

Ville Nurmi

DYNAAMISEN KIERTOLEIJUPETIKATTI- LAMALLIN KEHITTÄMINEN KÄYNNIS- TYSTILANTEISIIN SOVELTUVAKSI

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Tammikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Ville Nurmi: Dynaamisen kiertoleijupetikattilamallin kehittäminen käynnistystilanteisiin soveltuvaksi
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikka, DI
Tammikuu 2020

Perinteisiltä voimalaitoksilta vaaditaan jatkuvasti enemmän joustavuutta uusiutuvan energian lisääntymisen ja sähkömarkkinoiden muuttuvien vaatimusten vuoksi. Tämä tarkoittaa, että laitoksille tulee eteen yhä useammin käynnistys- ja alasajotilanteita. Käynnistystilanteet lisäävät kattiloiden kuormitusta muun muassa suurten lämpötilagradienttien myötä ja kustannuksia esimerkiksi käynnistyspolttoaineen kulutuksen vuoksi. Kustannusten ja päästöjen kannalta olisi erittäin hyödyllistä, mikäli kattilan käynnistäminen voitaisiin tehdä mahdollisimman nopeasti ja rakenteita liikaa rasittamatta. Yksi työkalu, jota tämän tavoitteen saavuttamiseksi voidaan hyödyntää, on kattilan dynaaminen matemaattinen malli.

Tässä työssä muokattiin olemassa olevaa kiertoleijupetikattilan dynaamista mallia, jotta sen avulla pystyttäisiin simuloimaan käynnistystilanteita. Dynaamisen mallin avulla voidaan kustannustehokkaasti ja turvallisesti tutkia kattilan käyttäytymistä erilaisissa tilanteissa. Malli perustuu massa- ja energiatasapainoon sekä tunnettujen fysikaalisten ilmiöiden yhtälöihin. Käynnistystilanteen epälineaarisuuksien ja tutkittavan kattilan ominaispiirteiden vuoksi mallissa käytetään myös useita empiirisiä yhtälöitä ja kertoimia. Mallinnus ja simuloinnit tehtiin MathWorksin MATLAB ja Simulink -ohjelmistoilla.

Työn laajuus rajattiin kattilan savukaasupuoleen sekä tulipesän, syklonien ja hiekkalukkojen muodostamaan kiertoon. Kattilan ohjaukset ja vesihöyrypuoli huomioitiin mallissa mitatusta datasta poimittuina sisääntulosignaaleina, jolloin tärkeimmät tutkimuksen kohteet olivat kattilassa tapahtuvan palamisen ja lämmönsiirron prosessit. Hiekkapetin käyttäytymisellä on merkittävä vaikutus näihin molempiin. Mallin kelpoisuus todennettiin vertaamalla simuloituja arvoja kolmesta eri käynnistystilanteesta kerättyyn mitattuun dataan. Simulointitulosten perusteella mallin voitiin todeta kuvaavan todellista prosessia hyvällä tarkkuudella.

Avainsanat: kiertoleijupetikattila, CFB-kattila, dynaaminen malli, käynnistystilanne, MATLAB

ABSTRACT

Ville Nurmi: Development of a dynamic CFB boiler model for start-up situations
Master's thesis
Tampere University
Automation Engineering, MSc
January 2020

Conventional power plants are nowadays required to be more flexible than before due to increased share of renewable energy and changing demands in the electricity market. This means that the number of boiler start-ups and shutdowns is increasing all the time. Start-up situations will increase boiler's load and stress via high temperature gradients and costs will go up as start-up burners' fuel consumption increases. Considering costs and emissions, short start-up time with minimised thermal stresses would have very high benefits. One tool, which can help to achieve this goal, is boiler's dynamic mathematical model.

In this thesis, the existing dynamic circulating fluidised bed boiler model was modified so, that it would be able to simulate start-up situations. With the help of a dynamic model, it is possible to simulate boiler's behaviour in different situations in cost-efficient and safe way. Mass and energy balances as well as physical laws form the basis of the model. Model also contains many empirical equations and coefficients because of start-up situation's nonlinearities and inspected boiler's characteristic behaviour. Programs used to perform the modelling and simulations were Math-Works' MATLAB and Simulink.

Work's scope limits in boiler's flue gas side and the circulation consisting of the furnace, cyclones and loop-seals. Model considers boiler's controls and water/steam side as input signals picked from measured data. This means that the most important targets for examination were boiler's combustion and heat transfer processes. Bed material behaviour has a big impact on both of these. To make sure that the model was valid, measured values from three different boiler start-ups were compared to the simulation results. Simulation results proved that the model represents the actual process with a decent accuracy.

Keywords: circulating fluidised bed boiler, CFB-boiler, dynamic model, start-up situation, MATLAB

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen yliopistolla Hervannassa (työn alkaessa Tampereen teknillinen yliopisto) tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunnassa. Työ aloitettiin ke-säkuussa 2018 yhteistyössä Valmet Technologies Oy:n kanssa.

Projektin aikana sain paljon apua ja tukea eri suunnilta. Erityiskiitokset ansaitsevat Timo Yli-Fossi, joka Valmetin puolelta oli valtava apu dynaamisen mallin muutosten suunnit-telun ja ongelmatilanteiden ratkaisemisten kanssa läpi työn, sekä Yrjö Majanne, joka toimi yliopiston puolelta työn ohjaajana ja antoi hyviä neuvoja, tukea ja kannustusta koko työprosessin ajan. Kiitokset myös Ville Ylä-Outiselle Valmetilta, joka auttoi mallin suun-nittelussa ja antoi monia hyviä neuvoja, sekä professori Matti Vilkolle yliopistolta työn yleisistä askelmerkeistä ja vinkeistä. Lisäksi kiitos myös kaikille muille palavereihin osal-listuneille tai muuten työn edistymiseen vaikuttaneille. Keskusteluissa tuli aina esiin hyö-dyllisiä ja mielenkiintoisia asioita.

Työn ulkopuolelta kiitokset kannustaneille ja välillä myös ajatuksia muualle saaneille ma-mille, äidille, sisaruksille, superjengille sekä muille ystäville ja sukulaisille.

Tampereella, 2.1.2020

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PROSESSIN ESITTELY	4
2.1 Työssä tutkittava kattila	4
2.2 Kattilan toiminta	6
2.3 Kiertoleijupetikattilan ominaispiirteitä	8
2.4 Tutkittavan kattilan tietoja	10
3. DYNAAMINEN MALLINNUS JA SIMULOINTI	11
3.1 Yleistä mallinnuksesta ja simuloinnista	11
3.2 Voimalaitoskattilamallinnuksen erityispiirteitä	13
4. FYSIKAALISET ILMIÖT KATTILASSA	16
4.1 Palaminen	16
4.2 Lämmönsiirto	22
4.2.1 Lämmön johtuminen eli konduktio	22
4.2.2 Konvektiivinen lämmönsiirto	24
4.2.3 Säteilylämmönsiirto	25
4.3 Petin hydrodynamikka	27
4.4 Kiertoleijupetikattilan lämmönsiirron ominaispiirteitä	35
5. MALLIRAKENNE	42
5.1 Valmetin dynaamisten kattilamallien kehitys	42
5.2 Mallin kuvaus, muutokset ja lisäykset aiempaan malliin	42
5.2.1 Päivitetty muurausmalli	47
5.2.2 Käynnistyspolttimet ja palamisen laskenta	49
5.2.3 Lämmönsiirron laskenta	51
5.2.4 Petimateriaalin käyttäytyminen	55
5.3 Yksinkertaistuksia, oletuksia ja reunaehtoja	57
5.4 Katsaus erilaisista malliratkaisuista	57
6. SIMULOINTITULOKSET	60
6.1 Ensimmäinen tapaus	60
6.2 Toinen tapaus	71
6.3 Kolmas tapaus	74
7. YHTEENVETO	78
7.1 Johtopäätökset	78
7.2 Jatkokehitys	79
LÄHTEET	81

LIITE A: SAVUKAASULASKUESIMERKKI

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Valmetin kiertoleijupetikattilan kuuma kierto [16].</i>	4
Kuva 2.	<i>Työn kannalta kattilan oleelliset osat ja syötteet.</i>	6
Kuva 3.	<i>Fysikaalisen ongelman ratkaisumalli [26].</i>	11
Kuva 4.	<i>Lämmönsiirto tulipesässä.</i>	22
Kuva 5.	<i>Lämmönjohtuminen tasalaatuisen materiaalin läpi.</i>	23
Kuva 6.	<i>Konvektiivinen lämmönsiirto.</i>	25
Kuva 7.	<i>Säteilylämmönsiirto.</i>	27
Kuva 8.	<i>Petin käyttäytyminen kaasun eri virtausnopeusalueilla.</i>	29
Kuva 9.	<i>Petimateriaalin sisäinen kierto tulipesässä.</i>	30
Kuva 10.	<i>Petimateriaalin ulkoinen kierto.</i>	30
Kuva 11.	<i>Periaatteellinen kuvaaja petimateriaalin käyttäytymisestä tulipesässä.</i>	31
Kuva 12.	<i>Klustereiden muodostuminen ja hajoaminen sekä kaasuväli [46].</i>	40
Kuva 13.	<i>Tulipesän jako lohkoihin.</i>	43
Kuva 14.	<i>Kuuman kierron massataseen lohkomalli.</i>	44
Kuva 15.	<i>Yksittäisen tulipesälohkon energiataseen lohkomalli.</i>	45
Kuva 16.	<i>Muurausmallin periaate.</i>	47
Kuva 17.	<i>Käynnistyspolttimen lohkomalli.</i>	49
Kuva 18.	<i>Korjauskerroin sekoitukselle pohjapetin pinnan yli.</i>	52
Kuva 19.	<i>Suspensiotiheyden käyttäytyminen tulipesässä.</i>	55
Kuva 20.	<i>Pohjapetin lämpötilan käyttäytyminen (tapaus 1).</i>	61
Kuva 21.	<i>Savukaasun lämpötila ennen syklonia (tapaus 1).</i>	62
Kuva 22.	<i>Savukaasun lämpötila syklonin jälkeen (tapaus 1).</i>	62
Kuva 23.	<i>Tulipesän vertikaalisia lämpötilaprofiileja eri ajanhetkillä (tapaus 1).</i>	63
Kuva 24.	<i>Hapen tilavuusosuus savukaasussa syklonin jälkeen (tapaus 1).</i>	63
Kuva 25.	<i>Hiekkalukon 1 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).</i>	64
Kuva 26.	<i>Hiekkatulistimen 1 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).</i>	64
Kuva 27.	<i>Hiekkalukon 2 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).</i>	65
Kuva 28.	<i>Hiekkatulistimen 2 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).</i>	66
Kuva 29.	<i>Simuloituja muurauslämpötiloja (tapaus 1).</i>	67
Kuva 30.	<i>Lämmönsiirto sekoittumisesta ylös ja alas sekä palamisesta käynnistyspolttimien alueella (tapaus 1).</i>	68
Kuva 31.	<i>Konvektiivinen lämmönsiirto seiniin/muurauksiin, petimateriaalin ja ilman mukana siirtyvät lämpövirtaukset sekä pohjatuhkan poistosta aiheutuva lämpövirtaus käynnistyspolttimien alueella (tapaus 1).</i>	69
Kuva 32.	<i>Lämmönsiirto säteilyllä, vedestä sekä polttoaineen ja savukaasun lämpötaseesta käynnistyspolttimien alueella (tapaus 1).</i>	70
Kuva 33.	<i>Petimateriaalin käyttäytymisen kuvaaja: leijutusnopeus, tulipesästä poistuvan petimateriaalin massavirtaus sekä suspensiotiheys tulipesän yläosassa (tapaus 1).</i>	71
Kuva 34.	<i>Pohjapetin lämpötila (tapaus 2).</i>	72
Kuva 35.	<i>Savukaasun lämpötila ennen syklonia (tapaus 2).</i>	73
Kuva 36.	<i>Savukaasun lämpötila syklonin jälkeen (tapaus 2).</i>	73
Kuva 37.	<i>Hapen tilavuusosuus savukaasussa syklonin jälkeen (tapaus 2).</i>	74
Kuva 38.	<i>Pohjapetin lämpötila (tapaus 3).</i>	75
Kuva 39.	<i>Savukaasun lämpötila ennen syklonia (tapaus 3).</i>	76
Kuva 40.	<i>Savukaasun lämpötila syklonin jälkeen (tapaus 3).</i>	76
Kuva 41.	<i>Hapen tilavuusosuus savukaasussa syklonin jälkeen (tapaus 3).</i>	77

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CFB-kattila	engl. circulating fluidised bed boiler, kiertoleijupetikattila
CHP-voimalaitos	engl. combined heat and power, sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos
DAE	engl. differential algebraic equation, yhtälöiden järjestelmä, joka koostuu differentiaalisista ja algebrallisista yhtälöistä
EU	Euroopan Unioni
MATLAB	matemaattinen ohjelmisto prosessien suunnitteluun ja analysointiin, engl. matrix laboratory
ODE	engl. ordinary differential equation, yhden vapaan muuttujan differentiaaliyhtälö
Simulink	MATLABin kanssa integroitu lohkomalliympäristössä toimiva ohjelmisto simulointiin ja mallipohjaiseen suunnitteluun
TR-BDF2	engl. trapezoidal rule - 2 nd order backward differentiation formula, numeerinen integrointimenetelmä

A	pinta-ala
A_d	tuhkapitoisuus kuiva-aineessa
A_f	taajuustekijä
Ar	Arkhimedeen luku
a	hajoamisvakio
a_{conv}	kokeellinen kerroin konvektiokertoimen laskentaan
b_{conv}	kokeellinen kerroin konvektiokertoimen laskentaan
C	hiili
C_1, C_2, C_3	mielivaltainen vakio, empiirinen kerroin
C_D	vastuskerroin
CO	hiilimonoksidi
CO_2	hiilidioksidi
c	aineen ominaislämpökapasiteetti
c_{conv}	kokeellinen kerroin konvektiokertoimen laskentaan
c_v	aineen ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa
D	sekoittumisen dispersiokerroin
D_i	molekylaarinen diffuusiokerroin
d	halkaisija; paksuus; derivaatta
E	aktivoitumisenergia
e	Neperin luku
G	kiintoaineen massavirrantiheys elementissä
g	maan vetovoiman kiihtyvyys
\dot{g}	lämmön tuoton nopeus aineessa
H	vety
H_2O	vesi
h	entalpia; korkeus
h_{conv}	konvektiivisen lämmönsiirron kerroin
h_{exit}	poistumiskanavan keskikohtan korkeus
h_{mt}	aineen taulukkoentalpia
h_x	pohjapetin korkeus
h_y	tiheän alueen korkeus
K	hajoamisvakio
K_a	hankautumisnopeusvakio
K_v	pyrolyysiajan parametri
K_{vol}	reaktion kertaluku
k	reaktionopeuskerroin

k_1	virityskerroin konvektiokertoimen laskentaan
$k_{ash,out}$	poistettavan tuhkan osuus
k_c	kineettinen reaktionopeusvakio
k_d	pyrolyysinopeuskerroin
k_{rad}	virityskerroin säteilylämmönsiirtoon
L	pituus
M	sekoittuminen
M_{ar}	kostean polttoaineen vesipitoisuus massaprosenttina
MWth	kokonaisteho, megawattia
MWe	sähköteho, megawattia
m	massa
\dot{m}	massavirta
$\dot{m}_{att,f}$	jäännöshiilien hankautuminen hienoainepartikkeleiksi
N	typpi
NOx	typen oksidit
n	pyrolyysiajan parametri
\dot{n}	moolivirta
O	happi
p	paine
\dot{Q}	lämpöteho
q_i	polttoaineen alempi lämpöarvo
q_{iw}	kostean polttoaineen alempi lämpöarvo
q_s	polttoaineen ylempi lämpöarvo
R	moolinen kaasuvakio
Re	Reynoldsin luku
r	aineen/komponentin kemiallinen reagointi
S	rikki
Sc	Schmidtin luku
Sh	Sherwoodin luku
SO ₂	rikkidioksidi
T	lämpötila
t	aika
t_c	jäännöshiilien palamisaika
$t_{c,k}$	jäännöshiilien viipymäaika
t_f	hienoainepartikkelin palamisaika
$t_{f,k}$	hienoainepartikkelin viipymäaika
t_{vol}	polttoainepartikkelin pyrolyysiaika
U	kaasun nopeus
U_{mf}	minimileijutusnopeus
U_t	hiukkasen terminaalinopeus
V	tilavuus
v	nopeus
w	leveys
x	mooliosuus; suunta tai paikka koordinaatistossa
y	massaosuus; suunta tai paikka koordinaatistossa
z	suunta tai paikka koordinaatistossa
α	kappaleen pinnan absorboivuus
γ	empiirinen kerroin
ΔH_f	aineen muodostumisentalpia referenssitilassa
ΔU	järjestelmän sisäisen energian muutos
ΔT	lämpötilan muutos
Δz	elementin keskipisteen pystysuora etäisyys
ε	suspension tyhjän tilan osuus; kappaleen pinnan emissiivisyys

$\Lambda_{water,vapor}$	veden latenttilämpö
λ	lämmönjohtavuuskerroin
μ	dynaaminen viskositeetti
ρ	tiheys
ρ_{exit}	suspensiotiheys poistumiskanavan korkeudella
$\rho_{O_2}(\infty)$	hapen tiheys emulsiossa kaukana partikkelin pinnasta
ρ_x	suspensiotiheys pohjapetin korkeudella
σ	Stefan-Boltzmannin vakio
τ	aikavakio
ϕ_4	jäähdytysteho
ϕ_5	häviölämpöteho
∂	osittaisderivaatta

ALAINDEKSIT

<i>absorbed</i>	absorboitunut
<i>air</i>	ilma
<i>ash</i>	tuhka
<i>att</i>	hankautuminen
<i>balance</i>	tase
<i>bed</i>	hiekkapeti
<i>bypass</i>	ohitus
<i>c</i>	karkea jäännöshiilipartikkeli
<i>cf</i>	jäännöshiili ja hienoaine yhteensä
<i>comb</i>	palaminen
<i>cond</i>	lämmön johtuminen
<i>conv</i>	konvektio
<i>cyc</i>	sykloni
<i>daf</i>	tuhkaton kuiva-aine
<i>down</i>	alas
<i>emit</i>	säteily
<i>exit</i>	poistumiskanava
<i>f</i>	hienoainepartikkeli
<i>fa</i>	lentotuhka
<i>fuel</i>	polttoaine
<i>fur</i>	tulipesä
<i>gas</i>	savukaasu
<i>heating</i>	lämmitys
<i>i</i>	muurauskerroksen indeksi
<i>in</i>	sisään
<i>incident</i>	kohdepintaan vaikuttava
<i>inert</i>	partikkelisuspensio
<i>inf</i>	ääretön
<i>j</i>	savukaasukomponentti
<i>k</i>	elementin numero/tunniste
<i>ls</i>	hiekkalukko
<i>lssh</i>	hiekkalukon tulistinkammio
<i>max</i>	maksimi
<i>mf</i>	minimileijutus
<i>mp</i>	massaprosentti
<i>next</i>	seuraava elementti
<i>O₂</i>	happi
<i>old</i>	edellinen ajanhetki
<i>out</i>	ulos
<i>p</i>	partikkeli

<i>prev</i>	edellinen elementti
<i>ref</i>	muuraus
<i>reflected</i>	heijastunut
<i>s</i>	pinta
<i>sand</i>	petihiekka
<i>source</i>	lähdepinta
<i>steam</i>	höyry
<i>target</i>	kohdepinta
<i>u</i>	hiilen ainemäärä polttoaineessa
<i>up</i>	ylös
<i>v</i>	vedyn ainemäärä polttoaineessa
<i>vapor</i>	höyrystyminen
<i>vol</i>	haihtuvat aineet
<i>water</i>	vesi
<i>x</i>	hapen ainemäärä polttoaineessa; pohjapeti
<i>y</i>	typen ainemäärä polttoaineessa; tiheä alue
<i>z</i>	rikin ainemäärä polttoaineessa

1. JOHDANTO

Uusiutuvan energian käyttö lisääntyy jatkuvasti ja myös erilaiset säädökset ohjaavat energiantuotantoa ympäristöystävällisempään suuntaan. EU on asettanut tavoitteeksi nostaa uusiutuvien energialähteiden osuuden 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä ja 27 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä [1]. Suomessa suurin osa uusiutuvasta energiasta tuotetaan vesivoimalla ja puuperäisillä polttoaineilla, uusiutuvien osuus kokonaistuotannosta vuonna 2016 oli 45 prosenttia. Hallituksen tavoitteena on nostaa uusiutuvan ja päästöttömän energian käyttöä 2020-luvulla yli 50 prosenttiin [2]. Nämä asiat tarkoittavat entistä suurempaa panostusta tuulivoimaan ja aurinkovoimaan. Suomessa tuotettiin vuonna 2018 sähköä 67476 gigawattituntia (GWh), josta tuulivoimalla 5857 GWh ja aurinkovoimalla 162 GWh eli niiden osuus kokonaistuotannosta oli yhteensä hieman vajaa 9 prosenttia [3].

Sekä tuuli- että aurinkovoima ovat ympäristön olosuhteista riippuvia energianlähteitä ja esimerkiksi tuulivoiman tuotanto voi tippua nopeastikin täydestä tehosta nolnaan. Tämä tarkoittaa suurta vaihtelua muista lähteistä tarvittavan tuntienergian määrässä, toisin sanoen minimi- ja maksimikuorman välinen ero kasvaa, kuten myös kuorman muutosnopeus. Asia aiheuttaa ongelmia etenkin perinteisille voimalaitoksille, joilta vaaditaan sopeutumista olosuhteiden mukaiseen tilanteeseen ja luonnonvoimista riippuvien laitosten tuotantoon. Tämä johtaa niin sanottuun sykliseen käyttöön, johon laitoksia ei ole suunniteltu. Niitä on yleensä operoitu täydellä teholla, koska osittaiskuormitus aiheuttaa merkittävää heikennystä hyötysuhteeseen [4]. Tämä tarkoittaa rasiusten ja kustannusten lisääntymistä. Käynnistys- ja pysäytystilanteita tulee eteen yhä useammin ja ne aiheuttavat kattilaan nopeita lämpötilan muutoksia etenkin kylmästä kuumaan, mikä rasittaa rakenteita huomattavasti. Tämä lisää huoltokustannuksia ja lyhentää kattilan elinikää. Lisäksi käynnistäminen vaatii paljon energiaa ja käynnistyspolttoaine on myös kalliimpaa kuin normaalin käytön polttoaine. Toimijoiden täytyy siis miettiä, onko viisainta pysäyttää kattila kokonaan vai pitää prosessia minimikuormalla yllä. [5][6][7]

Tuotannon heilahtelujen lisäksi sääriippuvien energianlähteiden ongelma saattaa olla, että tuotanto ei riitä vastaamaan kulutuspiikkeihin. Perinteisten voimalaitosten rooli varajärjestelmänä tulee myös tästä johtuen kasvamaan. Toimivan varastointijärjestelmän avulla olisi mahdollista saada joustavuutta kuormanmuutostilanteisiin. Toisaalta ylimääräistä sähköä ei ole helposti varastoitavissa kulutuspiikkien varalta, etenkin silloin kun

kyseessä on suhteellisen suuri laitos. Varastointiongelmaan ei ole vielä löydetty toimivaa ja kustannustehokasta ratkaisua, mutta erilaisia menetelmiä on kehitteillä. [5][8]

On helppo olettaa, että kun fossiilisia polttoaineita käyttävät laitokset osittain korvautuvat uusiutuvaa energiaa käyttävillä tekniikoilla, myös päästöt vähenevät. Asia ei kuitenkaan välttämättä ole näin, johtuen käynnistystilanteiden lisääntymisestä. Kuorman vaihtelujen lisääntyminen tarkoittaa laitoksen hyötysuhteen huonontumista ja siten hetkellisesti, laitoksesta riippuen mahdollisesti jopa yli vuorokauden ajaksi, polttoaineen suhteellisen kulutuksen ja päästöjen kasvamista. [5][9]

Syklinen käyttö ja käynnistystilanteet ovat siis laitoiksille ja myös kokonaisuutta ajatellen suuri ongelma. Mahdollisimman laaja tieto kattiloiden käyttäytymisestä olisi hyödyllistä toiminnan eteenpäin kehittämässä. Lähes jokainen laitos on kuitenkin omanlaisensa ja mitään täysin yleispätevää käyttäytymismallia on vaikea tai jopa mahdoton kehittää. Nykyisten kattiloiden joustokykyä määritetään mm. kyvyllä ajaa kattilaa tasaisesti minimikuormalla, lyhyellä käynnistysajalla ja korkealla kuormanmuutosnopeudella [7]. Energia-yhtiöt uudistavat voimalaitoksia soveltumaan suuremmille kuormitusgradienille ja pienemmälle minimikuormalle. Tällöin dynaamisen järjestelmän ennustettavuus on tärkeässä roolissa voimaloiden suunnittelussa ja operoinnissa. [10] Käynnistysaikaa lyhentämällä laitoksesta voi tulla tuottavampi, joustavampi ja paremmin sopiva sähkömarkkinoiden vaatimuksiin. [11]

Tampereen yliopisto (aiemmin Tampereen teknillinen yliopisto) ja Valmet Technologies Oy ovat yhteistyössä kehittäneet höyrykattiloiden käyttäytymistä kuvaavia malleja, joiden avulla voidaan simuloida voimalaitoksessa tapahtuvia erilaisia ilmiöitä ja tilanteita. Simulointien avulla voidaan ennustaa prosessin käyttäytymistä turvallisesti, ilman kalliita koekteita, ja tuloksia voidaan hyödyntää kattilan käyttöä tehostettaessa. Etenkin monia harvinaisempia tilanteita on vaikea tutkia ilman dynaamista mallinnusta, mutta niitä on kuitenkin tärkeä ymmärtää laitoksia suunniteltaessa. Kattilamalleilla on simuloitu esimerkiksi kattilan käyttökatoja, mutta käynnistystilanteissa on omat erityispiirteensä ja epälineaarisuutensa, joita Valmetin aikaisemmissa malliversioissa ei oltu huomioitu. Käynnistysten simulointi ei siis ole ollut mahdollista. [12]

Tämän työn päätavoite on voimalaitoskattilan käynnistämisen optimointi. Kiinnostava kysymys on, miten nopeasti kattila voidaan käynnistää siten, että kattilan rakenteet eivät rasitu liikaa. Yksi työkalu, jota nopean käynnistykseen tavoitteen saavuttamisessa voidaan hyödyntää, on kattilan dynaaminen malli. Mallintaminen ja simulointi tehdään tässä työssä MathWorksin MATLAB ja Simulink -ohjelmistoilla. Simuloinneista saatuja tuloksia verrataan käynnistysistä käytettävissä olevaan mitattuun dataan, jonka avulla voidaan

varmistua mallin kelpoisuudesta. Vertailudataa voidaan hyödyntää myös mallin parametrien tarkentamisessa.

Työn merkittävimmät saavutukset ovat käynnistystilanteen ominaispiirteiden tunnistaminen ja niiden implementointi dynaamiseen malliin. Päivitetyn dynaamisen kattilamallin avulla voidaan saada tukea käynnistykseen liittyvään prosessisuunnitteluun ja operoinnin suunnitteluun, jolloin käynnistysaikaa on mahdollista nopeuttaa, ja siten pienentää kustannuksia. Malli auttaa ennustamaan kattilan käyttäytymistä ja sitä kautta myös päätöksentekoa käynnistystilanteessa. Mallin avulla voidaan jatkossa suunnitella kattilalle paremmat säädöt ja myöhemmin mahdollisesti sekvenssi, jonka avulla kattila voidaan ajaa ylös automaattisesti nopeasti ja taloudellisesti, kuitenkin rakenteita kriittisesti rasittamatta. Työn simulointien perusteella pohditaan myös mahdollisia jatkokehityskohteita ja kattilan komponenttien kuormituksia. Nykyisen mallin yksityiskohtia muokataan mahdollisuuksien mukaan myös siten, että sen eteenpäin kehittäminen helpottuisi.

Työssä kuvataan prosessi, kattilan osat ja toimintaperiaate sekä toimintaympäristö työn kannalta oleellisilta osin. Fysikaalisista ilmiöistä tutkitaan palamisen, lämmönsiirron ja petin hydrodynamiikan käyttäytymistä kiertoleijupetikattilassa. Työssä käydään läpi ja pohditaan myös dynaamisen mallinnuksen ja simuloinnin vaiheita sekä mallinnuksen osuutta kattiloiden joustavuuden kehittämisessä. Käytettyä mallirakennetta käydään myös oleellisilta osin läpi. Lopuksi tutkitaan ja analysoidaan simulointituloksia, pohditaan työn onnistumista sekä tehdään työstä yhteenveto.

2. PROSESSIN ESITTELY

2.1 Työssä tutkittava kattila

Kattila tai höyrygeneraattori on energiaa muuntava laite tai järjestelmä, joka muuttaa polttoaineen kemiallista energiaa lämpöenergiaksi ja käyttää lämpöä muuttaakseen kattilaan syötetyn nestemäisen veden tulistetuksi vesihöyryksi. Höyrykattilan voidaan ajatella koostuvan kahdesta alisysteemistä: tulipesä, jossa tuotetaan kuumaa savukaasua sekä lämmönsiirtojärjestelmä, johon kuuluu muun muassa lieriö, höyrystin, tulistimet sekä palamisilman ja syöttöveden esilämmittimet. [13][14]

Tässä työssä tutkittava prosessi on olemassa oleva CHP-voimalaitoksen kiertoleijupetikattila eli CFB-kattila. Muita kattilatyyppejä ei tässä työssä käsitellä tarkemmin, mutta niistä voi lukea enemmän esimerkiksi kirjoista *Höyrykattilatekniikka* [14] tai *Boilers and Burners* [15].

Työn kannalta kiinnostavimmat tapahtumat sijoittuvat savukaasupuoleen sekä tulipesän, syklonien ja hiekkalukkojen muodostamaan kokonaisuuteen, joten päähuomio kiinnitetään tähän niin kutsuttuun kuumaan kiertoon. Sen ulkopuoliset tapahtumat ja reaktiot sekä vesihöyrypuoli jätetään vähemmälle huomiolle. Valmetin kiertoleijupetikattilan kuumaa kiertoa on havainnollistettu **kuvassa 1**.

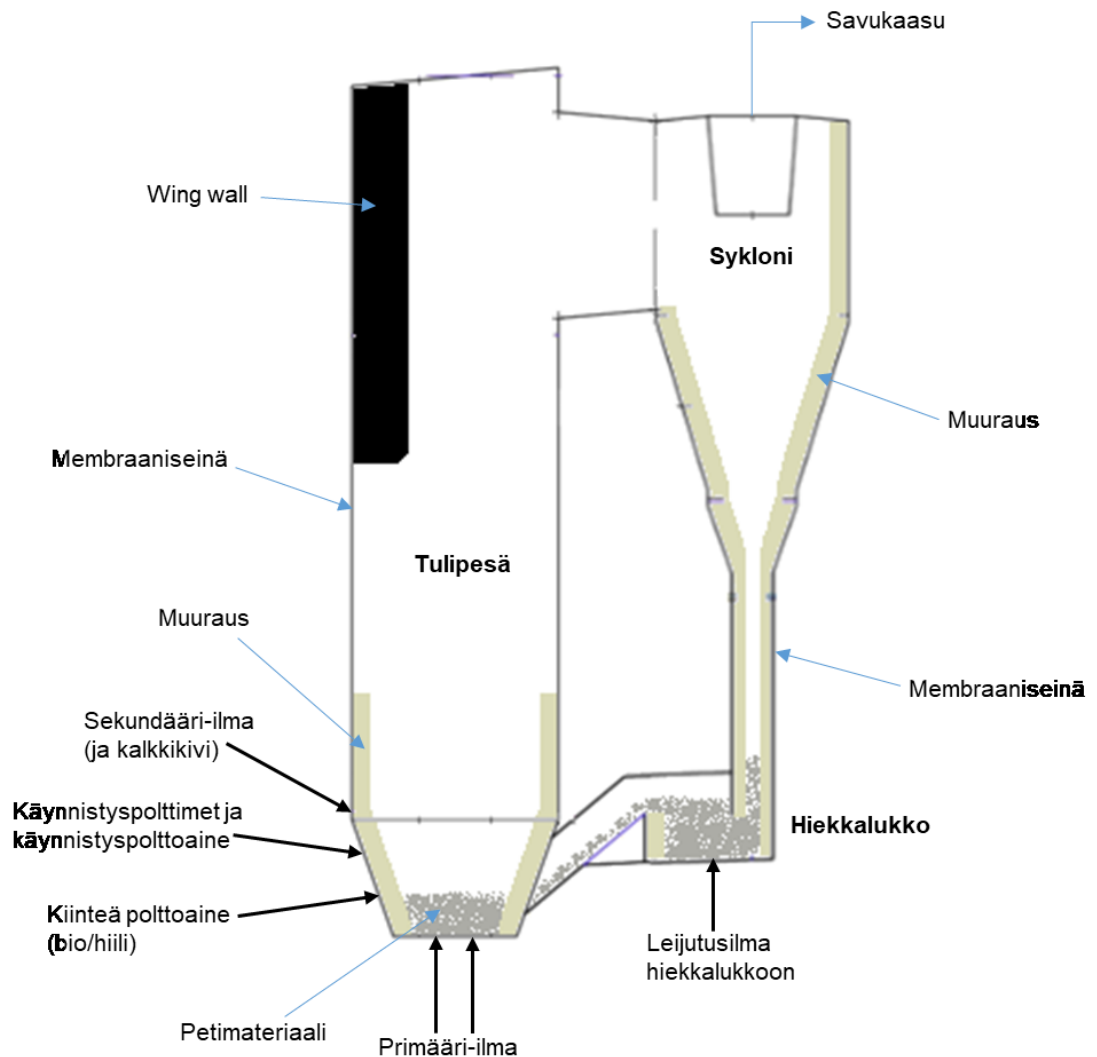


Kuva 1. Valmetin kiertoleijupetikattilan kuuma kierto [16].

Kattilassa polttoaine syötetään tulipesän alaosaan ja suurin osa palamisesta tapahtuu siellä. Tulipesässä oleellisia osia tämän työn ja toiminnan kannalta ovat: palotilassa oleva hiekkapeti, joka voi tilanteesta riippuen olla kiinteänä kattilan pohjalla (kattila pois käytöstä), kuplivana/leijuvana kattilan alaosassa (esim. käynnistystilanne) tai kiertävänä tulipesästä sykloniin, josta hiekkalukon kautta takaisin tulipesään (normaali käyttö). Tulipesän seinien alaosassa on muuraus, joka lisää järjestelmän lämpökapasiteettia ja suojaaa seiniä liikkuvan petimateriaalin aiheuttamalta eroosiovaikutukselta. Tulipesän, syklonien ja hiekkalukkojen varsinaiset seinät ovat putkimaisia membraaniseiniä, joiden sisällä vesi höyrystyy ja virtaa ylöspäin lieriöön. Tulipesän yläosassa saattaa olla wing wall -lämmönsiirtimiä, jotka lisäävät lämmönsiirtopinta-alaa ja toimivat höyryn tulistimina.

Tulipesän jälkeen kierrossa on sen vierellä oleva sykloni (tai useampia sykloneja), joka erottelee savukaasun ja palamattoman polttoaineen sekä palauttaa palamattomat hiukaset ja petihiekan uuteen kiertoön. Savukaasu jatkaa syklonin yläosasta savukaasukanavaan, jossa sijaitsee suurin osa tulistimista sekä ilman ja veden esilämmittimet. [14] Syklonista hiekka siirtyy alasmenokanavan läpi hiekkalukkoon, josta puolestaan myöhemmin tulipesän alaosaan. Normaalin käytön aikana suurin osa kierrossa olevasta petimateriaalista on hiekkalukossa. Hiekkalukko käyttäytyy kuten automaattinen säätöventtiili, joka säätelee kierrätetyn petimateriaalin virtausta takaisin tulipesään. Se toimii painesulkuna tulipesän positiivisen paineen ja syklonin negatiivisen paineen välillä ja estää savukaasun takaisinvirtauksen tulipesän alaosista sykloniin. Hiekkalukon ollessa välikomponentti, siihen vaikuttavat paljon syklonin erotustehokkuus ja tulipesän olosuhteet. [17] Hiekkalukoissa on myös tulistinputkia, joissa vesihöyryä lämmitetään korkeampaan lämpötilaan. Sykloneissa ja hiekkalukoissa on myös muuraukset kauttaaltaan sisäpinnoilla. [18]

Oleellisia toimilaitteita tutkittavassa kierrossa ovat primääri- ja sekundääri-ilmasuuttimet sekä käynnistyspolttimet. Ilman esilämmittimien eli LUVOjen vaikutus tulee huomioitua työssä mallin sisääntulosignaalien kautta. Tämä työ rajattiin kattilan savukaasupuoleen, jolloin vähemmälle huomiolle jäävät muun muassa lieriö, jossa erotetaan vesi ja vesihöyry, savukaasukanavassa sijaitsevat tulistimet, monet venttiilit, veden esilämmittimet eli ekonomaiserit ja höyryturbiini. Savukaasupuoli sisältää nopean käynnistyksen kannalta kiinnostavimmat elementit. Rajaamalla työstä vesihöyrypuoli pois, saadaan tilannetta yksinkertaistettua ja dynaamisen mallin laskentanopeutta parannettua huomattavasti. Työn kannalta kattilan oleelliset osat/elementit (ohuet nuolet) ja syötteet (paksummat mustat nuolet) on esitelty **kuvassa 2**.



Kuva 2. Työn kannalta kattilan oleelliset osat ja syötteet.

