

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 I & Tulistinprojekti, Osa II**

Lappeenranta 2023

43 pages

Reports

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

Soodakattiloiden valmistajat käyttävät tulistinmitoituksessaan ohjetta ”Tulistimen maksimipintalämpötila on 30 °C korkeampi kuin keskimääräinen höyryn ulostulolämpötila ko. tulistimesta. Soodakattilayhdistyksen tulistinprojektissa pyritään mittausten ja mallinnuksen avulla arvioimaan, 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 dataa kerättiin ja analysoitiin. Mittausdataa kerättiin ja analysoitiin etenkin savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisen ja viimeisen tulistimen osalta, mahdollisuuksien mukaan myös eri paneeleista ja paneelien eri putkista. Tarkastelu painottuu erityisesti savukaasun virtaussuunnassa ensimmäiseen ja viimeiseen tulistimeen.

Osa II käsittää tulistimien sisäpuolisen virtauksen mallinnuksen. Mallinnuksessa selvitetään, rinnakkaisten putkien lukumäärän vaikutusta tulistinputkien virtauksen epätasaiseen jakautumiseen. n. 6 kk LUT

Avainsanat: tulistin, painehäviö, soodakattila, lämpötilaprofiili

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Symboliluettelo	5
1 Johdanto	7
2 Tausta – Osa I	9
2.1 Kerätty mittausdata.....	11
2.2 Tulistinputkien ulostulolämpötiloihin vaikuttavat ilmiöt.....	14
3 Mallinnus – Osa II	17
4 Tulokset	24
4.1 Kattila A	24
4.1.1 Kattilan kuvaus	24
4.1.2 Laskentatulokset tasaisella lämpövirralla	26
4.1.3 Mitatun lämpötilajakauman toteuttava lämpövirran jakauma	28
4.2 Kattila B	31
4.2.1 Kattilan kuvaus	31
4.2.2 Laskentatulokset tasaisella lämpövirralla	33
4.2.3 Mitatun lämpötilajakauman toteuttava lämpövirran jakauma	35
4.3 Kattila C	37
4.3.1 Kattilan kuvaus	37
4.3.2 Laskentatulokset.....	39
5 Yhteenveto ja johtopäätökset	42
Lähteet	43

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 [$^{\circ}\text{C}$]
U	kokonaislämmönsiirtokerroin [$\text{W/m}^2\text{K}$]
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

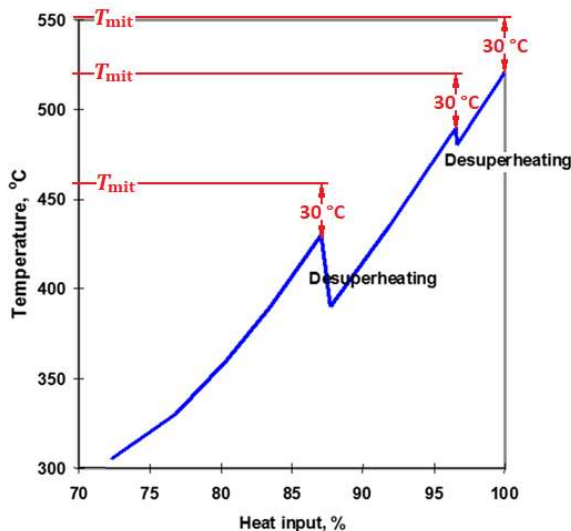
Lyhenteet

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 noin $+30\text{ °C}$ lämpötilalisään tulistimen ulostulon keskilämpötilaan (kuva 1.1). 30 °C tai vastaavan lämpötilalisän oikeellisuudesta erikokoisille kattiloille on kuitenkin epävarmuutta, varsinkin kun uusien kattiloiden koot ovat kasvaneet huomattavasti: noin 30 °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).

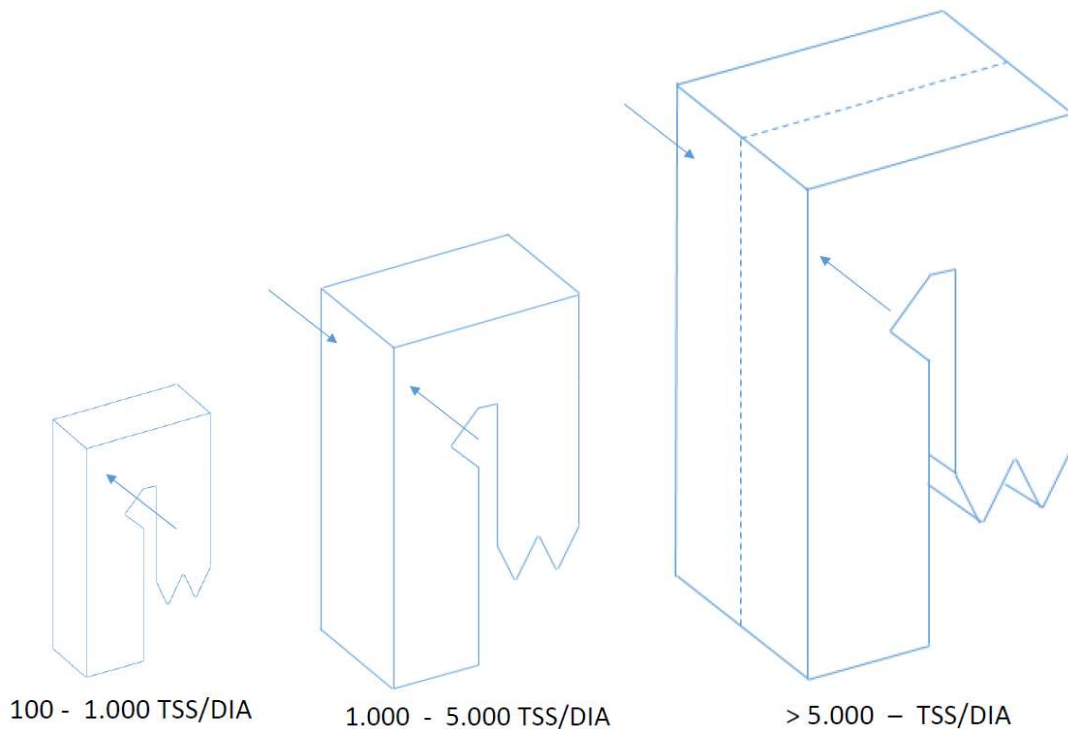


Kuva 1.1: Tulistimien lämpötiladiagrammi

Jos valittu esim. 30 °C lämpötilalisä on uusilla, suurilla kattiloilla riittämätön, niin käytön aikaiset pintalämpötilat voivat ylittää mitoituslämpötilan. Tällöin tulistinputkien viruminen nopeutuu. Uusilla isoilla kattiloilla etenkin savukaasun virtaussuunnassa ensimmäinen tulistin kasvattaa höyryn lämpötilaa paljon, joten mielenkiinto kohdistuu etenkin siihen, millaista lämpötilalisää tässä tulistimessa on syytä käyttää.

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.



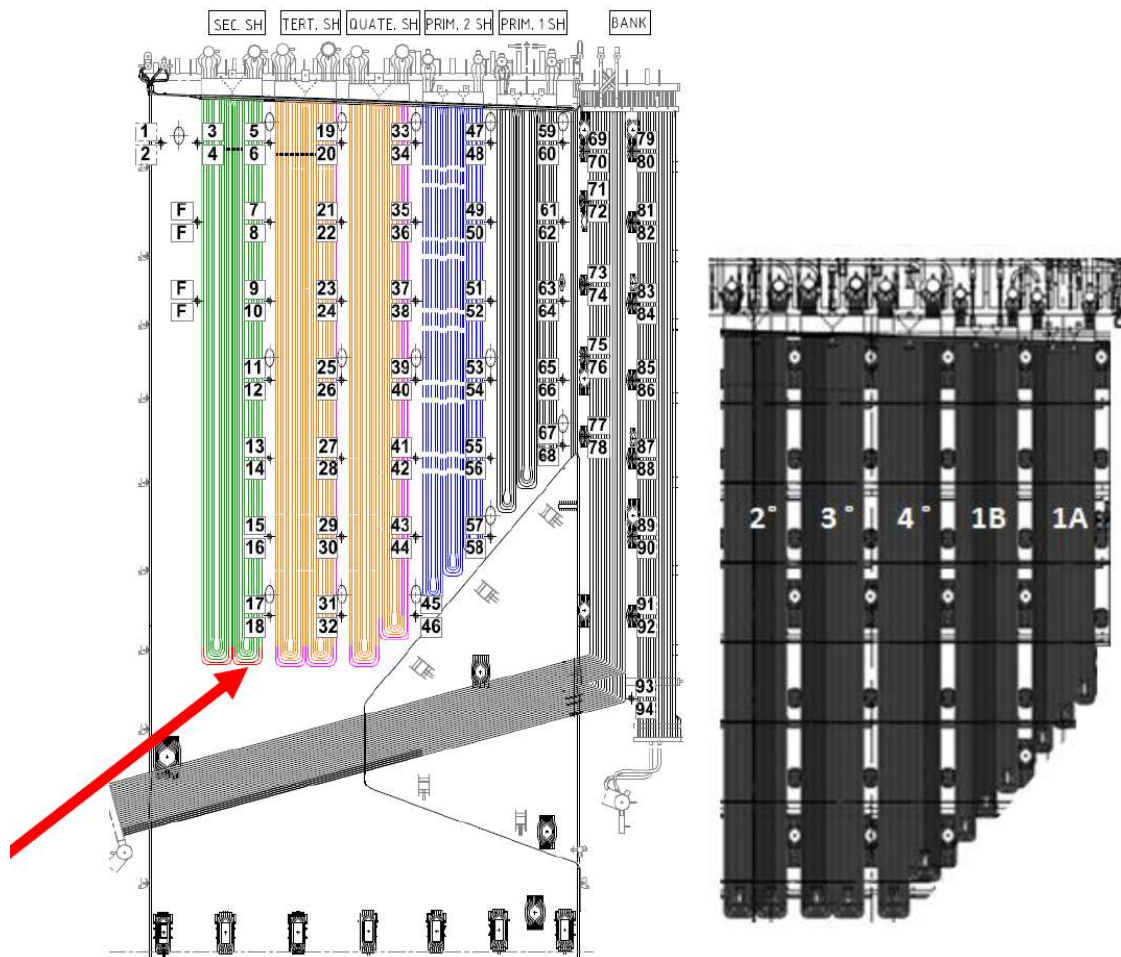
Kuva 1.2: Soodakattilan koon muutos kapasiteetin kasvaessa.

Tämän tulistinprojektin Osassa I kerättiin kolmen suomalaisen soodakattilan dataa. Mittausdataa kerättiin ja analysoitiin etenkin savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisen ja viimeisen tulistimen osalta, mahdollisuuksien mukaan myös eri paneeleista ja paneelien eri putkista.

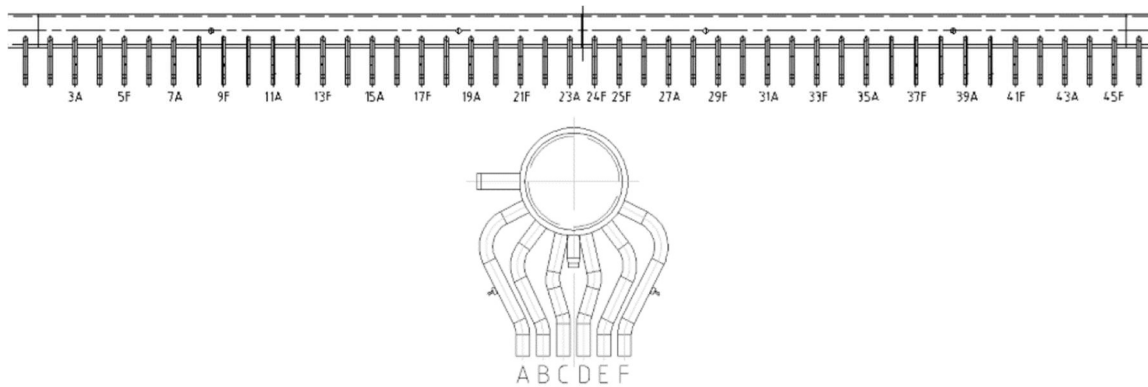
Tämän tulistinprojektin Osassa II tavoitteena on perehtyä höyryvirran jakautumiseen eri paneelien ja panelien yksittäisten putkien välillä. Työssä on laadittu laskentamalli kolmen eri kokoisen kattilan savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisille tulistimille. Mallin avulla voidaan arvioida höyryvirran 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

