

PÖYTÄKIRJA
LTR 2/2023

Suomen Soodakattilayhdistys ry

LIPEÄTYÖRYHMÄN KOKOUS 2/2023

AIKA 17.3.2023, klo 12:00 – 14:00

PAIKKA MS Teams

LÄSNÄ (vihreä) / POISSA (punainen)

Janne Mäkelä
Tuuli Oljakka
Markus Engblom

Juha Hakala
Camilla Karlemo
Teppo Pakarinen
Petri Qvintus

Jaakko Rautala
Esa Vakkilainen
Satu Korteniemi

Toni Orava
Kati Chan

Kaarina Fagerholm
Jussi Saari

Sakari Vuorinen

Stora Enso Oyj, Imatra, Puheenjohtaja
Andritz Oy, Helsinki, Varapuheenjohtaja
Åbo Akademi
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo
Valmet Technologies Oy, Helsinki
Stora Enso Oyj, Varkaus
AFRY Finland Oy, Vantaa
Metsä Fibre Oy, Rauma
LUT-yliopisto, Lappeenranta
Eurofins Nab Labs Oy, Helsinki
UPM-Kymmene Oyj, Kymi
UPM-Kymmene Oyj, Kymi
KCL (Keskuslaboratorio Oy), Espoo
LUT-yliopisto, Lappeenranta

AFRY Finland Oy, Vantaa, Sihteeri

PÖYTÄKIRJA LTR 2/2023

1 KOKOUKSEN AVAUS & LÄSNÄOLIJAT

Kokous avattiin ja läsnäolijat kirjattiin klo 12:01.

2 KILPAILULAINSÄÄDÄNTÖ

Sihteeri muistutti kokouksen osallistujia kilpailulainsäädännöstä hallituksen kanssa sovitulla tavalla.

Huomio Suomen Soodakattilayhdistys ry:n toimintaan osallistuville. Suomen Soodakattilayhdistys ry noudattaa kaikessa toiminnassaan kilpailulainsäädäntöä, joka asettaa rajoitukset järjestön toimintaan. Yhdistyksen järjestämissä kokouksissa tai muissa tapahtumissa ei keskustella aiheista, joilla voi olla vaikutusta yritysten kilpailukäyttäytymiseen. *Toiminnan arvioinnissa käytetään kilpailulain 5 § säännöstä: sellaiset elinkeinonharjoittajien väliset sopimukset, elinkeinonharjoittajien yhteenliittymien päätökset sekä elinkeinonharjoittajien yhdenmukaistetut menettelytavat, joiden tarkoituksena on merkittävästi estää, rajoittaa tai vaikeuttaa kilpailua tai joista seuraa, että kilpailu merkittävästi estyy, rajoittuu tai vääristyy, ovat kiellettyjä.*

Tee seuraavia asioita: Jokaisella toimintaan osallistuvalla on velvollisuus puuttua saman tien asiaan, mikäli havaitsee lainvastaista toimintaa. Pidä kirjaa kokouksen kulusta ja huolehdi pöytäkirjojen oikeellisuudesta.

Älä tee seuraavia asioita: Älä keskustele missään yhdistyksen toimintaan liittyvässä yhteydessä kilpailullisesti arkaluontoisista asioista tai vaihda niistä tietoja. Tällaisia asioita ovat mm. hinnat, asiakkaat, tuotantomäärät, investointisuunnitelmat ja seisakkiajankohdat. Älä luo käytäntöjä, sääntöjä tai ohjeistuksia, jotka vaikuttavat jäsenten mahdollisuuksiin kilpailla toisten yritysten kanssa.

3 ASIALISTA

1. KOKOUKSEN AVAUS & LÄSNÄOLIJAT
2. KILPAILULAINSÄÄDÄNTÖ
3. ASIALISTA
4. LTR:N KOKOONPANO 2/2023
5. EDELLISEN KOKOUKSEN PÖYTÄKIRJA
6. PROJEKTIT
7. MUIDEN TYÖRYHMIEN KUULUMISET
8. MUUT ASIAT
9. SEURAAVA KOKOUS

Ei muutoksia asialistaan.

PÖYTÄKIRJA LTR 2/2023

4 LIPEÄTYÖRYHMÄN KOKOONPANO 2/2023

Janne Mäkelä	Stora Enso Oyj, Imatra, Puheenjohtaja
Tuuli Oljakka	Andritz Oy, Kotka, Varapuheenjohtaja
Jaakko Rautala	Metsä Fibre Oy, Rauma
Teppo Pakarinen	Stora Enso Oyj, Varkaus
Camilla Karlemo	Valmet Technologies Oy, Tampere
Toni Orava	UPM Oyj, Kymi
Kati Chan	UPM Oyj, Kymi
Esa Vakkilainen	LUT-yliopisto, Lappeenranta
Markus Engblom	Åbo Akademi, Turku
Juha Hakala	VTT Oy, Espoo
Satu Korteniemi	Eurofins Nab Labs Oy, Helsinki
Kaarina Fagerholm	KCL (Keskuslaboratorio Oy), Espoo
Petri Qvintus	AFRY Finland Oy, Tampere
Sakari Vuorinen	AFRY Finland Oy, Vantaa, sihteeri

Sihteeri oli saanut Camilla Karlemolta sähköpostia liittyen sijaisen käyttöön tulevaisuudessa jos on itse estynyt. Työryhmä totesi että Aino Vettenranta on tervetullut työryhmän kokouksiin Camillan sijaisena. Sijaisen käyttö muidenkin työryhmäläisten osalta on ok mikäli sille koetaan tarvetta.

Soodakattilayhdistyksen vuosikokousta silmällä pitäen, sihteeri kartoitti lipeätyöryhmäläisten halukkuutta jatkaa työryhmän toiminnassa. Vihreällä värillä on korostettuna ne työryhmän jäsenet jotka ovat valmiita jatkamaan aktiivisena työryhmän jäsenenä myös jatkossa. Keltaisella värillä korostettuna ne joilta täytyy vielä saada vahvistus jatkoa ajatellen.

5 EDELLISEN KOKOUKSEN PÖYTÄKIRJA

Kokouksen 1/2023 pöytäkirja käytiin läpi. Pöytäkirja hyväksyttiin muutoksitta.

Uusiin projektiehdotuksiin liittyen keskusteltiin että sopiva projekti voisi olla ”Kapan vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin yleisesti”, jossa on mukana tarkastelussa sekä matalat että korkeat kapat.

PÖYTÄKIRJA
LTR 2/2023

6 PROJEKTIT

6.1 Käynnissä olevat projektit

Tulistimien maksimipintalämpötilalisän muutos kattilan koon funktiona

Esa Vakkilainen esitteli projektin tilannetta. Kaikki data on saatu ja suomalaisten kattiloiden lisäksi on hyödynnetty myös Eldoradon dataa. Kun siirrytään isompaan kattilaan, niin seinien välinen etäisyys kasvaa ja lämpötilaprofiili muuttuu. Tulistimissa esiintyy lämpötilan heiluntaa ja lämpötilavainoutta, eli tulistimen toiset putket käy kuumempina kuin toiset. Yleisesti ottaen tulistimen keskimmäiset paneelit ja reunimaiset putket käyvät kuumempina ja viruvat nopeammin. Erityisesti pitkällä ajanjaksolla tällä on merkitystä. Lisäksi Esa pohti että onko kattiloiden/tulistimien ostohtekellä sovittua tapaa siitä että miten tulistimen lämpötilaeroista viestitään kattilan ostajien/toimittajien välillä.

Esa on lähettänyt työryhmälle raportin projektin vaiheista 1 & 2 (Liite 1). Raporttiin toivotaan työryhmän jäseniltä kommentteja mahdollisimman pian. Kommentit käydään läpi työryhmän seuraavassa palaverissa.

Projektin seuraavassa vaiheessa 3 olisi tarkoitus selvittää ”vasen-oikea” ja ”ylä-ala” -suuntien lämpötilaprofiili CFD-mallinnusta apuna käyttäen. Mallin pohjalta voitaisiin määrittää muun muassa se että miten tulistimen reunimaiset putket mitoitetaan painelaite- ja kestävyysmielessä. Viimeistään seuraavassa LTR:n kokouksessa tulee keskustella projektin jatkoon liittyvät asiat (vaiheet 3&4) hyvin läpi, jotta syksyllä on hyvä valmius jatkaa projektia jos ja kun saadaan hallitukselta vihreää valoa. Esa lupasi järjestää erillisen palaverin vielä projektiin liittyen ennen seuraavaa LTR:n kokousta.

Sihteeri mainitsi vielä että olisi hyvä olla dataa tulistimen lämpötiloista myös kattilan ylösajotilanteista, koska silloin putket ovat usein lauhdelastissa ja ovat siten oletettavasti paljon kuumempia kuin tasaisessa ajossa, jossa höyry kulkee putkien läpi tasaisesti. Ylösajotilanteet saattavat kuormittaa tulistimen putkistoja jopa enemmän kuin kattilan koon aiheuttama lämpötilaprofiilin muutos. Esa voisi pyytää tehtailta vielä lämpötiladataa ylösajotilanteista ja sisällyttää sen raporttiin.

6.2 Projektiehdotukset

Korkean kappaluvun vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin

Projekti on ollut ehdotuksena jo aika pitkään. Työryhmä totesi että pyydetään tarjous AFRYltä projektista. Toiveena olisi että oltaisiin saatu tarjous seuraavaan palaveriin mennessä. Työryhmän puolelta vaikeaa löytää projektipäällikköä, joten sellaista ei valita. Pyydettiin Kaarinalta ja Satulta päivitykset analyysitarjouksiin maaliskuun loppuun mennessä. Sihteeri kutsuu koolle palaverin ilman Eurofinsin ja KCL:n läsnäoloa kun tarjoukset on saatu ja sihteeri on kerennyt tekemään tarjousvertailun valmiiksi.

Näytteiden otto on erittäin tärkeä vaihe projektin tulosten kannalta, joten siihen tulisi luoda ohjeistus viimeistään seuraavassa työryhmän palaverissa. Ohjeistuksella varmistetaan että käytännöt näytteiden otosta ovat mahdollisimman yhdenmukaiset eri tehtaiden välillä ja että jokainen tehdas ottaa näytteet

PÖYTÄKIRJA LTR 2/2023

varmasti täysin oikeasta paikasta. Tehtaiden vastuulla on pitää huoli siitä että ohjeistuksia on noudatettu näytteiden otossa.

Keskusteltiin myös referenssinäytteistä ja pohdittiin että olisi hyvä jos tehtailta löytyisi tuloksia samoista näytteenottopisteistä matalamman kappaluvun ajoilta. Lopuksi korostettiin vielä että näytteet otetaan laihalipeästä, välilipeästä ja polttolipeästä (ei vahvalipeästä).

1. Projektin tavoite

- a. Soodakattilayhdistys on 1990- ja 2010-luvuilla teettänyt useita tutkimuksia, joissa on tutkittu suomalaisten lipeiden arvoja. Näissä tutkimuksissa ei juurikaan ole käsitelty mustalipeää, joka olisi peräisin korkean kappaluvun keitosta. Valkaisematonta massaa on kuitenkin ryhdytty tuottamaan aiempaa useammalla tehtaalla kartonkikonekonversioiden takia. Olisikin mielenkiintoista tietää, millaisia ominaisuuksia näillä matalan orgaanisen aineen mustalipeillä on.