2.2 Kattilan toiminta

Kattilan toiminta pääpiirteittäin etenee siten, että polttoainetta poltetaan tulipesässä (polttoaine ja palamisilma reagoivat keskenään), jolloin reaktiossa vapautuva lämpöenergia siirtyy petimateriaaliin, muurauksiin ja savukaasuun, jotka puolestaan siirtävät energiaa membraaniseinien sisällä virtaavaan veteen/vesihöyryyn. Vesi-höyryseos lämpenee korkeassa paineessa höyrystyslämpötilaan, siirtyy kattilan yläosassa lieriöön, jossa jäljellä oleva vesi erotetaan höyrystä ja palautetaan höyrystyskiertoon. Höyry puolestaan jatkaa matkaa tulistimien läpi turbiinille, joka muuttaa höyryn sisältämän lämpöenergian liikeenergiaksi, josta se voidaan muuttaa edelleen sähköksi. Syklonin yläosassa eroteltu sa-

vukaasu jatkaa savukaasukanavaan ja siellä tulistimien sekä ilman ja veden esilämmittimien kautta lopulta suodatettuna savupiipusta ulos. Mitä enemmän savukaasun lämpöenergiaa on saatu matkalla luovutettua tulistimille ja esilämmittimille eli mitä kylmempää savukaasu lopussa on lähtötilanteeseen verrattuna, sitä parempi on kattilan hyötysuhde. [14][19]

Koska työssä tutkitaan ja simuloidaan kattilan käynnistystilannetta, käydään siinä tapahtuvia asioita vielä tarkemmin läpi. Käynnistyksen kesto riippuu paljon seisakkiajasta, sillä kattilan komponenttien viilentäminen voi kestää kauan. Tämän perusteella voidaan käynnistyksen kategorisointi jakaa kylmään, lämpimään ja kuumaan käynnistykseen. Käynnistystapahtuma on sarja pienempiä osakokonaisuuksia, jossa eri järjestelmät käynnistetään tietyssä järjestyksessä ja/tai sopivilla hetkillä. Ensimmäiseksi käynnistetään paineilmajärjestelmä ja tehdään sille tarvittavat tarkistukset. Seuraavaksi tehdään syöttövesijärjestelmälle ja vesi-höyrypiirille tarvittavat valmistelut ja toimenpiteet. Tämän jälkeen voidaan ottaa savukaasujärjestelmä käyttöön ja tehdä sille tarvittavat valmistelut ja tarkistukset. Seuraavaksi voidaan käynnistää kattilan palamisilmajärjestelmä. Tähän sisältyy muun muassa hiekkatulistimien leijutuspuhaltimien, sekundääri-ilmapuhaltimien ja primääri-ilmapuhaltimien käynnistys edellä mainitussa järjestyksessä. Öljyjärjestelmän käynnistysvalmistelut voidaan tehdä seuraavaksi. [20]

Ennen polttimien käynnistystä kattilaan syötetään ilmaa sisään hetken aikaa normaalia käyttöä voimakkaammin, jolloin kattila tuulettuu ja happipitoisuus saadaan ilman tasolle. Kokonaistuuletusaika on normaalisti suuruusluokaltaan noin 10 minuuttia. Tuuletuksen jälkeen ilmapuhaltimien pienennetään ns. normaalille tasolle, ja ensimmäinen käynnistyspolttin voidaan käynnistää. Polttimia poltetaan normaalisti aluksi vuoron perään, jotta hiekkapeti lämpiää mahdollisimman tasaisesti ja vesi-höyryjärjestelmän paine alkaa nousta. Tämä on tehtävä rauhallisesti, jotta kattilaan ei tule vaurioita esimerkiksi liian suurten lämpötilagradienttien vuoksi. Lopulta lämmitetään kaikki käynnistyspolttimet päällä peti haluttuun lämpötilaan, ennen kuin järjestelmään aletaan syöttää kiinteää polttoainetta. Biomassaa voidaan alkaa syöttää tulipesään, kun petin lämpötila on noin 400 °C. Käynnistyspolttoainetta ja kiinteää polttoainetta syötetään hetki samaan aikaan, jotta peti lämpiää edelleen. Noin 600 °C kohdalla tulipesään voidaan alkaa syöttää hiiltä ja käynnistyspolttimet on lupa sammuttaa. Yleensä käynnistyspolttoaineesta (kuten öljystä) siirrytään liukuvasti kiinteään polttoaineeseen. Käynnistyspolttimia pidetään tällöin pienellä teholla käynnissä kiinteän polttoaineen rinnalla. Suositeltu petilämpötila kaiken käynnistyspolttoaineen syötön lopettamiselle on noin 750 °C. [20]

Primääri-ilmapuhaltimien kasvaessa ja lämpötilojen noustessa kaasujen virtausnopeus kasvaa ja petimateriaali alkaa fluidisoitua ja vaikuttaa omalta osaltaan lämmönsiirtoon.

Viimeisimpinä toimenpiteinä käynnistyksen jälkeen aloitetaan vielä tuhkanpoisto ja nuohous sekä tarvittaessa ammoniakkin ja kalkin syöttö. Käynnistyksen aikana on tarkkailtava mm. tulipesän ja syklonien lämpötilaeroja ja järjestelmän lämpötilagradientteja sekä huolehdittava, ettei palamatonta polttoainetta kerääny petiin, ja että happea on riittävästi. [11][20]

Yleisellä tasolla lieriökattilan käynnistys voidaan jakaa vaiheisiin seuraavassa järjestyksessä: kattilan täyttö vedellä (lieriön alarajaan asti), puhaltimien käynnistäminen, tuulettus, käynnistyspolttimien käynnistäminen, kattilan lämmitys, kiinteän polttoaineen syötön aloitus, päähöyrylinjan lämmitys ohitusventtiilin kautta, päähöyryventtiilin avaus ja turbiinin ylösajo ja tahdistus. Lämmityksen aikana veden ominaistilavuus kasvaa, mutta toisaalta se paineen kasvaessa puristuu hieman kokoon. Käynnistyksen alkuvaiheessa ominaistilavuus kasvaa selvästi kokoonpuristumista nopeammin, jolloin lieriön pinta nousee ja sitä täytyy vajauttaa pohjatyhjennyksen kautta. Polttoaineen syöttönopeudella ja käynnistysventtiilin asennolla ohjataan kattilan painetta ja lämpötiloja. Laitos ei vielä käynnistyksen alussa tuota sähköä, sillä höyry ohjataan höyryturbiinin ohitukseen. Kun höyryn paine ja laatu ovat sopivalla tasolla, voidaan päähöyryventtiilin ohitus avata ja höyryputken antaa lämmitä. Päähöyryventtiili voidaan avata, kun käyttöpaine on lähes saavutettu. Turbiini ajetaan tämän jälkeen nimelliskierrosnopeuteensa, sähköntuotanto alkaa ja kuorma kasvaa, kunnes lopullinen kapasiteetti on saavutettu. [11][14]

2.3 Kiertoleijupetikattilan ominaispiirteitä

CFB-kattiloita käytetään laajasti teollisuudessa energiantuotantoon. Niiden etuja ovat muun muassa korkea palamistehokkuus, matalat päästöt, polttoainejoustavuus ja laaja kuormitussoveltavuus [21]. Eri laatuisten polttoaineiden käytön CFB-kattiloissa mahdollistaa suurelta osin hiekkapeti, johon on sitoutunut suuri lämpömäärä. Tämä tasoittaa polttoaineiden laatueroja ja sekoittaa eri polttoaineet sekä ilman tehokkaasti. Palamattomien aineiden erottelu syklonissa ja kierto takaisin tulipesään mahdollistaa palamisen verrattain hyvällä hyötysuhteella. Palamislämpötilat CFB-kattiloissa ovat matalia verrattuna perinteisiin polttomenetelmiin, mikä tarkoittaa, että typen oksideja muodostuu suhteellisen vähän. Syöttämällä ammoniakkia petiin, typen oksidien päästöjä voidaan vähentää edelleen. Rikin yhdisteiden päästöjä puolestaan vähennetään syöttämällä tulipesään kalkkikiveä, jolloin palamisessa syntyvä rikkidioksidi saadaan sidottua kalsiumsulfaatiksi, joka puolestaan voidaan poistaa kattilan alaosasta tuhkan kanssa. [14][15][22]

CFB-kattilan hyvät ominaisuudet joutuvat kuitenkin koetukselle normaalin käytön ulkopuolella. Muuttuvissa olosuhteissa korkeaa tehokkuutta ja matalia päästöjä on vaikea

taata järjestelmän sisältämän kiintoainemassan suuren inertian, metallimateriaalin ja muurauksien vuoksi. Virtaukset, palaminen ja lämmönsiirto muuttuvat dynaamisesti, jolloin operointiolosuhteet eivät välttämättä ole aina odotetun kaltaiset. Muuttuvia tilanteita CFB-kattilassa tulee eteen mm. käynnistyksessä, alasajossa ja kuormanmuutostilanteissa. [21]

Käynnistystilanteessa apupolttoaineen, kuten öljyn, kulutus voi lisätä kattilan käyttökustannuksia merkittävästi. Mahdollisia metodeja apupolttoaineen vähentämiseen käynnistyksessä ovat: petin korkeuden ja petimateriaalin kokojakauman optimointi (auttavat maksimaalisessa lämmön hyödyntämisessä), reaktiivisen polttoaineen optimaalisen määrän esisekoittaminen petimateriaaliin (voi auttaa nostamaan petin lämpötilaa oikeaan aikaan nopeasti), kanavapolttimien käyttö yhdistetyn sytytyksen järjestelmässä, käytetyn ja halvemman öljyn sekoittaminen käynnistyspolttimen öljyyn (vain pieni määrä likaantumisen estämiseksi), öljypolttimien sijoittaminen sekundääri-ilmasuuttimien lähelle palamisen ja nopean ilman kanssa sekoittumisen parantamiseksi, polttimien sijoittelu optimaaliselle korkeudelle ja optimaaliseen kulmaan sekä kuonan vähentämisen keinot (kuona hidastaa lämmitystä ja puhdistaminen on aikaa vievää työtä). [17]

Yksi kattiloiden alasajojen syy on huoltotarve. CFB-kattiloiden huollolla pyritään varmistamaan ja huolehtimaan neljästä asiasta: järjestelmän toiminta (saatavuus, tehokkuus ja laatu), järjestelmän käyttöikä, turvallisuus ja ihmisten hyvinvointi. Ennakoiva huolto voi parantaa merkittävästi kattilan käytettävyyttä ja vähentää seisakkien määrää. Iso osa CFB-kattilan sisäpinnoista on muurausten peitossa ja ne ovatkin kattilan suuri huoltokohde. CFB-yksikön ominaisuudet vaativat muurausmateriaaleja kestämaan kiertävien partikkelien aiheuttamaa hankausta ja lämmönmuutoksia 700...1000 °C välillä. Tulipesän vaikeat työskentelyolosuhteet korostavat muurauksen vaatimuksia. Muurauksen vuosittaiset huoltokustannukset ovat keskimäärin 25 % ja voivat olla jopa 40 % kokonaishuoltokustannuksista. [17]

Muurauksen pettäminen voi johtaa moniin käytöllisiin ongelmiin, kuten lämpöhäviöihin tulipesästä, putkien tai muiden paineosien altistumiseen eroosiolle ja korroosiolle tai syklonin erotustehokkuuden heikentymiseen. Irronneet muurauksen palaset voivat myös muodostaa esteen halutuille virtauksille. Haasteita muuraukselle luovat lämpötilan vaihtelut, eroosio ja korroosio. Ongelmia ovat aiheuttaneet lähinnä oikean muurausmateriaalin valinta ja sen oikeanlainen soveltaminen. Kattiloiden ajotavat puolestaan ovat aiheuttaneet vähemmän muurauksivikoja. Toiseksi yleisimmäksi huolenaiheeksi kattiloissa on arvioitu putkivauriot. Ne voivat johtua mekaanisesta vuodosta, korroosioista tai molemmissa. Putkivauriot ovat yleisin pakotettujen seisakkien syy CFB-kattiloissa. Niitä voidaan vähentää huolellisella suunnittelulla ja operoinnilla. [17]

CFB-kattiloiden säätöalue on laaja ja minimiteho on yleensä noin 30 %. Toiminta-alueellaan tyypillisesti kattilan petin lämpötila on 800...950 °C, leijutusnopeus vaihtelee välillä 3...10 m/s ja sekundääri-ilman osuus voi olla 25...65 % kokonaisilmamäärästä. Fluidisoidun petin korkeus voi vaihdella normaalisti välillä 0,5...1,0 m. Petimateriaalin raekoko on tyypillisesti 100...500 µm. Kiinteä polttoaine voidaan syöttää tulipesään joko etu- tai takaseinän kautta, tai hiekkalukosta tulevan petimateriaalin joukkoon. CFB-kattilat voivat olla hyvin eri kokoisia. Pienemmästä päästä olevat kattilat ovat kokonaisteholtaan kymmeniä megawatteja, kun taas esimerkiksi aikansa suurimmaksi CFB-kattilaksi vuonna 2009 valmistunut Lagiszan voimalaitoksen kattila on pelkästään sähköteholtaan 460 MWe. CHP-voimalaitoksien suurimmissa CFB-kattiloissa voidaan nykyään päästä yli 1000 MWth kokonaistehoihin. [14][15][16][22][23][24]

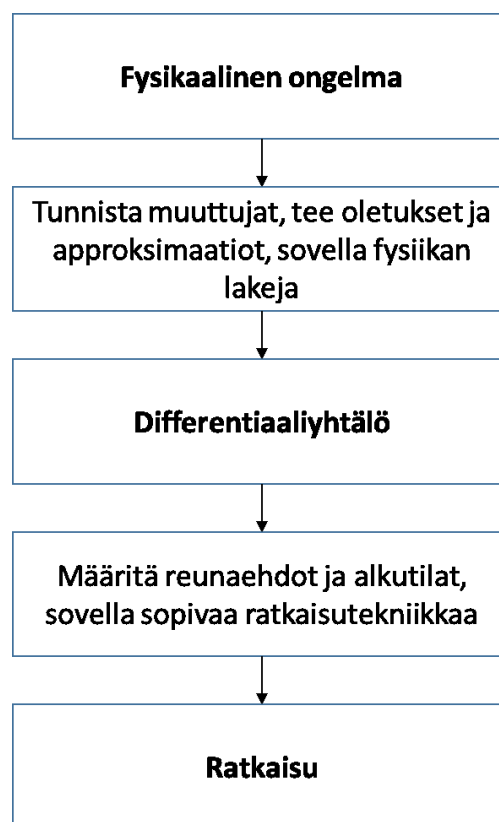
2.4 Tutkittavan kattilan tietoja

Tutkittava laitos on olemassa oleva kaupallinen monipolttoainevoimalaitos, jonka polttoaineteho on suuruusluokaltaan 400 MWth. Kattilan tulipesään on normaalissa käytössä mahdollista syöttää sekä biopolttoainetta (puu/turve) että hiiltä. Käynnistyspolttimet puolestaan käyttävät polttoöljyä. Tulipesän rinnalla on kaksi keskipakosyklonia, joiden alapuolella puolestaan kaksi hiekkalukkoa, joissa on lämmönsiirtopaketit. Käynnistyspolttimia on 4 kappaletta, kuten myös syöttöveden esilämmittimiä. Kattilan muita lämmönsiirtimiä ovat muun muassa tulistimet ja ilman esilämmittimet. [23]

3. DYNAAMINEN MALLINNUS JA SIMULOINTI

3.1 Yleistä mallinnuksesta ja simuloinnista

Mallilla tarkoitetaan tämän työn tapauksessa järjestelmää kuvaavaa matemaattista approksimaatiota, jossa järjestelmän tilat voidaan laskea sisääntulosignaalien ja järjestelmän dynamiikkaa kuvaavien yhtälöiden avulla. Staattisessa mallissa lasketaan ajasta riippumatta samojen kaavojen mukaan, kun taas dynaaminen malli huomioi laskennassa muuttuvan tilanteen ja sopeutuu siihen. Dynaamisessa jatkuva-aikaisessa mallissa voidaan käyttää differentiaaliyhtälöitä järjestelmän tilojen muutosnopeuksien eli derivaattojen laskemiseen. Tilat saadaan laskettua derivaatoista numeerisella integroinnilla. Yhtälöt voivat olla johdettavissa esimerkiksi fysiikan lakien kautta. Staattinen malli tarkoittaa käytännössä sitä, että sama sisäänmeno tuottaa aina saman ulostulon edellisestä tilasta riippumatta, kun taas dynaamisen mallin seuraava tila riippuu edellisestä tilasta. Tämä antaa dynaamiselle mallille mahdollisuuden huomioida monia asioita, joita staattisella mallilla on mahdotonta simuloida kovinkaan tarkasti. Esimerkki eräästä fysikaalisen ongelman matemaattisesta ratkaisumallista on esitetty **kuvassa 3**. [25]



Kuva 3. Fysikaalisen ongelman ratkaisumalli [26].

Simulointimalleja voidaan muodostaa lähes mille tahansa asialle ja simuloitava systeemi voi fyysikaalisen lisäksi olla myös jokin dynaaminen abstrakti ilmiö. Simuloitavia systeemejä voivat olla esimerkiksi kemiallinen prosessi, mekaaninen, biologinen tai ekonomisen järjestelmä. Vaikka malli onkin vain approksimaatio todellisesta järjestelmästä, simuloinnin avulla voidaan ennustaa järjestelmän käyttäytymistä ja sitä kautta esimerkiksi parantaa järjestelmän käytön tehokkuutta, turvallisuutta ja taloudellisuutta. [25]

Tämän työn simuloinnit suoritetaan MathWorksin MATLAB ja Simulink -ohjelmistoilla. MATLAB on ohjelmisto, joka on suunniteltu pääasiassa insinöörien ja tiedemiesten käyttöön järjestelmien ja tuotteiden analysoinnissa ja suunnittelussa. MATLAB käyttää matriisipohjaista ohjelmointikieltä, johon tarvittavat yhtälöt ja algoritmit voidaan kirjoittaa matemaattisessa muodossa. Saadut tulokset ovat graafisesti esitettävissä. Simulink on MATLABiin integroitu lohko-kaavioympäristö, johon malli voidaan rakentaa visuaalisesti käyttäjäystävällisempään muotoon verrattuna tekstipohjaiseen ohjelmointikoodiin. Itse simulointi on mahdollista ajaa joko MATLABin tai Simulinkin käyttöliittymän kautta. [27]

Dynaaminen malli koostuu usein differentiaalisista ja algebrallisista yhtälöistä, jolloin kyseessä on DAE-systeemi (engl. differential algebraic equation). DAE voidaan muuntaa ODE:ksi (engl. ordinary differential equation) derivoimalla ajan suhteen. Useampi vaa-dittu derivointi tarkoittaa järjestelmän korkeampaa kertalukua. [11] Simulinkissa DAE:t täytyy muuntaa ODE-muotoon derivaattojen ratkaisemiseksi. Kaikilla simulointiohjel-mistoilla muunnosta ei tarvitse tehdä. [28]

Dynaamisen järjestelmän simuloinnissa ohjelmistossa on tarjolla erilaisille malleille sopivia erilaisia ratkaisijoita, jotka ratkaisevat järjestelmän differentiaaliyhtälöt (ODE:t) halutulla aikavälillä ja aika-askeleilla. Aika-askel voi olla määritetty kiinteäksi tai se voi olla vaihtuva. Vaihtuva aika-askel soveltuu hyvin jatkuva-aikaisille malleille, koska sillä on mahdollista saada nopeissa muutostilanteissa tarkempia tuloksia ja hitaissa muutostilanteissa välttää ylimääräisten askelten määrää. Vaihtuvalla aika-askeleella ratkaisijan täytyy laskea haluttu askeleen pituus erikseen jokaisella simulointiaskeleella. Laskettu askeleen pituus riippuu määritetystä virhetoleranssista. [27]

Ratkaisija voi olla suunniteltu jatkuva-aikaiselle mallille tai diskreetille mallille. Diskreetti ratkaisija toimii vain täysin diskreetillä mallilla ja laskee ainoastaan mallin seuraavan aika-askleen jokaisen lohkon diskreetin tilan. Jatkuva-aikainen ratkaisija laskee jatkuvien tilojen arvot numeerisella integroinnilla aiempien tilojen ja niiden derivaattojen perusteella. Jatkuva-aikainen ratkaisija pystyy päivittämään myös mallin diskreettien tilojen arvot. Erilaiset jatkuva-aikaiset ratkaisijat eroavat toisistaan käytännössä numeerisen in-

tegrointimenetelmän perusteella. Sopivan ratkaisijan valintaan jatkuva-aikaisessa systeemissä vaikuttavat muun muassa systeemin dynamiikat, ratkaisun stabiilius sekä haluttu laskentanopeus ja -tarkkuus. [27]

3.2 Voimalaitoskattilamallinnuksen erityispiirteitä

Ensimmäinen simulointiohjelma lämpövoimalaitoksille kehitettiin 1960-luvulla, vesi/höyrypiirin numeerinen ratkaisu puolestaan 1970-luvulla. Modernit simulointiohjelmat sisältävät graafisen käyttöliittymän yksityiskohtaisilla virtaus-, termodynamiikka- ja lämmön siirtomalleilla. Dynaamisia simulointiohjelmia käytetään nykyään laajalti tieteellisissä ja teollisissa sovelluksissa. [10]

Kattilan suunnitteluprosessi perustuu suurelta osin olemassa olevaan tietoon ja kokeemukseen, direktiiveihin, sääntöihin ja matemaattiseen mallinnukseen [12]. Dynaaminen simulointi on kustannustehokas ja joustavuutta parantava työkalu tutkijoille ja ammattilaisille arvokkaan tietämyksen ja ymmärryksen saamiseksi järjestelmästä voimalaitoksien muuttuvassa operoinnissa. Simulointimallien avulla voidaan kehittää uusia suunnitteluratkaisuja, parantaa säätörakenteita, saavuttaa tarkemmin haluttuja kuormitusgradientteja ja nopeuttaa käynnistysmenettelytapoja. Tarkan ja kattavan mallin avulla tutkijat pystyvät keskittymään säätöön ja optimointiin, jolloin kattilan operoinnin tehokkuutta ja energiatehokkuutta voidaan nostaa ja päästöjä pienentää. [10][29][30][31][32]

Matemaattista mallia voidaan hyödyntää kattilan elinkaaren eri vaiheissa, kuten laitosuunnittelussa, säädössä ja optimoinnissa, kattilan suorituskyvyn analysoinnissa, käyttäytymisen testaamisessa sekä vianmäärityksessä, diagnostiikassa ja ennustamisessa. Näiden osa-alueiden avulla pystytään uudistamaan vanhoja ja suunnittelemaan uusia kattiloita, optimoimaan laitoksia, parantamaan laitoksen turvallisuutta ja testaamaan sen käyttäytymistä erilaisissa tilanteissa. [10][13] Jokaisella voimalaitoksella on yleensä oma dynaaminen käyttäytymisensä, jolloin joudutaan rakentamaan prosessimalli erikseen jokaiselle laitokselle. Käyttämällä valmiiksi rakennettuja voimalaitoskomponenttimalleja, voidaan mallinnustyötä kuitenkin nopeuttaa. [10][28]

Höyrykattila on yhdistelmä toisiinsa kytkeytyneitä virtauksia, energian muunnoksia, massan ja energian varastointia. Kattila sisältää mm. polttoaineen, ilman, savukaasun, veden, vesihöyryn ja petimateriaalin massavirtauksia. Massaa varastoituu kattilan eri osiin, kuten tulipesään, sykloneihin ja hiekkalukkoihin. Energiavirtauksia aiheutuu mm. lämmön siirtymisenä massavirtauksien mukana (konvektiolla), johtumalla (esim. kattilan rakenteissa) ja säteilemällä (esim. liekeistä tulipesän seiniin). Kattilan seinät ja muuraukset

toimivat lämpövarastoina ja vaikuttavat huomattavasti kattilan dynamiikkaan. Dynaamisella simuloinnilla voidaan ennustaa kattilan käyttäytymistä normaaleissa muutostilanteissa, kuten kuormanmuutoksissa sekä harvinaisemmissa ja poikkeuksellisissa tilanteissa. Mielenkiintoinen erikoistilanne on esimerkiksi lämmön vapautuminen edellä mainituista lämpövarastoista äkillisessä käyttökatkossa. Tässä työssä tutkitaan käynnistystilanteita, jolloin yksi kiinnostava ilmiö lämmön vapautumisen sijaan on lämmön varastoituminen muuraukseen. Yksinkertaistettuna kattilan malli on varastoista ja virtauksista koostuva systeemi. Mallinnetun systeemin yksi ominaisuuksista on se, että siitä pystytään tarkastelemaan myös sellaisia muuttujia, jotka eivät todellisessa prosessissa ole suoraan mitattavissa. [12]

Mallinnus CFB-kattilassa voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: virtausaineen dynamiikka, kemia (mukaan lukien savukaasun koostumuksen muodostuminen) ja lämpötasapaino (lämmönsiirto). Kaikki kolme ryhmää tarvitsevat sisääntulomuuttujia, jotka ovat jonkin toisen ryhmän ulostuloja. Kemian ja lämpötasapainon laskenta on hyvinkin herkkää virtausaineen dynamiikalle, johon vaikuttavat arvot puolestaan ovat enimmäkseen ulkoisia parametreja. Käytännössä siihen vaikuttavia tekijöitä kahdesta muusta pääryhmästä ovat vain sisäinen kaasun tuotto (kemia) ja lämpötilaprofiilit (lämpötasapaino). Kemia vaikuttaa merkittävästi lämpötasapainoon (lämmön tuotto), lämpötasapaino lämpötilaprofiilien kautta puolestaan vain hieman kemiaan. [33]

Suurin osa kirjallisuudessa esitetyistä voimalaitoskattiloiden dynaamisista malleista perustuu massa-, momentti- ja energiataseyhtälöihin sekä termodynamiikan perusyhtälöihin. [10][11][28][29][31][34][35][36] CFB-malli sisältää kolme perusosaa: tulipesä, sykloni ja hiekkalukko. Kasattua mallia varten näitä kolmea osaa tarkastellaan yleensä erikseen ja ne kytketään toisiinsa sisään- ja ulosvirtauksien kautta. Kolmen mallin suhde voidaan muodostaa esimerkiksi koko kierron painetasapainon kautta. [21] Kokonaista mallia tutkittaessa yksittäiset komponentit on yleensä jaettu vesi/höyry- ja savukaasupuoleen. Komponentit mallinnetaan normaalisti erikseen ja alisysteemit yhdistetään kokonaisuudeksi lopullisessa mallissa. [10][11][28][31]

Kirjallisuudessa on kuvattu viime vuosina kehitettyjen CFB-kattiloiden (tai muiden voimalaitoskattiloiden) malleja erikoistilanteissa, kuten käynnistystilanteissa tai minimikuormalla. Vanhemmat tutkimukset ovat keskittyneet enemmän tasaisen kuorman ja pienempien kuormanmuutosten mallinnukseen, jonka kautta on lähdetty hakemaan prosessin optimointeja, säätöstrategioita ja uusia lähestymistapoja suunnitteluun. Uudemmissa tutkimuksissa matemaattisia malleja laajemmalla käyttöalueella on kuvailtu välttämättömiksi operoinnin ja säätötutkimuksen kannalta. Tasapainotilan mallinnukseen verrattuna dynaamiset mallit vaativat yksityiskohtaisempaa tietoa prosessista. Simulointituloksina

kattilan savukaasupuolelta ollaan yleensä tarkkailtu muun muassa petimateriaalin suspensiotiheyttä, lämpötiloja, virtausnopeuksia ja happipitoisuutta. [4][10][13][28][29][31][34][36][37]

Kattilan dynamiikat käynnistystilanteessa ovat epälineaarisia ja sisältävät monia epävarmuuksia. Näitä ei pystytä kuvaamaan täysin tarkasti ja monimutkaisempi malli ei myöskään välttämättä tarkoita parempia tuloksia. Käytännön syistä epälineaarisia malleja onkin usein hyvä yksinkertaistaa. [4][10][11][31][32][35]

Useiden tutkimusten, joissa malleja on kehitetty, tärkeimpänä tavoitteena tai jatkotavoitteena mainitaan käynnistuksen optimointi. Käynnistystä halutaan saada nopeammaksi sallittujen lämpötila- ja painegradienttien rajoissa. [4][10][11][28][31][32][34][35] Hyötyinä käynnistysajan lyhentämiselle mainitaan yleisesti häviöiden ja kulujen pieneneminen, muun muassa apupolttoaineen kulutuksen väheneminen. Käynnistysajan minimoituessa myös energian tuotanto maksimoituu. [17][32][35][38] Kattilan käynnistysajalle on kirjallisuudessa annettu muutamia eri määritelmiä, esimerkiksi aika lieriön paineen nousun alkamisesta nimellisarvoonsa tai käyttökatkon jälkeisestä polttoaineen syötön alkamisesta hetkeen, jolloin kattila tuottaa sähköä tai hyödynnettävää lämpöenergiaa. [11][17][38][39]

Optimointiin säädön avulla on kirjallisuudessa esitetty useita eri strategioita. Useissa tapauksissa käytetään kustannusfunktiota, jossa kovina rajoitteina ovat kyseisen tutkimuksen painopistealueet, esimerkiksi tietyt lämpöjännitykset ja ohjausten maksimimuutosnopeudet. [4][11][28][32][35][38] Klassisessa käynnistysstrategiassa polttoaineen syöttö tapahtuu ramppimaisesti. Tällöin etuna on yksinkertaisuus, mutta huonoja puolia ovat, että käynnistysaika ei ole optimoitu ja kestää tarpeettoman kauan, vaikka lämpöjännitysten marginaaleissa olisi varaa ja käynnistyspolttoaineenkulutusta voitaisiin vähentää. [10][35]

Datan puute on usein iso ongelma laadittujen mallien validoinnissa. On kuitenkin tärkeää perustaa makroskooppinen, semiempiirinen mallinnus robustiin ja korkealaatuiseen dataan, joka on saatu teollisille yksiköille relevanteissa olosuhteissa. [10][33]

Mallinnus voidaan jakaa kolmeen lähestymistapaan: white box, gray box ja black box. Käynnistystilanteiden dynaamiset mallit ovat usein gray box -malleja, joissa osa yhtälöistä perustuu tunnettuihin luonnonlakeihin (white box) ja osa parametreista puolestaan on tuntemattomia ja empiirisesti määritettäviä/identifioitavia (black box) ja riippuvat kyseessä olevan kattilan ominaisuuksista. Tämän työn malli on gray box -malli. [31][32]

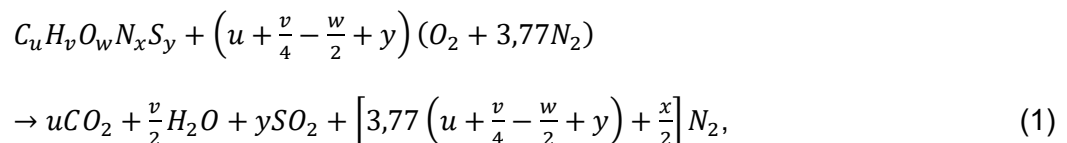
4. FYSIKAALISET ILMIÖT KATTILASSA

4.1 Palaminen

Polttoaineen palamisreaktiolla saadaan lämpöenergiaa kattilan sisään, jota kattila toimikseen vaatii. Lämpöä vapautuu, kun happi reagoi eri alkuaineita sisältävän polttoaineen kanssa. Primääri-ilman kaksi tärkeää tehtävää ovatkin palaminen ja leijutus [17]. Myös sekundääri-ilman tehtävä on toimittaa happea palamiseen. Reaktion kannalta tärkeimmät alkuaineet, joita polttoaine usein sisältää ovat hiili, vety, happi, typpi ja rikki. Polttoaine voi sisältää tärkeimpien alkuaineiden lisäksi myös hiilidioksidia, kosteutta ja tuhkaa. Hiilidioksidin ja kosteuden oletetaan tutkittavassa tapauksessa siirtyvän sellaisenaan savukaasuun. Tuhkan puolestaan ei oleteta reagoivan eikä siirtyvän savukaasuun. [40]

Eksotermisessä reaktiossa lämpöä vapautuu entalpian muutoksen suuruinen määrä. Hiili, vety ja rikki reagoivat eksotermisesti hapen kanssa, eli niiden kaikkien palamisessa vapautuu lämpöenergiaa. Typen ei oleteta tutkittavan tapauksen mallissa reagoivan hapen kanssa lainkaan, jolloin se siirtyy sellaisenaan savukaasuun. Polttoaineen sisältämä happi puolestaan vähentää ulkopuolelta tarvittavaa hapen määrää. Palamista tarkasteltaessa oleellisia huomioitavia asioita ovat reaktioentalpian lisäksi palamistuotteet (ts. syntyvän savukaasun koostumus), pyrolyysi- ja palamisnopeus sekä tarvittava hapen määrä. [40]

Palamistuotteiden, teoreettisen eli stökiometrisen tarvittavan hapenmäärän ja reaktioentalpian laskennassa voidaan hyödyntää ilmassa täydellisesti palavalle hiiltä, vetyä, happea, typpeä ja rikkiä sisältävälle yhdisteelle kaavaa [40]:



jossa C , H , O , N ja S ovat hiili, vety, happi, typpi ja rikki, u on hiilen ainemäärä polttoaineessa ja vastaavasti v , w , x ja y ovat vedyn, hapen, typen ja rikin ainemäärät. Nämä voidaan muuttaa massoiksi kertomalla ne aineiden moolimassoilla. Kerroin 3,77 tulee ilman koostumuksesta, jonka oletetaan olevan happea 20,948 tilavuusprosenttia (vol-%) ja raakatyppeä 79,052 vol-% eli hapen ja typen tilavuuksien suhde on 1:3,77. Hapen lisäksi ilman sisältämät aineet ovat pääosin typpeä, joten niistä käytetään yhteistä nimitystä raakatyppi. [40]

Kaavasta (1) voidaan nähdä, että palamisessa tarvittava polttoaineen ulkopuolisen hapen määrä on $u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y$ moolia, ja että palamistuotteina syntyy hiilidioksidia u moolia, vettä $\frac{v}{2}$ moolia ja rikkidioksidia y moolia. Typen määrä syntyvässä savukaasussa puolestaan on $3,77 \left(u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y \right) + \frac{x}{2}$ moolia. On kuitenkin huomioitava, että tarvittava hapen määrä on todellisessa reaktiossa aina suurempi, kuin teoreettisesti laskettu. Ylimääräinen ilma helpottaa palamista, mutta aiheuttaa samalla lämpöhäviötä tulipesässä. Optimaalinen ilmamäärä on sellainen, että happi riittää kaiken polttoaineen palamiseen ja minimoi lämpöhäviöt. [15]

Polttoaineen täydellisessä palamisessa vapautuvan energian ilmoittaa polttoaineen lämpöarvo, eli stökiometrisen palamisreaktion reaktioentalpia. Lämpöarvo ilmoitetaan yleensä energiana massayksikköä kohti (MJ/kg). Ylemmässä eli kalorimetrisessä lämpöarvossa reaktion jälkeinen vesimäärä oletetaan kokonaan nesteeksi, alemmassa eli tehollisessa lämpöarvossa höyryksi. Ylempi lämpöarvo on siis veden höyrystämiseksi vaadittavan energian verran suurempi kuin alempi lämpöarvo. Alempi lämpöarvo kuvaa yleensä paremmin kiinteän polttoaineen sisältämää energiamäärää. [40]

Kiinteiden polttoaineiden tarkat lämpöarvot saadaan selville vain kokeellisesti mittaamalla. Jos kiinteän polttoaineen koostumus on tiedossa, voidaan käyttää laadittuja korrelaatioita, joiden avulla saadaan laskettua likimääräinen lämpöarvo. Lasketut arvot voivat kuitenkin poiketa melko paljon todellisesta arvosta. Kaasumaisille ja yleensä myös nestemäisille polttoaineille lämpöarvo saadaan laskettua komponenttien palamisreaktion reaktioentalpioiden avulla. [40]

Standardin mukaisessa referenssitilassa ($T = 298,15$ K ja $p = 100$ kPa) tapahtuvassa palamisessa monien lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden muodostumisentalpiat on taulukoitu. Esimerkiksi hiilidioksidin muodostumisentalpia on 393,505 kJ/mol. Lähtöaineiden muodostumisentalpiat tulee myös huomioida laskennassa, jotta saadaan palamisessa aiheutuva entalpien muutos. [40]

Aineen entalpia referenssipaineessa ja lämpötilassa T (K) voidaan laskea kaavalla [40]:

$$h(T) = \Delta h_f + h_{mt}(T), \quad (2)$$

jossa Δh_f on aineen muodostumisentalpia referenssitilassa ja $h_{mt}(T)$ on taulukkoentalpia lämpötilassa T . Palamisen energiataseyhtälö stationääritilassa voidaan määrittää seuraavasti [40]:

$$\dot{m}_{fuel} q_i + \dot{n}_{air} h_{mt,air}(T_2) = \dot{n}_{gas} h_{mt,gas}(T_3) + \phi_4 + \phi_5, \quad (3)$$

Jossa termi $\dot{m}_{fuel} q_i$ on polttoaineen täydellisen palamisen polttoaineteho. \dot{m}_{fuel} on polttoainevirta ja q_i on polttoaineen alempi lämpöarvo. \dot{n}_{air} on ilman moolivirta, $h_{mt,air}(T_2)$ on ilman taulukkoentalpia lämpötilassa T_2 , \dot{n}_{gas} on savukaasun moolivirta, $h_{mt,gas}(T_3)$ on savukaasun taulukkoentalpia lämpötilassa T_3 , ϕ_4 on jäähdysteho ja ϕ_5 on häviölämpöteho.

Muodostumisentalpian arvot ovat eksotermisessä reaktiossa negatiiviset. Kun lämpöä vapautuu ja liekin lämpötila nousee, muodostuvan savukaasun taulukkoentalpian arvo kasvaa ja alkaa rajoittaa lämpötilan nousua (entalpian muutosta), kunnes saavutetaan adiabaattinen palamislämpötila, josta liekin lämpötila ei samalla polttoaineella ja samoilla palamisilman ominaisuuksilla voi enää kasvaa. Tietyn polttoaineen adiabaattinen palamislämpötila voidaan määrittää iteroimalla edellisestä energiataseyhtälöstä (3), kun jäähdysteho ja häviöteho asetetaan nolliksi. [40]

Yksi kiinteän polttoaineen ylemmän lämpöarvon korrelaatiokaava on esimerkiksi Dulong'in kaava [40]:

$$q_{s,daf} = 0,3382 \cdot C_{mp} + 1,4428 \cdot \left(H_{mp} - \frac{O_{mp}}{8} \right) + 0,0942 \cdot S_{mp}, \quad (4)$$

jossa C_{mp} , H_{mp} , O_{mp} ja S_{mp} ovat aineiden massaprosentit tuhkattomasta kuiva-aineesta (daf). Ylemmän lämpöarvon perusteella voidaan laskea alempi lämpöarvo q_i [40]:

$$q_{i,daf} = q_{s,daf} - 0,2196 \cdot H_{mp}, \quad (5)$$

Kuivan tuhkattoman polttoaineen alemman lämpöarvon perusteella voidaan edelleen laskea kostean tuhkaa sisältävän polttoaineen alempi lämpöarvo q_{iw} [41]:

$$q_{iw} = q_{i,daf} \cdot \frac{(100-A_d)}{100} \cdot \frac{(100-M_{ar})}{100} - 0,02443 \cdot M_{ar}, \quad (6)$$

jossa A_d on tuhkapitoisuus kuiva-aineessa ja M_{ar} on kostean polttoaineen vesipitoisuus massaprosenttina.