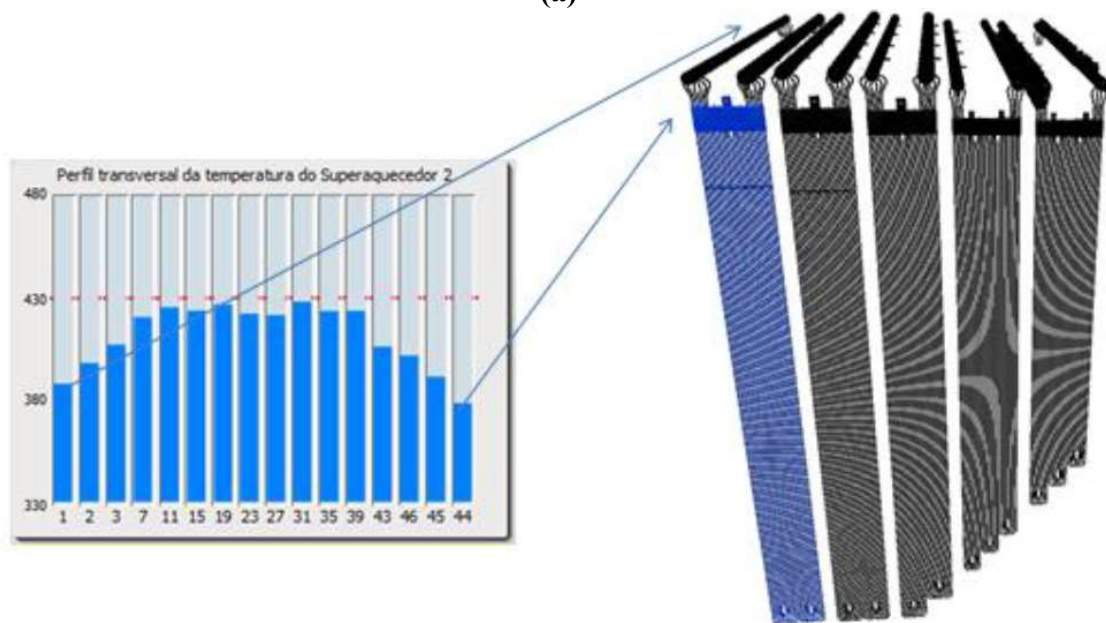
Soodakattilan tulistinputkien lämpötilajakaumasta on saatavilla vain vähän kattavaa, julkista mittausdataa. Villarroel et al. esittivät 2018 Eldoradon suuren, 7850 t_{ka}/d soodakattilan savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisen, 2-tulistimen (kuva 2.1) lämpötilamittaustuloksia [1]. 2-tulistin koostuu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



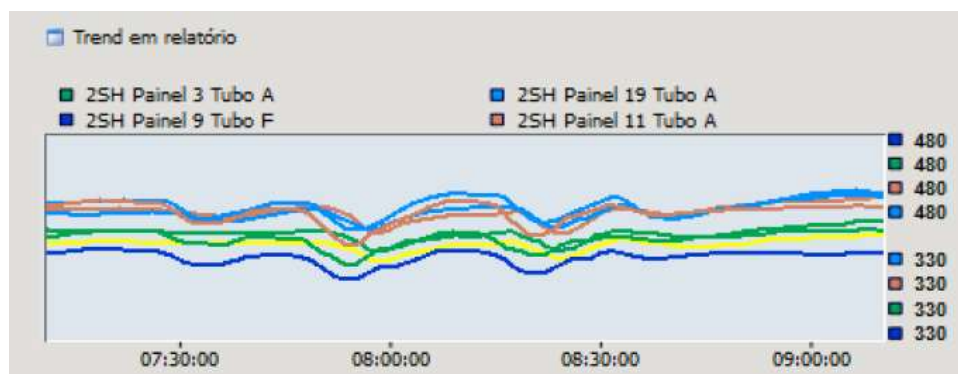
Kuva 2.1: Eldoradon soodakattilan tulistimet.[1]



(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-paneelien 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 tulistuspöytätilojen laskiessa reunimmaisista paneeleja kohti (kuva 2.2c), mutta ei riittä 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 (Osa I) 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.

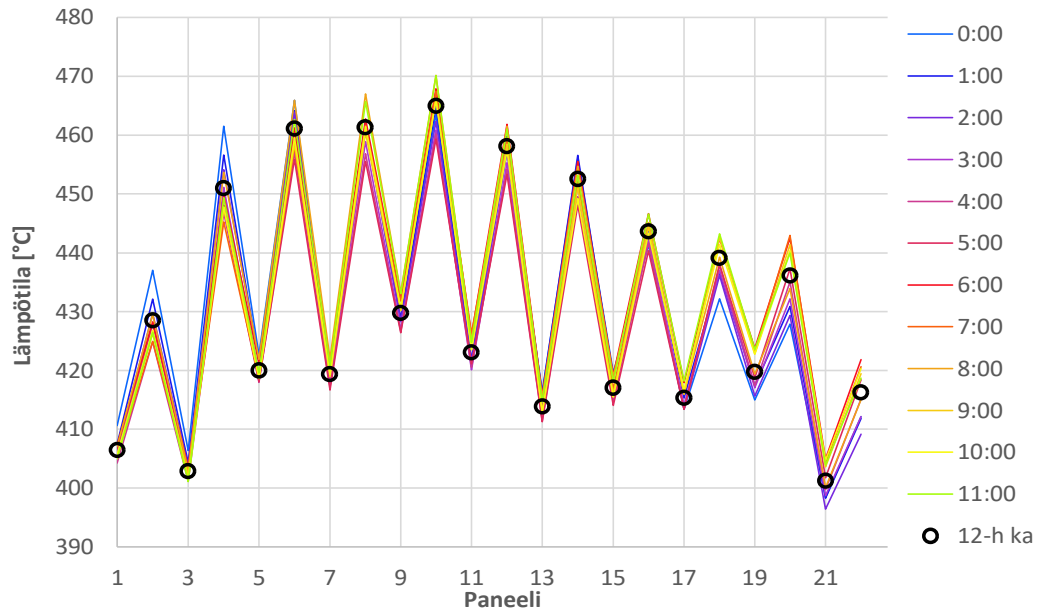
Tulistimen lämpötilojen mittauspisteet sijaitsevat kattiloiden vintissä eli kattoputkiston yläpuolella. Tämä osa putkea on ulkopuoliselta säteilyltä ja konvektioltä sekä korrosiolta suojattu. Mitatun lämpötilan voidaan olettaa vastaavan mittauksen tarkkuuden rajoissa putken sisällä virtaavan höyryn lämpötilaa. Kattiloista A ja B saaduissa lämpötilojen mittausdatoissa 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.

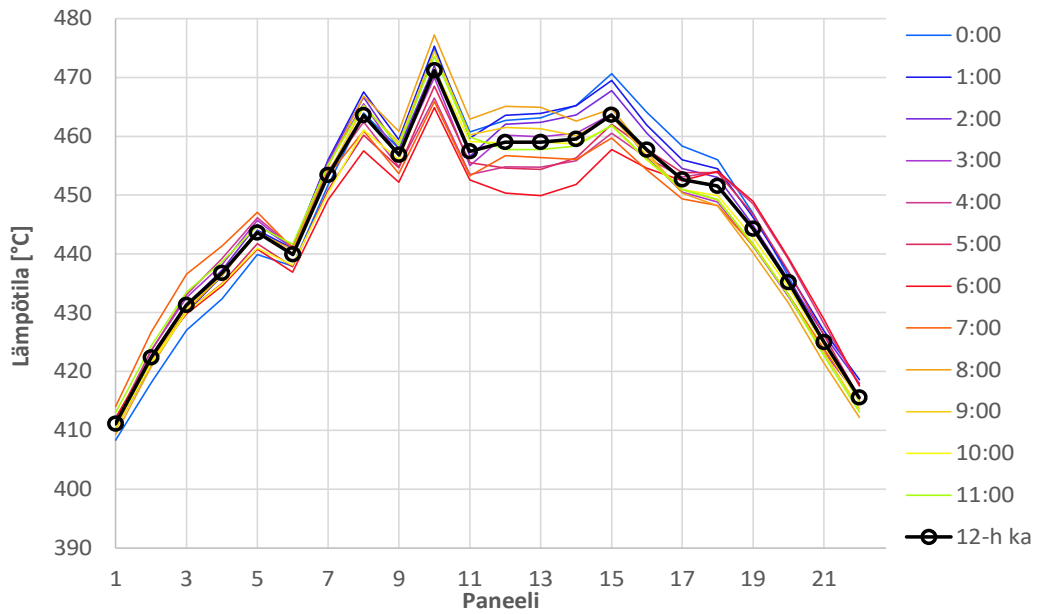
Saaduista lämpötilamittauksista laskettiin tuntikeskiarvot 12 tunnin jaksolle, jotta saatiin käsitys keskimääräisistä lämpötilatasoista, ja samalla myös lämpötilan vaihtelusta ajan funktiona. Kattiloiden B ja C 2-tulistimien ulostulolämpötilat eri paneeleista mitattuina on esitetty kuvassa 2.3.

Tieto siitä, missä panelin putkessa mittauspisteet sijaitsivat puuttui kummastakin kattilasta A ja B, 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 mittauksilukemat on esitetty kuvassa 2.4. Lämpötilajakauma tämän tulistimen ulostuloissa on selvästi tasaisempi, kuin kahden isomman kattilan 2-tulistimissa.

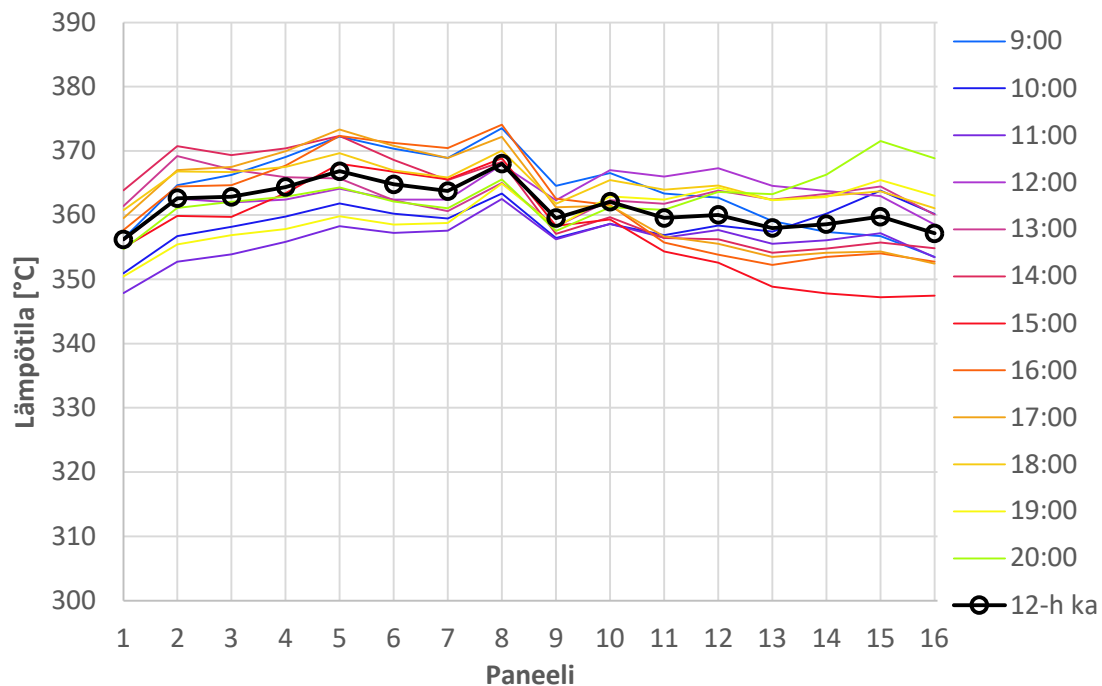


(a)



(b)

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



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

2.2 Tulistinputkien ulostulolämpötiloihin vaikuttavat ilmiöt

Höyryn ulostulolämpötiloihin tulistinputkista vaikuttavat sekä savukaasu- että höyrypuolen ilmiöt. Toisaalta tyypillisesti savukaasukanavan reunoilla savukaasun virtausnopeus ja lämpötilat jäävät pienemmiksi kuin keskellä, mikä pienentää lämpötilaeroa ja siten tulistuksen loppulämpötilaa. 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 tulistuselämpötilaan: 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 tulistuselämpötilaan 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 3D-CFD/1D-prosessimallinnusmenetelmiä sovellettu hiilikattiloiden mallinnukseen [7,8]. Soodakattilan koon vaikutusta tulistinpaneelien ja paneelien yksittäisten putkien ulostulolämpötiloihin ei ole tähän mennessä selvitetty.