2. Projektisuunnitelma

- a. Tehtaiden halukkuuden kartoitus => SE Varkaus, SE Oulu, MM Kotkamills Kotka
- b. Tarjoukset laboratorioilta halutuista analyyseistä + kilpailutus (Eurofins & KCL)
- c. Ohjeistuksen laatiminen tehtaille (LTR)
- d. Työn tekijän kartoittaminen (AFRY? Joku muu?)
- e. Raportin julkaisu ja esitleminen LTR:lle + Soodakattilapäivillä 2023 tai 2024

3. Projektin tekijä(t)

- a. Projektipäällikkö: AFRYltä tarjous
- b. Muut: AFRYltä tarjous

4. Projektin kustannukset

- a. Arvio vuodelle 2023: 40 000 € (alustava)
- b. Arvio vuodelle 2024: 20 000 € (alustava)

5. Projektin aikataulu

- a. Alku: 1.5.2023 (alustava)
- b. Valmis: 1.11.2023 (alustava)

6. Tilanne

- a. Hallitukselta on saatu siunaus projektille ja vuoden 2023 budjettiin on varattu 40 000€ työlle. Odotetaan tarjousta AFRYltä ja

Muita ehdotuksia

- Kapan vaikutus mustalipeän ominaisuuksiin.
 - o Viskositeetti, BPR, HHV, perusanalyysit, yms.
 - o Projekti sisältäisi sekä matalan kapan, ”normaalin kapan” ja korkean kapan ominaisuuksien vertailua.

PÖYTÄKIRJA LTR 2/2023

7 MUIDEN TYÖRYHMIEN KUULUMISET

KTR

- Käynnissä olevat projektit
 - Compound-putkien säröily ja vauriomekanismit
 - S0-suosituksen käännös englanniksi
- Projektiehdotukset
 - Soodakattiloiden käytettävyyden ja luotettavuuden arviointi (yhd. ATR)
 - Selvitys soodakattiloiden vuorausten kuivumisajoista

YTR

- Käynnissä olevat projektit
 - Hajukaasusuosituksen käännös (Grano)
 - CCUS-diplomityö (LUT)
 - Opinnäytetyölistaus (AFRY)
 - Viherlipeäsakan POP-yhdisteet
- Projektiehdotukset
 - Lentotuhkan hyötykäyttö

ATR

- Käynnissä olevat projektit
 - Kattilalaitoksen sähkötekniset turvajärjestelmät –päivitys, kevät 2023
- Projektiehdotukset
 - OPC UA:n hyödyntäminen (järjestelmien yhteensopivuus)
 - Soodakattilan käytettävyyden ja luotettavuuden arviointi (yhd. KTR)
 - Lipeäkierron jatkuvatoimisten mittalaitteiden luotettavuus

OTR

- Tulevia tapahtumia
 - Vuosikokous
 - 20.4.2023, Hotelli Ilves, Tampere
 - Soodakattilapäivä
 - 2.11.2023, Paasitorni, Helsinki
 - 60-vuotisjuhlaseminaari
 - 5.-7.6.2024, Helsinki-Tukholma-Helsinki -risteily

8 MUUT ASIAT

Ei muita asioita.

PÖYTÄKIRJA
LTR 2/2023

9 SEURAAVA KOKOUS

Seuraava kokous LTR 3/2023
- Aika: ke 26.4.2023, klo 11:30 – 15:00 (Lounas 11:30 - 12:15 Jaakontalolla)
- Paikka: Jaakontalo, Vantaa / MS Teams

Vakuudeksi

Sakari Vuorinen

PÖYTÄKIRJA
LTR 2/2023

LIITTEET

**Tulistimien maksimipintalämpötilalisän muutos kattilan
koon funktiona**

Tulistinprojekti Osat I & II

LUT yliopisto
LUT University

LUT School of Energy Systems

LUT Scientific and Expertise Publications
Raportit ja selvitykset – Reports, yy

Jussi Saari, Esa Vakkilainen

Tulistimien maksimipintalämpötilalisän muutos kattilan
koon funktiona

Tulistinprojekti Osat I & II

ISBN 978-952-265-xxxx
ISSN-L 2243-3384, ISSN 2243-3384

Lappeenranta 2023

Tiivistelmä

Jussi Saari, Esa Vakkilainen

**Tulistimien maksimipintalämpötilalisän muutos kattilan koon funktiona :
Tulistinprojekti, osa 2 Tulistinprojekti, osa 2** Lappeenranta 2023

34 pages

Reports

ISBN 978-952-265-xxxx . ISSN-L 2243-3384, ISSN 2243-3384

Soodakattiloiden valmistajat käyttävät tulistinmitoituksessaan ohjetta ”Tulistimen maksimipintalämpötila on xxx oC korkeampi kuin keskimääräinen höyryn ulostulolämpötila ko. tulistimesta. Soodakattilayhdistyksen tulistinprojektissa pyritään mittauksien ja mallituksien avulla ehdottamaan millaista arvoa voitaisiin käyttää pienissä, keskikokoisissa ja suurissa kattiloissa.

Tässä osassa on vedetty yhteen tutkimuksen Osa I ja Osa II. Osassa I kolmen suomalaisen soodakattilan datan kerättiin ja analysoitiin – Kolme esimerkkitehdasta

- Viimeinen tulistin ja savukaasun suunnassa ensimmäinen tulistin
- Dataa ajon aikana myös eri putkista
- Raportointi ja datan analysointi

Vaihe II – rinnakkaisten putkien koon ja lukumäärän vaikutus n. 6 kk LUT

- Laskelmia siitä miten putkimäärä vaikuttaa, tarvittava ruiskutusmäärä?

Avainsanat: tulistin, painehäviö, soodakattila, lämpötilaprofiili

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboliluettelo	5
1 Johdanto	7
2 Tausta	9
2.1 Kerätty mittausdata.....	11
2.2 Tulstinputkien ulostulolämpötiloihin vaikuttavat ilmiöt.....	14
3 Mallinnus	17
3.1 alaotsikko.....	Error! Bookmark not defined.
3.2 alaotsikko.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.1 alempi alaotsikko	Error! Bookmark not defined.
4 Tulokset	24
4.1 Kattila A	24
4.2 Kattila B	28
4.3 Kattila C	31
Lähteet	33
Appendix A: appendiks	34

Symboliluettelo

Roomalaiset kirjaimet

A	pinta-ala [m^2]
d_i	putken sisähalkaisija [m]
d_o	putken ulkohalkaisija [m]
e	putken pinnankarheus [m]
f_D	kitkakerroin (Darcy) [-]
h	ominaisentalpia [kJ/kg]
K	kertavastus [-]
L	pituus [m]
$\dot{m}$	massavirta [kg/s]
p	paine [Pa]; [bar]
Re	Reynoldsin luku [-]
T	lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
w	virtausnopeus [-]

Kreikkalaiset kirjaimet

Φ	lämpövirta [kW]
Φ''	lämpövirran tiheys [kW/m^2]
μ	dynaaminen viskositeetti [Pa s]
ρ	tiheys [kg/m^3]

alaindeksit

i	1. paneelin indeksi 2. sisäpuolinen
j	putken indeksi paneelissa

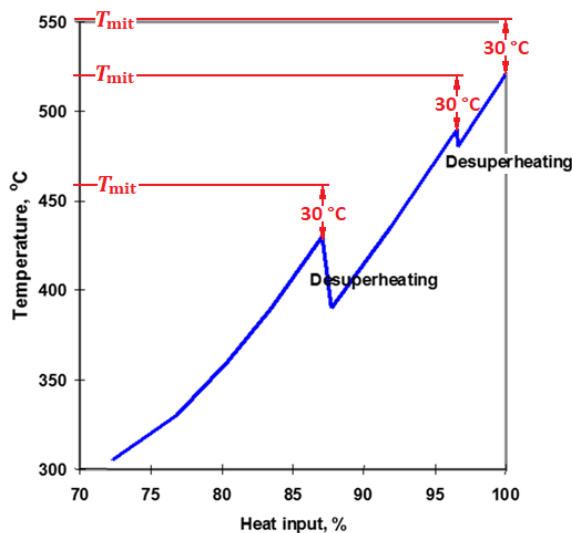
Lyhenteet

CFD Computational Fluid Dynamics

IAPWS International Association for the Properties of Water and Steam

1 Johdanto

Soodakattilan tulistimien putkipaksuus riippuu mitoituspaineen lisäksi mitoituslämpötilasta. Kattilateollisuudessa mitoitus on perinteisesti perustunut $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilalisä tulistimen ulostulon keskilämpötilaan (kuva 1.1). $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilalisän oikeellisuudesta erikokoisille kattiloille on kuitenkin epävarmaa, ja uusien kattiloiden koot ovat kasvaneet huomattavasti: $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lisä on peräisin ajalta, jolloin soodakattiloiden kapasiteetit olivat alle $1000\text{ t}_{\text{ka}}/\text{d}$, uusien soodakattiloiden kapasiteettien ollessa jo yli $7000\text{ t}_{\text{ka}}/\text{d}$. (kuva 1.2).

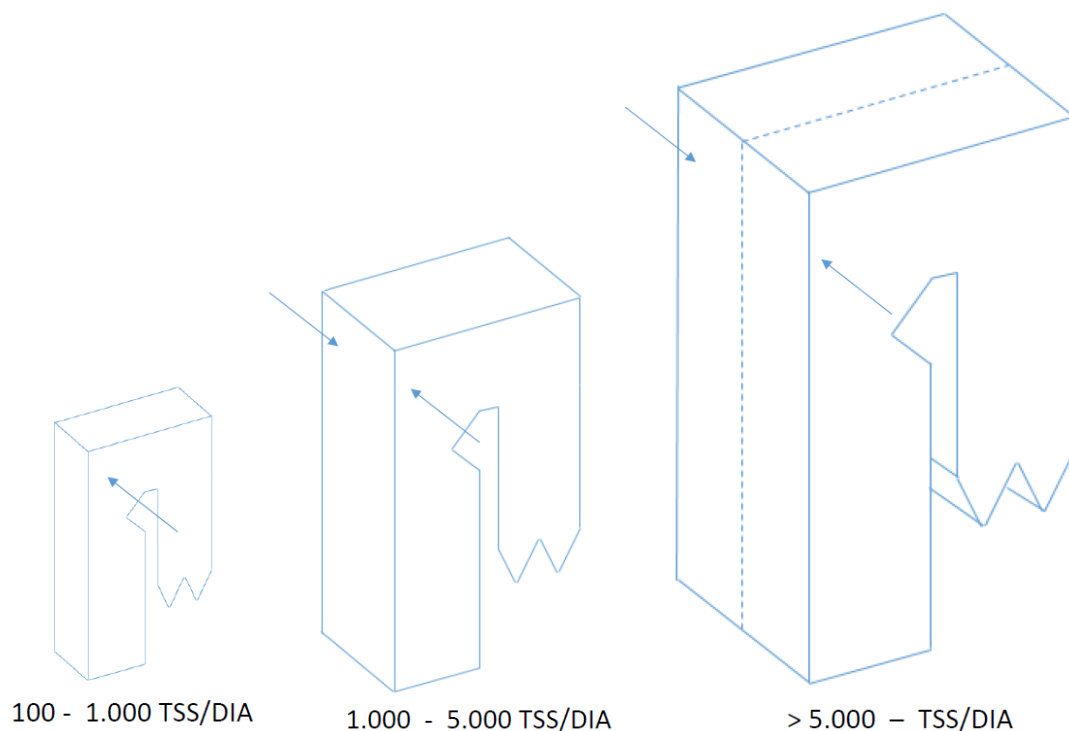


Kuva 1.1: Tulistimien lämpötiladiagrammi

Jos $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilalisä on uusilla, suurilla kattiloilla riittämätön, toimintalämpötilat voivat ylittää mitoituslämpötilan. Tällöin tulistinputkien viruminen nopeutuu. Uusilla isoilla kattiloilla etenkin savukaasun virtaussuunnassa ensimmäinen tulistin kasvattaa höyryn lämpötilaa paljon, joten mielenkiinto kohdistuu etenkin siihen, onko tässä tulistimessa syytä käyttää suurempaa lämpötilalisää kuin $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lämpötilaerot tulistinputkien ulostulolämpötilojen välillä aiheutuvat useista syistä, ja eroja syntyy sekä savukaasun virtaussuunnassa rinnakkaisten panelien välille, että yksittäisen panelin eri putkien välillä. Lämpötilaeroja putkien välille aiheuttavat sekä

savukaasupuoleen, että höyryn virtaukseen liittyvät ilmiöt. Mittaus- ja tutkimustietoa aiheesta on kuitenkin vielä varsin vähän.

