverage factor). Kattavuuskertoimen arvo kertoo, mitä luottamustasoa noudatetaan, eli monenko keskihajonnan päässä keskiarvosta tuloksen oletetaan olevan. Jos mittaustulosten virheiden oletetaan olevan normaalijakautuneita, laajennettu epävarmuus saadaan kertomalla yhdistetty epävarmuus kattavuuskertoimella (30) (JCGM 2008):

$$U_{e,y} = k * u_c(y) \quad (30)$$

missä  $U_{e,y}$  = laajennettu epävarmuus

$k$  = normaalijakauman luottamustason kattavuuskerroin

Taulukosta yksi nähdään kattavuuskertoimet:

Taulukko 1: kattavuuskertoimet eri luottamustasoille.

Luottamustaso [%]	Kattavuuskerroin k
90	1,64
95	1,96
95,45	2
99	2,58
99,73	3

Valmistaja ilmoittaa instrumentin spesifikaatiossa tietyn virhetekijän aiheuttaman epävarmuuden toleranssina, jonka sisällä mittauksen tulos on. Yleensä valmistaja myös ilmoittaa näiden vaihteluvälien noudattavan kaksi tai kolme kertaa keskihajonnan (spesifikaatiossa lukee  $2\sigma$  tai  $3\sigma$ ), joka tarkoittaa sitä normaalijakauman luottamustasoa, jolla mittauksen epävarmuustekijän virhe osuu vaihteluvälille. (Eurachem 2012) Tästä valmistajan ilmoittamasta vaihteluvälistä saadaan standardiepävarmuus jakamalla toleranssi luottamustasoa vastaavalla kattavuuskertoimella (31):

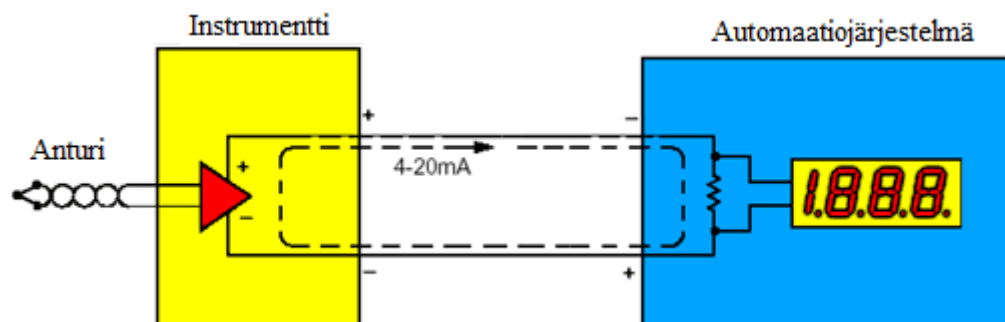
$$u(x_i) = \frac{\pm a}{k} \quad (31)$$

missä  $a$  = valmistajan antama lukema

Mikäli valmistaja ei ole ilmoittanut toleranssille kattavuuskerrointa tai luottamustasoa, voidaan tällöin olettaa tulosten olevan tasajakautuneita. Tällöin standardiepävarmuus valmistajan ilmoittamasta toleranssista saadaan jakamalla toleranssi luvun kolme neliöjuurella. Valmistaja voi ilmoittaa toleranssin kahdella eri tavalla, absoluuttisina tai suhteellisina. Absoluuttisella arvolla tarkoitetaan suoraan annettua mitattavan yksikön arvoa, esimerkiksi  $\pm 4$  kPa. Suhteellisella arvolla toleranssi voidaan ilmaista esimerkiksi  $\pm 0,15\%$  instrumentin mittausalueesta (measurement range), kalibroidusta mittausalueesta (calibrated span) tai  $0,15\%$  mitatusta arvosta (measured value, reading). Mittauksen virhe saadaan valmistajan ilmoittamista tekijöistä laskemalla standardiepävarmuudet yhteen yhdistetyksi epävarmuudeksi, sekä sen jälkeen laajentamalla tämä epävarmuus valmistajan ilmoittamalla luottamustason kattavuuskertoimella. (JCGM 2008, 12)

### 3.2 Mittausketjun epävarmuus

Mittauks tuloksen tuottaa mittausketju. Mittausketju koostuu yleisesti sensorista (esimerkiksi termopari), instrumentista (muunnin ja lähetin) ja ohjauslaitteistosta (automaatiojärjestelmä). Anturi mittaa prosessista halutun suureen mitattavaa ilmiötä ja lähettää mittausarvon instrumentille. Instrumentissa mittausarvo muuntuu mittausviestiksi ja lähetin lähettää mittausviestin lähtöviestinä (esimerkiksi 4-20mA) automaatiojärjestelmälle. Automaatiojärjestelmässä lähtöviesti muuttuu tulosignaalksi, ja tulosignaalin avulla muodostetaan järjestelmässä näkyvä mittauks tulos. Tässä työssä keskitytään anturin ja instrumentin mittausvirhetekijöihin, jotka liittyvät mittauksen luonteeseen, ei esimerkiksi tilanteisiin, joissa kalibrointi on virheellinen. Alla olevassa kuvassa neljä havainnekuva mittausketjusta.



Kuva 4: Havainnekuva mittausketjusta. (Globalspec 2018)

Anturin aiheuttamat virheet liittyvät yleensä ilmiöön, jota anturilla mitataan, jolloin erilaisten antureiden epävarmuustekijät vaihtelevat. Instrumentista johtuvat epävarmuustekijät ovat toisaalta hyvin samankaltaisia anturista riippumatta, sillä ne liittyvät yleensä mittausarvon käsittelyyn sekä mittausten yleisluonteisiin ominaisuuksiin. Yleisimpiä instrumentin epävarmuustekijöitä ovat hystereesi, erotuskynnys, toistettavuus, lineaarisuus, stabiilisuus, ulkoisen lämpötilan vaikutus sekä virtalähteiden aiheuttamat jänniteheilahtelut. (Vaisala 2016) Myös ulkoisella paineella on vaikutusta mittaukseen, mikäli mitataan esimerkiksi paine-eroa, joka saa referenssin ulkoisesta paineesta.

Hystereesi kuvaa ilmiötä, jossa mittauksen herkkyys muuttuu mitattavan suureen muutoksen suunnan mukaan. Toisin sanoen lähtöviestillä voi olla hieman eri arvo samalla mittausarvolla, kun suureen muutoksen suunta on eri. Erotuskynnyksellä tarkoitetaan tässä yhteydessä mitattavan suureen pienintä muutosta, joka aiheuttaa muutoksen mittausarvoon. Toistettavuudella tarkoitetaan instrumentin kykyä ilmoittaa sama lähtöviesti samalla mittausarvolla. (Vaisala 2016)

Lähettimen linearisaatiovirheellä tarkoitetaan sitä, että lähettimessä on referenssiarvoja, joiden avulla tehdään linearisaatio mittausarvolle. Referenssiarvolla tarkoitetaan taulukkoarvoja, esimerkiksi vastuslämpötila-anturilla tietty resistanssi on tietty lämpötila. Todellisuudessa esimerkiksi vastuslämpötila-anturin lämpötila-resistanssikuvaaja ei ole tarkka, vaan täsmällinen riippuvuus saadaan korkeamman asteen yhtälöllä, jonka vuoksi linearisaatio tehdään. Taulukkoarvojen määrä on myös sidottu laitteen muistin kokoon, joka osaltaan vaikuttaa tähän virheeseen. Mikäli mittaustulos ei ole taulukkoarvo, syntyy linearisaatiovirhettä. Lisäksi lähettimessä, ja tiedon vastaanotossa syntyy pyöristystä, joka yleensä lasketaan mukaan tähän virheeseen. (Scheller & Krummeck 2018, 18)

Stabiilisuudella kuvataan instrumentin tarkkuuden heikentymistä instrumentin vanhetessa. Tähän vaikuttaa prosessiolosuhteet mittauksen kohdalla sekä erilaiset mekaaniset ja kemialliset rasitukset. Stabiilisuudessa otetaan yleensä myös huomioon ajautuma (drift).

Ulkoisen lämpötilan vaikutus mittausketjuun johtuu johtimien resistanssien muutoksista ja materiaalien lämpölaajenemisesta. Lisäksi, jos mitattava aine on kuumempaa, kuin ulkolämpötila, mittalaitteiston kautta johtuu lämpöä ympäristöön, joka aiheuttaa virhettä. Vaikkakin tämä vaikutus on pieni, se yleensä otetaan huomioon spesifikaatioissa. Tyypillisesti ulkolämpötilan vaikutus annetaan esimerkiksi lämpötilalähettimien kohdalla kiinteän ja mittausalueesta laskettavan suhteellisen arvon yhdistelmänä per muuttuva ulkolämpötila-aste. Painelähettimissä lämpötilan vaikutus ilmoitetaan tyypillisesti hieman laajempaa lämpötilanvaihtelua kohden, esimerkiksi n. 10-20 astetta. (WIKA 2008, 93-96)

Myös instrumenttien virtalähteiden jännitteiden vaihtelut aiheuttavat virhettä mittaustulokseen. Tämän virheen arviointi on kuitenkin haastavaa, sillä virheen arvioimiseksi pitäisi mitata jännitevaihtelut, jotka eivät ole tarkoituksena prosessimittauksissa. (Scheller & Krummeck 2018, 18)

### 3.2.1 Lämpötilamittaus

Lämpötilan mittausten tarkkuus on standardoitu eri tarkkuusluokkiin. Työn kohteissa käytetään Neste Oyj:n sisäisten spesifikaatioiden mukaan standardin IEC 751 tarkkuusluokan A vastuslämpötila-antureita sekä IEC 584 tarkkuusluokan 1 termopareja, joiden tyyppi on K (nikkeli-kromi /nikkeli-alumel) tai N (NiCroSil ja NiSil). Lämpötilamittaus-osiossa käydään läpi yleisesti näiden antureiden virhetekijöitä.

Lämpötilamittaukset perustuvat johonkin toiseen fysikaaliseen ilmiöön, toisin sanoen lämpötilaa ei voi mitata suoraan itsessään. Esimerkiksi työn kohteissa käytettävissä vastuslämpötila-antureissa lämpötilan mittaus perustuu metallin resistanssin riippuvuuteen lämpötilasta, ja termopareissa metalliliitosten välille syntyvään jännitteeseen, jonka suuruus on riippuvainen lämpötilaerosta. Lämpötilan mittauksessa käytetään teollisuudessa tyypillisesti vastuslämpötila-antureita alle 600 °C lämpötiloissa, ja sitä korkeammissa lämpötiloissa termopareja aina noin 1500 °C asti. (Childs 2001, 16-17)

Lämpötilamittaus koostuu monesta tekijästä. Tällöin voidaan puhua mittausketjusta. Itse anturi muodostaa vain ensimmäisen osan ketjua. Antureille on määritelty standardeissa IEC 751 (vastuslämpötila-anturit) ja IEC 584 (termoparit) toleranssit eri tarkkuusluokan

laitteille sekä myös termopareilla eri tyyppin pareille. Huomioitavaa on, että nämä toleranssit koskevat vain itse anturia, jolloin koko mittausketjun muita tekijöitä on arvioitava erikseen. Termopari- ja vastuslämpötila-anturilla on niiden toiminnasta johtuen erilaisia virheitä synnyttäviä tekijöitä, joita käsitellään myöhemmin tässä osiossa. (Scheller & Krummeck 2016, 11)

Lisäksi on olemassa virhetekijöitä, joita voidaan standardin mukaisella asennuksella sekä valmistajan että hyvän kunnossapidon käytännöillä tehdä merkityksettömiksi. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi vastuslämpötila-anturin eristysresistanssi ja liialliset lämmönjohtumishäviöt. Esimerkiksi eristysresistanssin vaikutus voidaan poistaa huolehtimalla anturin johtimen huolellisesta eristyksestä, jolloin se ei joudu kosketuksiin suojataskun materiaalin kanssa. Lämmönjohtumishäviöillä tarkoitetaan sitä, että anturi ei ole riittävän syvällä mitattavassa aineessa, jolloin ulkoinen lämpötila vaikuttaa siihen liiaksi. Tätä virhettä voi ehkäistä tarpeeksi pitkällä (>80mm) suojataskulla. Myös suojataskun paksuus vaikuttaa, sillä ohuemalla suojataskulla varustetulla anturilla on pienempi vasteaika (Scheller & Krummeck 2018, 12)

### 3.2.2 Kylmien pintojen vaikutus lämpötilanmittaukseen

Yksi huomattavasti virhettä lämpötilan mittaustulokseen aiheuttavista tekijöistä lämpötilamittauksissa on mitta-anturin läheisyydessä sijaitsevat kylmät pinnat. Jos lämpötila-anturi näkee kylmän pinnan, anturi on tällöin säteilyvuorovaikutuksessa kyseisen pinnan kanssa, ja tällöin anturiin aiheutuu säteilylämpöhäviötä. Kylmiä pintoja voivat olla esimerkiksi lämmönsiirtimen putket, joissa virtaa kylmää ainetta sisällä, tai kylmät seinämäpinnat. Säteilevän pinnan tuottama lämpöteho pinta-alaa kohti noudattaa yhtälöä (32):

$$E_{rad} = \varepsilon\sigma T^4 \quad (32)$$

missä  $E_{rad}$ = säteilyteho pinta-alaa kohti [W/m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$ = pinnan emissiviteetti [-]

$\sigma$ = Stefanin-Bolzmännin vakio [ W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

T= säteilevän pinnan lämpötila [°C]

Yhtälössä lämpötila on korotettu neljänteen potenssiin, joten mikäli säteilevä pinta, kuten lämpötila-anturi, on huomattavasti kuumempi, kuin lähistöllä sijaitseva kylmä pinta, jonka kanssa anturi on säteilyvuorovaikutuksessa, säteilylämpöhäviö voi olla merkittävä. (Butler & Shannon 2003)

### 3.2.3 Termoparianturi

Termopariantureille määritellään standarditoleranssi ominaiskäyrästä riippuen termoparin tyypistä sekä tarkkuusluokasta. Termoparin tyyppikirjain kertoo termoparissa käytettävän metalliparin, esimerkiksi tyypissä K on nikkelin ja kromin sekä nikkelin ja alumiinin seoksesta valmistetut johdinparit ja tyypissä N on kahdesta eri nikkelseoksesta (NiCroSil ja NiSil) valmistetut johdinparit. Termoparin ominaiskäyrällä tarkoitetaan lämpötilan ja siitä riippuvan jännitteen funktiona piirrettyä jokaiselle termoparille tyypillistä käyrää. Standardissa IEC 584 määritellään eri tyypeille ja tarkkuusluokille toleranssit sille, kuinka paljon anturi vaikuttaa mittaustulokseen. Tyypin K tai N ja luokan I (tarkin luokka) termopareille voidaan määrittellä toleranssi kahdella tavalla, ja näistä valitaan aina suurempi (33):

$$\delta_{TC} = \pm 1,5 \text{ °C tai } \pm 0,004 * |T|. \quad (33)$$

missä  $\delta_{TC}$ =standardipoikkeama termoparille [°C]

T= lämpötilan mitattu arvo [°C]

Yleinen ongelma termopariantureissa on anturin kylmän pään referenssilämpötila. Jotta termoparilla voidaan mitata mitattavan aineen lämpötila, kylmän pään lämpötila täytyy olla tiedossa. Standardin mukaisten lämpösähköiset jännitteiden kylmän pään referenssilämpötila on 0 °C, joka ei toteudu käytännön mittauksessa, jolloin tälle erolle referenssipisteestä täytyy tehdä kompenzaatio. Tätä kutsutaan kylmän pään kompensoinniksi (cold junction compensation). Tälle virheelle tyypillisesti ilmoitetaan valmistajan toimesta absoluuttinen arvo, joka on  $\pm 0,5\text{-}2 \text{ °C}$  luokkaa. (Emerson 2013, 16-17)

Termoparien mittauselementti kytketään monesti eri materiaalista, kuin itse termopari, tehdyllä kaapelilla lähettimeen, joka luo yhden virhetekijän lisää. Kirjallisuudessa tätä kaapelia kutsutaan kompensatiokaapeliksi. Tälle kaapelille annetaan standardissa IEC 60584 toleranssi, joka on  $\pm 2,5$  °C tarkkuusluokan 2 tyyppin K termopareille. Kompensatiokaapeleilla ei ole tarkkuusluokkaa 1, jolloin toleranssi luetaan kompensatiokaapeleiden luokan 2 kohdalta. Kompensatiokaapeli valitaan yleensä siten, että sillä olisi mahdollisimman vastaavat ominaisuudet kuin itse termoparien materiaalilla. (Scheller & Krummeck 2018, 17)

### 3.2.4 Vastuslämpötila-anturi

Vastuslämpötila-anturi koostuu tuntoelimestä (resistance thermometer detector) ja kytkentäjohdoista, jotka ovat mahdollisimman puhdasta materiaalia, kuten platinaa (Pt). Kytkentäjohdot kytkyvät tuntoelimen mittaussiltaan, jonka tarkoituksena on muuntaa vastusmittaus jänniteviestiksi, joka muutetaan lähettimessä virtaviestiksi. Tuntoelimeen syötetään virtaa ja tuntoelimen tuottama resistanssi riippuu lämpötilasta, jolloin resistanssin perusteella voidaan määrittää lämpötila.

Kuten termopariantureille, myös vastuslämpötila-antureillekin on määritetty standardipoikkeama ominaiskäyrästä riippuen anturin tarkkuusluokasta. Luokan A Pt100-antureilla standardipoikkeama IEC 751 mukaan voidaan laskea kaavalla (34):

$$\delta_{RTD} = \pm(0,15 + 0,002 * |T|) \quad (34)$$

missä  $\delta_{RTD}$  = standardipoikkeama Pt100- mittalaitteelle

Tuntoelin kytketään mittaussiltaan kahdella, kolmella tai neljällä kytkentäjohdolla. Mikäli kytkentä tehdään vain kahdella tai kolmella johdolla, aiheuttaa kytkentäjohdon resistanssi virhettä mittaustulokseen. Neljällä johdolla kytkentä ei aiheuta virhettä. Kolmella johdolla tehtävä kytkentä aiheuttaa virhettä vain sen verran, mikä on johdinten välinen resistanssiero, jolloin virheen vaikutus on pieni. Kahdella johdolla tehtävä kytkentä aiheuttaa virhettä kytkentäjohdon resistanssin verran. (Emerson 2013, 33-34)

Vastuslämpötila-anturin mittausketju koostuu useista eri johdinmateriaaleista. Käytännössä jokainen eri materiaalin kytkentä toisiinsa muodostaa kohtaa termoparin, jonka seurauksena kyseiseen kohtaan muodostuu lämpösähköistä jännitettä, joka

vääristää mittausravon tulosta. Vastuslämpötila-antureilla tulosta vääristää myös anturin johtimen läpi kulkevan virran tuottama lämpö, joka vääristää ylöspäin. Tämän virheen suuruus riippuu johtimen vastuksesta, sekä itselämmityskertoimesta. Tälle kertoimelle on valmistajan toimesta yleensä annettu arvo, jonka perusteella kyseisen virheen suuruutta voi laskea. (Scheller & Krummeck 2018, 15).

### 3.2.5 Paineanturi

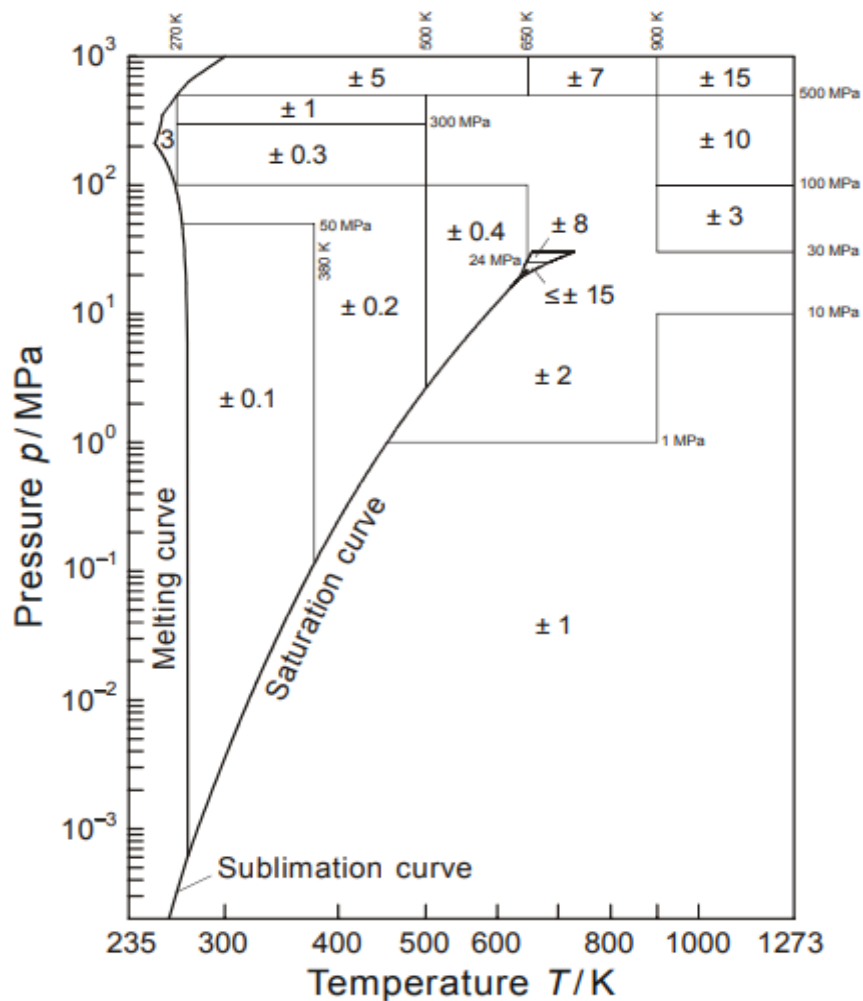
Työn kohteissa käytetään paineen mittaukseen instrumentteja, joissa antureina ovat pietsoresistiivinen anturi, kapasitiivinen paineanturi sekä resonanssianturi. Toimintaperiaatteeltaan nämä kaikki eroavat hieman toisistaan. Pietsoresistiivisessä anturissa paine mitataan kalvon resistanssin avulla. Kalvolle tuodaan pieni virta, jota mitataan. Paineen muuttuessa kalvon muoto muuttuu, ja muodon muuttuessa resistanssi muuttuu. Paineella ja resistanssilla on lineaarisuussuhde, ja kun resistanssi muuttuu paineen kasvaessa, kalvon kulkeva virta muuttuu, ja paine pystytään määrittämään. Prosessin paine voidaan tuoda kalvolle joko suoraan tai paineenvälittimen kautta. Paineenvälitin koostuu kalvolle tulevasta nesteletkusta ja prosessin mittausyhteeseen sijoitettavasta kalvosta. Paineenvälitintä voidaan käyttää olosuhteissa, joissa mittauskalvo ei kestä prosessiainetta. Kapasitiivisella anturilla periaate on hyvin samankaltainen, mutta mittaus perustuu kalvon kapasitanssiin ja sen muutokseen paineen seurauksena. (Pihkala 2004, 28-30) Resonanssianturi koostuu esimerkiksi silikonista tehtyyn lastuun, joka on lasin ja kalvon välissä. Kalvoon vaikuttava paine kuormittaa lastua ja saa sen värähtelemään. Tämä värähtelytaajuus muutetaan paineeksi. Paineen muuttuessa lastun värähtelytaajuus muuttuu. (Yokogawa 2017, 44-45)

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi paineenmittausinstrumentteihin virhettä aiheuttavat prosessista johtuvat lämpökuormat. Lämpökuormien muutosten vaikutuksesta paineantureiden ja käytössä olevien painevälittimien kalvot sekä sisäiset nesteet lämpölaajenevat, joka aiheuttaa eroa anturin kalibrointiolosuhteissa määritettyyn toimintaan. Mikäli prosessin lämpötila ei juurikaan muutu, kalibroimalla instrumentti kyseisessä lämpötilassa voidaan minimoida prosessiaineen lämpötilan vaikutus.

### 3.3 Veden ja vesihöyryn entalpia

Kappaleen 2.3 rajoiteyhtälöiden muodostuksen yhteydessä huomattiin, että energiataseen laskentaan tarvitaan aineiden entalpiat. Vesihöyrylle ja vedelle entalpian arvot saadaan paineen ja lämpötilan funktiona, joten paineen ja lämpötilan mittaukset ovat keskeisiä energiataseen täsmäämisen kannalta. Entalpialle energiataseen täsmäykseen tarvittava epävarmuus voidaan määrittää tietyssä pisteessä kyseisen pisteen paine- ja lämpötilamittausten epävarmuuksien avulla.

Työssä käytetään entalpian määrittämiseen eri lämpötiloissa ja paineissa IAPWS:n määrittelemää laskentaa, johon pohjautuvat mm. Xsteam- laskentatyökalu, sekä työssä käytettävät eri mallinnusohjelmien taulukot. Määrittelyissä eri lämpötila- ja painealueiden entalpioille määritellään laskennasta johtuva epävarmuus. Alla olevasta kuvasta viisi voidaan nähdä eri alueiden epävarmuudet, jotka on otettava huomioon erillisenä epävarmuusterminä määritettäessä epävarmuutta täsmäyksessä käytettäville virhearvioille. (IAPWS 2003, 5)



Kuva 5: Absoluuttisia epävarmuuksia entalpialle (kJ/kg) yhden faasin tilassa tietyillä paine- ja lämpötila-alueilla (IAPWS 2003, 5).

