



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOHANNA NIEMINEN
BIOMASSAA POLTTAVAN KERROSLEIJUKATTILAN TULIPESÄN
KUONAANTUMISEN MALLINTAMINEN
Diplomityö

Tarkastajat: professori Antti Oksanen ja DI Aino Leppänen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksissa 6. helmikuuta 2013
ja 8. toukokuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

NIEMINEN, JOHANNA: Biomassaa polttavan kerrosleijukattilan tulipesän kuonaantumisen mallintaminen

Diplomityö, 105 sivua

Syyskuu 2013

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastajat: Professori Antti Oksanen ja DI Aino Leppänen

Avainsanat: Leijupoltto, biomassa, kuonaantuminen, tuhka, lämmönsiirto, CFD, mallinnus

Tuhkan sulaminen ja tulipesän seinille osuvien tahmeiden tuhkapartikkelien aiheuttama kuonaantuminen synnyttävät ongelmia polttoprosesseissa. Seinillä olevat kerrostumat huonontavat lämmönsiirtoa, aiheuttavat korroosiota ja voivat suuriksi kasvaessaan rajoittaa kaasun virtausta. Kerrosleijukattiloissa myös petiin putoavat suuret kuonakappalet aiheuttavat ongelmia. Tämän työn tavoitteena on testata kirjallisuudesta poimittujen kuonaantumismallien toimivuutta käytännön sovelluksissa. Mallien avulla tutkitaan, missä höyrystimen alueella on kuonaantumisen riski ja otetaan kuonaantuminen huomioon tulipesän ja höyrypuolen välisessä lämmönsiirrossa.

Työ jakaantuu kirjallisuusselvitykseen kuonaantumisesta ja siihen liittyvistä ilmiöistä sekä mallinnusosioon, jossa sovelletaan kirjallisuusselvityksen perusteella valittuja malleja ja yritetään löytää biomassan leijupolttoon sopiva kuonaantumismalli. Mallin ensimmäinen osa on seinille osuvien partikkelien tarttumismalli, jonka perusteella voi päätellä, millä alueilla tulipesässä tapahtuu kuonaantumista. Toisessa osassa tarkastellaan kuonaantumisen vaikutusta lämmönsiirtoon ja tulipesän olosuhteisiin.

Mallinnus tehdään kuorta sekä kuoren ja lietteen seosta polttavalle kerrosleijukattilalle ja siinä käytetään virtauslaskentaohjelmaa FLUENT 12.1. Käytetty tarttumismalli perustuu pintaan osuvan partikkelin sisältämän tuhkan sulamisasteeseen ja partikkelin kineettiseen energiaan. Tarttumismallin mukaan kattila kuonaantuu eniten höyrystimen etu- ja takaseiniltä sekundääri-ilman korkeudelta ja sen alapuolelta.

Tulipesän reunaehtoja mallinnettaessa lähdetään liikkeelle joko ennalta määräytyistä höyrystinpintojen lämpötiloista tai kuonakerroksen paksuuksista. Reunaehdot määritellään niin, että lämmönsiirto pienenee eniten alueilla, joilla kuonaantumisenopeus on suurin. Pintojen emissiviteettiä nostetaan, jotta saadaan kokonaislämmönsiirto vastaamaan todellisuutta. Tämä nostaa lämpövirran tiheyksiä puhtaammilla pinnoilla. Kuonaantumismallin käyttö nostaa kaasun lämpötiloja tulipesän alaosassa.

Tutkimuksen perusteella partikkelien tarttumismalli on helppo ottaa käyttöön. Tarkempi malli kuitenkin vaatii lisää tietoa tuhkan käyttäytymisestä palamisprosessissa. Kuonaantumisen vaikutusta lämmönsiirtoon on vaikeampi mallintaa, koska kuonaantuminen on todellisuudessa aikariippuva prosessi eikä kerrostuman paksuuteen vaikuttavia tekijöitä tunneta hyvin. Jonkinlaisia approksimaatioita tilanteesta on kuitenkin mahdollista tehdä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

NIEMINEN, JOHANNA: Modelling slagging in a bubbling fluidized bed boiler burning biomass

Master of Science Thesis, 105 pages

September 2013

Major: Power plant and Combustion Technology

Examiner: Professor Antti Oksanen and M.Sc. Aino Leppänen

Keywords: Fluidized bed combustion, biomass, slagging, ash, heat transfer, CFD, modelling

Slagging caused by melting of ash and the impaction of sticky ash particles to furnace walls causes problems in combustion processes. Deposits on the wall reduce heat transfer, cause corrosion, and if they grow large, they can restrict gas flow. In bubbling fluidized bed boilers, the shedding of large deposits can also cause problems. The goal of this thesis is to test different slagging models taken from literature. With the models, the location of areas with a risk of slagging is studied, and slagging is taken into account in the heat transfer between combustion gases and steam.