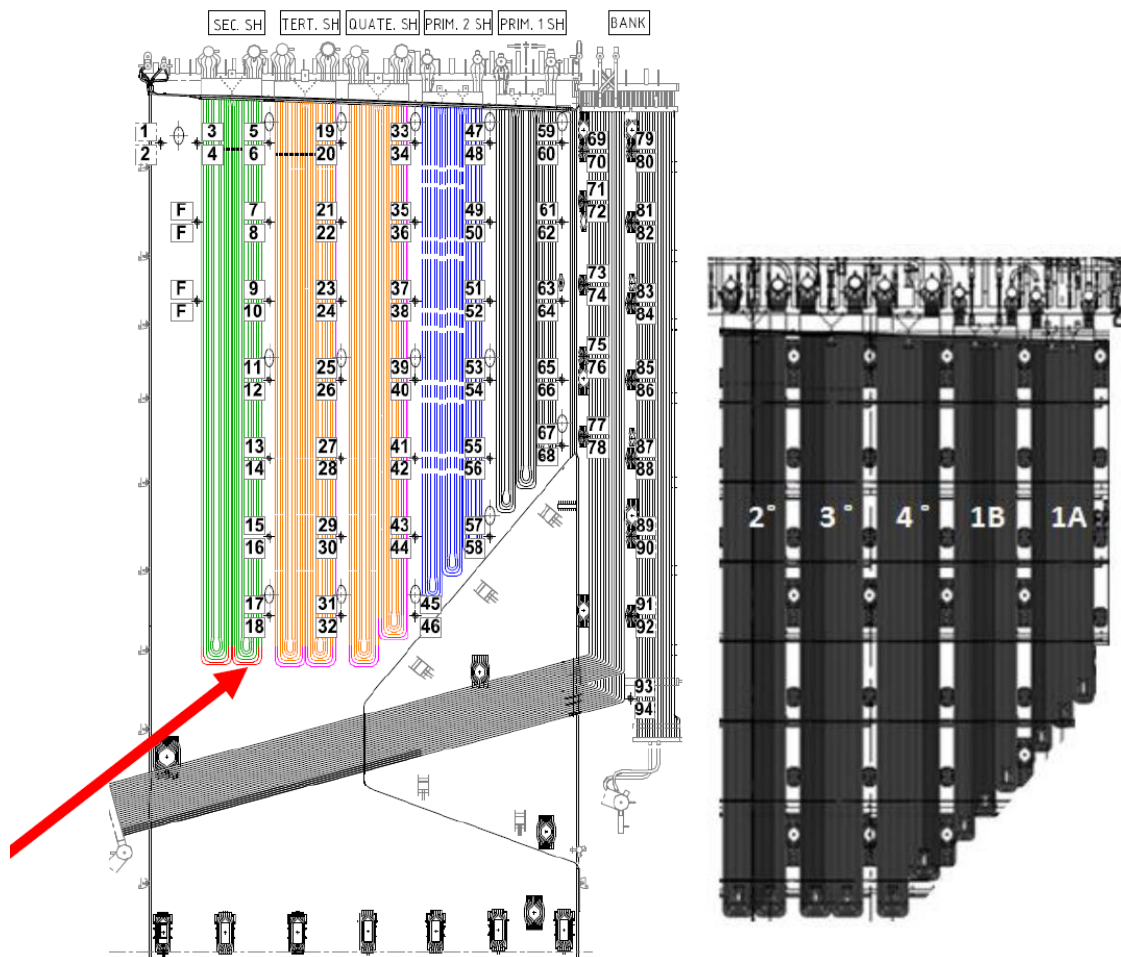


Kuva 1.2: Soodakattilan koon muutos kapasiteetin kasvaessa.

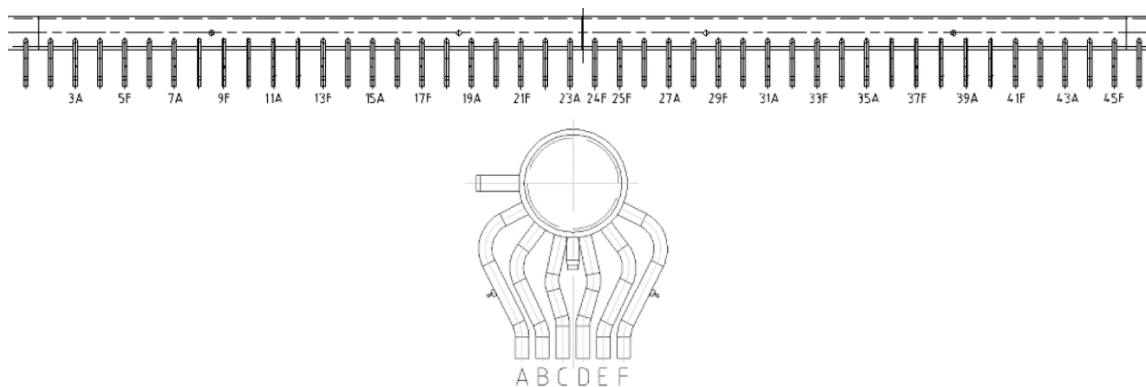
Tämän tulistinprojektin vaiheen II tavoitteena on perehtyä höyryvirran jakautumiseen eri paneelien ja panelien yksittäisten putkien välillä. Työssä on laadittu laskentamalli kolmen eri kokoisen kattilan savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisille tulistimille. Mallin avulla voidaan arvioida höyryvirran epätasaisen jakautumisen aiheuttamaa ulosvirtauslämpötilan vaihtelua putkien välillä. Vertaamalla mallinnustuloksia mittaustuloksiin voidaan myös arvioida tarvittavaa savukaasusta höyryyn siirtyvän lämpövirran muutoksia paneelien ja putkien välillä, jotta mitatut ulosvirtauslämpötilat toteutuisivat.

2 Tausta – Osa I

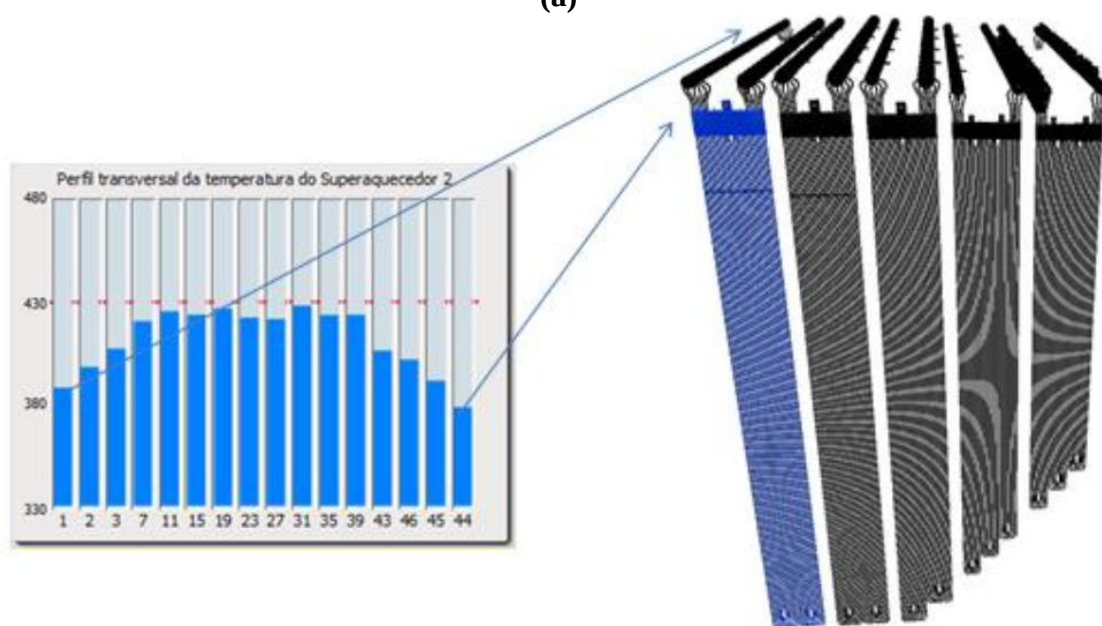
Soodakattilan tulistinputkien lämpötilajakaumasta on saatavilla vain vähän kattavaa, julkista mittausdataa. Villarroel et al. esittivät 2018 Eldoradon suuren, 7850 t_{ka}/d soodakattilan savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisen, 2-tulistimen (kuva 2.1) lämpötilamittauksia [1]. 2-tulistin koostuu yhteensä 46 paneelista. Kussakin panelissa on kuusi putkea neljässä läpikulussa. Kuvassa 2.2. nähdään 2-tulistimen paneelien ja yksittäisten putkien nimeämisperiaate, mittauspisteiden sijainnit, sekä mittauksulokset ulostulossa.



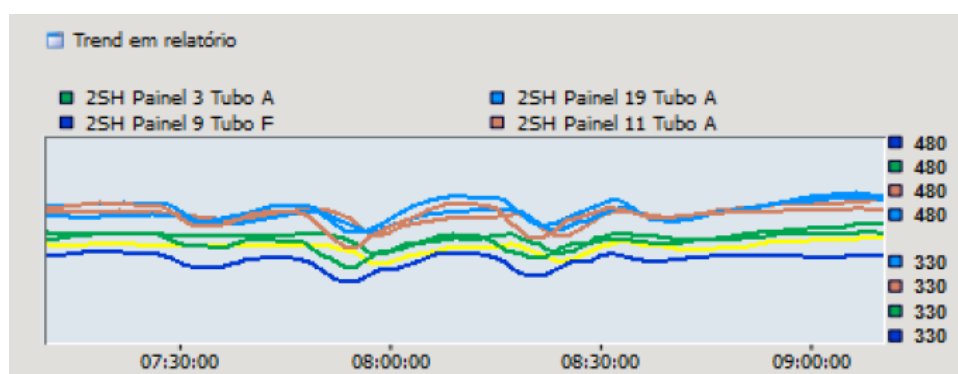
Kuva 2.1: Eldoradon soodakattilan tulistimet.[1]



(a)



(b)



Kuva 2.2: Eldoradon soodakattilan 2-tulistimen panelien ulostulolämpötilojen mittauspisteet sekä panelien ja panelin yksittäisten putkien merkinnät (a), ulostulolämpötilat näissä putkissa (b), sekä neljän yksittäisen putken ulostulolämpötilojen vaihtelua noin 2 tunnin jakson aikana (c).[1]

Kuvan 2.2 mittaustuloksista nähdään selvästi, että putken (paneelin) sijainnilla savukaasun virtaussuuntaan nähden poikkisuuntaan on tuntuva vaikutus ulostulolämpötilaan kustakin putkesta. Etenkin reunimmaisten paneelien kohdalla muutos on suuri.

Lämpötilaerot yksittäisen paneelin eri putkien välillä eivät erotu yhtä selkeästi. Kuvan 2.2 alimmasta c-osasta voidaan havaita sivusuunnassa lähekkäin olevien 9 ja 11-panelien A- ja F-putkien ulostulojen välillä selvä ero. Kuitenkin mittausjoukossa on vain yksi F-putki, ja kuvan 2.2 b datasta puuttuvat yksittäisten putkien merkinnät kokonaan, jolloin vaikutuksen suuruuden arviointi jää väistämättä epävarmaksi.

Villarroelin [1] Eldoradon kattilasta julkaisema mittausdata on pääpiirteissään odotetun suuntaista reunimmaisen putken tulistaessa paketin sisempiä putkia enemmän (kuva 2.2c) ja tulistuselämpötilojen laskiessa reunimmaisista paneeleja kohti (kuva 2.2c), mutta ei riitä johtopäätöksiin vaikutusten suuruudesta, näiden vaihteluista, taustalla vaikuttavien ilmiöiden keskinäisistä merkittävyyseroista, tai näiden huomioon ottamisesta ja eri kokoisten soodakattiloiden mitoituksessa tarvittavista lämpötilallisista.