Entalpiain laajennettun epävarmuuden laskentaan vaikuttavat ne mittaukset, jonka perusteella entalpia määritetään. Esimerkiksi jos määrittäminen tehdään lämpötilan ja paineen mittausten funktiona, molempien mittausten epävarmuus vaikuttaa entalpiain epävarmuuteen. (UKAS 2012, 15) Tähän lisäksi lisätään vielä IAPWS:n antama entalpiain epävarmuus.

Laskentatapoja on muutamia erilaisia, mutta käytännöllisintä voi olla arvioida entalpiain epävarmuutta siten, että osittaisderivaatat lasketaan entalpiain muutoksesta muuttujan suhteen numeerisesti. (Karimi ja Manteufel 2013). Tässä tavassa lämpötilan mittaukselle lasketaan laajennettu epävarmuus, ja entalpiain määrittämiseen vaikuttavaa lämpötilaa muutetaan kyseisen epävarmuuden verran. Näin saadaan entalpiain muutos lämpötilan

muutoksen funktiona. Samoin saadaan myös entalpian muutos paineen funktiona. Laskuun yhdistetään vielä IAPWS:n antama epävarmuus ja laajennettu epävarmuus entalpialle voidaan laskea yhtälöllä (35):

$$U_{e,h_i} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial h_i}{\partial T_i} U_{T_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_i}{\partial p_i} U_{p_i}\right)^2 + (U_{h,abs})^2} \quad (35)$$

missä  $U_{e,h_i}$  = entalpian absoluuttinen, laajennettu epävarmuus [kJ/kg]

$\frac{\partial h_i}{\partial T_i}, \frac{\partial h_i}{\partial p_i}$  = entalpian muutos vastaavalla muuttujan muutoksella

$U_{T_i}$  = lämpötilan laajennettu, absoluuttinen epävarmuus [°C]

$U_{p_i}$  = paineen laajennettu, absoluuttinen epävarmuus [Pa]

$U_{h,abs}$  = entalpian absoluuttinen epävarmuus IAPWS:n mukaan [kJ/kg]

## 4 HÖYRYNUOHOINTEN TOIMINTA

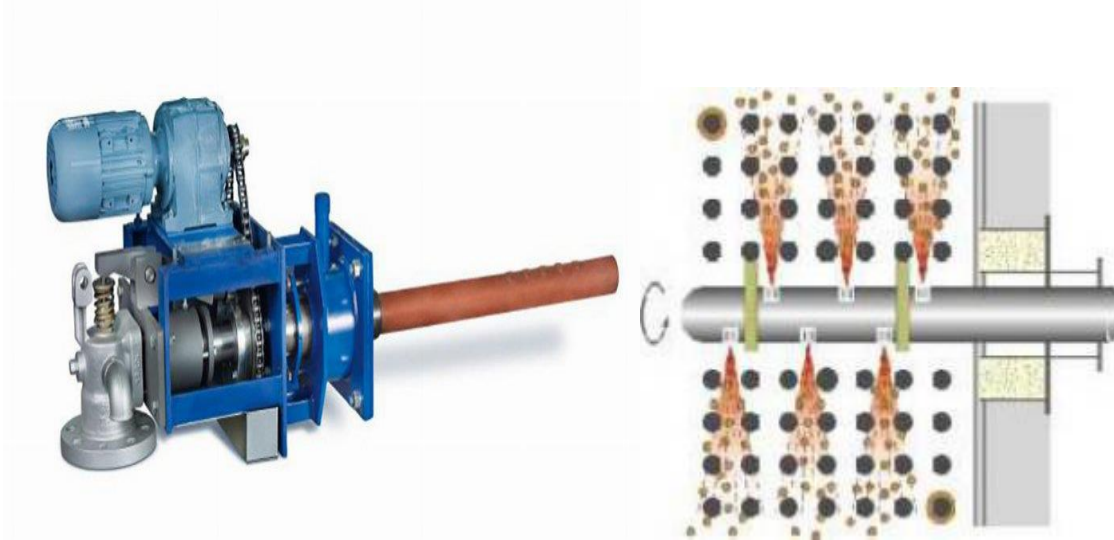
Työn soveltavan osan kohteena olevassa jätelämpökattilassa on käytössä ulosvedettävät akselinsa ympäri pyörivät höyrynuohoimet, joten tässä kappaleessa tarkastellaan höyryllä toimivia nuohoimia. Työn kohteena olevassa jätelämpökattilassa nuohous toteutetaan kuusi kertaa päivän aikana neljän tunnin välein noin 20 minuutin mittaisissa sykleissä. Kappaleessa käsitellään vain putkilämmönsiirtimien nuohoukseen käytettäviä nuohoimia, sillä työn kohteena olevassa jätelämpökattilassa höyrystin on putkipakettina erikseen kattilan sisällä. Höyrynuohous on yleinen tapa lämpöpintojen puhdistamiseksi höyryn saannin ja käyttökelpoisuuden vuoksi. Lisäksi hieman avataan lämpöpintojen nuohouksen vaihtoehtoisia tapoja.

### 4.1 Toimintaperiaate

Höyrynuohoimen perustoimintaperiaate on se, että tuodaan puhdistettavalle pinnalle paineessa olevaa höyryä suihkuna, jonka tarkoituksena on poistaa lämpöpinnoille kertynyttä kuona. Suihku törmää kuonaan, tunkeutuu kuonakerroksen sidoksiin ja irroittaa kuonan pinnalta. Nuohoushöyrynä käytetään yleensä n. 18-25 bar:n paineessa olevaa höyryä, joka otetaan yleensä joko turbiinin välitosta halutussa paineessa tai sitten suoraan tulistetun höyryn (tuorehöyry) linjasta, riippuen laitoksen konfiguraatiosta. (Vakkilainen 2016, 159)

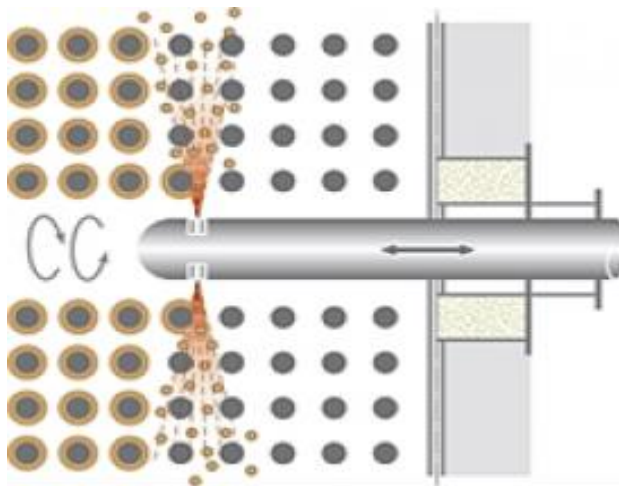
Nuohoinmalleja on erilaisia, mutta suurimmaksi osin erilaisten putkiesilämmittimien nuohoukseen käytetään kahta mallia, kattilassa paikallaan pysyvää, mutta akselinsa ympäri pyörivää monisuutinnuohointa, sekä ulosvedettävää akselinsa ympäri pyörivää nuohointa. Kuvan kuusi kaltainen paikallaan pysyvä nuohoin asennetaan kanavaan siten, että se ei liiku muuten kuin paikallaan pyörimällä akselinsa ympäri. Nuohoin koostuu pitkästä metalliputkesta (nuohoinlanssi), jonka sisällä on höyryputki. Lanssiin on tehty reikiä tiettyihin kohtiin, joista höyry puhalletaan ulos. Reiät mitoitetaan siten, että saadaan riittävä puhallusalue lämpöpintojen puhdistamiseksi, jotta pinnoille ei jäisi kohtia, joihin kerääntyy kuonaa. Lanssin sisällä oleva putki tiivistetään tiivistepöksillä kiinni. Sisempi höyryputki ei pyöri vaan pelkästään lanssi pyörii. Tästä nuohoinmallista on muutamia eri

variaatioita, joiden toiminta vaihtelee enimmäkseen sen mukaan, nuohoaako nuohoin kattilan seiniä vai putkipaketteja. (Huhtinen et al. 1994, 215)



Kuva 6: Kiinteä monisuutinnuohoin (Clyde & Bergmann. 2018)

Ulosvedettävä nuohoin on toiminnaltaan hyvin samankaltainen kuin paikallaan pysyvä. Se eroaa siten, että kun nuohousta ei tapahdu, lanssi vedetään ulos tulipesästä tai kaasukanavasta. Nuohous on sekvensoitu tietyn mittaiseksi ja sekvenssin alussa nuohoin työntyy kattilaan sisälle. Rakenteeltaan lanssi on hyvin samanlainen kuin kiinteässä nuohoimessa, mutta siinä ei tarvitse olla yhtä montaa suutinta. Ulosvedettävässä lanssissa on tyypillisesti vain päässä suuttimet molemmin puolin. Lanssi pyörii akselinsa ympäri ja liikkeessaan eteen ja taaksepäin saadaan tarvittava puhallus nuohoimen toiminta-alueelle. Kuvassa seitsemän havainnollistetaan ulosvedettävän nuohoimen toimintaa. (Vakkilainen 2018)



Kuva 7: Ulosvedettävä nuohoin (Clyde & Bergmann. 2018)

Nuohoushöyry otetaan tulistettuna n. 100 °C vastaavaa kylläistä höyryä lämpimämpänä tavoitteena välttää lämpöpintojen kulumisen vesipisaroiden vuoksi. Höyry tuodaan nuohoimelle reductioventtiilin kautta, ja paine pyritään laskemaan siten, että lämpöpinnoille osuessaan höyryn paine olisi maksimissaan 6 bar. Matalalla paineella pyritään estämään lämpöpintojen vahingoittumista. (Huhtinen et al. 1994, 216)

Nuohointen toiminnan optimointi on erittäin tärkeää, jotta saadaan mahdollisimman hyvä nuohoustulos, sekä vältetään turhaa höyryn käyttöä. Nuohouksen tehokkuuteen vaikuttaa usea tekijä. Suuttimen muotoilu ja koko vaikuttaa suihkun dynaamiseen paineeseen, ja kyseinen paine sekä suihkun lämpötila vaikuttaa höyrystuulikon tunkeutumiskykyyn. Suihkon teho laskee etäisyyden kasvaessa kuonasta, joten nuohoimia täytyy olla riittävin välimatkoin. Myös nuohoussekvenssin pituus sekä ulosvedettävissä nuohoimissa nuohoimen edestakaisen liikkeen nopeus vaikuttaa nuohouksen tulokseen. Liian nopea lanssin pyöriminen ja liike vähentää höyrystuulikon viipymäaika yhdessä kohdassa liikaa, jolloin puhdistus ei ole optimaalista. (Teir 2002, 98)

Nuohoinvalinta riippuu myös siitä, että millä lämpötila-alueella nuohointa käytetään. Esimerkiksi ulosvedettävää nuohointa käytetään silloin, kun lämpötilat ovat korkeat (n. 800-1500 °C). Näin korkeissa lämpötiloissa nuohoin vaurioituisi kattilan sisällä, kun nuohous ei ole yleensä jatkuvaa, jolloin nuohoimessa jäädyttimenä toimivaa höyryä ei ole. Pääsääntönä nuohousta ei käytetä paikoissa, joissa lämpötila nousee yli 850 astetta, sillä kuonakerrostumat ovat liian vaikeita poistaa. (Teir 2002, 98)

## 4.2 Nuohouksen vaikutus prosessiin

Nuohous ei vaikuta tässä työssä suoraan käytettävään mittaustietoon, sillä nuohous ei ole jatkuvaa ja mittaustiedon keräyshetkenä, tasehetkenä, nuohous ei ole käytössä, jotta prosessi olisi mahdollisimman vakaassa tilassa. Nuohouksen vaikutus prosessin taseeseen nuohouksen ollessa käynnissä voidaan huomata esimerkiksi vähentyneestä höyryntuotannosta, sekä kattilan kaasun vesipitoisuuden kasvusta.

Nuohouksen tärkeyttä voidaan tarkastella lämpöpintojen likaantumisen vaikutuksen kannalta. Lämmönsiirtoa kaasusta veteen tai höyryyn voidaan havainnollistaa lämmönsiirrinpinnan energiaperiaatteen avulla. Oletetaan lämmönsiirron tapahtuvan tasapainotilassa ja vain yksiulotteisesti lämmönsiirtimen pinnan läpi. Oletetaan myös, että säteilylämmönsiirto on vähäistä, joten sitä ei huomioida. Tällöin lämmönsiirtimen pinnan lämmönsiirtotase voidaan kirjoittaa yhtälönä (36):

$$q_{conv} - q_{cond} = 0 \quad (36)$$

missä  $q_{conv}$ =konvektiolla tapahtuvan lämmönsiirron teho [W]

$q_{cond}$ =konduktiolla tapahtuvan lämmönsiirron teho [W]

Konvektiolämmönsiirron termi voidaan kirjoittaa auki yhtälöllä (37):

$$q_{conv} = hA(T_g - T_{s,out}) \quad (37)$$

missä  $h$ =konvektiolämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>°C]

$A$ =pinta-ala [m<sup>2</sup>]

$T_g$ = kaasun lämpötila [°C]

$T_{s,out}$ =putken ulkopinnan lämpötila [°C]

Putken ollessa sylinterimäinen pinta, konduktiolämmönsiirto sille voidaan kirjoittaa auki yhtälöllä (38):

$$q_{cond} = kA_c \frac{T_{s,out} - T_{s,in}}{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)} \quad (38)$$

missä  $k$  =konvektiolämmönsiirtokerroin [W/ °C]

$A_c$ = sylinterin pinta-ala [m<sup>2</sup>]

$r$  = putken säde [m]

Sylinterin pinta-ala saadaan kaavalla (39):

$$A_c = 2\pi rL \quad (39)$$

$L$ = putken pituus [m]

Yhtälö saadaan muotoon (40):

$$q_{cond} = k2\pi rL \frac{T_{s,out}-T_{s,in}}{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)} \quad (40)$$

Lämmönsiirtoa putken pinnan läpi voidaan kuvata myös yhtälöllä (41):

$$q = UA\Delta T \quad (41)$$

$U$  =kokonaislämmönsiirtokerroin [W/ m<sup>2</sup> °C]

$A$  =lämmönsiirtopinta-ala [m<sup>2</sup>]

Termi  $UA$ , jota voidaan kutsua myös konduktanssiksi, koostuu lämmönsiirtimille ominaisista lämpövastuksista sekä lämpövastuksille ominaisista pinta-aloista. Lämpövastuksella tarkoitetaan esimerkiksi putken materiaalin lämmönjohtumisesta ja paksuudesta aiheutuva lämmönsiirtovastusta. Termi  $UA$  voidaan kirjoittaa auki toisessa muodossa (42):

$$UA = (R_i + R_{f,i} + R_w + R_o + R_{f,o})^{-1} \quad (42)$$

missä  $R_{in}$ = putken sisäpinnan lämpövastus [m<sup>2</sup>°C/W]

$R_{f,i}$ =putken sisäpinnan likaantumiskerroin [m<sup>2</sup>°C/W]

$R_w$ =putken seinämärakenteen lämpövastus [m<sup>2</sup>°C/W]

$R_{out}$ = ulkopinnan lämpövastus [m<sup>2</sup>°C/W]

$R_{f,o}$  = ulkopinnan likaantumiskerroin [ $\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ ]

Yhtälön (41) lämpövastustermit kirjoitetaan auki, saadaan (43):

$$UA = \left( \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)}{k 2\pi L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \right)^{-1} \quad (43)$$

Termillä  $R_{f,o}$  kuvataan yhtälössä putken ulkopinnan likaantumisen vaikutusta lämmönsiirtokertoimeen (fouling factor). Likaantumisvastus kasvaa sitä suuremmaksi, mitä likaisemmaksi pinta tulee. Nuohouksella pidetään tämän termin vaikutus lämmönsiirtoon mahdollisimman pienenä, sekä pidetään lämmönsiirto mahdollisimman tasaisena.

### 4.3 Hyödyt ja haitat

Nuohoushöyryn suurin etu on sen tehokkuus, sekä edullinen käyttö, kun höyry saadaan samasta prosessista. Nuohousjaksot ovat verrattain lyhyet tehokkuuden ansiosta, ja nuohous ei kuluta lämpöpintoja. Laitteistokustannukset ovat myös alhaiset. Puhalluspainetta on yleensä mahdollista säätää, jolloin nuohousta voidaan käyttää vallitsevan ajotilanteen mukaan. (Huhtinen et al. 1994, 216)

Höyryn käyttö kuitenkin vähentää kattilahyötysuhdetta riippuen käytettävistä nuohoimista, sillä nuohoukseen käytettävä höyry vähentää hyötykäyttöön saatavan höyryn määrää. Tämän vuoksi nuohouksen optimointi on tärkeää. Nuohouksen kuluttama höyrymäärä riippuu paljon kattilassa käytettävästä polttoaineesta. Esimerkiksi soodakattilassa kuona on erittäin vaikeasti poistuvaa, jolloin täytyy nuohota enemmän ja toisaalta taas pölypolttokattilassa kuona poistuu helpommin. Nuohouksen käytön vuoksi myös lisäveden tarve lisääntyy, joka myös kasvattaa kustannuksia. (Teir 2002, 98)

Höyryn käyttäminen nuohoukseen lisää vesihöyryn määrää savukaasuissa, joka voi johtaa rikkihapon muodostumiseen savukaasukanavan lopussa. Tätä voidaan ehkäistä pitämällä savukaasun lämpötila yli happokastepisteen rajan, jotta happo ei tiivisty lämpöpinnoille. Tämä osaltaan huonontaa kattilahyötysuhdetta hieman, sillä kaikkea lämpöä savukaasusta ei saada talteen. Nuohouslaitteisto myös vaatii huoltoa, joka puolestaan kasvattaa kustannuksia. Lisäksi höyrynuohous ei sovi kovin pienille kattiloille, sillä

höyrysuihkut aiheuttavat painenvaihteluita savukaasukanavassa, joka heikentää kattilan toimintaa. (Huhtinen et al. 1994, 216)

#### **4.4 Vaihtoehtoisia nuohousmenetelmiä**

Höyrynuohousta pidetään yleisesti käytettävimpänä nuohoustekniikkana. Tämä johtuu sen helposta käytettävyydestä, käyttövarmuudesta sekä halvasta käyttövoimasta. On olemassa kuitenkin muutamia vaihtoehtoja höyrynuohoukselle. Vaihtoehtoja ovat muun muassa erilaiset puhaltimet (ilma), ravistimet sekä ääniaalloilla (infraääni) tehtävät värinät. Ilmaa käytetään harvoin nuohoukseen, sillä se vaatii kompressorilaitteiston, joka nostaa hankintakustannuksia selvästi. Lisäksi se aiheuttaa tulipalovaaran pinnoille, joihin on mahdollista jäädä palamatonta polttoainetta.

Ääninuohouksessa laitteistolla synnytetään matalataajuista infraääntä. Ääniaallot aiheuttavat lämpöpinnoille värinää ja värinä irrottaa lämpöpinnoilta likaa. Ääninuohouksen tehokkuus kuitenkin muodostuu ongelmaksi, sillä se ei poista vaikeasti irtoavaa likaa. Ääniaaltoja käytetään vähän likaavien polttoaineiden ja muiden nuohoustekniikoiden apuna. (Huhtinen et al, 1994, 219)

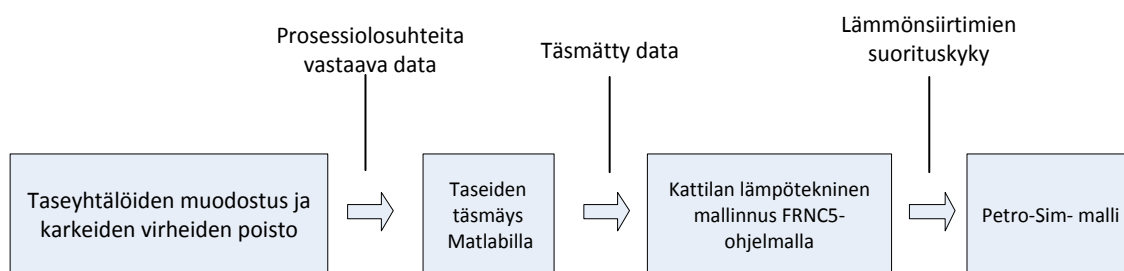
Ravistinnuohouksessa lämpöpinta pyritään saamaan värisevään liikkeeseen iskun avulla. Lämpöpinnalla on yleensä kohta, joka on valmistettu ottamaan isku vastaan, ja tästä kohdasta värähtely johtuu muulle pinnalle. Ravistuslaitteita käytetään paikoissa, jotka ovat erittäin likaavia, joissa voi muodostua isoja kerrostumia pinnoille. Ravistuslaitteiden suurin haitta on kuitenkin huollontarve, sillä ne kuluvat käytössä paljon. Isona etuna kuitenkin ovat halpuus ja korroosioriskin lisäämättömyys.

Kuulanuohouksessa lämpöpinnoille tiputetaan kuulia, jotka puhdistavat mekaanisesti pintoja. Kuulien käyttö edellyttää kuitenkin, että lämpöpinnat ovat vaakasuorassa pystykanavassa, sillä kuulat tiputetaan painovoiman avulla. Kuulia tiputetaan jakelijasta tasaisesti siten, että kuulat puhdistavat pintoja mahdollisimman hyvin pudotessaan alaspäin kanavassa. Kuulat kerätään kanavan pohjalla suppiloon, josta ne voidaan kierrättää pneumatiikan avulla uudelleen käyttöön. Kuulanuohous soveltuu helposti irtoavan lian poistamiseen, mutta myös kuluttaa lämpöpintoja. (Huhtinen et al, 1994, 217)

## 5 JÄTELÄMPÖKATTILA BF-2401

Jätelämpökattila on La Mont- tyyppinen pakkokierto-kattila, jonka tavoitteena on tuottaa tulistettua 16 bar:n höyryä jalostamon höyryverkkoon. Kattilan lämmönsiirtimet koostuvat kahdesta ekonomaiseriputkipaketista, neljästä höyrystinputkipaketista sekä yhdestä tulistinputkipaketista. Syöttövesi tulee syöttövesisäiliöstä BG-6107, jonne vesi tulee lauhteina eri prosesseista sekä vesilaitokselta lisävetenä. Syöttövesi kulkee ekonomaiserin kautta lieriöön, jossa on jatkuva ulospuhallus, jota säädetään käsiventtiilin asennolla. Lieriöstä kiertovesi pumpataan pakkokiertoa kiertopumpuilla höyrystimeen, jossa noin kuudesosa kiertävästä vedestä höyrystyy. Tämä kaksifaasiseos kiertää takaisin lieriöön, jossa kylläinen höyry erottuu omaksi faasikseen ja jatkaa tulistimeen. Ennen tulistinta kylläisen höyryn sekaan tuodaan muualta lisää kylläistä höyryä tulistettavaksi. Tulistuksen jälkeen tulistettuun höyryyn ajetaan hieman lauhdetta höyryn lämpötilan pitämiseksi halutussa arvossa, jonka jälkeen höyry menee jalostamon höyryverkkoon.

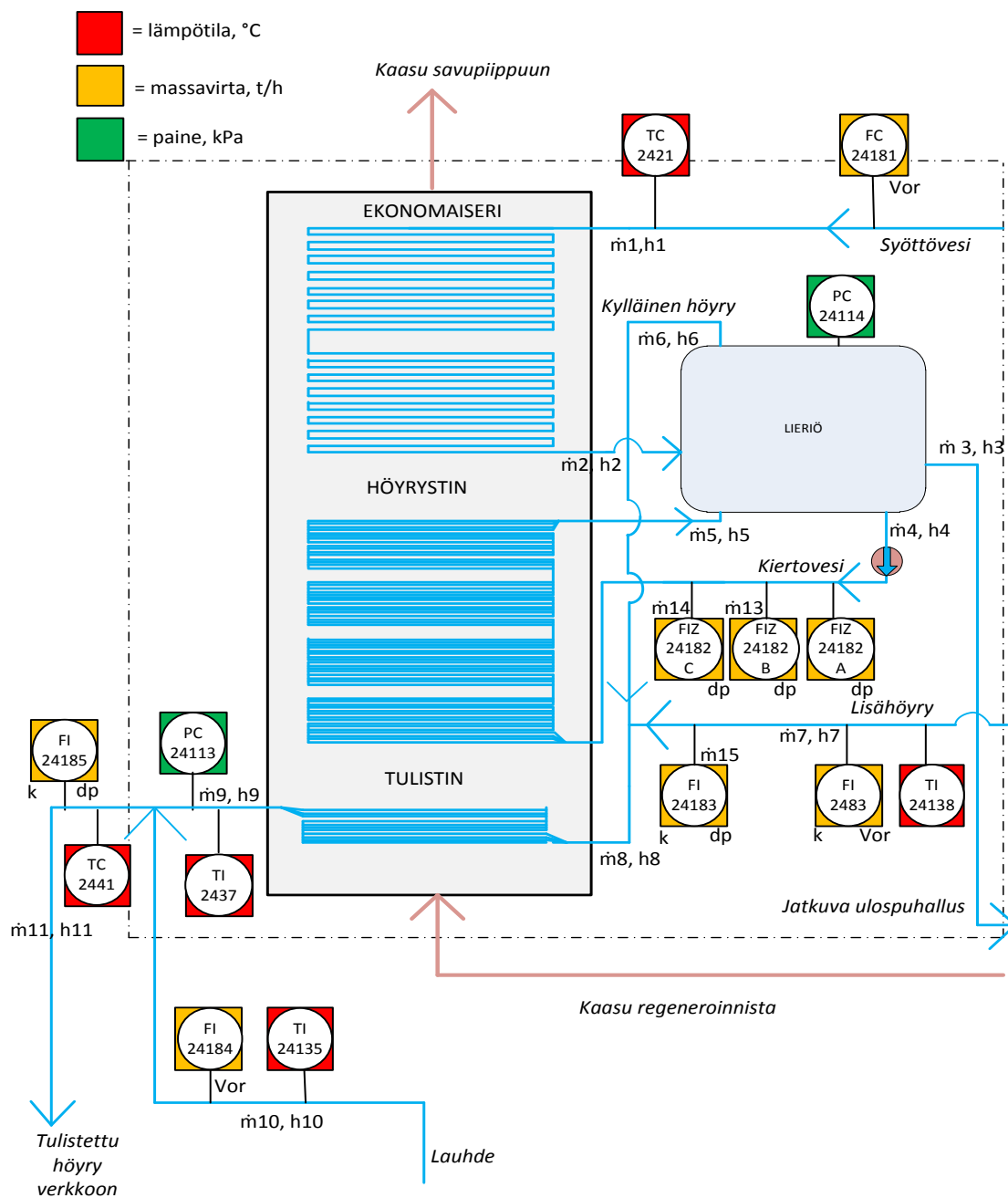
Kohteen massa- ja energiataseen täsmäminen aloitetaan muodostamalla prosessista taseyhtälöt, jotka myös toimivat rajoiteyhtälöinä Matlab-laskentaa varten. Tämän jälkeen prosessin mittaustuloksiin vaikuttavat karkeat virheet poistetaan. Sitten energia- ja massataseet täsmätään ensin Matlab:n avulla, jonka jälkeen näitä tuloksia käytetään FRNC5- mallin virittämiseen. FRNC5- mallin tarkoituksena on mallintaa kattila lämpötekniisesti. Näiden tulosten perusteella lasketaan Petro-SIM- mallin lämmönsiirtimille tarvittavat konduktanssit, joiden avulla Petro-SIM- malli pystyy tuottamaan sille syötettävistä mittaustiedoista todenmukaisia tuloksia. Työssä toteutettava Petro-SIM- malli toimii osana FCC-yksikön optimointimallia. Kuvassa kahdeksan on kaavio työn kulusta jätelämpökattilan osalta.