This work is divided into a literature review of slagging and the phenomena related to it and to a part where models from the literature review are chosen for the modeling of BFB boilers burning biomass. The first part of the slagging model is the sticking model of particles impacting to the evaporator walls. This is used to find the areas with a risk of slagging problems. In the second part, the effect of slagging to heat transfer and boiler conditions is studied.

Modelling is performed with the CFD code FLUENT 12.1 for a BFB boiler burning bark as well as a mixture of bark and sludge. The sticking model used is based on the molten fraction of ash as well as the kinetic energy of the impacting particle. According to the model, slagging in the boiler mostly occurs in front and back walls of the boiler in the secondary air level and below it.

When modelling the boundary conditions of the furnace, the approach is either to predefine the temperature of the evaporator walls or to predefine the thickness of the deposits on the walls. The boundary conditions are determined so that the heat transfer is reduced most where most slagging occurs. The emissivity of the walls is increased in order to make the total heat transfer rate correspond to reality. This increases heat transfer in the areas with less slagging. The use of the slagging model increases the gas temperatures in the lower part of the furnace.

According to the study, the particle sticking model is easy to implement. However, a more precise model requires better knowledge of the behaviour of ash in the combustion process. The effect of slagging to heat transfer is more difficult to take into account because slagging is a time dependent process and the factors affecting the deposit thickness are not well known. However, it is possible to make some approximations of the situation.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknologian tutkimuskeskus VTT:llä keväällä ja kesällä 2013. Työ on tehty osana Tekesin FUSEC-projektia (Future Fuels for Sustainable Energy Conversion). Haluankin kiittää Tekesiä työn rahoituksesta.

Haluaisin kiittää työtäni ohjannutta Lars Kjälmania mahdollisuudesta diplomityön tekemiseen VTT:llä sekä arvokkaista neuvoista ja keskusteluista työn aikana. Lisäksi haluaisin kiittää VTT:n tutkija Cyril Bajamundia työssä käytetyn tuhka-analyysin tekemisestä ja hyödyllisistä tuhka-aiheisista keskusteluista. Kiitos myös Marko Huttuselle ja Perttu Jukolalle sekä muulle VTT:n mallinnustiimille diplomityöni tekemiseen saamastani avusta.

Työn tarkastivat professori Antti Oksanen ja DI Aino Leppänen Voimalaitos- ja polttotekniikan tutkimusryhmästä Kemian ja biotekniikan laitoksella. Kiitän heitä kommentteista ja korjauksista työhöni.

Lopuksi haluaisin kiittää perhettäni ja ystäviäni sekä erityisesti Lassea, joka antoi diplomityön ja opiskeluvuosien aikana korvaamatonta tukea.

Espoossa 15.8.2013

Johanna Nieminen

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Kuonaantumisen teoria.....	3
2.1	Tuhkan käyttäytyminen palamisprosessissa	3
2.1.1	Tuhkan koostumus.....	4
2.1.2	Tuhkakomponenttien höyrystyminen	5
2.1.3	Tuhkapartikkelien mallinnus	6
2.1.4	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	7
2.1.5	Kuonan koostumus	9
2.2	Hiukkasten kulkeutuminen lämmönsiirtopinnoille	10
2.2.1	Hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen.....	10
2.2.2	Turbulentti iskeytyminen.....	10
2.2.3	Termoforeesi	11
2.2.4	Kondensaatio	11
2.2.5	Kemiallinen reaktio.....	12
2.3	Hiukkasten tarttuminen pinnoille.....	12
2.3.1	Hiilen poltossa ja kaasutuksessa käytetyt mallit.....	12
2.3.2	Biomassan poltossa käytetyt mallit.....	17
2.3.3	Hiukkasen kineettisen energian vaikutus tarttumiseen.....	19
2.4	Kuonakerroksen kasvu	21
2.4.1	Kerrostuman kasvu	21
2.4.2	Kuonan virtausmallit.....	22
2.4.3	Kerrostuman poistomekanismit	24
2.5	Tuhkan ja kuonan ominaisuudet	25
2.5.1	Tiheys.....	25
2.5.2	Pintajännitys.....	26
2.5.3	Viskositeetti	27
2.5.4	Lämmönjohtavuus	29
2.5.5	Emissiviteetti	32
3	Lähtötiedot ja käytetyt mallit	34
3.1	Rauman laskentatapauksen kuvaus	34
3.1.1	Kattilan mitat ja ilman jako	34
3.1.2	Polttoaineet	36
3.1.3	Tulipesän seinien lämpötilamittaukset.....	37
3.2	Laskentatapausten yleinen mallinnus ja kuonaantumismallin lähtöoletukset. 38	
3.2.1	Tulipesän virtauslaskenta.....	39
3.2.2	Kuonaantumismallissa tehdyt oletukset.....	39
3.3	Partikkelien tarttumismalli	40
3.3.1	Tarttumiskriteerit	41
3.3.2	Tuhkan sulamislämpötilat.....	42
3.4	Lämmönsiirron mallinnus: reunaehtona kuonan pintalämpötila	44
3.4.1	Pinnan lämpötilan määrittäminen	44