Myös polttoöljylle on kehitetty erilliset keskimääräisten lämpöarvojen korrelaatiokaavat [40]:

$$q_s = 0,339 \cdot C_{mp} + 1,25 \cdot \left(H_{mp} - \frac{O_{mp}}{8} \right) + 0,105 \cdot S_{mp} \quad (7)$$

$$q_i = q_s - 0,224 \cdot H_{mp}. \quad (8)$$

Kaavoilla (4–8) laskettujen lämpöarvojen yksiköksi saadaan MJ/kg.

Yksinkertainen laskuesimerkki, jossa lasketaan palamisessa syntyvän savukaasun koostumus, tarvittava hapen määrä ja polttoaineen likimääräinen lämpöarvo, on esitetty liitteessä A.

CFB-kattilan käynnistyksessä käytetään tavallisesti yhtä kolmesta polttotavasta: petin yläpuolinen, petin alapuolinen tai yhdistetty sytytysmetodi. Petin yläpuolisessa metodissa polttimet ovat tulipesän alaosassa, petin yläpuolella ja suunnattuna petiä kohti. Tällä järjestelyllä voidaan tarjota myös tukilämmitystä petille matalan kuormituksen tilanteissa. Tehon hyödyntäminen petin lämmitykseen yläpuolisissa polttimissa (alle 45 %) ei ole yhtä hyvää kuin petin alapuolisissa polttimissa (noin 90 %). Alapuoliset polttimet ovat kanavapolttimia, jotka sijaitsevat primääri-ilmakanavassa. Ne lämmittävät primääri-ilmaa, joka puolestaan lämmittää petiä tasaisesti. Alapuolisilla polttimilla voidaan päästä pienempään käynnistysaikaan, kuin yläpuolisilla polttimilla. [17]

Vakaa ja tasainen petin lämpötila on tärkeä vaatimus CFB-kattilan stabiiliuden ja turvallisen käytön kannalta. Petin lämpötila riippuu yksikön kuormasta, polttoaineen laadusta, polttoaineen partikkelikokospektristä, polttoaineen syöttönopeudesta, ilman syöttönopeudesta ja tuhkan poistonopeudesta. Näistä operaattorin toimesta hallittavissa ovat polttoaineen syöttönopeus, primääri- ja sekundääri-ilmavirrat sekä tuhkan poistonopeus. Petin lämpötila kasvaa polttoainetta syötettäessä, mutta lämpiäminen tapahtuu vasta viiveen jälkeen. Polttoaineen massa itse asiassa viilentää aluksi hieman petiä. Tämä pitää huomioida, jos petin lämpötila on lähellä polttoaineen syttymislämpötilaa. [17]

Savukaasun happikonsentraatio voi opastaa operaattoria, miten ohjata polttoaineen syöttönopeutta ja primääri-ilmaa, jotka vaikuttavat palamisolosuhteisiin tulipesässä. Jos happikonsentraatio laskee vakioilmavirralla, se tarkoittaa, että polttoainetta syötetään liikaa. Tällöin operaattorin tulisi vähentää polttoaineen syöttöä, jotta petilämpötila säilyy. [17] Päästöjen vähennysmekanismien mallinnukseen ei simulointiohjelmista yleensä löydy kirjastomalleja. Aihepiiri vaatisi lisää tutkimusta. [10]

Seuraavaksi esitellään muita mallissa käytettyjä palamisen kaavoja ilman laajempia kuvauksia. Monia näistä kaavoista ja esimerkiksi jäännöshiilen palamiseen liittyviä reaktioita, kuten pyrolyysiä, on kuvattu tarkemmin Petri Köykan diplomityössä [42]. Työn mallissa käytetyt palamisen differentiaaliyhtälöt puolestaan esitellään tämän työn **luvussa 5.2.2**. On huomioitavaa, että tulipesä on mallinnuksessa jaettu pystysuunnassa pienempiin osiin (elementteihin), ja laskenta tehdään jokaisessa elementissä erikseen.

Palamisen kinetiikkaan vaikuttavat kemiallisten reaktioiden nopeus sekä aineen- ja lämmönsiirto. Kemiallinen kinetiikka on yleensä suhteellisen nopeaa korkean palamislämpötilan vuoksi. Aineensiirron ilmiöt, kuten polttoaineen ja ilman sekoittuminen, voivat vaikuttaa merkittävästi palamiseen. Lämmönsiirron ominaisuudet vaikuttavat esimerkiksi kattilan käynnistyspolttimilla pyrolyysi- ja palamisnopeuteen. Poltettava öljy hajotetaan

höyryn avulla polttimen suuttimessa pieniksi pisaroiksi, jolloin reaktiopinta-ala ja -nopeus kasvavat. [40]

Haihtuvien aineiden palamista tulipesässä voidaan kuvata empiirisellä yhtälöllä [42]:

$$\dot{m}_{vol,k} = k_{vol} y_{vol,k} x_{O_2,k}^{K_{vol}}, \quad (9)$$

jossa $\dot{m}_{vol,k}$ on reagoivien haihtuvien aineiden määrä elementissä k , k_{vol} on reaktionopeuskerroin, $y_{vol,k}$ on haihtuvien aineiden massaosuus elementissä k , $x_{O_2,k}$ on hapen mooliosuus elementissä k ja K_{vol} on reaktion kertaluku.

Polttoainepartikkelin pyrolyysiaika voidaan laskea empiirisellä yhtälöllä [42]:

$$t_{vol} = K_v d_{p, fuel}^n, \quad (10)$$

jossa $d_{p,f}$ on polttoainepartikkelin halkaisija, K_v ja n ovat polttoaineesta ja lämpötilasta riippuvia parametreja. Parametri n voi saada arvoja välillä 1...2.

Jäännöshiilen palamisaika voidaan laskea kaavalla [42]:

$$t_c = \frac{\rho_c d_c^2}{3D_i(\rho_{O_2}(\infty))Sh}, \quad (11)$$

jossa ρ_c on karkean jäännöshiilipartikkelin tiheys, d_c on karkean jäännöshiilipartikkelin halkaisija, D_i on molekylaarinen diffuusiokerroin hapesta tyypeen, $\rho_{O_2}(\infty)$ on hapen tiheys emulsiossa kaukana partikkelin pinnasta ja Sh on Sherwoodin luku.

Edellisessä kaavassa esiintyvä Sherwoodin luku voidaan laskea korrelaatioyhtälöllä [42]:

$$Sh = 2\varepsilon + 0,69 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{1/2} \cdot Sc^{1/3}, \quad (12)$$

jossa ε on suspension tyhjän tilan osuus, Re on Reynoldsin luku ja Sc on Schmidtin luku.

Sherwoodin luvun yhtälössä esiintyvät tyhjän tilan osuus ja Schmidtin luku saadaan kaavoilla [42]:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{inert} - \rho_{p,bed}}{\rho_{gas} - \rho_{p,bed}}, \quad (13)$$

$$Sc = \frac{\mu_{gas}}{\rho_{gas} D_i}, \quad (14)$$

joissa ρ_{inert} on suspensiotiheys, $\rho_{p,bed}$ on petipartikkelin tiheys, ρ_{gas} on kaasun tiheys, μ_{gas} on kaasun dynaaminen viskositeetti ja D_i on molekylaarinen diffuusiokerroin.

Schmidtin luvun yhtälössä esiintyvä molekylaarinen diffuusiokerroin puolestaan voidaan määrittää sovitteella [43]:

$$D_i = 0,207 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{T_{p,c}}{300}\right)^{1,75}, \quad (15)$$

jossa $T_{p,c}$ on palavan hiilipartikkelin lämpötila Kelvineinä. Kaavassa oletetaan, että hiilipartikkeli on lämpötilaltaan keskimäärin 100 Kelviniä petimateriaalin lämpötilaa suurempi.

Hienoainepartikkelien palamisaika saadaan yhtälöllä [42]:

$$t_f = \frac{\rho_f d_f}{1,5k_c}, \quad (16)$$

jossa ρ_f on hienoainepartikkelin tiheys, d_f on hienoainepartikkelin halkaisija ja k_c on kineettinen reaktionopeusvakio.

Yhtälössä esiintyvä kineettinen reaktionopeusvakio saadaan ratkaistua Arrheniuksen yhtälöllä [40]:

$$k_c = A_f e^{\frac{-E}{RT}}, \quad (17)$$

jossa A_f on taajuustekijä, E on aktivoitumisenergia, R on moolinen kaasuvakio ja T on polttoainepartikkelin pintalämpötila.

Hienoainepartikkelin viipymäaika voidaan laskea kaavalla [44]:

$$t_{f,k} = \frac{h_k \rho_{inert}}{G}, \quad (18)$$

jossa h_k on elementin korkeus, ρ_{inert} on suspensiotiheys ja G on kiintoaineen massavirtauksen tiheys elementissä (ks. luku 4.3 yhtälö (34)).

Jäännöshiilen viipymäajan voidaan olettaa suoraan verrannolliseksi hienoainepartikkelien viipymäaikaan [44]:

$$t_{c,k} = \gamma t_{f,k}, \quad (19)$$

jossa γ on empiirinen kerroin ja $t_{f,k}$ on hienoainepartikkelin viipymäaika.

Elementistä ulos virtaavien hienoainepartikkelien ja karkeiden polttoainepartikkelien määrät voidaan laskea viipymäaikojen perusteella kaavoilla [44]:

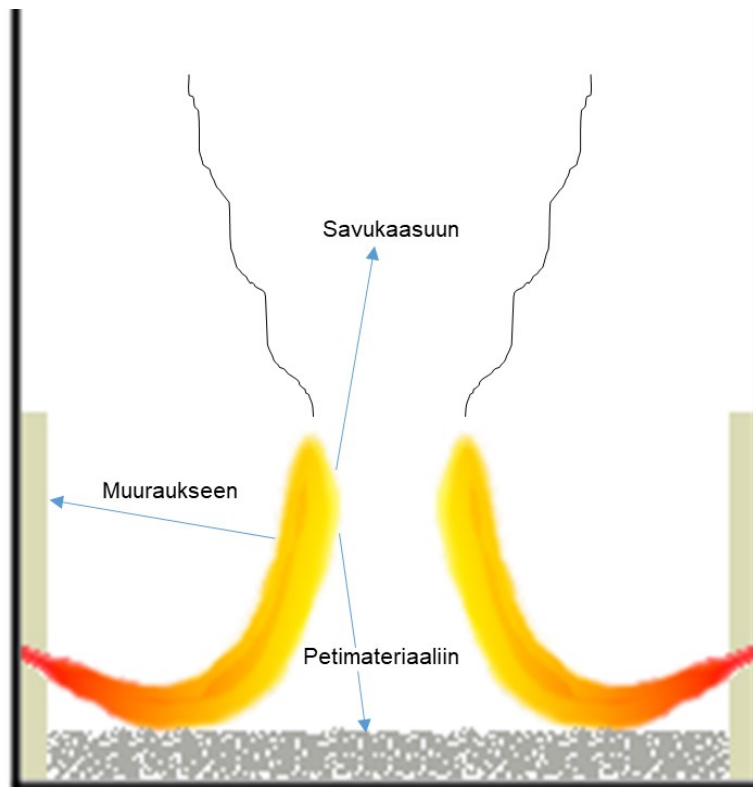
$$\dot{m}_{f,k} = \frac{m_{f,k}}{t_{f,k}}, \quad (20)$$

$$\dot{m}_{c,k} = \frac{m_{c,k}}{t_{c,k}}, \quad (21)$$

joissa $m_{f,k}$ on hienoainepartikkelien massa elementissä k , $t_{f,k}$ on hienoainepartikkelien viipymäaika elementissä k , $m_{c,k}$ on karkeiden polttoainepartikkelien massa elementissä k ja $t_{c,k}$ on karkeiden polttoainepartikkelien viipymäaika elementissä k .

4.2 Lämmönsiirto

Käynnistystilanteen lämmönsiirto kattilassa on kiinnostava ilmiö. Lämmönsiirtotavat voidaan jakaa kolmeen lajiin, jotka kaikki ovat läsnä kattilan käyttäytymistä tutkittaessa. Lämpö voi siirtyä johtamalla, konvektiolla eli virtaavan väliaineen mukana tai säteilemällä. Yksinkertaisesti eriteltynä lämpöä siirtyy starttipolttimen liekistä hiekkapetiin, muuraukseen ja savukaasuun, tätä on havainnollistettu **kuvassa 4**. Ilman ja savukaasun mukana lämpöä siirtyy konvektiolla tulipesän ylempiin osiin ja muuraukseen. Hiekkapetin liikkeessä kuuma hiekka käyttäytyy myös virtausaineen kaltaisesti, jolloin lämmönsiirron hiekasta voidaan ajatella tapahtuvan konvektiivisesti. Muurauksen sisäinen lämmönsiirto puolestaan tapahtuu johtamalla. Kaikilla lämpöenergian siirtymismuodoilla on suunta ja voimakkuus. [26]

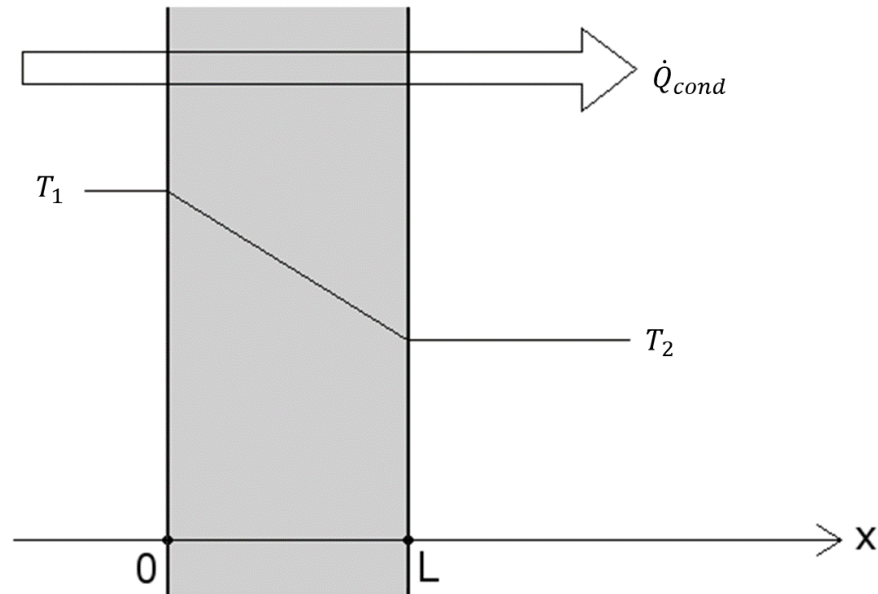


Kuva 4. Lämmönsiirto tulipesässä.

4.2.1 Lämmön johtuminen eli konduktio

Lämmön johtumista muurauksen sisällä tapahtuu käytännössä kolmiulotteisesti, mutta mallin sisällä laskenta tehdään yksiulotteisesti eli vain muurauksen paksuussuunnassa, sillä muurauksen muut dimensiot ovat suhteutettuna selvästi suurempia ja niiden lämpötilaerot puolestaan pienempiä paksuussuuntaan verrattuna. Tämä on dominoiva lämmön johtumissuunta ja antaa malliin kokonaisuuden kannalta hyvän tarkkuuden. [26]

Kuvassa 5 on esitetty lämmönjohtumisen vaikutus jollain hetkellä tasalaatuisen seinän läpi. Paksuudeltaan L olevan seinän vasemmalla puolella ympäristö on lämpötilassa T_1 ($T(0) = T_1$) ja oikealla puolella lämpötilassa T_2 ($T(L) = T_2$). Koska lämpötila T_1 on korkeampi kuin T_2 , lämpötehon \dot{Q}_{cond} vaikutussuunta on kuvassa vasemmalta oikealle. Jos seinä on tasalaatuinen, lämpötilagradientti sen läpi on lineaarinen. Materiaalien ominaislämpökapasiteetit muuttuvat kuitenkin hieman lämpötilan mukana, jolloin seinän johtumisolosuhteiden täydellinen tasalaatuisuus ei käytännössä toteudu.



Kuva 5. Lämmönjohtuminen tasalaatuisen materiaalin läpi.

Lämmönjohtumisteho \dot{Q}_{cond} yksiulotteisessa tapauksessa voidaan laskea Fourierin lämmönjohtumislain mukaan kaavalla [26]:

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda A \frac{dT}{dx}, \quad (22)$$

jossa λ on lämmönjohtavuuskerroin, A on lämpötehoon nähden kohtisuora pinta-ala ja $\frac{dT}{dx}$ on lämpötilagradientti. Lämpö johtuu ylemmästä lämpötilasta alemmaksi kohti, johon suuntaan lämpötilagradientin arvo on negatiivinen. Miinusmerkki yhtälön alussa kääntää tällöin lämmönsiirron suureen positiiviseksi. Kolmiulotteisessa tapauksessa yhtälöitä on kolme kappaletta, joissa käytetään osittaisderivaattoja ∂x , ∂y ja ∂z ja kunkin suunnan kohtisuoraa pinta-alaa.

Yksiulotteisen lämmönjohtumisen yleinen yhtälö tasomaisen pinnan/seinän tapauksessa voidaan kirjoittaa muotoon [26]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (23)$$

jossa $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ on lämpötilan toisen kertaluvun osittaisderivaatta paikan suhteen, \dot{q} on lämmön tuoton nopeus aineessa, ρ on aineen tiheys, c aineen ominaislämpökapasiteetti ja $\frac{\partial T}{\partial t}$ lämpötilan osittaisderivaatta ajan suhteen. Jos lämmöntuottoa ei ole, termi $\frac{\dot{q}}{\lambda}$ jää yhtälöstä pois. Tasapainotilassa myös yhtälön oikea puoli supistuu pois. Toisin sanoen tasapainotilassa, jossa ei ole aineen sisäistä lämmöntuottoa, yhtälö saa muodon:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \quad (24)$$

Integroimalla tämä differentiaaliyhtälö kahdesti, lämpötilan yleiseksi ratkaisuksi paikan funktiona saadaan:

$$T(x) = C_1 x + C_2, \quad (25)$$

jossa C_1 ja C_2 ovat mielivaltaisia vakioita. Yhtälön (25) huomataan olevan yleinen suoran yhtälö, eli lämpötilan käyttäytyminen on tällaisessa tasapainoisessa tapauksessa lineaarista, samoin kuten kuvassa 5 on havainnollistettu. [26]

4.2.2 Konvektiivinen lämmönsiirto

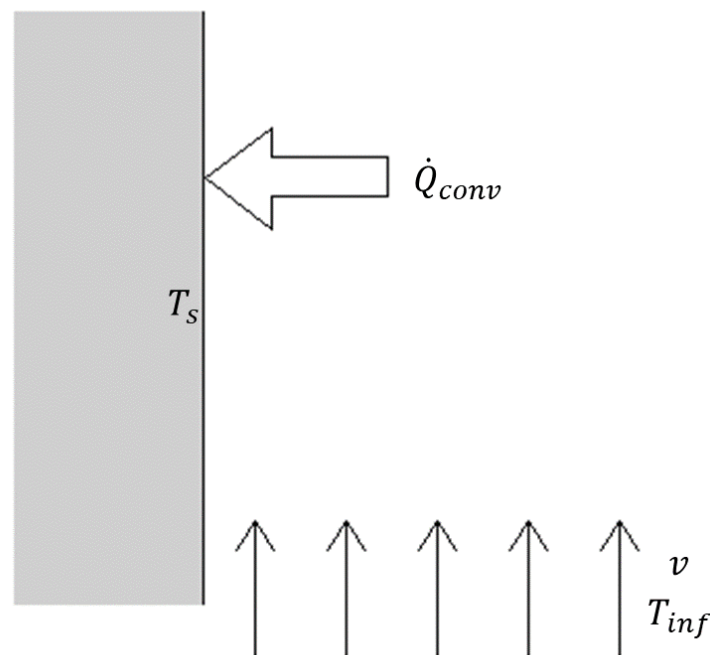
Kuten lämmön johtuminen, myös konvektio vaatii väliaineen toimiakseen. Erona on, että konvektiossa väliaineen tulee olla liikkeessä, eli väliaine on yleensä käytännössä neste-mäinen aine tai kaasu. Väliaine voi kuitenkin olla myös kiinteää, jos se käyttäytyy virtausaineen kaltaisesti, kuten esimerkiksi tässä työssä CFB-kattilan petimateriaali. Konvektio voidaan luokitella kahteen eri tyyppiin. Luonnollisessa konvektiossa väliaineen virtaus aiheutuu painovoiman, tiheys- ja/tai lämpötilaerojen vaikutuksesta. Pakotetussa konvektiossa virtaus aiheutetaan mekaanisesti avustettuna, esimerkiksi tuulettimella. Toinen luokittelu ulkoiseen ja sisäiseen konvektioon voidaan tehdä sen perusteella, tapahtuuko virtaus jollain avoimella pinnalla vai kanavassa. Tutkittavan kattilan tapauksessa virtausta aiheutetaan useilla puhaltimilla ja virtaus tapahtuu kattilan sisällä, joten kyseessä on pakotettu sisäinen konvektio. Pakotettua konvektiota esiintyy paljon myös jokaisen ihmisen päivittäisessä elämässä, moni esimerkiksi puhalttaa kuumaan ruokaan nopeuttaakseen sen jäähtymistä. [26]

Tarkan konvektiivisen lämmönsiirron määrittäminen on hankalaa, sillä se riippuu monista asioista, kuten väliaineen dynaamisesta viskositeetista, lämmön johtuvuudesta, tiheydestä ja ominaislämmöstä. Lisäksi vaikuttavia asioita ovat geometria, kiinteällä pinnalla pinnan karheus ja se onko virtaus luonteeltaan laminaarista vai turbulენტista. Tutkimusten mukaan konvektiivinen lämmönsiirto on kuitenkin suoraan verrannollinen lämpötilaeroon ja se voidaan laskea Newtonin jäähtymislain mukaan kaavalla [26]:

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} A_s (T_s - T_{inf}), \quad (26)$$

jossa h_{conv} on konvektiivisen lämmönsiirron kerroin, A_s lämmönsiirron pinta-ala, T_s pinnan lämpötila ja T_{inf} väliaineen lämpötila tarpeeksi kaukana pinnasta. Kertoimella h_{conv} huomioidaan siis käytännössä kaikki lämmönsiirtoon vaikuttavat muuttujat. Tutkittavan kattilan tapauksessa tätä kerrointa täytyy muuttaa tilanteen mukaan, koska esimerkiksi virtausnopeuksien ja petimateriaalin tiheysprofiilin muutokset vaikuttavat osaltaan huomattavasti konvektiiviseen lämmönsiirtoon. [26]

Konvektiivisen lämmönsiirron periaatetta on havainnollistettu **kuvassa 6**. Kuvan tilanteen voidaan ajatella myös kuvaavan tutkittavan kattilan tilannetta, kun savukaasu ja/tai petimateriaali virtaa alhaalta nopeudella v ja lämpötilassa T_{inf} . Muurauksen tai kattilan seinän pinta on lämpötilassa T_s , joka on tässä tapauksessa matalampi kuin T_{inf} . Tällöin lämpötehon \dot{Q}_{conv} suunta on seinää kohti. Mikäli virtauksen vaikutus seinään on viilentävä (ts. $T_{inf} < T_s$), lämpötehon suunta on tietenkin päinvastainen.



Kuva 6. Konvektiivinen lämmönsiirto.

4.2.3 Säteilylämmönsiirto

Säteilylämmönsiirtoa tapahtuu käytännössä kaikista kappaleista ja aineista. Kappale levittää sisäistä energiaansa sähkömagneettisen säteilyn muodossa ympäristöönsä ja myös vastaanottaa muiden kappaleiden lähettämää säteilyä. Suoran säteilyenergiavir-

tauksen mukana kuumasta kappaleesta kylmempään on aina olemassa myös paluuvirtaus kylmemmästä kappaleesta kuumempaan. Sähkömagneettiset aallot liikkuvat tyhjiössä valon nopeudella. Kappaleiden absorboidessa sähkömagneettisia aaltoja, ne muuttuvat jälleen molekyylien lämpöliike-energiaksi. Tasapainotilassa kappale absorboi yhtä paljon säteilyenergiaa, kuin säteilee itse eteenpäin. Toisin kuin johtuminen tai konvektio, säteilylämmönsiirto ei edellytä väliainetta. [40][45]

Kappaleeseen kohdistuva säteilyenergia voi heijastua, absorboitua tai läpäistä kappaleen. Näiden kolmen ominaisuuden perusteella saadaan muodostettua kappaleelle säteilyn energiatasapainoyhtälö. Kun tasapainoyhtälön kertoimien summa skaalataan yhdeksi, voidaan nähdä absorptio, heijastumisen ja läpäisyn kertoimet. Täysin mustalle kappaleelle absorptiokerroin on 1, täysin valkoiselle kappaleelle heijastuvuus on 1 ja täysin läpinäkyvälle kappaleelle läpäisykerroin on 1. [45]

Säteilylämmönsiirtoon vaikuttavia asioita on monia, kuten pinnan emissiivisyys eli säteilykyky, absorptiokyky, heijastuvuus, säteilykulma, säteilyn intensiivisyys, aallonpituus, taajuus ja niin edelleen. Myös muita säteilyn kannalta vaikuttavia asioita on paljon, esimerkiksi pinnan värillä on iso vaikutus kappaleen absorptiokykyyn. Esimerkkinä säteilylämmönsiirrosta on aurinko, joka lämmittää maapalloa. Auringon ja maapallon välissä on suuri tyhjiö eli avaruus, jonka läpi lämpö ei siirry johtumalla tai konvektiolla, joten sen täytyy siirtyä säteilemällä. [26]

Ideaalinen musta kappale määritellään täydelliseksi säteilijäksi ja absorboijaksi. Se absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn, kulmasta tai aallonpituudesta riippumatta. Lisäksi se emittoi säteilyenergiaa tasaisesti joka suuntaan. Tällaisen kappaleen lähettämä säteilyteho voidaan laskea kaavalla [26]:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4, \quad (27)$$

jossa σ on Stefan-Boltzmannin vakio, A_s emittoivan pinnan ala ja T_s pinnan absoluuttinen lämpötila Kelvineissä. Yhtälö tunnetaan nimellä Stefan-Boltzmannin-laki, jolla saadaan laskettua kappaleiden välinen teoreettinen maksimaalinen energian siirto säteilemällä [45]. Tällaisia ideaalisia kappaleita ei kuitenkaan käytännössä esiinny. Tämä otetaan kertoimen avulla huomioon, jolloin yhtälö tulee muotoon [26]:

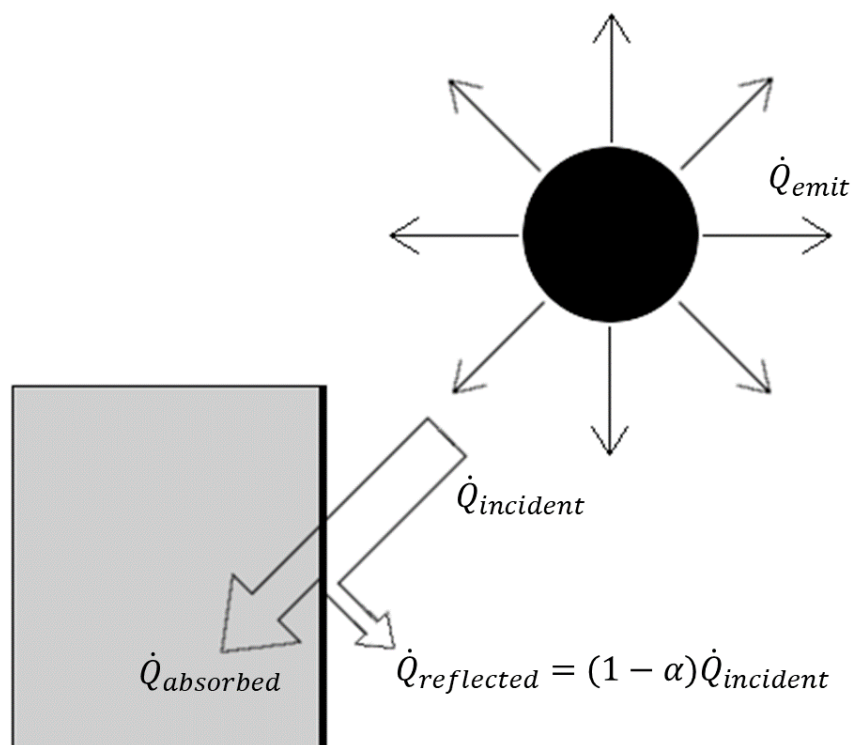
$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4, \quad (28)$$

jossa ε on kappaleen pinnan emissiivisyys, joka voi saada arvoja väliltä 0...1. Kappaleen absorboivuus ei myöskään käytännössä toteudu täydellisesti, jolloin absorboituneen lämpösäteilyn määrä kohdekappaleeseen on [26]:

$$\dot{Q}_{absorbed} = \alpha \dot{Q}_{incident}, \quad (29)$$

jossa α on kappaleen pinnan absorboivuus, joka voi saada arvoja väliltä $0 \dots 1$. $\dot{Q}_{incident}$ on kohdepintaan vaikuttava kokonaissäteilyn määrä.

Kuvassa 7 on havainnollistettu säteilylämmönsiirtoa. Pallomainen kappale säteilee lämpöä ympäristöönsä (\dot{Q}_{emit}), josta osa kohdistuu kulmikkaaseen kappaleeseen ($\dot{Q}_{incident}$), joka absorboi osan säteilystä ($\dot{Q}_{absorbed}$) ja heijastaa osan pois ($\dot{Q}_{reflected}$). Kappaleen läpäisevää säteilyä ei kuvan tapauksessa oleteta olevan. Pallomaisen kappaleen lämpötilan oletetaan olevan suuri verrattuna kulmikkaan kappaleen lämpötilaan, jolloin pääosa kappaleiden välisestä säteilylämmönsiirrosta suuntautuu kulmikasta kappaletta kohden. Periaatteessa myös kulmikas kappale säteilee lämpöä ja pallomainen kappale absorboi säteilevää lämpöä.



Kuva 7. Säteilylämmönsiirto.

4.3 Petin hydrodynamiiikka

Petimateriaalin kolme päätehtävää ovat lämmönvarastointi, kattilan sisäisten lämpötilaerojen tasoittaminen ja rikin sorbenttina toimiminen. Petimateriaalina käytetään useimmiten edellisen ajon jälkeistä materiaalia, eli kalkin, piihiekan/kvartsihiekan ja tuhkan sekoitusta. Petimateriaalin toimintaa pidetään usein itsestään selvyytenä, mutta se voi vaikuttaa suuresti kattilan operointiin ja olla myös iso syy suorituskyvyn huononemisessa tai jopa kattilaviassa. Oikean partikkelikokojakauman ja petimateriaalin määrän ylläpito on tärkeää. [17]

CFB-yksiköt voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan geometrian ja tulipesän alaosan viistouden perusteella: korkeat ja kapeat yksiköt, joita käytetään usein laboratorioissa testikattiloina sekä suuret yksiköt, joita teollisuuden kattilat yleensä ovat. Näiden kahden virtauskäyttäytymiset eroavat merkittävästi toisistaan. [33] Dynaamista mallia rakennettaessa, CFB-järjestelmän hydrodynamiikkaa on syytä tutkia mallinnuksen alkuvaiheessa, sillä monimutkainen virtausprosessi on perustana kemialliselle palamiselle ja lämmönsiirtoprosesseille [21]. Kiintoainepartikkelien konsentraatioprofiili tulipesän korkeussuunnassa on tärkeä asia CFB-kattilan suunnittelun ja operoinnin kannalta. Konsentraatioprofiili määräytyy pääasiassa partikkelien kokojakauman, leijutusilman nopeuden ja petimateriaalin määrän perusteella. [39]

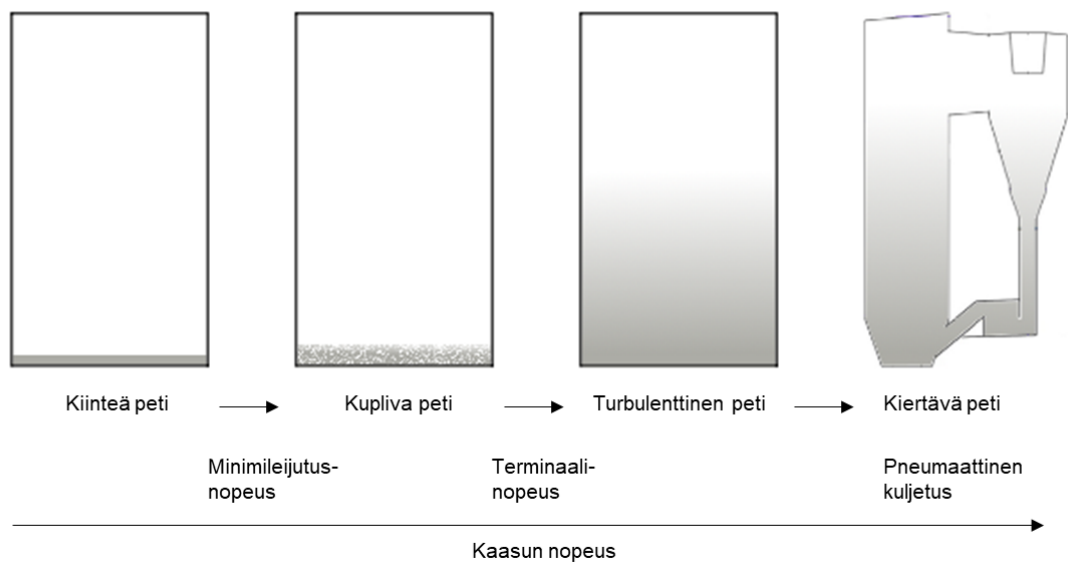
Kirjallisuudessa on tutkittu muun muassa kuorman muutoksen vaikutuksia tulipesän hydrodynamiisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksissa on todettu, että kiintoainemassa keskittyy enemmän tulipesän pohjalle, kun kuormaa vähennetään ja kaasun nopeus laskee. Kaasun nopeus on karkeasti suoraan verrannollinen kuormitukseen. [37] Kaasun nopeus kattilassa on normaalisti maksimissaan 5,5 m/s eroosiolta suojautumisen vuoksi [46].

Petimateriaali kiertää normaalissa käytössä tulipesä-sykloni-hiekkalukko-tulipesä jne. kiertoa, mutta käynnistystilanteessa sen käyttäytyminen muuttuu ajan ja tilanteen myötä. Aluksi peti on levossa tulipesän pohjalla. Ennen kuin käynnistyspolttimet kytketään päälle, aletaan tulipesän alaosaan tuoda sisään primääri-ilmaa, joka kattaa normaalissa käytössä noin puolet koko kattilan ilmamäärästä. Sen lisäksi, että primääri-ilmalla tuodaan oma osuutensa poltossa tarvittavan hapen määrästä, se alkaa myös virtausnopeuden kasvaessa liikuttaa petimateriaalia. Tätä suurelta osin primääri-ilman virtauksen aiheuttamaa vaikutusta kuvataan leijutusnopeudella. [15][47]

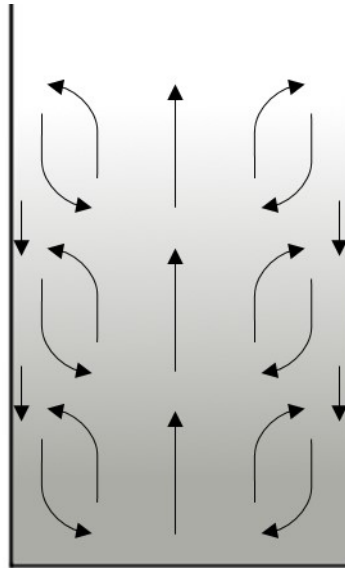
Virtausnopeuden kasvaessa yli ns. minimileijutusnopeuden, petimateriaali alkaa kuplia ja fluidisoitua ilmavirran voimasta, jolloin sen pinta nousee hieman ja materiaalimassan huokoisuus kasvaa. Fluidisoitumiseksi kutsutaan ilmiötä, jossa kiinteät partikkelit siirtyvät kaasun tai nesteen joukossa nestemäiseen tilaan. Kun leijutusnopeus ylittää yksittäisen materiaalihiukkasen terminaalinopeuden, hiukkanen lähtee nousemaan. Leijutusnopeuden edelleen kasvaessa, petimateriaali siirtyy kuplivasta tilasta turbulentiin tilaan, jolloin petin pintaa ei enää ole havaittavissa. Turbulentin tilan jälkeen petimateriaali siirtyy lopulta aiemmin mainittuun kiertävään tilaan. Tulipesään syntyy petin ulkoisen kierron lisäksi myös paljon sisäistä kiertoa yksittäisten hiukkasten liikkeessä välillä virtauksen mukana ylös ja välillä painovoiman vaikutuksesta alas. Alaspäin kulkeva sisäinen virtaus painottuu seinien läheisyyteen, kun taas ylöspäin työntävä virtaus on voimakkaampaa tulipesän keskiosassa. Petimateriaalin tiheys on sisäisen kierron vuoksi suurempaa seinien läheisyydessä kuin tulipesän keskellä. [15][47]

Tulipesä voidaan näin ollen jakaa poikittaissuunnassa kahteen alueeseen: ydinalue ja reuna-alue. Ydinalueella kiintoainekonsentraatio on matalampi kuin reunoilla ja kiinteillä partikkeleilla on keskimääräistä kaasun nopeutta suurempi nopeus. Ydinalueella tulipesän lämpötila on lähes tasainen. Reuna-alue on pienempi (paksuus normaalisti 0,1...0,2 m teollisissa kattiloissa) ja tiheämpi pystyseiniä eli lämmönsiirtopintojen läheisyydessä. Reuna-alueelle muodostuu petipartikkelien kasautuessa klustereita, jotka putoavat jonkin matkaa alaspäin eri nopeuksilla tulipesässä kaasun nopeuden ollessa tällä alueella pieni tai negatiivinen. Klustereiden alaspäin suuntautuva nopeus reuna-alueella suuressa CFB-kattilassa vaihtelee välillä 2...8 m/s. Niillä on erilaisia ominaisuuksia, kuten koko, muoto ja tiheys. [48][49]

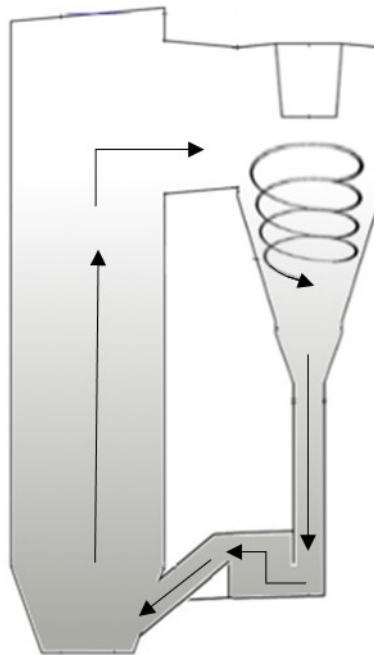
Kun kaasun nopeus ylittää merkittävän osan petimateriaalin terminaalinopeudesta, kiintoainetta nousee ulos tulipesästä. Leijutusnopeuden edelleen kasvattaminen (tai kierron kiintoaineiden vähentäminen) aiheuttaa pohjapetin katoamisen ja petin siirtymisen pneumaattisen kuljetuksen tilaan. Samoin kuin konsentraatioprofiili, myös kuljetuksen raja riippuu pääosin petimateriaalin partikkelikokojakaumasta, leijutusnopeudesta ja petimateriaalin määrästä. [33] Petin käyttäytymistä sekä sisäistä ja ulkoista kiertoa on havainnollistettu **kuvissa 8–10**.