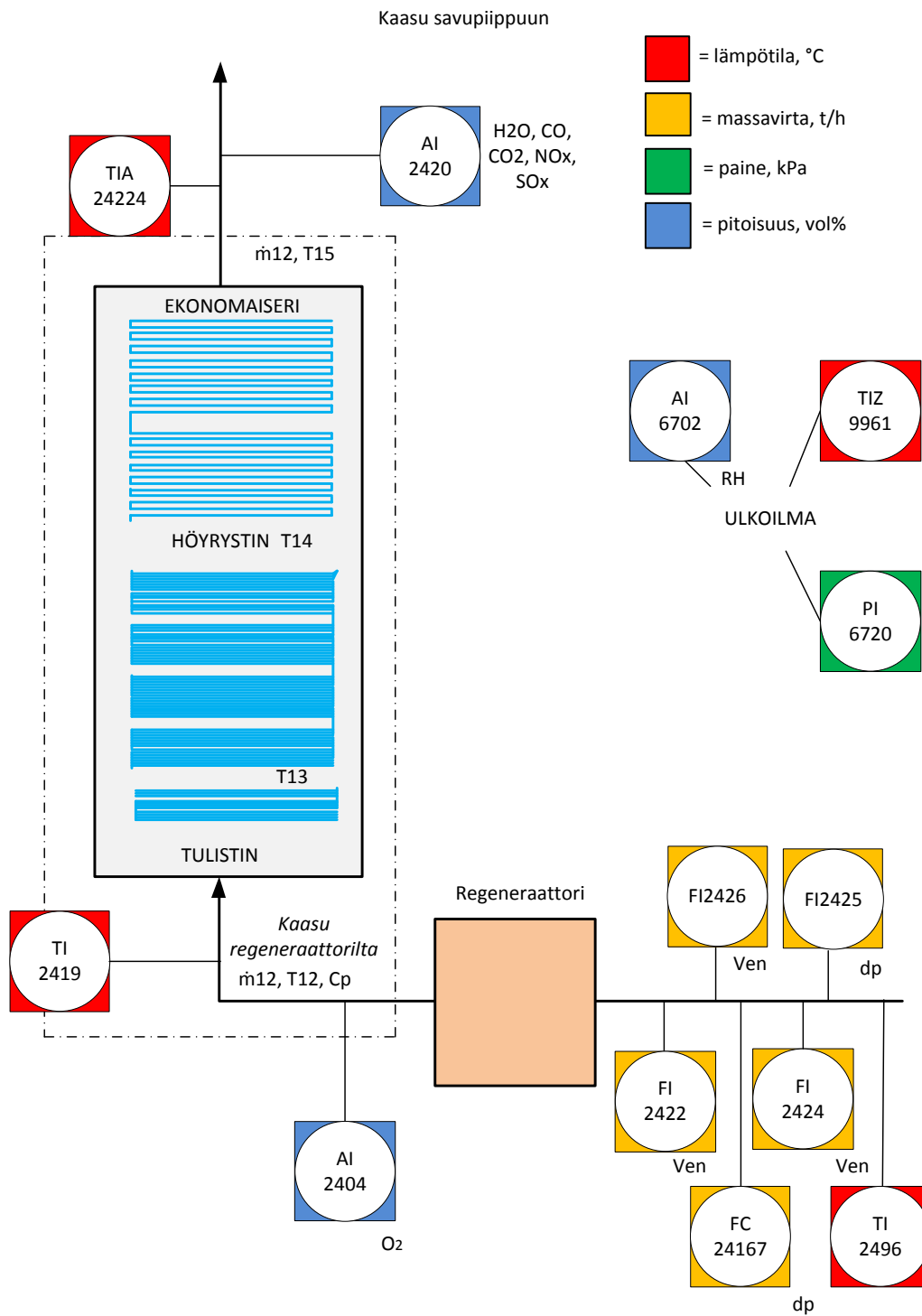
Kuva 8: Havainnekuva työn kulusta

## 5.1 Jätelämpökattilan mittaukset

Ennen kuin taseyhtälöt muodostetaan, käydään tässä osiossa läpi, mitä mittauksia, ja muuttujia käytetään prosessin täsmäämiseksi. Alla olevissa kuvissa yhdeksän ja kymmenen havainnoidaan jätelämpökattilan mittauksia sekä prosessin kulkua.



Kuva 9: Havainnekuva kattilan rakenteesta sekä vesi/höyrypuolen mittauksista. Nimettynä myös virrat sekä virroille annetut termit taseyhtälöissä.



Kuva 10: Havainnekuva kattilan savukaasupuolen mittauksista sekä savukaasun massavirran laskennassa käytettäviä mittauksia.

Kuvissa yhdeksän ja kymmenen eri mittaukset on yhdistetty virtoihin viivoilla. Virtausmittaukset ovat keltaisella pohjalla, lämpötilamittaukset punaisella, painemittaukset vihreällä sekä kaasuanalysaattorit sinisellä. Väripohjien päällä valkoisen ympyrän sisällä on mittauksen tagi, joka kertoo, mistä mittauksesta on kyse. Virtausmittauksien oikeassa alakulmassa on lyhenteitä, mitkä kertovat, millä tavalla mittaustuloksesta saadaan massavirta muodostettua. Lyhenteitä ovat dp, Vor ja Ven. Kaasuanalysaattoreiden vieressä on lueteltuna, mitä ainetta tai pitoisuutta analysaattorit mittaavat.

Lyhenne dp viittaa mittalevyn tuottamaan paine-eroon. Tämä paine-ero mitataan painelähtetimillä, ja paine-erosta voidaan laskea massavirta. Lyhenteellä Vor viitataan Vortex-virtausmittaukseen, jossa virtauseste tuottaa pyörteitä. Pyörteiden paine vaihtelee, ja saa sensorin värähtelemään. Värähtelytaajuus on suoraan verrannollinen virtaavan fluidin virtausnopeuteen. Ven- lyhenne viittaa venturiputkeen, jonka periaate on samankaltainen mittalevyn kanssa. Virtauksen paine mitataan ennen venturiputkea, sekä venturiputken keskikohdassa, ja mitattavan paine-eron avulla voidaan Bernoullin lain avulla laskea virtausnopeus, kun putken poikkipinta-alat ovat tiedossa.

Kuvissa yhdeksän ja kymmenen virtausten ja eri kattilan komponenttien viereen on sijoitettu kirjain-numero- yhdistelmä massavirroista ja entalpioista. Näin kuvataan, mikä muuttujan termi kuvastaa mitäkin kohtaa prosessista. Alla olevassa taulukossa yksi on taulukoituna massavirtauksen ja entalpian selite, sitä vastaava kirjain-numeroyhdistelmä kuvassa, sekä yhdistelmän mittausta vastaava positionumero. Mikäli mittauksen kohdalla on viiva, se tarkoittaa, että muuttujaa ei ole mitattu, jolloin se täytyy estimoida mitattujen muuttujien avulla.

Taulukko 1: Kuvien 9 ja 10 massavirtojen ja entalpioiden selitteet

Virtaus	Termi	Positionumero
Syöttövesi	$\dot{m}_1$	FI24181
Syöttövesi ekonomaiserilta	$\dot{m}_2$	-
Ulospuhallus	$\dot{m}_3$	-
Kiertovesi höyrystimelle A	$\dot{m}_4$	FIZ24182A
Höyrystimeltä lieriöön	$\dot{m}_5$	-
Kylläinen höyry lieriöstä	$\dot{m}_6$	-
Lisähöyry Vortex	$\dot{m}_7$	FI2483
Höyry tulistimeen	$\dot{m}_8$	-
Höyry tulistimelta	$\dot{m}_9$	-
Lauhde	$\dot{m}_{10}$	FI24184
Tulistettu höyry verkkoon	$\dot{m}_{11}$	FI24185
Kaasu regeneroinnista	$\dot{m}_{12}$	Laskenta
Kiertovesi B	$\dot{m}_{13}$	FIZ24182B
Kiertovesi C	$\dot{m}_{14}$	FIZ24182C
Lisähöyry dP	$\dot{m}_{15}$	FI24183
Syöttöveden entalpia	$h_1$	TC2421
Ekonomaiserilta tulevan veden entalpia	$h_2$	PC24114
Ulospuhallusveden entalpia	$h_3$	PC24114
Kiertoveden entalpia	$h_4$	PC24114
Höyrystimeltä tulevan vesi/höyry- seoksen entalpia	$h_5$	-
Kylläisen höyryn entalpia	$h_6$	PC24114
Lisähöyryn entalpia	$h_7$	TI24138
Tulistimelle menevän höyryn entalpia	$h_8$	-
Tulistimelta tulevan höyryn entalpia	$h_9$	PC24113, TI2437
Lauhteen entalpia	$h_{10}$	TI24135
Tulistetun höyryn entalpia	$h_{11}$	TC2441, PC24113
Kaasun sisääntulolämpötila	$T_{12}$	TI2419
Kaasun lämpötila tulistimen jälkeen	$T_{13}$	-
Kaasun lämpötila höyrystimen jälkeen	$T_{14}$	-
Kaasun poistumislämpötila	$T_{15}$	TI24224

Taulukossa kaasun massavirran kohdalla lukee laskenta, sillä kaasun massavirta lasketaan kuvassa kymmenen ennen regeneraattoria näkyvien usean ilman massavirran sekä kuvan kaasun koostumusmittausten perusteella FCC:n yksikön mallissa.

## 5.2 Taseyhtälöt

Kuvien yhdeksän ja kymmenen avulla prosessista taseyhtälöitä muodostetaan 14 kappaletta, joilla kuvataan prosessin aine- ja energiataseet. Taseyhtälöt pyritään

muodostamaan siten, että niissä käytetään mahdollisimman paljon mitattuja muuttujia, jotta täsmäys on tarkempaa. Kuvien yhdeksän ja kymmenen mukaisesti massojen säilyvyyden perusteella mittaamattomista massavirroista  $\dot{m}_2$  voidaan olettaa suoraan  $\dot{m}_1$ :ksi,  $\dot{m}_5$  voidaan olettaa  $\dot{m}_4$ :ksi ja  $\dot{m}_9$   $\dot{m}_8$ :ksi. Näin osa mittaamattomista massavirroista voidaan jättää pois taseyhtälöistä. Taseyhtälöihin tarvitaan mukaan mittaamattomat virrat  $\dot{m}_6$  ja  $\dot{m}_8$ , sekä entalpiat  $h_5$ ,  $h_8$  ja kaasun lämpötilat  $T_{13}$  ja  $T_{14}$ . Kattilan taseista jätetään pois vuotoilma, nuohoushöyry, sekä pursoilma verraten kuvaan kaksi. Kattilan runko on kokonaan hitsattu, jolloin vuotoilman määrä on vähäinen. Nuohousta ei tapahdu säännöllisesti, ja nuohous ei ollut käynnissä tasehetkien aikana, joten se jätetään pois. Pursoilman määrä on myös pieni, joten myös se jätetään pois.

Tässä osiossa viitataan pelkästään taseyhtälöihin, jotka numeroidaan kursiiveilla numeroin *1-14*. Näitä taseyhtälöiden numeroita ei pidä sekoittaa työssä muuten käytettäviin yhtälönumeroihin, vaan näillä kursivoiduilla numeroilla viitataan vain alla oleviin taseyhtälöihin.

Taseyhtälöt *1-6* ovat jätelämpökattilasta muodostettuja massataseita. Taseyhtälö *1* on koko kattilan taserajat ylittävä mitattujen vesi-/höyryvirtojen muodostama massatase

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_3 + \dot{m}_7 + \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} = 0 \quad (1)$$

Taseyhtälöt *2* ja *3* ovat kattilan höyrytaseita, joilla on tarkoitus antaa estimaatit mittaamattomille massavirroille  $\dot{m}_6$  ja  $\dot{m}_8$ :

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_7 + \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} = 0 \quad (3)$$

Taseyhtälöt *4,5* ja *6* ovat massataseita, joissa käytetään hyödyksi saman virtauksen useampaa mittausta täsmäyksen tarkentamiseksi

$$\dot{m}_7 - \dot{m}_{15} = 0 \quad (4)$$

$$\dot{m}_4 - \dot{m}_{13} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{m}_4 - \dot{m}_{14} = 0 \quad (6)$$

Taseyhtälöt 7, 8, 9 ovat tulistimen, höyrystimen ja ekonomaiserin energiataseita. Niissä esiintyvät ominaislämpökapasiteetit oletetaan vakioiksi, mutta ominaislämpökapasiteetit iteroidaan mallissa vastaamaan kunkin lämmönsiirtimen lämpötilaeron keskiarvoa:

$$\dot{m}_{12}c_{p,t}(T_{12} - T_{13}) - \dot{m}_8(h_9 - h_8) - \Phi_t = 0 \quad (7)$$

$$\dot{m}_{12}c_{p,h}(T_{13} - T_{14}) - \dot{m}_4(h_5 - h_4) - \Phi_h = 0 \quad (8)$$

$$\dot{m}_{12}c_{p,e}(T_{14} - T_{15}) - \dot{m}_1(h_2 - h_1) - \Phi_e = 0 \quad (9)$$

missä  $\Phi_i$  = kattilan osion lämpöhäviö [W]

Taseyhtälö 10 on koko kattilan energiatase:

$$\begin{aligned} \dot{m}_1h_1 - \dot{m}_3h_3 + \dot{m}_7h_7 + \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_{12}c_{p,kat}(T_{12} - T_{15}) \\ - \Phi_{kat} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Taseyhtälö 11 on lieriön energiatase:

$$\dot{m}_1h_2 - \dot{m}_3h_3 - \dot{m}_6h_6 + \dot{m}_4(h_5 - h_4) = 0 \quad (11)$$

Taseyhtälöllä 12 höyryn ulostulon entalpia lasketaan höyrystymisasteen avulla, joka on tasapainotilanteessa höyrystimen tuottaman höyryn ja kiertoveden suhde. Yhtälöllä 13 määritetään tulistimen sisäänmenevän höyryn entalpia kylläisten höyryjen massojen suhteen avulla:

$$h_5 - \left(1 - \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_4}\right) * h_4 - \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_4} * h_6 = 0 \quad (12)$$

$$h_8 - \left(1 - \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_6 + \dot{m}_7}\right) * h_6 - \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_6 + \dot{m}_7} * h_7 = 0 \quad (13)$$

Taseyhtälöllä 14 annetaan täsmäymallille arvio kylläisten tilojen välisestä entalpiaerosta. Lieriössä olevan kylläisen höyryn ja veden entalpian erotus on kyseisen

paineen ja lämpötilan höyrystymisentalpia. Tällä tavoin malli täsmää lieriötä hieman tarkemmin.

$$h_6 - h_4 - h_{höyr.entalpia} = 0 \quad (14)$$

missä  $h_{höyr.entalpia}$  = höyrystymisentalpia [kJ/kg]

### 5.3 Karkeiden virheiden poisto

Tässä osiossa käydään läpi mittausdatalle tehtäviä muutoksia, jotka tehdään ennen kuin suoritetaan tasetäsmäys. Karkeiden virheiden poistolla tarkoitetaan mittausdatan käsittelyä siten, että sieltä poistetaan systemaattiset virheet, jotka vääristävät mittaustuloksia.

#### 5.3.1 Virtausmittauksen tiheyskorjaus

Työssä käytettävä mittausdata kerätään erillisestä historiatietokannasta, johon tiedot luetaan automaatiojärjestelmästä. Automaatiojärjestelmän näyttämä massavirta käyttää tiheytenä joko suunnittelutiheyttä tai itse järjestelmässä kompensoitua tiheyttä. Näistä kumpikaan ei täysin vastaa todellista prosessiolosuhdetta, joten täsmäystä varten mittaustulokset korjataan vastaamaan todellista tilaa. Paine-eroon perusteella mitattavalle massavirralle tehdään ensin virityskorjaus ennen kuin se tiheyskorjataan. Virityskorjaus tehdään Nesteen sisäisin metodein, eikä sitä käydä tässä läpi enempää. Virityskorjauksen jälkeen massavirran todellinen arvo paine-eroon perustuvalla mittauksella saadaan yhtälöllä (44):

$$\dot{m}_{tod} = \dot{m}_{aut} * \sqrt{\frac{\rho_{tod}}{\rho_{aut}}} \quad (44)$$

missä  $\dot{m}_{tod}$  = todellinen massavirta [kg/s]

$\dot{m}_{aut}$  = automaatiojärjestelmän näyttämä massavirta [kg/s]

$\rho_{tod}$  = prosessin olosuhteita vastaava tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{aut}$  = automaatiojärjestelmän käyttämä tiheys, suunnittelutiheys [kg/m<sup>3</sup>]

Esimerkiksi kiertoveden virtausmittaus FIZ24182A näyttää automaatiojärjestelmässä 61,18 kg/s ja suunnittelutiheytenä on käytetty 855,4 kg/m<sup>3</sup>. Sen hetkisen prosessiolosuhteen mukainen tiheys on kuitenkin 858,49 kg/m<sup>3</sup>, jolloin suoritetaan yhtälön (44) mukainen korjaus:

$$\dot{m}_{tod} = 61,18 \text{ kg/s} * \sqrt{\frac{858,49 \text{ kg/m}^3}{855,4 \text{ kg/m}^3}} = 61,29 \text{ kg/s} \quad (44)$$

Vortex-mittauksen korjaus tehdään muuten samoin, mutta tiheyksien suhdetta ei juurretta. Esimerkiksi syöttöveden automaatiojärjestelmän näyttämä arvo on 10,42 kg/s, ja suunnittelutiheys 955,36 kg/m<sup>3</sup> ja todellinen tiheys 939,08 kg/m<sup>3</sup>. Tällöin todelliseksi massavirraksi saadaan (45):

$$\dot{m}_{tod} = 10,42 \text{ kg/s} * \frac{939,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{955,36 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 10,24 \text{ kg/s} \quad (45)$$

Edellä mainitut lasketut virtaukset eivät olleet automaatiojärjestelmässä tiheyskompensoituja. Mikäli automaatiojärjestelmässä on tehty tiheyskompensointi kyseiselle mittaukselle, tiheyskompensointi lasketaan auki, jotta saadaan alkuperäinen, oikaisematon arvo virtaukselle. Sen jälkeen toteutetaan samanlainen korjaus kuin yllä. Tiheyskompensoinnilla tarkoitetaan automaatiojärjestelmässä tehtävää kompensatiota, jossa esimerkiksi samasta virrasta mitattavalla lämpötilan avulla lasketaan virtaukselle kompensatiokerroin, jonka avulla virtausta korjataan lähemmäs todellista tiheyttä vastaavaa arvoa.

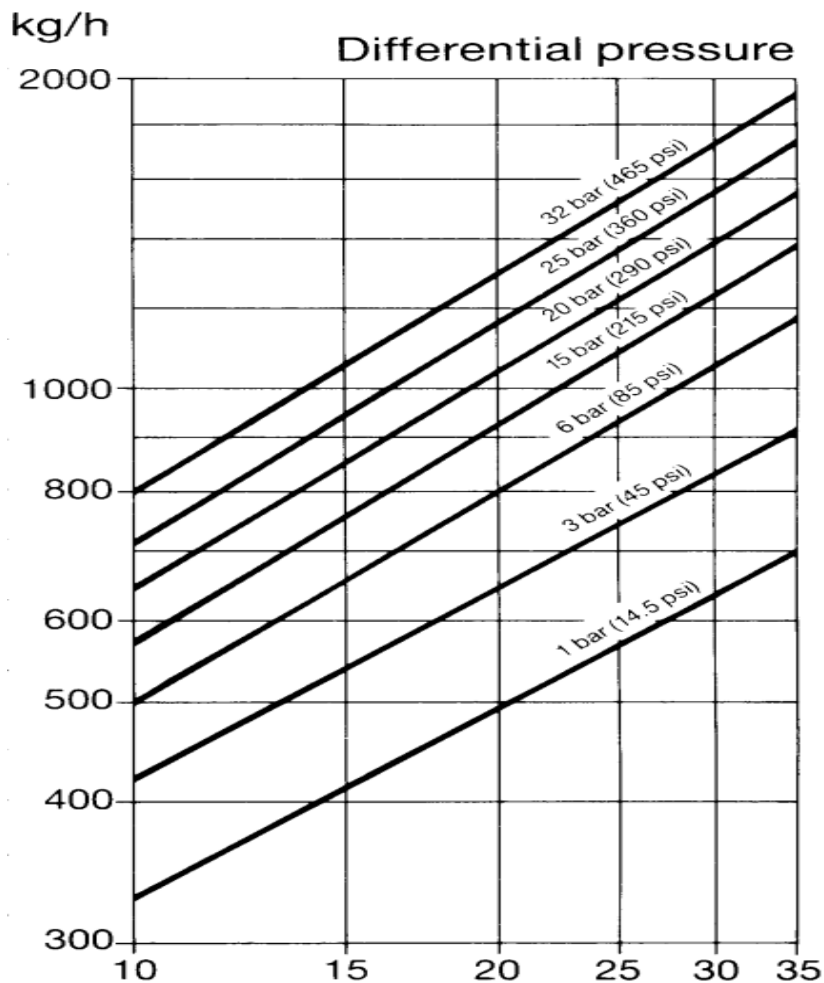
### 5.3.2 Termisten massavirtausmittausten käyttö

Jätelämpökattilan massavirralla on neljä termistä massavirtamittausta välittömästi kattilan jälkeisessä piipussa. Näitä mittauksia päätettiin jättää käyttämättä täsmäyksessä, sillä neljästä mittauksesta kaksi oli epäkunnossa työn aikana. Mittaukset sijaitsevat neljässä eri kohdassa kanavaa 90 asteen kulmassa toisiinsa sekä kohtisuoraan virtaukseen nähden. Mittauksia oli neljä sen vuoksi, että kaasu tulee mittaukseen mutkan jälkeen,

jolloin virtausprofiili ei ole tasainen, jolloin mittausten tulosten keskiarvolla saadaan paras arvio massavirtauksesta. Kahden mittauksen ollessa epäkunnossa tulosten keskiarvo oli keskimäärin noin 20 t/h suurempi, kuin laskennan perusteella saatu massavirta. Pelkästään kahden toimivan mittauksen välinen ero oli noin 30 t/h. Virtausmittausten toimittajan datalehden perusteella neljän mittauksen keskiarvon epävarmuus oli pahimmillaan yli kolmen prosentin luokkaa, ja tämä lukema vaatii, että kaikki neljä mittausta toimisivat. Tässä tilanteessa arvioitiin, että näillä perusteilla saatu massavirran arvo kaasulle ei ollut kovin luotettava.

### 5.3.3 Ulospuhalluksen arviointi

Lieriön jatkuvassa ulospuhalluksessa ei ollut mittausta, joten sen määrä täytyi arvioida muuten. Ulospuhalluksen venttiili on täysin auki, joten kun asentotieto on tiedossa, voidaan venttiilityypin valmistajan antamien tietojen perusteella arvioida ulospuhalluksen määrä. Valmistaja antoi venttiilille ominaisen kuvaajan, josta nähdään venttiilin avauman, ja paine-eron perusteella ulospuhalluksen määrä. Paine-eron arvioitiin olevan noin 10 bar:ia. Valmistajan kuvaajassa ei kuitenkaan ollut tietoja venttiilin avaumalle kuin 35 prosenttiin asti, joten apuna arviointiin käytettiin Dagra-soviteohjelmaa, jonka avulla kuvaajasta ekstrapoloitiin suoran yhtälön avulla tarvittavat arvot avaumalle sata prosenttia auki. Kuvassa 11 valmistajan antama kuvaaja.