2.1 Kerätty mittausdata

Paremmän käsityksen muodostamiseksi taustalla vaikuttavien ilmiöiden vaikutuksista, sekä kattilan koon merkityksestä näihin, tulistinprojektin ensimmäisessä vaiheessa kerättiin dataa kolmesta eri kokoisesta soodakattilasta. Jatkossa isoon kattilaan viitataan Kattila A:na, keskikokoiseen B:nä ja pieneen kattila C:nä. Tarkastelu keskittyi pääosin savukaasun virtaussuunnassa ensimmäiseen tulistimeen.

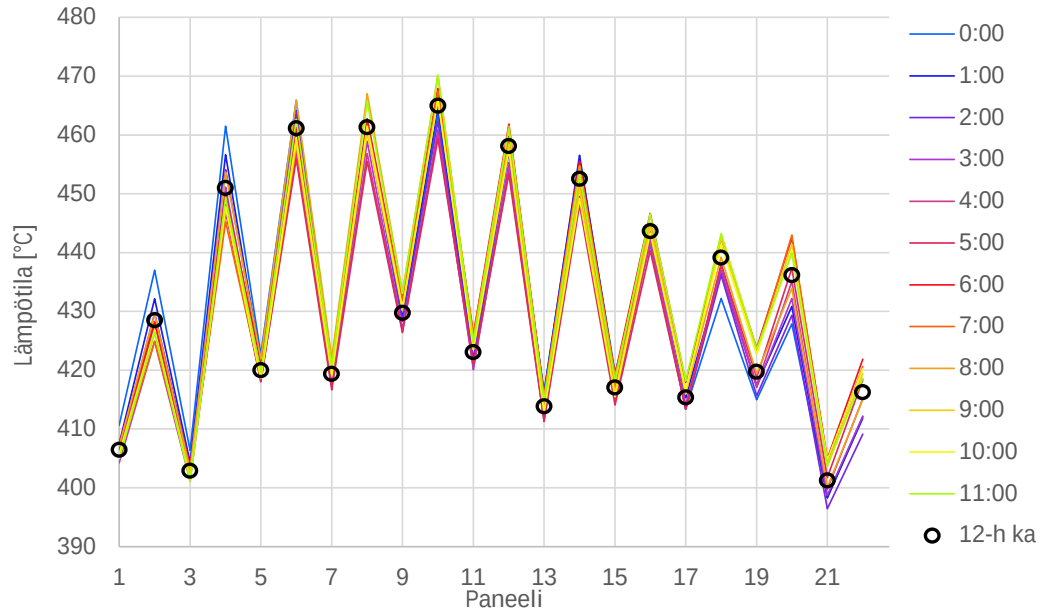
Tulistimen lämpötilojen mittauspisteet sijaitsevat kattiloiden vintissä eli sillä osalla putkea joka on savukaasun säteilyltä ja konvektiolta suojattu. Mitatun lämpötilan voidaan olettaa vastaavan mittaustarkkuuden rajoissa putken sisällä virtaavan höyryn lämpötilaa. Kattiloista A ja B saaduissa lämpötilojen mittausdatassa oli mittapisteitä useissa paneeleissa; kattila B:n datassa 22 (joka toisessa paneelissa), ja kattila A:n 23 (joka toisessa paneelissa). Pienimmän, kattila C:n, mittauksista 2-tulistimelle oli saatavilla vain

sisäänmeno- ja ulostulolämpötilat koko tulistimeen. Usean paneelin lämpötilamittaukset olivat saatavilla kattila C:n osalta vain primääritulistimelle.

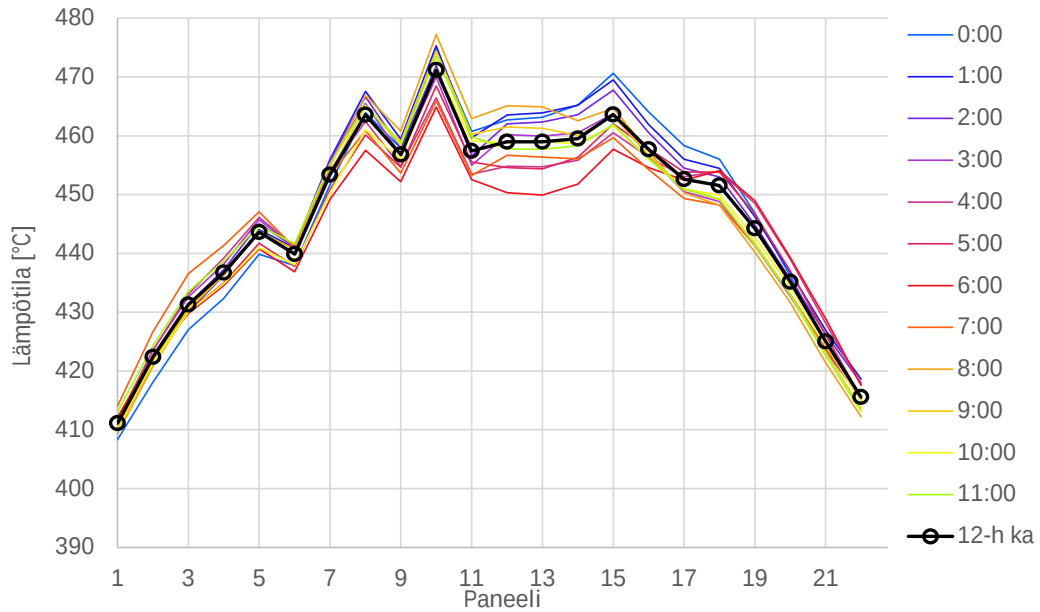
Saaduista lämpötilamittauksista laskettiin tuntikeskiarvot 12 tunnin jaksolle, jotta saatiin käsitys keskimääräisistä lämpötilatasoista, ja samalla myös vaihtelusta ajan funktiona. Kattiloiden B ja C 2-tulistimien ulostulolämpötilat eri paneeleista mitattuina on esitetty kuvassa 2.3.

Tieto siitä, missä panelin putkessa mittauspisteet sijaitsivat puuttui kummastakin kattilasta, mutta kuvista voidaan päätellä, että suurella todennäköisyydellä kattila A:n mittauksista joka toinen sijaitsi paneelin ensimmäisessä putkessa savukaasuvirran suunnassa tarkasteltuna, joka toinen jossakin muussa putkessa. Kattilan B lämpötilamittaukset sijaitsivat kuvan perusteella todennäköisesti kunkin panelin samoissa putkissa.

Kattilan C tulistimen 1 vastaavat tuntikeskiarvoistetut mittaustulokset on esitetty kuvassa 2.4. Lämpötilajakauma tämän tulistimen ulostuloissa on selvästi tasaisempi, kuin kahden isomman kattilan 2-tulistimissa.

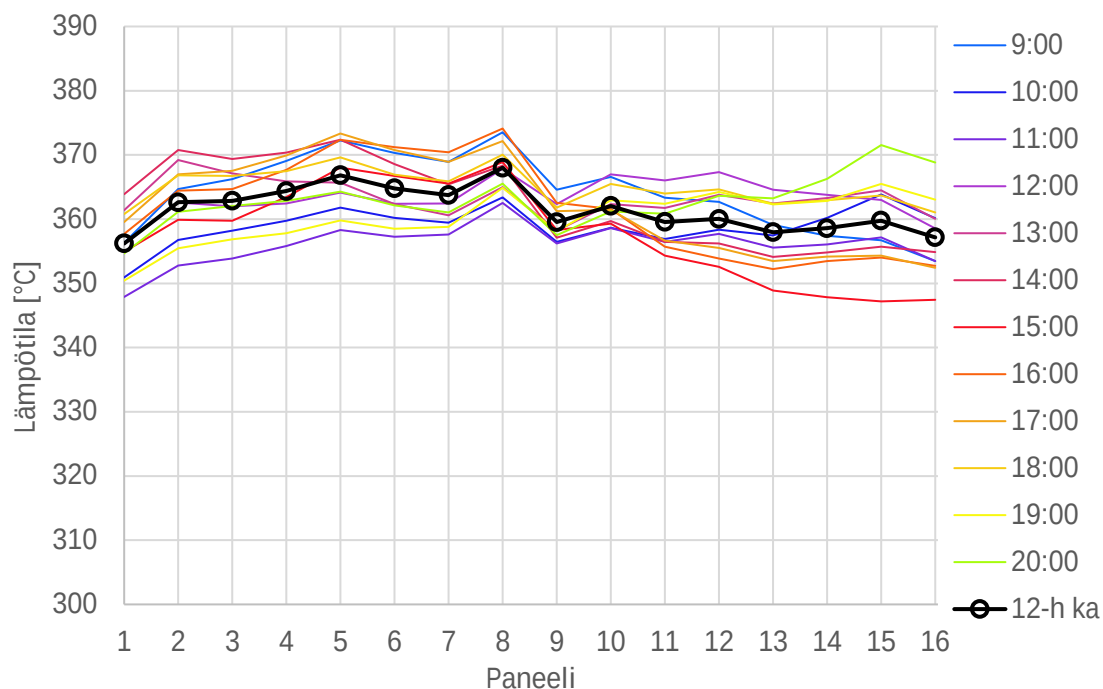


(a)



(b)

Kuva 2.3: Kattila A:n [2] (a) sekä kattila B:n [3] (b) 2-tulistimien ulostulojen pintalämpötilamittauksien tuntikeskiarvot 12 tunnin jaksoilta.



Kuva 2.4: Kattila C:n 1-tulistimen ulostulojen pintalämpötilamittauksien tuntikeskiarvot 12 tunnin jaksoilta.[3]

2.2 Tulistinputkien ulostulolämpötiloihin vaikuttavat ilmiöt

Höyryn ulostulolämpötiloihin tulistinputkista vaikuttavat sekä savukaasu- että höyrypuolen ilmiöt. Toisaalta kanavan reunoilla savukaasun virtausnopeus ja lämpötilat jäävät pienemmiksi kuin keskellä, mikä pienentää tulistuslämpötilaa. Höyrypuolella höyryn jakautuminen putkiin vaikuttaa saman suuntaisesti.

Höyrypuolen ilmiöistä lämpötilajakaumaan vaikuttaa kaksi pääasiallista syytä: toisaalta keskimmäisiin putkiin virtaava höyry kulkee pidemmän matkan sekä jako- että keräystukissa, kasvattaen painehäviötä, ja siten pienentäen massavirtaa näihin putkiin. Lisäksi höyryn lämpötilan kasvuun liittyy vahvistava takaisinkytkentä painehäviön kautta: kun savukaasukanavan keskimmäisiin paneeleihin kohdistuu suurempi lämpövirta, ja lisäksi näissä kulkeva höyryvirta on jonkin verran pienempi, höyry tulistuu enemmän, minkä seurauksena höyryn tiheys pienenee, ja virtausnopeus kasvaa. Lopputuloksena painehäviön ollessa verrannollinen tiheyteen vain lineaarisesti, mutta virtausnopeuteen neliöllisesti, painehäviö kasvaa ja massavirta pienenee enemmän, kuin

vain pidemmän virtausmatkan vaikutuksesta tapahtuisi, kasvattaen näin myös ulostulolämpötilaa näiden paneelien putkista.

Yksittäisen paneelin eri putkien ulostulolämpötiloihin ja näiden eroihin vaikuttava samat perusilmiöt kuin vierekkäisten paneelien lämpötiloihin ja lämpötilaeroihin: painehäviö massavirran kautta, sekä lämpövirta. Yksittäisen putken ollessa muita pidempi, sen saama höyryvirta pienenee, jotta kaikkien putkien painehäviö asettuisi samaksi, kasvattaen näin ulostulolämpötilaa. Pidempi putki saa suuremman alansa ansiosta myös suuremman kokonaislämpövirran, voimistaen vaikutusta. Putken kokonaispituuden lisäksi putken sijainnilla paneelissa on vaikutus tulistuslämpötilaan: savukaasuvirran suunnassa ensimmäinen putki on tässä erityisasemassa. Koska muut putket eivät varjosta sitä tulipesän ja tulipesästä tulevan kuumen kaasun säteilyltä, eivätkä myöskään jätä sitä jättöreunan pyörrevirtaukseen, etenkin säteilylämpövirran tiheys putken pintaan kasvaa merkittävästi.