3.4.2	Pinnan emissiviteetin määrittäminen	46
3.4.3	Kuonakerroksen paksuuden laskeminen.....	47
3.5	Lämmönsiirron mallinnus: reunaehtona kerrostuman paksuus	48
3.6	Tulipesän olosuhteet.....	48
4	Tulokset.....	51
4.1	Partikkelien tarttuminen tulipesän seinille	52
4.1.1	T ₁₅ -lämpötilaan ja Weberin lukuun perustuva tarttumiskriteeri	53
4.1.2	Piipitoisuuden vaikutus kuoripartikkelien tarttumiseen	57
4.1.3	Ilmakertoimen vaikutus partikkelien tarttumiseen	58
4.1.4	Sulamisasteesta riippuva tarttumistodennäköisyys.....	59
4.2	Seinän lämpötilaan perustuva kuonaantumismalli.....	60
4.2.1	Seinien lämpötilat	61
4.2.2	Vaikutus lämmönsiirtoon ja emissiviteettiin	62
4.2.3	Kuonakerroksen paksuus	64
4.2.4	Eri emissiviteetin käyttö likaiselle ja puhtaalle pinnalle	65
4.3	Kerrostuman paksuuteen perustuva kuonaantumismalli.....	67
4.3.1	Valitut kuonakerroksen paksuudet.....	67
4.3.2	Seinien lämpötilat	68
4.3.3	Vaikutus lämmönsiirtoon ja emissiviteettiin	69
4.4	Kuonaantumismallin vaikutukset tulipesässä	70
4.4.1	Vaikutus tulipesän lämpötilaprofiiliin	70
4.4.2	Vaikutus tyyppiyhdisteiden muodostumiseen	72
4.4.3	Muut vaikutukset tulipesässä.....	74
4.4.4	Kuonaantumisen vaikutus partikkelien tarttumiseen.....	75
4.5	Mallien soveltaminen toiseen kattilaan.....	77
4.5.1	Partikkelien tarttuminen.....	78
4.5.2	Kuonaantumisen vaikutus lämmönsiirtoon	79
5	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	81
5.1	Partikkelien tarttumisen tarkastelu.....	81
5.1.1	Eri tarttumismallien vertailu	81
5.1.2	Tuhkan muodostumisen ja kulkeutumisen mallintamisen ongelmat	83
5.1.3	Muut tarttumismallin ongelmat	84
5.1.4	Vertailu muihin tutkimuksiin.....	85
5.2	Kuonaantumisen vaikutusten mallintaminen	86
5.2.1	Laskettujen tapausten vertailu	86
5.2.2	Emissiviteetin vaikutus tuloksiin	90
5.2.3	Kuonaantumismallien vaikutus tulipesässä	91
5.2.4	Kuonakerroksen paksuutta rajoittavat tekijät	92
5.3	Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet	93
6	Yhteenveto	95
	LÄHTEET	98