Kuva 8. Petin käyttäytyminen kaasun eri virtausnopeusalueilla.



Kuva 9. Petimateriaalin sisäinen kierto tulipesässä.

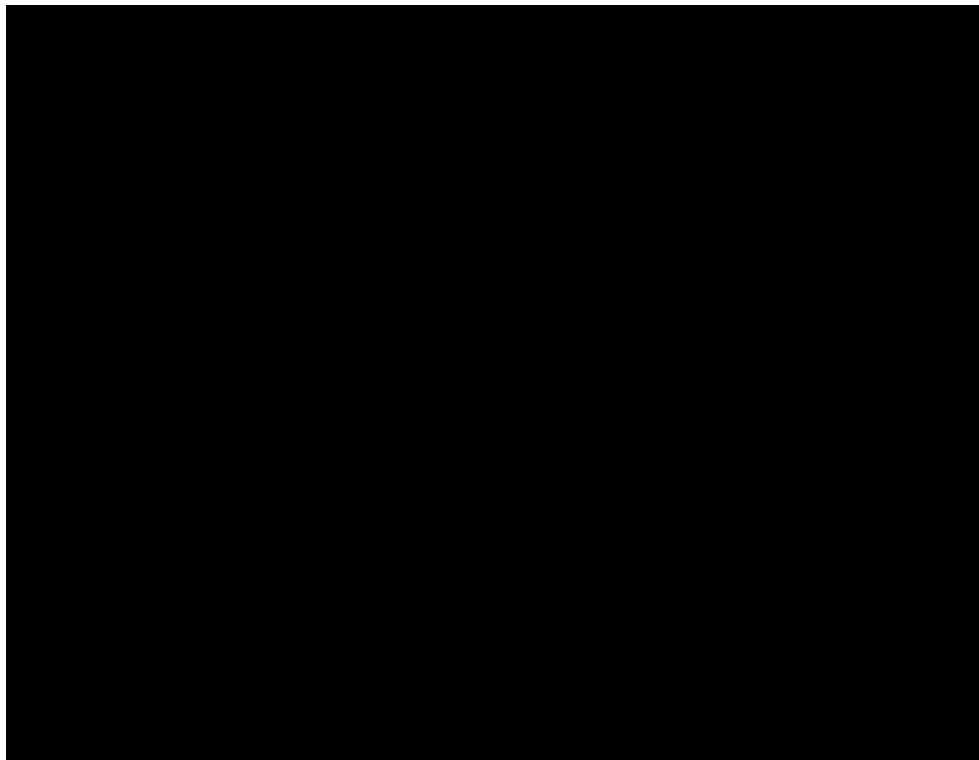


Kuva 10. Petimateriaalin ulkoinen kierto.

Petin käyttäytymistä mallinnettaessa hyödynnetään Filip Johnssonin ja Bo Lecknerin tutkimusta ja heidän kehittämäänsä kaavoja suspensiotiheyden määrittämiseen tulipesän eri korkeuksilla ja erilaisilla leijutusnopeuksilla [50]. Kaavoissa käytetään kokeellisia kertoimia, jotka tässä työssä on määritetty korkeammille leijutusnopeuksille soveltamalla ku-

vaaja mitattuihin datapisteisiin. Pienille leijutusnopeuksille mittausdataa petin käyttäytymisestä ei ole käytettävissä, joten pienemmän nopeuden toiminta-alueelle on tehty oma sovite, joka käyttäytyy halutulla alueella loogisesti.

Hiekkapeti voidaan käyttäytymisensä perusteella jakaa tulipesässä pystysuunnassa kolmeen alueeseen: pohjapetiin, roiskealueeseen (engl. splash zone) ja kuljetusalueeseen (engl. transport zone). Pohjapetin alueella petimateriaalin tiheys/massakonsentraatio säilyy suurin piirtein vakiona sen koko korkeudella. Roiskealueella peti kuplii ja räiskyy, ja sen massakonsentraatio tulipesässä laskee nopeasti korkeammalle siirryttäessä. Se toimii myös pohjapetin ja kuljetusalueen liityntäkohtana. Kuljetusalueella petimateriaalihiukkaset liikkuvat virtauksen mukana ja petimateriaalin massakonsentraatio laskee korkeammalle mentäessä, tosin selvästi hitaammin kuin roiskealueella. Petimateriaalin massakonsentraation ja tulipesän korkeuden suhdetta on havainnollistettu **kuvassa 11** (kun kattila on kiertävässä moodissa). Myös kolme käyttäytymisaluetta ovat kuvassa eroteltuna. Kuvassa merkityt korkeudet h_x , h_y ja h_{exit} tarkoittavat järjestyksessä pohjapetin korkeutta, tiheän alueen (pohjapeti ja roiskealue) korkeutta ja poistumiskanavan keskikohdan korkeutta. [50]



Kuva 11. Periaatteellinen kuvaaja petimateriaalin käyttäytymisestä tulipesässä.

Petimateriaalin massakonsentraation/suspensiotiheyden suuruus ρ_{inert} korkeudella h voidaan määrittää seuraavasti [50]:

Jos $h < h_x$

$$\rho_{inert} = \rho_x \quad (30.1)$$

tai jos $h_x < h < h_{exit}$

$$\rho_{inert} = (\rho_x - \rho_{exit} e^{K(h_{exit}-h_x)}) e^{-a(h-h_x)} + \rho_{exit} e^{K(h_{exit}-h)}. \quad (30.2)$$

Kaavoissa ρ_x ja ρ_{exit} ovat petin suspensiotiheydet pohjapetin korkeudella ja poistumkanavan korkeudella, K ja a ovat ns. hajoamisvakioita (engl. decay constant). K :n ja a :n valinnalla voidaan vaikuttaa tiheysjakauman muotoon. Roiskealueella dominoivana ilmiönä on materiaalin kasautuminen (engl. cluster phase), missä kuvaajan muotoon voidaan vaikuttaa vakiolla a . Kuljetusalueella puolestaan dominoivana ilmiönä on materiaalin hajautuminen (engl. disperse phase), jolloin tämän alueen kuvaajan muotoon voidaan vaikuttaa vakiolla K . Petimateriaalin tyypillinen suspensiotiheys pohjapetin alueella on 800...1200 kg/m³. [50]

Kirjallisuuden malleissa suspensiotiheysjakaumia on laskettu myös empiirisillä korrelaatiokaavoilla, jotka riippuvat paine-erosta tulipesän sisällä [48]. Kuljetusalueella on harva kiintoaineen konsentraatio aina poistumisalueelle asti. Kiintoaineen konsentraation lisäksi myös partikkelikoko pienenee alueen korkeuden mukana, jolloin tulipesän yläosan keskimääräinen partikkelikoko voi olla merkittävästi erisuuruinen kuin pohjapetissä. [33] Petimateriaalin kokojakauma ja määrä ovat tärkeitä suureita käynnistysnopeuden, energian kulutuksen, käynnistyksen automaattisen hallinnan ja suspensiotiheysjakauman kannalta CFB-kattilassa. [39] Petimateriaalin kokojakauma vaikuttaa esimerkiksi kaasun nopeuteen, lämmönsiirtoon ja hydrodynamiikkaan. [17]

Kiertävien partikkelien laajan kokojakauman vuoksi partikkelieroosion ja hankautumisen vaikutus on syytä ottaa huomioon. Hankautumisilmiöt ovat oleellisia kiinteän polttoaineen määrää ja keskimääräistä partikkelikokoa arvioitaessa. Mallinnuksessa partikkelikoot voi olla kannattavaa jakaa osiin halkaisijan mukaan, ja massan säilyminen täytyy tällöin huomioida kaikille partikkeliko'oilte kaikissa kierron osissa. Massatasapainossa huomioitavia asioita tulipesässä eri partikkelikokojen osalta ovat syötettävän materiaalin virtaus, uudelleenkiertävä materiaali, sykloniin huuhtoutunut materiaali, pohjatuhkan poisto ja sisäinen massan häviäminen kulumisen vuoksi. Syklonin massatasapainoon vaikuttavat tulipesästä huuhtoutuneet partikkelit, lentotuhka ja alasmenokanavaan kerntyneet partikkelit. Hiekkalukossa huomioitavaa on kierrätyksen nopeus eri partikkeliko'oilte ja koko kierrätyksen nopeus. Kierron paineen tasapainoa mallinnettaessa täytyy huomioida eri osissa tapahtuvat paineen pudotukset ja laskea paine-ero alasmenokanavan yli. [21][44]

Käynnistystilanteessa massatasapaino ja partikkelikokojakauma ovat tärkeässä roolissa ja vaikuttavat omalta osaltaan kuormituksen noston nopeuteen, käynnistysaikaan ja

käynnistyksen energian kulutukseen. Ne vaikuttavat näin myös ohjaukseen, jolloin syntyy tarve dynaamisille malleille massatasapainon ja partikkelikokojakauman määrittämiseen. CFB-kattilan petimateriaalin massatasapaino määräytyy syötettävän materiaalin sekä pakenevan lentotuhkan ja tyhjennettävän pohjatuhkan mukaan. [39]

Eräissä käytännön testeissä on määritetty petimateriaalin kokojakauman, määrän ja syklonin erotustehokkuuden vaikutuksia materiaalitasapainon kehittymiseen ja käyttäytymiseen käynnistystilanteessa. Testatussa tapauksessa pienten partikkelien määrä väheni alussa niiden todennäköisesti poistuessa lentotuhkan mukana. Karkeiden partikkelien osuus tiheällä alueella pieneni käynnistyksen alkupuolella nopeasti niiden poistuessa pohjatuhkan mukana, jonka jälkeen niiden osuus pysyi tasapainossa. [39]

Syklonille on annettu kaksi erotustehokkuutta kuvaavaa rajaa: d50-raja (engl. cut size) ja d99-raja (engl. critical size). Nämä rajat kuvaavat kiintoainepartikkelien halkaisijoita, joilla sykloni kaappaa 50 % (d50) ja 99 % (d99) partikkeleista. Suuruusluokaltaan d50-raja voi olla esimerkiksi noin 30 μm ja d99-raja puolestaan noin 100 μm . Pienemmän d50-ajan on havaittu hieman nopeuttavan dynaamisen tasapainon saavuttamista. Hienot partikkelit ovat tällöin myös säilyneet paremmin kierrossa. Pienempi d99-raja puolestaan tarkoitti hienompaa petimateriaalia kierrossa. Pienempi petimateriaalin määrä tarkoitti nopeampaa tasoittumisaikaa; tasapainotilan kokojakaumaan tällä ei havaittu olevan vaikutusta. Alkuperäisen kokojakauman vaikutuksena havaittiin, että mitä lähempänä lopullista jakaumaa oltiin, sitä nopeammin tasapainotila saavutettiin. Lopulliseen kokojakaumaan tällä ei ollut merkittävää vaikutusta. [39]

Syklonin tehokkuus ja kiinteän polttoaineen laatu vaikuttavat merkittävästi petimateriaalin dynaamiseen tasapainoon. Suurempi syklonin tehokkuus tarkoittaa hienompaa materiaalia kierrossa. Tällä on positiivisia vaikutuksia muun muassa lämmönsiirtoon, jolloin petimateriaalin määrää voidaan vähentää ja siten pienentää energian kulutusta. Myös kalkin teho paranee ja NO_x- ja CO-päästöt vähenevät. Suurempi palavan materiaalin määrä kiinteässä polttoaineessa tuhkaan verrattuna tarkoittaa lyhyempää käynnistysaikaa. Kiinteän polttoaineen laadun vaikutus näkyy petimateriaalissa, kun palamisessa muodostunut tuhka korvaa osan alkuperäisestä materiaalista ja tulee merkittäväksi osaksi petimateriaalia. Jos muodostuvan tuhkan koko ei vastaa kierrossa olevan tuhkan kokoa, uutta materiaalia tarvitaan järjestelmään, jotta materiaalitasapaino voidaan saavuttaa. [39]

Mitä lähempänä lähtötilanteen partikkelikokojakauma on lopullista jakaumaa, sitä lyhyempi on käynnistysaika. Myös vähäisempi petimateriaalin määrä tarkoittaa lyhyempää

käynnistysaikaa. Alkuperäinen petimateriaali ja sen kokojakauma vaikuttavat paljon petimateriaalin dynaamiseen muutokseen käynnistyksen aikana, kun jonkin ajan kuluttua suuri osa alkuperäisestä materiaalista poistuu kierrosta lentotuhkan tai pohjatuhkan mukana. Poistumisnopeus riippuu materiaalin määrästä ja kokojakaumasta. Nopeampi poistuminen tarkoittaa lyhyempää dynaamista asettumisaikaa petimateriaalin käyttäytymiselle. Syklonien selektiivisen erotuskyvyn ja pohjatuhkalaitteiston toiminnan kautta petimateriaalin kokojakaumasta tulee tasapainoinen. Tietty kokojakauma muodostuu annetulla leijutusnopeudella ja materiaalin syötöllä, ja kattila saavuttaa lopulta tasaisen kuormituksen. [39]

Liian suuret lämpötilagradientit voivat olla haitallisia myös petimateriaalille. Mahdollisia petimateriaalista aiheutuvia ongelmia kattilassa ovat kuonan muodostuminen kiinteille pinnoille tuhkan sulamisen tai pehmenemisen vuoksi, paakkuuntuminen ja kuonan jäähmettyminen petimateriaalin sulamisen vuoksi (engl. slagging, agglomeration, clinkering). [17]

Minimileijutusnopeudelle on kehitetty empiirisiä kaavoja, yksi tapa sen laskemiseksi on Reynoldsin luvun avulla [33]:

$$U_{mf} = \frac{Re_{p,mf}\mu_{gas}}{\rho_{gas}d_p}, \quad (31)$$

jossa $Re_{p,mf}$ on minimileijutuksen Reynoldsin luku, μ_{gas} on kaasun dynaaminen viskositeetti, ρ_{gas} on kaasun tiheys ja d_p on yksittäisen petipartikkelin halkaisija. Minimileijutuksen Reynoldsin luku voidaan määrittää esimerkiksi Wenin ja Yun korrelaatiolla [33]:

$$Re_{p,mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_3, \quad (32)$$

jossa C_1 , C_2 ja C_3 ovat empiirisiä kertoimia ja Ar on Arkhimedeen luku, joka voidaan ratkaista seuraavalla kaavalla [42]:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_{gas} (\rho_p - \rho_{gas}) g}{\mu_{gas}^2}, \quad (33)$$

jossa d_p on yksittäisen petipartikkelin halkaisija, ρ_{gas} on kaasun tiheys, ρ_p on petipartikkelin tiheys, g on maan vetovoiman kiihtyvyys ja μ_{gas} on kaasun dynaaminen viskositeetti.

Kiintoaineen massavirtauksen tiheys elementissä voidaan laskea kaavalla:

$$G = \rho_{inert}(U - U_t), \quad (34)$$

jossa ρ_{inert} on suspensiotiheys, U on kaasun nopeus ja U_t on hiukkasen terminaalinopeus. Mallissa on käynnistystilanteessa huomioitava, että hiukkasen terminaalinopeus

on alussa suurempi kuin leijutusnopeus, jolloin massavirran tiheys menisi negatiiviseksi ilman tarvittavia reunaehtoja.

Hiukkasen terminaalinopeuden laskemiselle on olemassa monia korrelaatioyhtälöitä. Yleinen terminaalinopeuden yhtälö on [42]:

$$U_t = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_p - \rho_{gas})}{3\rho_{gas}C_D}}, \quad (35)$$

jossa d_p on yksittäisen petipartikkelin halkaisija, ρ_p on partikkelin tiheys, ρ_{gas} on kaasun tiheys ja C_D on vastuskerroin, joka voidaan määrittää kokeellisesti tai esimerkiksi estimoida pallomaiselle kappaleelle Reynoldsin luvun avulla.

Jäännöshiilen hankautumisnopeus hienoainepartikkeleiksi voidaan laskea seuraavasti [44]:

$$\dot{m}_{att,f} = K_a(U - U_{mf})\frac{m_c}{d_c}, \quad (36)$$

jossa K_a on hankautumisnopeusvakio, U on kaasun nopeus, U_{mf} on minimileijutusnopeus, m_c on jäännöshiilen massa elementissä ja d_c on jäännöshiilipartikkelin halkaisija.

Mallissa esiintyviä leijutukseen ja virtaukseen liittyviä kaavoja on esitelty laajasti myös esimerkiksi Petri Köykin diplomityössä [42]. Muita mallissa esiintyviä petimateriaalin käyttäytymisen kaavoja puolestaan kuvataan tarkemmin **luvussa 5.2.4**.

4.4 Kiertoleijupetikattilan lämmönsiirron ominaispiirteitä

Membraaniseinien sisältämän veden lämmitys ja höyrystys on kattilan toiminnan kannalta erityisen kiinnostava ilmiö, minkä vuoksi suuressa osassa kirjallisuudessa esitetyistä tutkimuksista on keskitytty tulipesän ja membraaniseinien väliseen lämmönsiirtoon. Tämä asia ei kuitenkaan ole tämän työn pääpainopisteitä, koska vesi/höyrypuoli on poistettu mallista ja huomioidaan vain mallin sisääntulosignaalien muodossa. Tässä työssä tärkeää puolestaan on lämmön jakautuminen oikeassa suhteessa eri puolille kattilaa mallin simulointeja ja mitattua dataa verrattaessa.

Petimateriaalin käyttäytymisellä on suuri vaikutus CFB-kattilan lämmönsiirtoon. Lämmönsiirto on monimutkainen ilmiö leijutuksen luonteen vuoksi. Klustereita muodostuu ja hajoaa, ja petimateriaalin käyttäytyminen on erilaista tiheällä alueella ja dispersioalueella. Petipartikkelien hydrodynamiikka ja kaasusekoitus ohjaavat lämmönsiirron olosuhteita. Näin ollen petin hydrodynamiikasta, lämmönsiirtomekanismeista ja operointiparametrien vaikutuksesta lämmönsiirtoprosessiin tarvitaan tietämystä tulipesän lämmönsiirron suunnittelua, säätöä ja optimointia varten. [46][49]

Lämmönsiirron ominaispiirteiden havainnollistamiseen tarvitaan empiiristä tutkimusta kattiloiden eroavaisuuksien ja tietämyksessä olevien puutteiden vuoksi [48][49]. Kun lämmönsiirtoprosessi tunnetaan paremmin, tulipesän palamista voidaan parantaa ja saavuttaa matalammat päästöt sekä pienempi kulutus [45]. Lämmönsiirtoprosessin tunteminen on myös siinä mielessä tärkeää, että liian korkea petin lämpötila voi aiheuttaa ongelmia kattilan suorituskykyyn, luotettavuuteen ja materiaalien käyttöikään [17]. Teollisissa CFB-kattiloissa käytetään savukaasun kierrätystä tulipesän lämmönsiirtoprosessin ohjaukseen. Tällä voidaan vaikuttaa etenkin palamisen reaktiolämpötilaan ja petin lämpötilaan. Savukaasun kierrätys auttaa myös tasaisen lämpötilaprofiilin säilyttämisessä sekä pysty- että vaakasuunnassa. [48]

Tarkemmat virtaus- ja lämmönsiirtomallit ottavat huomioon klustereiden peitossa olevan seinän osuuden, klustereiden ja seinän välisen kaasuvälin paksuuden, klustereiden lämmönjohtavuuden, klustereiden kiinteän aineen osuuden ja klusterin viipymääjan tulipesässä [46]. Seinät ja muuraukset toimivat mallissa lämpövarastoina [28]. Lämmönsiirto metallipintoihin (membraaniseinät ja wing wall -lämmönsiirtimet) on avainparametri CFB-kattilan tulipesän lämpötilan säädössä [51]. Lämmönsiirtopinta-ala ja lämmön absorptio tulipesässä ovat suoraan verrannollisia keskenään. Absorption suuruus riippuu petin sekä savukaasun ja tulipesän seinien ja lämmönsiirtimien välisistä lämmönsiirtokertoimista ja lämpötilaeroista. [46]

Petimateriaalin ja seinien välille on kirjallisuudessa kehitetty jonkin verran empiirisiä lämmönsiirtokorrelaatioita. Lämmönsiirto riippuu vahvasti tulipesän sisäisestä hydrodynamiikasta ja petin poikkileikkauksen geometriasta. Petimateriaalin lämpötila ja suspensiotiheys korreloivat vahvasti lämmönsiirtokertoimen kanssa. Myös suspensiotiheys ja paineen pudotus tulipesässä korreloivat vahvasti keskenään. Näiden suureiden välisiä empiirisiä yhteyksiä voidaan soveltaa laskennassa. [46][48][49][51]

Lämmönsiirto CFB-tulipesässä ytimeistä membraaniseiniin voidaan erotella eri tapoihin, joiden summana saadaan kokonaislämmönsiirtoteho. Kirjallisuudessa esitetyt kolme tulipesän lämmönsiirtomuotoa ovat partikkelikonvektio, kaasukonvektio ja säteilylämmönsiirto, joka voidaan vielä jakaa säteilyyn klustereista ja säteilyyn dispersioalueelta. [46][48][49][51]

Partikkelikonvektiota tapahtuu tiheällä reuna-alueella petipartikkeleista ja klustereista seiniin. Partikkelikonvektion lämmönsiirtokertoimen suhteellinen suuruus kasvaa pienemmällä petipartikkeleilla, suuremmilla konsentraatioilla ja suhteellisen matalilla lämpötiloilla kiintoaineen suuren lämpökapasiteetin vuoksi. [48][49][51] Reuna-alue täydentyy

ytimen alueelta tulevilla korkean lämpötilan omaavilla petipartikkeleilla ja palavan polttoaineen partikkeleilla. Tapahtuvan sekoittumisen ansiosta lämmönsiirto tulipesän seiniin kasvaa. Paikalliset virtausdynamiikat vaikuttavat täten merkittävästi lämmönsiirtoon. [48][49][51] Lämmönsiirto kaasukonvektiolla membraaniseiniin on merkittävä tekijä kokonaislämmönsiirrossa suuren Arkhimedeen luvun ja/tai pienen suspensiotiheyden alueella. Kaasukonvektiota tapahtuu alueilla, joilla seinä ei ole petipartikkelien ja klustereiden peitossa. [48][49]

Säteilylämmönsiirtoa seiniin tapahtuu sekä klustereiden peittämällä, että peittämättömillä alueilla [49]. Klustereiden oletetaan jatkuvasti absorboivan ja lähettävän säteilyä sekä hajautuvan klusterivaiheessa, jolloin säteily klustereiden ja seinien välillä tulee ottaa kokonaislämmönsiirrossa huomioon. Lämmönsiirto voidaan arvioida olevan kahden yhden-suuntaisen äärettömän seinän välistä, joista toinen on tulipesän seinä ja toinen on partikkelisuspensio. [48][51] Dispersioalueen säteily on dominoiva lämmönsiirtomuoto membraaniseinän ja leijupetin välillä, kun tulipesän lämpötila on korkea ja suspensiotiheys pieni [48]. Kaasun mukana virtaavat partikkelit ja savukaasun sisältämät kolmiatomiset yhdisteet, kuten hiilidioksidi ja vesi, vaikuttavat kaasun säteilylämmönsiirto-ominaisuuksiin. Suurimmalla osalla nestemäisistä ja kiinteistä kappaleista lämpösäteilyn absorptio tapahtuu ohuella pinnallisella tasolla, eikä riipu kappaleen paksuudesta. Kaasulla toisaalta on säteilevyydessä myös tilavuusominaisuus, eli kaasun absorboivuus kasvaa kaasutason tiheyden ja paksuuden kasvaessa. [45]

Käytännön testeissä eräässä suuressa CFB-kattilassa suurin lämpötila on mitattu kiinteän petin yläpuolella ja pienin tulipesän yläosassa. Lämpötilaero on ollut noin 40 K. Käytännön testit on tehty kattilan ollessa tasapainotilassa. [48][49] Testeissä tutkittu lämmönsiirtoalue on ollut tulipesän muurauksen yläpuolinen membraaniseinien alue. Testeissä havaittiin, että tulipesän korkeussuuntaisen sijainnin kasvaessa, kokonaislämmönsiirtoteho pienenee samalla, kun suspensiotiheys ja klusterien osuus seinien läheisyydessä pienenee. Toinen lämmönsiirtotehon pienenemisen syy tulipesän yläosissa on lämpötilan lievä putoaminen. Suurin lämmönsiirtoteho tulipesässä saatiinkin alimmalla tutkitulla korkeudella, kun taas pienin teho suurimmalla mahdollisella korkeudella. Suurin teho oli yli kaksinkertainen pienimpään verrattuna. [48]

Stefan-Boltzmannin yhtälön (27) perusteella voidaan päätellä, että säteilylähteen lämpötilalla on suuri vaikutus lämmönsiirtotehoon. Kokonaislämmönsiirtoteho kasvaa petin lämpötilan kasvaessa, koska lämpösäteily on dominoiva lämmönsiirtomekanismi ytimen ja reuna-alueen välillä. [48] Petilämpötilan kasvaessa konvektiivisen komponentin suhteellinen vaikutus pienenee, kun kaasun lämmönjohtuminen ja lämpösäteily kasvavat.

[48][49] Tästä voidaan päätellä, että tulipesän lämpötilalla on suurempi vaikutus kokonaislämmönsiirtotehoon kuin suspensiotiheydellä. [48] Säteilylämmönsiirto on merkittävässä roolissa etenkin suurella tulipesän lämpötilalla ja pienellä suspensiotiheydellä. [46][49]

Blaszczuk & Nowak selvittivät tutkimuksessaan [49] petipartikkelikoon roolia lämmönsiirrossa membraaniseiniin. Lämmönsiirtokertoimien estimoinnissa hyödynnettiin kokeellista dataa ja yksinkertaisia korrelaatioita. Testeissä havaittiin, että petipartikkelikoolla ja suspensiotiheydellä on merkittävä vaikutus lämmönsiirto-olosuhteisiin. Suuremmat partikkelit tuottavat pienemmän kokonaislämmönsiirtokertoimen petin ja seinän välillä. Sopivan petipartikkelikoon avulla on mahdollista hallita suspensiotiheyden pystysuuntaista jakaumaa, joka puolestaan auttaa pitämään optimaalista käyttölämpötilaa yllä ja parantamaan kattilan suorituskykyä. [49]

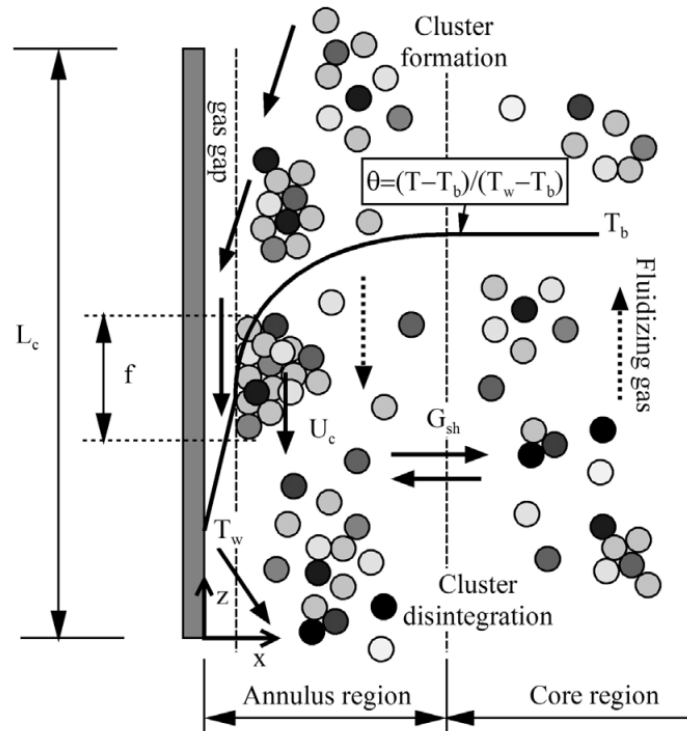
Suuri kuorma ja pieni petimateriaalin partikkelikoko tuottavat tasaisen lämpötilaprofiilin tulipesän korkeudella, kun taas pienempi kuorma ja suurempi partikkelikoko tuottavat suuremman suhteellisen lämpötilaeron. Pienellä kuormalla tulipesän alaosan lämpötila on korkea, mutta laskee melko jyrkästi ylöspäin mentäessä. Sekundääri-ilman ja primääri-ilman suhteella on havaittu olevan vaikutusta lämpötilaprofiilin muotoon. Petin lämpötila laskee liikuttaessa ytimeistä akselia pitkin membraaniseiniä kohti. Keskimääräinen lämpötilaero membraaniseinän ja petin välillä on käytännön testeissä vaihdellut välillä 410...495 K. [46][49]

Suspensiotiheyden muutoksia tutkittaessa havaittiin, että ytimen ja reuna-alueen välinen suurempi sivuttaissuuntainen partikkelien virtaus parantavaa lämmönsiirtoa petistä seinään. Lämmönsiirtoteho on vahvasti riippuva petipartikkelien liikkeestä seinien lähellä. Operointiolosuhteilla voidaan arvioida olevan suuri vaikutus aksiaaliseen suspensiotiheyden profiiliin. Kokeissa onkin havaittu, että kun kaasun nopeus kasvaa, lämmönsiirtoteho kasvaa myös. Näillä huomattiin olevan polynominen suhde. Suspensiotiheyden havaittiin olevan dominoivassa roolissa keskimääräisen lämmönsiirtokertoimen arvossa. Suhde keskimääräisen lämmönsiirtokertoimen ja leijutusnopeuden välillä on herkkä sekä petipartikkelikoolle että suspensiotiheydelle. Pienillä kaasun nopeuksilla muodostuu pieni suspensiotiheys aktiivisten lämmönsiirtopintojen alueelle, kun taas suurilla nopeuksilla reuna-alueille muodostuu suuri kiintoaineen konsentraatio. Hienolla petimateriaalilla ja suhteellisen pienillä suspensiotiheyksillä kaasun nopeuden vaikutus lämmönsiirtoon on havaittu olevan pienempi. [46][49]

Tulipesässä korkeammalle mentäessä, suspensiotiheys pienenee ja lämmönsiirtoteho sen mukana myös. Pienemmät petipartikkelit ja suuremmat suspensiotiheydet tarkoittavat suurempaa lämmönsiirtopinta-alaa, mikä puolestaan tarkoittaa suurempaa lämmönsiirtoa. Petin ja seinän välinen lämmönsiirto kasvaa klustereiden peittäessä suuremman osan seinästä. Partikkelikoon vaikutus näkyy erityisesti partikkelikonvektiossa. Pienillä suspensiotiheyksillä ja dispersioalueella säteily on dominoiva lämmönsiirtomuoto. Kokeellisen datan perusteella määritetyn lämmönsiirron on havaittu olevan suoraan verrannollinen suspensiotiheyteen ja petin lämpötilaan. [49]

Lämmönsiirtomekanismien vertailussa havaittiin, että pienemmällä partikkelikoolla ja alempana tulipesässä konvektiivinen lämmönsiirto ja etenkin partikkelikonvektio on dominoiva mekanismi. Partikkelikoon kasvaessa ja/tai tulipesässä ylemmäs mentäessä, säteilystä tulee dominoiva mekanismi. Partikkelikonvektion vaikutus laskee jyrkästi partikkelikoon kasvaessa. Suurella partikkelikoolla dispersioalueen lämpösäteily on merkittävin lämmönsiirtomekanismi myös alempana tulipesässä. [49]

Kaasuväli (engl. gas gap) on lähes partikkelivapaa alue, joka klustereiden ja seinän välissä huonontaa lämmönsiirtoa seinän lähellä. Lämmönjohtuvuus kaasuvälin yli on huomppi kuin petipartikkeleilla ja se määrittelee osaltaan kaasu-partikkelisuspension ja seinän välisen lämmönsiirron. Kaasuvälin aiheuttama heikennys klustereista tapahtuvaan lämmönsiirtoon on merkittävä. Konvektiivinen lämmönsiirto ja johtumislämmönsiirto ovat herkkiä sen paksuudelle. Pienemmällä suspensiotiheydellä ja suuremmalla partikkelikoolla kaasuvälin paksuus kasvaa. [45][46][49][51] Kaasuväliä sekä klustereiden muodostumista ja hajoamista seinien lähellä on havainnollistettu **kuvassa 12**.



Kuva 12. Klustereiden muodostuminen ja hajoaminen sekä kaasuväli [46].

Petipartikkelikoko vaikuttaa lämmönsiirtoprosessiin kolmella tavalla: kaasuvälin pakkaus, konvektio ohuen kaasuvälin ja klustereiden välillä sekä suspension lämmön absorboivuus. Petin ja seinän välinen lämmönsiirtokerroin pienenee tyypillisesti, kun petipartikkelikoko ja tulipesän korkeus kasvavat eli lämmönsiirtokerroin kasvaa yhdessä tulipesän paineen kanssa. [49]

Täydellä kuormalla suspensiotiheys on suurempi kuin pienemmillä kuormilla, etenkin keskivaiheilla tulipesän korkeutta [46]. Kuorman vaikutus lämpötilajakaumaan on merkittävä, koska kiintoainemassa tasoittaa lämpötilaeroja ja pienellä kuormalla partikkeleita nousee vähemmän, mikä tarkoittaa hitaampaa lämmönsiirtoa tulipesän yläosassa [37]. Lämmönsiirtoteho pienenee kaikilla kuormilla tulipesässä ylemmäs mentäessä. Teho kasvaa jyrkästi suspensiotiheyden mukana. Täydellä kuormalla konvektio on dominoiva lämmönsiirtomekanismi tulipesän alaosassa, säteily puolestaan yläosassa. Pienellä kuormalla säteily dominoi koko tutkittavalla alueella. Partikkelikonvektio on erityisen herkkä suspensiotiheydelle, kaasukonvektion osuus lämmönsiirtoon on silti normaalisti huomattavasti pienempi. Laskeutuvien klustereiden halkaisijat seinien lähellä ovat tärkeässä roolissa lämmönsiirrossa. [46]

Kokeelliset mittaukset osoittavat, että tulipesän pystysuuntainen lämpötilaprofiili muuttuu epälineaariseksi, mutta poistumisalueella lämpötila pysyy lähes vakiona. Sivuttaissuuntainen lämpötilaprofiili on tasainen ytimen alueella, mutta epätasainen reuna-alueella.