Kuva 11: Ulospuhallusventtiilin toiminta-arvot. X- akselilla venttiilin avauma ja y- akselilla virtaus venttiilin läpi.

Yllä mainituilla arvoilla ulospuhalluksen tulokseksi saatiin 0,719 kg/s (2,59 t/h).

#### 5.3.4 Kaasun sisääntulon lämpötilamittauksen korjaus

Työtä tehdessä huomattiin, että mittaustulosten perusteella kattilan kaasuvirrasta puuttuu lämpötehoa. Suurin vaikuttava tekijä on, että kattilan kaasun sisääntulolämpötilamittaus on sijoitettu siten, että se on kaasuvirtaa reilusti kylmempien (lämpötila ero noin 300 °C) tulistinputkien alapuolella noin metrin etäisyydellä. Lämpötilamitta-anturi näkee nämä kylmät pinnat, jolloin anturin pintaan syntyy säteilylämpöhäviötä. Tämän häviön vuoksi mitattu lämpötila voi olla tässä tapauksessa jopa kymmeniä asteita matalampi kuin sisääntulon todellinen lämpötila.

Säteilylämpöhäviön vaikutusta arvioitiin kahdella tavalla. Ensimmäisessä tavassa muodostetaan konvektio-säteily-energiatase mitta-anturille yhtälöllä (46), jossa oletetaan kaasusta mitta-anturiin konvektiolla siirtyvän lämmön olevan yhtä suuri mitta-anturin ja ympäröivien seinämien säteilyvuorovaikutuksen kanssa (Roberts et al. 2011, 2266):

$$hA(T_g - T_p) = \sigma A \varepsilon F (T_p^4 - T_w^4) \quad (46)$$

missä  $\sigma$  = Stefanin-Bolzmännin vakio [ $\text{W/m}^2\text{K}^4$ ]

$\varepsilon$  = pinnan emissiviteetti [-]

$F$  = näkyvyyskerroin kylmään seinämään [-]

$g$  = kaasu

$p$  = anturi (probe)

$w$  = kylmä seinämä

Yhtälön (46) avulla voidaan laskea kaasun lämpötila (47):

$$T_g = T_p + \frac{\sigma \varepsilon F (T_p^4 - T_w^4)}{h} \quad (47)$$

Yhtälöllä (47) voidaan arvioida säteilyhäviön maksimivirhettä sijoittamalla yhtälöön näkyvyyskerroimen ja pinnan emissiviteetin arvoiksi yksi. Kylmän seinämän lämpötilaksi arvioitiin FRNC5-mallin laskelmien perusteella n. 420. °C. Konvektiolämmönsiirtokerroimen arvona käytettiin 88,53  $\text{W/m}^2\text{°C}$ . Kyseisellä hetkellä anturin lukema näytti 637,34 °C, jolloin yhtälön (47) avulla voidaan laskea:

$$T_g = 637,34^\circ\text{C} + \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{°C}^4 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (637,34^\circ\text{C}^4 - 420^\circ\text{C}^4)}{88,53 \text{W/m}^2\text{°C}} = 723,09^\circ\text{C}$$

Kaasun sisääntulolämpötilan arviointi on tällä tavoin kuitenkin haasteellista, sillä pintojen emissiviteeteille löytyy useita eri arvoja, ja arvoille on annettu yleensä vaihteluväli, joka voi olla suuri. Tällöin emissiviteetin arvioinnista syntyvä virhe voi vaikuttaa paljon kaasun sisääntulolämpötilan laskemiseen.

Säteilylämpötilan vaikutusta sisäänmenon lämpötilalle arvioitiin myös toisella tavalla, laskemalla kaasukanavan lämpöhäviöt edeltävästä kanavan lämpötilamittauksesta kattilan sisäänmenoon asti. Käytettävissä on kattilasta tarkat materiaali- ja rakennetiedot, joiden avulla lämpöhäviöistä saadaan kohtuullisen tarkka arvio. Lisäksi käytettävät kanavan edeltävät lämpötilamittaukset sijaitsevat paikoissa, joissa ne eivät näe kylmiä pintoja, jolloin lämpötilamittaukset voidaan olettaa kohtuullisen tarkkoiksi. Kappaleessa neljä määritetyn yhtälön (42) perusteella määritettiin kanavan seinämän lämpövästus. Lisäksi tässä laskussa virtaavan kaasun aineominaisuudet keskiarvoistettiin laskennan matkalta vakioiksi, sillä lämpötila ja paine muuttuvat kohtuullisen vähän. Kaasun aineominaisuudet laskettiin Petro-SIM- ohjelman avulla. Laskennassa käytettävien konvektiolämmönsiirtokerrointen laskemista varten tarvitaan Reynoldsin, Prandtin ja Nusseltin luvut. Kanava on pyöreä koko matkalta, jolloin luvut voitiin laskea tässä tapauksessa seuraavilla yhtälöillä (48):

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (48)$$

missä  $Re_D$  = Reynoldsin luku putkivirtauksessa [-]

$D$  = putken halkaisija

$\mu$  = viskositeetti [Pa\*s]

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (49)$$

$\lambda$  = kaasun lämmönjohtuvuus [W/m°C]

$$Nu = 0,023 \cdot Re_D^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \quad (50)$$

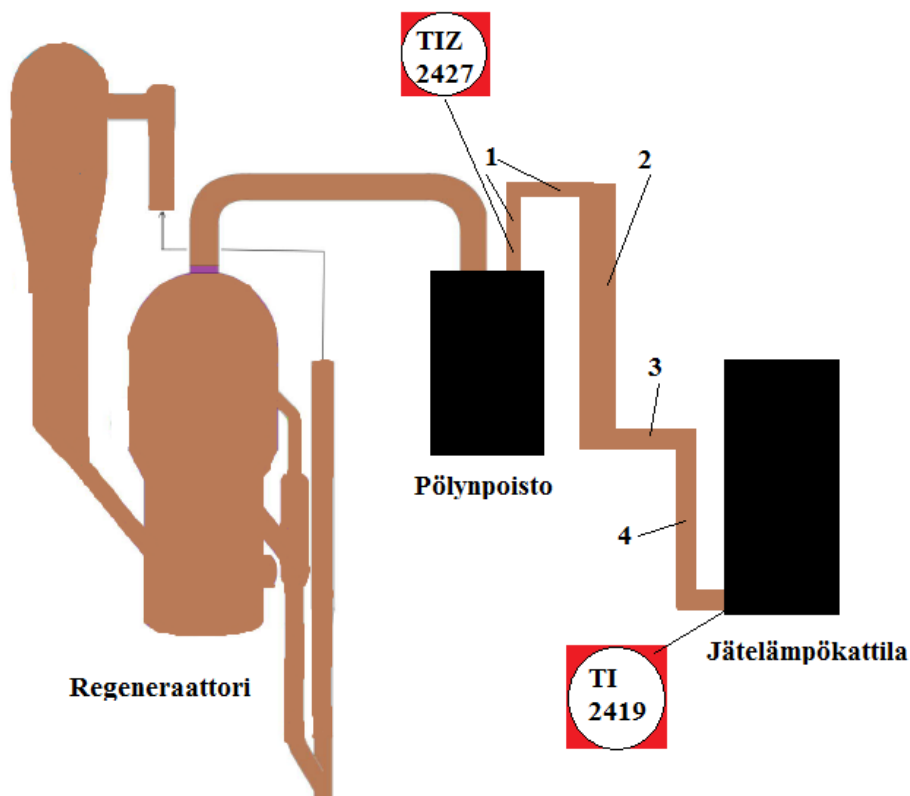
Lopulta konvektiolämmönsiirtokerroin  $h$  voidaan laskea yhtälöllä (51)

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (51)$$

Yhden osuuden lämpöhäviö voidaan laskea yhtälöllä (52):

$$T_{out} = T_{in} - \frac{Q}{R_{tot}} \quad (52)$$

Yhtälöstä saatua lämpötilaa käytetään aina seuraavan osuuden sisääntulolämpötilana. Tämä toistettiin jokaiselle osuudelle. Alla olevassa taulukossa kaksi löytyy taulukoituna tulokset lämpöhäviölaskennasta. Jälkimmäisen laskentatavan todettiin olevan riittävänä tarkka ja tuloksena saatavaa lämpötilaa (korostettu punaisella) käytetään täsmäyksessä kaasun sisäänmenolämpötilana. Lämpöhäviölaskenta ei ole täysin tarkka, ja siinä on tehty geometrian osalta yksinkertaistuksia, sekä yhden osion lämpöhäviöt lasketaan kyseiseen osioon tulevan lämpötilan perusteella. Nämä yksinkertaistukset vaikuttavat lopputulokseen lämpöhäviötä kasvattamalla. Lämpöhäviöiden laskennan alkulämpötila on katsottu anturin TIZ2427 perusteella, jossa lukema tasehetkellä oli 703,69 °C. Ulkoilman lämpötila oli -3,71 °C. Kuvassa 12 kuvataan lämpötilamittausten sijaintia ja laskujen kohteena olevaa putkistoa.



Kuva 12: Lämpöhäviölaskennan osiot numeroituna. Ylimenoputki on 1, paineentasauskammio 2, kattilakanava 1 on 3 ja kattilakanava 2 on 4. Myös laskennan lämpötila-anturit mukana.

Kattilan lämpöhäviöt laskettiin vastaavilla korrelaatioilla, kuin pyöreälle putkelle, sillä turbulenttisella virtauksella neliskanttiselle kanavalle voidaan käyttää pyöreän kanavan korrelaatioita. (Incropera et al. 2011, 552). Pinta-alana käytettiin kattilan seinämäpinta-alaa, ja halkaisijana hydraulista halkaisijaa.

Taulukko 2: Lämpöhäviölaskennassa käytetyt arvot ja tulokset. Merkintä E-00 tarkoittaa kymmenpotenssia.

	Yksikkö	Ylimeno-putki	Paineen tasauskammio	Kattilakanava 1	Kattilakanava 2
Putken sisähalkaisija	m	1,44	2,30	1,33	1,41
Sisähalkaisija + vuoraus	m	1,64	2,50	1,32	1,40
Ulkohalkaisija	m	1,68	2,54	1,83	1,91
Putken pituus	m	15,16	17,04	9,47	12,41
Putken teräspaksuus	m	0,02	0,02	0,01	0,01
Eristeen/vuorauksen paksuus	m	0,10	0,10	0,25	0,25
Teräksen lämmönjohtavuus	W/m°C	40,00	35,00	25,00	25,00
Eristeen/vuorauksen lämmönjohtavuus	W/m°C	0,80	0,80	0,16	0,16
Ominaislämpökapasiteetti	J/kgK	1233,00	1233,00	1233,00	1233,00
Viskositeetti	Pas	4,16E-05	4,16E-05	4,16E-05	4,16E-05
Massavirta	kg/s	52,70	52,70	52,70	52,70
Kaasun lämmönjohtavuus	W/m°C	0,07	0,07	0,07	0,07
Tiheys	kg/m <sup>3</sup>	0,38	0,38	0,38	0,38
Reynolds	-	1,12E+06	7,01E+05	1,21E+06	1,14E+06
Prandl	-	0,78	0,78	0,78	0,78
Nusselt	-	1477,88	1013,87	1569,49	1496,96
Konvektiolämmönsiirtokerroin	W/m <sup>2</sup> °C	67,72	29,01	77,53	69,70
Rsisä	°C/W	2,16E-04	2,80E-04	3,26E-04	2,60E-04
Reriste/vuoraus	°C/W	1,71E-03	9,73E-04	3,35E-02	2,43E-02
Rteräs	°C/W	6,34E-06	4,24E-06	2,22E-04	1,61E-04
Rulko	°C/W	5,01E-04	2,94E-04	7,34E-04	5,36E-04
Ryht	°C/W	2,43E-03	1,55E-03	3,48E-02	2,52E-02
Lämpötilaero sisääntulossa ulkoilmaan nähden	°C	711,84	707,34	700,32	700,01
Lämpöhäviö	MW	0,29	0,46	0,02	0,03
Kumulatiivinen lämpöhäviö	MW	0,29	0,75	0,77	0,80
Lämpötila osuuden päässä	°C	703,63	696,61	696,30	695,88

Laskennan perusteella saatava lämpötila on 695,88 °C. Vastaavassa kohdassa sijaitsevan anturin TI2419 lukema oli vastaavalla tasehetkellä 641,79 °C. Voidaan arvioida, että kyseessä on karkea virhe, jonka sisältyessä täsmäykseen täsmäys olisi todennäköisesti tuottanut huomattavan virheellisiä tuloksia.

Kyseisen tasehetken arvoilla kattilan lämpöhäviöiksi saatiin käytetyllä laskentatavalla 78 kW. Tulos vaikuttaa pieneltä lukemalta, mutta huomioitavaa on kattilan eristepaksuus, sekä kattilan pieni koko. Käytetyssä laskennassa on huomioitu vain yksiulotteinen johtuminen kattilan sisältä ulkoilmaan, eikä esimerkiksi kylmäsiltoja ole otettu huomioon, joten tarkemmalla laskennalla saatettaisiin saada suurempia tuloksia. Toisaalta lämpöhäviöt koko kattilan matkalta ovat laskettu kattilan sisääntulon lämpötilassa, joka vääristää lämpöhäviöitä ylöspäin, sillä kattilan kaasun lämpötilaprofiili muuttuu suuresti kattilan matkalla. Taseyhtälöihin lämpöhäviöt jaettiin prosentteina kyseisen lämmönsiirtimen korkeuden suhteessa koko kattilan korkeuteen.

## 5.4 Epävarmuuslaskenta

Tässä osiossa käydään läpi jokaisesta mittaustyyppistä yksi esimerkkilasku ja loppujen mittausten tulokset näytetään taulukossa kolme. Laskennassa lämpötilojen laajennetuille epävarmuuksille käytetään yhtälöitä (33) ja (34). Painemittauksille käytetään valmistajan ilmoittamaa referenssitarkkuutta. Virtausmittauksille absoluuttisen virheen laskemiseen käytetään arvoa riippuen mittaustavasta, paine-eroon perustuvilla käytetään kolme prosenttia mittausalueen maksimista ja vortex-mittaukselle 0,65 prosenttia.

Syöttöveden lämpötila mittauksen TC2421 mukaan oli tasehetkellä 145,011 °C. Syöttöveden lämpötilamittaus koostuu pt-100- mitta-anturista sekä lähettimestä. Pt-100 anturi on IEC 751 – standardin tarkkuusluokan A anturi, jolloin sille voidaan laskea kyseisen standardin mukainen toleranssin laajennettu epävarmuus yhtälöllä (53):

$$U_{e,TC2421} = 0,15 + 0,002 * 145,011 \text{ °C} = \pm 0,44\text{°C} \quad (53)$$

Lieriön painemittaukselle käytetään valmistajan antamaa referenssitarkkuutta, joka on  $\pm 0,2$  prosenttia mittausalueesta. Kyseisellä mittauksella PC24114 maksimi on 4000 kPa.

Valmistaja ilmoittaa kattavuuskertoimeksi kolme, jolloin standardiepävarmuus voidaan laskea:

$$U_{e,PC24114} = 0,002 * 4000kPa = \pm 8 \text{ kPa} \quad (54)$$

Kiertoveden virtausmittauksen mittausalue on 83,33 kg/s ja epävarmuuden laskemiseen käytetään arvoa kolme prosenttia mittausalueen maksimista, joka on 2,5 kg/s. Tällöin kiertoveden mittaukselle FIZ24182A mittausarvo voidaan esittää muodossa 67,457 kg/s  $\pm 2,5$  kg/s

#### 5.4.1 Entalpien epävarmuus

Entalpien epävarmuus tietyssä kohdassa prosessia voidaan laskea $\pm$  kyseisen kohdan lämpötilan ja/tai paineen mittauksen avulla. Lisäksi huomioon otetaan vielä IAPWS:n määrittämät entalpien epävarmuudet. Esimerkiksi tulistetun höyryn entalpia tulistimen jälkeen voidaan laskea seuraavasti. Lämpötilamittaus TI2437 on Pt-100 anturi, ja mittaustulos on 397,82 °C. jolloin sen standardiepävarmuus voidaan laskea samoin, kuin yhtälössä (33). Standardiepävarmuudeksi saadaan  $\pm 0,546$  °C. Sitä vastaava entalpien muutos on  $\pm 2,048$  kJ/kg. Paineen mittauksen PC24113 mittaustulos on 1701,1 kPa (abs), ja mittausalue sama kuin lieriössä, joten epävarmuus lasketaan samoin kuin lieriön paineen mittauksen. Sen standardiepävarmuus on  $\pm 2,67$  kPa ja vastaava entalpien muutos on  $\pm 0,127$  kJ/kg. Ja kun tiedetään, millä lämpötila- ja painealueella liikutaan (670,97K, 1,7 MPa), voidaan lukea kuvan kolme perusteella absoluuttisen epävarmuuden arvo entalpialle kyseisessä pisteessä, joka on 2 kJ/kg. Saadut arvot sijoitetaan kappaleessa 3.3 yhtälöön (35), ja laajennetuksi epävarmuudeksi tulistetulle höyrylle saadaan:

$$U_{e,h_g} = \pm \sqrt{(2,048 \text{ kJ/kg})^2 + \left(0,127 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)^2 + \left(2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)^2} = \pm 2,865 \text{ kJ/kg}$$

Alla olevassa taulukoissa kolme ja neljä on epävarmuuslaskujen tulokset.

Taulukko 3: Kaikkien täsmäyksessä käytettävien mittausten epävarmuus

Virtaus	Positionumero	Yksikkö	Mittausarvo	Epävarmuus absoluuttinen arvo	Suhteellinen arvo mittaustuloksesta [%]
Syöttövesi	TC2421	°C	145,01	0,44	0,30
Lisähöyry	TI24138	°C	204,54	0,56	0,27
Tulistettu höyry	TI2437	°C	397,82	0,95	0,24
Lauhde	TI24135	°C	87,95	0,33	0,37
Tulistettu höyry verkkoon	TC2441	°C	369,18	0,89	0,24
Kaasun sisääntulo	TI2419	°C	641,80	2,57	0,40
Kaasun ulostulo	TIA24224	°C	257,88	0,67	0,26
Lieriö	PC24114	kPa	1733,91	8,00	0,46
Tulistettu höyry	PC24113	kPa	1701,11	8,00	0,47
Syöttövesi	FC24181	kg/s	10,24	0,09	0,88
Kiertovesi A	FIZ24182A	kg/s	61,29	2,50	4,08
Kiertovesi B	FIZ24182B	kg/s	61,03	2,50	4,10
Kiertovesi C	FIZ24182C	kg/s	60,95	2,50	4,10
Lisähöyry vortex	FI2483	kg/s	2,40	0,07	3,01
Lisähöyry dp	FI24183	kg/s	2,11	0,21	9,87
Lauhde	FI24184	kg/s	0,26	0,00	1,74
Tulistettu höyry verkkoon	FI24185	kg/s	12,07	0,58	4,83

Taulukko 4: Entalpioiden epävarmuudet.

Virtaus	Yksikkö	Lämpötilan muutos	Paineen muutos	IAPWS:n epävarmuus	Yhteensä, absoluuttinen arvo
Syöttövesi	kJ/kg	1,89	0,00	0,20	1,90
Lieriön kylläinen vesi	kJ/kg	0,00	1,02	2,00	2,25
Lieriön kylläinen höyry	kJ/kg	0,00	0,12	2,00	2,00
Lisähöyry	kJ/kg	2,54	0,00	2,00	3,23
Tulistettu höyry	kJ/kg	2,05	0,13	2,00	2,87
Lauhde	kJ/kg	1,37	0,00	0,20	1,38
Tulistettu höyry verkkoon	kJ/kg	1,93	0,15	2,00	2,79

Kovarianssimatriisi muodostetaan korottamalla massavirtojen ja entalpioiden absoluuttiset epävarmuudet toiseen potenssiin, ja muodostamalla niistä diagonaalimatriisi

vastaamaan mitattujen muuttujien vektoria. 5.3.2019 tasehetken kovarianssi matriisi on liitteessä yksi.

## 5.5 Ominaislämpökapasiteetin laskenta

Ominaislämpökapasiteetin laskentaan tietyssä lämpötilassa Matlab-mallissa käytettiin NIST:n (National institute of standards and technology) antamia kertoimia. Kaasun koostumus saadaan kattilan kaasuanalysointorien pitoisuustulosten perusteella. Kertoimien avulla molaarinen ominaislämpökapasiteetti yhdelle aineelle voidaan laskea yhtälöllä (56) (NIST,2019):

$$c_{p,i} = A_i + B_i * T + C_i * T^2 + D_i * T^3 + \frac{E_i}{T^2} \quad (56)$$

missä  $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i$  = aineelle ominaiset kertoimet [-]

$$T = \text{lämpötila}/1000 \text{ [K]}$$

Kertoimet syötettiin mallille, jolloin mallin laskemien lämpötilojen avulla voidaan iteroida ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona. Näin ei tarvinnut tehdä mallille suoran sovitteita, tai arvioita. Huomioitavaa on, että yhtälö (56) antaa ominaislämpökapasiteetin yksikkönä J/molK. Muutos yksikköön J/kgK voidaan tehdä jakamalla yhtälön (56) tulos vastaavan aineen moolimassalla. Lopullinen ominaislämpökapasiteetti jätelämpökattilan kaasulle saatiin yhtälöllä (57):

$$c_{p,sk} = \frac{c_{p,1}}{M_1} * \left(\frac{w_{i1}}{w_{sk}}\right) + \dots + \frac{c_{p,i}}{M_i} * \left(\frac{w_i}{w_{sk}}\right) \quad (57)$$

missä  $M_i$  = kaasukomponentin moolimassa [g/mol]

$$\frac{w_i}{w_{sk}} = \text{kaasukomponentin massaosuus savukaasusta [-]}$$

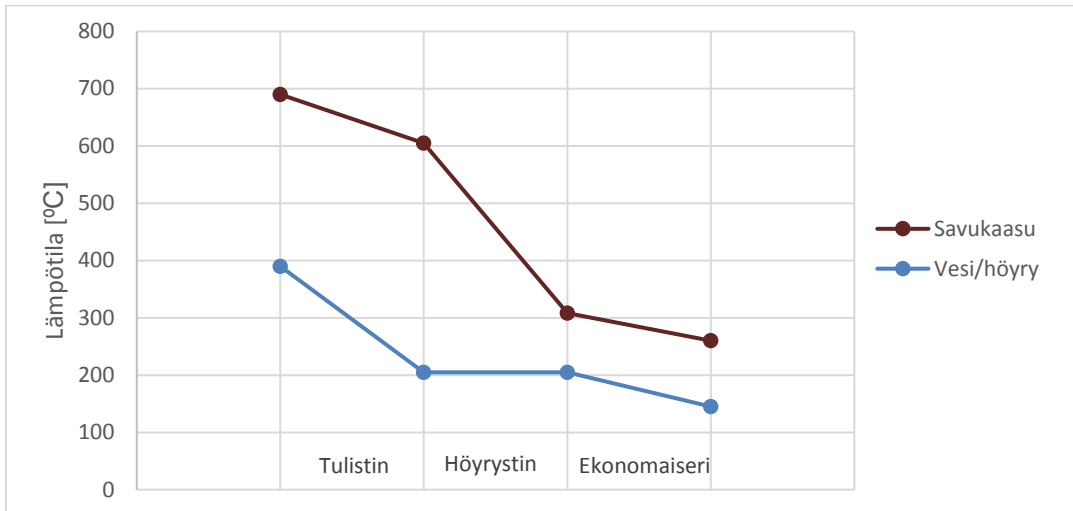
## 5.6 Energiataseen täsmäys Matlab-ohjelmalla

Jätelämpökattilan energiataase täsmätään Matlab:lla hyödyntäen kappaleen kaksi matemaattista ratkaisua sekä yllä kirjoitettuja rajoiteyhtälöitä. Täsmäyksessä käytetään

apuna myös kappaleen kolme avulla muodostettuja epävarmuuksia kovarianssimatriisiin määrittämiseen. Kappaleessa kaksi esiteltyä matriisit  $A_x$ ,  $A_u$  ja kovarianssimatriisi  $\Psi$  ovat liitteessä yksi. QR- hajotelmaa ei soveltavassa osassa käydä läpi enempää, sillä Matlab-ohjelmasta löytyy hajotelmaa varten sisäänrakennettu komento. Koodilla iteraatiota tehtiin niin kauan, kunnes uusien alkuarvojen ja täsmättyjen arvojen erotus on miljoonasosa ( $10^{-6}$ ).

Matlab-mallia varten tehtiin oletuksia mallin yksinkertaistamiseksi. Kaasun koostumus on vakio, ja ainoastaan sen määrää ja lämpötiloja täsmätään. Tasehetken vallitsevat paineet oletetaan vakioiksi, sillä paineen muutos muuttaa entalpiaa paljon vähemmän, jolloin oletetaan, että entalpien muutos eri kohdissa on lämpötilan muutosta. Työssä käytetään IFC1967- sovitukseen perustuvia ASME:n höyrytaulukoita pohjanaan käytettäviä funktioita. Tähän ratkaisuun päädyttiin, sillä myös työssä käytettävät mallinnusohjelmat FRNC5- ja Petro-SIM käyttävät näitä taulukoita.