Soodakattilan tulistimien yksittäisten putkien tulistuslämpötilaan vaikuttavista ilmiöistä on julkaistu tutkimustuloksia vain vähän. Kawaji et al. [5] ovat mallintaneet soodakattilan tulistinputkien pintalämpötiloja yhdistäen savukaasupuolen CFD-mallinnukseen savukaasu- ja höyrypuolen yksinkertaiset lämmönsiirtokertoimen arvioinnin. Kawaji et al. eivät kuitenkaan ottaneet huomioon höyrypuolen painehäviön vaikutusta virtaukseen ja sen jakautumiseen eri paneelien ja paneelin putkien välillä.

Myöhemmin 2020 Kumar et al. [6] selvittivät sekä höyry- että savukaasupuolen ilmiöiden yhteisvaikutusta integroidulla CFD/1-D prosessimallinnusmenetelmällä. Tässä virtauksen jakautumista höyrypuolella selvitettiin Apros-prosessimallinnusohjelmistolla, ja näin saadut tulokset integroitiin 3-D CFD-mallinnukseen. Tuloksena saavutettiin hyvä vastaavuus mitattujen ja laskennallisten tulosten välillä pienehkössä 1000 tka/d soodakattilassa.

Edellä mainittujen julkaisujen lisäksi muutamissa tutkimuksissa on sovellettu 3D-CFD/1D-prosessimallinnusmenetelmiä on sovellettu hiilikattiloiden mallinnukseen [7,8].

Soodakattilan koon vaikutusta tulistinpaneelien ja paneelien yksittäisten putkien ulostulolämpötiloihin ei ole tähän mennessä selvitetty.

Tässä tutkimuksessa on tarkoitus selvittää alustavasti kolmen eri kokoisen soodakattilan toimintaa putken sisäpuolisten, höyrypuolen ilmiöiden kannalta. Tällä päästään selville näiden ilmiöiden merkityksestä tulistinpaneelien ja paneelin yksittäisten putkien ulostulolämpötilojen eroihin. Lisäksi mallilla voidaan arvioida tarvittavaa lämpövirran jakaumaa, joka toteuttaisi mitatut höyryn ulostulolämpötilan jakaumat niissä kattiloissa, joista tämä data on saatavilla.

3 Mallinnus

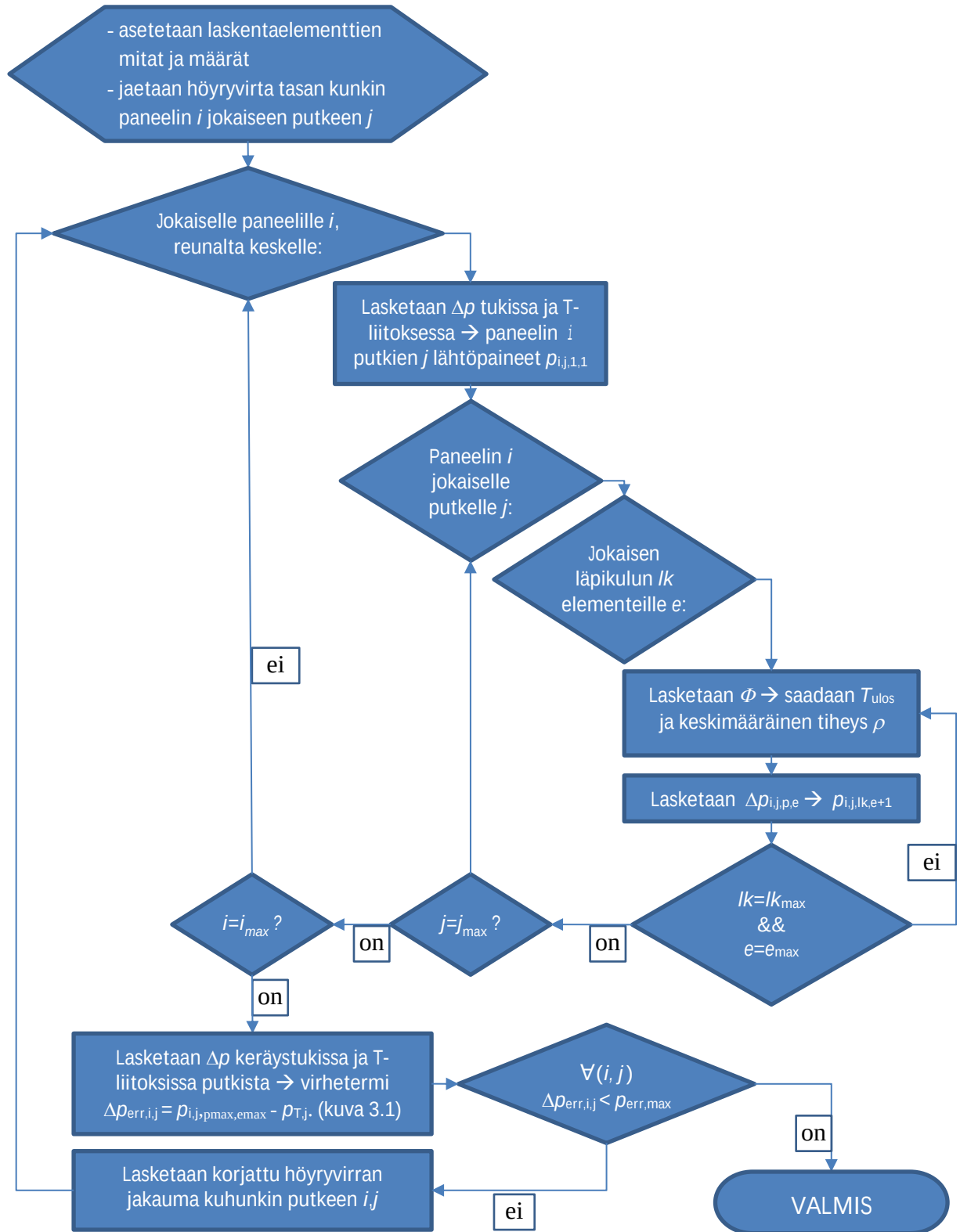
Mallinnus toteutettiin MATLAB-ohjelmistolla (R2019a). Höyryn tilasuureet saatiin XSteam-höyrykirjaston (IAPWS IF-97) avulla. Toteutus oli kaksiosainen: ensimmäisessä vaiheessa lämpövirran tiheys Φ'' [$\frac{W}{m^2}$] kaikkiin putkiin oli asetettu vakioksi, lukuunottamatta ensimmäisen putkiläpikulun savukaasuvirran suunnassa ensimmäistä putkea, jossa se oli asetettu 50% suuremmaksi. Laskenta jaettiin laskentaelementteihin siten, että kunkin paneelin i putken j läpikulku p oli jaettu 10 laskentaelementtiin e . Näiden 10 elementin lisäksi läpikulujen väliset 180° käännöt, sekä savukaasukanavan ja jako/keräystukin väliset osat, muodostivat omat laskenta-elementtinsä.

Laskenta toteutettiin iteratiivisesti, lähtien liikkeelle ideaalisesta tilanteesta, jossa koko höyryvirta olisi jakautunut tasan kaikkiin putkiin. Kokonaishöyryvirraksi asetettiin saadun mittausdatan keskiarvo [2,3,4]. Laskennan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.1.

Kunkin laskentaelementin kokonaispainehäviö määritettiin sekä höyrytukissa että tulistimen lämmönsiirtoputkissa Darcy-Weisbachin yhtälöllä

$$\Delta p = \frac{\rho w^2}{2} \cdot \left(\frac{f_D L}{d_i} + \Sigma K \right), \quad (1)$$

missä	Δp	painehäviö [Pa]
	ρ	höyryn keskimääräinen tiheys [kg/m^3]
	w	höyryn keskimääräinen virtausnopeus [m/s]
	f_D	kitkakerroin (Darcy) [-]
	L	laskentaelementin pituus [m]
	d_i	putken sisähalkaisija [m]
	ΣK	laskentaelementin kertavastusten summa [m]



Kuva 3.1: Laskenta-algoritmin toiminta

Jako- ja keräystukissa höyryn tiheys säilyy lähes muuttumattomana, virtausnopeuden muuttuessa vain lämmönsiirtoputkiin lähtevän tai niistä palaavan höyryvirran mukaan.

Lisäksi ennen ensimmäisen läpikulun ensimmäistä elementtiä ja viimeisen läpikulun viimeisen elementin jälkeen höyrytukiin ja savukaasukanavassa kattila

Tulistinputkien mutkien kertavastukset arvioitiin mutkan kulman, sekä kääntösaateen perusteella, arvojen vaihdellessa välillä $K=0.1$ ($\alpha < 60^\circ$, $r/d_i > 1.5$) enimmillään $K=1.0$:aan asti ($\alpha \geq 120^\circ$, $r/d_i < 1.5$) [9]. Kitkakerroin määritettiin iteratiivisella Colebrook-Whiten yhtälöllä

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log_{10} \left(\frac{e}{3.7d_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f_D}} \right), \quad (2)$$

missä	e	pinnan absoluuttinen hiekanjyväkarheus [m]
	d_i	putken sisähalkaisija [m]
	Re	virtauksen Reynoldsin luku [-]

Reynoldin luku määritettiin kullekin elementille sen keskimääräisen tilavuusvirran perusteella,

$$Re = \frac{4\dot{m}_{i,j}}{\bar{\mu} \pi d_i}, \quad (3)$$

missä $\bar{\mu}$ on elementin keskimääräinen dynaaminen viskositeetti [Pa s], määritettynä sisään- ja ulosmenotilan keskimääräisessä paineessa ja lämpötilassa, $\bar{\mu} = \mu(\bar{p}, \bar{T})$.

Savukaasukanavassa sijaitsevien laskentaelementtien osalta lämmönsiirron vaikutus tiheyteen ja siten nopeuteen huomioitiin lämpövirran tiheyden Φ kautta: lämmönsiirtokertoimia ei määritetty, vaan elementistä e poistuvan virtauksen tiheys määritettiin entalpianmuutoksen kautta, $\bar{\rho} = \rho(\bar{p}, \bar{h})$, ja

$$h_{\text{ulos},i,j,\text{lk},e} = h_{\text{sisään},i,j,\text{lk},e} + \Phi'' \frac{\pi d_i L_{i,j,\text{lk},e}}{\dot{m}_{i,j}}, \quad (4)$$

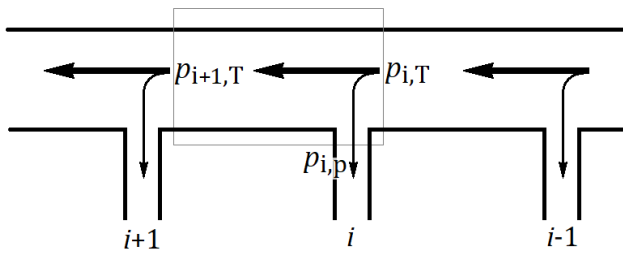
missä $L_{i,j,\text{lk},e}$ on laskentaelementin pituus.