Kokeiden tulokset osoittavat myös, että säteilylämmönsiirto pienenee huomattavasti yli 5 kg/m^3 suspensiotiheyksillä, jolloin partikkelikonvektio on lämmönsiirron dominoiva tekijä. [46] Testeissä on havaittu, että kun suspensiotiheys kasvaa arvosta 1 kg/m^3 arvoon 30 kg/m^3 , kokonaislämmönsiirtoteho kasvaa suurin piirtein kaksinkertaiseksi. [51]

Ongelmana klustereiden säteilylämmönsiirron laskennassa on, miten valita kuvaava säteilylämpötila partikkelisuspensiolle. Ytimen lämpötila on yleensä noin $850 \text{ }^\circ\text{C}$, mutta partikkelien lämpötila seinän lähellä on noin $200 \text{ }^\circ\text{C}$ matalampi. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen lisäksi myös säteilylämmönsiirtokertoimen on havaittu olevan suspensiotiheyden funktio. Toisin kuin konvektiivisen kertoimen tapauksessa, säteilyn lämmönsiirtokerroin pienenee suspensiotiheyden kasvaessa. [51]

Laitoksen elinkaari määräytyy suurelta osin käynnistystilanteessa aiheutuvien lämpöjännitysten ja painerasitusten perusteella [4]. Materiaalivaurioiden riski kasvaa, kun kattilan kuorman nostonopeutta kasvatetaan [37]. Kattilan jännitysten seuranta voidaan tehdä pintalämpötilojen mittausten perusteella. Kovimman kuormituksen alaisiksi komponenteiksi kattiloissa mainitaan useissa lähteissä paksuseinäiset komponentit, kuten muuraukset tai lieriö. Myös höyryturbiinin roottoria pidetään jännityksille alttiina komponenttina. Näiden komponenttien maksimilämpöjännitykset ovat tällöin myös nopean käynnistytksen suurin rajoittava tekijä. [11][28][34][35][38] Kattilan käynnistytksen optimoinnissa halutaan siis minimoida lämpöjännitykset ja optimaalisen käynnistytysajan voidaan arvella riippuvan valmistajan sallimista materiaalien lämpötilojen nousunopeuksista [10][11][32][34][38]. Nykyistä korkeampia gradientteja tarvitaan sekä positiiviseen että negatiiviseen kuorman muutokseen. Kattiloiden toiminta-aluetta olisi myös hyödyllistä kasvattaa, jolloin minimikuorman pienentyessä ylös- ja alasajojen määrä vähenisi ja lämpögradieniteista rasittuvien komponenttien käyttöikä pitenis. [10]

Pohjapetiä voidaan johonkin pisteeseen asti hallita pohjatuhkan poistolla. Jos pohjatuhkan poistoa vähennetään, kun primääri-ilma ja polttoaineen syöttö pidetään vakiona, tiheän alueen korkeus petin alaosassa kasvaa. Tämä pienentää petilämpötilaa, tulipesän poistumisalueen lämpötilaa, päähöyryn painetta ja kasvattaa tulipesän paine-eroa. Kun tiheän alueen korkeus muuttuu, operaattorin täytyy säätää primääri-ilmaa petilämpötilan säilyttämiseksi. Petin paineen putoaminen saattaa viitata petimateriaalin häviämiseen. Tämä pienentää petimateriaalin kiertonopeutta, jolloin suspensiotiheys ja lämmönsiirto pienenevät ja petilämpötila nousee. [17]

5. MALLIRAKENNE

5.1 Valmetin dynaamisten kattilamallien kehitys

Dynaamisia prosessi- ja leijupetikattilamalleja on Suomessa tutkittu Oulussa ja Lappeenrannassa tehdyissä diplomitoissa jo 1980- ja 1990-luvuilla. Muun muassa Timo Jäntin Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa tekemä diplomityö *Kiertoleijukattilan dynaaminen simulointi* vuodelta 1996 käsittelee paljon nykyisessäkin mallissa käytössä olevia periaatteita. [52]

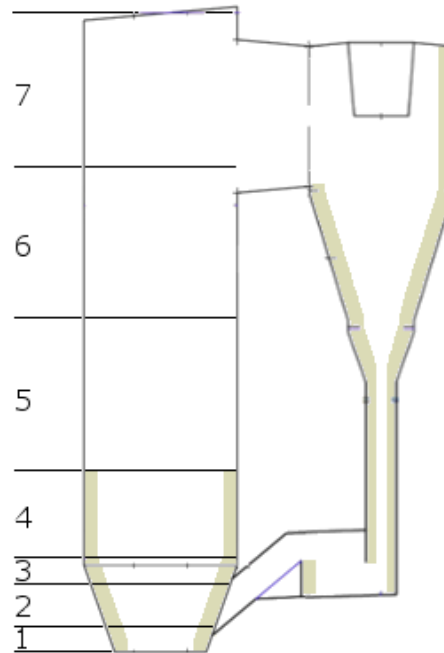
Valmet Technologies Oy:n ja Tampereen Yliopiston yhteistyö dynaamisten kattilamallien kehityksessä ulottuu yli kymmenen vuoden taakse. Tuomas Katajan diplomityö *Kerrosleijukattilan dynaaminen mallintaminen* oli ensimmäisiä yhteistyössä aihepiiristä valmistuneita opinnäytteitä vuonna 2007. Myöhemmin samana vuonna valmistui myös Petri Köykin kiertoleijupetikattiloihin keskittynyt diplomityö *Kiertoleijukattilan dynaaminen mallintaminen*, johon tässä työssä muokattavan mallin savukaasupuoli pääosin vieläkin perustuu. Mallin kehitystä on tästä eteenpäin jatkettu muun muassa säätöjen, pyrolyysin tutkimisen ja vesihöyrypuolen kanssa. Suurin osa kehitystyöstä on muutenkin viime vuosina keskittynyt juurikin vesihöyrypuoleen, kun taas tässä työssä keskitytään savukaasupuoleen. [23][42][53]

5.2 Mallin kuvaus, muutokset ja lisäykset aiempaan malliin

Muokattava malli on saatu Valmet Technologies Oy:ltä täyttä mallia kevyempänä versiona, jotta simulointi olisi kohtuullisen nopeaa. Alkuperäisestä täydestä mallista on poistettu vesihöyrypuoli ja savukaasukanava. Simulointiesimerkeissä puuttuvat osamallit on korvattu oikeasta prosessista koeajotilanteessa kerätyllä mittausdatalla. Myös säätöpiirit on korvattu mitatuilla todellisilla prosessin ohjauksilla, jolloin tutkimuksen kohteeksi jää puhtaasti prosessin toiminta. Muokattava malli simuloi siis tulipesän, syklonien ja hiekkalukkojen savukaasupuolen toimintaa, ja käyttää lähtötietoina esimerkikattilan käynnistystilanteista kerättyä dataa mm. polttoaineiden virtauksista, primääri- ja sekundääri-ilman määristä ja lämpötiloista sekä vesihöyryn lämpötilasta. Käynnistystilanne aiheuttaa mallinnukselle omat rajansa ja reunaehdonsa, joita alkuperäisessä mallissa ei aikaisemmin tarvinnut huomioida.

Muokattavan mallin tulipesä on jaettu pystysuunnassa seitsemään päälohkoon. Jokainen päälohko on lisäksi jaettu puolesta välistä kahtia, jolloin lohkoja/elementtejä on yh-

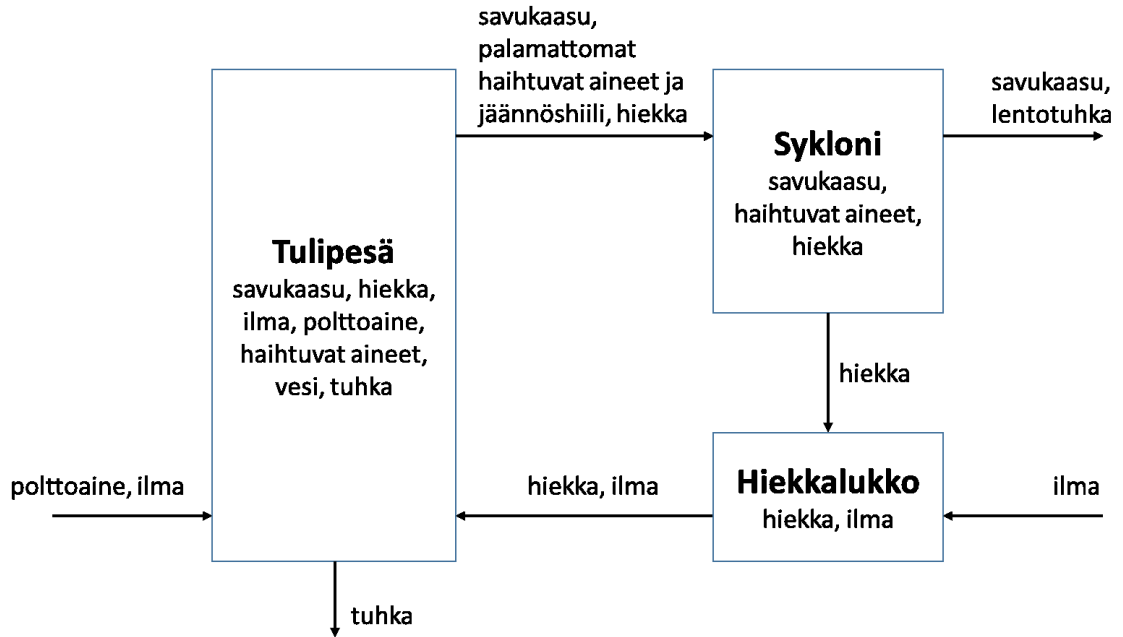
teensä 14 kappaletta. Lohkot ovat keskenään erisuuruisia, ja tulipesän alaosassa lohkojako on tiheämpi kuin yläosassa. Tulipesän päälohkot on esitetty **kuvassa 13**. Kattilan kaksi sykklonia käsitellään mallissa yhtenä yhdistettynä lohkona ja kaksi hiekkalukkoa erillisinä yksiosaisina lohkoina.



Kuva 13. Tulipesän jako lohkoihin.

Tulipesä jaetaan myös monien lähteiden malleissa pienempiin osiin eri osien virtauksien tai palamisen erilaisen luonteen vuoksi [11][33][44].

Massan ja energian käyttäytymiset järjestelmän sisällä ovat kiinnostavia asioita ja mallin laskentojen kannalta myös erittäin oleellisia. Sekä massataseen että energiataseen täytyy olla tasapainossa, jotta simuloidun järjestelmän toiminta pysyy järkevänä. Kuuman kierron massatase on esitetty lohkokaaaviona **kuvassa 14**.



Kuva 14. Kuumen kierron massataseen lohkomalli.

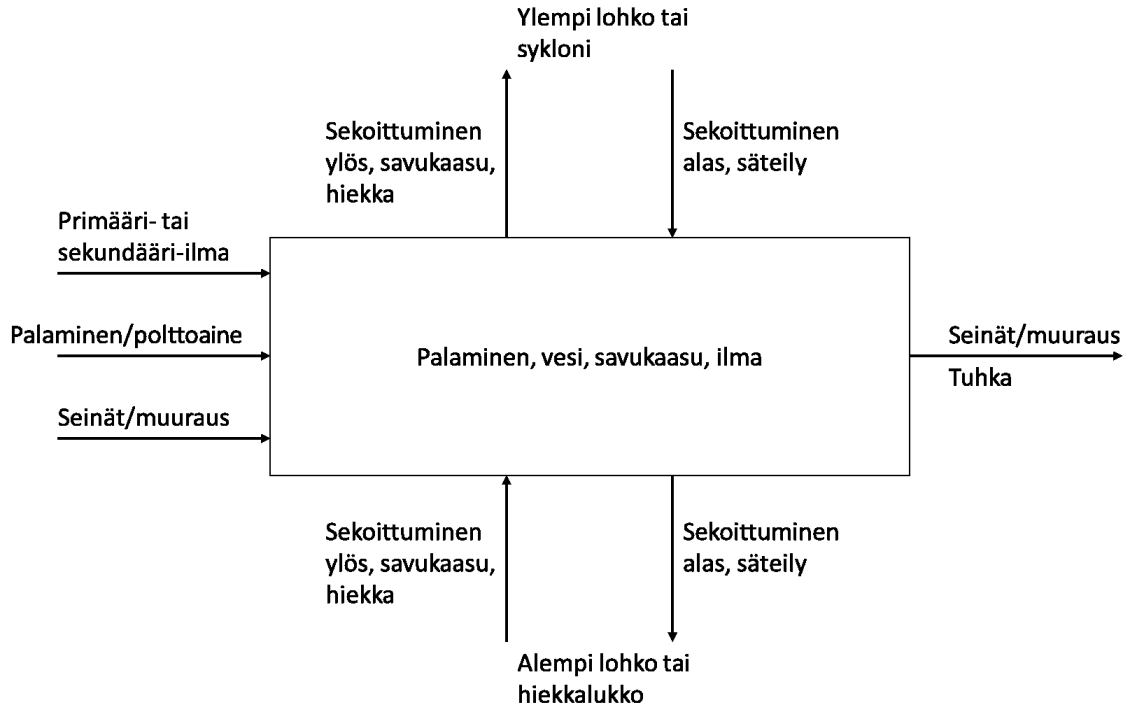
Massataseessa järjestelmään sisään syötetään polttoainetta ja ilmaa. Ulos puolestaan virtaa savukaasua ja tuhkaa. Mallissa oletetaan hiekkaa olevan kierrossa vakiomäärä sekä haihtuvien aineiden ja jäännöshiilen palavan viimeistään syklonissa. Tulipesään syötettävä ilma siirtyy heti palamisreaktioon ja savukaasutuotteisiin. Myös kaikki polttoaineen mukana tuleva kosteus ja palamisessa syntyvä vesi siirtyvät heti savukaasuun. Palamaton polttoaine erotellaan haihtuviin aineisiin ja jäännöshiileen. Tuhkan osuus määräytyy polttoaineen mukaan.

Pelkkää savukaasun massatasetta tarkasteltaessa tilanne yksinkertaistuu. Savukaasua tulee lohkon sisään ja lähtee siitä ulos. Primääri- tai sekundääri-ilmaa voi myös tulla sisään. Lisäksi lohkon sisällä tapahtuu reaktioita, joissa savukaasukomponentteja syntyy lisää. Tulipesälohkon tai syklonin dynaaminen massataseyhtälö yksittäiselle savukaasukomponentille j voidaan täten kirjoittaa muotoon [42]:

$$V_k \frac{d(y_{j,k} \rho_{gas,k})}{dt} = \dot{m}_{gas,k-1} y_{j,k-1} + \dot{m}_{air,k} y_{j,air} + r_j - \dot{m}_{gas,k} y_{j,k}, \quad (37)$$

jossa V_k on lohkon k tilavuus, $y_{j,k}$ on savukaasukomponentin j massaosuus elementissä k , $\rho_{gas,k}$ on savukaasun tiheys elementissä k , jolloin termi $\frac{d(y_{j,k} \rho_{gas,k})}{dt}$ kuvaa komponentin massakonsentraation muutosta elementissä. $\dot{m}_{gas,k}$ on savukaasun massavirta ulos elementistä k , $\dot{m}_{air,k}$ on ilman massavirta, $y_{j,air}$ on savukaasukomponentin j massaosuus ilmassa ja r_j on savukaasukomponentin j tuotto elementin reaktioissa.

Yksittäisen tulipesälohkon energiatase on esitetty **kuvassa 15**.



Kuva 15. Yksittäisen tulipesälohkon energiataseen lohkomalli.

Energiataseessa energiaa tulee järjestelmään sisään palamisesta ja polttoainemassan mukana, primääri- ja sekundääri-ilman mukana sekä seinien ja muurauksiin varastoituneesta lämmöstä. Energiaa myös lähtee järjestelmästä seinien ja muurauksien kautta sekä tuhkan poiston vuoksi. Syklonista eteenpäin jatkavan savukaasun mukana energiaa myös poistuu. Lohkon sisäisesti vaikuttavia asioita ovat vielä palamattoman polttoaineen palaminen, polttoaineen ja/tai savukaasun sisältämän veden tase, lämpiäminen ja höyrystyminen, savukaasun tase ja sisään tulevan ilman tase. Sekä alemman että ylemmän lohkon kanssa tapahtuu sekoittumista. Ylemmästä lohkosta saattaa lisäksi siirtyä lämpöä säteilemällä. Alemmasta lohkosta virtaa ylöspäin savukaasua ja petihiekan lämpötase huomioidaan alhaalta tulevan hiekan lämpötilan perusteella. Alimmassa tulipesän lohkossa petihiekasta siirtyvä energia lasketaan hiekkalukosta tulevan virtauksen ja lämpötilan perusteella. Monet edellä mainituista muuttujista, kuten primääri-ilman virtaus ja tuhkan poisto, vaikuttavat välittömästi vain yksittäisiin lohkoihin. Vaikutukset taasoittuvat mallissa kaasun ja hiekan virtauksen sekä sekoittumisen kautta.

Energiataseen avulla voidaan laskea elementin lämpötilan muutos ajan suhteen. Mallissa käytettävä energiataseyhtälö voidaan kirjoittaa yksittäiselle elementille muotoon

$$\begin{aligned} (m_{inert}c_{inert} + m_{gas}c_{gas}) \frac{dT}{dt} = M_{up} - M_{down} + \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{sand} \\ + \dot{Q}_{gas} - \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{emit} + \dot{Q}_{water} + \dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel} + \dot{Q}_{ash}, \end{aligned} \quad (38)$$

jossa m_{inert} ja c_{inert} ovat petimateriaalin massa ja ominaislämpökapasiteetti elementissä, m_{gas} ja c_{gas} ovat savukaasun massa ja ominaislämpökapasiteetti elementissä, $\frac{dT}{dt}$ on lämpötilan aikaderivaatta elementissä, M_{up} on sekoittuminen ylemmän elementin kanssa ja M_{down} on sekoittuminen alemman elementin kanssa. \dot{Q}_{air} , \dot{Q}_{sand} , \dot{Q}_{gas} , \dot{Q}_{conv} , \dot{Q}_{emit} , \dot{Q}_{water} , \dot{Q}_{comb} , \dot{Q}_{fuel} ja \dot{Q}_{ash} ovat järjestyksessään lämpötehot ilman lämpöta-
seesta, petimateriaalin lämpötaseesta, savukaasun lämpötaseesta, konvektiivisesta lämmönsiirrosta, säteilylämmönsiirrosta, veden lämpiämisen, höyrystymisen ja lämpöta-
seen summatuista tehoista, palamisesta, polttoaineen lämpövirtataseesta ja pohjatuh-
kan poistosta. Syklonin tapauksessa energiataseyhtälö puolestaan saa muodon

$$(m_{inert}c_{inert} + m_{gas}c_{gas})\frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{sand} + \dot{Q}_{gas} - \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fa}, \quad (39)$$

jossa tulipesän laskennassa olevien termien lisäksi esiintyvä \dot{Q}_{fa} on lentotuhkan pois-
tosta aiheutuva lämpöteho. Taseyhtälöiden (38) ja (39) oikean puolen termien laskentaa
tarkastellaan erikseen **luvuissa 5.2.2 ja 5.2.3**. On huomioitavaa, että taseyhtälöissä
esiintyvien yksittäisten tehojen etumerkit saattavat kääntyä, jos kyseisen tehon yhtälössä
esiintyvä lämpötilaero on negatiivinen.

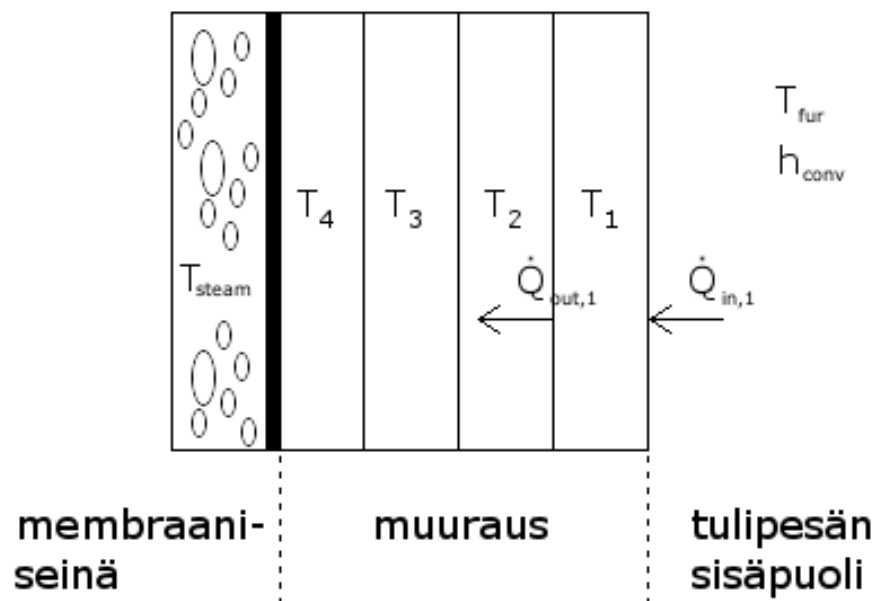
Käynnistystilannetta simuloitaessa, mallin alkutila täytyy saada ensin halutuksi, eli tämän
työn tapauksessa kylmäksi. Aiemmissa simulointitapauksissa on tutkittu tilanteita, joissa
kattila on jo alkutilanteessa valmiiksi kuuma ja ns. normaalissa käytössä. Alkuarvojen
asettaminen kylmäksi saadaan Simulinkissa aikaan asettamalla integraattoreiden, viive-
lohkojen ja muiden tarvittavien dynaamisten lohkojen alkuarvot (engl. initial condition)
halutuksi. Esimerkiksi kylmässä alkutilanteessa lämpötilat halutaan asettaa arvoon 20
°C, virtaukset nolliin ja kaasun koostumus kattilan sisällä ilmakehän koostumukseksi.
Tätä varten tehtiin oma Excel-taulukko, johon arvot voi asettaa, ja MATLAB-funktio, joka
lukee ja päivittää arvot taulukosta tarvittaville mallin lohkoille.

Tässä työssä tarvittavat alkuparametrit lasketaan ja tallennetaan MATLABin työtilaan,
jonka jälkeen niitä käytetään Simulinkissa, johon simuloitava malli on rakennettu. Si-
sääntulosignaalit voidaan luoda Simulinkin omilla työkaluilla tai tuoda malliin MATLABin
työtilasta esimerkiksi matriisimuodossa, kuten tässä työssä on lähes kaikkien signaalien
osalta tehty. Työn malli käyttää pääosin jatkuva-aikaisia, mutta myös jonkin verran
diskreettejä Simulink-lohkoja. Suurin osa mallin yhtälöistä on sijoitettu Simulinkin sulau-
tettuihin MATLAB-funktio-lohkoihin, joissa lasketaan sisään tulevien signaalien ja para-
metrien perusteella muun muassa dynaamisesti muuttuvien tilojen derivaatat. [27]

Mallin simuloinneissa käytetään ratkaisijaa ode23tb, joka on jäykälle systeemille soveltuva implisiittinen ratkaisija, joka toimii kahdessa osassa. Ensimmäisessä vaiheessa otetaan puolikas askel käyttämällä puolisuunnikkasääntöä (engl. trapezoidal rule, TR), jonka jälkeen askel viimeistellään käyttämällä toisen kertaluvun taaksepäin lasketun differenssin kaavaa (engl. backward differentiation formula, BDF). Menetelmä tunnetaan myös lyhenteellä TR-BDF2. Jäykällä tarkoitetaan sellaista systeemiä, joka sisältää sekä hitaasti että nopeasti muuttuvaa jatkuva-aikaista dynamiikkaa. Kiertoleijupetikattila täyttää näiltä osin jäykän systeemin tuntomerkit, sillä mallin aikavakiot vaihtelevat suuresti. [27]

5.2.1 Päivitetty muurausmalli

Muokattavaan malliin lisättiin ensimmäisenä päivitetty muurausmalli. Tässä muuraus jaetaan paksuussuunnassa neljään osaan, joille jokaiselle lasketaan erikseen lämpötilan käyttäytyminen tulipesän/syklonin/hiekkalukon membraaniseinien ja savukaasupuolen välillä. Membraaniseinän sisäpinnan lämpötilana käytetään mallissa datasta otettua veden, höyryn tai vesihöyryseoksen lämpötilaa eli seinän oletetaan olevan samassa lämpötilassa fluidin kanssa. Muurausmallit ovat olleet käytössä myös aiemmissa malleissa, mutta ne jouduttiin poistamaan tässä työssä muokattavasta mallista samalla, kun vesihöyrypuoli poistettiin mallia kevennettäessä. Työhön päivitetyn muurausmallin periaatetta on havainnollistettu **kuvassa 16**.



Kuva 16. Muurausmallin periaate.

Muurausmallille annetaan tässä työssä sisääntulona fluidin (vesi, höyry, vesihöyryseos) lämpötila, jonka oletetaan olevan sama kuin membraaniseinän lämpötila. Tulipesän (tai syklonin tai hiekkalukon) puolelta muuraukseen vaikuttaa lämpöteho, joka riippuu muurauksen ja tulipesän lämpötilaerosta sekä konvektiokertoimesta. Seuraavaan kerrokseen kohdistuva lämpöteho on edellisestä kerroksesta ulostuleva lämpöteho, ts. $\dot{Q}_{out,1} = \dot{Q}_{in,2}$. Lämpöteho yksittäisestä kerroksesta ulos lasketaan yhtälöstä (22) johdetulla kaavalla:

$$\dot{Q}_{out,i} = \frac{\lambda A(T_i - T_{i+1})}{d}, \quad (40)$$

jossa alaindeksi i on kyseessä olevan kerroksen numero ja d on kerroksen paksuus. Ensimmäiseen kerrokseen tulipesän puolelta sisään tuleva lämpöteho $\dot{Q}_{in,1}$ saadaan konvektiivisella lämmönsiirrolla (kaava (25)), jolloin vertailtavat lämpötilat ovat ensimmäisen muurauskerroksen keskimääräinen lämpötila ja tulipesälohkon lämpötila. Lämpötehoa $\dot{Q}_{out,4}$ laskettaessa arvona T_{i+1} käytetään fluidin lämpötilaa. Yksittäisen kerroksen lämpötilan muutoksen differentiaaliyhtälönä puolestaan käytetään:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}}{\rho_{ref} \cdot d \cdot h \cdot w \cdot c}, \quad (41)$$

jossa ρ_{ref} on muurauksen tiheys, h korkeus, w leveys ja c ominaislämpökapasiteetti. Tämä yhtälö on johdettu suljetun järjestelmän sisäisen energian muutoksen kaavasta [26]:

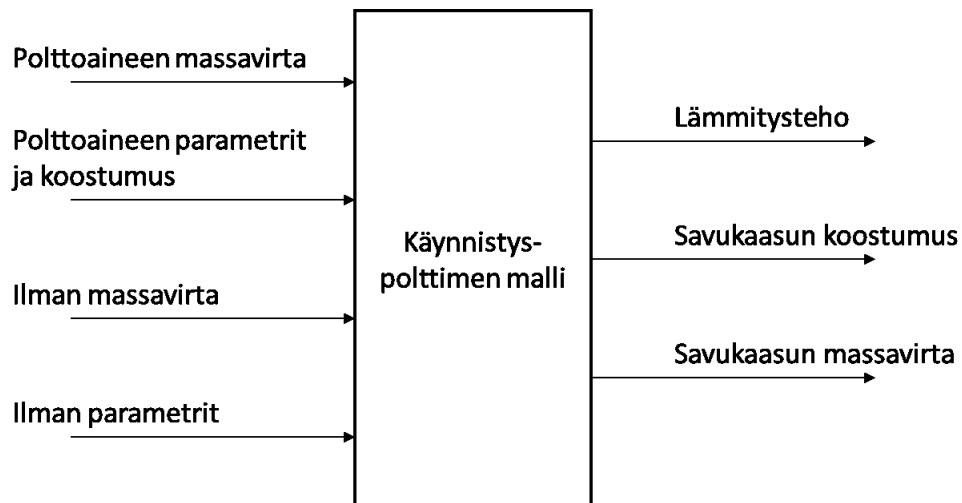
$$\Delta U = m c_v \Delta T, \quad (42)$$

jossa m on massa, c_v on aineen ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa ja ΔT on lämpötilan muutos.

Muurauksen jakamisella neljään kerrokseen saadaan tarkempaa tietoa lämpötilan käyttäytymisestä muurauksen sisällä. Mallin yksittäisen kerroksen tilat ovat keskiarvoja, mutta laskennan resoluutiota voidaan kasvattaa mallinnettavan muurausseinämän jakamisella useampaan kerrokseen. Muurauksen ominaisuudet, kuten ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus, muuttuvat lämpötilan mukana, joka voidaan myös huomioida paremmin seinämän jakamisella paksuussuunnassa lohkoihin. Muurauksen lämpötilagradientti on käynnistystilanteessa yksi tärkeimmistä ylösajon nopeutta rajoittavista tekijöistä, sillä muuraus on ensimmäinen komponentti, johon tulipesän lämpötilan muutokset vaikuttavat.

5.2.2 Käynnistyspolttimet ja palamisen laskenta

Käynnistyspolttimien ja niistä aiheutuvan lämmön jakautumisen mallintaminen kattilassa, sekä polttinmallien lisääminen kattilamalliin ovat työn keskeistä sisältöä. Käynnistyspolttimet mallinnettiin lisäämällä alkuperäiseen malliin polttoaineen syöttövirtaus haluttuun lohkoon ja antamalla laskentalohkolle polttoaineen parametrit. Alkuperäisessä mallissa oli valmiina palamisen laskenta kiinteälle polttoaineelle, jota voitiin hyödyntää. Sen ansiosta parametrien ja käynnistyspolttoaineen virtauksen tiedot voitiin käytännössä suurelta osin siirtää suoraan laskentakoodissa jo valmiina olemassa oleviin muuttujiin ja kaavoihin. Mallissa polttoainesuihkun oletetaan olevan kokonaan haihtuvaa ainetta ja palamisen olevan nopeaa. **Kuvassa 17** on esitetty käynnistyspolttimen periaatteellinen lohkomalli.



Kuva 17. Käynnistyspolttimen lohkomalli.

Uutena muutoksena malliin lisättiin säteilylämmönsiirto käynnistyspolttimien liekeistä savukaasuun, muuraukseen ja hiekkapetiin. Mallin toiminnan kannalta merkittävin säteilyn kohde on hiekkapeti, säteily muuraukseen voidaan huomioida konvektiokerroimen kautta ja polttimien lohkoista lämpöä siirtyy muihin kuin hiekkapetilohkoihin selvästi merkittävimmin sekoittumalla, käytännössä säteily muihin lohkoihin voidaan arvioida muihin lämmönsiirtomuotoihin verrattuna pieneksi ja kokonaisuuden kannalta merkityksettömäksi. Kun kiinteää polttoainetta aletaan syöttää sisään, voidaan säteilyn merkitys myös petiin olettaa pieneksi, vaikka käynnistyspolttimet olisivatkin vielä käynnissä.

Mallin kannalta uusi ja haastava tilanne on, kun useampia polttoaineita syötetään järjestelmään yhtä aikaa. Tällöin kiinteän polttoaineen palamatonta haihtuvaa ainetta ja jäännöshiiltä virtaa myös käynnistyspolttimien alueelle. Tässä työssä tilanne ratkaistiin siten, että polttoaineiden parametrit yhdistettiin painotetusti. Tämä ratkaisu tarkoittaa joltain

osin epätarkkoja tuloksia yhtäaikaisen syötön aikaan tulipesän alaosassa, koska käynnistyspolttoaineen ja kiinteän polttoaineen syöttö tapahtuvat omissa lohkoissaan eri korkeudella. On myös huomioitava eri polttoaineiden erilaiset kosteuspitoisuudet, jotka hie-man monimutkaistavat tilannetta. Yhdistetyistä parametreista poikkeuksena käynnistys-polttoaineen lämpöarvoa ei yhdistetty kiinteiden polttoaineiden lämpöarvojen kanssa, ku-ten ei myöskään reaktionopeuden kerrointa. Kiinteät polttoaineet jaettiin lisäksi kahteen eri lohkoon, jaon suhdetta näiden lohkojen välillä muokattiin polttoaineiden suhteen pe-rusteella.

Mikäli polttoaineen lämpöarvo on tiedossa, palamisessa vapautuva lämpöenergia \dot{Q}_{comb} saadaan laskettua kaavalla:

$$\dot{Q}_{comb} = q_{i,vol} \cdot \dot{m}_{vol} + q_{i,c} \cdot \dot{m}_c, \quad (43)$$

jossa $q_{i,vol}$ on haihtuvien aineiden alempi lämpöarvo, \dot{m}_{vol} on haihtuvien aineiden vir-taus, $q_{i,c}$ on jäännöshiilen alempi lämpöarvo ja \dot{m}_c jäännöshiilen virtaus. Vapautuva läm-pöenergia on siis laskettu kuivan polttoaineen tehollisen eli alemman lämpöarvon mu-kaan, joka kuvaa käytännön tilannetta parhaiten.

Haihtuvien aineiden massatase elementissä voidaan laskea yhtälöllä:

$$\frac{dm_{vol}}{dt} = \dot{m}_{vol,fuel} - k_d m_{vol}, \quad (44)$$

jossa $\dot{m}_{vol,fuel}$ on polttoaineen mukana tuleva haihtuvien aineiden virtaus, k_d on pyro-lyysinopeuskerroin ja m_{vol} on vapautumattomien haihtuvien aineiden massa elemen-tissä. Karkean jäännöshiilen massataseeksi puolestaan saadaan:

$$\frac{dm_c}{dt} = \dot{m}_{c,fuel} + \dot{m}_{c,prev} - r_c - \dot{m}_c - \dot{m}_{att,f}, \quad (45)$$

jossa $\dot{m}_{c,fuel}$ on polttoaineen mukana tuleva hiilen virtaus, $\dot{m}_{c,prev}$ on jäännöshiilen vir-taus edellisestä lohkosta, r_c on reagoivan jäännöshiilen määrä elementissä, \dot{m}_c on jään-nöshiilen virtaus seuraavaan elementtiin ja $\dot{m}_{att,f}$ on jauhautuneen jäännöshiilen määrä hienojakoisiksi partikkeleiksi. Hienojakoisten partikkelien massatase voidaan määrittää yhtälöllä:

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_{f,prev} - r_f - \dot{m}_f + \dot{m}_{att,f}, \quad (46)$$

jossa $\dot{m}_{f,prev}$ on hienoaineen virtaus edellisestä lohkosta, r_f on reagoivan hienoaineen määrä elementissä, \dot{m}_f on hienoaineen virtaus seuraavaan elementtiin ja $\dot{m}_{att,f}$ on jau-hautuneen jäännöshiilen määrä hienojakoisiksi partikkeleiksi. Hankautuneen hiilen hie-noaineiden palaminen vaikuttaa merkittävästi hiilen kokonaiskonversionopeuteen [44].

5.2.3 Lämmönsiirron laskenta

Sekoittuminen on merkittävässä osassa tulipesän sisäisessä lämmönsiirrossa. Lasketavan lohkon sekoittuminen ylemmän lohkon kanssa voidaan laskea kaavalla:

$$M_{up} = \rho_{next} \cdot D \cdot c_{inert} \cdot A_{up} \frac{T_{next} - T_{gas}}{\Delta z_{up}}, \quad (47)$$

ja vastaavasti alemman lohkon kanssa:

$$M_{down} = \rho_{inert} \cdot D \cdot c_{inert} \cdot A_{down} \frac{T_{gas} - T_{prev}}{\Delta z_{down}}, \quad (48)$$

joissa ρ_{next} on seuraavan (ylemmän) lohkon ja ρ_{inert} laskettavan lohkon suspensiotiheys, D on dispersiokerroin, jonka arvolla sekoittumisen tehokkuutta voidaan korjata tai hienosäätää. c_{inert} on petimateriaalin ominaislämpökapasiteetti, A_{up} ja A_{down} ovat laskettavan lohkon yläpinnan ja alapinnan pinta-alat, T_{gas} , T_{next} ja T_{prev} ovat laskettavan, seuraavan ja edellisen lohkon lämpötilat. Δz_{up} ja Δz_{down} ovat laskettavan lohkon keskipisteen pystysuorat etäisyydet ylemmän ja alemman lohkon keskipisteisiin.

Käynnistystilanteessa peti on kiinteänä tulipesän pohjalla. Tämä tarkoittaa, että sekoittuminen ei ole yhtä tehokasta petin pinnan ala- ja yläpuolisen lohkon välillä kuin normaalissa käytössä. Tämän vuoksi sekoittumista kyseisen rajapinnan yli rajoitettiin käynnistystilanteessa empiirisesti määritetyn muuttuvan kertoimen avulla. Kerroin muuttuu leijutusnopeuden funktiona ja sen käyttäytyminen on esitetty **kuvassa 18**. Kuvaajan muotoa voidaan selittää sillä, että petimateriaali siirtyy tietyllä hetkellä kiinteästä petistä kuplivaan toimintatilaan. Kiertävä toimintatila ja pneumaattinen kuljetus puolestaan alkavat vahvistua voimakkaasti suuremmalla leijutusnopeudella.



Kuva 18. Korjauskertoimen sekoitukselle pohjapetin pinnan yli.

Mallin konvektiivisen lämmönsiirron (\dot{Q}_{conv}) laskenta muurauksen tai seinän ja tulipesän/syklonin/hiekkalukon välillä tapahtuu aiemmin luvussa 4.2.2 esitetyn yhtälön (25) mukaan. Yhtälössä esiintyvä konvektiokerroin h_{conv} lasketaan mallin tulipesässä kaavalla:

$$h_{conv} = k_1 \cdot a_{conv} \cdot \rho_{inert}^{b_{conv}} \cdot T_{gas}^{c_{conv}}, \quad (49)$$

jossa k_1 on virityskerroin, a_{conv} , b_{conv} ja c_{conv} ovat kokeellisesti määritettyjä kertoimia eri suspensiotiheyden alueille, ρ_{inert} on lohkon suspensiotiheys ja T_{gas} lämpötila. Syklonille ja hiekkalukoille on mallissa annettu omat, kiinteät konvektiokerroimensa.

Säteilylämmönsiirto huomioidaan mallissa siten, että säteilyä tapahtuu käynnistyspolttimen lohkoista vain sen kahteen alapuoliseen lohkoon. Näistä alempi on kiinteän hiekkapetin aluetta, jolloin säteily muodostuu käynnistysvaiheessa tärkeäksi tekijäksi etenkin hiekkapetin lämmityksessä. Ylempiin lohkoihin säteilylämmönsiirtoa ei erikseen oteta huomioon, mutta sen voidaan ajatella tulevan huomioiduksi sekoittumisen kautta. Kun kiinteää polttoainetta aletaan syöttää, lämpötilaerot pienenevät ja sekoittumisen vaikutus pohjapetin ja ylemmän tulipesän välillä kasvaa, jolloin myös säteilyn vaikutus alempiin lohkoihin pienenee selvästi. Säteilylämmönsiirron vaikutus jätetään tässä vaiheessa laskennassa pois. Säteilylämmönsiirron teho \dot{Q}_{emit} lasketaan yhtälöstä (27) muokatulla kaavalla:

$$\dot{Q}_{emit} = k_{rad} \sigma A_{target} (T_{source}^4 - T_{target}^4), \quad (50)$$

jossa k_{rad} on virityskerroin, σ on Stefan-Boltzmannin vakio, A_{target} on kohdepinnan koh-tisuora ala, T_{source} on lähteen ja T_{target} kohteen pinnan absoluuttinen lämpötila Kel-vineissä. Jotta energiatasapaino säilyy, alempien lohkojen vastaanottamat lämpötehot pitää tietenkin vähentää polttimen lohkoista.

Petimateriaalin lämpötase lasketaan yhtälöllä:

$$\dot{Q}_{sand} = \dot{m}_{inert} c_{inert} (T_{prev} - T_{gas}), \quad (51)$$

jossa \dot{m}_{inert} on petimateriaalin virtaus, c_{inert} on petimateriaalin ominaislämpökapasi-teetti, T_{prev} on edellisen lohkon lämpötila ja T_{gas} laskettavan lohkon lämpötila. Vastaa-vasti lämpöteho alimpaan tulipesälohkoon saadaan, kun summataan hiekkalukosta ja hiekkatulistimesta tulevien virtauksien aiheuttamat tehot. Myös ne voidaan laskea edel-lisellä kaavalla.