3 Mallinnus – Osa II

Tässä tutkimuksessa (Tulistintutkimus Osa II) on tarkoitus selvittää alustavasti kolmen eri kokoisen soodakattilan toimintaa putken sisäpuolisten, höyrypuolen ilmiöiden kannalta. Tällä päästään selvyyteen 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

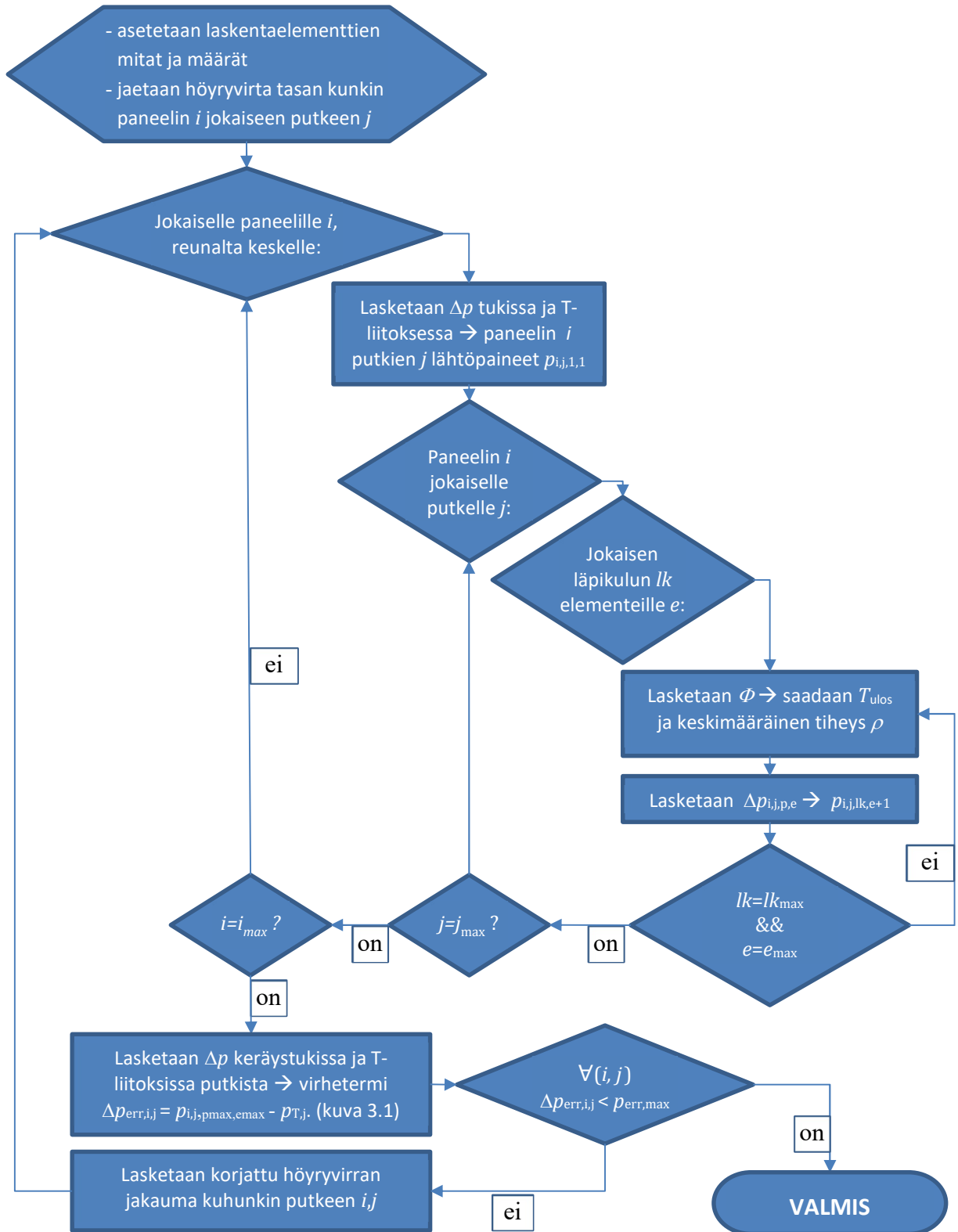
Mallinnus toteutettiin MATLAB-ohjelmistolla (R2019a). Höyryn tilasuureet saatiin XSteam-höyrykirjastolla (IAPWS IF-97). Toteutus oli kaksiosainen: ensin lämpövirran tiheys Φ [W/m² kaikkiiin putkiin asetettiin vakioksi. Laskenta jaettiin elementteihin siten, että kunkin paneelin i putken j läpikulku p oli jaettu 10 laskentaelementtiin e . Näiden 10 elementin lisäksi läpikulkujen 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 kaikkiiin putkiin. Kokonaishöyryvirraksi asetettiin saadun mittausdatan keskiarvo [2,3,4]. Laskennan toimintaperiaate on esitetty kuva 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 höyrytükkin ja savukaasukanavassa kattila

Tulistinputkien mutkien kertavastukset arvioitiin mutkan kulman, sekä kääntösäteen perusteella, arvojen vaihdellessa välillä $K = 0.05$ ($\alpha < 60^\circ$, $r/d_i > 1.5$) enimmillään $K = 0.4$: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

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

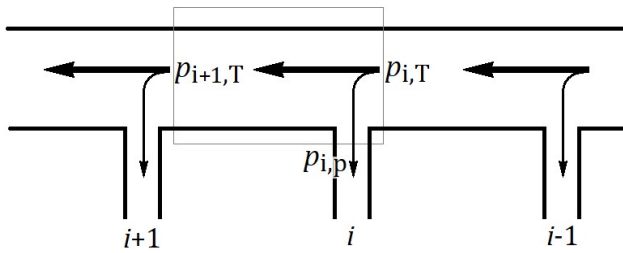
missä $L_{i,j,\text{lk},e}$ on laskentaelementin pituus.

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 painehäviön,

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

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

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



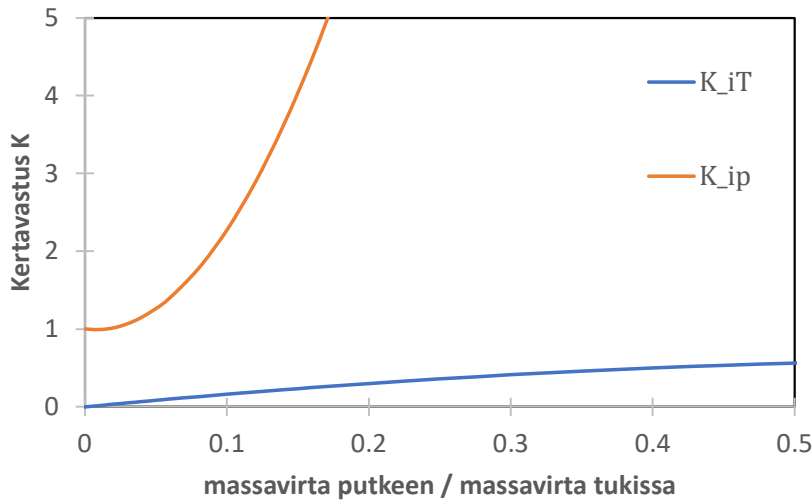
Kuva 3.2: Virtauksen jakautuminen jakotukista paneeleihin $i = 1, \dots, i_{\max}$.

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 suurempia 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.

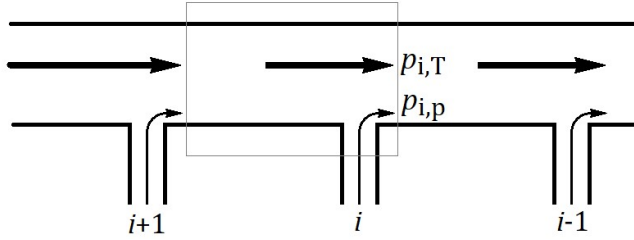


Kuva 3.3: Kertavastukset jakotukissa lämpöpintaputkien T-haarojen ohi ($K_{i,t,jako}$), ja putkeen kääntyvälle virtaukselle ($K_{i,p,jako}$).

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,

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

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



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).

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

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

Lineaariset sovitteet on esitetty kuvassas 3.5 graafisesti.

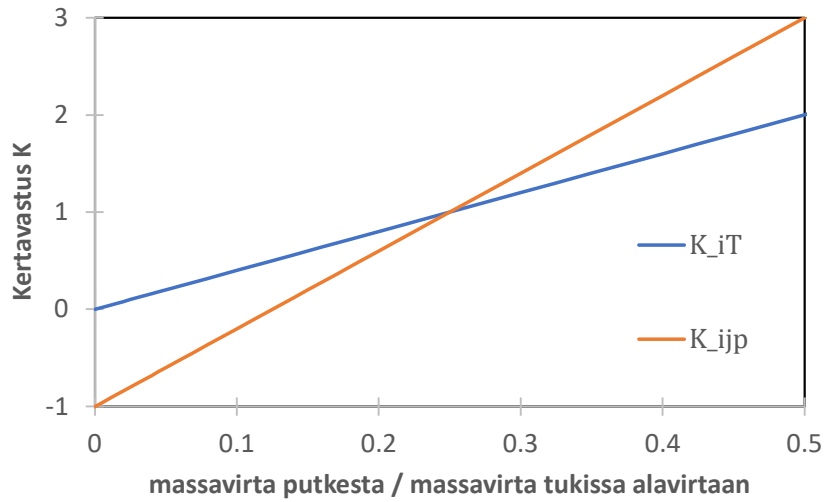
Yhtälöiden (9) ja (10) tuottamien paineiden erotukset muodostavat virhetermin $\Delta p_{\text{err},ij}$,

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

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,

$$\dot{m}_{i,j}^{(n+1)} = \dot{m}_{i,j}^{(n)} \left(\frac{\Delta p_{\text{tot},i,j} + \Delta p_{\text{err},i,j}}{\Delta p_{\text{tot},i,j}} \right)^\alpha, \quad (14)$$

missä α on vaimennuskerroin, jolla estetään iteroinnin divergointi.



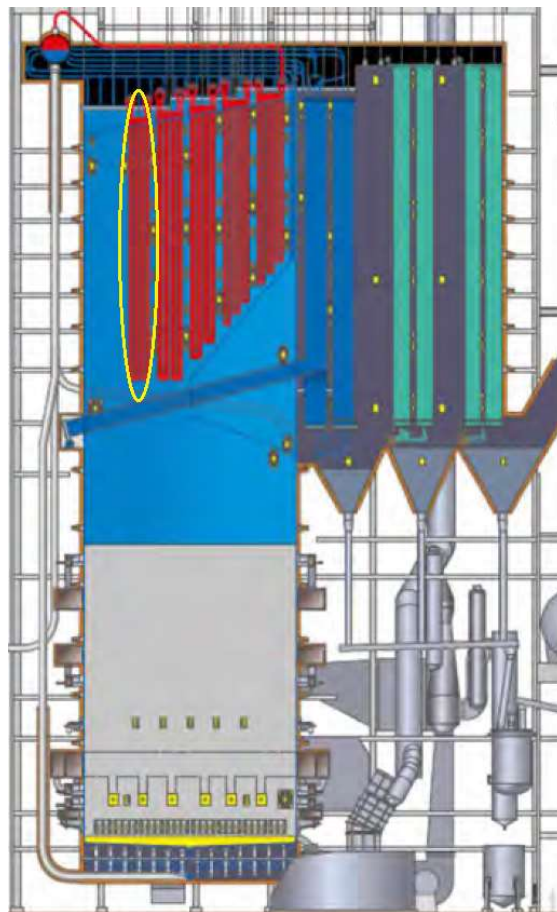
Kuva 3.5: Kertavastukset kokoojatukissa lämpöpintaputkien T-liitosten ohi ($K_{i,T}$), ja putkesta saapuvalle virtaukselle ($K_{i,j,p}$).

4 Tulokset

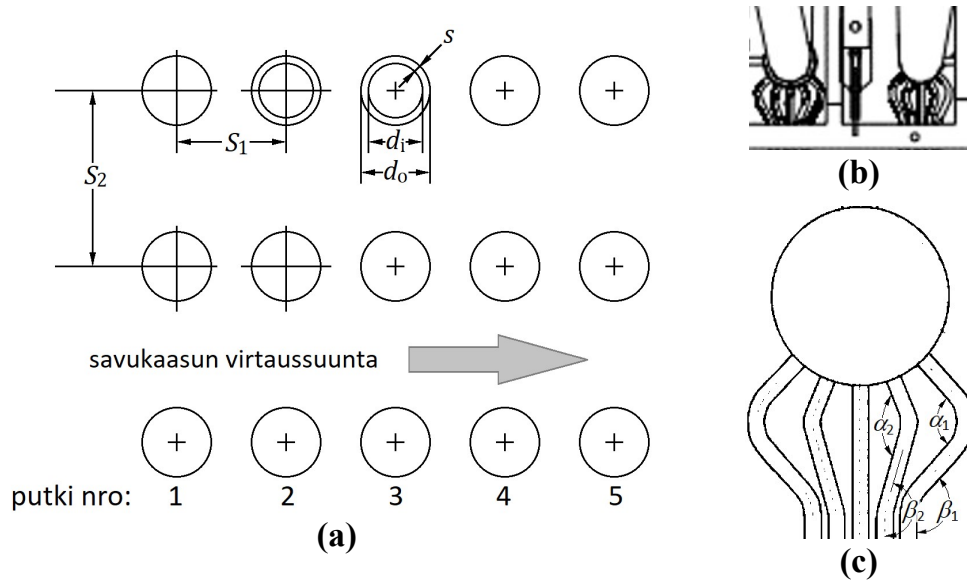
4.1 Kattila A

4.1.1 Kattilan kuvaus

Kattila A edustaa tutkimuksessa suurta, nimelliskapasiteetiltaan 7200 tka/d ja tuorehöyryn tuotannoltaan 363 kg/s, 515 °C ja 115 bar modernia kattilaa (kuva 4.1). Mallinnuksessa keskityttiin sekundääritulistimeen, joka sijaitsee savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisenä (ympyröity kuvassa keltaisella). Tulistimen päämitat on esitetty taulukossa 4.1, putkikoko ja jako- kuvassa 4.2. Paneelin yksittäisten putkien kokonaispituudet sekä putken mutkien kertavastusten summat on esitetty taulukossa 4.2.