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BFB	Kerrosleijukattila, bubbling fluidized bed boiler
CFD	Virtauslaskenta, computational fluid dynamics
LHV	Alempi lämpöarvo, lower heating value
UDF	Käyttäjän määrittelemä funktio, user defined function
a_i	Tuhkan sulamista kuvaavan korrelaation vakio Urbain-mallin kerroin
$\frac{A}{B}$	Happo-emässuhde
b_i	Urbain-mallin kerroin Tuhkan sulamista kuvaavan korrelaation vakio
c	Watt-Fereday-mallin kerroin
c_i	Tuhkan sulamista kuvaavan korrelaation vakio
c_p	Ominaislämpökapasiteetti
d	Halkaisija
d_i	Tuhkan sulamista kuvaavan korrelaation vakio
D	Partikkelin maksimaalisen ja alkuperäisen halkaisijan suhde
e_p	Eroosiokerroin
E_{kin}	Partikkelin kineettinen energia
f	Sulaneen tuhkan massaosuus
F	Huokoisuuteen liittyvä kerroin
g	Putoamiskiiktyvyys
h	Lämmönsiirtokerroin
h_f	Faasimuutosentalpia
k	Lämmönjohtavuus
m	Massa Watt-Fereday-mallin kerroin
\dot{m}	Massavirta
\dot{m}'	Massavirta pituusyksikköä kohden
\dot{m}''	Massavirta pinta-alaa kohden
\dot{m}'''	Massavirta tilavuutta kohden
p	Todennäköisyys partikkelin tai seinän tahmeudelle
q	Lämpövirran tiheys, lämpövuoto
Q	Lämpömäärä
r	Säde
Re	Reynoldsin luku
S_ϕ	Virtausyhtälön lähdetermi
t	Aika
T	Lämpötila
T_m	Tuhkan sulamislämpötila

T_s	Tuhkan pehmenemislämpötila
T_y	Lämpötila, jossa tuhkan massasta on sulanut y %
u	Nopeus
V	Tilavuus
We	Weberin luku
x_i	Mooliosuus
y	Watt-Fereday-mallin kerroin
	Etäisyys kuonakerroksen pinnalta
y_i	Massaosuus
α	Iskeytymiskulma
	Pinnan kaltevuus
	Urbain-mallin kerroin
δ	Kerrostuman paksuus
Δx	Laskentakopin leveys
ε	Emissiviteetti
θ	Kontaktikulma
κ	Sulavien ja sintraantuvien oksidien suhde
λ	Ilmakerroin
η_t	Tarttumistodennäköisyys
μ	Viskositeetti
ρ	Tiheys
σ	Pintajännitys
	Stefan-Boltzmannin vakio
τ_p	Leikkausjännitys
ϕ	Huokoisuus
	Virtausyhtälön yleinen suure

Alaindeksit

0	Alkutila
amf	Amfoteerinen
avg	Keskiarvo
b	Biomassa
conv	Konvektiivinen
cr	Kriittinen
cv	Kriittinen viskositeetti
g	Kaasu
h	Hiili
inc	Tuleva säteily
k	Kuona
l	Nestemäinen
max	Maksimi

min	Minimi
muod	Lasia muodostava
muok	Lasia muokkaava
p	Partikkeli
r	Reagoiva partikkeli
rad	Säteily
s	Kiinteä
sisään	Laskentakoppiin sisään tuleva
t	Tarttuva partikkeli
th	Tehollinen
tot	Kokonais-
ulos	Laskentakopista ulos menevä
w	Kuonakerroksen alla oleva höyrystinpinta

1 JOHDANTO

Kasvavan laskentatehon sekä tulipesäprosessien eri osa-alueiden, kuten virtauksen, palamisen ja lämmönsiirron tuntemuksen parantumisen myötä virtauslaskenta (CFD) on kehittynyt tehokkaaksi apuvälineeksi polttoprosessien suunnittelussa ja tutkimuksessa. Laskennan avulla saadaan tietoa muun muassa tulipesän virtausolosuhteista ja lämpötiloista sekä savukaasujen koostumuksesta. Tässä työssä mallinnetaan biopolttoaineiden polton aiheuttamaa kuonaantumista kerrosleijukattilassa (BFB). Tulokset lasketaan virtauslaskentaohjelma ANSYS FLUENT 12.1:llä. Simuloitava kattila on Rauman kerrosleijukattila, josta simuloidaan kahta ajotilannetta. Ensimmäisessä tilanteessa poltetaan kuorta ja toisessa kuoren ja lietteen seosta. Lisäksi mallia testataan myös toiselle biomassan ja turpeen seosta polttavalle kerrosleijukattilalle.

Kuonaantuminen määritellään kattilan tulipesässä tapahtuvaksi tuhkan sulamiseksi ja jähmettymiseksi sen osuessa jäädytetyille lämmönsiirtopinnoille. Likaantuminen on samankaltainen prosessi, joka tapahtuu kattilan konvektio-osassa, erityisesti tulistinpinnoilla, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä. (Jacobson 1998.) Vaikka termi kuona tarkoittaa sulanutta tai osittain sulanutta tuhkaa, kuonaantumisessa voi syntyä myös kiinteitä kerrostumia (Bryers 1996).