Pohjatuhkan poistosta aiheutuva lämpöhäviö voidaan laskea yhtälöllä:

$$\dot{Q}_{ash} = k_{ash,out} \dot{m}_{ash,fuel} c_{ash} (T_{fuel} - T_{gas}), \quad (52)$$

jossa $k_{ash,out}$ on poistettavan tuhkan osuus, $\dot{m}_{ash,fuel}$ on polttoainevirran sisältämä tuh-kan määrä, c_{ash} on tuhkan ominaislämpökapasiteetti, T_{fuel} on sisään tulevan polttoai-neen lämpötila ja T_{gas} lohkon lämpötila.

Polttoaineen lämpötase voidaan laskea yhtälöllä:

$$\dot{Q}_{fuel} = (\dot{m}_{c,fuel} + \dot{m}_{vol,fuel} + \dot{m}_{ash,fuel})(h_{fuel} - h_{gas}), \quad (53)$$

jossa $\dot{m}_{c,fuel}$, $\dot{m}_{vol,fuel}$ ja $\dot{m}_{ash,fuel}$ ovat hiilen, haihtuvien aineiden ja tuhkan määrä polt-toainevirtauksissa, h_{fuel} on sisään tulevan polttoaineen entalpia ja h_{gas} on laskettavan lohkon savukaasun entalpia.

Savukaasun lämpötase lohkoissa voidaan laskea yhtälöllä:

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{m}_{gas,prev} (h_{gas,prev} - h_{gas}), \quad (54)$$

jossa $\dot{m}_{gas,prev}$ on edellisestä elementistä tuleva savukaasun määrä, $h_{gas,prev}$ on edelli-sen elementin savukaasun entalpia ja h_{gas} on laskettavan lohkon savukaasun entalpia.

Primääri- ja sekundääri-ilman lämpötase voidaan laskea yhtälöllä:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} (h_{air} - h_{gas}), \quad (55)$$

jossa \dot{m}_{air} on lohkon syötettävän ilmavirtauksen määrä, h_{air} on syötettävän ilman en-talpia ja h_{gas} on laskettavan lohkon savukaasun entalpia.

Veden vaikutus järjestelmän lämpötehoon voidaan laskea summana:

$$\dot{Q}_{water} = \dot{Q}_{water,balance} + \dot{Q}_{water,heating} + \dot{Q}_{water,vapor}, \quad (56)$$

jossa esiintyvät veden lämpötase sekä lämmitykseen ja höyrystämiseen tarvittavat lämpötehot voidaan laskea yhtälöillä (57–59):

$$\dot{Q}_{water,balance} = \dot{m}_{water,fuel}(h_{water} - h_{gas}), \quad (57)$$

$$\dot{Q}_{water,heating} = \dot{m}_{water,fuel}c_{water}(T_{fuel} - T_{water,vapor}), \quad (58)$$

$$\dot{Q}_{water,vapor} = -\dot{m}_{water,fuel}\Lambda_{water,vapor}, \quad (59)$$

joissa $\dot{m}_{water,fuel}$ on veden määrä polttoainevirrassa, h_{water} on veden entalpia, h_{gas} on laskettavan lohkon savukaasun entalpia, c_{water} on veden ominaislämpökapasiteetti, T_{fuel} on sisään tulevan polttoaineen lämpötila, $T_{water,vapor}$ on veden höyrystymislämpötila ja $\Lambda_{water,vapor}$ on veden latenttilämpö.

Syklonin energiataseessa on lisäksi otettava huomioon lentotuhkan poiston vaikutus:

$$\dot{Q}_{fa} = k_{ash,out}\dot{m}_{ash,prev}c_{ash}(T_{ash} - T_{gas}), \quad (60)$$

jossa $k_{ash,out}$ on poistettavan tuhkan osuus, $\dot{m}_{ash,prev}$ on tulipesästä kulkeutuneen tuhkan määrä, c_{ash} on tuhkan ominaislämpökapasiteetti, T_{ash} on tuhkan lämpötila ja T_{gas} syklonin lämpötila.

Hiekkalukon laskennassa huomioidaan erikseen hiekkatulistikammio ja muun hiekkalukon alue. Hiekkalukon lämpötilan muutos voidaan laskea energiataseen avulla:

$$\begin{aligned} V_{ls}c_{inert}\frac{dT}{dt} &= \dot{m}_{inert,bypass}c_{inert}(T_{cyc} - T_{ls}) \\ &+ 0,5 \cdot \dot{m}_{air,ls}(h_{air,in} - h_{air,ls,out}) - \dot{Q}_{conv,ls}, \end{aligned} \quad (61)$$

jossa V_{ls} on koko hiekkalukon tilavuus, c_{inert} on petimateriaalin ominaislämpökapasiteetti, $\frac{dT}{dt}$ on lämpötilan muutos ajan suhteen, $\dot{m}_{inert,bypass}$ on tulistimen ohi ohjattu petimateriaalivirta, T_{cyc} on syklonin ja T_{ls} hiekkalukon lämpötila, $\dot{m}_{air,ls}$ on hiekkalukon leijutusilmavirta, $h_{air,in}$ on sisään tulevan ilmavirran entalpia, $h_{air,out}$ on hiekkalukosta poistuvan ilmavirran entalpia ja $\dot{Q}_{conv,ls}$ on konvektiivinen lämmönsiirto hiekkalukon muuraukseen. Vastaava laskenta tulistikammionlelle voidaan tehdä seuraavasti:

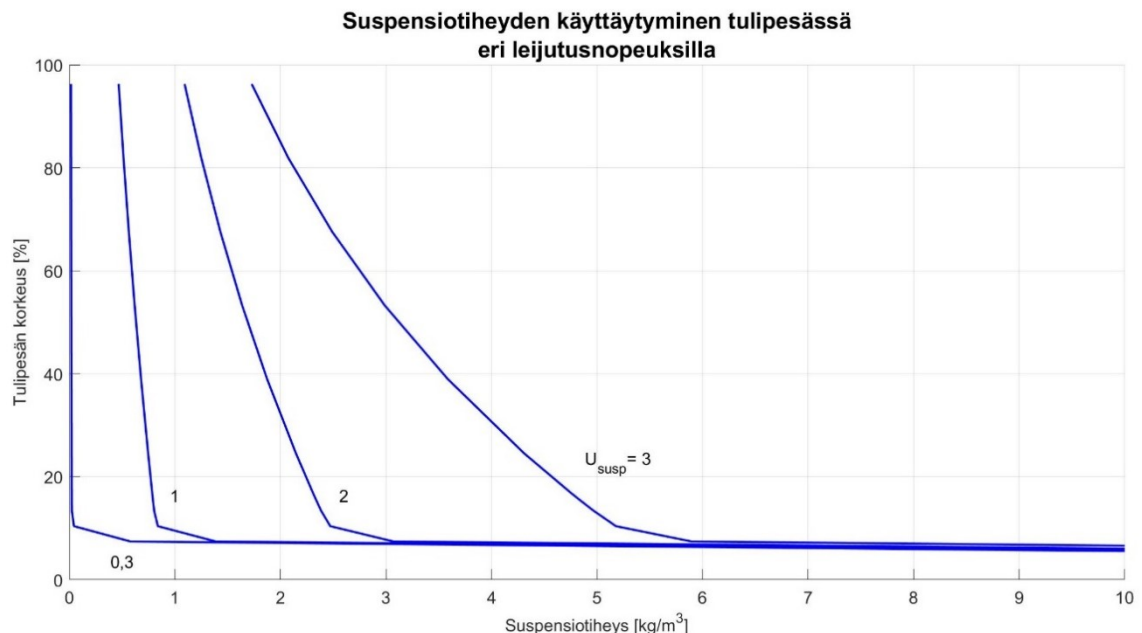
$$\begin{aligned} V_{ls}c_{inert}\frac{dT}{dt} &= \dot{m}_{inert,lssh}c_{inert}(T_{cyc} - T_{lssh}) \\ &+ 0,5 \cdot \dot{m}_{air,ls}(h_{air,in} - h_{air,lssh,out}) - \dot{Q}_{conv,lssh}, \end{aligned} \quad (62)$$

jossa $\dot{m}_{inert,lssh}$ on tulistikammioon ohjattu petimateriaalivirtaus, T_{lssh} hiekkatulistikamion lämpötila, $h_{air,lssh,out}$ on hiekkatulistikamion poistuvan ilmavirtauksen entalpia ja $\dot{Q}_{conv,lssh}$

on konvektiivinen lämmönsiirto tulistinputkiin. Hiekkalukon seiniin siirtyvä lämpö laske-
taan konvektiivisen lämmönsiirron kaavalla (25), kuten myös hiekkatulistimen tulistinput-
kiin siirtyvä lämpö. Tulistinputkien ja hiekkatulistimen välinen lämmönsiirron kerroin
muuttuu hiekkatulistimen lämpötilan ja tulistinkammion leijutusnopeuden funktiona.

5.2.4 Petimateriaalin käyttäytyminen

Hiekkapetin käyttäytymistä on simuloitu alkuperäisillä malleilla Johnsson-Lecknerin [50]
sekä virtauslaskennan tunnettujen kaavojen avulla. Johnsson-Lecknerin kaavoilla saa-
daan arvioitua hiekkapetin tiheyden käyttäytymistä tulipesän alueella ja virtauslaskennan
kaavoilla puolestaan saadaan laskennallista tietoa petin hydrodynamiikasta. Petimateri-
aalia käsitellään tällöin virtausaineena. Malliin lisättiin laskennallisia ehtoja etenkin kattil-
lan käynnistyksen alkuvaiheeseen, jolloin petimateriaali ei ole vielä kiertävässä moo-
dissa. Oleellisena muuttujana toimii useissa tilanteissa leijutusnopeus, jonka perusteella
annettiin muun muassa ehto sekoittumiselle petin pinnan ala- ja yläpuolisen tulipesäloh-
kon välille, kun sekoittumista voidaan olettaa tapahtuvan vähemmän petin ollessa kiin-
teässä tai kuplivassa tilassa verrattuna turbulenttiseen tai kiertävään tilaan. Petimateri-
aalin tiheydelle ja Johnsson-Lecknerin kaavojen kertoimille määritettiin kahdet kertoimet
eri toiminta-alueille ja niiden välille liukuva siirtymävaihe leijutusnopeusvälillä 2,0...2,5
m/s. Petimateriaalin tiheyden käyttäytyminen eri leijutusnopeuksilla on esitetty **kuvas-
sa 19**.



Kuva 19. Suspensiotiheyden käyttäytyminen tulipesässä.

Suspensiotiheyden käyttäytyminen noudattaa staattista Johnsson-Lecknerin kaavaa (30), mutta muutostilanteisiin on lisätty dynamiikkaa kaavan (63) mukaan:

$$\frac{d\rho_{inert,out}}{dt} = \frac{1}{\tau} (\rho_{inert} - \rho_{inert,old}), \quad (63)$$

jossa τ on aikavakio, ρ_{inert} on laskettu suspensiotiheys ja $\rho_{inert,old}$ on suspensiotiheys edellisellä ajan hetkellä. Leijutusnopeus tulipesässä voidaan laskea kaavalla:

$$U_{susp} = \frac{\dot{m}_{air} + \dot{m}_{gas,prev}}{A_{down}\rho_{gas}}, \quad (64)$$

jossa \dot{m}_{air} on ilmapvirtaus elementtiin, $\dot{m}_{gas,prev}$ on savukaasun virtaus edellisestä elementistä, A_{down} on lohkon alaosan poikkipinta-ala ja ρ_{gas} on kaasun tiheys.

Savukaasun virtausnopeuden muutos tulipesäelementissä voidaan laskea differentiaaliyhtälöllä:

$$\Delta z_{up} \frac{d\dot{m}_{gas}}{dt} = \frac{\dot{m}_{air} + \dot{m}_{gas,prev} + k_d \dot{m}_{vol} + r_{cf} \dot{m}_{water,fuel}}{A_{up}\rho_{gas}} - \dot{m}_{gas}, \quad (65)$$

jossa Δz_{up} on laskettavan lohkon ja sen yläpuolisen lohkon keskipisteiden pystysuora etäisyys, $\frac{d\dot{m}_{gas}}{dt}$ on savukaasun virtauksen muutos ajan suhteen elementissä, \dot{m}_{air} on primääri- tai sekundääri-ilman virtaus lohkoon, $\dot{m}_{gas,prev}$ on savukaasun virtaus edellisestä lohkosta, k_d on pyrolyysinopeuskerroin, \dot{m}_{vol} on vapautumattomien haihtuvien aineiden massa elementissä, r_{cf} on reagoivan jäännöshiilen ja hienoaineen määrä elementissä yhteensä, $\dot{m}_{water,fuel}$ on polttoaineen mukana tulevan kosteuden virtaus, A_{up} on laskettavan lohkon yläosan poikkipinta-ala, ρ_{gas} on savukaasun tiheys ja \dot{m}_{gas} on lohkosta poistuva savukaasuvirtaus. Alimman lohkon savukaasun virtausnopeus voidaan laskea leijutusnopeuden kaavasta (64) asettamalla edellisen elementin savukaasun virtaus nolaksi.

Petimateriaalin massavirtausta tulipesästä poistumiskanavaan voidaan arvioida ylimässä tulipesälohkossa kaavalla:

$$\dot{m}_{inert,fur,out} = G \cdot A_{top}, \quad (66)$$

jossa G on kiintoaineen massavirtauksen tiheys ja A_{top} on tulipesän yläosan poikkipinta-ala.

Hiekkalukosta tulipesään poistuvan petimateriaalin massavirtauksen muutos voidaan laskea differentiaaliyhtälöllä:

$$\frac{d\dot{m}_{inert,ls,out}}{dt} = \frac{1}{\tau} (\dot{m}_{inert,bypass} - \dot{m}_{inert,ls,out}), \quad (67)$$

jossa τ on hiekkalukon viivettä kuvaava aikavakio, $\dot{m}_{inert,bypass}$ on tulistimen ohi ohjattu petimateriaalivirtaus ja $\dot{m}_{inert,ls,out}$ on tulipesään poistuva petimateriaalivirtaus.

5.3 Yksinkertaistuksia, oletuksia ja reunaehtoja

Malli sisältää useita yksinkertaistuksia ja oletuksia, joista käynnistystilanteen kannalta oleellisimpia ovat:

- Käynnistyspolttimien teho vaikuttaa suoraan vain yhteen lohkoon
- Käynnistyspolttoaine on kokonaisuudessaan haihtuvaa ainetta ja sillä on suuri palamisnopeus
- Lämmönsiirto on yksiulotteista myös käytännön kolmiulotteisissa tapauksissa
- Säteilylämmönsiirto huomioidaan erikseen vain, kun kiinteää polttoainetta ei syötetä ja vain polttimien alapuolisiin lohkoihin
- Kaikki polttimien järjestelmään vapauttama lämpöenergia jakautuu petimateriaaliin, muuraukseen ja savukaasuun
- Lämpöhäviöt järjestelmän ulkopuolelle (vuotoilma yms.) oletetaan pieniksi
- Tulipesässä palamatta jääneet polttoainehiukkaset palavat syklonissa
- Lasketut lämpötilat, ainepitoisuudet ja kaikki muutkin arvot ovat keskiarvoja kyseisen lohkon tilavuudella; ts. olosuhteet lohkon sisällä ovat tasaiset
- Lohkojen sisältö on täysin sekoittunutta, kaasu ja petimateriaali ovat lohkon sisällä samassa keskimääräisessä lämpötilassa
- Petimateriaalin ja savukaasun virtausta tapahtuu vain kierron suuntaan.

5.4 Katsaus erilaisista malliratkaisuista

Edellä esiteltiin yksityiskohtaisesti tämän työn malli, mutta kirjallisuudessa on esitetty tähän verrattuna myös monia erilaisia malliratkaisuja. Tähän kappaleeseen on vertailun vuoksi poimittu tämän työn malliin verrattuna erilaisia tai laajennettuja ratkaisuja. Voidaan huomata, että mallinnuksessa ei välttämättä ole vain yhtä oikeaa lähestymistapaa. Jotkin ratkaisut voivat olla yksinkertaisempia, jotkin tarkempia, ja joissakin on otettu ongelmaan täysin erilainen näkökulma. Esitettyjen mallien pohjana on yleensä aiemmin kehitetty ja tunnettu malli, mutta esille tuodaan usein uusia ajatuksia ja lähestymistapoja ainakin jollekin osa-alueelle.

Yang et al. esittävät tutkimuksessaan [21] kiertoleijupetikattilan dynaamisen mallin, joka pohjautuu massa- ja energiataseeseen, kuten suurin osa malleista. Mallin pääkomponentit tulipesä, sykloni ja hiekkalukko ovat yhdistetty painetasapainon avulla. Julkaisussa kuvaillaan myös paine-eron säätö tulipesän yli, jota ohjataan pohjatuhkan poistolla.

Pallarès & Johnsson kuvailevat julkaisussaan [33] yksityiskohtaisesti kiertoleijupetikattilan virtausdynamiikan mallinnusta. Malli on jaettu kuuteen virtauskäyttäytymiseltään erilaiseen osaan: pohjapeti, tulipesän vapaavirtausalue (engl. freeboard), tulipesän poistumisalue, poistumiskanava, sykloni sekä alasmienokanavan ja hiekkalukon muodostama kokonaisuus. Jokaisen osion käyttäytymistä ja roolia kierrossa on kuvailtu tarkasti. Esi-tetyissä yhtälöissä huomioidaan monia yksityiskohtia, joita esimerkiksi tämän työn mallissa ei yksinkertaistuksien vuoksi huomioida. Kuuden virtausalueen väliset riippuvuus-suhteet on myös kuvailtu. Kokonaisuudessa huomioitavina asioina mainitaan muun muassa tulipesän diskretointi verkostoksi epäjatkuvuuksien huomioimiseksi, partikkelikoko-
jen erottelu, jotta malli osaisi käsitellä kokojakaumien eroavaisuuksia eri puolilla kiertoa sekä painetasapaino ja alasmienokanavan sisältämän kiintoaineen määrä.

Ma et al. esittelevät tutkimuksessaan [39] dynaamisen mallin petimateriaalin partikkelikokojakauman dynaamisen tasapainon simulointiin CFB-kattilan käynnistysprosessissa. Mallissa kiinnitetään erityishuomiota kokojakaumaan vaikuttaviin ilmiöihin kattilassa. Julkaisussa tutkitaan myös muun muassa syklonin erotustehokkuuden, polttoaineen laadun, petimateriaalin määrän ja alkuperäisen petimateriaalin kokojakauman vaikutuksia käynnistystilanteen dynamiikkaan.

Arena et al. esittävät julkaisussaan [44] CFB- ja BFB-kattiloille dynaamiset mallit palami-selle ja petin hydrodynamiikalle. Palamiseen liittyviin ilmiöihin on mallissa kiinnitetty eri-tyistä huomiota. Mallissa tulipesä jaetaan kahteen osaan (primääri- ja sekundäärialue), jotka jaetaan edelleen pystysuunnassa pienempiin osiin. Kahdelle pääalueelle tehdään erilaiset oletukset erilaisen käyttäytymisen perusteella. Myös Andersson jakaa maisterintutkimuksen työssään [11] tulipesän kahdeksi komponentiksi, joista ensimmäisessä kom-
ponentissa palaminen on epätäydellistä.

Błaszczuk & Krzywański esittelevät tutkimuksessaan [48] CFB-kattilan lämmönsiirron mallinnuksen yhtälöitä ja vertailevat kahta erilaista mallin ratkaisutapaa. Lämmönsiirron muotoja mallissa ovat partikkelikonvektio, kaasukonvektio, säteily klustereista ja säteily dispersioalueella. Leckner et al. puolestaan kehittivät julkaisussaan [51] yksinkertaisen korrelaatiokaavan koko lämmönsiirtopinnan lämmönsiirtokertoimen ja vastaavan sus-pensiotiheyden välille.

Taler et al. kuvailevat tutkimuksessaan [34] epälineaarisen kattilamallin, jossa tulipesän lämmönsiirron mallinnuksessa lähtökohdaksi otetaan polttimen liekki, jolla on pinta-ala ja emissiivisyys. Polttoaineen syötön perusteella lasketaan lämpövirtaus, entalpia ja liekin adiabaattinen palamislämpötila. Lämpöteho savukaasuista tulipesän seiniin laske-
taan mallissa Christiansenin yhtälöllä. Tutkimuksessa on mallin avulla tavoitteena saavuttaa liekin optimaalinen lämmitys ja kattilan optimaalinen käynnistys.

6. SIMULOINTITULOKSET

Käynnistystilanteiden dataa oli työssä saatavissa kolmesta eri tapauksesta, joista yhtä tutkittiin muita tarkemmin malliin tehtäviä muutoksia määritettäessä. Dataa käytettiin paitsi verrattaessa simulointituloksia todellisten starttien mitattuihin arvoihin, myös prosessimallin sisääntulosignaaleina. Prosessille syötettäviä arvoja datasta ovat polttoaineiden massavirtaukset, primääri- ja sekundääri-ilmojen lämpötilat sekä massavirtaukset, hiekkalukkojen leijutusilmojen massavirtaukset, hiekkalukkojen tulistimien ohituskertoimet, lieriön lämpötila sekä wing wall -lämmönsiirtimien ulostulolämpötila. Kaikista edellä mainituista ei ole suoraa mittausdataa saatavilla, mutta tarvittavat arvot on näissä tapauksissa pystytty laskemaan joidenkin muiden mitattujen arvojen perusteella. Jokaisessa simulointitapauksessa simuloinnin aikaväli oli sama, noin 32 tuntia. Simulointi aloitettiin tapauksesta riippuen 1–3 tuntia ennen ensimmäisen käynnistyspolttimen käynnistystä.

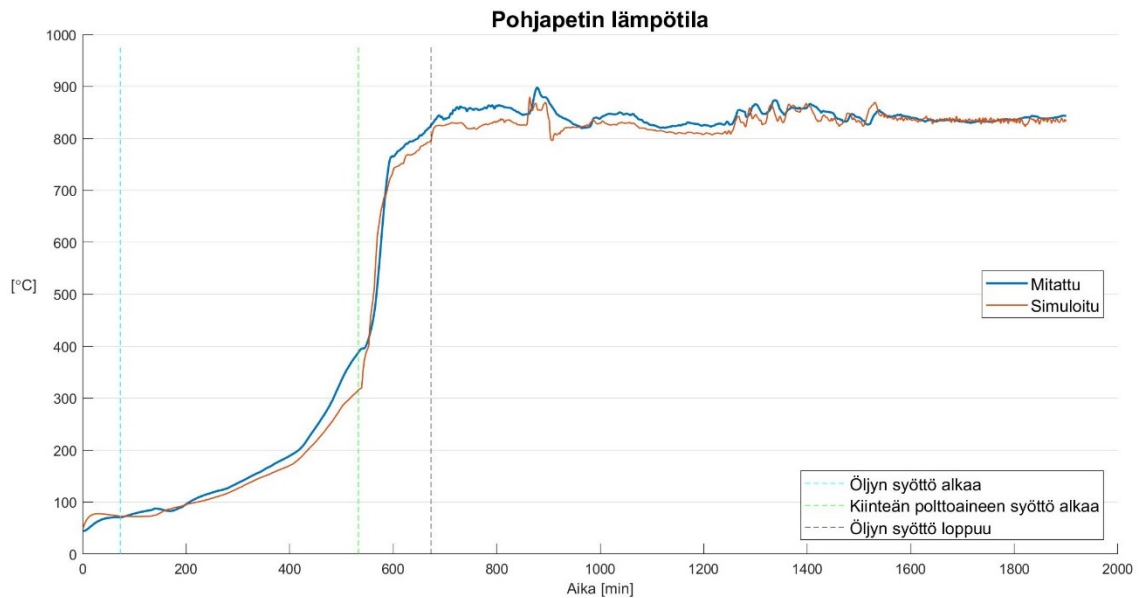
Järjestelmästä tarkkailtavat tilat on mahdollista valita monella eri tavalla. Tulosten analysoinnin kannalta kiinnostavia tiloja ovat sellaiset, joista voidaan tehdä johtopäätöksiä kattilan toiminnasta, joita on fysikaalisesti helppo tulkita, ja mallin validoinnin kannalta myös sellaiset tilat, joita voidaan suoraan verrata mitattuun dataan. [54]

Tässä työssä kiinnostavia tiloja ovat etenkin lämmönsiirrosta ja palamisesta riippuvat tilat. Pohjapetin lämpötila on yksi kiinnostavimmista tiloista, koska se määrittelee suurelta osin käynnistyksen vaiheen ja etenemisen. Esimerkiksi kiinteää polttoainetta ei ohjeistuksen mukaan pidä syöttää, ennen kuin peti on tietyissä lämpötilassa, ja käynnistyspolttimet voidaan sammuttaa vasta, kun peti on saavuttanut tietyn lämpötilan. Lämmönsiirron kannalta kiinnostavia tiloja ovat myös savukaasun lämpötilat kattilan eri osissa sekä muurausten lämpötilat. Muurausten lämpötilamittaukset tosin ovat paikallisia ja usein huonosti verrattavissa simuloituihin lämpötiloihin, jotka ovat alueen keskimääräisiä arvoja. Käynnistyksen nopeutta rajoittavat tekijät ovat myös mielenkiintoisia tarkastelun kohteita. Näitä ovat muun muassa muurausten lämpötilagradientti sekä pohjapetin lämpötila.

6.1 Ensimmäinen tapaus

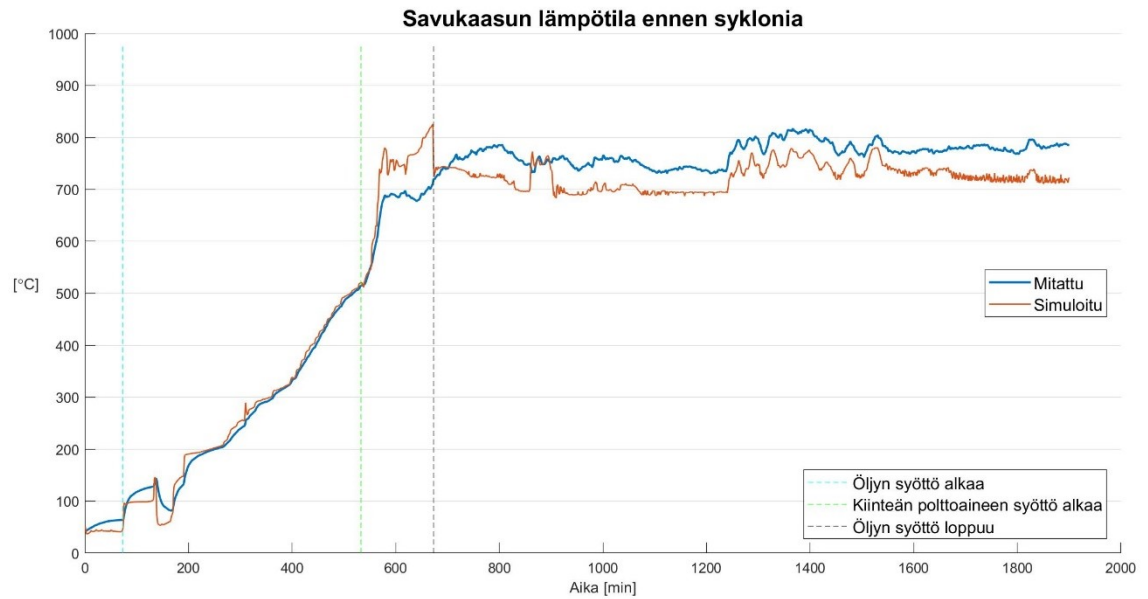
Ensimmäisen tapauksen simulointituloksia tarkastellaan tässä työssä kahta muuta tapausta tarkemmin. Tämä käynnistys on nopein kolmesta tutkitusta ja sitä on kuvailtu niin sanotuksi oppikirjan mukaiseksi ylösajoksi. **Kuvassa 20** nähdään tämän käynnistyksen

pohjapetin lämpötilan käyttäytyminen simuloituna ja mitattuna. Kuvassa esiintyvät kolme pystysuoraa katkoviivaa kuvaavat käynnistyksen kannalta merkittäviä ajanhetkiä. Ensimmäinen (sinivihreä) viiva kertoo, milloin käynnistyspolttoainetta aletaan syöttää järjestelmään, toinen (vihreä) kiinteän polttoaineen syötön aloitushetken ja kolmas (musta) hetken, jolloin käynnistyspolttoaineen syöttö lopetetaan.

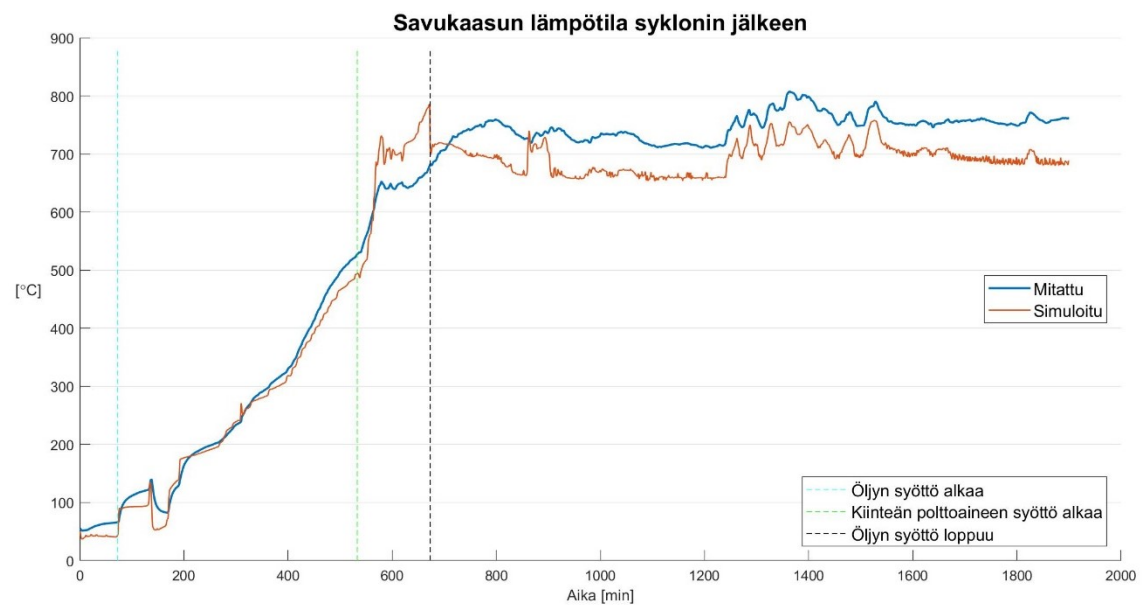


Kuva 20. Pohjapetin lämpötilan käyttäytyminen (tapaus 1).

Kuvasta nähdään, että malli simuloi tässä tapauksessa petimateriaalin lämpötilan käyttäytymistä kokonaisuutena hyvin. Epätarkkuutta esiintyy hieman esimerkiksi juuri ennen kiinteän polttoaineen syötön aloitusta. Tämä on mahdollisesti seurausta siitä, että mallin simuloima säteilylämmönsiirto petiin ei ole tarpeeksi suuri tai sitten sekoittumista on tapahtunut petin ja sen yläpuolisen tulipesän kanssa todellisuudessa enemmän kuin simuloitussa tapauksessa. Erot ovat kuitenkin suhteellisen pieniä ja käyttäytyminen on luonteeltaan samankaltaista sekä simuloitussa tapauksessa että mitattujen arvojen mukaan. **Kuvissa 21 ja 22** on esitetty savukaasun lämpötilan käyttäytyminen ennen sykklonia ja sykklonin jälkeen.

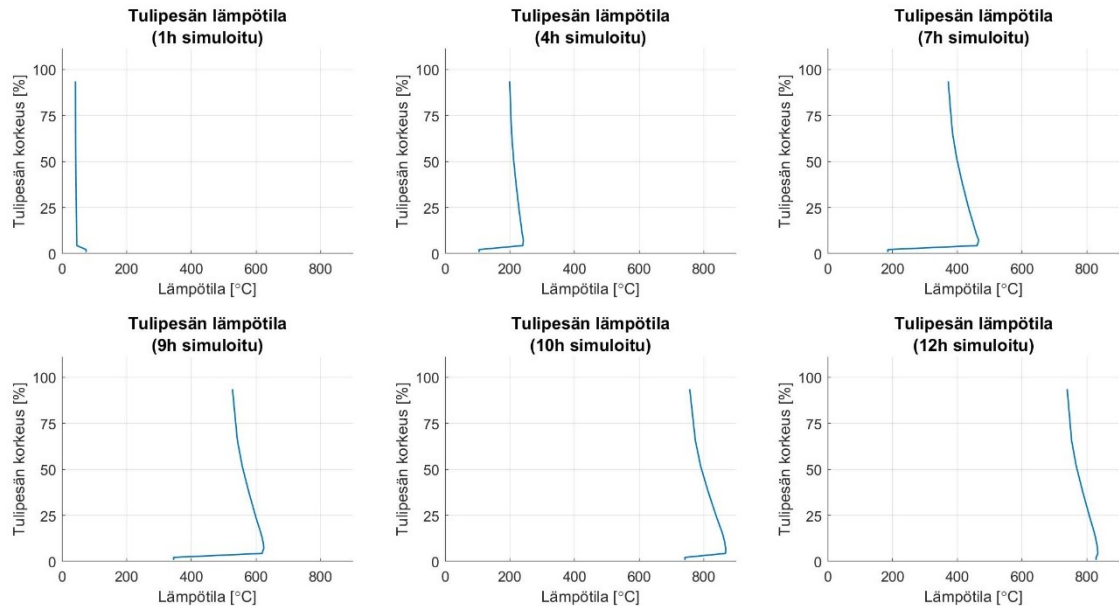


Kuva 21. Savukaasun lämpötila ennen sykklonia (tapaus 1).



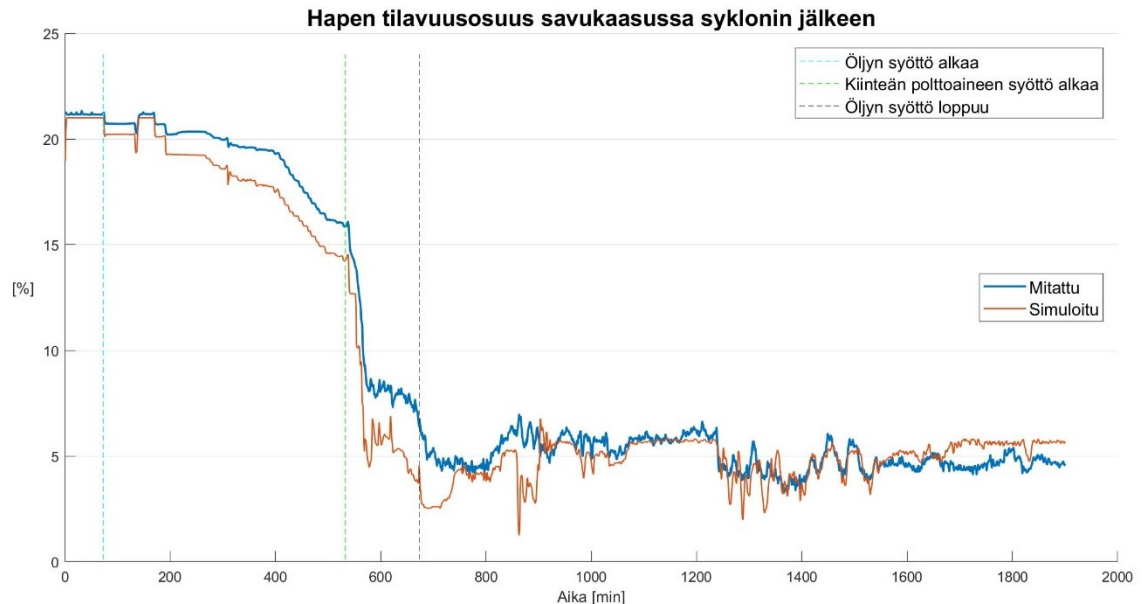
Kuva 22. Savukaasun lämpötila sykklonin jälkeen (tapaus 1).

Kuten voidaan olettaa, niin savukaasun lämpötila käyttäytyy ennen sykklonia ja sen jälkeen hyvin samalla tavalla. Simuloidut arvot vastaavat hyvin mitattuja arvoja pelkkien käynnistyspoltinten ollessa toiminnassa. Kun kiinteää polttoainetta aletaan syöttää, simulointi ei ole enää aivan yhtä tarkka. Huomiota herättää etenkin kohta, jolloin käynnistyspolttimet sammutetaan ja simuloitu lämpötila pienenee hetkessä selvästi. **Kuvassa 23** on esitetty tulipesän korkeussuuntaisia lämpötilaprofiileja tarkemmin kuudella eri ajanhetkellä.



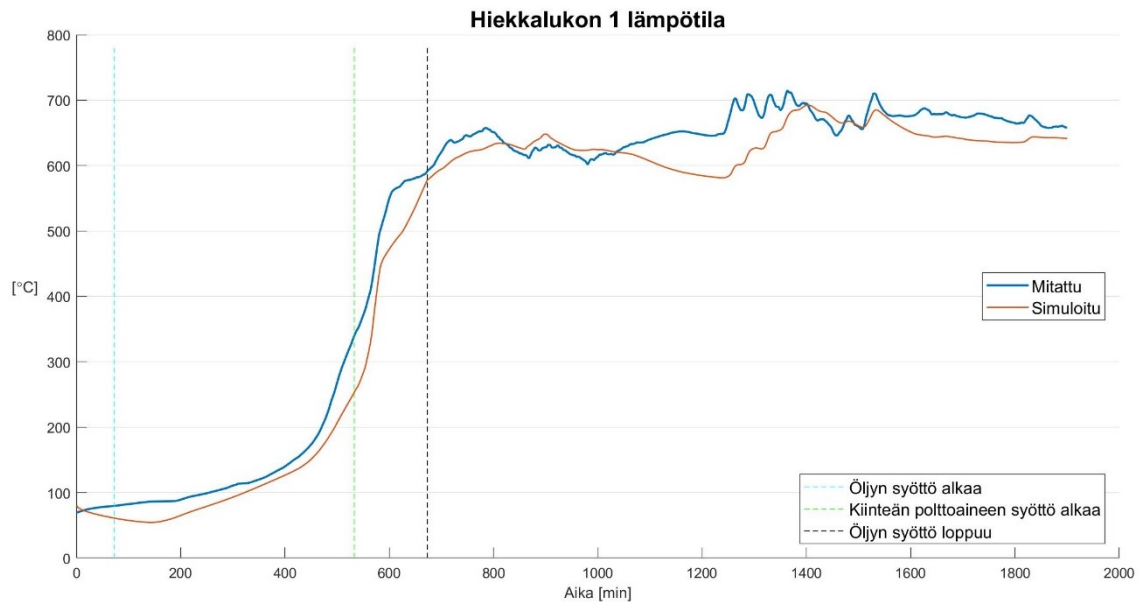
Kuva 23. Tulipesän vertikaalisia lämpötilaprofiileja eri ajanhetkillä (tapaus 1).