Lieriössä on yksi painemittaus, eikä yhtään lämpötilan mittausta. Lisäksi lieriöön tulevissa virroissa, ja sieltä lähtevissä virroissa ei ole lämpötilan mittausta, jolloin täytyy olettaa, että kaikki nämä virrat ovat kylläisessä tilassa lieriön paineen perusteella. Tällöin ekonomaiserin, ulospuhalluksen sekä kiertoveden entalpiat oletetaan samoiksi. Lieriöstä lähtevän höyryn entalpia oletetaan lieriön paineessa olevan kylläisen höyryn entalpiaksi. Ekonomaiserin ulostulon oletaminen tässä tapauksessa kylläiseksi vedeksi on kohtuullisen lähellä todellista tilannetta, sillä höyrystimen jälkeisen kaasun lämpötila ja ekonomaiserin ulostulolämpötilan erotus on useita kymmeniä asteita (approach temperature). Tällöin ekonomaiserissa vesi lämpiää lähelle, tai jopa höyrystymispisteeseensä. Kuvassa 13 on kuvattu tyypillinen lämpötilaprofiili työn kattilalle. Kattilan kaasun sisääntulolämpötila on matala, jolloin höyryn kehitys vähenee, ja kaasun lämpötila ekonomaiserin kohdalla on korkea verrattuna ekonomaiserin veden lämpötilaan. Lisäksi kattilan valmistajan dokumenteissa todetaan, että normaalissa käyttötilanteessa ekonomaiserin saattaa jopa höyrystää hieman syöttövedettä. Kun käytettävissä ei ole mittaustietoa, niin edellä mainittujen tietojen pohjalta tehdään oletus ekonomaiserin ulostulosta. (Neste Oyj 2001)



Kuva 13: BF2401:n tyypillinen lämpötilaprofiili.

Alla olevissa taulukoista nähdään täsmäykseen muodostettavat mitatut ja mittaamattomat muuttujat. Taulukosta viisi nähdään termeille Matlab:n matriiseihin annetut termit, jotta kappaleen kaksi mukaisen teorian seuraaminen on helpompaa. Taulukossa kuusi on mittausten tuloksia vastaavat entalpiat ja taulukossa seitsemän on mittaamattomien muuttujien alkuarvaukset. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty taulukon viisi mukaiset alkuarvot.

Taulukko 5: Taseyhtälöitä vastaavat mitattujen muuttujien alkuarvot

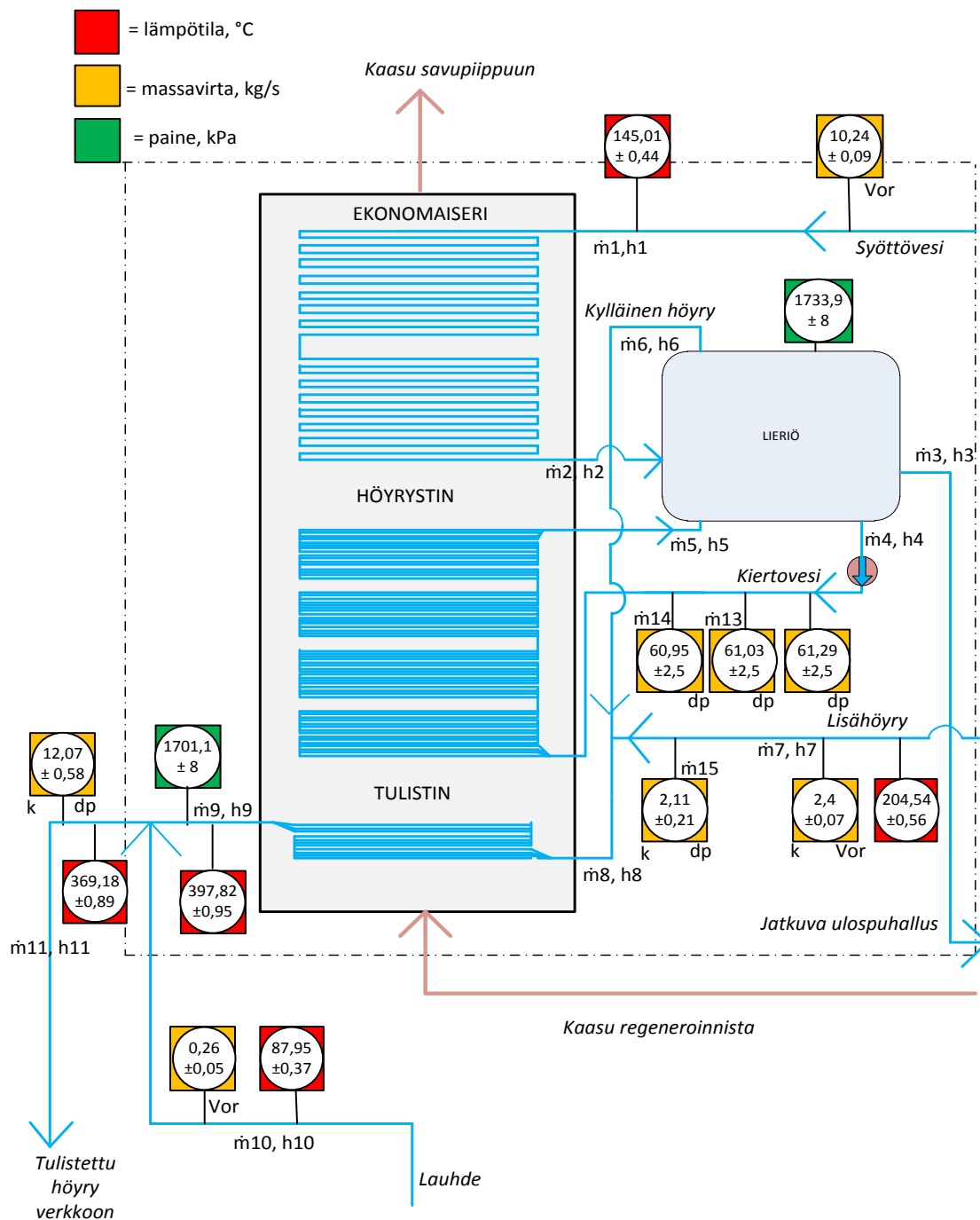
Virtaus			Yksikkö	Arvo
Syöttövesi	x1	m <sup>3</sup>	kg/s	10,24
Ulospuhallus	x2	m <sup>3</sup>	kg/s	0,72
Kiertovesi A	x3	m <sup>3</sup>	kg/s	61,29
Lisähöyry vortex	x4	m <sup>3</sup>	kg/s	2,40
Lauhde	x5	m <sup>3</sup>	kg/s	0,26
Tulistettu höyry verkkoon	x6	m <sup>3</sup>	kg/s	12,07
Kaasun massavirta	x7	m <sup>3</sup>	kg/s	52,70
Kiertovesi B	x8	m <sup>3</sup>	kg/s	61,03
Kiertovesi C	x9	m <sup>3</sup>	kg/s	60,95
Lisähöyry dp	x10	m <sup>3</sup>	kg/s	2,11
Syöttöveden lämpötila	x11	h1	°C	145,01
Lieriön paine (kylläinen vesi)	x12	h3	kPa	1733,91
Lieriön paine (kyll. Höyry)	x13	h6	kPa	1733,91
Lisähöyryn lämpötila	x14	h7	°C	204,54
Tulistetun höyryn lämpötila	x15	h9	°C	397,82
Lauhteen lämpötila	x16	h10	°C	87,95
Verkkoon menevän höyryn lämpötila	x17	h11	°C	369,18
Kaasun sisääntulolämpötila	x18	T12	°C	696,39
Kaasun ulosmenolämpötila	x19	T15	°C	257,88

Taulukko 6: Lämpötiloja ja paineita vastaavat entalpiat

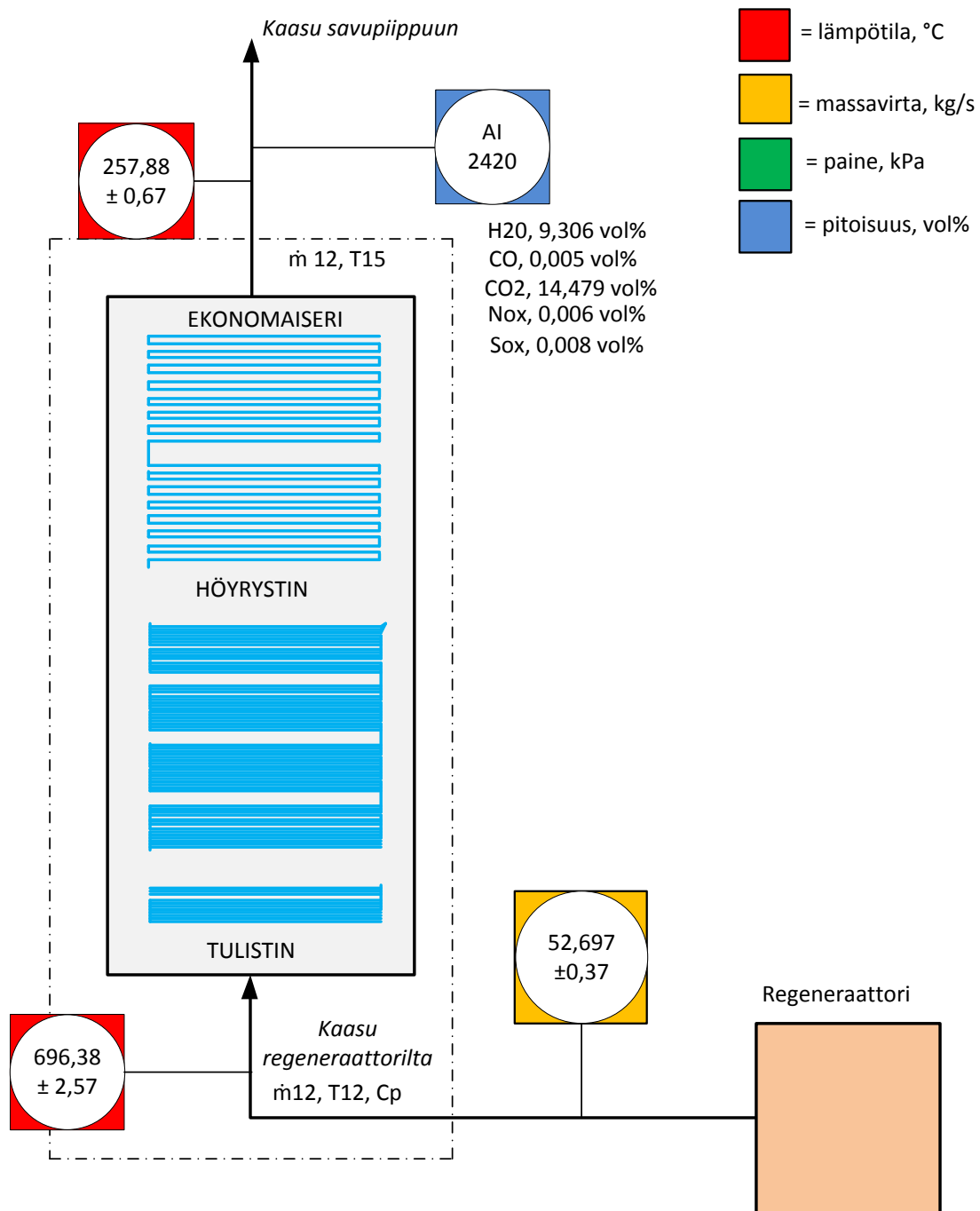
Virtaus			Yksikkö	Arvo
Syöttöveden lämpötila	x11	h1	kJ/kg	611,48
Lieriön paine (kylläinen vesi)	x12	h3	kJ/kg	876,22
Lieriön paine (kyll. höyry)	x13	h4	kJ/kg	2793,90
Lisähöyryn lämpötila	x14	h7	kJ/kg	2793,51
Tulistetun höyryn lämpötila	x15	h9	kJ/kg	3248,71
Lauhteen lämpötila	x16	h10	kJ/kg	369,59
Verkkoon menevän höyryn lämpötila	x17	h11	kJ/kg	3186,57

Taulukko 7: Mittaamattomien muuttujien alkuarvaukset

Virtaus			Yksikkö	Arvo
Kylläinen höyry lieriöstä	u1	m <sup>6</sup>	kg/s	9,52
Tulistimeen menevän höyry massavirta	u2	m <sup>8</sup>	kg/s	11,92
Höyrystetyn kiertoveden entalpia	u3	h <sup>5</sup>	kJ/kg	1144,69
Tulistimeen menevän höyryn entalpia	u4	h <sup>8</sup>	kJ/kg	2793,82
Kaasun lämpötila tulistimen jälkeen	u5	T13	°C	586,39
Kaasun lämpötila höyrystimen jälkeen	u6	T14	°C	307,88



Kuva 14: Tasepäivän 5.3.2019 mukaiset lähtöarvot ja absoluuttiset epävarmuudet vesi-höyry-piirissä.



Kuva 15: Jätelämpökattilan kaasupuolen lähtöarvot 5.3.2019 tasepäivänä

Edellä kuvissa 14 ja 15 sekä taulukoissa viisi, kuusi ja seitsemän käytetyt arvot ovat 5.3.2019 kello seitsemän ja kahdeksan väliseltä tunnin ajalta jokaisen minuutin ensimmäisen arvon keskiarvoja. Täsmäyksen tuloksena iteraatio muuttaa alkuarvoja siten, että kaikkien muodostettujen taseyhtälöiden tulos on nolla. Alla on taulukoituna taulukossa kahdeksan täsmätyt arvot, niiden erotus verrattuna lähtöarvoihin, sekä niiden

väläinen muutos prosentteina. Muutosprosentteissa vihreä väri tarkoittaa, että täsmäyksen seurauksena arvo on kasvanut lähtöarvosta, ja punainen väri, että arvo on laskenut.

Taulukko 8: Tasepäivän 5.3.2019 täsmäyksen tulokset.

Virtaus			Yksikkö	Lähtöarvot	Epävarmuuden neliö	Täsmätyt arvot	Erotus alkuarvoihin, yksikköä	Muutos % lähtöarvoon verrattuna
Syöttövesi	x1	m1	kg/s	10,24	0,01	10,31	0,07	0,68
Ulospuhallus	x2	m3	kg/s	0,72	0,00	0,72	0,00	0,00
Kiertovesi A	x3	m4	kg/s	61,29	6,25	61,29	0,00	0,00
Lisähöyry vortex	x4	m7	kg/s	2,40	0,01	2,37	-0,03	-1,25
Lauhde	x5	m10	kg/s	0,26	0,00	0,26	0,00	0,32
Tulistettu höyry verkkoon	x6	m11	kg/s	12,07	0,34	12,22	0,15	1,24
Kaasun massavirta	x7	m12	kg/s	52,70	0,37	51,97	-0,73	-1,39
Kiertovesi B	x8	m13	kg/s	61,03	6,25	61,29	0,26	0,43
Kiertovesi C	x9	m14	kg/s	60,95	6,25	61,29	0,34	0,56
Lisähöyry dp	x10	m15	kg/s	2,11	0,04	2,37	0,26	12,32
Syöttöveden lämpötila	x11	h1	kJ/kg	611,48	3,63	611,36	-0,12	-0,02
Lieriö (kylläinen vesi)	x12	h3	kJ/kg	876,22	5,05	873,22	-3,00	-0,34
Lieriö (kyll. Höyry)	x13	h6	kJ/kg	2793,90	4,01	2790,90	-3,00	-0,11
Lisähöyry	x14	h7	kJ/kg	2793,51	10,43	2793,40	-0,11	0,00
Tulistettu höyry tulistimelta	x15	h9	kJ/kg	3248,71	8,21	3247,69	-1,02	-0,03
Lauhde	x16	h10	kJ/kg	369,59	1,92	369,60	0,01	0,00
Verkkoon menevän höyry	x17	h11	kJ/kg	3186,57	7,76	3187,95	1,38	0,04
Kaasun sisääntulo- lämpötila	x18	T12	°C	696,39	6,59	694,32	-2,07	-0,30
Kaasun ulosmeno- lämpötila	x19	T15	°C	257,88	0,44	257,99	0,11	0,04

Taulukko 9: Mittaamattomien estimaattien tulokset täsmäyksen seurauksena

Virtaus				Lähtöarvot	Täsmätyt arvot	Erotus alkuarvoihin , yksikköä	Muutos % lähtöarvoon verrattuna
Kylläinen höyry lieriöstä	u1	m6	kg/s	9,52	9,59	0,07	0,74
Tulistimeen menevän höyry massavirta	u2	m8	kg/s	11,92	11,96	0,04	0,34
Höyrystetyn kiertoveden entalpia	u3	h5	kJ/kg	1144,69	1173,32	28,63	2,50
Tulistimeen menevän höyryn entalpia	u4	h8	kJ/kg	2793,82	2791,39	-2,43	-0,09
Kaasun lämpötila tulistimen jälkeen	u5	T13	°C	586,39	608,40	22,01	3,75
Kaasun lämpötila höyrystimen jälkeen	u6	T14	°C	307,88	305,00	-2,88	-0,94

Taulukosta kahdeksan huomataan, että täsmäyksen tekemät muutokset eivät ole kovin isoja. Suurin yksittäinen muutos tapahtuu lisähöyryn paine-eroon perustuvassa mittauksessa sekä kaasun massavirrassa. Täsmäykseen valittiin viisi tasepäivää, joista 5.3. oli yksi. Muiden tasepäivien tulokset ovat liitteessä kaksi. Näiden viiden päivän tulosten perusteella määritettiin FRNC5-mallin konduktanssit ja likavastukset. Tulosten perusteella voidaan todeta, että alkuarvoina käytetyt mittaustulokset ovat melko lähellä täsmäyksen toteuttavia arvoja.

## 5.7 FRNC5-PC-malli

FRNC5-PC- ohjelman käytön tarkoitus on laskea kattilan lämmönsiirtimille täsmäyksen tuloksia mahdollisimman hyvin vastaavat lämmönsiirrinten tehot ja kaasun ulostulolämpötila. Tämä toteutettiin siten, että mallin geometria vastaa fyysisiltä mitoiltaan ja materiaaleiltaan todellista kattilaa, ja mallin laskennalle annetaan lähtöarvoina täsmäyksestä saadut tulokset, kuten esimerkiksi lämmönsiirrinten vesipuolen massavirrat ja entalpiat. Kaasupuolelta mallille annetaan vakiona kaasun sisäänmenolämpötila, massavirta sekä koostumus. Mallissa ei ole mukana lieriötä tai tulistetun höyryn lämpötilan säätöä lauhteella, vaan ainoastaan kattilan sisällä tapahtuva lämmönsiirto. Ennen kuin ohjelma aloittaa simulaation, täytyy mallin käyttöliittymästä

valita, että mitkä annetuista alkuarvoista kiinnitetään (fixed inlet/outlet). Mallille annetaan siis osa alkuarvoista kiintopisteinä, joita se ei juurikaan muuta iteroinnin seurauksena. Mallille päädyttiin kiinnittämään niiden kohtien lähtöarvot, joista tieto on mitattua, eli ekonomaiserin sisäänmeno, höyrystimen sisäänmeno ja tulistimen ulostulo. Mallille annettiin tietoina näistä kohdista massavirta, lämpötila, paine ja entalpia.

Tehojen ja kaasun ulostulolämpötilan sovittaminen täsmäyksen tuloksiin tapahtui siten, että lämmönsiirrinten ulkoista likavastusta muutettiin siihen suuntaan, jossa lämmönsiirrimen tehon arvo muuttui lähemmäs täsmäyksen arvoa. Likavastusten arvot määritettiin kokeilemalla eri arvoja niin kauan, että tulokset ovat riittävän lähellä täsmäyksen tuloksia.

Taulukko 10: Likavastusten virittämiseen käytetyt arvot

	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Tulistimen teho [FRNC]	MW	5,38	5,24	5,39	5,68	5,56
Tulistimen teho [Matlab]	MW	5,50	5,32	5,46	5,66	5,57
Höyrystimen teho [FRNC]	MW	18,55	18,26	18,39	19,20	19,41
Höyrystimen teho [Matlab]	MW	18,75	18,39	18,53	19,32	19,58
Ekonomaiserin teho [FRNC]	MW	2,77	2,77	2,75	2,92	2,91
Ekonomaiserin teho [Matlab]	MW	2,73	2,69	2,70	2,74	2,78
Kaasun ulostulolämpötila [FRNC]	°C	260,7	258,4	258,3	262,4	263,5
Kaasun ulostulolämpötila [Matlab]	°C	260,30	258,00	258,00	265,20	266,00

Yllä olevan taulukon arvoilla saatiin likavastusten arvoiksi tulistimelle  $0,00002 \frac{\text{m}^2\text{°C}}{\text{W}}$ , höyrystimelle  $0,00042 \frac{\text{m}^2\text{°C}}{\text{W}}$  ja ekonomaiserille  $0,006 \frac{\text{m}^2\text{°C}}{\text{W}}$ . Putken sisäisille likavastuksille käytettiin arvoa  $0,0001 \frac{\text{m}^2\text{°C}}{\text{W}}$ . Ekonomaiserin suurempaa ulkoista likavastusta selittää se, että ekonomaiserin ylimmän putkipaketin yläpuolella ei ole höyrynuohointa. Ekonomaiserin putkipaketeissa putkirivien pystysuuntainen riviväli on harvempi, kuin esimerkiksi höyrystimessä, joten ekonomaiserin putkipakettien keskellä sijaitseva nuohoin ei välttämättä yllä puhdistamaan ekonomaiserin ylimpiä putkia. Näin ollen niihin voi kerääntyä likakerros, joka ei puhdistu pois ja heikentää lämmönsiirtoa.

Malli ei itsessään anna tuloksena lämmönsiirrinten konduktanssia, vaan se täytyy laskea mallin tulosten perusteella. Malli antaa jokaiselle putkiriville ominaisen ulkopuolisen ja sisäpuolisen konvektiolämmönsiirtokertoimen. Likavastukset tiedetään, kun ne annetaan mallille käyttäjän toimesta ja kattilan dokumenttien perusteella tiedetään lämmönsiirtopinta-alat. Putkien lämmönjohtavuutta malli ei anna, vaan mallissa putkille annetaan joku tietty materiaali, jonka ominaisuuksien perusteella malli laskee materiaalin lämmönjohtavuuden lämpötilan funktiona. Malli ei kuitenkaan kerro lämmönjohtavuuksien arvoja missään vaiheessa, jolloin lämmönjohtavuuden arvo täytyi arvioida mallin käyttämän materiaalin tietojen perusteella. Tästä ei kuitenkaan synny suurta virhettä, sillä putkimateriaalin lämmönjohtavuuden lämpövastus on pieni verrattuna muihin lämpövastuksiin ja vaikuttaa hyvin vähän konduktanssiin, jolloin voidaan arvioida, että muutaman yksikön heitto lämmönjohtavuudessa ei juurikaan vaikuta tulokseen.

Konvektiolämmönsiirtokerrointen tuloksista lasketaan keskiarvo koko lämmönsiirtimelle ja lämmönjohtumiskertoimen arvo lasketaan lämmönsiirtimen lämpötila-alueen perusteella. Kappaleessa 4.2 määritetyllä yhtälöllä (43) voidaan laskea konduktanssin (UA) arvo yhdelle lämmönsiirtimelle. Esimerkkinä 5.3.2019 tasepäivän tuloksilla tulistimen konduktanssi:

$$UA_{tulistin} = \left( \frac{1}{592,1 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 129,4 m^2} + \frac{0,0001 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}}{129,4 m^2} + \frac{\ln\left(\frac{0,0318 m}{0,0286 m}\right)}{31,3 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} * 2 * \pi * 1440 m} + \frac{0,00002 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}}{143,9 m^2} + \frac{1}{144,2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 143,9 m^2} \right)^{-1} = 15996 \frac{W}{^\circ C} \quad (43)$$

Samalla tavoin laskettiin jokaiselta tasepäivältä lämmönsiirtimille konduktanssin arvot. Tulokset ovat taulukoituna taulukkoon 11.

Taulukko 11: Konduktanssin arvot eri lämmönsiirtimille ja tasepäiville.

Lämmönsiirrin	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019	Keskiarvo
Tulistin	W/°C	16368	16118	15996	16951	16730	16433
Höyrystin	W/°C	92392	91423	90144	94514	94542	92603
Ekonomaiseri	W/°C	24931	24750	24494	25316	25311	24960



Mallin toimintaa testattiin siten, että siihen syötettiin konduktanssien keskiarvot, ja valituilta tasepäiviltä lähtöarvot. Lähtöarvojen perusteella Petro-SIM- malli laski lopuille virroille massavirrat, paineet ja lämpötilat. Tasepäivien lähtöarvot ja Petro-SIM:n simuloinnin tulokset näkyvät taulukossa 12. Taulukossa 12 mainittavat tulistetun höyryn arvot on höyryn arvot ennen kuin lauhde ajetaan sekaan höyryyn. Petro-SIM:n laskemat arvot ja valitut lähtöarvot syötettiin tämän jälkeen FRNC5-mallille ja sen simuloinnin perusteella laskettiin uudestaan konduktanssit samoille tasepäiville. Sen jälkeen uudelleen laskettuja konduktansseja verrattiin aiemmin laskettuihin taulukossa 11 näkyviin konduktanssin arvoihin. Taulukkoon 13 on taulukoitu uudet konduktanssit ja ero alkuperäisiin konduktansseihin.

Taulukko 12: Lähtöarvot sekä Petro-SIM- mallin laskemat arvot.