Höyrystinpintojen kuonaantuminen huonontaa lämmönsiirtoa, mikä johtaa kohonneisiin lämpötiloihin sekä tulipesässä että savukaasukanavassa (Livingston 2006). Syntyvät kerrostumat voivat myös aiheuttaa korroosiota ja kasvaessaan rajoittaa kaasun virtausta. Kun kerrostuman rakenne hajoaa sen kasvaessa liian suureksi, putoava kuonakappale voi leijupoltossa aiheuttaa pedin paikallista defluidisaatiota eli pedin leijutusominaisuuksien katoamista. (Latva-Somppi et al. 1998.)

Työn tavoitteena on verrata kirjallisuuteen perustuvia kuonaantumismalleja ja löytää käytännön sovelluksiin sopiva malli. Kuonaantumisen mallintaminen jaetaan tässä työssä kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa käsitellään partikkelien tarttumista höyrystinpinoille, mitä on tutkittu paljon. Tarttumista käsittelevät mallit voidaan karkeasti jakaa hiilelle ja biomassalle kehitettyihin malleihin. Hiilen mallit perustuvat useimmiten Walshin et al. (1990) määrittelemään tarttumistodennäköisyyteen, joka riippuu tuhkan viskositeetista. Tässä työssä käytetty tarttumismalli perustuu muun muassa Kaerin (2001), Muellerin et al. (2005), Zhoun et al. (2007) ja Schulzen et al. (2011) soveltamaan menetelmään, jonka mukaan biomassan poltossa syntyvä tuhkapartikkeli on tahmea lämpötiloissa, joissa yli 15 % tuhkasta on sulanut. Partikkelien tarttumismallin tuloksena saadaan tarttuvien partikkelien massavirrat pinta-alaa kohti eli kuonaantumisnopeudet höyrystinpinoilla.

Kuonaantumismallin toisessa osassa asetetaan reunaehdot, jotka ottavat huomioon kuonaantumisen vaikutuksen lämmönsiirtoon. Tuloksia verrataan alkuperäiseen malliin, jossa reunaehtoina on käytetty vakiolämpötilaa ja -emissiviteettiä. Kuonaantumisen vaikutusten mallintamista on tutkittu vain vähän. Useimmat, kuten Richards et al. (1993) ja Kaer (2001) mallintavat kerrostuman kasvamisen aikariippuvana prosessina. Toisessa lähestymistavassa oletetaan, että kuonakerroksen paksuutta rajoittaa se kuonakerroksen pinnan lämpötila, jossa kuona muuttuu juoksevaksi ja valuu pois pinnalta. Tällaista mallia käyttävät esimerkiksi Li et al. (2009) soodakattiloissa, Wang et al. (2007) hiilen poltossa ja Yong et al. (2012) hiilen kaasutuksessa. Näistä lähestymistavoista kumpikaan ei kuitenkaan sovi mallinnettavaan tapaukseen.

Edellä selvitettyjen lähestymistapojen sijaan työssä kehitetään malli, jossa oletetaan lämmönsiirron pienenevän eniten alueilla, joilla partikkeleita tarttuu eniten. Höyrystintintojen lämmönsiirtoa mallinnetaan asettamalla joko ennalta määritetty seinän lämpötilaprofiili tai kerrostuman paksuus seinien reunaehdoksi. Valitut lämpötilat perustuvat seinille osuvien partikkeliin lämpötilaan ja tarttuvien partikkeliin massavirtaan. Valitut kerrostuman paksuudet perustuvat kattilassa tehtyihin mittauksiin ja tarttuvien partikkeliin massavirtaan. Koska kokonaislämmönsiirto kaasusta höyrypuolelle pienenee tulipesän seinien lämpötilojen noustessa, käytetään lisäksi mallia, jossa kokonaislämmönsiirto pidetään todellisuutta vastaavassa arvossa seinän emissiviteettiä säätämällä.