Jakotukin T-haarojen kohdalla virtaus jakautuu kunkin paneelin i putkiin meneviin osiin i,p , sekä jakotukissa eteenpäin jatkaviin osuuksiin, $i+1,T$ (kuva 3.2). Kumpikin virta, kääntyvä ja jatkava, kokevat T-haaroissa painehäviönsä,

$$p_{i+1,T} = p_{i,T} - \frac{\rho_{i,T} w_{i,T}^2}{2} K_{i,T,\text{jako}}, \quad (5)$$

$$p_{i,p} = p_{i,T} - \frac{\rho_{i,T} w_{i,T}^2}{2} \left[K_{i,p,\text{jako}} - 1 + \left(\frac{w_{i,p}}{w_{i,T}} \right)^2 \right], \quad (6)$$

missä kertavastuksille $K_{i,T}$ ja $K_{i,p}$ arvioitiin ensimmäisellä laskentakierroksella arvot $K_{i,T} = 0.1$ ja $K_{i,p} = 1.0$.



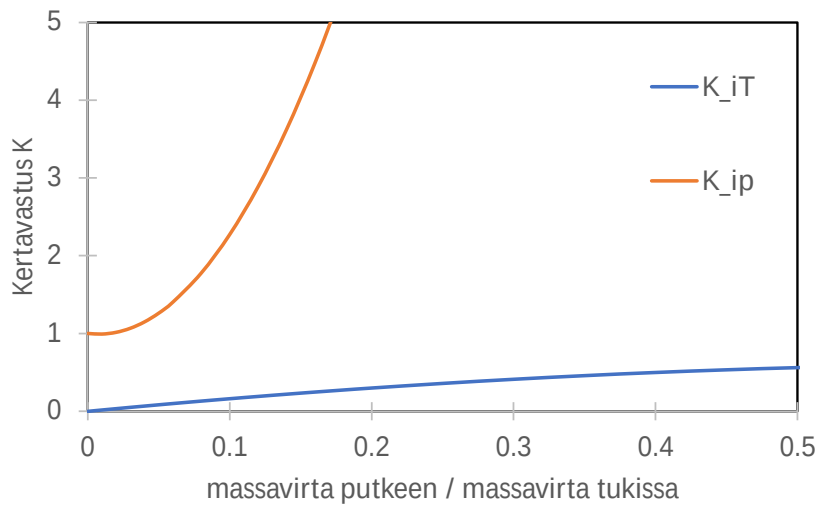
Kuva 3.2: Virtauksen jakautuminen jakotukista paneeleihin $i = 1, \dots, i_{\max}$.

Massavirta-arvioiden tarkentuessa laskennan edetessä jakotukissa eteenpäin jatkavan virtauksen kertavastusta tarkennettiin jatkavien ja kääntyvien massavirtojen suhteiden avulla. Tämä toteutettiin laatimalla lähteen [9] kuvaajien pohjalta yksinkertaiset polynomisovitteet,

$$K_{i,T,jako} = \frac{7}{4} \frac{\dot{m}_{i,p}}{\dot{m}_{i,T}} - \frac{5}{4} \left(\frac{\dot{m}_{i,p}}{\dot{m}_{i,T}} \right)^2, \quad (7)$$

$$K_{i,p,jako} = 150 \left(\frac{\dot{m}_{i,p}}{\dot{m}_{i,T}} \right)^2 - 2.3 \frac{\dot{m}_{i,p}}{\dot{m}_{i,T}} + 1. \quad (8)$$

Sovitteita vastaavat käyrät on esitetty kuvassa 3.3. Koska yksittäiseen putkeen menevän, ja koko tukissa liikkuvan massavirran suhde on hyvin pieni, $K_{i,p}$ saa tuntuvasti suurempi arvoja kuin 1 vain keskimmäisiin paneeleihin käännettäessä, jossa jakotukkiin tulleesta virtauksesta lähes kaikki on jo kääntynyt aiempien tulistinpaneelien putkiin. Keskimmäiseen paneeliin kääntyvä virtaus ei kuitenkaan pienene tästä syystä merkittävästi, koska myös virtausnopeus jakotukissa on tässä vaiheessa enää hyvin pieni.

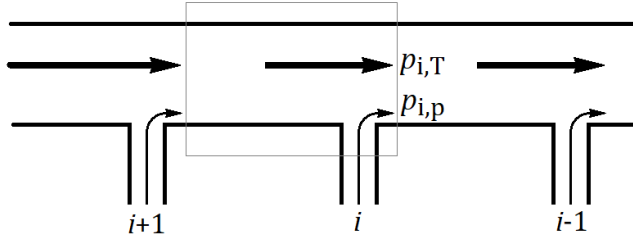


Kuva 3.3: Kertavastukset jakotukissa lämpöpintaputkien T-haarojen ohi ($K_{i,t,jako}$), ja putkeen kääntyvälle virtaukselle ($K_{i,p,jako}$).

Kokoojatukissa tulistimen lämmönsiirtoputkista palaavat virtaukset päinvastoin yhtyvät tukissa kulkevaan päävirtaan (kuva 3.4). Tähän liittyvät paineen muutokset ratkaistaan yhtälöistä (9) ja (10), putkista saapuvan virtauksen tapauksessa kullekin putkelle j erikseen,

$$p_{i,T} = p_{i+1,T} - \frac{\rho_{i,T} w_{i,T}^2}{2} K_{i,T,kok} , \quad (9)$$

$$p_{i,j,p} = p_{i,j,p,ulos} - \frac{\rho_{i,j,p} w_{i,T}^2}{2} \left[K_{i,j,p,kok} + 1 - \left(\frac{w_{i,j,p,ulos}}{w_{i,T}} \right)^2 \right] . \quad (10)$$



Kuva 3.4: Virtauksen kokoojatukkiin paneeleista $i = 1, \dots, i_{\max}$.

Myös kokoojatukissa kertavastusten arvot riippuvat massavirtojen suhteesta. Putkista saapuvan massavirran ollessa alle puolet tukissa kulkevasta virrasta, vastuskerroin käyttäytyy melko lineaarisesti, jolloin soviteiksi lähteen [9] kuvaajista saatiin yhtälöt (11) ja (12).

$$K_{i,T,kok} = 4 \frac{\dot{m}_{i,p}}{\dot{m}_{i,T}} , \quad (11)$$

$$K_{i,j,p,kok} = 8 \frac{\dot{m}_{i,j,p}}{\dot{m}_{i,T}} - 1 . \quad (12)$$

Lineaariset sovitteet on esitetty kuvassas 3.5 graafisesti.

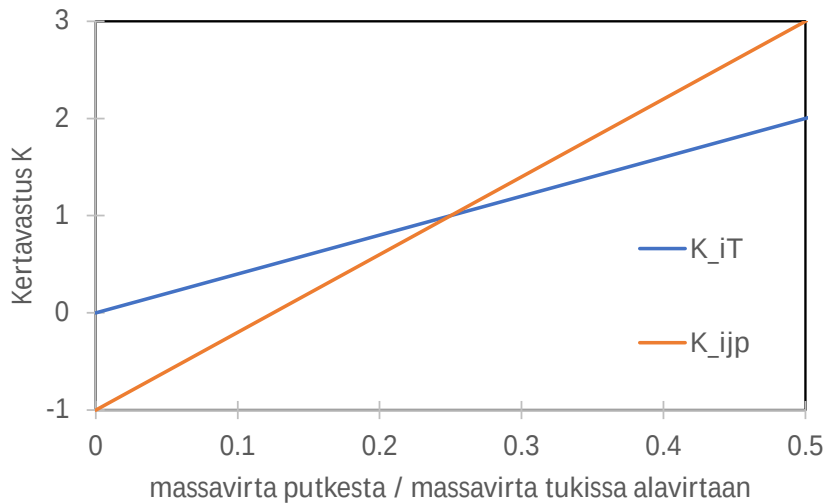
Yhtälöiden (9) ja (10) tuottamien paineiden erotukset muodostavat virhetermin $\Delta p_{err,i,j}$,

$$\Delta p_{err,i,j} = p_{i,j,p,ulos} - p_{i+1,T} \quad (13)$$

jota iteroinnissa pyritään minimoimaan. Uuden iteraatiokierroksen $n+1$ massavirrat kullekin putkelle, $\dot{m}_{i,j}^{(n+1)}$, saadaan virhetermin ja viimeisimmän iteraation n massavirran $\dot{m}_{i,j}^{(n)}$ avulla,

$$\dot{m}_{i,j}^{(n+1)} = \dot{m}_{i,j}^{(n)} \left(\frac{\Delta p_{\text{tot},i,j} + \Delta p_{\text{err},i,j}}{\Delta p_{\text{tot},i,j}} \right)^\alpha, \quad (13)$$

missä α on vaimennuskerroin, jolla estetään iteroinnin divergointi.

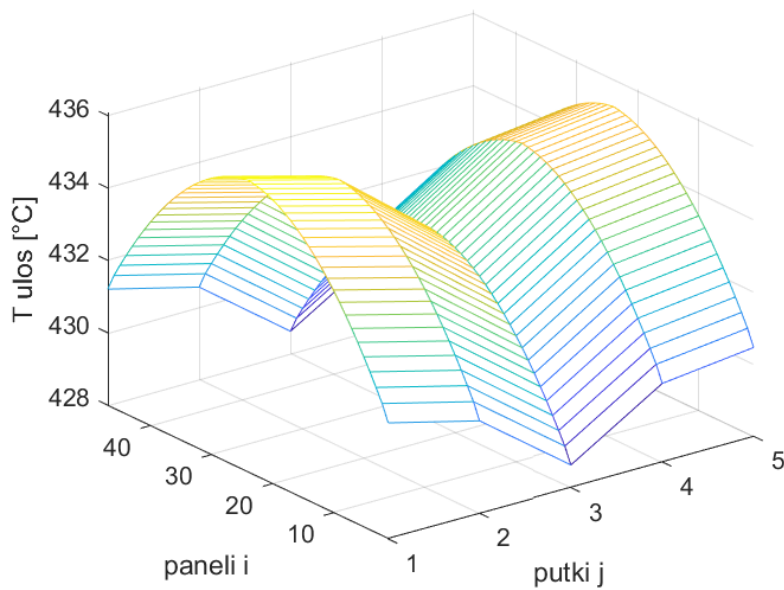


Kuva 3.5: Kertavastukset kokoojatukissa lämpöpintaputkien T-liitosten ohi ($K_{i,T,kok}$), ja putkesta saapuvalle virtaukselle ($K_{i,j,p,kok}$).

4 Tulokset

4.1 Kattila A

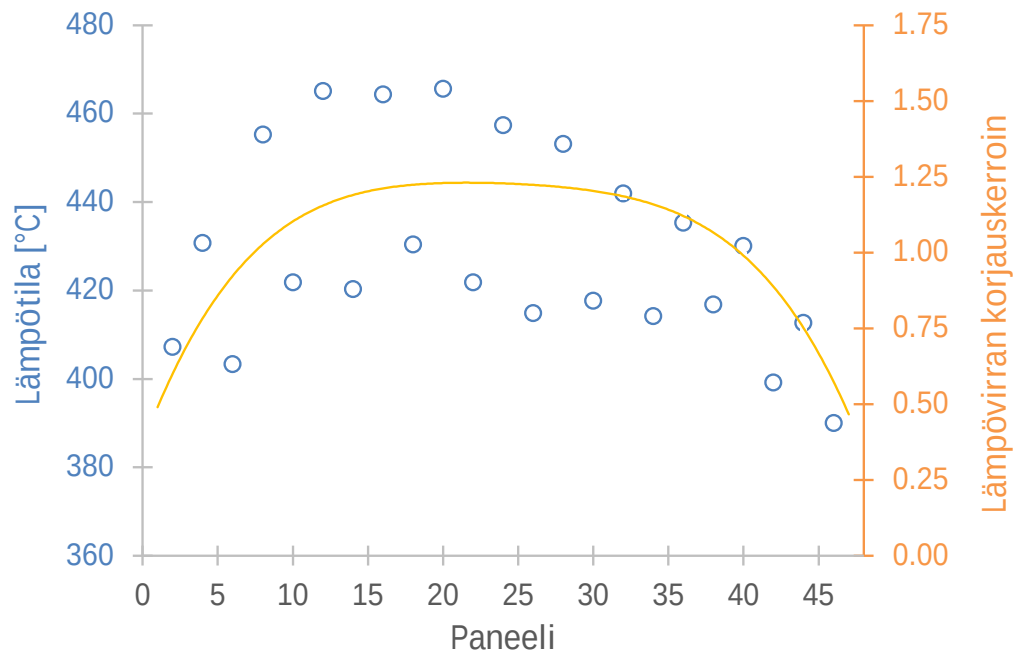
Taulukko 4.1. Kattila A:n 2-tulistimen mitat.