Tasepäivien arvot	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Syöttövesi	kg/s	10,25	10,12	10,24	10,70	10,78
Lisähöyry	kg/s	2,35	2,08	2,11	3,26	2,12
Kiertovesi	kg/s	61,58	61,75	61,29	60,76	60,64
Kaasu	kg/s	55,74	54,64	52,70	56,99	57,01
Lieriö	kPa	1735,57	1733,66	1733,91	1749,99	1737,17
Lisähöyry	kPa	1730,07	1727,01	1727,06	1745,77	1728,88
Kaasun sisääntulo	°C	683,55	680,56	695,88	683,23	687,21
Petro-SIM:n laskemat arvot	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Tulistettu höyry kattilalta	kg/s	12,47	11,99	12,03	13,34	12,49
Tulistettu höyry kattilalta	°C	397,08	401,80	407,30	386,90	398,79
Kiertovesi	°C	205,47	205,42	205,42	205,88	205,52
Kaasun ulostulo	°C	261,20	257,90	254,60	264,10	264,80
Tulistettu höyry	kPa	1715,60	1713,70	1707,10	1730,00	1717,20
Kiertovesi	kPa	1903,60	1901,70	1901,90	1918,00	1905,20

Taulukko 13: Uudelleen lasketut konduktanssit sekä erotus alkuperäisiin.

Uudet konduktanssit	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Tulistin	W/°C	16632	16354	16103	16916	16837
Höyrystin	W/°C	93862	92673	90872	95109	95214
Ekonomaiseri	W/°C	25186	24977	24632	25415	25428
Ero uusien ja alkuperäisten välillä	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Tulistin	%	1,59	1,44	0,67	-0,21	0,64
Höyrystin	%	1,57	1,35	0,80	0,63	0,71
Ekonomaiseri	%	1,01	0,91	0,56	0,39	0,46

Taulukossa 13 näkyvä erotus on laskettu alkuperäisen ja uudelleen lasketun konduktanssin erotuksen ja alkuperäisen konduktanssin suhteena. Suurimmat erot ovat alle kaksi prosenttia, jolloin tuloksista voidaan todeta, että uudelleen lasketut konduktanssit vastaavat hyvin alkuperäisiä konduktansseja. Taulukon 13 tulokset ovat samansuuntaiset, sillä uudelleen lasketut konduktanssit ovat yhtä lukuunottamatta suurempia kuin alkuperäiset konduktanssit. Mallien keskinäistä toimintaa vertailtiin myös lämmönsiirrinten lämpötehojen osalta taulukon 12 lähtöarvoja käyttäen. Tulokset on taulukoitu alle taulukkoon 14.

Taulukko 14: Uudelleen laskettujen konduktanssien mukaiset lämpötehot.

Tehot	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Tulistin Petro-Sim	MW	5,59	5,52	5,69	5,70	5,67
Tulistin FRNC5	MW	5,40	5,21	5,43	5,62	5,53
Ero	%	3,45	5,65	4,52	1,46	2,45
Höyrystin Petro-Sim	MW	19,54	19,14	19,24	19,75	20,01
Höyrystin FRNC5	MW	19,36	18,97	18,90	19,59	19,91
Ero	%	0,92	0,89	1,78	0,82	0,50
Ekonomaiserin Petro-Sim	MW	2,60	2,52	2,47	2,68	2,71
Ekonomaiserin FRNC5	MW	2,85	2,79	2,77	2,92	2,97
Ero	%	-9,83	-10,71	-12,15	-8,79	-9,80
Yhteensä Petro-Sim	MW	27,73	27,18	27,40	28,14	28,38
Yhteensä FRNC5	MW	27,61	26,97	27,10	28,13	28,41
Ero	%	0,42	0,78	1,09	0,03	-0,09

Taulukon 14 tuloksista huomataan, että Petro-SIM:n laskema tulistimen lämpöteho on noin puolestatoista viiteen prosenttia suurempi kuin FRNC5:n. Höyrystimen suhteelliset erot eivät ole kovinkaan, Petro-SIM:n laskemat lämpötehot ovat kuitenkin hieman suuremmat. Höyrystimen absoluuttiset erot ovat kuitenkin tulistimen kanssa samaa tasoa. Ekonomaiserissa puolestaan lämpötehot ovat FRNC5:n laskemana suuremmat. Ero on teholtaan absoluuttisesti hieman suurempi, kuin tulistimessa. Koko kattilan teho ei kuitenkaan eroa kovinkaan paljon eri mallien välillä. Eroja selittää se, että mallit laskevat tehot ” eri järjestyksessä”. Tämä tarkoittaa sitä, että mallit aloittavat simuloinnin eri osasta kattilaa. FRNC5- malli myös mallintaa ekonomaiserille veden höyrystymistä, joka nostaa ekonomaiserin lämpötehoa FRNC5-mallissa.

Petro-SIM- mallin tulistetun höyryn lämpötilan säätö on toteutettu vastaamaan todellisen kattilan vastaavaa. Lauhdetta ajetaan tulistetun höyryn sekaan sen verran, että tulistetun höyryn lämpötila alenee haluttuun asetusarvoon (360 °C). Petro-SIM-mallin ja täsmäysten tulosten ero näkyy tässä paljon, sillä höyry tulee hieman kuumempuna tulistimelta ulos Petro-SIM-mallissa, jolloin Petro-SIM ajaa enemmän lauhdetta, kuin mitattu tai täsmätty tulos on. Taulukossa 15 on tulokset eri tasepäiviltä.

Taulukko 15: Lauhteen ja verkkoon menevän tulistetun höyryn määrien erot.

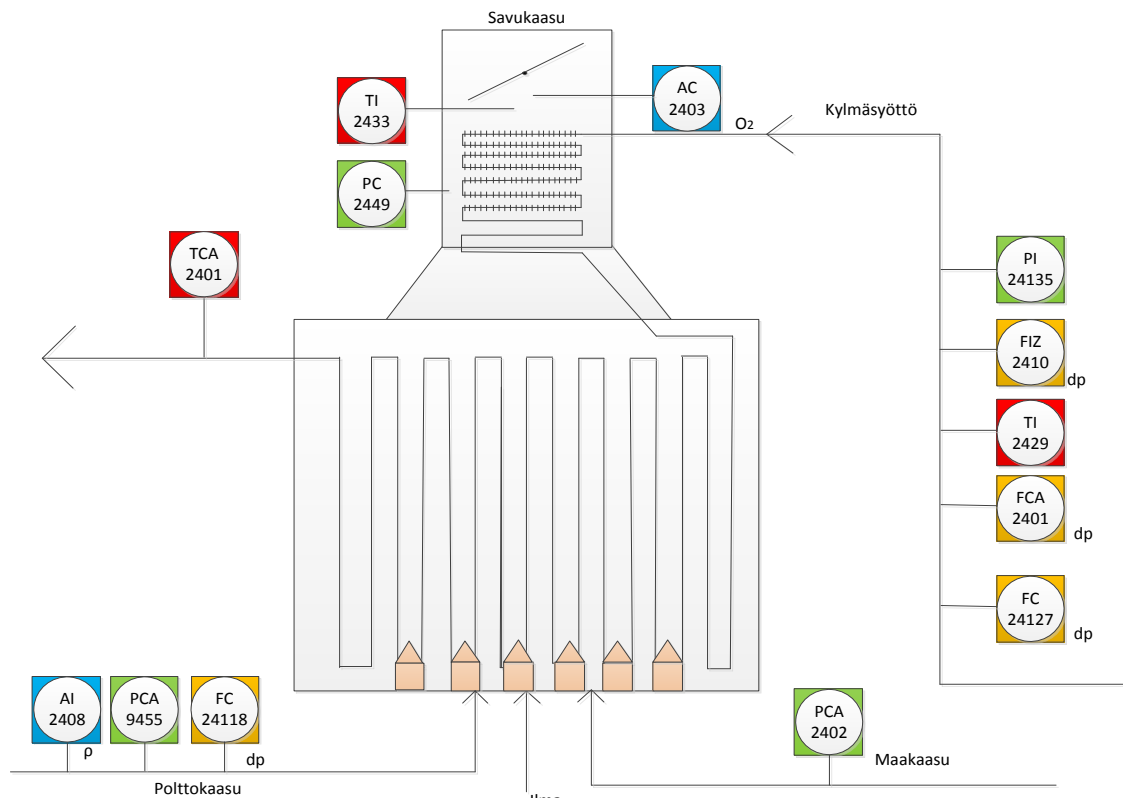
Tulistettu	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Mitattu	kg/s	12,29	11,93	12,07	13,53	12,36
Matlab	kg/s	12,53	12,09	12,22	13,72	12,73
Petro-SIM	kg/s	12,66	12,34	12,38	13,91	12,90
Ero	%	1,02	1,97	1,26	1,33	1,36
Lauhde	Yksikkö	5.2.2019	12.2.2019	5.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
Mitattu	kg/s	0,23	0,23	0,26	0,11	0,22
Matlab	kg/s	0,23	0,23	0,26	0,11	0,22
Petro-SIM	kg/s	0,36	0,36	0,42	0,30	0,40
Ero	%	36,03	35,78	37,50	62,23	43,86

Tulosten perusteella voidaan todeta, että malli toimii keskimääräisillä konduktansseilla tarkasti. Suurimmat erot mallien toiminnassa johtuvat tulistimen ja ekonomaiserin välisistä tehoeroista mallien välillä, josta johtuu myös ero lauhteen määrässä. Tulistimen jälkeinen lämpötila höyryssä on hieman korkeampi Petro-SIM-mallissa, kuin mittausten perusteella, jolloin Petro-SIM ajaa myös enemmän lauhdetta. Konduktanssien arvoja voisi saada tarkemmaksi vielä useamman tasepäivän avulla. Konduktanssien määrittämiseen käytetyt likavastuksetkin ovat keskimääräisiä, jolloin niiden vaikutus yksittäisten tasepäivien tuloksiin voi olla merkittävä.

## 6 PROSESSIUUNI BA-2401

FCC-yksikössä voidaan käyttää hiilivetysyötön lämmittämiseen prosessiuunia kuvan yksi mukaisesti. Uuni on luonnonvetouuni, jossa palamisilma tulee uuniin alapuolelta luonnonvetona. Uunissa poltetaan jalostamon polttokaasuverkosta saatavaa polttokaasua, sekä pilot-polttimilla maakaasua. Uuni koostuu sylinterinmuotoisesta, halkaisijaltaan konvektio-osaa leveämmästä säteilyosasta, jossa syöttö kiertää putkissa vertikaalisti uunin seinillä sekä suorakaiteen muotoisesta konvektio-osasta, jossa putket ovat kaasuvirtaan nähden poikittain ripaputkipakettina. Konvektio-osan kolme ensimmäistä putkiriviä ovat kuitenkin paljaita putkia, jotka suojaavat ripaputkia lämpösäteilyltä. Syöttö tulee uunissa ensin konvektio-osan yläosaan ja kulkee sieltä alaspäin uunin sisällä säteilyosaan. Säteilyosan jälkeen syöttö poistuu uunista ja jatkaa eteenpäin riserille.

Uunissa on kehässä säteilyosan keskellä kuusi pääpoltinta, joissa poltetaan polttokaasua. Jokaisella pääpolttimella on oma pilot-poltin, jotka varmistavat, että pääpolttimilla on liekki. Palamistuotteena syntyvät savukaasut poistuvat piippuun. Polton ilmamäärää säädetään uunin konvektio-osan jälkeisellä savukaasupellillä, jota ohjaa uunin happipitoisuusmittaus.



Kuva 17: Uunin mallintamiseen käytetyt mittaukset.

## 6.1 Tasetäsmäysmalli

Työn kohteena olevan prosessiuunin kaasupuolelta ei voi tehdä tasetäsmäystä, sillä kaasupuolella on kuvan 17 mukaisesti kolme sisään tulevaa ja yksi ulosmenevä virta, joista ainoastaan yksi sisään menevä virtaus on mitattu. Kaasupuolen mittauksia ei ole tällöin tarpeeksi täsmäykseen, eli ei saavuteta redundanssia. Lisäksi savukaasujen laskenta perustuu oletukseen täydellisestä palamisesta, sillä savukaasuista mitataan ainoastaan happipitoisuutta, jolloin mallissa savukaasun ja ilman virtaukset seuraisivat ainoastaan polttokaasun määrän muutosta, jolloin kyse ei olisi mittaustulosten perusteella luotujen taseiden täsmämisestä. Uunin täsmäys onnistuisi riittävällä tarkkuudella, mikäli savukaasun massavirta olisi mitattu, sillä pilot-polttimille menevä maakaasuvirta voitaisiin syöttää vakiona, ja se on polttokaasuvirtaan verrattuna pieni, jolloin sen vaikutus energiataseeseen on hyvin pieni.

Prosessipuolen energia- ja massatase voitaisiin täsmätä laskemalla kaasupuolelta palamisen ja häviöiden avulla hiilivetysyöttöön siirtyvä lämpö ja tätä lämpöä

käsiteltäisiin mallissa vakiona, joka ei muutu. Kuitenkin myöhemmin mainittavien kaasupuolen mittausten ja mallinnuksen epävarmuuksien perusteella ei ole mielekästä toteuttaa täsmäystä näin, sillä prosessipuolen mittaukset ovat tässä tapauksessa luotettavampia, ja antavat tarkemman arvion tarvittavasta tehosta. Uunin prosessipuolen mittaukset ovat mukana myös yksikön optimointimallissa, jossa ne on todettu luotettaviksi.

## 6.2 Savukaasulaskut

Uunin mallintamista varten täytyi määrittää ilman ylimäärä (excess air) uunin savukaasujen happipitoisuuden mittauksen perusteella, sillä työssä käytettävissä mallinnusohjelmissa vaihtoehtoina oli syöttää joko savukaasujen happipitoisuus kuivana tai ilman ylimääränä. Uunin savukaasun happipitoisuus mitataan savukaasusta siten, että savukaasun vesihöyry on mukana mittaustuloksessa. Tällöin vaihtoehtona ollut ilman ylimäärä nähtiin parempana vaihtoehtona.

Uunin palamisilman ja savukaasujen massavirrat määritetään palamisen reaktioyhtälöiden avulla. Mittaustiedon puutteen vuoksi oletetaan täydellinen palaminen. Rikkiä jalostamalla käytettävissä kaasuissa on yleensä todella vähän tai ei ollenkaan. Täydellinen palaminen noudattaa seuraavia reaktioyhtälöitä (57), (58), (59) :



### 6.2.1 Ilman koostumus ja kosteuden määrittäminen

Ilma koostuu useista kaasuista, mutta tässä työssä käytännön vuoksi otetaan huomioon vain typpi, happi ja hiilidioksidi, sillä FRNC5- ohjelma käyttää näitä kuivan ilman koostumuksena. Tyypeä on tässä tapauksessa kuivasta ilmasta 79,02 mooliprosenttia, happea 20,95 mooliprosenttia ja hiilidioksidia 0,03 mooliprosenttia. Kuivan ilman lisäksi mukaan lasketaan ilman kosteuden vuoksi mukana tuleva vesihöyry. Tämä voidaan

laskea ulkoilman suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja paineen perusteella. Kun oletetaan ilma ideaalikaasuksi, veden mooliosuus ilmasta voidaan laskea yhtälöllä (60) siten, että kaasun mooliosuus on sama, kuin kaasun osapaine kaasuseoksessa :

$$x_{H_2O,mol} = \frac{p_v}{p_{ymp}} \quad (60)$$

missä  $x_{H_2O,mol}$  = vesihöyryn mooliosuus

$p_v$  = vesihöyryn osapaine [kPa]

$p_{ymp}$  = ympäristön ilman paine [kPa]

Vesihöyryn osapaine voidaan laskea suhteellisen kosteuden ja veden höyrynpaineen avulla yhtälöllä (61):

$$p_v = p_{v,s} * \frac{RH\%}{100} \quad (61)$$

missä  $p_{v,s}$  = veden höyrynpaine [kPa]

RH% = ilman suhteellinen kosteus [%]

Veden höyryn paine voidaan laskea yhtälöllä riippuen ilman lämpötilasta ja sen laskemiseen voidaan käyttää yhtälöä (62) (Wagner ja Pruss 2002, 398):

$$p_{v,s} = p_c * e^{\frac{T_c}{T}(a_1\vartheta + a_2\vartheta^{1,5} + a_3\vartheta^3 + a_4\vartheta^{3,5} + a_5\vartheta^4 + a_6\vartheta^{7,5})} \quad (62)$$

missä  $p_c$  = kriittinen paine

$T_c$  = kriittinen lämpötila

$a_i$  = kaavakohtainen vakio, näkyvillä taulukossa 12

$$\vartheta = 1 - \frac{T}{T_c} [-]$$

Taulukko 12: Yhtälössä (62) käytetyt vakiot

a1	-7,85951783
a2	1,84408259
a3	-11,7866497
a4	22,6807411
a5	-15,9618179
a6	1,80122502

### 6.2.2 Polttoaineen määrä

Kun tiedetään palamisreaktiot, ilman koostumus ja määrä, tarvitaan vielä polttoaineen koostumus ja määrä. jotta yli-ilman määrä voidaan laskea. Poltto- ja maakaasun koostumus on tiedossa analyysitulosten perusteella. Alla olevassa taulukossa on poltto- ja maakaasun analyysitulokset. Niistä on jätetty pois aineet, joita oli vähemmän kuin yksi moolin miljoonasosa (mol-ppm). Analyysissä on myös oletettu, että kaikki hiililuvultaan kuusi ja sitä raskaammat hiilivedyt ovat n-heksaania ( $C_6H_{14}$ ), sillä analyysissä ei eritelty näitä hiilivetyjä erikseen. Taulukossa 13 on taulukoituna 5.3.2019 tasepäivänä käytetyt koostumukset. Taulukossa butaanin ja pentaanin kohdalla etuliitteet I ja N viittaavat saman aineen eri isomeereihin.

Taulukko 13: Poltto- ja maakaasun koostumus aineittain mooliprosentteina (mol-%).

	H2	O2	N2	CO	CO2	CH4	C2H6	C3H8	I-C4H10	N-C4H10	I-C5H12	N-C5H12	C6H12	CH3OH
Polttokaasu	57,00	0,00	0,10	0,01	0,00	12,30	10,80	8,50	2,20	3,10	2,70	2,10	1,20	0,00
Maakaasu	0,00	0,00	0,60	0,00	0,21	97,00	1,90	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

Analyysitulosten, sekä polttokaasun paineen ja lämpötilan perusteella laskettiin polttokaasulle prosessiolosuhteita vastaava tiheys, jonka avulla automaatiojärjestelmästä saatavalle mittaustulokselle tehtiin tiheyskorjaus, kuten kappaleessa 5.4.1. Polttokaasun prosessiolosuhteita vastaava tiheys ei välttämättä ole kuitenkaan ihan todellisuutta vastaava, sillä siihen tarvittavia mittauksia, kuten lämpötila- ja paine, ei ollut virtausmittauksen lähellä, vaan ne jouduttiin hakemaan kauempaa eri kohdista. Tämä voi aiheuttaa tiheyskorjaukseen jonkin verran virhettä.

Polttoaineena on myös maakaasua, jonka virtauksesta ei ole mittausta, joten sen määrä arvioitiin maakaasun paineensäätöventtiilin tietojen avulla laskemalla. Valmistajan datalehdessä saatiin eri venttiilin avaumille venttiilille ominaisia arvoja, joita käytettiin

laskennassa. Laskenta suoritettiin kyseisen venttiilin valmistajan venttiilien mitoitusohjelmalla. Ohjelmaan syötettiin venttiilin tietojen lisäksi kaasun tyypilliset arvot kuten moolimassa, kompressibiliteetti, lämpötila ja paine, joiden avulla ohjelma laskee massavirran tietylle venttiilin avaumalle. Maakaasun massavirtaukselle laskettiin arvot useille eri avaumille, ja niiden avulla luotiin sovite, jonka perusteella datahausta saatavalla venttiilin avaumalla saadaan arvio maakaasun määrälle. Mikäli maakaasun koostumus, paine ja lämpötila muuttuvat merkittävästi sovitteen arvoista, tällöin sovitteen tuottama arvo voi poiketa paljonkin todellisuudesta. Maakaasun massavirta on kuitenkin laskentojen perusteella n. 10 kg/h, jolloin sen vaikutus on kuitenkin pienehkö.

### 6.2.3 Palamislaskenta

Nyt kun tiedetään palamisilman ja polttoaineen koostumus, sekä polttoaineen määrä, voidaan laskea yli-ilman määrä. Palamisilman typpi, vesihöyry ja hiilidioksidi kulkevat uunin läpi reagoimatta. Palamisilman mukana oleva happi reagoi palamisreaktioyhtälöiden mukaisesti polttoaineen hiilen ja vedyn kanssa. Ylimääräisen palamisilman mukana tuleva happi jää savukaasuihin. Edellä mainittuja koostumuksia, määriä ja reaktioyhtälöitä käyttäen muodostettiin palamistaulukko.

Yli-hapen ainemäärää ei tiedetty ennalta, joten se ratkaistiin yhtälöryhmän avulla. Yhtälöryhmä koostui yhtälöistä (63), (64) ja (65):

$$n_{EA} = n_{O_2,sk} * K \quad (63)$$

$$n_{sk} = n_{stök,sk} + n_{EA} \quad (64)$$

$$n_{O_2,sk} = x_{O_2,mol} * n_{sk} \quad (65)$$

missä EA= stökiometrisen palamisen lisäksi uuniin tuleva ilman ylimäärä

sk= kaasun osuus savukaasuissa

K = palamisilman kaasujen määrä suhteessa happeen [-]

$n_{stök,sk}$  =stökiometrisen palamisen savukaasujen ainemäärä [kmol]

$$n_{O_2,sk} = \text{hapen ainemäärä savukaasussa [kmol]}$$

Yhtälö (63) kuvaa palamisilman kaasujen osuutta suhteessa happeen palamisilmassa, ja se tiedetään ilman koostumuksen perusteella. Yhtälö (64) kuvaa savukaasun koostumusta ja yhtälöllä (65) saadaan hapen määrä savukaasusta mittauksen avulla. Yhtälön (64) stökiometrisen palamisen savukaasut voidaan kirjoittaa myös muodossa (65):

$$n_{stök,sk} = n_{CO_2,stök,sk} + n_{H_2O,stök,sk} + n_{N_2,stök,sk} \quad (66)$$

Sijoittamalla yhtälö (66) yhtälöön (64) ja yhtälöryhmästä ratkaisemalla saadaan savukaasujen hapen ainemäärälle (67):

$$n_{O_2,sk} = \frac{n_{CO_2,stök,sk} + n_{H_2O,stök,sk} + n_{N_2,stök,sk}}{1 - x_{O_2,mol} * K} * x_{O_2,mol} \quad (67)$$

Yhtälön (67) avulla ratkaistun ylihapen määrän avulla voidaan laskea muiden yli-ilman mukana tulevien kaasujen määrät kertomalla hapen määrä kaasujen suhteella happeen. Taulukkoon 14 on laskettu kaasujen alkuaineiden ja hiilidioksidin perusteella palamiseen tarvittava hapen määrä, joka on taulukossa polttoaineen kohdalla alimmalla rivillä. Taulukkoon 15 on laskettu palamisreaktioiden ja palamisilman koostumuksen perusteella savukaasujen ainemäärät.

Taulukko 14: Alkuaineiden ja hiilidioksidin osuuksien mukainen hapen tarve.

Polttokaasu	Yksikkö	C	H2	N2	O2	CO2	Yhteensä
Painoprosentti	%	75,76	24,07	0,16	0,01	0,00	100,00
Massa	kg	355,39	112,94	0,74	0,04	0,00	469,12
Moolimassa	kg/kmol	12,01	2,02	28,01	32,00	0,00	17,73
Ainemäärä	kmol	29,59	56,02	0,03	0,00	0,00	85,64
Hapen tarve	kmol	29,59	28,01	0,00	0,00	0,00	57,60
Maakaasu	Yksikkö	C	H2	N2	O2	CO2	Yhteensä
Painoprosentti	%	73,80	24,59	1,02	0,02	0,56	100,00
Massa	kg	6,98	2,32	0,10	0,00	0,05	9,45
Moolimassa	kg/kmol	12,01	2,02	28,01	32,00	44,01	16,48
Ainemäärä	kmol	0,58	1,15	0,00	0,00	0,00	1,74
Hapen tarve	kmol	0,58	0,58	0,00	0,00	0,00	1,16

Taulukko 15: Palamisreaktioiden mukaiset ainemäärät sekä ilman ylimäärä

Polttokaasu	Yksikkö	H2O	N2	O2	CO2	Yhteensä
Palamistuotteet	kmol	56,02	0,00	0,00	29,59	85,61
Polttoaineen mukana	kmol	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03
Maakaasu	Yksikkö	H2O	N2	O2	CO2	Yhteensä
Palamistuotteet	kmol	1,15	0,00	0,00	0,58	1,73
Polttoaineen mukana	kmol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Palamisilma	Yksikkö	H2O	N2	O2	CO2	Yhteensä
Stök. Palamisilmana	kmol	0,24	221,63	58,76	0,08	280,70
Ilman ylimäärä	kmol	0,31	294,28	78,02	0,11	372,72
Savukaasu	Yksikkö	H2O	N2	O2	CO2	Yhteensä
Yhteensä	kmol	57,73	515,93	78,02	30,37	682,05

#### 6.2.4 Palamisilman määrä

Taulukon 15 palamisilmamääristä voidaan laskea stökiometrisen palamisilman ja kokonaisilmamäärän ainemääristä yli-ilman määrä yhtälöllä (68):

$$EA = \frac{n_{\text{kok.ilma}}}{n_{\text{stök.ilma}}} * 100\% = \frac{653,43 \text{ kmol}}{280,70 \text{ kmol}} * 100\% = 132,78 \% \quad (68)$$

Palamistaulukosta voidaan laskea myös massavirrat ilmalle ja savukaasuille moolimassojen avulla. Tulokset on taulukoitu alle taulukkoon 16.