Kuvasta saadaan hyvä käsitys lämpötilan käyttäytymisestä ja kehittymisestä käynnistyttyä aikana. Kuvaajista erottuu selkeästi pohjapetin alue, jonka lämpötila käyttäytyy eri tavalla muuhun tulipesään verrattuna. Muun tulipesän osalta sekoittuminen on voimakasta ja lämpötilaerot tasaisempia. Kuumassa tilanteessa ero on suurimmillaan noin sadan asteen suuruusluokkaa. Hapen määrä savukaasussa on kiinnostava asia etenkin palamisen kannalta. Hapen tilavuusosuuden käyttäytymistä on vertailtu **kuvassa 24**.



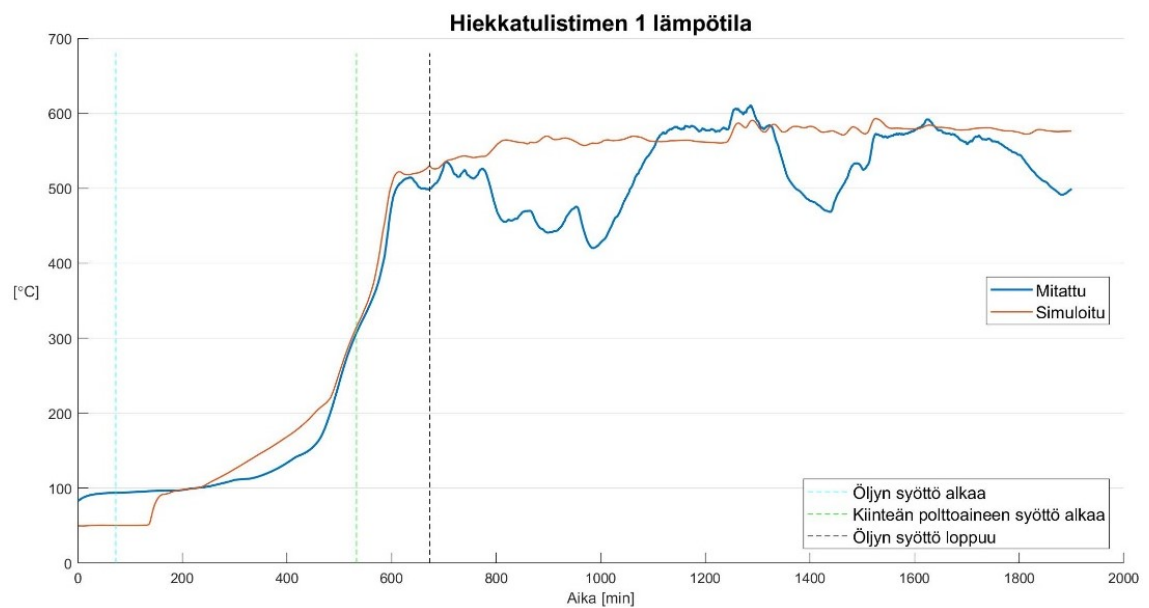
Kuva 24. Hapen tilavuusosuus savukaasussa syklonin jälkeen (tapaus 1).

Hapen tilavuusosuuden käyttäytyminen on samankaltaista simuloidussa ja mitatussa tilanteessa. Pientä eroa esiintyy etenkin simuloinnin alkupuolella ja suurin ero tulee tilanteessa, jossa käynnistyspolttoainetta ja kiinteää polttoainetta syötetään samaan aikaan. Kun kattilaa ajetaan pelkällä kiinteällä polttoaineella, simulointi vaikuttaa tarkalta. **Kuvassa 25** on esitetty hiekkalukon 1 mitattu ja simuloitu lämpötila.



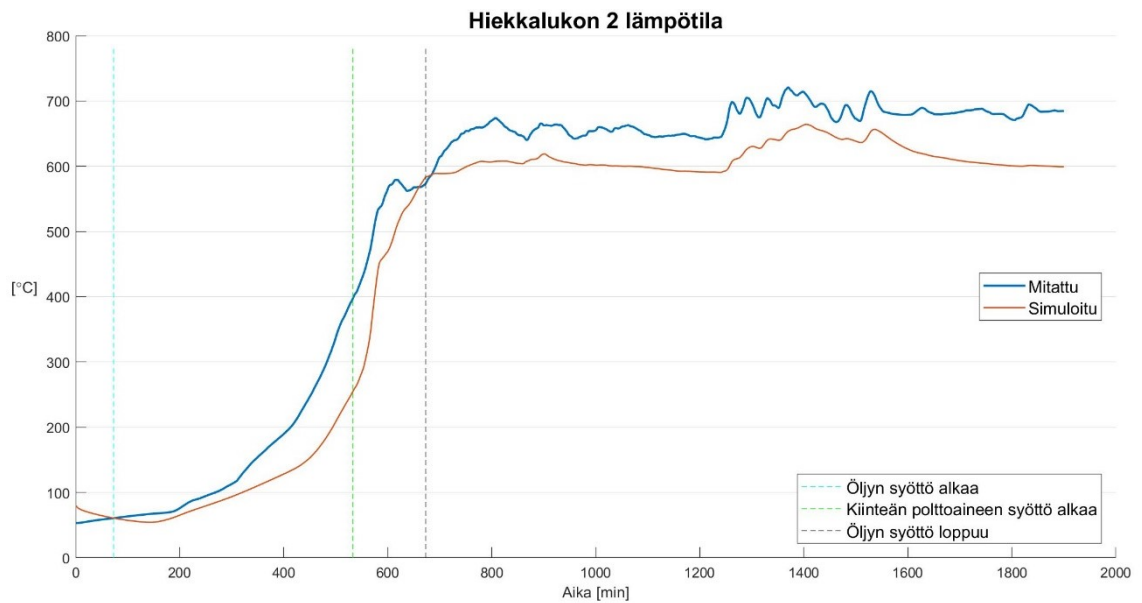
Kuva 25. Hiekkalukon 1 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).

Kuvasta nähdään, että simulointi noudattaa pääosin kohtuullisen hyvin mitattujen arvojen käyttäytymistä. **Kuvassa 26** puolestaan on esitetty saman hiekkalukon tulistinosan mitattu ja simuloitu lämpötila.



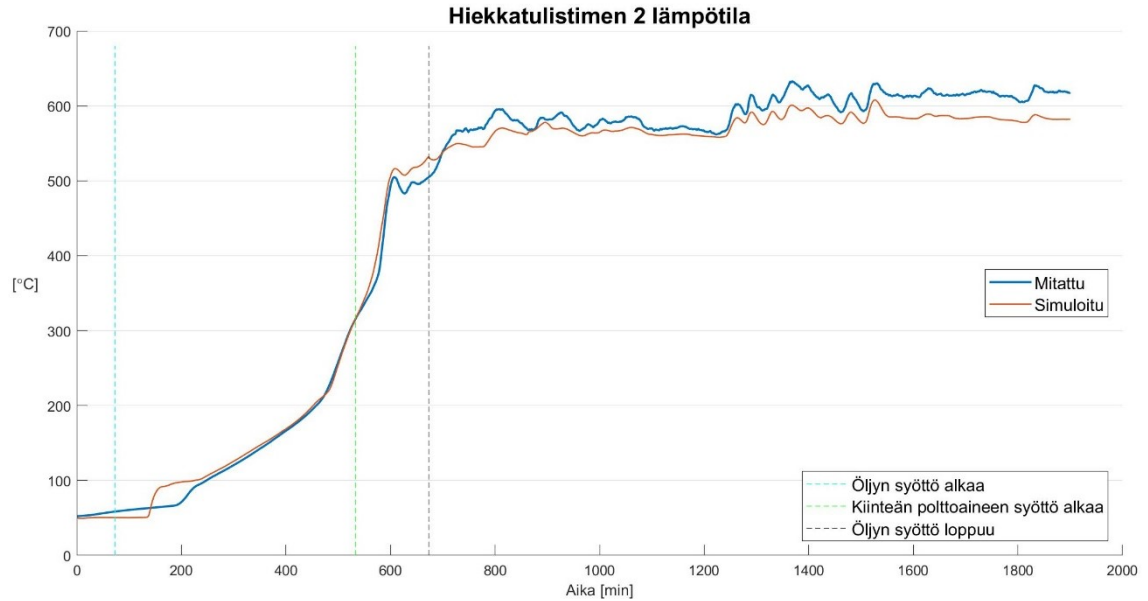
Kuva 26. Hiekkatulistimen 1 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).

Kuvasta huomataan, kuinka simuloitu lämpötila on tässä tapauksessa käytökseltään huomattavasti tasaisempaa kuin mitattu lämpötila. Suuruusluokka molemmilla on pääosin samaa tasoa, vaikka mittauksen heilunnan vuoksi eroa tuleeekin paikoitellen yli sadan asteen verran. **Kuvassa 27** on esitetty hiekkalukon 2 mitattu ja simuloitu lämpötila.



Kuva 27. Hiekkalukon 2 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).

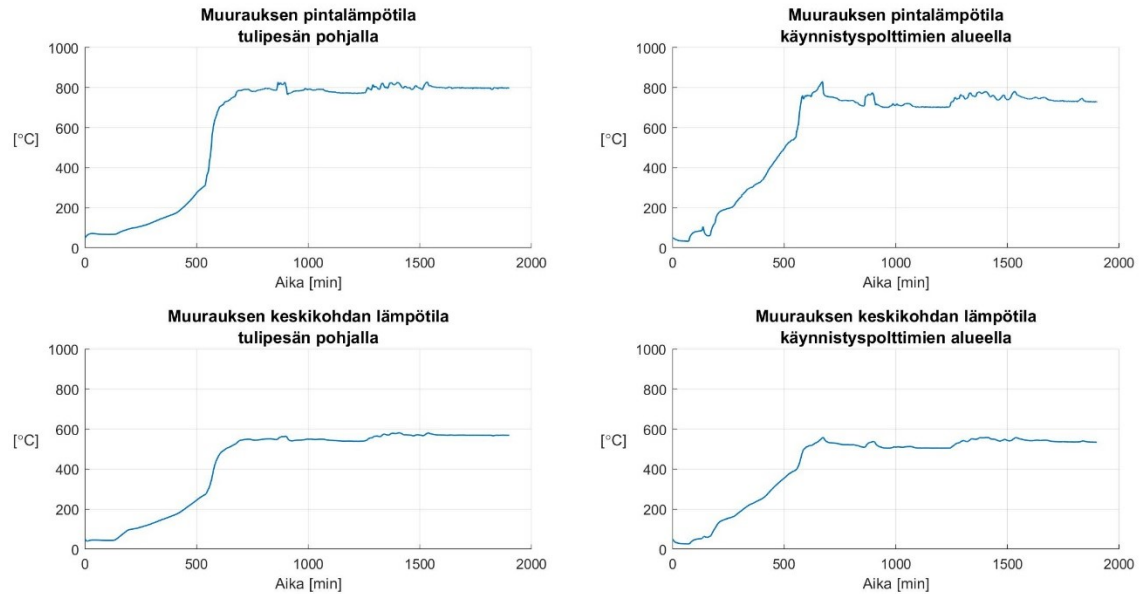
Kuvasta nähdään, että simuloitu lämpötila on käytännössä koko tutkitulla ajanjaksolla mitatun alapuolella. Ero on kuitenkin suurimmillaankin melko maltillinen eli käytös on samankaltaista. **Kuvassa 28** on esitetty saman hiekkalukon tulistinosan mitattu ja simuloitu lämpötila.



Kuva 28. Hiekkatulistimen 2 keskimääräinen lämpötila (tapaus 1).

Kuvan käyrät osuvat suurelta osin päällekkäin tai ainakin lähekkäin eli tämän tapauksen simulointi vaikuttaa tarkalta. Hiekkalukkojen lämpötilojen simuloinnit vaikuttavat kokonaisuudessaan kuitenkin hieman epätarkoilta, mutta niiden kohdilleen virittäminen ei ollut prioriteettilistan kärkipäässä, joten niiden osalta tuloksiin voidaan tätä taustaa vasten olla joka tapauksessa melko tyytyväisiä.

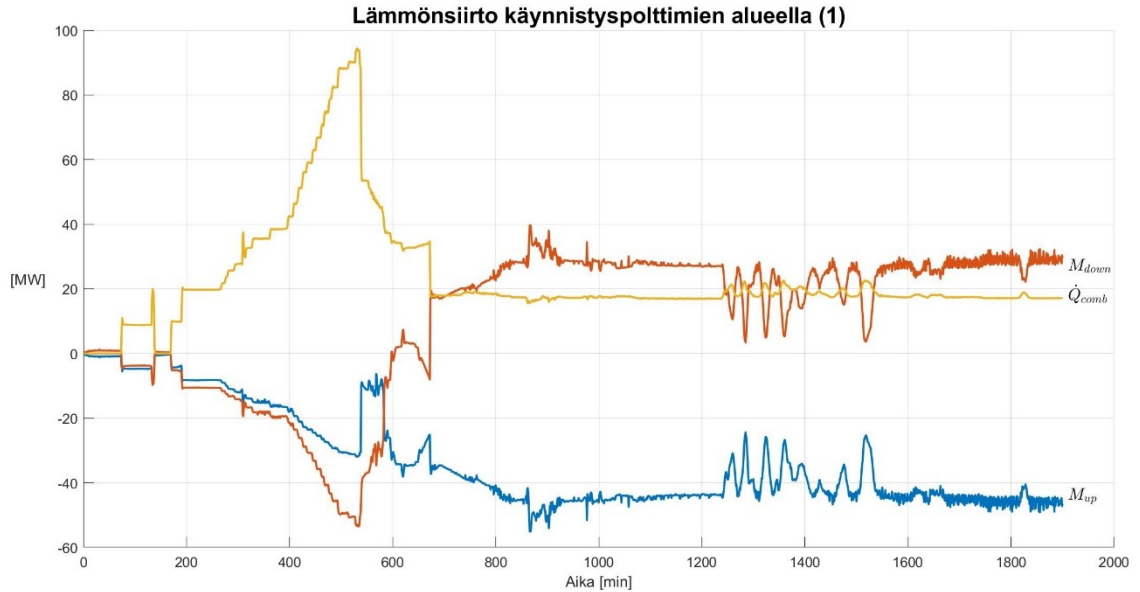
Muurausten on arveltu olevan kenties merkittävin kattilan ylösajon nopeutta rajoittava tekijä. Muurausten lämpötilamittaukset ovat paikallisia, joten niitä on hankala vertailla simuloituihin muurauslämpötiloihin. Muurausten pintalämpötilojen voidaan olettaa muuttuvan keskimäärin melko samankaltaisesti samalla alueella kuin savukaasun lämpötilan. Paikalliset erot voivat kuitenkin olla välillä melko suuria. Esimerkiksi kun lämmityksen alkuvaiheessa on käytössä vain yksi käynnistyspoltin, lienee selvää, että muuraus polttimen vieressä kuumenee nopeammin kuin esimerkiksi vastakkaisella seinällä. **Kuvassa 29** on esitetty muutamia simuloituja muurauslämpötiloja. Vasemmalla ylhäällä nähdään muurausten pinnan lämpötila tulipesän pohjalla. Vasemmalla alhaalla on saman alueen muurausten lämpötila syvemältä eli paksuussuunnassa puolesta välistä muurausta. Oikealla puolestaan on esitetty hieman ylempää tulipesästä eli pohjapetin yläpuolelta, käynnistyspoltinten alueelta vastaavat kuvaajat.



Kuva 29. Simuloituja muurauslämpötiloja (tapaus 1).

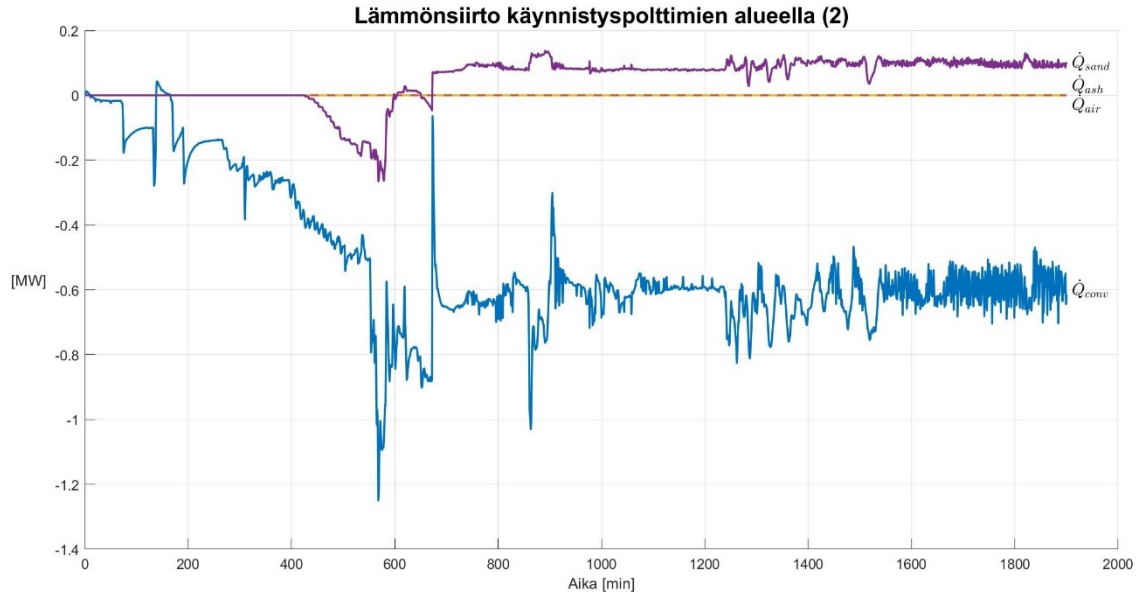
Kuvaajista huomataan, että pelkillä käynnistyspolttimilla lämmitettäessä poltinten alueella oleva muuraus lämpiää nopeammin kuin pohjan muuraus. Kun taas kiinteää polttoainetta aletaan syöttää, pohjalla oleva muuraus lämpiää nopeasti ja saavuttaa hieman korkeamman lämpötilan kuin ylempänä oleva muuraus. Syvemmältä muurauksesta poimitut lämpötilakuvaajat ovat samanmuotoisia kuin samojen kohtien pintojen lämpötilakuvaajat, mutta selvästi vaimentuneita muurauksen massan vuoksi. Lämpötilagradientit ovat suurimmillaan juuri näillä kahdella alueella, pelkillä käynnistyspolttimilla lämmitettäessä suurimmat muutosnopeudet esiintyvät oikean yläkulman kuvaajassa, kiinteää polttoainetta syötettäessä kattilaan puolestaan vasemman yläkulman kuvaajassa.

Kuvissa 30–32 on esitelty, millä tehoilla lämpöä siirtyy tulipesässä käynnistyspolttimien alueella. Nämä ovat hyvä esimerkki suureista, joita ei ole mahdollista erikseen mitata käytännön prosessista, mutta voimme tarkastella niiden käyttäytymistä simuloitussa tilanteessa. Kuvissa positiivinen arvo tarkoittaa, että kyseinen lämmönsiirtotapa tai palaminen lämmittää tutkittavaa aluetta. Negatiivinen arvo puolestaan tarkoittaa, että kyseisen tehon vaikutus alueella on viilentävä. Kuvissa on esitetty kaikki energiataseyhtälössä (38) esiintyvät tehot.



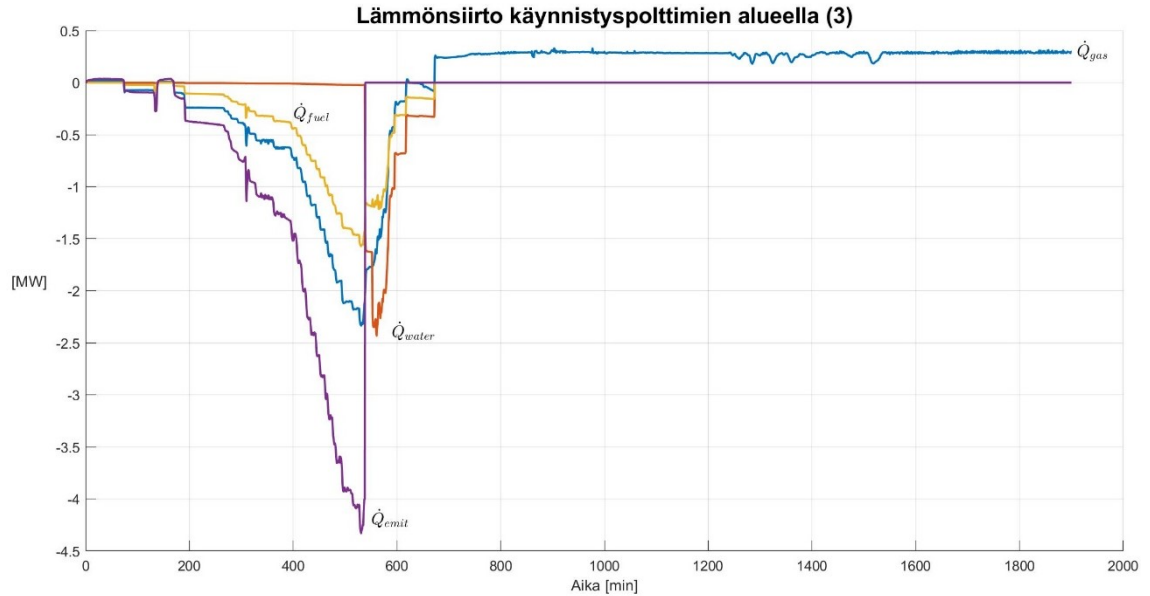
Kuva 30. Lämmönsiirto sekoittumisesta ylös ja alas sekä palamisesta käynnistyspolttimien alueella (tapaus 1).

Kuvassa 30 esiintyvät sekoittuminen ylös (M_{up}) ja alas (M_{down}) sekä palaminen (\dot{Q}_{comb}). Nämä ovat suuruusluokaltaan eniten lohkon lämpötilaan vaikuttavat tehot. Kuvasta huomataan, että palaminen lisää alueen lämpöä koko sinä aikana, kun palamista tulipesässä tapahtuu. Käynnistyspolttimet tuovat käynnissä ollessaan odotetusti selvästi suurimman lämpömäärän tälle alueelle. Myös käynnistyspolttimien sammuttua palaminen tuo lämpöä alueelle, sillä kiinteän polttoaineen jäännöshiilen palamista tapahtuu koko tulipesän alueella. Sekoittuminen ylöspäin vähentää tämän alueen lämpöä, koska ylempi tulipesän lohko on tätä lohkoa alemmassa lämpötilassa. Sekoittuminen alaspäin käyttäytyy mielenkiintoisesti, sillä sen etumerkki muuttuu, kun kiinteää polttoainetta on hetken aikaa syötetty tulipesään. Tämä tarkoittaa, että aluksi sekoittumisella lämpöä siirtyy tutkittavasta lohokosta alempaan, mutta myöhemmin lämpötehon suunta onkin alemmasta tutkittavaan lohkoon.



Kuva 31. Konvektiivinen lämmönsiirto seiniin/muurauksiin, petimateriaalin ja ilman mukana siirtyvät lämpövirtaukset sekä pohjatuhkan poistosta aiheutuva lämpövirtaus käynnistyspolttimien alueella (tapaus 1).

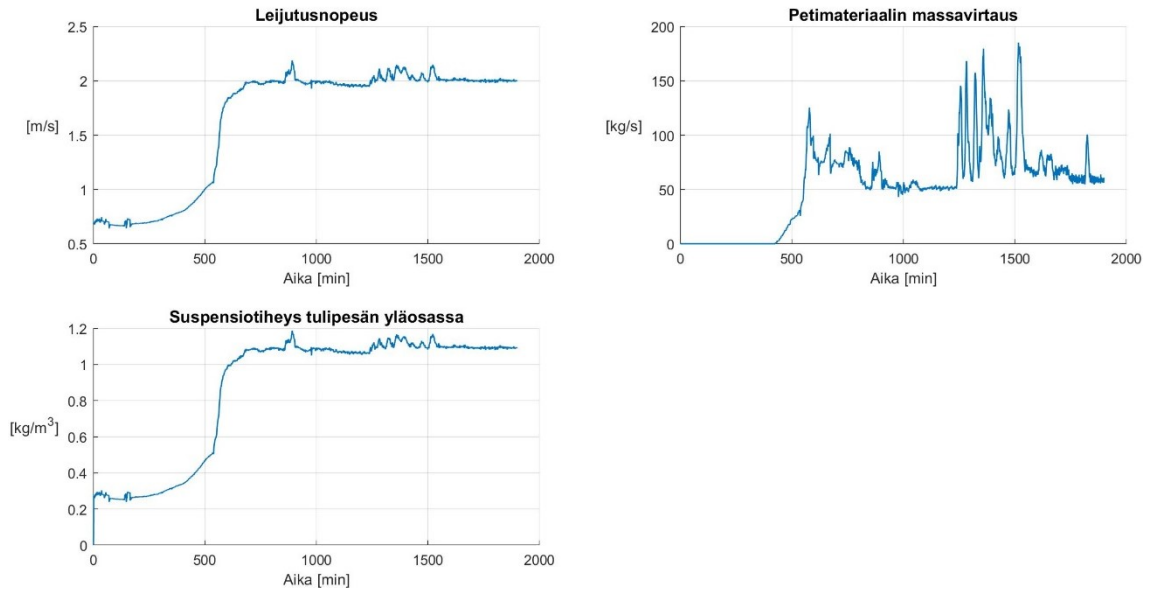
Kuvassa 31 esiintyvät konvektiivinen lämmönsiirto seinien/muurauksen ja lohkon savukaasun/petimateriaalin välillä (\dot{Q}_{conv}), petimateriaalin (\dot{Q}_{sand}) ja ilman (\dot{Q}_{air}) mukana siirtyvä lämpövirtaus sekä pohjatuhkan poiston (\dot{Q}_{ash}) vaikutus. Kuvan y-akselin skaalasta nähdään, että näiden tehojen vaikutus kokonaisuuteen on huomattavasti pienempi kuin aiemmassa kuvassa esiintyneiden tehojen vaikutus. Pohjatuhkan poistolla ja ilman lämpötaseella ei ole vaikutusta lämmönsiirtoon tässä lohossa lainkaan, sillä pohjatuhkan poisto vaikuttaa tulipesässä vain pohjalla ja primääri- tai sekundääri-ilmaa ei tähän lohkoon puhalleta. Myös petimateriaalin lämpötaseen vaikutus on melko pieni. Konvektiolla lämpöä siirtyy jonkin verran lohkosta muuraukseen, pienen hetken simuloinnin alkupuolella myös toisin päin eli muurauksesta lohkoon.



Kuva 32. Lämmönsiirto säteilyllä, vedestä sekä polttoaineen ja savukaasun lämpötaseesta käynnistyspolttimien alueella (tapaus 1).

Kuvassa 32 esiintyvät säteilylämmönsiirto (\dot{Q}_{emit}), polttoaineen (\dot{Q}_{fuel}) ja savukaasun (\dot{Q}_{gas}) lämpötaseet sekä polttoaineen kosteuden vaikutus (\dot{Q}_{water}). Suuruusluokaltaan näiden tehojen vaikutus tässä lohossa on kahdessa edellisessä kuvassa esiintyneiden väliltä. Kuvasta nähdään, että säteilylämmönsiirtoa tapahtuu pelkkien käynnistyspolttimien ollessa toiminnassa tästä lohokosta poispäin, käytännössä lähinnä pohjapetiin. Säteilyn vaikutus menee mallissa kuitenkin heti kiinteään polttoaineen syötön alkaessa nolaksi. Polttoaineen lämpötaseella on aluksi jonkin verran vaikutusta, mutta se luonnollisesti poistuu myös, kun käynnistyspolttimien käyttö lopetetaan. Savukaasun lämpötaseen kuvaaja on saman muotoinen hiekan lämpötaseen ja alaspäin sekoittumisen kuvaajan kanssa.

Veden höyrystymisestä johtuvaa jäähtymistä esiintyy tässä lohossa mallinnusteknisistä syistä hetkellisesti, kun käynnistyspolttoainetta ja kiinteää polttoainetta syötetään yhtäaikaaisesti. Tämä johtuu polttoaineiden parametrien yhdistämisestä. **Kuvassa 33** on esitetty muutamia petimateriaalin käyttäytymiseen liittyviä kuvaajia.



Kuva 33. *Petimateriaalin käyttäytymisen kuvaaja: leijutusnopeus, tulipesästä poistuvan petimateriaalin massavirtaus sekä suspensiotiheys tulipesän yläosassa (tapaus 1).*

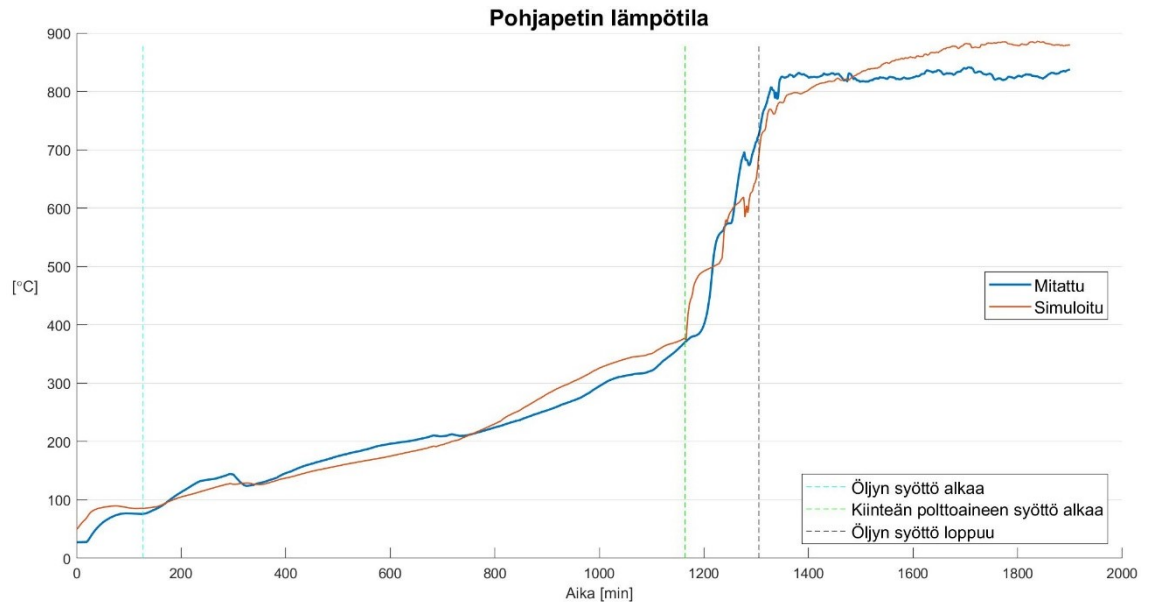
Kuvassa ylhäällä vasemmalla on esitetty leijutusnopeus tulipesässä. Leijutusnopeuteen vaikuttavat lämpötila sekä ilman ja savukaasun massavirtaukset. Jyrkintä nousua leijutusnopeudessa havaitaan samalla hetkellä, kun suurin lämpötilan nousu tapahtuu tulipesässä. Alhaalla vasemmalla on esitetty suspensiotiheys tulipesän yläosassa, joka on suoraan riippuvainen leijutusnopeudesta. Kuten olettaa sopii, näiden kahden kuvaajan muoto on sama. Ylhäällä oikealla on esitetty tulipesästä poistuvan petimateriaalin massavirtauksen kuvaaja. Kuvaajasta nähdään hetki, jolloin leijutusnopeus ylittää materiaalihiukkasten terminaalinopeuden; tällöin massavirtaus alkaa nousta nollassa. Kuvaajassa esiintyy myös teräviä piikkejä, joista voidaan päätellä, että massavirtauksen laskenta on melko herkkä olosuhteiden muutoksille. Samat piikit esiintyvät myös kahdessa muussa kuvaajassa, mutta selvästi pienemmällä voimakkuudella.

Ensimmäisen tapauksen simulointituloksiin voidaan kokonaisuutena olla melko tyytyväisiä. Simuloidut ja mitatut muuttujat käyttäytyvät pääosin samankaltaisesti ja simuloidut arvot ovat suuruusluokaltaan lähellä mitattuja arvoja koko vertailujakson ajan. Epätarkkuuksia esiintyy joissain kohdissa, mutta pahimmat epätarkkuudet eivät näytä esiintyvän jokaisessa kuvaajassa samassa kohdassa, joten niiden syitä on hankala arvioida.

6.2 Toinen tapaus

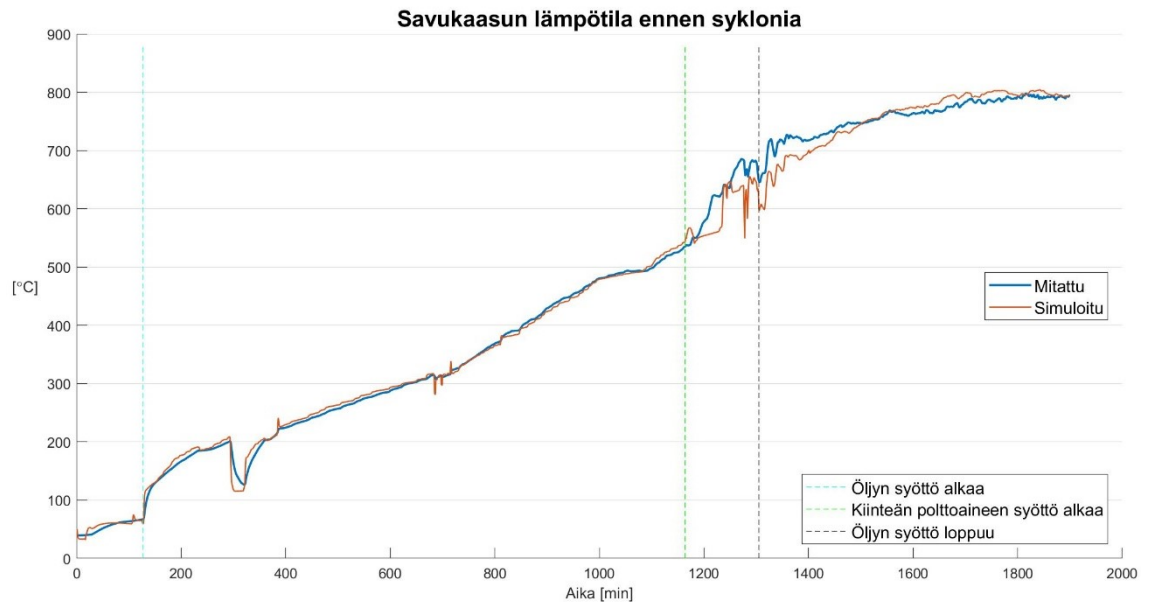
Toisessa tapauksessa on huomattavasti rauhallisempi ylösajo kuin ensimmäisessä tapauksessa, jopa hitaaksi luonnehdittu. Ensimmäisen tapauksen tuloksia käsiteltiin melko

laajasti, joten tästä ja kolmannesta tapauksesta otetaan tarkasteluun vain mielenkiintoisimmiksi arvioidut ja hyvin vertailtavissa olevat tilat eli pohjapetin lämpötila, savukaasun lämpötila ennen sykklonia ja sen jälkeen sekä happipitoisuus sykklonin jälkeen. **Kuvassa 34** on esitetty tämän käynnistyksen simuloitua ja mitattua pohjapetin lämpötilat.

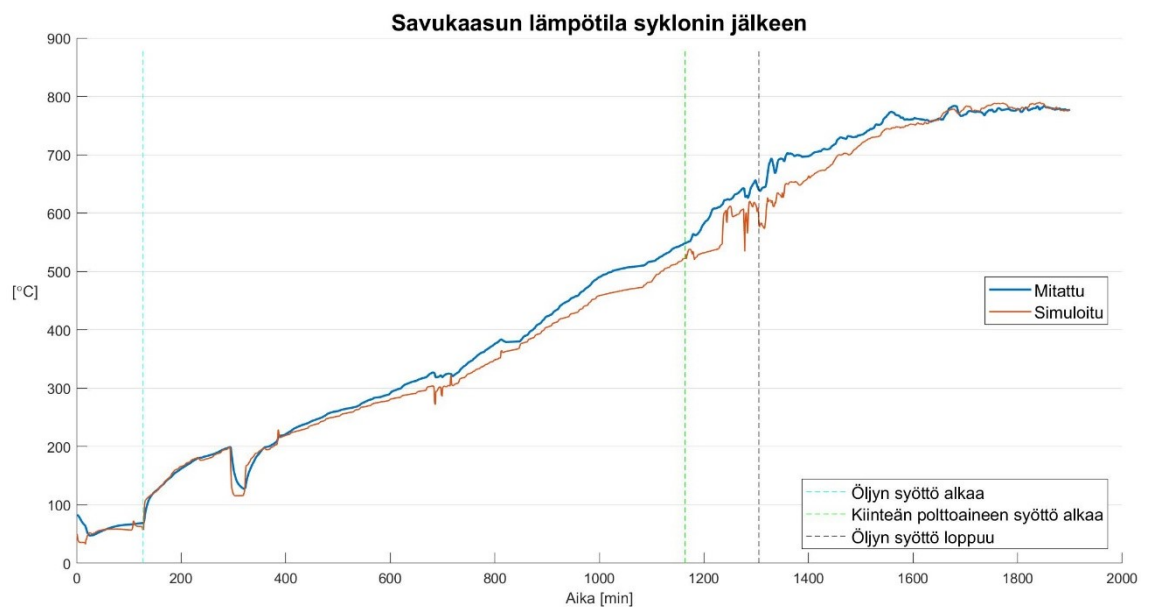


Kuva 34. Pohjapetin lämpötila (tapaus 2).