Kuva 4.1: Kattila A:n sivukuva, tarkasteltava sekundääritulistin ympyröity keltaisella.



Kuva 4.2: Kattila A:n sekundääritulistin: a) yhden läpikulun kolmen paneelin putkijako ja mitat, b) jako- ja keräystukkien yhteen, kattila A:n kuva c) mutkien kulmat yhteissä tukkiin.

Taulukko 4.1. Kattila A:n sekundääritulistimen mitat.

Parametri	Arvo
Putkimitat: $d_o \times s$ [mm]	60.3×6.3
Putkijako $S_1 \times S_2$ [mm]	95.5×305
Paneelien lukumäärä N_p [-]	47
Paneelin korkeus savukaasukanavassa H_{tot} [m]	21.5
Putkien lukumäärä läpikulussa/paneelissa $N_{p/lk} / N_{p/p}$	5/20

Taulukko 4.2. Kattila A:n sekundääritulistimen putkien kokonaispituudet ja mutkien kerta-
vastusten summat. Kulmat α ja β , ks. kuva 4.1 (c).

Putken numero	1	2	3	4	5
Kokonaispituus [m]	84.1	83.4	82.9	82.7	82.6
Kulmat $\alpha + \beta$ [°]	75+30	55+20	0	55+20	75+30
Kertavastukset $K_\alpha + K_\beta$ [-]	0.12+0.06	0.09+0.05	0	0.09+0.05	0.12+0.06
Mutkat 2 läpikulun välissä [°]	90+90	90+90	180	90+90	90+90
2 läpikulun välinen K [-]	0.24 ^{1,3}	0.24 ¹	0.24 ¹	0.24 ¹	0.36 ^{2,3}
Kertavastusten summa $\sum K$ [-]	1.20	1.00	0.72	1.00	1.32

¹ $r/d_i \approx 2.5-3$, kaksi 90° mutkaa, kummassakin $K \approx 0.12$

² yksi 180° mutka, $r/d_i \approx 1.25 \Rightarrow K=0.25$. Lisäksi 2×2 20° mutkaa, á $K = 0.055$.

³ K :t parittoman läpikulun jälkeisille käännoille. Parillisen läpikulun jälkeen K_1 ja K_5 päinvastoin.

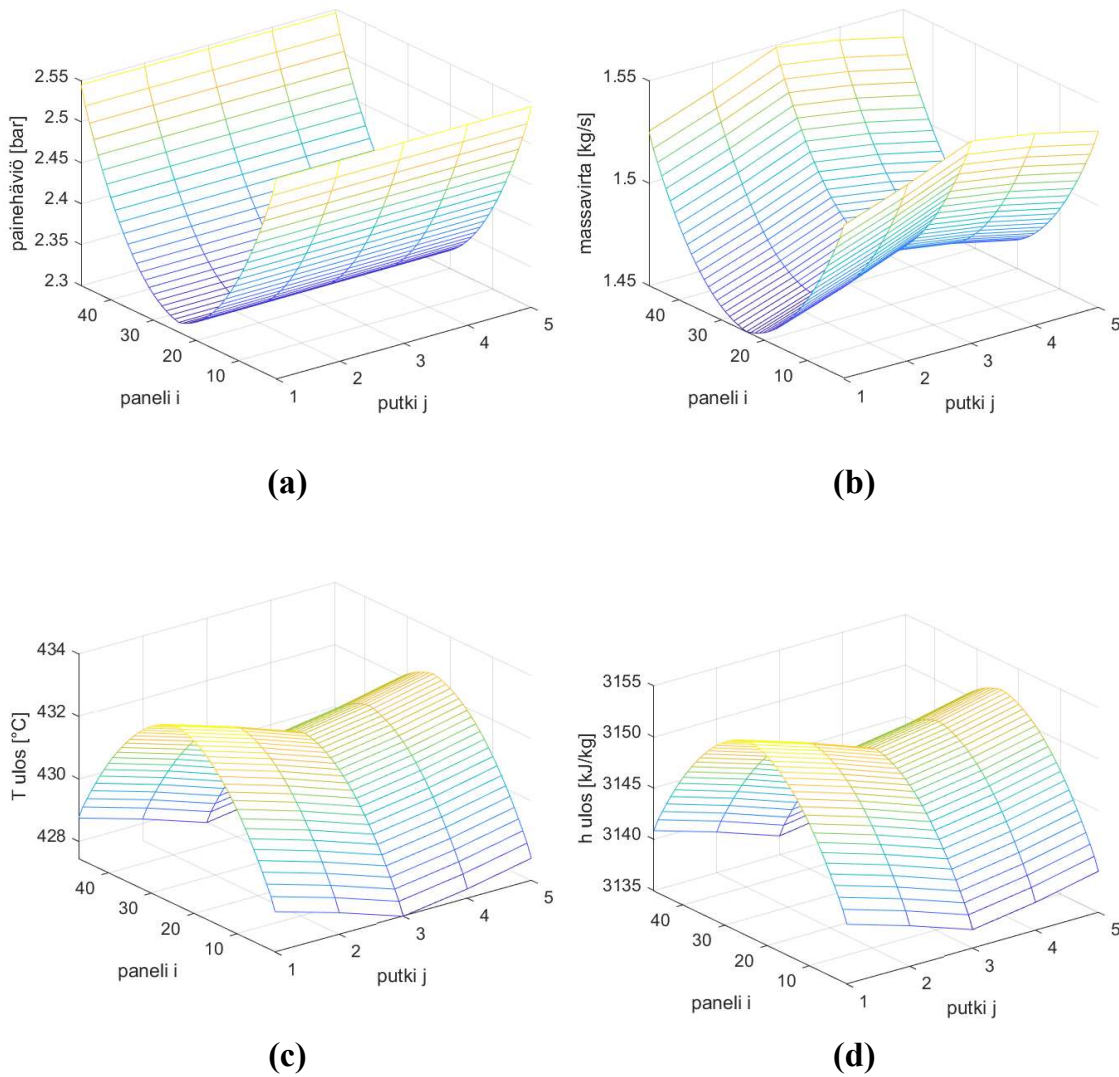
Putkien 1 ja 5 mutkien kertavastusten summat ovat hieman muita putkia suuremmat. Nämä putket ovat vuoron perään sisimpinä putkina läpikulkujen välisissä käännoissä, jolloin pienehköllä kääntösäteellä tapahtuva 180° mutka aiheuttaa hieman suuremman kertavastuksen kuin kaksi 90° kääntöä muissa putkissa. Erot jäävät kuitenkin pieniksi. Kertavastukset arvioitiin lähteen [9] käyrästöjen perusteella, arvioiden 90° mutkien säteeksi noin 135 mm, ja sisimmän putken 180° mutkan säteeksi noin 60 mm. Lisäksi yhteissä keräys- ja jakotukkiin olivat putkien 1 ja 5 mutkat hieman putkien 2 ja 3 mutkia jyrkemmät (kuva 4.1 b ja c, taulukko 4.1).

4.1.2 Laskentatulokset tasaisella lämpövirralla

Saadun mittausdata perusteella arvioitiin sekundääritulistimeen jälkimmäiseltä primääritulistimelta saapuvan höyryvirran lämpötilaksi noin 360°C . Massavirraksi arvioitiin $7300 \text{ t}_{\text{ka}}/\text{d}$ keskimääräisellä kuormalla noin 350 kg/s . Keskimääräiseksi lämpötilaeroksi savukaasun ja höyryn välille arvioitiin 640°C ; tällöin keskimääräiseksi kokonaislämmönsiirtokertoimeksi U tulistimessa saatiin $38 \text{ W/m}^2\text{K}$, jotta lähtevän höyryn lämpötila vastasi saadun mittausdatan noin 430°C arvoa.

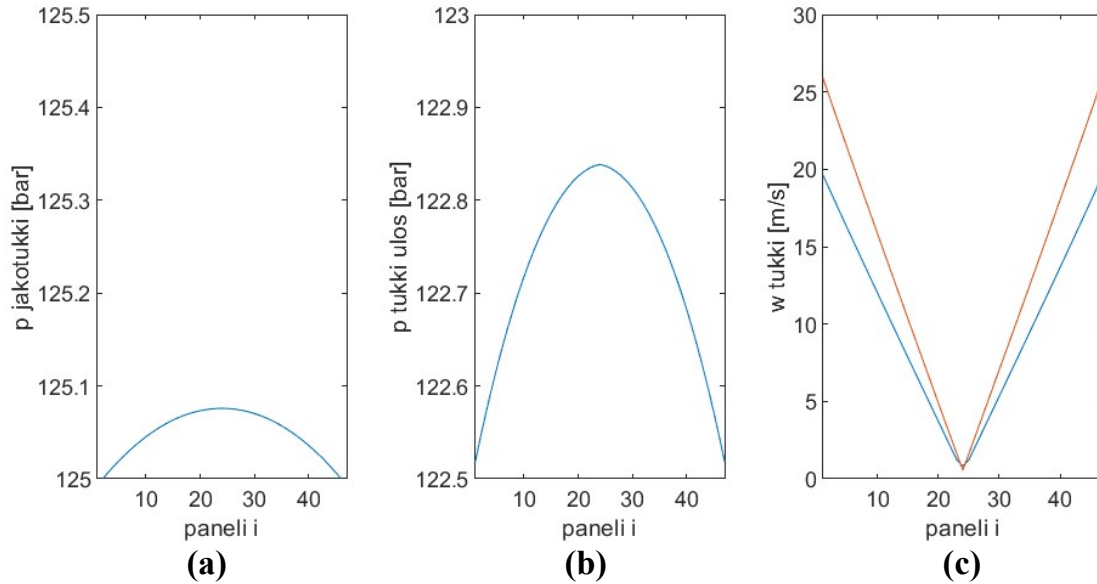
Kuvassa 4.3 on esitetty edellä esitetyillä lähtöarvoille saatu jakauma putkien a) painehäviöille, b) massavirroille, sekä kunkin putken ulostulon c) lämpötilalle sekä d) entalpialle. Höyryn massavirta jää keskimmaisissa paneeleissa jonkin verran reunimmaisista pienemmäksi, samoin kun yksittäisen paneelin reunimmaisten putkien massavirrat muihin putkiin verrattuna. Tämä ilmenee suurempana ulostulolämpötilana keskimmaisissa paneeleissa sekä paneelin reunimmaisissa, etenkin ensimmäisessä putkessa.

Oletuksella että lämpövirta ei merkittävästi muutu virtauksen suuntaan poikittain, saadut erot ovat hyvin pieniä verrattuna 2.3 a) mittaustuloksiin verrattuna: laskentatuloksissa vain noin 5°C kylmimmän ja kuumimman yksittäisen putken ulostulolämpötilojen välillä, kun mittaustuloksissa kylmimmän ja kuumimman putken välinen ero ulostulolämpötiloissa on lähes 70°C .



Kuva 4.3: Kattila A:n sekundääritulistimen laskentatulokset lämpövirran tiheyden ollessa vakio kaikkien putkien kaikissa osissa: a) putkien painehäviöt, b) putkien massavirrat, c) putkien ulostulolämpötilat, d) ominaisentalpiat putkien ulostuloissa.