Taulukko 16: Savukaasujen ja palamisilman koostumus ja massavirrat.

Savukaasu	Yksikkö	Vesi	Typpi	Happi	Hiilidioksidi	Yhteensä
Massavirta	kg/h	1039,97	14453,05	2496,54	1336,46	19326,01
Painoprosentti	%	5,38	74,79	12,92	6,92	100,00
Mooliprosentti	%	8,46	75,64	11,44	4,45	100,00
Palamisilma	Yksikkö	Vesi	Typpi	Happi	Hiilidioksidi	Yhteensä
Massavirta	kg/h	9,89	14452,21	4376,72	8,62	18847,44
Painoprosentti	%	0,05	76,68	23,22	0,05	100,00
Mooliprosentti	%	0,08	78,95	20,93	0,03	100,00

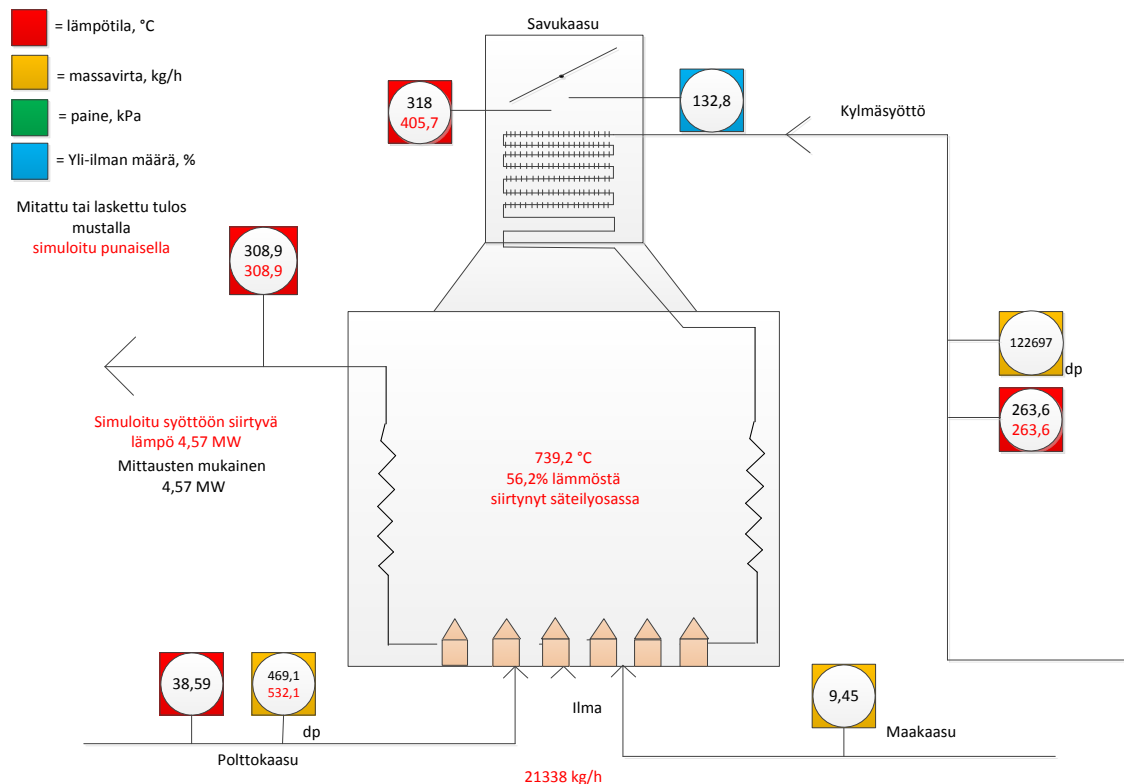
### 6.3 FRNC5-PC-malli

FRNC5- mallilla kokeiltiin, voidaanko uunin mittaustulokset toistaa uunimallin avulla, jotta voidaan todeta uunin prosessimittaukset toimiviksi, ja mallintaa sitä optimointityökaluun mittaustulosten perusteella. Samoin kuin jätelämpökattilasta, mallille syötettiin tarkat geometriat uunista. Aluksi uunin toimintaa mallinnettiin siten, että polttoaineiden massavirrat, palamisilmamäärä sekä hiilivetysyötön sisääntulo-olosuhteet annettiin vakiona, jotta malli laskee syöttöä lämmittävän lämpötehon. Lisäksi mallilla laskettiin erikseen syötön lämmitykseen vaadittava teho, jotta mallin toimintaa voi verrata mittaustuloksiin. Alla olevassa taulukossa 17 on koottu simuloinnin lähtötiedot. Malliin lämpöhäviöiksi syötettiin neljä prosenttia palamisessa syntyvästä lämpöenergiasta.

Taulukko 17: Tasepäivän 22.1.2019 lähtötiedot mallille.

Kohde	Positionumero	Yksikkö	Arvo
Ilman lämpötila	TI29961	°C	-19,79
Ilman paine	PI6720	kPa	102,30
Ilman suhteellinen kosteus	AI6702	RH%	81,58
Ilman ylimäärä	-	%	132,79
Polttokaasun lämpötila	TI34136	°C	38,59
Polttokaasun massavirta	FC24118	kg/h	469,12
Maakaasun lämpötila	TI61022	°C	26,27
Maakaasun massavirta	-	kg/h	9,45
Kaasun lämpötila uunin jälkeen	TI2433	°C	318,01
Syötön sisääntulolämpötila	TI2429	°C	263,60
Syötön ulostulolämpötila	TCA2401	°C	308,93
Syötön määrä	-	kg/s	34,08
Syöttöön arboroitunut lämpöteho	-	MW	4,57

Syöttämällä lähtötiedot mallille lämpötehoa lukuunottamatta, malli laski syötön vastaanottamaksi lämpötehoksi 4,13 MW, jolloin verrattuna mittaustulosten perusteella syötön vaatimasta tehosta puuttuu 0,44 MW. Mallinnus toistettiin toisinpäin siten, että polttokaasun määrää lisättiin niin kauan, että tehot vastasivat toisiaan. Polttokaasun massavirraksi saatiin tällä tavalla 532,1 kg/h. Polttokaasun lisäys on niin suuri, että todennäköisesti eron selittää jokin muu tekijä, kuin polttokaasun massavirran mittausrvirhe. Kuvassa 18 on kuvattuna simuloinnin ja mittaustulosten eroja.



Kuva 18: Mallin ja mittaustulosten erot, kun syöttöön siirtynyt lämpöteho on vakio.

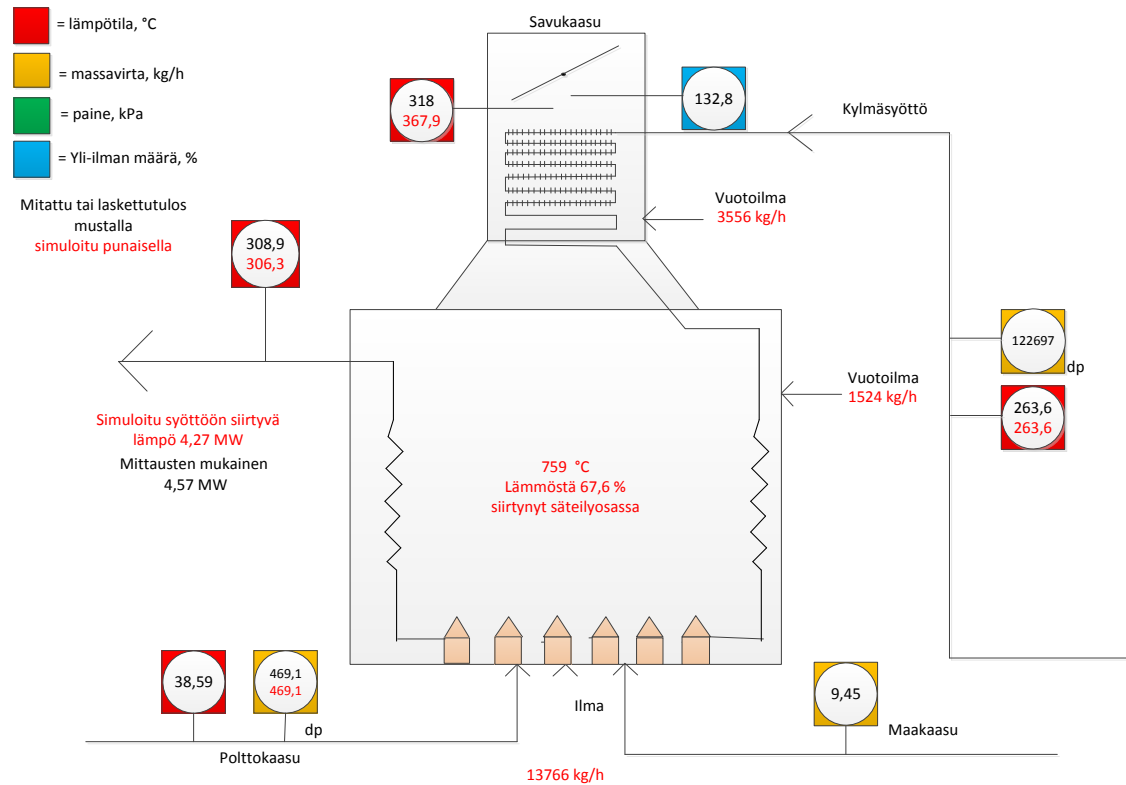
Yksi selittävä tekijä kuvan 18 eroihin on se, että kun mallille syötetään kaikki yli-ilma polttimille, kylmä ilma sekoittuu heti polttimilla kuumiin palamiskaasuihin, ja lämpöä säteilevät kuumat kaasut kylmenevät todellista tilannetta kylmemmiksi. Tämä johtaa uunissa tapahtuvan säteilylämmönsiirron heikkenemiseen. Työn kohteen kaltaisissa uuneissa kuitenkin suurin osa lämmöstä siirtyy syöttöön säteilemällä, joten malli laskee tarvitsevansa lisää polttokaasua saadakseen syöttöä lämmitettyä riittävästi. Kuvan 18 tuloksista nähdään, että simuloinnin perusteella 56,2 prosenttia lämmöstä on siirtynyt säteilyosassa.

Todellisuudessa osa uunin ilman ylimäärästä tulee uuniin vuotoilmana, jolloin osa ilmasta sekoittuu kuumiin kaasuihin myöhemmin ylempänä säteilyosassa ja konvektio-osassa. Tällöin vaikutus säteilylämmönsiirtoon vähenee. Vuotoilma on yksi todennäköinen selittäjä korkealle happipitoisuudelle savukaasuissa. Tyypillisesti yli-ilman määrä on kaasupolttimilla varustetuissa uuneissa 10-20% luokkaa, joka vastaa kahdesta viiteen prosenttia hapen määrää savukaasuissa. Tällä uunilla mittauksen perusteella saatu noin

133 prosenttia (happena 11,44 prosenttia) vaikuttaa melko korkealta, joten korkean lukeman syyksi epäiltiin vuotoilmaa.

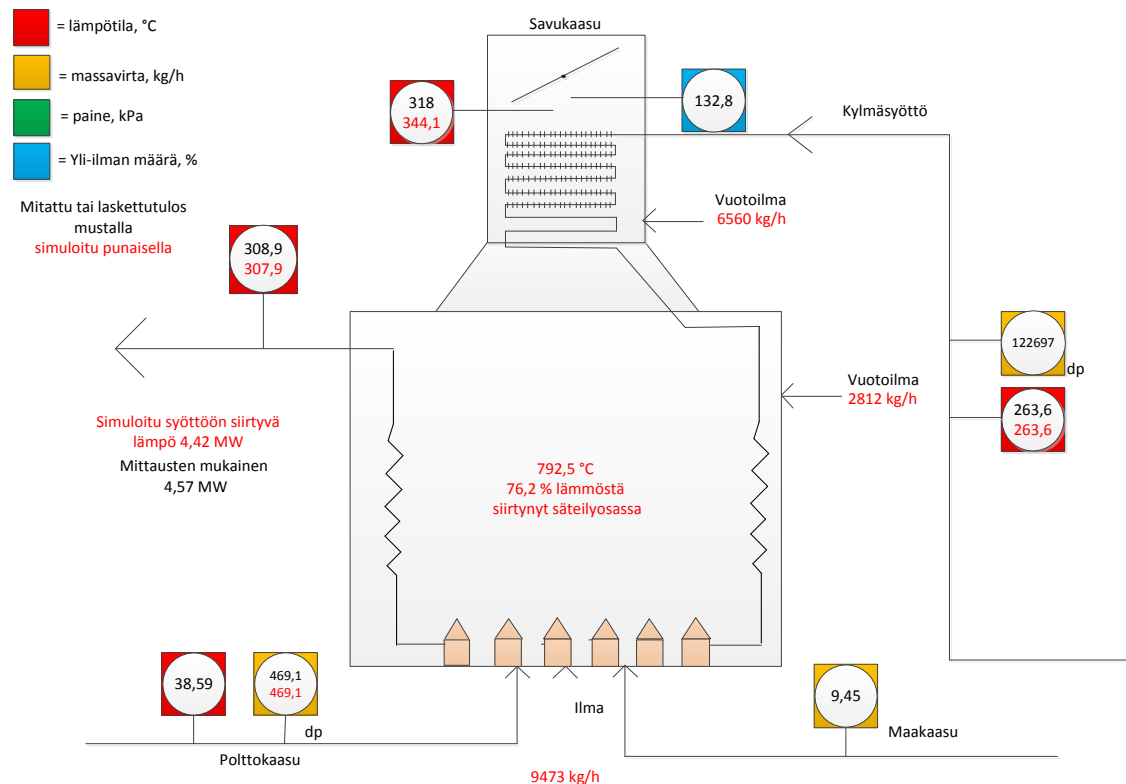
Mallilla voi mallintaa vuotoilman määrää syöttämällä ylimääräisiä kaasuvirtoja uunin eri osiin. Vuotoilman määrityksessä lähdettiin siitä oletuksesta, että happipitoisuuden mittaustulos pitää paikkansa. Mallissa polttimille syötettävän ilman ylimäärää pienennettiin, ja vuotoilmavirtoja uuniin lisättiin samassa suhteessa, jotta ylihappimittauksen perusteella saatava ilmavirta pysyisi samana. Vuotoilman aiheuttamaa eroa tehoissa tukee se, että ilman vuotoilmaa mallin laskema savukaasun lämpötila uunin jälkeen on huomattavasti korkeampi kuin mitattu lämpötila. Tämä lämpötila lähti mallissa laskemaan lähemmäs mitattua tulosta, kun vuotoilmaa syötettiin uuniin. Vuotoilman määrän arviointia mallissa kuitenkin vaikeuttaa se, että uunista ei ole tehty tarkastelua vuotokohtien sijainnista. Tällöin täytyi tehdä oletuksia, paljonko säteily- tai konvektio-osaan vuotaa ilmaa. Oletuksena oli, että säteilyosassa uuniin vuotaa huomattavasti vähemmän ilmaa. Tätä oletusta tuki se, että kun simulaatiossa säteilyosaan lisättiin vuotoilmaa ja konvektio-osasta sitä vähennettiin ilmamäärän pysyessä vakiona, polttokaasun määrä ja savukaasun ulostulolämpötila lähti nousuun mittaustuloksista poiketen. Vuotoilmaa syötettiin uuniin siten, että vuotoilmasta 35 prosenttia menee säteilyosaan ja loput konvektio-osaan.

Aluksi yli-ilman määrä vähennettiin 70 prosenttiin, jolloin polttimille syötettävä ilmamäärä pieneni lukemaan 13766 kg/h. Säteilyosaan syötettiin ilmaa 1524 kg/h ja konvektio-osaan 3556 kg/h. Polttokaasun määrä annettiin mallille mittauksen perusteella. Malli laskee syöttöön siirtyvän lämmön, jota verrataan mittaustulosten perusteella vaadittavaan määrään. Tällöin mitatulla kaasun määrällä saatava syöttöön siirtyvä lämpö nousee 4,27 MW:iin, ja piippuun menevän kaasun lämpötila laskee lähemmäs mitattua arvoa. Myös kuumien kaasujen lämpötila tulipesässä nousee, ja lämmönsiirto siirtyy enemmän säteilyosaan. Kuvassa 19 on kuvattuna simulaatioon tehdyt muutokset.



Kuva 19: Vuotoilman mallinnuksen vaikutuksia.

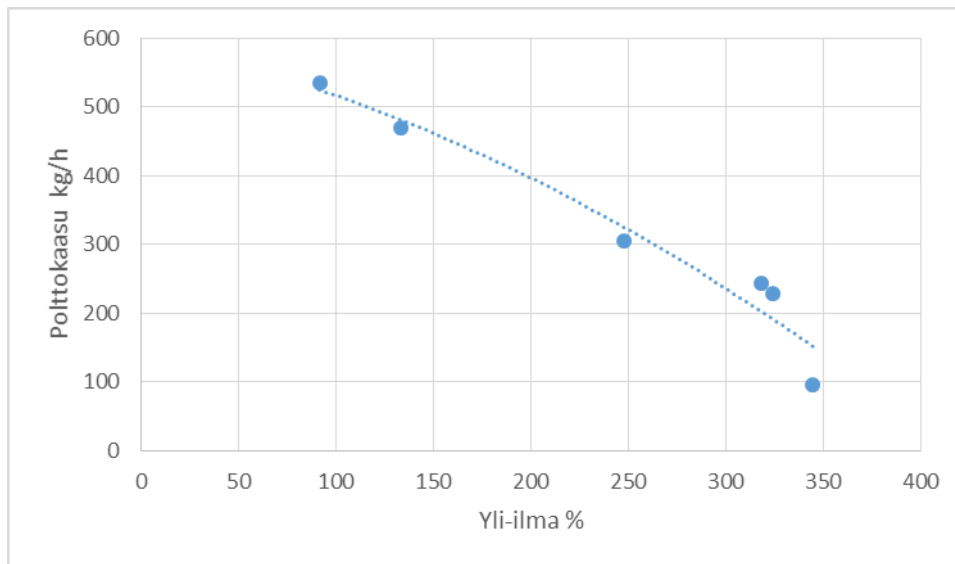
Polttimille syötettävää yli-ilman määrää vähennettiin vielä 17 prosenttiin, jolloin vuotoilmaa syötettiin säteilyosaan 2812 kg/h ja konvektio-osaan 6560 kg/h. Palamisilman virtaus oli 9473 kg/h. Tällöin syöttöön siirtyvä teho on 4,42 MW. Piippuun menevän kaasun lämpötila on 344,1 °C. Kaasujen lämpötila tulipesässä nousee edelleen, ja lämmönsiirto siirtyy vielä enemmän säteilyosaan. Syöttöön absorboituva teho vastaa lähes laskettua mittausten mukaista tehoa. Esimerkiksi noin 10 kg/h lisäys polttokaasua ja 2 kg/h lisäys maakaasua riittäisi nostamaan simulaation perusteella absorboituvan tehon mittausten tasolle. Näin pieni ero tehossa voi hyvinkin johtua laskennan epävarmuuksista ja mittaustulosten satunnaisvirheestä. Kuvassa 20 on jälkimmäisen simulaation tulokset.



Kuva 20: Vuotoilman mallinnuksen vaikutuksia.

Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tässä tapauksessa vuotoilma selittää selkeästi happipitoisuuden mittaustulosta, ja vuotoilman osuus on merkittävä uunin läpi kulkevien kaasujen määrästä. Vuotoilmaa mallintamalla kuitenkin saatiin järkevä selitys sille, miksi mittaustulokset eroavat ilman vuotoilmaa mallinnetuista tuloksista merkittävästi. Ilman tarkempaa tutkimusta vuotoilman määrästä ja vuotokohdista uunin tarkempi mallintaminen ei ole mielekäästä. Suuri ero mallista ja mittauksista löytyy piippuun menevän kaasun lämpötilasta, jota osittain selittää se, että malli laskee kaasun lämpötilan heti konvektio-osan jälkeen, kun todellisuudessa mittausta on korkeammalla konvektio-osan jälkeen. Mittaustulokseen voi vaikuttaa vielä konvektio-osan jälkeen uuniin vuotava ilma, joka jäädyttää savukaasuja. Lisäksi korkeaa happipitoisuutta savukaasuissa selittää vielä se, että käytettäessä uunia pienellä teholla, osa polttimista ei ole päällä, mutta niiden ilmapellit ovat auki. Tällöin uuniin virtaa pohjalta ylimääräistä ilmaa hyvinkin paljon, joka nostaa happipitoisuutta savukaasuissa. Kuvan 21 käyrässä polttokaasun kulutus on sovitettu ilman ylimäärään uunissa eri tasepäivinä. Polttokaasun

kulutuksen kasvaessa päällä olevien poltinten määrä kasvaa, jolloin suurempi osa palamisilmasta menee palamiseen ja ylimääräistä ilmaa tulee pohjalta vähemmän.

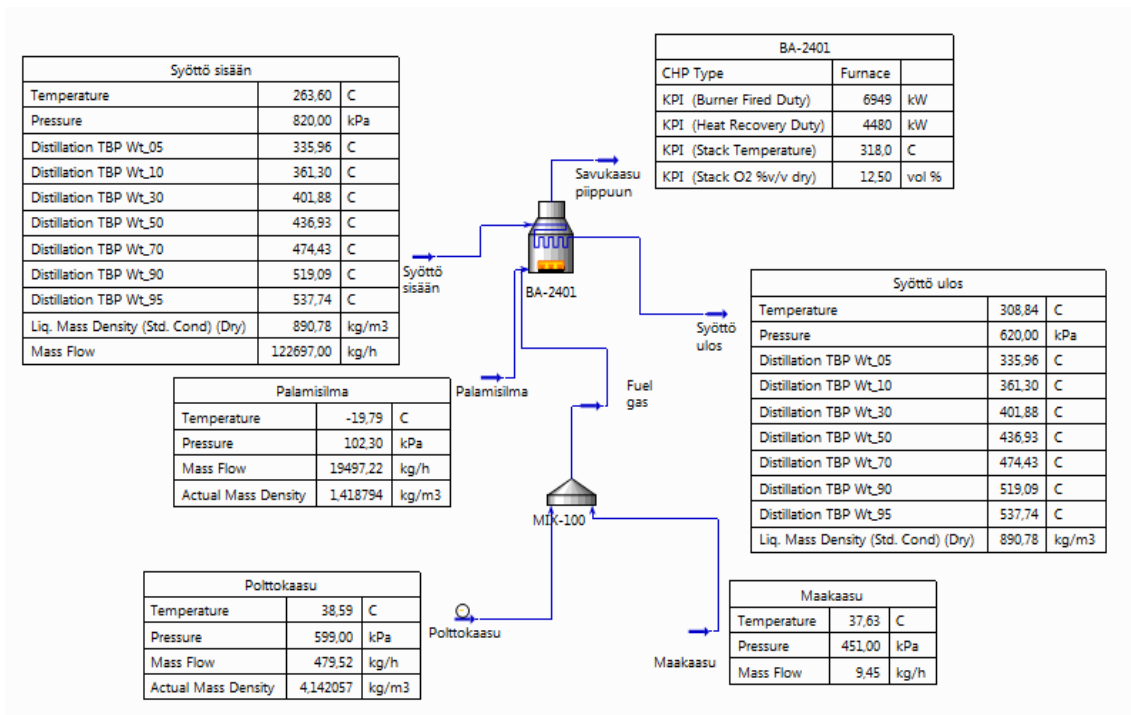


Kuva 21: Polttokaasun määrä suhteessa ilman ylimäärään.

## 6.4 Petro-SIM- malli

Myös prosessiuunin Petro-SIM- malli toteutettiin siten, että se toimii ennustusmoodissa. Tavoitteena on, että malli laskee todenmukaisen polttokaasun kulutuksen, kun FCC:n prosessioptimointimalli antaa uunilta ulostulevalle syötölle halutun lämpötila-arvon. Optimointimalli antaa tarpeen syöttöön absorboituvasta tehosta, jonka perusteella malli laskee, kuinka paljon polttokaasua tarvitaan. Polttokaasun kulutus saadaan näin mukaan työkalun kautta kustannuslaskentaan. Kaikki muu mallin tarvitsema tieto syötetään sille mittaustulosten perusteella.

Palamisilman määrän uunimalli laskee täydellisen palamisen mukaisesti polttoaineiden perusteella. Mallille syötetään tiedot kaasuvirtojen koostumuksesta, paineesta ja lämpötiloista. Maakaasulle annetaan myös massavirta. Hiilivetyisyötölle annetaan koostumus, paine, massavirta ja sisääntulolämpötila. Uunimalliin syötetään ilman ylimäärä, joka lasketaan happipitoisuuden mittauksen perusteella ja lisäksi piippuun menevän kaasun lämpötila. Kuvassa 22 näkyy uunin Petro-SIM- mallin rakenne.



Kuva 22: Tasepäivän 22.1.2019 arvot ja uunin malli.