Kuva 4.1: Lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun lämpövirran tiheys on vakio. Putkipaneelit 1 ja 47 ovat savukaasukanavan reunoilla.

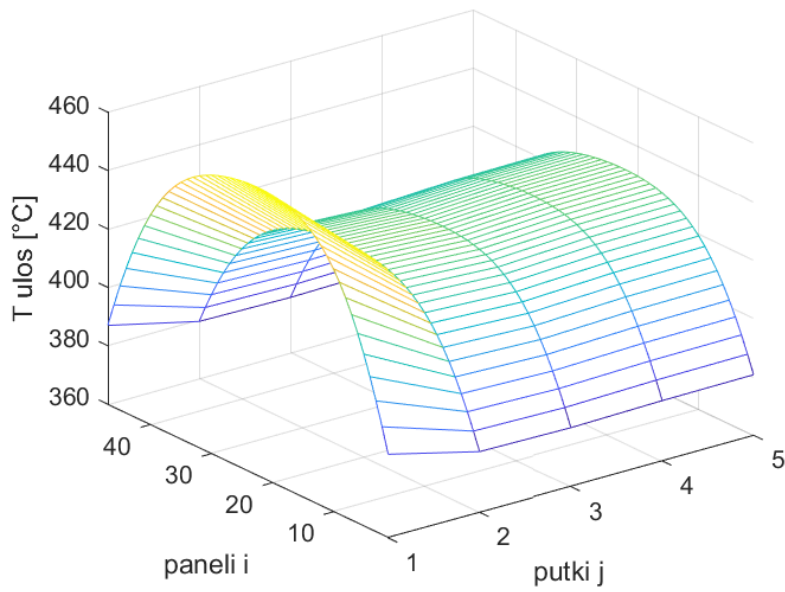
Kattilan A mittausdatassa oli havaittavissa selvä ulostulolämpötilojen profiili savukaasun virtaussuuntaan nähden sivusuunnassa. Lämpötilaerot ovat merkittävästi suurempia, kuin mitä selittyy pelkällä höyrypuolen virtauksen epätasaisella jakautumisella paneeleihin,

joten lämpövirralle laadittiin korjauskerroin neljännen asteen polynomisovitteena (kuva 4.2).

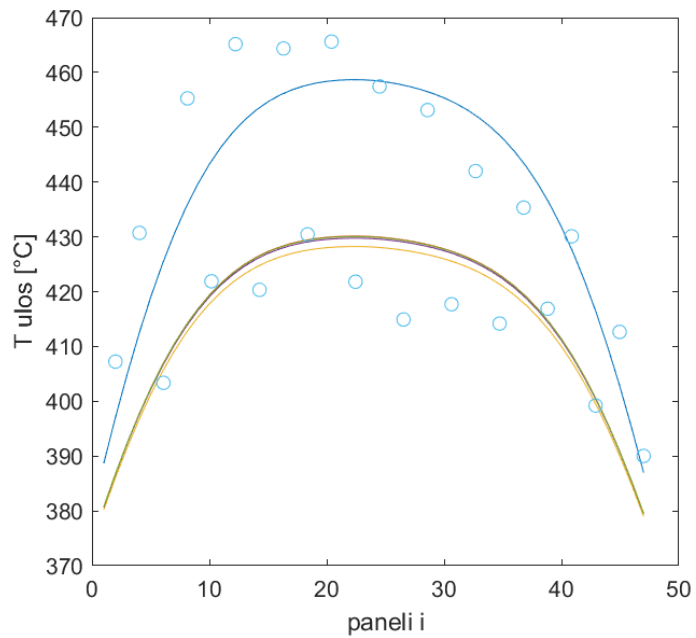


Kuva 4.2: Mitatut ulostulolämpötilat putkista (sininen, vasen akseli), sekä sovite kertoimelle, jolla mallin laskennallista lämpövirtaa korjataan paneelin sijainnin perusteella (oranssi viiva, oikea akseli).

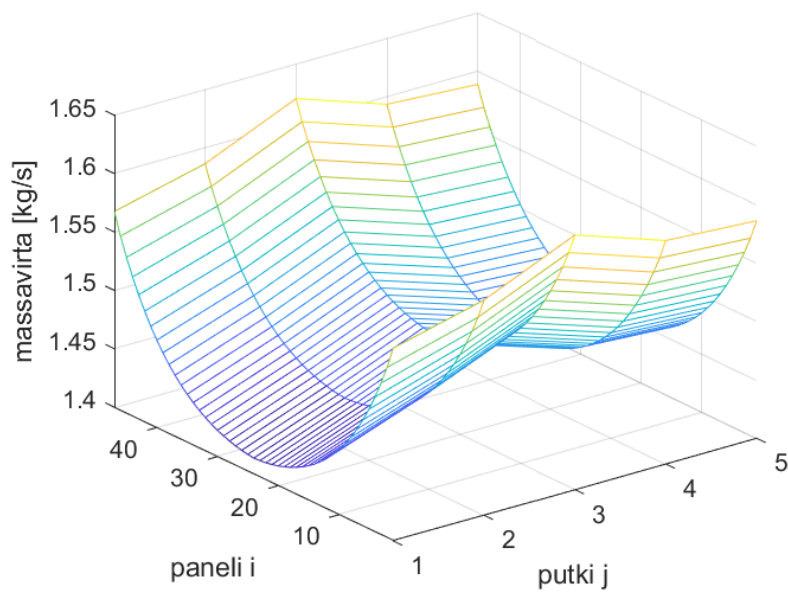
Kun kuvan 4.2 korjauskerroinsovitteella korjattiin kattilan A mittausdatassa oli havaittavissa selvä ulostulolämpötilojen profiili savukaasun virtaussuuntaan nähden sivusuunnassa. Lämpötilaerot ovat merkittävästi suurempia, kuin mitä selittyy pelkällä höyrypuolen virtauksen epätasaisella jakautumisella paneeleihin, joten lämpövirralle laadittiin korjauskerroin neljännen asteen polynomisovitteena (kuva 4.2).



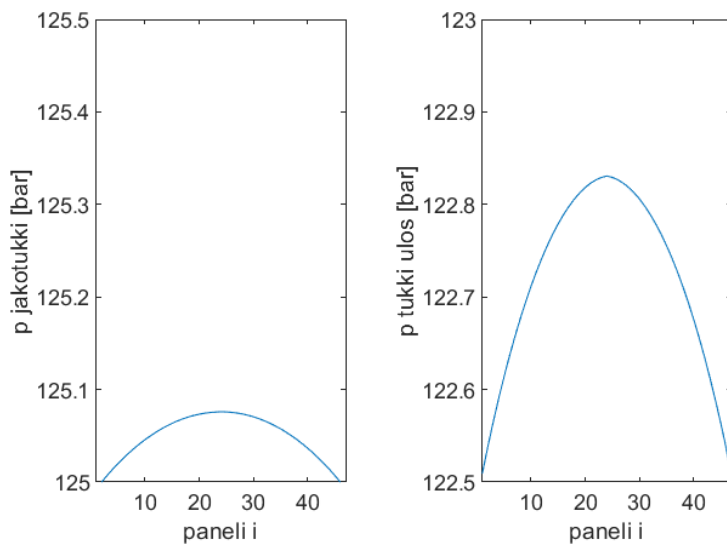
Kuva 4.3: Lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun 1.putken lämpövirta kasvatettu 80%.



Kuva 4.4: Mitatut ja lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun lämpövirta korjattu sovitteella.



Kuva 4.5: Virtauksen jakautuminen tulistinputkiin. Putkipaneeli 1 on savukaasukanavan reunalla, indeksi kasvaa kohti savukaasukanavan reunaa siirryttäessä.



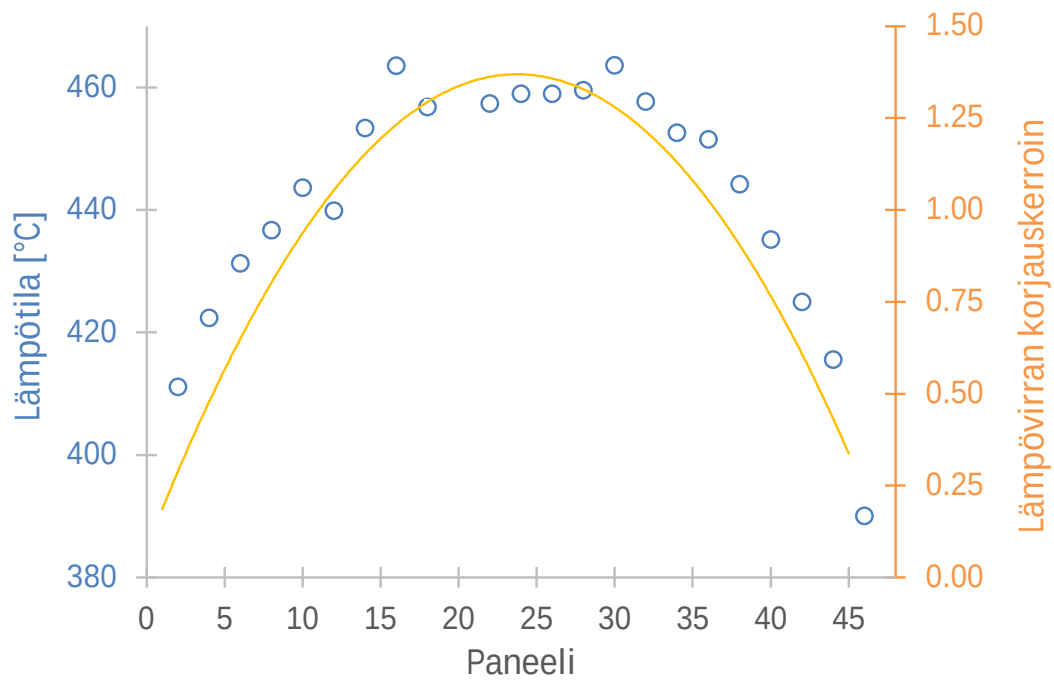
Kuva 4.6: Höyryn staattinen paine jako- ja keräystukissa.

Äki loppu.