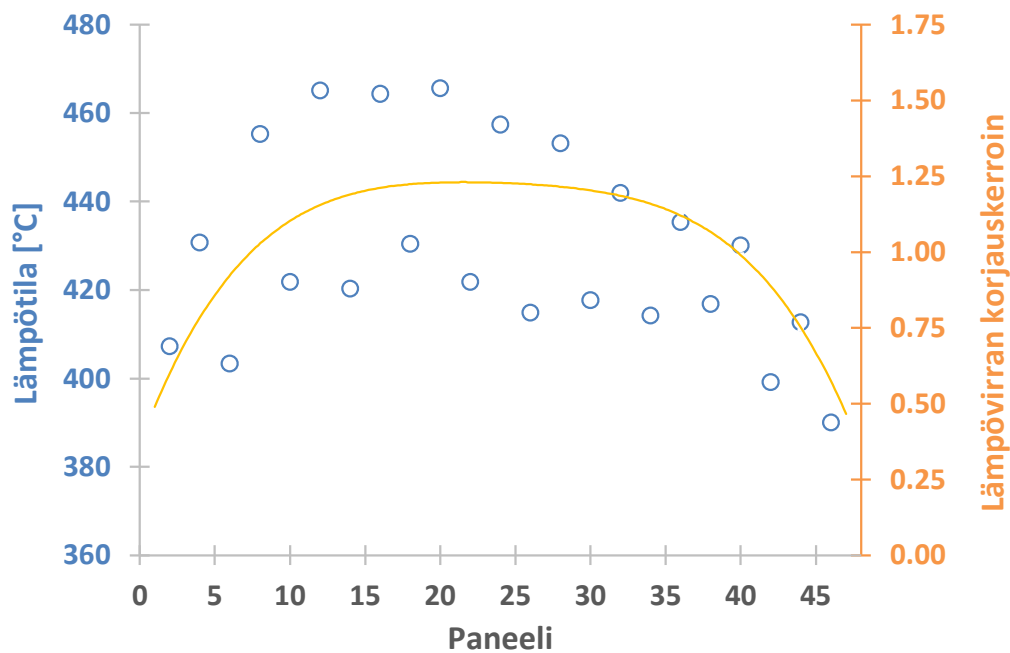
Painejakauma jako- ja keräystukeissa, sekä höyryn virtausnopeudet, on esitetty kuvassa 4.4. Bernoullin yhtälön mukaisesti jakotukissa staattinen paine kasvaa virtauksen suunnassa, kun virtausnopeus hidastuu höyryn poistuessa tukista tulistinputkiin. Paineerot jako- ja keräystukeissa ovat noin kertaluokkaa tulistinputkia pienemmät, minkä ansiosta virtausten jakautuminen putkiin on säilyy melko tasaisena.



Kuva 4.4: Virtaus kattila A:n jako- ja keräystukeissa: a) staattinen paine jakotukissa, b) staattinen paine keräystukissa, c) nopeusjakauma jako- ja keräystukeissa.

4.1.3 Mitatun lämpötilajakauman toteuttava lämpövirran jakauma

Kattilan A mittausdatassa oli havaittavissa selvä ulostulolämpötilojen profiili savukaasun virtaussuuntaan nähden sivusuunnassa, lämpötilaerojen ollessa merkittävästi suurempia, kuin mitä selittyy pelkällä höyrypuolen virtauksen epätasaisella jakautumisella paneeleihin. Tämän eron huomioimiseksi lämpövirralle virtauksen suuntaan poikittain laadittiin korjauskerroin. Korjauskerroin määritettiin laskemalla lämpötilaerot ΔT_i kustakin mitatusta ulostulosta primääritulistin 2:lta tulevaan lämpötilaan, määrittämällä kunkin ΔT_i :n suhde r keskimääräiseen, $r_{\Delta T_i} = \Delta T_i / \overline{\Delta T}$, ja laatimalla tälle suhteelle neljännen asteen polynomisovite. Kuvassa 4.4 on esitetty mitatut ulostulolämpötilat (siniset merkit, kuvaajan vasen psytyakseli), sekä laadittu lämpövirran korjauksen sovite (oranssi käyrä, oikea akseli).

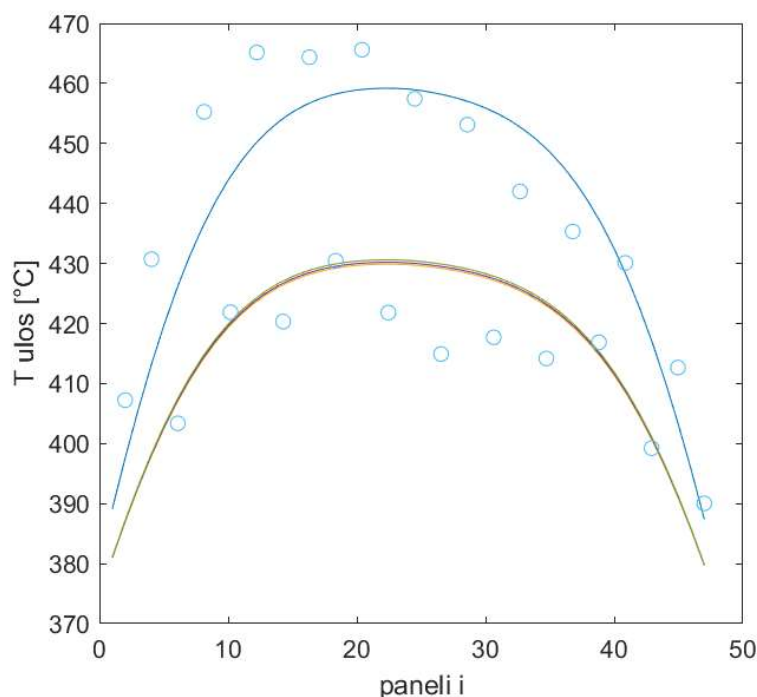


Kuva 4.5: Mitatut ulostulolämpötilat putkista (sininen, vasen akseli), sekä sovite kertoimelle, jolla mallin laskennallista lämpövirtaa korjataan paneelin sijainnin perusteella (oranssi viiva, oikea akseli).

Sivusuunnassa vaihtelevan lämpövirtaprofiilin lisäksi joka toinen mittauksen lämpötila oli suurempi ja joka toinen pienempi. Tämän arvioitiin selittyvän sillä, missä paneelin putkessa mittaus sijaitsi: savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisen putken säteilylämmönsiirron näkyvyyskerroin tulipesästä tulevaan kaasuun sekä tulipesän pintoihin on merkittävästi suurempi, kuin muiden putkien, ja myös konvektiolämmönsiirtokerroin on suurempi. Vaihtelun amplitudi oli suurehko, noin 20-50 °C.

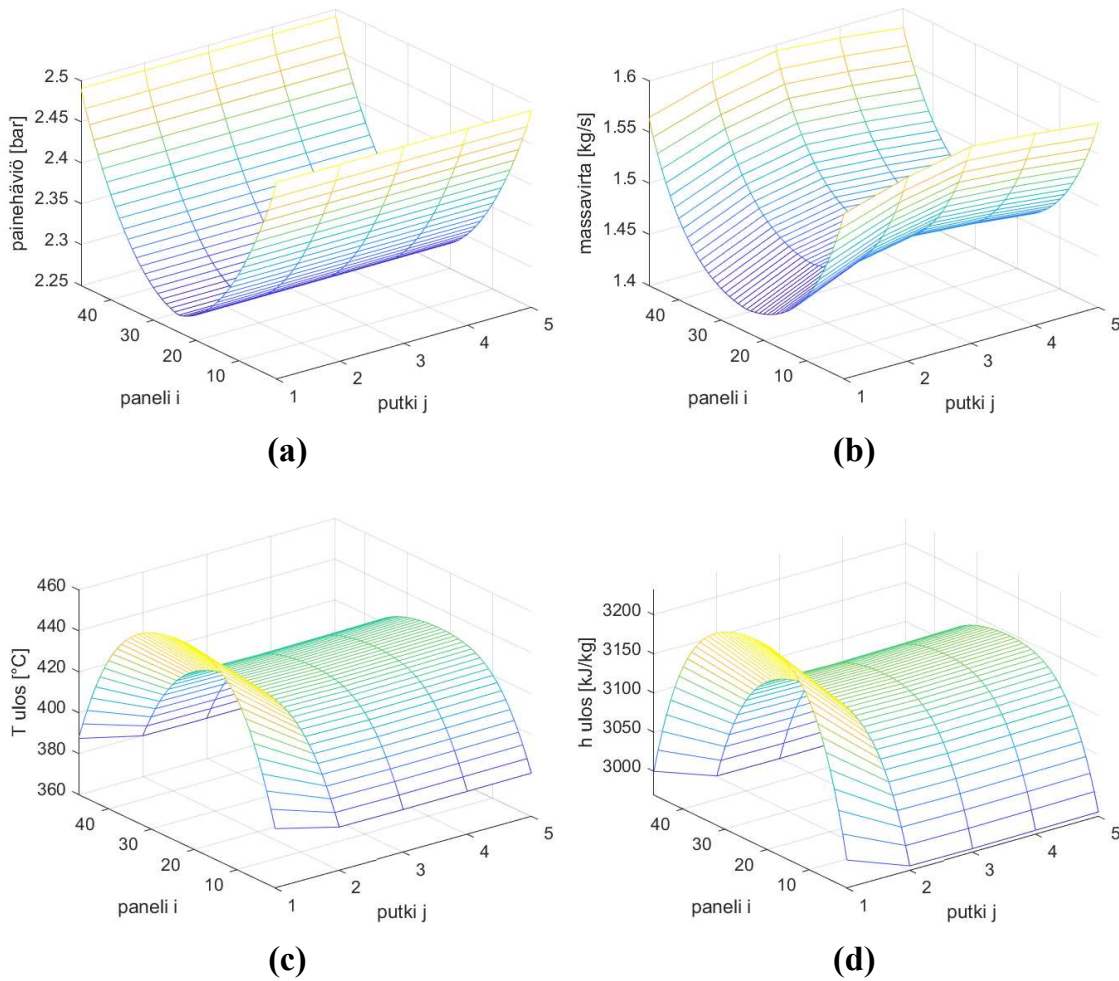
Ilmiön suuruudelle haettiin selitystä kasvattamalla savukaasua vastassa olevan ensimmäisen läpikulun ensimmäisen putken lämpövirran tiheyttä Φ'' [W/m²] manuaalisesti, pienentäen samalla keskimääräistä lämmönsiirtokerrointa, jotta ulos tulevan höyryn lämpötila säilyi likimain mitattua vastaavana. Sama korjaus tehtiin myös läpikulkuja yhdistävien alimpien osien lämpövirralle. Vaadittavan korjauksen kasvaessa huomattavan suureksi, myös viimeisen putken lämmönsiirtoa kasvatettiin: myös tämän osan näkyvyyskerroin tulipesään on ainakin vähän muita putkia suurempi, ja myös

konvektiolämmönsiirtokerroin saattaa olla lievästi kohonnut. Lopulta ensimmäisille ja alimmille osille asetettiin 80%, ja viimeisen läpikulun viimeiselle putkelle 10% kasvatettu lämmönsiirtokerroin. Keskimääräinen lämmönsiirtokerroin U pienennettiin $38 \text{ W/m}^2\text{K}$:sta $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ arvoon. Kun edellä kuvatut korjaukset putkien lämpövirtoihin määritettiin, saatiin kuvan 4.6 mukainen ulostulojen lämpötilajakauma.



Kuva 4.6: Mitatut ulostulolämpötilat putkista (siniset merkit), sekä lasketut ulostulolämpötilat lämpövirtakorjauksilla (putki 1 sinisenä käyränä, putket 2-5 muut, lähes päällekkäiset käyrät).

Kuvassa 4.7 on esitetty kuvaa 4.3 vastaavat tulokset korjatuilla lämpövirroilla. Lämpövirran ja massavirran epätasaisilla jakaumilla on toisiaan voimistava vaikutus: keskimmäisten paneelien pienentynyt virtaus kasvattaa ulostulolämpötilaa. Toisaalta kasvanut ulostulolämpötila myös pienentää tiheyttä, ja kasvattaa siten virtausnopeutta ja painehäviötä: virtauksen dynaamisen paine pienentyy tiheyden mukana vain lineaarisesti, mutta kasvaa verrannollisesti nopeuden neliöön.



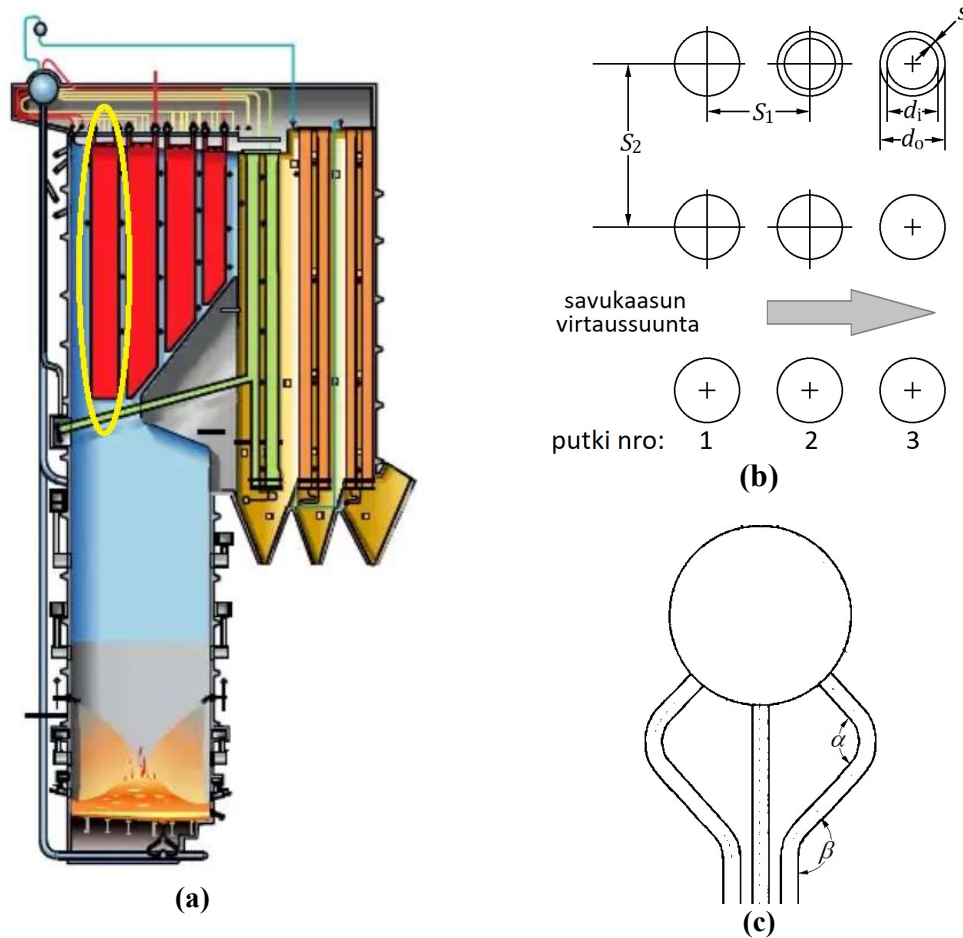
Kuva 4.7: Lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun paneelien lämpövirtoja korjattu kuvan 4.5 korjauskertoimen mukaisesti, ja ensimmäisen putken lämpövirtaa kasvatettu 80% ensimmäisessä läpikulussa ja tulistimen alaosan käännöissä, sekä 10% viimeisessä läpikulussa.