Kuten kuvasta nähdään, tässä käynnistyksessä pohjapetin lämmitys tapahtuu selvästi hitaammin kuin ensimmäisessä tapauksessa. Simulointi vaikuttaisi toimivan kokonaisuutena hyvin. Simuloidun ja mitatun käyrän käyttäytymisessä on kuitenkin pieniä eroavaisuuksia koko simuloidulla matkalla. Syytä on vaikea arvioida, sillä tietyillä ajanhetkillä malli vaikuttaisi reagoivan muutokseen liian nopeasti ja toisilla hetkillä liian hitaasti. Täytyy myös muistaa, että mittauksessakin tapahtuu suodatusta, mikä saattaa selittää osan eroista. **Kuvissa 35 ja 36** on esitetty tämän käynnistyksen savukaasun lämpötilan käyttäytyminen ennen sykklonia ja sykklonin jälkeen.

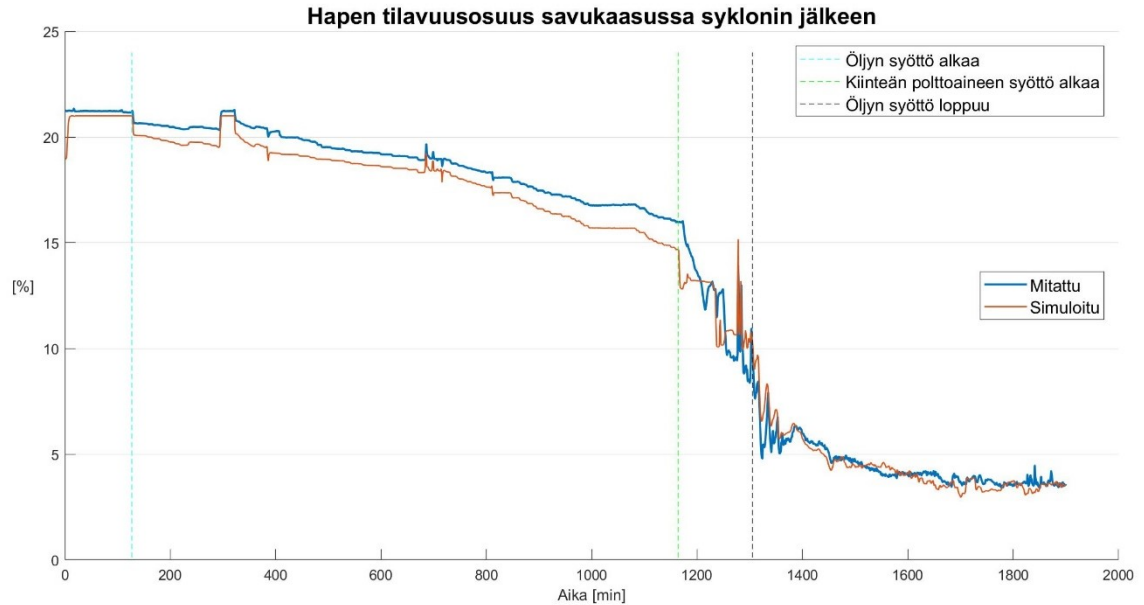


Kuva 35. Savukaasun lämpötila ennen sykklonia (tapaus 2).



Kuva 36. Savukaasun lämpötila sykklonin jälkeen (tapaus 2).

Malli simuloi savukaasun lämpötilaa tässä tapauksessa hyvin. Etenkin alku- ja loppu-osuuksien virhe on erittäin pientä. Kun sekä käynnistyspolttoainetta että kiinteää polttoainetta syötetään kattilaan, virhettä on hieman enemmän ja vaikuttaisi siltä, että malli reagoi muutoksiin mittauksia herkemmin. Hapen tilavuusosuuden käyttäytymisen tulokset tässä käynnistyksessä on esitetty **kuvassa 37**.



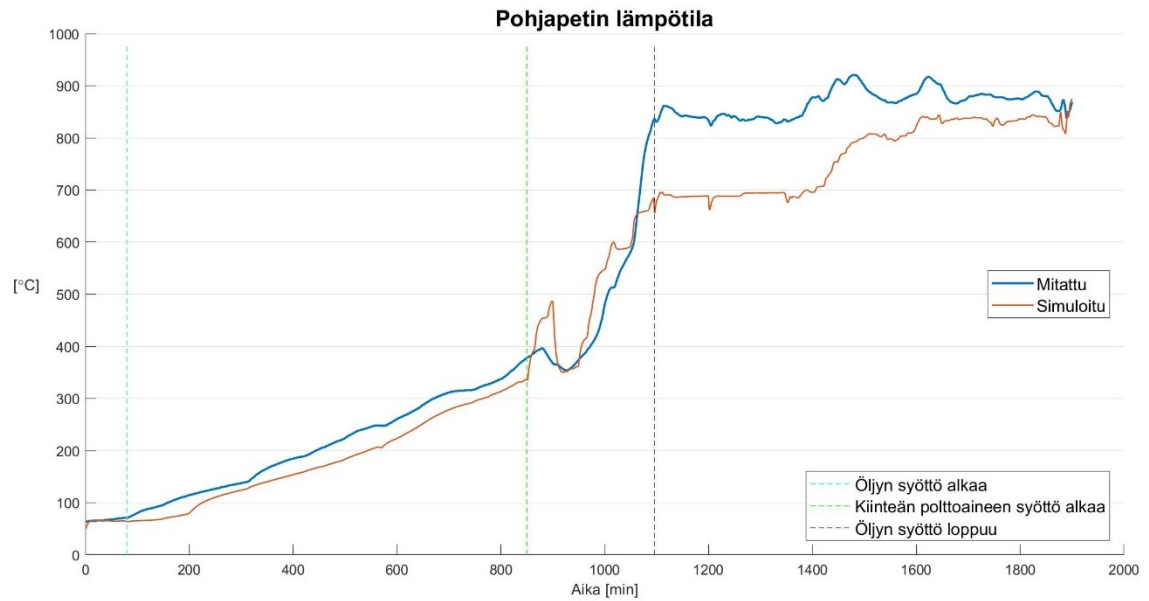
Kuva 37. Hapen tilavuusosuus savukaasussa syklonin jälkeen (tapaus 2).

Hapen tilavuusosuuden simulointi vaikuttaa tässä tapauksessa tarkalta. Pelkkää käynnistyspolttoainetta syötettäessä ilmenee hieman systemaattista virhettä. Muilta osin käyttäytyminen on samankaltaista ja etenkin loppuosassa erittäin tarkkaa.

Toisen tapauksen simuloinnit vaikuttavat kokonaisuudessaan onnistuneilta ja hyvin todellista käynnistystä kuvaavilta. Muokatun mallin ensimmäiset virityskertoimet määritettiin tämän käynnistyksen simulointien perusteella, joten kohtuullisen hyviä tuloksia oli myös sen perusteella odotettavissa.

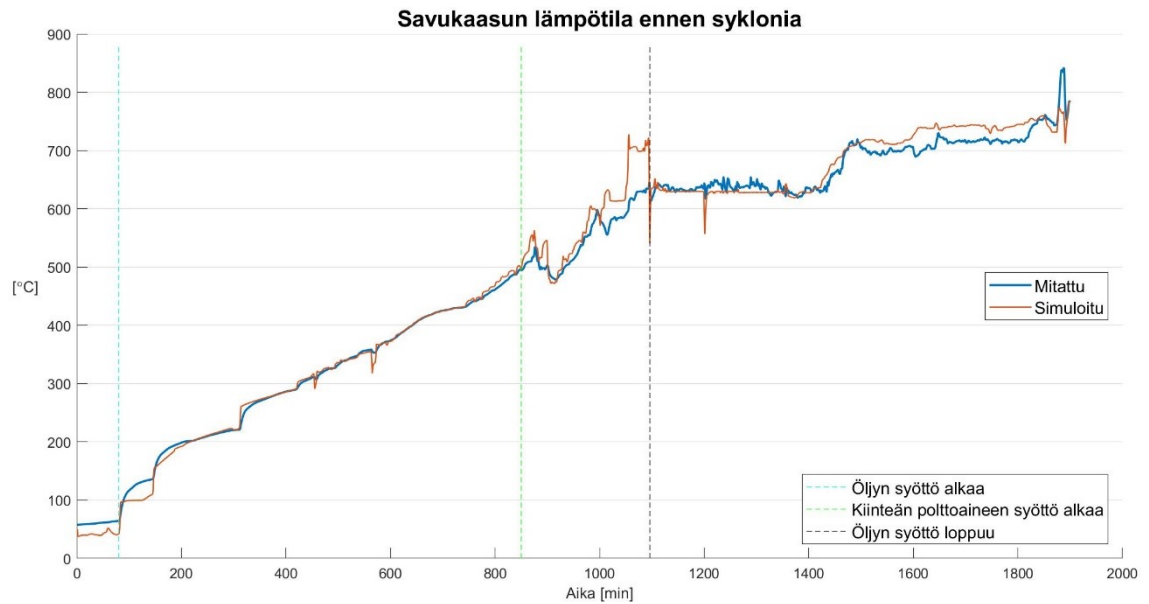
6.3 Kolmas tapaus

Kolmannen tapauksen merkittävänä erona kahteen edelliseen verrattuna on, että ennen käynnistystä petimateriaali oli vaihdettu, ja se on ollut karkeampaa kuin kahdessa aiemmin tutkitussa käynnistyksessä. Petimateriaalin parametreja ei kuitenkaan muokattu simulointia varten erikseen, vaan ne ovat samat kuin kahdessa aiemmassa tapauksessa. Nopeudeltaan tämä ylösajo on kahden edellisen tapauksen väliltä. **Kuvassa 38** on esitetty tämän käynnistyksen simuloitujen ja mitattujen pohjapetin lämpötilat.

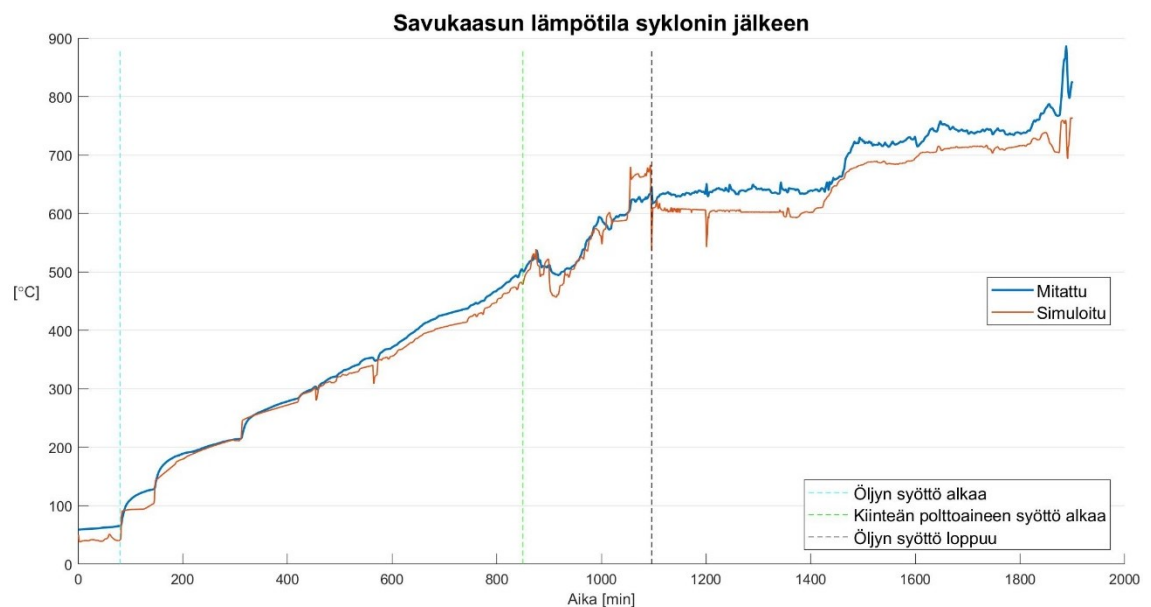


Kuva 38. Pohjajepetin lämpötila (tapaus 3).

Kuvasta nähdään, että simuloitujen ja mitattujen tulosten välillä on enemmän eroa kuin aikaisemmin esitetyissä käynnistystilanteissa. Tämän varmasti osittain selittää edellä mainittu petimateriaalin vaihtuminen. Malli pystyy kuvaamaan alkuosuuden, jonka aikana ajetaan pelkillä käynnistyspolttimilla melko hyvin, mutta siirryttäessä kiinteän polttoaineen syöttämiseen, mallivirhettä ilmenee enemmän. Simuloinnin viimeiset tunnit tosin parantavat tilannetta ja virhe pienentyi. **Kuvissa 39 ja 40** on esitetty tämän käynnistuksen savukaasun lämpötilan käyttäytyminen ennen sykklonia ja sykklonin jälkeen.

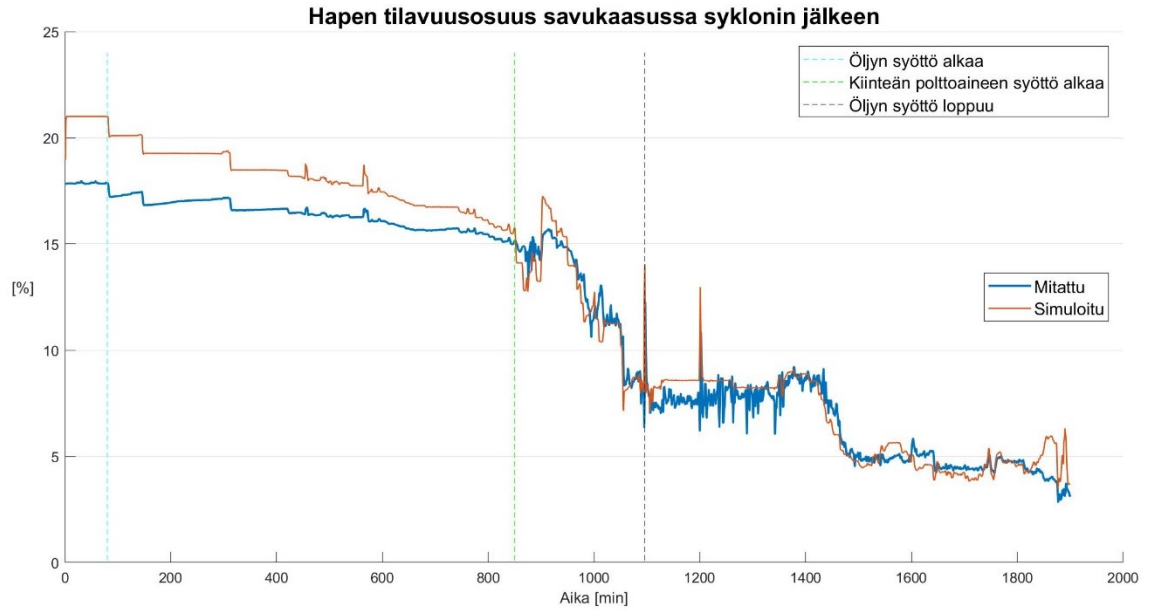


Kuva 39. Savukaasun lämpötila ennen sykklonia (tapaus 3).



Kuva 40. Savukaasun lämpötila sykklonin jälkeen (tapaus 3).

Kuvista nähdään, että vaikka petimateriaalin lämpötilan simulointi ei ollut tässä käynnistyksessä tarkkaa, simuloitujen savukaasujen lämpötilat vastaavat hyvin mitattuja arvoja. Pelkillä käynnistyspolttimilla ajettaessa simulointi on erittäin tarkkaa. Hieman ennen käynnistyspolttimien sammuttamista tapahtuu simuloinnissa erikoinen hyppäys, joka on mitatussa tapauksessa huomattavasti rauhallisempi. Muilta osin simuloinnissa ei ole havaittavissa isoja virheitä. Hapen tilavuusosuuden käyttäytymisen tulokset tässä käynnistyksessä on esitetty **kuvassa 41**.



Kuva 41. Hapen tilavuusosuus savukaasussa syklonin jälkeen (tapaus 3).

Kuvan perusteella näyttää, että alkuosuuden simulointi on ollut epätarkkaa, mutta tässä tapauksessa kyseessä on todennäköisesti mittauksen epätarkkuus. Alkutilanteessa hapen tilavuusosuuden mitattu arvo on noin 18 % tilavuusosuudesta. Oletuksena on kuitenkin, että kattila on tuuletettu ilmalla, jolloin pitoisuuden pitäisi vastata suurin piirtein ilmakehän pitoisuutta. Tätä epävarmuutta lukuun ottamatta, simuloitujen arvojen näyttävät vastaavan mitattuja arvoja hyvin.

Kolmannen tapauksen simuloinnit vaikuttavat kokonaisuutena epätarkimmilta tutkituista tapauksista. Etenkin petimateriaali ja pohjapetin lämpötilan simulointi lisäävät hieman epävarmuutta kaikkien tulosten luotettavuudesta. Toisaalta savukaasun lämpötila ja kattilan happipitoisuus vastaavat mitattuja arvoja pääasiassa hyvin.

7. YHTEENVETO

7.1 Johtopäätökset

Työn tavoitteen saavuttamiseksi tarvittava malli saatiin muokkaamalla olemassa olevaa kiertoleijupetikattilan dynaamisen mallin savukaasupuolta siten, että mallin avulla voidaan simuloida kattilan käynnistystilanteita. Malli pystyy sujuvasti simuloimaan erilaisia tilanteita, joita käynnistyksessä tulee vastaan. Tämä tarkoittaa, että simulointien avulla voidaan tutkia käynnistystilanteessa kiinnostavien muuttujien käyttäytymistä hyvällä luotettavuudella. Työ voidaan todeta tältä osin onnistuneeksi.

Savukaasupuolta tutkittaessa kriittisin komponentti käynnistyksen aikana on muuraus. Suurimmat muurauksen lämpötilagradientit ilmenevät, kun polttimet käynnistetään ensimmäistä kertaa sekä hetkellä, kun kiinteää polttoainetta aletaan syöttää. Tutkituissa tapauksissa vaikuttaisi olevan varaa tehostaa lämmitystä lähes koko ajalta, kun lämmitetään pelkillä käynnistyspolttimilla. Käynnistyspolttimien tehoja olisi muurauksen puolesta varaa kasvattaa hitaimmassa tapauksessa jopa moninkertaiseksi. Nopeimmassakin käynnistyksessä gradienteissa olisi vielä kasvattamisen varaa ajoittain melko paljon. Käynnistysaikaa voitaisiin näin lyhentää.

Kaikki tutkittavat käynnistykset ovat luonteeltaan hyvin erilaisia. Niiden voidaan olettaa näin ollen sopivan hyvin mallin validointiin, koska sen täytyy osata ottaa erilaiset tilanteet ja muutosnopeudet huomioon, jotta simuloidut tulokset vastaisivat hyvin mitattuja arvoja. Simulointituloksia voidaan pääosin pitää onnistuneina, sillä samalla mallilla ja samoilla parametreilla saatiin kaikkien ylösajojen mittausdataan verrattuna samankaltaisia tuloksia. Suureet jotka eivät ole todellisesta prosessista mitattavissa, ovat myös mielenkiintoisia tutkinnan kohteita ja tuovat omalta osaltaan lisäarvoa simulointituloksille.

Työssä käytettyjen mittausdatojen perusteella voidaan todeta, että ylösajoja on tehty monella eri tavalla ja nopeudella. Tämä tarkoittaa vaihtelua myös niiden laadussa ja tehokkuudessa. Käynnistysten simuloinnista voi varmasti olla hyötyä tulevien käynnistysten suunnittelussa, kun prosessin mittauksien ja käyttökokemusten rinnalle saadaan enemmän laskennallista tukea. Kattilan nopea käynnistys rajoitusten puitteissa on kuitenkin taloudellinen vaihtoehto ja myös tämän työn taustalla oleva tärkein yksittäinen tavoite. Mallia voidaan käyttää erilaisten käynnistysnopeutta rajoittavien muuttujien, kuten muurauksen lämpötilagradienttien, tutkimiseen.

7.2 Jatkokehitys

Malli ei ole täydellinen, eikä kaikilta osin täysin valmis, mutta hyvin suuntaa antava ja jatkokehityskelpoinen. Joitain puuttuvia elementtejä on myös tällä hetkellä tiedossa, mutta niitä ei joko ajan rajallisuuden tai laskennallisten yksinkertaistuksien vuoksi otettu tässä työssä huomioon. Esimerkiksi kiertokaasun avulla voidaan hieman säädellä petin lämpötilaa, mutta sitä ei tässä työssä olla huomioitu.

Seuraavana loogisena kehitysaskeleena on vesihöyrypuolen ja tässä työssä muokatun savukaasupuolen yhdistäminen yhdeksi toimivaksi malliksi. Tämän työn malliakkin on mahdollista kehittää vielä monella tavalla. Tarkennuksia voidaan tehdä moneen laskennalliseen asiaan, ja validoida edelleen esimerkiksi toiselta kattilalta mitattuihin tuloksiin. Tästä päästään myös mallin käytettävyyden ja soveltuvuuden parantamiseen. Esimerkiksi parametrien muokattavuutta toiselle kattilalle sopiviksi voitaisiin joltain osin tehdä helpommaksi ja mallin sisältämien funktioiden kommentointia voitaisiin selkeyttää ja parantaa. Myös mallin laskentanopeutta ja -stabiiliutta voisi olla mahdollista parantaa laskentateknisillä muutoksilla.

Käynnistystilanteiden simulointi on laskennallisesti haastavaa, koska mallin on kyettävä kuvaamaan prosessin käyttäytymistä laajalla toiminta-alueella, joka sisältää muun muassa pysähtyneitä ja hyvin hitaita virtauksia. Simuloitavat ajanjaksot ovat lisäksi pitkäkestoisia verrattuna muihin tilanteisiin (esim. kuormanmuutokset), joita tyypillisesti tarkastellaan simuloimalla. Osaltaan tästä syystä tässä työssä jouduttiin keskittymään suurelta osin myös mallin toimivuuteen, sillä laskenta kaatui useasti mallin ajautuessa poikkeuksellisiin arvoihin. Esimerkkinä virheestä, jolle ei tässä työssä ehditty toteuttaa parempaa ratkaisua on kuvassa 32 esiintyvä polttoaineen kosteuden aiheuttama jäähdyttävä vaikutus. Muutenkin parannettavaa malliin jäi etenkin hetkelle, kun järjestelmään syötetään useampaa polttoainetta samanaikaisesti. Jatkossa malliin voitaisiin kehittää polttoaineiden yhdistämiselle jokin parempi vaihtoehto, joka tällä hetkellä on karkea linearisointi, eikä anna täysin oikeaa tulosta. Yksi vaihtoehto voisi olla käynnistyspolttoaineen ja kiinteän polttoaineen laskentojen jakaminen kahteen täysin eri funktiohaaraan, mikä toisaalta tekisi mallista vielä hieman entistä raskaamman. Myös esimerkiksi petin käyttäytymisen laskentaa olisi vielä mahdollista tarkentaa.

Mahdollisesti pidemmällä tulevaisuudessa voidaan myös miettiä laajempia muutoksia malliin, kuten tulipesän jakamista lohkoihin myös sivuttaissuunnassa. Tällä muutoksella olisi mahdollista saada tarkempaa tietoa esimerkiksi käynnistyspolttimien vaikutuksesta lämmityksen alkuvaiheessa, kun polttimia käytetään yksi kerrallaan tai kun kaikki poltti-

met eivät vielä ole käynnissä. Tällä voitaisiin tarkentaa myös petimateriaalin ja lämmönsiirron käyttäytymistä, koska virtaus on luonteeltaan erilaista tulipesän keskiosassa kuin seinien läheisyydessä. Yksi ajatus tulevaisuuteen voisi myös olla laskentaosuuden siirtämisestä ulkopuolisille klustereille laskentatehon ja -nopeuden parantamiseksi. Mallin kehittyessä laskennallisesti raskaammaksi, tällainen tehostaminen voisi olla harkitseminen arvoinen asia.

LÄHTEET

- [1] Euroopan Unionin toiminta-alat: Energia, Euroopan Unioni, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2019): https://europa.eu/european-union/topics/energy_fi
- [2] Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriö, verkkoaineisto, 2016. Saatavissa (viitattu 1.11.2019): <https://tem.fi/documents/1410877/3570111/Kansallinen+energia-+ja+ilmastostrategia+vuoteen+2030+24+11+2016+lopull.pdf/a07ba219-f4ef-47f7-ba39-70c9261d2a63/Kansallinen+energia-+ja+ilmastostrategia+vuoteen+2030+24+11+2016+lopull.pdf>
- [3] Sähkön hankinta energialähteittäin, Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannat, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2019): pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehk/statfin_ehk_pxt_015_fi.px/
- [4] F. Casella, M. Farina, F. Righetti, R. Scattolini, D. Faille, F. Davelaar, A. Tica, H. Gueguen, D. Dumur, An optimization procedure of the start-up of Combined Cycle Power Plants, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) 44(1), 2011, pp. 7043–7048.
- [5] S.J. Mills, Integrating intermittent renewable energy technologies with coal-fired power plant, IEA Clean Coal Centre, October 2011, 85 p.
- [6] S.A. Lefton, P.M. Besuner, The Cost of Cycling Coal Fired Power Plants, Coal Power Magazine, Winter 2006, pp. 16–20.
- [7] G.N. Stamatelopoulos, T. Heinzl, Operational Flexibility of Coal-Fired Power plants, EnBW AG, Germany, 10 p.
- [8] C. Wang, Y. Zhao, M. Liu, Y. Qiao, D. Chong, J. Yan, Peak shaving operational optimization of supercritical coal-fired power plants by revising control strategy for water-fuel ratio, Applied Energy 216, 2018, pp. 212–223.
- [9] N. Kumar, P. Besuner, S. Lefton, D. Agan, D. Hilleman, Power Plant Cycling Costs, NREL Technical Monitor: Debra Lew, April 2012, 83 p.
- [10] F. Alobaid, N. Mertens, R. Starkloff, T. Lanz, C. Heinze, B. Epple, Progress in dynamic simulation of thermal power plants, Progress in Energy and Combustion Science 59, 2016, pp. 79–162.
- [11] E. Andersson, Development of a dynamic model for start-up optimization of coal-fired power plants, KTH Electrical Engineering, Master's Degree Project, Stockholm, Sweden, June 2013, 52 p.
- [12] T. Yli-Fossi, V. Ylä-Outinen, M. Vilkkö, The Role of Dynamic Simulation in Detailed Design of a Commercial CFB Boiler, B5-3, 23rd International Conference on FBC, Seoul, Korea, May 13–17, 2018, pp. 579–587.
- [13] P.U. Sunil, J. Barve, P.S.V. Nataraj, Mathematical modeling, simulation and validation of a boiler drum: Some investigations, Energy 126, 2017, pp. 312–325.

- [14] M. Huhtinen, A. Kettunen, P. Nurminen, H. Pakkanen, Höyrykattilatekniikka, Edita Prima Oy, Helsinki 2004, 379 s.
- [15] P. Basu, C. Kefa, L. Jestin, Boilers and Burners, Design and Theory, Mechanical Engineering Series, Springer Science+Business Media, LLC, New York 2000, 563 p.
- [16] CYMIC boilers - using CFB technology, Valmet Technologies Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2019): <https://www.valmet.com/energyproduction/cfb-boilers/>
- [17] A. Arjunwadkar, P. Basu, B. Acharya, A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers, Applied Thermal Engineering 102, 2016, pp. 672–694.
- [18] Valmet Technologies Oy, Säättökuvaus (Salainen)
- [19] S. Basu, A.K. Debnath, Power Plant Instrumentation and Control Handbook, A Guide to Thermal Power Plants, Academic Press, Elsevier, 2015, 921 p.
- [20] Valmet Technologies Oy, Käyttö- ja huolto-ohjeet CYMIC™ kattila (Salainen)
- [21] L. Shan, M. Zhang, Y. Zhang, C. Liu, H. Yang, A dynamic model for gas-solid hydrodynamic in CFB boiler, B7-4, 23rd International Conference on FBC, Seoul, Korea, May 13–17, 2018, pp. 678–685.
- [22] T. Joronen, J. Kovács, Y. Majanne, Voimalaitosautomaatio, Suomen Automaatioseura ry, Helsinki 2007, 276 s.
- [23] Valmet Technologies Oy, CFB-kattilan toimintaperiaatteet (Sisäinen)
- [24] Lagisza Power Plant, Power Technology, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2019): <https://www.power-technology.com/projects/lagisza/>
- [25] K. Ogata, Modern control engineering, 5th edition, Prentice Hall, 2010, 894 p.
- [26] Y.A. Cengel, Heat Transfer: A Practical Approach, Second Edition, McGraw-Hill, 2002, 888 p.
- [27] MATLAB documentation, MathWorks. Saatavissa: <https://se.math-works.com/help/matlab/>
- [28] F. Casella, F. Donida, J. Åkesson, Object-Oriented Modeling and Optimal Control: A Case Study in Power Plant Start-Up, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) 44(1), 2011, pp. 9549–9554.
- [29] F. Alobaid, R. Starkloff, S. Pfeiffer, K. Karner, B. Epple, H. Kim, A comparative study of different dynamic process simulation codes for combined cycle power plants – Part A: Part loads and off-design operation, Fuel 153, 2015, pp. 692–706.
- [30] F. Alobaid, R. Starkloff, S. Pfeiffer, K. Karner, B. Epple, H. Kim, A comparative study of different dynamic process simulation codes for combined cycle power plants – Part B: Start-up procedure, Fuel 153, 2015, pp. 707–716.

- [31] P. Sindareh-Esfahani, E. Habibi-Siyahpoush, M. Saffar-Avval, A. Ghaffari, F. Bakhtiari-Nejad, Cold start-up condition model for heat recovery steam generators, *Applied Thermal Engineering* 65(1–2), 2014, pp. 502–512.
- [32] P. Sindareh-Esfahani, S.S. Tabatabaei, J.K. Pieper, Model predictive control of a heat recovery steam generator during cold start-up operation using piecewise linear models, *Applied Thermal Engineering* 119, 2017, pp. 516–529.
- [33] D. Pallarès, F. Johnsson, Macroscopic modelling of fluid dynamics in large-scale circulating fluidized beds, *Progress in Energy and Combustion Science* 32(5), 2006, pp. 539–569.
- [34] J. Taler, P. Dzierwa, D. Taler, P. Harchut, Optimization of the boiler start-up taking into account thermal stresses, *Energy* 92, 2015, pp. 160–170.
- [35] K. Krüger, R. Franke, M. Rode, Optimization of boiler start-up using a nonlinear boiler model and hard constraints, *Energy* 29(12), 2004, pp. 2239–2251.
- [36] T. Zhang, Z. Zhao, Y. Li, X. Zhu, The simulation of start-up of natural circulation boiler based on the Astrom-Bell model, *AIP Conference Proceedings* 1794, 2017, 8 p.
- [37] M. Huttunen, J. Peltola, S. Kallio, L. Karvonen, T. Niemi, V. Ylä-Outinen, Analysis of the processes in fluidized bed boiler furnaces during load changes, *Energy Procedia* 120, 2017, pp. 580–587.
- [38] J. Taler, B. Węglowski, D. Taler, T. Sobota, P. Dzierwa, M. Trojan, P. Madejski, M. Pilarczyk, Determination of start-up curves for a boiler with natural circulation based on the analysis of stress distribution in critical pressure components, *Energy* 92, 2015, pp. 153–159.
- [39] S. Ma, J. Guo, W. Chang, G. Yue, H. Zhang, Study on the dynamic balance behaviors of bed material during the start-up process of a circulating fluidized bed boiler, *Powder Technology* 280, 2015, pp. 35–41.
- [40] R. Raiko, I. Kurki-Suonio, J. Saastamoinen, M. Hupa, *Poltto ja palaminen*, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 1995, 629 s.
- [41] E. Alakangas, M. Hurskainen, J. Laatikainen-Luntama, J. Korhonen, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, *VTT Technology* 258, 2016, 229 s. Saatavissa (viitattu 1.11.2019): <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- [42] P. Köykkä, *Kiertoleijukattilan dynaaminen mallintaminen*, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2007, 86 s.
- [43] Y. Hua, G. Flamant, J. Lu, D. Gauthier, Modelling of axial and radial solid segregation in a CFB boiler, *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification* 43(8), 2004, pp. 971–978.
- [44] U. Arena, R. Chirone, M. D'Amore, M. Miccio, P. Salatino, Some issues in modelling bubbling and circulating fluidized-bed coal combustors, *Powder Technology* 82(3), 1995, pp. 301–316.
- [45] A. Maximov, *Radiative Heat Transfer in Boiler Furnaces*, Master's thesis, Lappeenranta University of Technology, 2008, 94 p.

- [46] A. Blaszczyk, W. Nowak, Heat transfer behavior inside a furnace chamber of large-scale supercritical CFB reactor, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 87, 2015, pp. 464–480.
- [47] D. Kunii, O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*, Second edition, Butterworth-Heinemann, H. Brenner, Series in Chemical Engineering, 1991, 491 p.
- [48] A. Błaszczyk, J. Krzywański, A comparison of fuzzy logic and cluster renewal approaches for heat transfer modeling in a 1296 t/h CFB boiler with low level of flue gas recirculation, *Archives of Thermodynamics* Vol. 38(1), 2017, pp. 91–122.
- [49] A. Blaszczyk, W. Nowak, Bed-to-wall heat transfer coefficient in a supercritical CFB boiler at different bed particle sizes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 79, 2014, pp. 736–749.
- [50] F. Johnsson, B. Leckner, Vertical distribution of solids in a CFB-furnace, *Proceedings of the International Conference on Fluidized Bed Combustion 1*, Orlando, May 7–10, 1995, pp. 671–679.
- [51] C. Breitholtz, B. Leckner, A.P. Baskakov, Wall average heat transfer in CFB boilers, *Powder Technology* 120(1), 2001, pp. 41–48.
- [52] T. Jäntti, Kiertoleijukattilan dynaaminen simulointi, *Diplomityö*, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 1996, 86 s.
- [53] T. Kataja, Kerrosleijukattilan dynaaminen mallintaminen, *Diplomityö*, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2007, 97 s.
- [54] K.J. Åström, R.D. Bell, Drum-boiler dynamics, *Automatica* 36(3), 2000, pp. 363–378.

LIITE A: SAVUKAASULASKUESIMERKKI

Esimerkki: Polttoaineen kuiva osuus sisältää hiiltä 70 vol-%, vetyä 10 vol-%, rikkiä 0,1 vol-%, happea 8 vol-%, typpeä 1,9 vol-% ja tuhkaa loput eli 10 vol-%. Polttoaineessa on kosteutta 10 vol-%. Lasketaan palamisessa syntyvän savukaasun koostumus ja tarvittava hapen määrä, kun polttoainetta poltetaan yksi mooli. Lasketaan lisäksi kiinteän polttoaineen arvioitu lämpöarvo Dulong'in kaavalla.

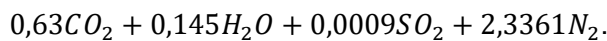
Ratkaisu: Koska polttoaineessa on kosteutta 10 vol-%, muiden lähtöaineiden osuudet voidaan kertoa 0,9:llä, jolloin saadaan niiden osuudet yhtä moolia polttoainetta kohden. Tällöin lähtötilanteeksi kaavaan (1) sijoittamalla saadaan:

$$C_{0,63}H_{0,09}O_{0,072}N_{0,0171}S_{0,0009} + \left(0,63 + \frac{0,09}{4} - \frac{0,072}{2} + 0,0009\right) (O_2 + 3,77N_2).$$

Tästä nähdään jo suoraan, että hiilidioksidia syntyy 0,63 mol ja rikkidioksidia syntyy 0,0009 mol. Vettä syntyy reaktiossa $0,09/2=0,045$ mol ja kun siihen lisätään polttoaineen kosteus 0,1 mol, niin savukaasu sisältää yhteensä 0,145 mol vettä. Savukaasun typpipitoisuus saadaan laskemalla polttoilman ja polttoaineen typpipitoisuudet yhteen:

$$\left(0,63 + \frac{0,09}{4} - \frac{0,072}{2} + 0,0009\right) \cdot 3,77 + \frac{0,0171}{2} = 2,3361 \text{ mol.}$$

Eli kaavan (1) reaktiotuotteiden puoli tulee muotoon:



Savukaasua syntyy siis yhteensä 3,1120 mol.

Reaktion tarvitsema hapen määrä puolestaan on:

$$0,63 + \frac{0,09}{4} - \frac{0,072}{2} + 0,0009 = 0,6174 \text{ mol.}$$

Ja kun tähän lisätään ilman mukana tuleva typen määrä, saadaan yhteensä tarvittavaksi polttoilmamääräksi:

$$0,6174 \cdot (1 + 3,77) = 2,945 \text{ mol.}$$

Käytetään polttoaineen lämpöarvon laskentaan Dulong'in kaavaa (4), johon aineiden arvot tulee sijoittaa tuhkattomana eli jaetaan kuivan polttoaineen pitoisuudet 0,9:llä ja sijoitetaan yhtälöön:

$$q_{s,daf} = 0,3382 \cdot 77,78 + 1,4428 \cdot \left(11,11 - \frac{8,889}{8}\right) + 0,0942 \cdot 0,1111,$$

jolloin ylemmäksi lämpöarvoksi saadaan:

$$q_{s,daf} = 40,74 \text{ MJ/kg.}$$

Sijoitetaan tämä alemman lämpöarvon kaavaan (5) ja tämän jälkeen lasketaan kostean polttoaineen alempi lämpöarvo kaavalla (6):

$$q_{i,daf} = 40,74 - 0,2196 \cdot 11,11 = 38,30 \text{ MJ/kg}$$

$$q_{iw} = 38,30 \cdot \frac{(100-10)}{100} \cdot \frac{(100-10)}{100} - 0,02443 \cdot 10 = 30,78 \text{ MJ/kg.}$$

Eli lämpöenergiaa vapautuu noin 30,78 MJ, kun kyseistä polttoainetta poltetaan yksi kilogramma.

Laskelmien kanssa täytyy olla huolellinen ja varmistaa, että ainemäärät ja massat eivät mene sekaisin.