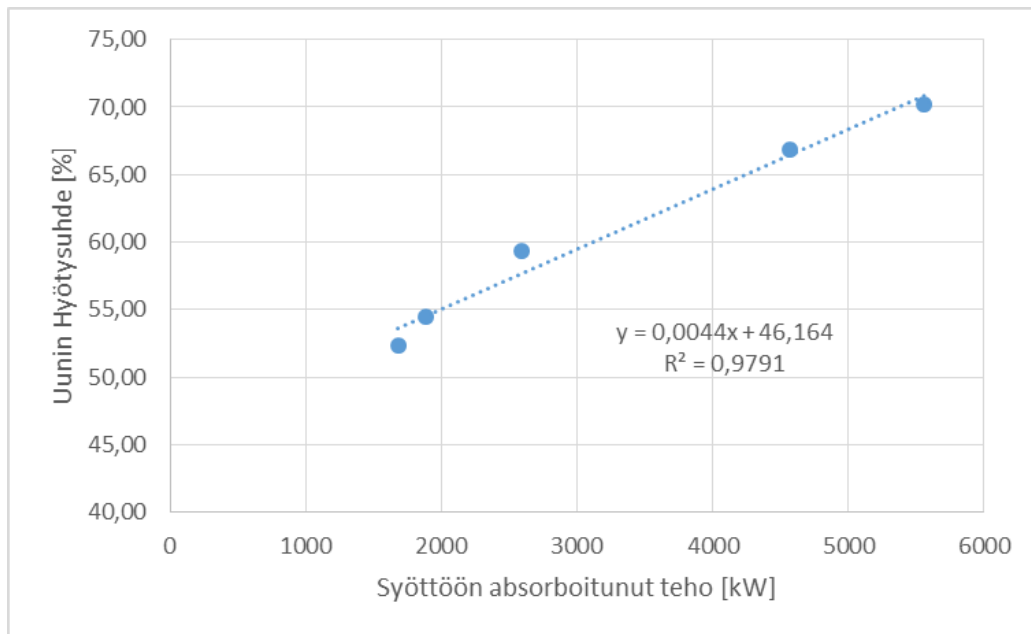
Tässä mallissa ei voida mallintaa vuotoilman määrää samalla tavoin kuin FRNC5-mallissa, joten kaikki mallille syötettävä ilma tulee polttimille. Mallille ei myöskään syötetä geometriaa. Kuvan 22 BA-2401 laskentamoduuli koostuu polttimesta ja lämmönvaihtimesta. Poltin polttaa polttoaineet täydellisesti ja malli laskee polttimen jälkeisen savukaasun lämpötilan. Tämä kaasu siirtyy mallin lämmönvaihtimeen, jossa syöttöön absorboituu optimointimallin haluama määrä tehoa. Sitten mallille syötetyn lämmönvaihtimen ulostulolämpötilan perusteella (kaasu piippuun) malli laskee, kuinka paljon polttokaasua tarvitaan, jotta lämmönsiirron jälkeen savukaasut pysyvät kyseisessä lämpötilassa. Mallia kokeiltiin viiden eri tasepäivän mittaustuloksilla, ja taulukkoon 18 on koottu simulointien tulokset.

Taulukko 18: Syöttöön absorboituneen tehon mukaan järjestetyt tulokset.

Kohde	Yksikkö	9.4.2019	29.1.2019	12.3.2019	22.1.2019	30.7.2019
Syöttöön absorboitunut teho	MW	1,55	1,82	2,53	4,49	5,41
Ulkoilman lämpötila	°C	1,99	-4,80	-7,33	-19,79	12,75
Ilman ylimäärä	%	323,85	318,32	247,55	132,90	91,57
Polttokaasu						
Tiheyskorjattu mittaus	kg/h	228,54	242,57	304,65	469,11	535,49
FNRC5	kg/h	198,36	234,36	304,92	483,12	542,12
Petro-SIM	kg/h	177,61	233,73	287,43	480,02	507,81
Kaasun lämpötila piippuun						
Mittaus	°C	255,12	268,80	291,99	318,01	333,15
FNRC5	°C	252,10	277,10	298,50	344,70	370,40
Petro-SIM	°C	334,40	280,48	308,61	301,50	382,60

Taulukon 18 tuloksista nähdään, että FNRC5 ja Petro-SIM- mallien laskemat polttokaasun massavirrat eivät täsmää kovinkaan tarkasti polttokaasun mittaustuloksen kanssa. Viimeisellä rivillä on laskettuna se lämpötila, jonka Petro-SIM haluaisi piipussa olevan, jotta polttokaasun massavirta täsmäisi mitatun määrän kanssa. Tuloksista voidaan todeta, että Petro-SIM- malli ei toimi sellaisenaan kovinkaan tarkasti. Lisäksi kokeiltiin myös tasepäiviä, jolloin polttokaasun kulutus oli mittauksen mukaan alle 150 kg/h. Tällöin kumpikaan malli ei kyennyt simulointiin, sillä syöttöön absorboitunut teho oli liian pieni.

FCC:n optimointimalliin saatiin toimiva ratkaisu kuitenkin siten, että FNRC5-mallin simulointien tuloksista muodostettiin suora uunin hyötysuhteen ja syöttöön absorboituneen tehon suhteen. Optimointimalli antaa uunimallille haluamansa tehon, jolloin uunimalli osaa suoran yhtälön avulla laskea uunin hyötysuhteen ja sitä kautta polttokaasun kulutuksen. Tällä tavoin uunimalli saatiin toimimaan riittävän tarkasti, sillä oletuksena oli simulointien perusteella, että uunin hyötysuhde paranee polttokaasun kulutuksen myötä, kun uunissa on vähemmän ylimääräistä ilmaa. Kuvassa 23 näkyy FNRC5- simulointien perusteella muodostettu suora.



Kuva 23: Uunin hyötysuhde syöttöön absorboituneen tehon funktiona

## 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkasteltiin massa- ja energiataseen täsmäämistä, sekä luotiin tasetäsmäysmalli jätelämpökattilalle, jonka avulla kattilan lämmönsiirtimille määritettiin FRNC5-ohjelmalla konduktanssit ja konduktanssien avulla toteutettiin kattilasta höyryn tuotantoa ennustava Petro-SIM- malli. Prosessiuunista tasetäsmäysmallia ei voitu tehdä, mutta uunin toimintaa mallinnettiin FNRC5-mallilla sekä siitä luotiin Petro-SIM- ohjelmaan polttokaasun kulutusta ennustava malli.

### 7.1 Jätelämpökattila BF-2401

Jätelämpökattilan mallinnuksen yhteydessä havaittiin, että kaasun sisääntulon lämpötila oli mittaustuloksissa kymmeniä asteita matalampi, kuin mitä saatiin laskemalla häviöiden kautta. Suositeltavaa olisi, että kylmät pinnat otettaisiin huomioon ja mitta-anturi sijoitettaisiin kohtaan, jossa anturi ei näe kylmiä pintoja, jolloin mittaustulos olisi luotettavampi.

Ulospuhalluksen määrä on jätelämpökattilan mallien kannalta oleellista, sillä se vaikuttaa selkeästi täsmäyksen tuloksiin. Työssä arvioitu määrä on noin kuusi prosenttia kattilan tuottamasta höyrystä. Täsmäyksen tulokset vaikuttavat myös muiden mallien tuloksiin, joten ulospuhalluksen määrän tarkentaminen voisi vielä parantaa mallin tarkkuutta.

Jätelämpökattilan kaasun massavirtaa mitataan termisillä virtausmittareilla ja niiden tarkkuus perustuu useamman mitta-anturin käyttöön. Mikäli kaikki anturit eivät toimi, mittaustulos ei ole luotettava. Työssä ei verrattu täsmäyksen tuloksia näihin mittauksiin, sillä työn aikana mitta-antureista kaksi kappaletta neljästä oli epäkunnossa, jolloin mittaustulosta pidettiin lähtökohtaisesti epätarkkana. Mahdollisesti myöhemmin, kun mittaukset ovat toiminnassa, ne voitaisiin lisätä täsmäysmalliin. Kyseisten mittausten tarkkuus kannattaisi tarkistaa myös päästökaupan vuoksi, sillä niiden perusteella maksetaan osa yksikön päästöistä.

Työhön luodulla Matlab-täsmäysmallilla ei kyetty ottamaan huomioon ekonomaiserin höyrystämistä. Tämä näkyy siinä, että täsmäyksen perusteella ekonomaiserin teho on

jatkuvasti noin 100-200 kW pienempi, kuin FRNC5-malli laskee. Vaikutus täsmäyksen tuloksiin ei itsessään ole kovin suuri, mutta vaikuttaa määritettyihin konduktansseihin ja sitä kautta Petro-SIM-mallin tuloksiin. Täsmäysmallin osalta jatkokehitysidea olisi tarkentaminen ekonomaiserin höyrystämisen osalta.

Jätelämpökattilan lämpöhäviöt laskettiin karkeasti ja lämpöhäviölaskennan tulokset ovat suuntaa antavia. Täsmäys- ja simulointimalleja voisi tarkentaa lämpöhäviöiden osalta. Lämpöhäviöiden tarkka laskenta on suositeltavaa myös siksi, että voidaan tarkastella lämpöeristyksen riittävyttä.

## **7.2 Prosessiuuni BA-2401**

Uunin osalta tärkeimpänä havaintona on se, että uunia ajetaan todella suurella ilman ylimäärällä, jolloin polttokaasua kuluu turhaan ilman lämmittämiseen. Tätä voitaisiin vähentää tutkimalla uunin vuotoilmakohdat ja tiivistämällä ne, sekä sulkemalla tarvittaessa käyttämättömien poltinten ilmapellit, jotta uuniin ei sitä kautta vuoda turhaa ilmaa.

Uunin mallintaminen ilman tarkempaa tietämystä vuotoilman määrästä sekä vuotokohdista on epätarkkaa, joten myös mallintamisen vuoksi on suositeltavaa tarkastella uunin vuotokohtia. Uunista tehtiin toimiva Petro-SIM-malli, mutta mikäli ajotapaa muutetaan, on tehty korrelaatio päivitettävä vastaamaan kyseistä ajotilannetta.

Kaikkina simulointiin käytettyinä tasepäivinä savukaasun happipitoisuus oli korkea, joten voidaan todeta, ettei uunin toiminnan monitorointi ja sitä kautta optimaalisen ajotilanteen hakeminen ole jatkuvaa. Todettakoon, että uunin polttokaasun kulutus on jalostamon mittakaavassa pieni, jolloin siihen ei välttämättä haluta käyttää resursseja. Jalostamolla on kuitenkin muita uuneja, jotka kuluttavat huomattavasti enemmän polttokaasua, joiden monitoroinnin kautta tapahtuvalla optimoinnilla voitaisiin saavuttaa mahdollisesti kustannussäästöjä.

Työn kohteena oleva luonnonvetouuni ei sellaisenaan sovellu energiataseen täsmäykseen ilman tarvittavia mittauksia palamisilmasta ja savukaasuista. Jos jalostamolla halutaan

tarkastella prosessiuuneja tasetäsmäyksen avulla, suositeltavaa on valita kohde, josta tarvittavat mittaukset löytyvät.

## LÄHDELUETTELO

B.W. Butler ja K.S. Shannon.2003. A review of error associated with thermocouple temperature measurement in fire environments. USDA Forest Service, Fire Sciences Laboratory. [Verkkojulkaisu], [Viitattu 5.8.2019]. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/228496160\\_A\\_review\\_of\\_error\\_associated\\_with\\_thermocouple\\_temperature\\_measurement\\_in\\_fire\\_environments/link/55c2276608ae6b975673e3b5b/download](https://www.researchgate.net/publication/228496160_A_review_of_error_associated_with_thermocouple_temperature_measurement_in_fire_environments/link/55c2276608ae6b975673e3b5b/download)

Childs, Peter R. N. 2001. Practical temperature measurement. Butterworth-Heinemann. 372s. ISBN-13: 978-0750650809

Clyde Bergemann Power Group. Products and solutions: Retractable Sootblower. [Verkkojulkaisu], [Viitattu 15.2.2019]. Saatavilla: <https://www.cbpg.com/en/products-solutions/boiler-efficiency/load-boiler-cleaning-systems/economiser/retractable-sootblower>

Clyde Bergemann Power Group. Products and solutions: Rotating Element Sootblower. [Verkkojulkaisu], [Viitattu 15.2.2019]. Saatavilla: <https://www.cbpg.com/en-gb/products-solutions/boiler-efficiency/load-boiler-cleaning-systems/petrochemical-applications/rotating-element-sootblower>

Eurachem/Citac. 2012. Quantifying uncertainty in analytical measurements. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 10.3.2019] Saatavilla: [https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012\\_P1.pdf](https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1.pdf)

Emerson. 2013. The Engineer's Guide to Industrial Temperature Measurement. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 1.6.2019] Saatavilla: <http://instrumentationandcontrol.net/emerson-2013-the-engineers-guide-to-industrial-temperature-measurement/>

Globalspec. 2019. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 6.3.2019] Saatavilla: [https://www.globalspec.com/learnmore/data\\_acquisition\\_signal\\_conditioning/sensor\\_transmitters/sensor\\_transmitters](https://www.globalspec.com/learnmore/data_acquisition_signal_conditioning/sensor_transmitters/sensor_transmitters)

Huhtinen et al. 1994 Höyrykattilatekniikka. Painatuskeskus Oy. ISBN 951-37-1327-X  
379 s.

IEC 584. 1995. Thermocouples. International Electrotechnical Commission. Toinen painos. Geneve. 152 s.

IEC 751. 1995 Industrial Platinum Resistance Thermometer Sensors. International Electrotechnical Commission. Liite 2 Geneve. 7 s.

The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). 2003. Advisory Note No. 1 Uncertainties in Enthalpy. [Verkkójulkaisu] [Viitattu 15.3.2019] Saatavilla: <http://www.iapws.org/relguide/Advise1.pdf>

JCGM. 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurements. [Verkkójulkaisu] [Viitattu 5.3.2019] Saatavilla: [https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)

John R. Taylor. 1997. An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. University Science Books. 327s. ISBN-13: 978-0935702750

Jose A. Romagnoli ja Mabel Christina Sanchez. 2000. Data processing and reconciliation for chemical process operations. Academic Press. 270s. ISBN 0-12-594460-8

Karimi, Amir ja Manteufel, Randall. 2013. Influence of uncertainties and assessment of significant digits in thermodynamics. [Verkkójulkaisu] [Viitattu 1.6.2019] Saatavilla: <https://www.asee.org/public/conferences/20/papers/7906/download>

Kernler, Dan. 2014. [Viitattu 6.3.2019] Saatavilla: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empirical\\_Rule.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empirical_Rule.PNG)

Mäkelä Tea. 2018. Kiertokaasukompressorin monitorointi simulointimallilla. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Kemianteekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta 107s.

Narasimhan S ja Jordache C. 2000. Data Reconciliation & Gross Error Detection: An intelligent use of process data. Gulf Publishing company. 402s. ISBN 0-88415-255-3

National Institute of Standards and Technology (NIST). 2019. Chemistry Webbook. [Verkkotietokanta] [Viitattu 13.6.2019] Saatavilla: <https://webbook.nist.gov/>

Neste Oyj. 2001. Jätelämpökattilan toiminta- ja huoltomanuaali. Nesteen sisäinen dokumentti.

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. Opetushallitus. 170s. ISBN-13: 978952132198.

Roberts I.L., Coney J.E.R. ja Gibbs B.M.. 2011. Estimation of radiation losses from sheathed thermocouples. Applied Thermal Engineering 31, 2262-2270s. Elsevier Ltd. ISSN 1359-4311

Scheller Gerd ja Krummeck Stefan. 2018. Measurement uncertainty of a temperature measuring chain. Jumo GmbH & Co. 164s. ISBN 978-3-935742-13-9.

Teir Sebastian ja Kulla Antto. 2003. Steam Boiler Technology. TKK-ENY-11, Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering, Espoo. 215s. ISBN 951-22-6759-4

United Kingdom Accreditation Service (UKAS). 2012. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. [Verkkójulkaisu] [Viitattu 15.3.2019] Saatavilla: [https://www.ukas.com/download/publications/publications-relating-to-laboratory-accreditation/M3003\\_Ed3\\_final.pdf](https://www.ukas.com/download/publications/publications-relating-to-laboratory-accreditation/M3003_Ed3_final.pdf)

Vaisala. 2016. Sovellusesite. [Verkkójulkaisu] [Viitattu 7.3.2019] Saatavilla:<https://www.vaisala.com/fi/file/30901/download?token=a9VE8F-1>

Vakkilainen Esa K. 2016. Steam Generation from Biomass - Construction and Design of Large Boilers. Butterworth-Heinemann. 159s. ISBN 978-01-2804-3899.

Vakkilainen Esa K. 2018. Höyrykattilatekniikka- kurssin luentomateriaali. LUT Energia. Höyrykattilatekniikka [Viitattu 15.2.2019]

WIKA Instrument Corporation. 2008. Pressure & Temperature Measurement., U.S. Edition. 417s. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 5.8.2019] Saatavilla: [https://www.wika.us/upload/BR\\_RF\\_Handbook\\_en\\_us\\_18447.pdf](https://www.wika.us/upload/BR_RF_Handbook_en_us_18447.pdf)

W. Wagner ja A. Pruss. 2002. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. Journal Of Physical And Chemical Reference Data 2002 Jun, Vol.31. 398 s. ISSN 0047-2689 15297845.

N. Hamamatsu et al. 2017. High-sensitivity Silicon Resonant Strain Sensor. Yokogawa Technical Report English Edition Vol. 60 No. 1. 43-48s. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 15.3.2019] saatavilla: <https://web-material3.yokogawa.com/rd-te-r06001-010.pdf>

## LIITTEET

### Liite 1: Matriisit $A_x$ , $A_u$ ja $\Psi$ .

$A_x =$  sarakkeet 1-10

$$\begin{bmatrix}
 1 & -1 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (cp, t(T12-T13)) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & (h3-h5) & 0 & 0 & 0 & (cp, h(T13-T14)) & 0 & 0 & 0 \\
 (h1-h3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (cp, e(T14-T15)) & 0 & 0 & 0 \\
 h1 & -h3 & (h5-h3) & 0 & 0 & 0 & (cp, tk(T12-T15)) & 0 & 0 & 0 \\
 h3 & -h3 & 0 & h7 & h10 & -h11 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \left( \frac{m6 * h3}{m4^2} - \frac{m6 * h6}{m4^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \left( \frac{h6}{m8} - \frac{h7}{m8} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$

Sarakkeet 11-19

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -m8 & 0 & 0 & (m12 * cp, t) & 0 \\
 0 & m4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 m1 & -m1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-m12 * cp, e) \\
 m1 & -m3 & 0 & m7 & 0 & m10 & -m11 & (m12 * cp, k) & (-m12 * cp, k) \\
 0 & (m1 - m3 - m4) & -m6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \left( -1 + \frac{m6}{m4} \right) & \left( -\frac{m6}{m4} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \left( -1 + \frac{m7}{m8} \right) & \left( -\frac{m7}{m8} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$



## Liite 2: Täsmäyksen tulokset lopuilta tasepäiviltä.

5.2.2019					12.2.2019				
Muuttuja		Yksikkö	Täsmätyt arvot	Alkuperäiset arvot	Muuttuja		Yksikkö	Täsmätyt arvot	Alkuperäiset arvot
Syöttövesi	m1	kg/s	10,40	10,25	Syöttövesi	m1	kg/s	10,24	10,12
Ulospuhallus	m3	kg/s	0,72	0,72	Ulospuhallus	m3	kg/s	0,72	0,72
Kiertovesi A	m4	kg/s	61,58	61,58	Kiertovesi A	m4	kg/s	61,75	61,75
Lisähöyry	m7	kg/s	2,62	2,64	Lisähöyry	m7	kg/s	2,34	2,37
Lauhde	m10	kg/s	0,23	0,23	Lauhde	m10	kg/s	0,23	0,23
Tulistettu höyry verkkoon	m11	kg/s	12,53	12,29	Tulistettu höyry verkkoon	m11	kg/s	12,09	11,93
Kaasu	m12	kg/s	54,37	55,74	Kaasu	m12	kg/s	53,50	54,64
Kiertovesi B	m13	kg/s	61,58	61,32	Kiertovesi B	m13	kg/s	61,75	61,46
Kiertovesi C	m14	kg/s	61,58	61,26	Kiertovesi C	m14	kg/s	61,75	61,38
Lisähöyry	m15	kg/s	2,62	2,35	Lisähöyry	m15	kg/s	2,34	2,08
Syöttövesi	h1	kJ/kg	611,47	611,72	Syöttövesi	h1	kJ/kg	611,27	611,48
Lierion vesi	h3	kJ/kg	873,91	876,43	Lierion vesi	h3	kJ/kg	873,53	876,19
Lierion höyry	h6	kJ/kg	2791,40	2793,92	Lierion höyry	h6	kJ/kg	2791,23	2793,89
Lisähöyry	h7	kJ/kg	2793,43	2793,64	Lisähöyry	h7	kJ/kg	2793,39	2793,55
Tulistettu höyry	h9	kJ/kg	3238,95	3239,82	Tulistettu höyry	h9	kJ/kg	3240,05	3240,94
Lauhde	h10	kJ/kg	375,95	375,95	Lauhde	h10	kJ/kg	374,33	374,32
Tulistettu höyry verkkoon	h11	kJ/kg	3187,85	3186,27	Tulistettu höyry verkkoon	h11	kJ/kg	3187,47	3186,01
Kaasu sisään	T12	°C	681,06	684,13	Kaasu sisään	T12	°C	678,44	680,94
Kaasu piippuun	T15	°C	260,30	260,09	Kaasu piippuun	T15	°C	257,98	257,80
Kylläinen höyry lieriöstä	m6	kg/s	9,68		Kylläinen höyry lieriöstä	m6	kg/s	9,52	
Höyry tulistimeen	m8	kg/s	12,30		Höyry tulistimeen	m8	kg/s	11,87	
Vesi-höyryseos	h5	kJ/kg	1175,20		Vesi-höyryseos	h5	kJ/kg	1169,30	
Höyry tulistimeen	h8	kJ/kg	2791,84		Höyry tulistimeen	h8	kJ/kg	2791,66	
Kaasu tulistimen jälkeen	T13	°C	598,22		Kaasu tulistimen jälkeen	T13	°C	596,76	
Kaasu höyrystimen jälkeen	T14	°C	305,69		Kaasu höyrystimen jälkeen	T14	°C	303,49	
								303,4888	

26.3.2019					9.4.2019				
Muuttuja		Yksikkö	Täsmätyt arvot	Alkuperäiset arvot	Muuttuja		Yksikkö	Täsmätyt arvot	Alkuperäiset arvot
Syöttövesi	m1	kg/s	10,39588	10,25189	Syöttövesi	m1	kg/s	10,74	10,70
Ulospuhallus	m3	kg/s	0,719444	0,719444	Ulospuhallus	m3	kg/s	0,72	0,72
Kiertovesi A	m4	kg/s	61,58374	61,58374	Kiertovesi A	m4	kg/s	60,76	60,76
Lisähöyry	m7	kg/s	2,619258	2,64218	Lisähöyry	m7	kg/s	3,59	3,63
Lauhde	m10	kg/s	0,230182	0,229256	Lauhde	m10	kg/s	0,11	0,11
Tulistettu höyry verkkoon	m11	kg/s	12,52587	12,29412	Tulistettu höyry verkkoon	m11	kg/s	13,72	13,53
Kaasu	m12	kg/s	54,37214	55,73764	Kaasu	m12	kg/s	56,54	56,99
Kiertovesi B	m13	kg/s	61,58374	61,32494	Kiertovesi B	m13	kg/s	60,76	60,45
Kiertovesi C	m14	kg/s	61,58374	61,26405	Kiertovesi C	m14	kg/s	60,76	60,36
Lisähöyry	m15	kg/s	2,619258	2,346592	Lisähöyry	m15	kg/s	3,59	3,26
Syöttövesi	h1	kJ/kg	611,4679	611,7227	Syöttövesi	h1	kJ/kg	620,51	620,59
Lieriön vesi	h3	kJ/kg	873,9144	876,4315	Lieriön vesi	h3	kJ/kg	875,77	878,27
Lieriön höyry	h6	kJ/kg	2791,403	2793,92	Lieriön höyry	h6	kJ/kg	2791,63	2794,13
Lisähöyry	h7	kJ/kg	2793,431	2793,643	Lisähöyry	h7	kJ/kg	2793,72	2793,83
Tulistettu höyry	h9	kJ/kg	3238,947	3239,816	Tulistettu höyry	h9	kJ/kg	3207,68	3208,62
Lauhde	h10	kJ/kg	375,9535	375,9462	Lauhde	h10	kJ/kg	384,20	384,20
Tulistettu höyry verkkoon	h11	kJ/kg	3187,847	3186,272	Tulistettu höyry verkkoon	h11	kJ/kg	3186,09	3184,87
Kaasu sisään	T12	°C	681,0586	684,1341	Kaasu sisään	T12	°C	682,99	684,04
Kaasu piippuun	T15	°C	260,3043	260,0884	Kaasu piippuun	T15	°C	265,18	265,10
Kylläinen höyry lieriöstä	m6	kg/s	9,676434		Kylläinen höyry lieriöstä	m6	kg/s	10,02	
Höyry tulistimeen	m8	kg/s	12,29569		Höyry tulistimeen	m8	kg/s	13,61	
Vesi-höyryseos	h5	kJ/kg	1175,203		Vesi-höyryseos	h5	kJ/kg	1191,81	
Höyry tulistimeen	h8	kJ/kg	2791,835		Höyry tulistimeen	h8	kJ/kg	2792,18	
Kaasu tulistimen jälkeen	T13	°C	598,2164		Kaasu tulistimen jälkeen	T13	°C	600,83	
Kaasu höyrystimen jälkeen	T14	°C	305,6856		Kaasu höyrystimen jälkeen	T14	°C	309,10	