4.2 Kattila B

4.2.1 Kattilan kuvaus

Kattila B edustaa tutkimuksessa keskikokoista, nimelliskapasiteetiltaan 3600 t_{ka}/d ja tuorehöyryn tuotannoltaan 168 kg/s, 505 °C ja 102 bar modernia kattilaa. Kuvassa 4.7 on esitetty kattilaa B:n kaltaisen kattilan sivukuva. Sekundääritulistin, tutkimuksessa

mallinnettu, on ympyröity kuvassa 4.8 keltaisella. Tulistimen päämitat on esitetty taulukossa 4.3, putkikoko ja jako- kuvassa 4.4. Paneelin yksittäisten putkien kokonaispituudet sekä putken mutkien kertavastusten summat on esitetty taulukossa 4.4.



Kuva 4.8: Kattila B: a) sivukuva, tarkasteltava sekundääritulistin ympyröity keltaisella b) yhden läpikulun kolmen paneelin putkijako ja mitat, c) jako- ja keräystukkien yhteen. Sivukuva (a) esittää kattila B:n tyypistä kattilaa, mutta mittasuhteet eivät välttämättä ole tarkkoja.

Taulukko 4.3. Kattila A:n sekundääritulistimen mitat.

Parametri	Arvo
Putkimitat: $d_o \times s$ [mm]	65.3×7.1
Putkijako $S_1 \times S_2$ [mm]	95.5×305
Paneelien lukumäärä N_p [-]	45
Paneelin korkeus savukaasukanavassa H_{tot} [m]	20.0
Putkien lukumäärä läpikulussa / paneelissa $N_{p/lk} / N_{p/p}$	3/24

Taulukko 4.4. Kattila B:n sekundäritulistimen putkien kokonaispituudet ja mutkien kerta-
vastusten summat. Kulmat α ja β , ks. kuva 4.8 (c).

Putken numero	1	2	3
Kokonaispituus [m]	84.1	82.9	82.6
Kulmat $\alpha + \beta$ [°]	75 + 30	0	75 + 30
Kertavastukset $K_\alpha + K_\beta$ [-]	0.12 + 0.06	0	0.12 + 0.06
Mutkat 2 läpikulun välissä [°]	90 + 90	180	90 + 90
2 läpikulun välinen K [-]	0.24 ^{1,3}	0.24 ¹	0.36 ^{2,3}
Kertavastusten summa $\sum K$ [-]	1.20	0.72	1.32

¹ $r/d_i \approx 2.5-3$, kaksi 90° mutkaa, kummassakin $K \approx 0.12$

² yksi 180° mutka, $r/d_i \approx 1.25 \Rightarrow K=0.25$. Lisäksi 2×2 20° mutkaa, á $K = 0.055$.

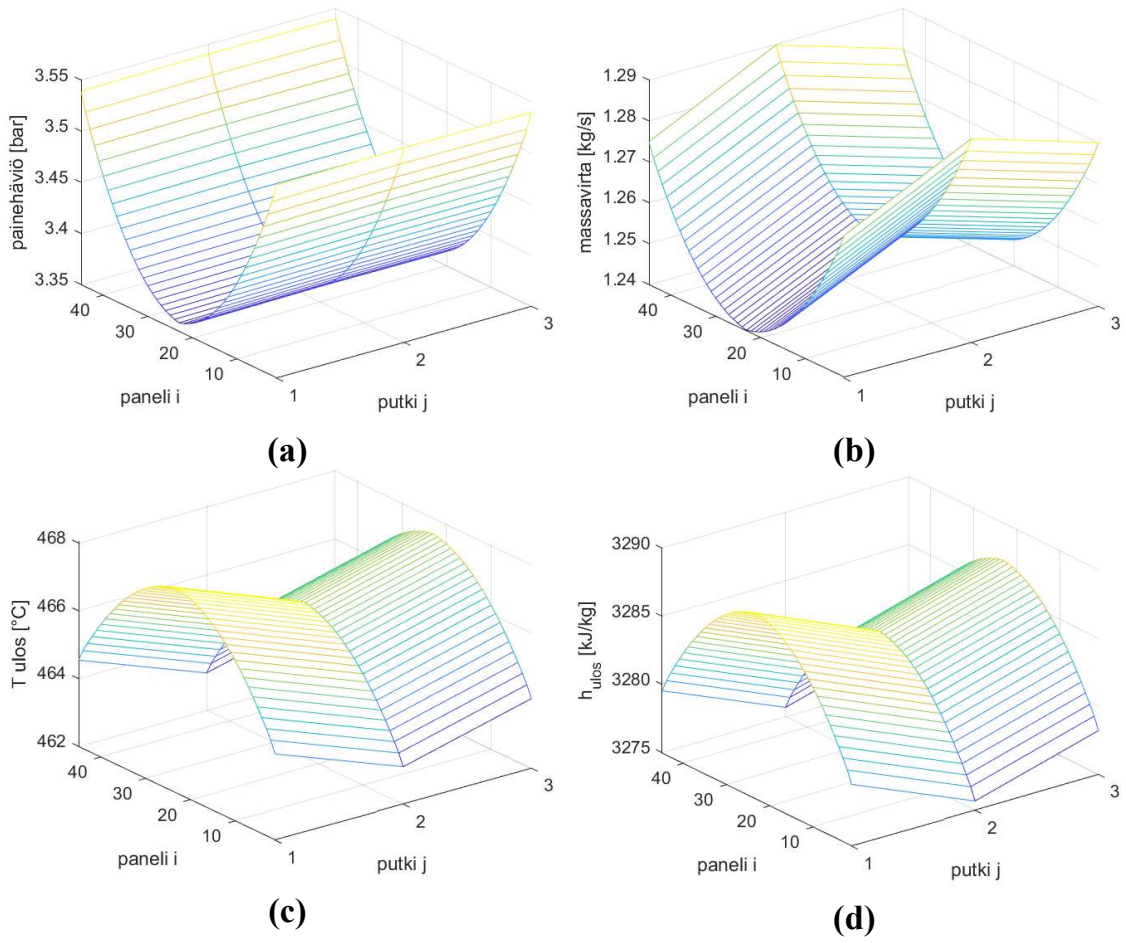
³ K:t parittoman läpikulun jälkeisille käännoille. Parillisen läpikulun jälkeen K_1 ja K_5 päinvastoin.

Putkien 1 ja 3 mutkien kertavastusten summat ovat hieman putkea 2 suuremmat. Nämä putket ovat vuoron perään sisimpinä putkina läpikulkujen välisissä käännoissa, jolloin pienehköllä kääntösäteellä tapahtuva 180° mutka aiheuttaa hieman suuremman kertavastuksen kuin kaksi 90° kääntöä muissa putkissa. Erot jäävät kuitenkin Kattila A:n tavoin pieniksi. Kertavastukset arvioitiin lähteen [9] perusteella kuten kattilalle A.

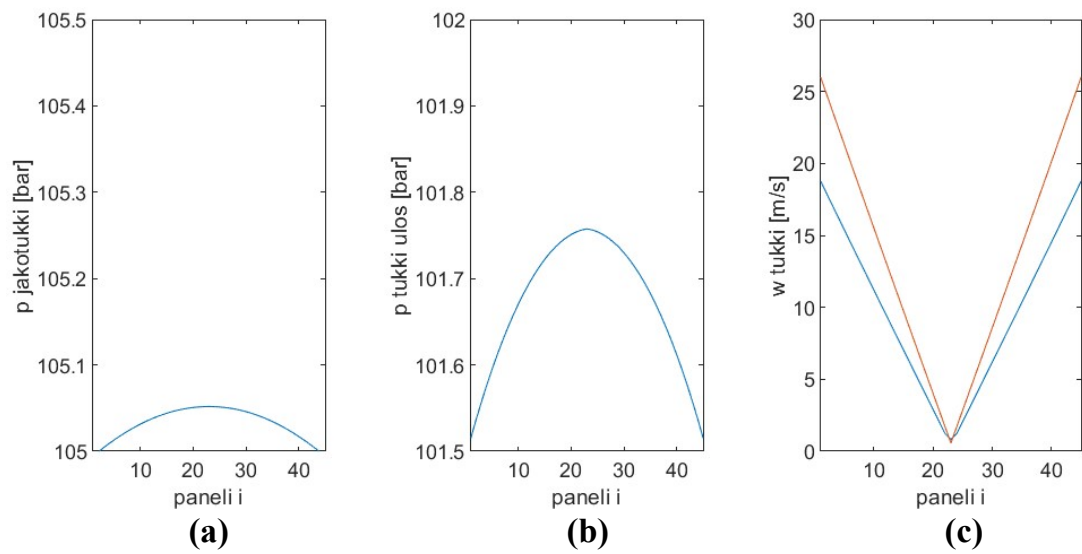
4.2.2 Laskentatulokset tasaisella lämpövirralla

Sekundäritulistimeen saapuvan höyryvirran lämpötilaksi arvoitiin 360 °C, ja massa-
virraksi 170 kg/s (likimain maksimikuorma). Jotta höyryn ulostulolämpötila vastasi
mittausdataa, n. 430 °C, oli savukaasun ja höyryn välinen ΔT sekä tulistimessa keski-
määräinen U asetettava selvästi kattila A:ta pienemmiksi: $\Delta T = 600$ °C ja $U = 20$ W/m²K.

Kuvassa 4.9 on esitetty edellä esitetyillä lähtöarvoille, joissa lämpövirta ei eroa virtauksen
suuntaan poikittain, saatu jakauma putkien a) painehäviöille, b) massavirroille, sekä
kunkin putken ulostulon c) lämpötilalle sekä d) entalpialle. Höyryvirran jakauma
muistuttaa kattila A:n tuloksia, jääden keskimmaisissa paneeleissa jonkin verran
reunimmaisista pienemmäksi, samoin kun yksittäisen paneelin reunimmaisissa putkissa.
Erot ovat kattila A:n tavoin pieniä verrattuna mittaustuloksiin (kuva 2.3 b). Paine ja
virtausnopeudet jako- ja keräystukeissa on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.9: Kattila B:n sekundääritulistimen tulokset tasaisella lämpövirran tiheydellä: a) putkien painehäviöt, b) massavirrat, c) ulostulolämpötilat, d) ominaisentalpiat putkien ulostuloissa.

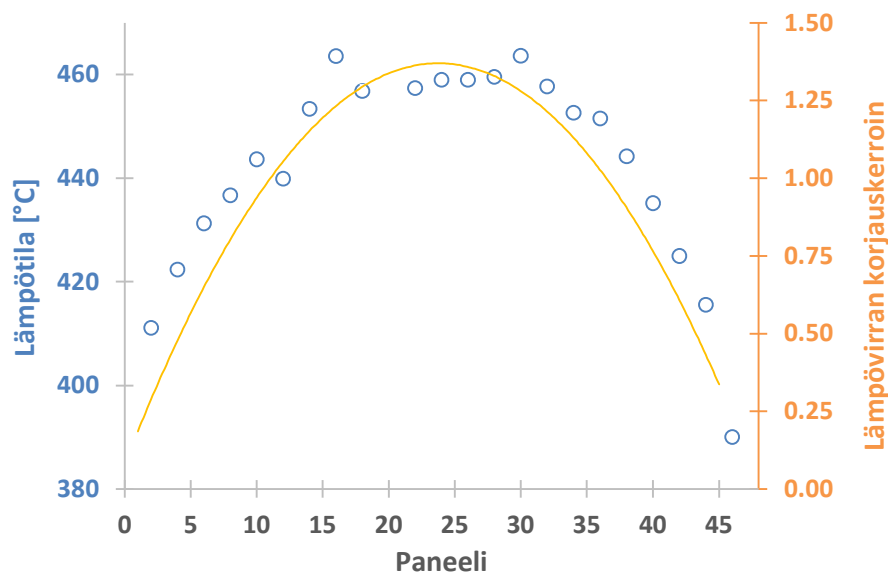


Kuva 4.10: Virtaus kattila A:n jako- ja keräystukeissa.