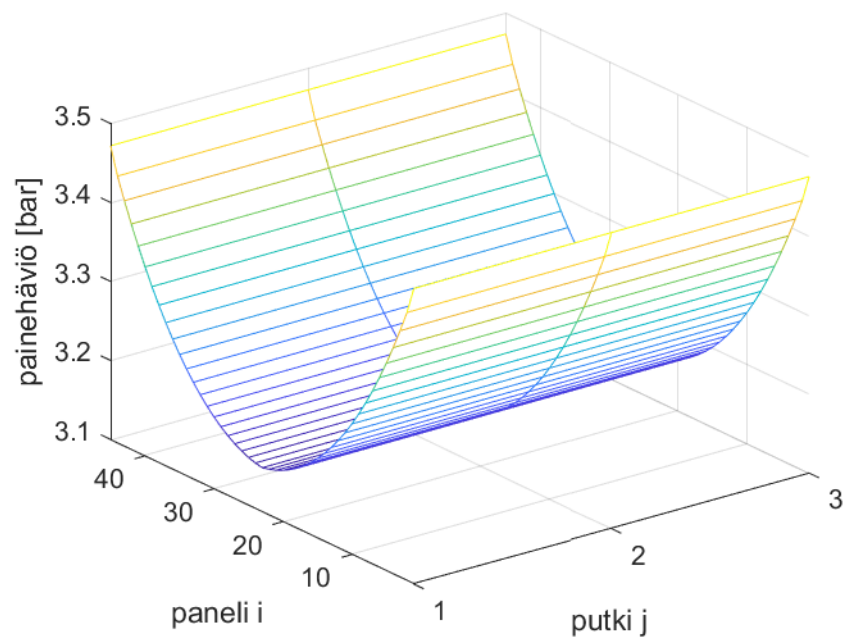
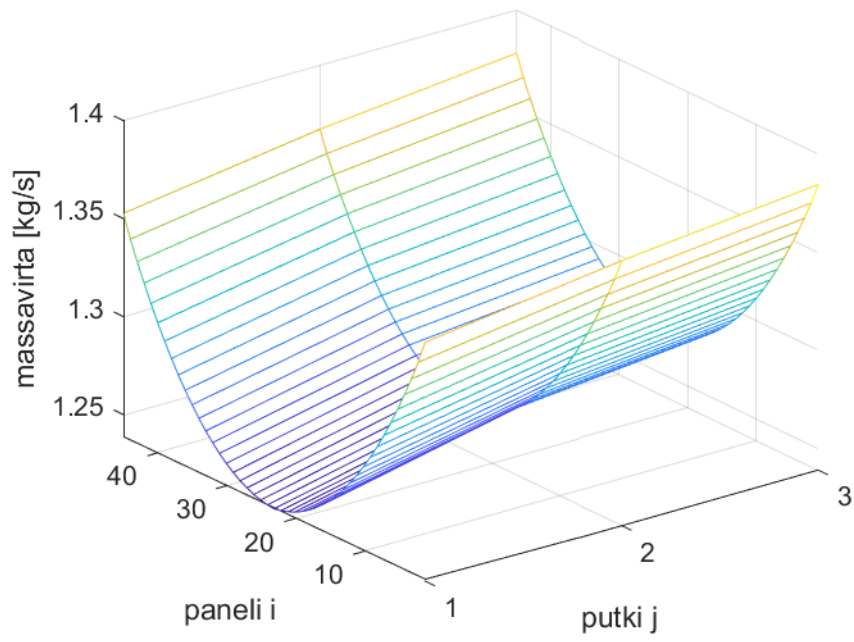
4.2 Kattila B

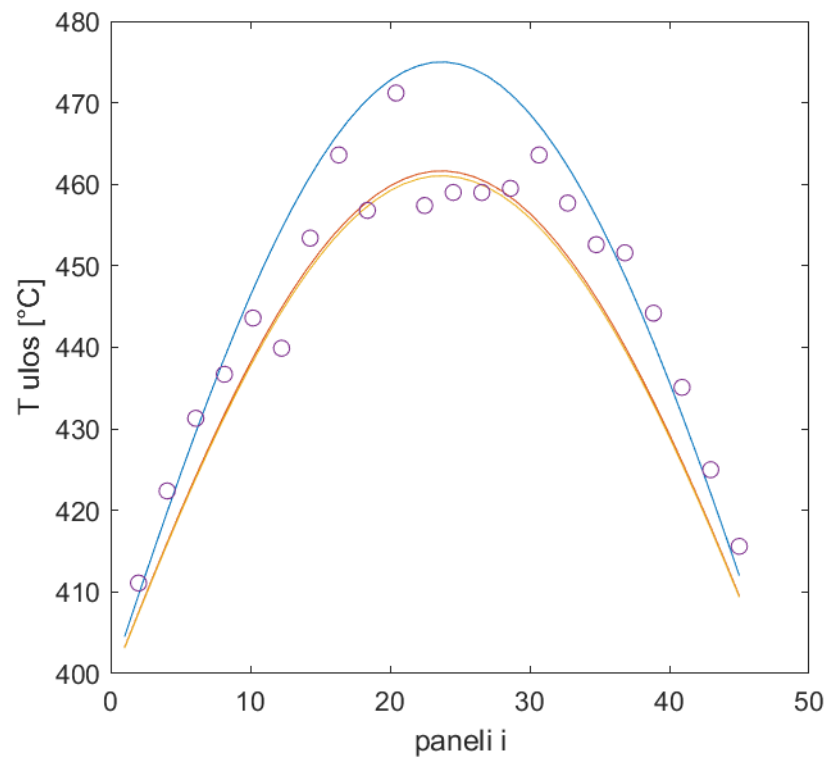
Kattila B:n data.

Taulukko 4.2. Kattila B:n 2-tulistimen mitat.



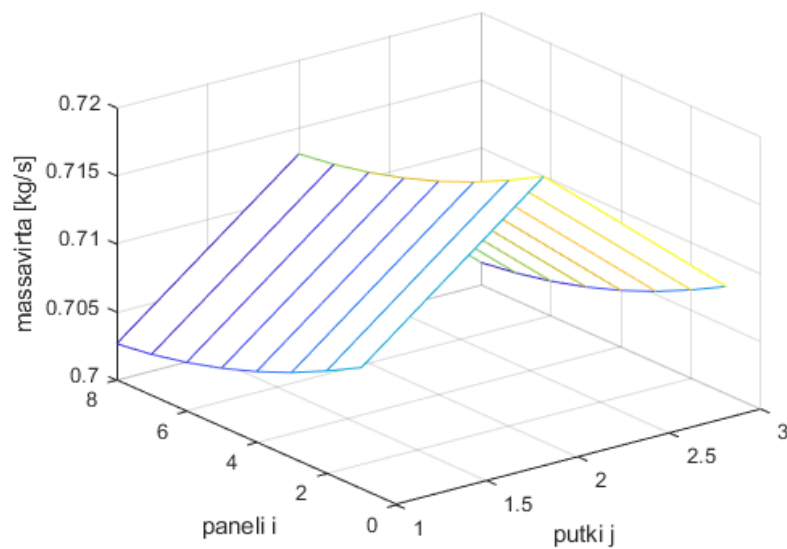
Kuva 4.7: Mitatut ja lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun lämpövirta korjattu soviteella.



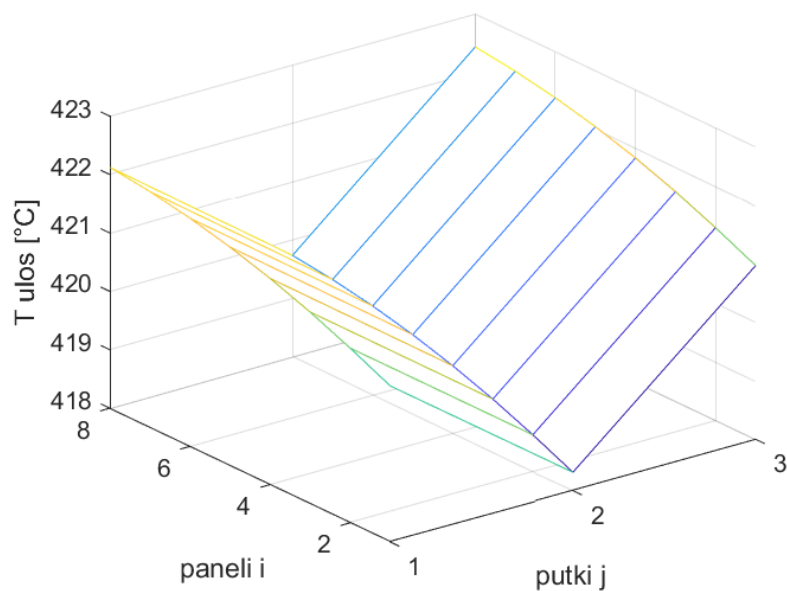


Kuva 4.8: Mitatut ja lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun lämpövirta korjattu sovitteella.

4.3 Kattila C

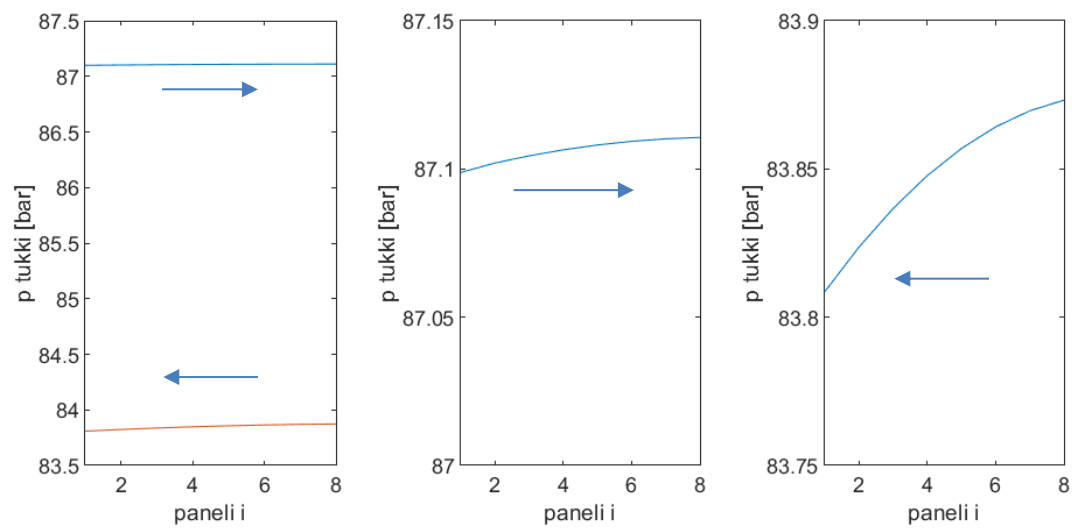


Kuva 4.9: Virtauksen jakautuminen tulistinputkiin. Putkipaneeli 1 on savukaasukanavan reunalla, indeksi kasvaa kohti savukaasukanavan reunaa siirryttäessä.



Kuva 4.10: Lämpötilat putkien ulostuloissa. Putkipaneeli 1 on savukaasukanavan reunalla, indeksi kasvaa kohti savukaasukanavan reunaa siirryttäessä.

Painejakauma jako- ja keräystukeissa



Kuva 4.11: Höyryn staattisen paineen jakauma jako- ja keräystukeissa. Paneeli 1 sijaitsee savukaasukanavan reunalla, paneeli 8 keskellä.

Lähteet

1. Vilarroel, Roberto; Silva, Murilo; Silotti, Saulo. 2018. Perfil transversal das temperaturas dos superaquecedores como ferramenta de avaliação da condição operacional em caldeiras de recuperação. ABTCP 2018, 25 October 2018.
2. Mittausdata, Äänekoski. Sähköposti, Hannu Loiri, 19.5.2022.
3. Mittausdata, Kymi. Sähköposti, Toni Orava, 24.11.2022.
4. Mittausdata, Kotkamills. Sähköposti, Jarmo Latva, 13.6.2022.
5. Kawaji, Mashiro, Shen, X.H., Tran, H., Esaki, S. ja Dees, C., 1995. Prediction of heat transfer in the kraft recovery boiler superheater region. TAPPI Journal, 78(10), pp. 214-221.
6. Kumar, Kunal, Maakala, V. ja Vuorinen, V., 2020. Integrated study of flue gas flow and superheating process in a recovery boiler using computational fluid dynamics and 1D-process modeling. TAPPI Journal, 19(6), pp. 303-316.
7. Park, H.Y., Faulkner, M., Turrell, M.D., Stopford, P.J. and Kang, D.S., 2010. Coupled fluid dynamics and whole plant simulation of coal combustion in a tangentially-fired boiler. Fuel, 89(8), pp.2001-2010.
8. Chen, T., Zhang, Y.J., Liao, M.R. and Wang, W.Z., 2019. Coupled modeling of combustion and hydrodynamics for a coal-fired supercritical boiler. Fuel, 240, pp.49-56.
9. Kast, W., Nirschl, H., 2010. Pressure Drop in Flow Through Pipes of Changing Cross-section. VDI Heat Atlas, 2. painos; Springer: Berliini/Heidelberg, Saksa; pp. 1065–1075
10. Henry, J.A.R., 1983. Heat exchanger design handbook 2, Fluid mechanics and heat transfer, 2.2 Single-Phase Fluid Flow / 2.2.7 Headers, Nozzles and Turnarounds; Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA.

Appendix A: appendiks