Myös tältä osin tulokset noudattavat pitkälti kattila A:n tuloksia. On syytä huomata, että vaikka kattilan koko ei merkittävästi vaikuta höyryn tasaiseen jakautumiseen, tasainen jakautuminen on herkkä jako- ja keräystukkien virtausnopeudelle. Mahdollinen epätasainen jakautuminen on seurausta tukkien T-yhteiden painehäviön suuruudesta verrattuna itse lämpöpintaputkien painehäviöön, yhtälöiden (5-6) ja (9-10) mukaisesti.

4.2.3 Mitatun lämpötilajakauman toteuttava lämpövirran jakauma

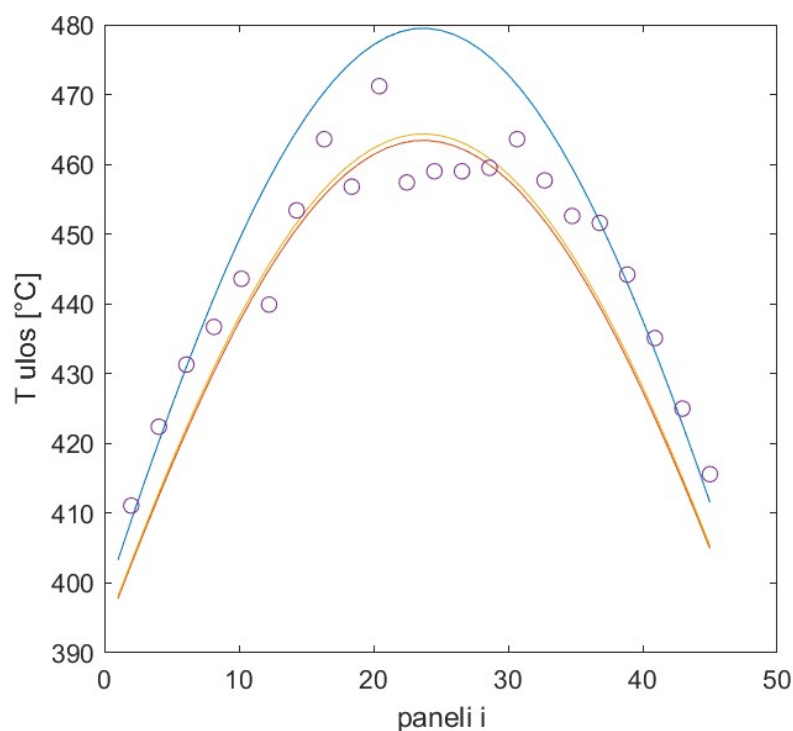
Kattilan B:n mittausdatassa oli havaittavissa kattila A:n tavoin selvä ulostulolämpötilojen profiili savukaasun virtaussuuntaan nähden sivusuunnassa. Tämän eron huomioimiseksi lämpövirralle laadittiin korjauskerroin kuten kattilalle A. Kuvassa 4.4 on esitetty mitatut ulostulolämpötilat (siniset merkit, kuvaajan vasen pystyakseli), sekä laadittu lämpövirran korjauksen sovite (oranssi käyrä, oikea akseli).



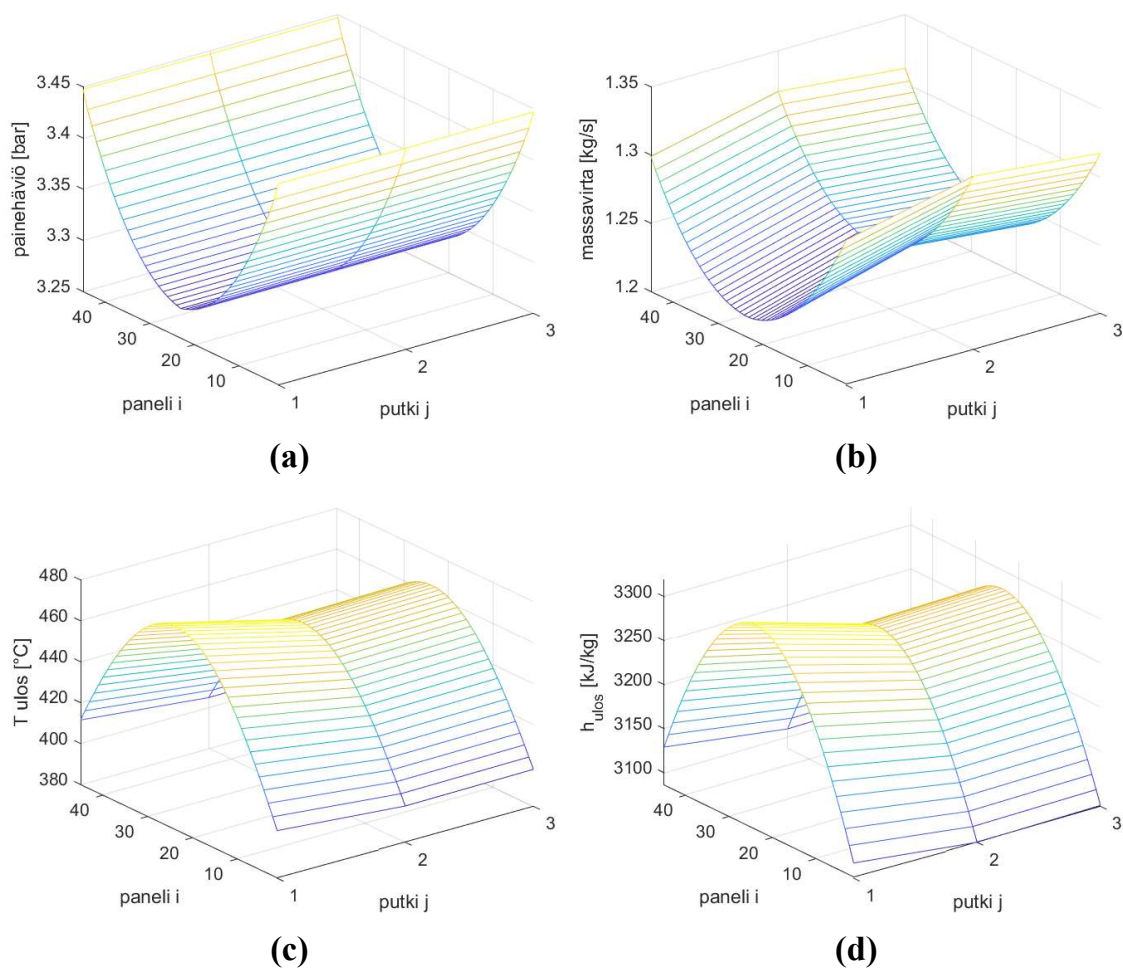
Kuva 4.11: Mitatut ja lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun lämpövirta korjattu sovitteella.

Toisin kuin kattilassa A, lämpötilat eivät vuorottele suuremman ja pienemmän arvon välillä. Tämä saattaa selittyä läpikulkujen suuremmalla määrällä (8): 1. läpikulun ensimmäisen putken osuus lämpöpinnasta on pienempi. Koska vaihtelua ei kuitenkaan ole havaittavissa lainkaan, todennäköisemmältä vaikuttaa, että lämpötilamittaukset joko eivät sijaitse putkessa 1, tai vaihtoehtoisesti ovat kaikki tässä putkessa.

Tarkemman tiedon puuttuessa, laskenta toteutettiin kasvattamalla ensimmäisen läpikulun ensimmäisen putken lämpövirtaa 50 %. Sama korjaus tehtiin myös käännoissä alimman osan lämpövirralle. Viimeisen putken lämmönsiirtoa kasvatettiin 10 %. Keskimääräinen lämmönsiirtokerroin pienennettiin arvoon $U = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Näin saatiin kuvan 4.12 mukainen ulostulojen lämpötilajakauma. Kuvassa 4.13 on esitetty kuvaa 4.9 vastaavat tulokset korjatuilla lämpövirroilla.



Kuva 4.12: Mitatut (ympyrät), sekä lämpövirtakorjauksilla lasketut (viivat) ulostulolämpötilat.



Kuva 4.13: Lasketut ulostulolämpötilat putkista, kun paneelien lämpövirtoja korjattu kuvan 4.11 korjauskertoimen mukaisesti, ja ensimmäisen putken lämpövirtaa kasvatettu 80% ensimmäisessä läpikulussa ja tulistimen alaosan käännöissä, sekä 10% viimeisessä läpikulussa.

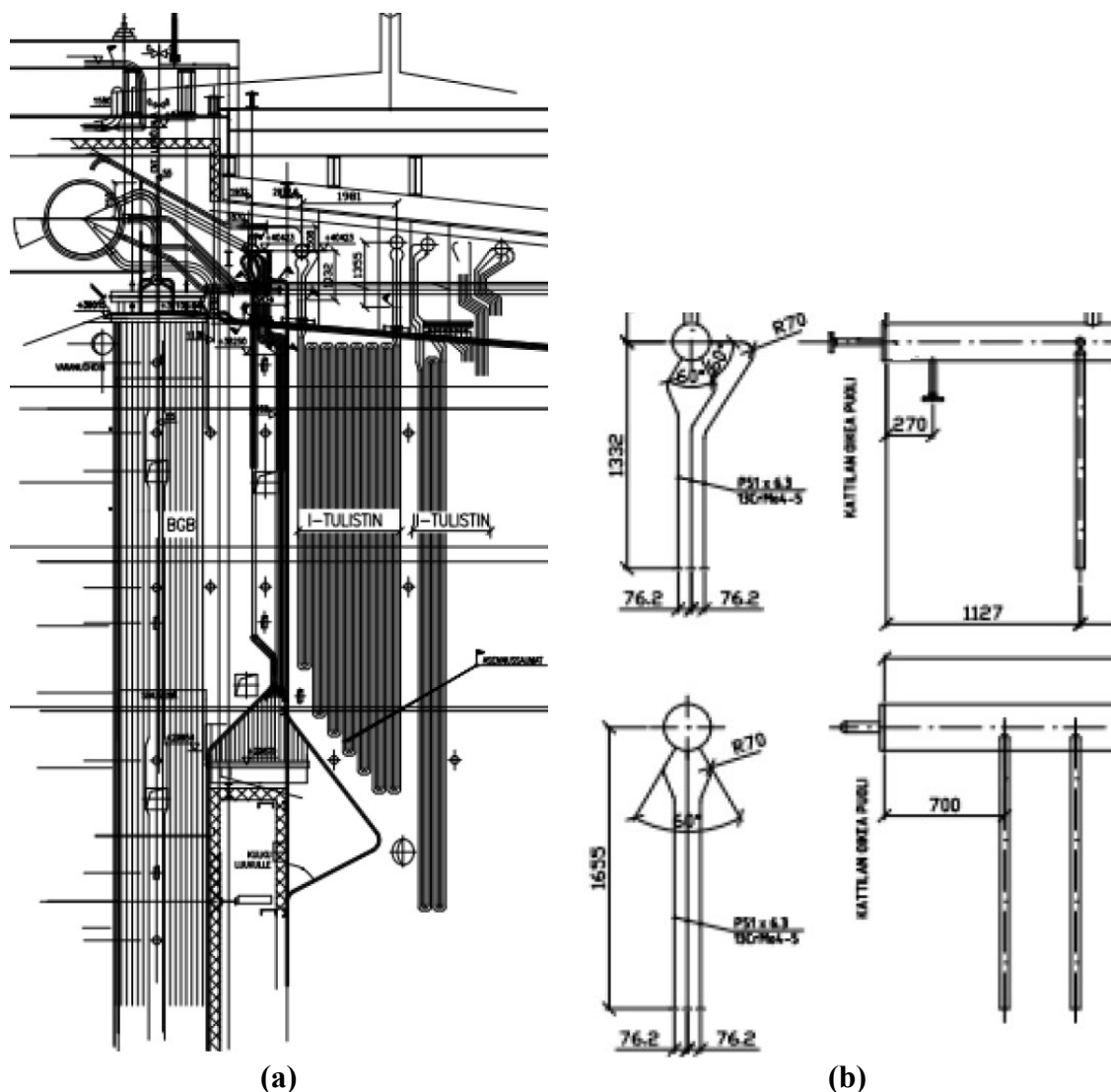
4.3 Kattila C

4.3.1 Kattilan kuvaus

Kattila C edustaa tutkimuksessa pienikokoisinta. Kattilan nimelliskapasiteetti on $700 t_{ka}/d$, ja tuorehöyryn arvot 460 °C ja 84 bar . Suurin jatkuva höyryn tuotanto on 34.5 kg/s . Saatua mittaustiedettä oli likimain maksimikuorman mukaisesta ajotilanteesta.

Paneelikohtaista mittausdataa oli saatavilla vain 1-tulistimesta, muissa tulistimissa mittaus oli vain keräystukissa sekoittuneesta höyryvirrasta. Tästä syystä myös mallinnus toteutettiin tämän kattilan primääritulistimelle. Kattilan tulistinputkien sijoittelu poikkesi kattiloista A ja B siten, että vain primääritulistin sijaitsi kattilan nokan takana: sekundääri- ja tertiääritulistimet oli sijoitettu tulipesän yläpuolelle, ja kvartääritulistin puuttui.

Kuvassa 4.14 on esitetty 14-läpikulkuisen primääritulistimen a) sivukuva ja sijainti, sekä b) putkijako ja jako- ja keräystukkien yhteiden toteutus; tulistimen päämitat on esitetty taulukoissa 4.5 ja 4.6.



Kuva 4.14: Kattila B: a) sivukuva nokalta, primääritulistin; b) jako- ja keräystukien yhteydet.

Taulukko 4.5. Kattila C:n primääritulistimen mitat.

Parametri	Arvo
Putkimitat: $d_o \times s$ [mm]	51.0×6.3
Putkijako $S_1 \times S_2$ [mm]	76.2×360
Paneelien lukumäärä N_p [-]	16
Putkien lukumäärä läpikulussa / paneelissa $N_{p/lk} / N_{p/p}$	3/42

Taulukko 4.6. Kattila C:n primääritulistimen putkien kokonaispituudet ja mutkien kertavastusten summat. Kulmat α ja β , ks. kuva 4.8 (c).

Putken numero	1	2	3
Kokonaispituus [m]	113.1	112.4	112.9
Jakotukin kulmat $\alpha + \beta$ [°]	30 + 30	30 + 30	120 + 30
Kertavastukset $K_\alpha + K_\beta$ [-]	0.06 + 0.06	0.06 + 0.06	0.16 + 0.06
Mutkat 2 läpikulun välissä [°]	90 + 90	180	180
2 läpikulun välinen K [-]	0.31 ^{1,4}	0.22 ²	0.29 ^{3,4}
Kertavastusten summa $\sum K$ [-]	4.15	2.98	4.23

¹ $r/d_i \approx 2.5-3$, kaksi 90° mutkaa, kummassakin $K \approx 0.155$

² yksi 180° mutka, $r/d_i = 2.98 \Rightarrow K=0.22$.

³ yksi 180° mutka, $r/d_i = 0.99 \Rightarrow K=0.29$.

⁴ K :t parittoman läpikulun tapaukselle; parillisissa läpikuluissa putkien 1 ja 3 arvot päinvastoin.

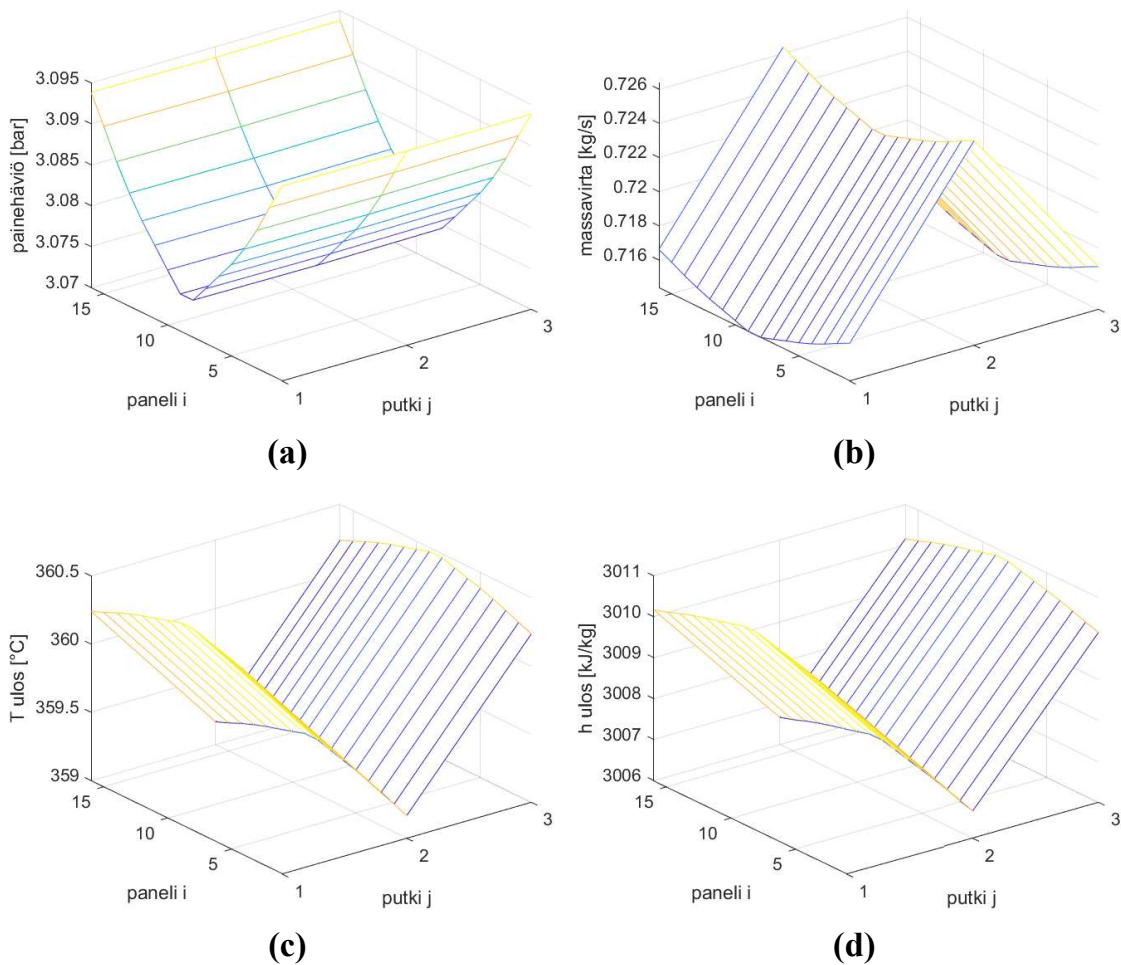
Läpikulkujen suuremman määrän vuoksi kattilan C primääritulistimen putkien kertavastusten summat ovat selvästi kattiloiden A ja B sekundääritulistimien vastaavia suuremmat. Ero putken 2 ja putkien 1 ja 3 välillä on myös suurempi. Kertavastukset arvioitiin lähteen [9] perusteella.

4.3.2 Laskentatulokset

Primääritulistimeen saapuvan höyryvirran arvioitiin saapuvan lieriöltä 87 bar(a) paineessa kylläisenä höyrynä (301 °C). Massavirraksi arvioitiin nimelliskuormaa vastaava 34.5 kg/s. Jotta tulistimelta lähtevän höyryn lämpötila vastasi saadun mittausdatan noin 360 °C arvoa, keskimääräiseksi lämpötilaeroksi savukaasun ja höyryn

välille sekä keskimääräiseksi kokonaislämmönsiirtokertoimeksi tulistimessa asetettiin $\Delta T = 300\text{ °C}$ ja $U = 21\text{ W/m}^2\text{K}$.

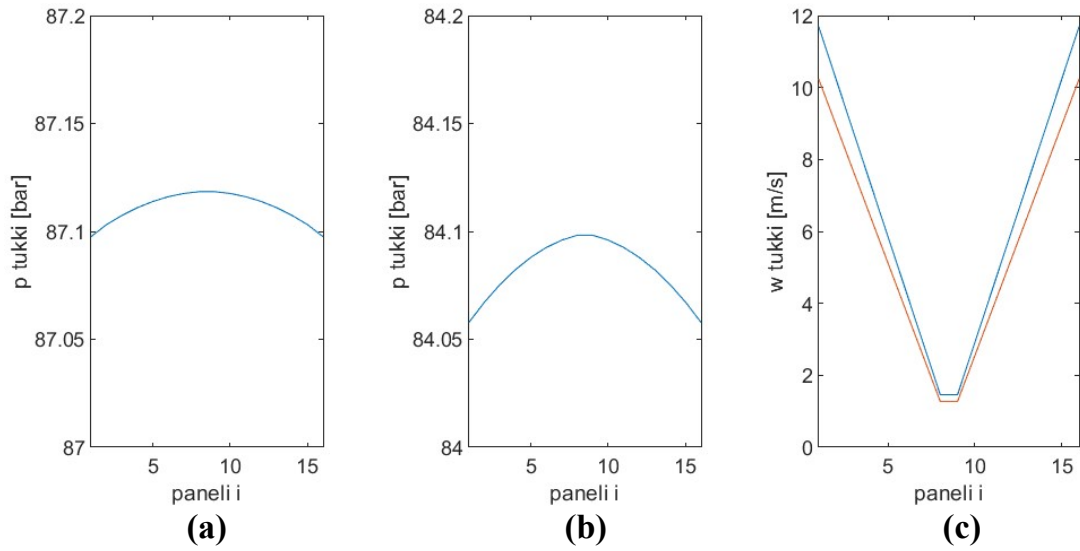
Kuvassa 4.9 on esitetty edellä esitetyillä lähtöarvoille, kun virtauksen suuntaan poikittain lämpövirta ei muutu, saatu jakauma putkien a) painehäviöille, b) massavirroille, sekä kunkin putken ulostulon c) lämpötilalle sekä d) entalpialle.



Kuva 4.15: Kattila B:n sekundääritulistimen tulokset tasaisella lämpövirran tiheydellä: a) putkien painehäviöt, b) massavirrat, c) ulostulolämpötilat, d) ominaisentalpiat putkien ulostuloissa.

Höyryvirran jakauma leveyssuunnassa on erittäin tasainen, lähes muuttumaton. Putken 2 tulistuksen poikkeama putkiin 1 ja 3 verrattuna on reunimmaisten ja keskimmäisten putkien väliseen eroon nähden lähes kymmenkertainen. Tämäkin ero on kuitenkin vain noin 1 °C . Erittäin tasainen virtausjakauma selittyy pääosin jako- ja keräystukkien

pienekköjen virtausnopeuksien avulla, ja toisaalta myös hieman kattiloiden A ja B sekundääritulistimia suurempien lämmönsiirtoputkien painehäviöiden kautta. Paine ja virtausnopeudet jako- ja keräystukeissa on esitetty kuvassa 4.16.



Kuva 4.16: Virtaus kattila A:n jako- ja keräystukeissa.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Höyryvirran jakautuminen tulistinputkiin sekä leveyssuunnassa paneelien välillä, että paneelin yksittäisten putkien välillä, osoittautui kaikissa kattiloissa melko tasaiseksi, kun oletettiin että ainoastaan putken sisäpuoliset höyrypuolen ilmiöt muuttavat virtauksia. Kattiloiden A ja B sekundääritulistimissa mitatut ulostulolämpötilat olivat kuitenkin reunoilta merkittävästi pienempiä kuin keskeltä. Mallinnustulosten perusteella mitatusta lämpötilaprofiilista vain muutamia prosentteja oli selitettävissä putkipuolen epätasaisen virtausjakauman kautta. Loppuosa on selitettävissä kattilan savukaasupuolen ja tähän liittyvien lämmönsiirtoilmiöiden kautta, johon tässä tutkimuksessa ei vielä perehdytty.

Virtauksen jakautumisen tasaisuuden osalta kattilan koolla ei ollut suurta vaikutusta. Kattilan C primääritulistimessa virtauksen jakautuminen oli selvästi kattiloiden A ja B sekundääritulistimia tasaisempaa. Tämä selittyi kuitenkin ensisijaisesti höyryn pienemmällä virtausnopeudella jako- ja keräystukeissa, sekä suuremmalla painehäviöllä itse lämpöpintaputkissa. Kun painehäviö lämmönsiirtoputkissa on suuri sisään- ja ulostuloyhteisiin verrattuna, saavutetaan mahdollisimman tasainen virtauksen jakautuminen itse lämmönsiirtimeen.

Myös kattilan koon kasvattaminen saattaa aiheuttaa virtauksen epätasaisempaa jakautumista, etenkin jos rinnakkaisten paneelien määrä kasvaa myös merkittävästi, eikä tätä kompensoida jako- ja keräystukkien pienemmällä virtausnopeudella. Vaikutus on kuitenkin pienehkö, ja kohdistuu lähtökohtaisesti vaikutukseltaan vähäiseen ilmiöön.

Saatujen laskentatulosten tulkinnassa on syytä huomioida, että jako- ja keräystukin yhteiden kertavastusten määrittämiseen perustuva laskentamenetelmä on tarkkuudeltaan rajallinen. Laskennassa oletettiin tasainen virtaus molemmissa tukeissa, mikä ei todellisuudessa toteudu. Tarkempi laskenta edellyttäisi CFD-mallinnusta.

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, Sähköposti, Hannu Loiri, 19.5.2022.
3. Mittausdata, Sähköposti, Toni Orava, 24.11.2022.
4. Mittausdata, 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.
11. Niittonen Juha, 2019. Navisworks Simulate -ohjelman hyödyntäminen suunnittelun laadunvarmistuksessa. Opinnäytetyö (AMK), Turku AMK.