Työ alkaa kirjallisuusselvityksellä, jossa käsitellään tuhkapartikkeliin muodostumista sekä niiden kulkeutumista ja tarttumista tulipesän lämmönsiirtopinnoille. Kirjallisuusselvityksessä käsitellään myös kuonakerroksen kasvamista ja sen vaikutusta lämmönsiirtoon sekä tuhkan ja kuonan ominaisuuksia. Kirjallisuusselvityksen jälkeen esitellään työssä mallinnettava laskentatapaus ja käydään läpi työssä käytetyt kuonaantumiseen liittyvät mallit, jotka perustuvat kirjallisuusselvitykseen. Laskettuja tapauksia on useita ja niiden tulokset esitetään kirjallisesti ja kuvina. Tulosten esittelyn jälkeen tarkastellaan ja vertaillaan tuloksia ja tehdään niistä johtopäätöksiä.

Tässä työssä käytetyt tuhkan sulamisanalyysit on tehnyt VTT:n tutkija Cyril Bajamundi. Tulipesän mallinnus on käyttämällä samanaikaisesti FLUENTin ja VTT:n omia malleja. Vain kuonaantumiseen liittyvät mallit on kehitetty tämän työn puitteissa.

2 KUONAANTUMISEN TEORIA

Tässä luvussa käsitellään teoriaa kuonaantumisen taustalla. Kuonaantuminen tarkoittaa tulipesän säteilyalueella tapahtuvaa tuhkan tarttumista seinille. Likaantuminen on samankaltainen prosessi, joka tapahtuu tulipesän konvektio-osissa. Kuonaantumisessa syntyvät kerrostumat ovat yleensä osittain sulia kun taas likaantumisessa syntyy matalampien lämpötilojen vuoksi kiinteitä kerrostumia. (Skrifvars & Hupa 2002.)

Kuonaantumista ja likaantumista on mallinnettu paljon ja ne tapahtuvat suurelta osin samoilla mekanismeilla. Näiden prosessien tarkka mallintaminen koostuu monesta osialueesta. On tunnettava polttoaineen koostumus ja palamisen aikana tapahtuva tuhkapartikkelien muodostuminen. Muodostuneen lentotuhkan koostumus ei vastaa laboratoriossa mitattua tuhkan koostumusta, koska siihen vaikuttavat palamisen aikana tapahtuvat reaktiot ja tuhkakomponenttien höyrystyminen. Virtaus- ja lämpötilakenttä sekä partikkelien liikeradat pitää ratkaista tarkasti, jotta tiedetään, missä partikkelit osuvat seinille. Partikkelit kulkeutuvat seinille useilla mekanismeilla ja niiden tarttuminen riippuu partikkelien ominaisuuksista. (Stam et al. 2009.)

Syntyvän kerrostuman kasvunopeus riippuu tarttuvien partikkelien vuon lisäksi tuhkan ominaisuuksista ja pinnan ympäristön olosuhteista. Lämpötilalla ja tuhkan koostumuksella on suuri vaikutus kuonakerroksen ominaisuuksiin. Kerrostuman lämmönjohdavuus ja emissiviteetti vaikuttavat kerrostuman läpi kulkevan lämpövuon suuruuteen. Kerrostuneiden partikkeleiden sintraantuminen eli hitsaantuminen yhteen taas vaikeuttaa kerrostuman puhdistamista. Lika- tai kuonakerros vaikuttaa tulipesän lämmönsiirtoon ja lämpötilajakaumaan. Lisäksi suureksi kasvaneet kerrostumat voivat vaikuttaa kaasun virtaukseen. (Stam et al. 2009.)

Tässä kirjallisuusselvityksessä tarkastelu alkaa tuhkan vapautumisesta palamisen aikana, minkä jälkeen käsitellään tuhkapartikkelien kulkeutumista lämpöpinoille. Hiukkasen osuessa pintaan selvitetään, tarttuuko vai heijastuuko se. Tämän jälkeen määritetään, miten pintaan tarttuneiden hiukkasten synnyttämä kerrostuma kasvaa ja mitkä mekanismit pienentävät sitä. Viimeisessä osassa tarkastellaan tuhkan ja sen muodostaman kuonan ominaisuuksia, joilla voi olla suuri vaikutus kuonaantumiseen ja sen vaikutuksiin lämmönsiirrossa.

2.1 Tuhkan käyttäytyminen palamisprosessissa

Tuhkan alkuainekoostumuksen avulla voi saada suuntaa antavaa tietoa tuhkan käyttäytymisestä palamisen aikana. Biomassan ja hiilen tuhkat käyttäytyvät eri tavalla, koska hiilen tuhka on pääosin mineraalimuodossa, kun taas biomassan tuhka on sitoutunut polttoaineen orgaaniseen osaan. Biomassan sisältämät orgaanisesti sitoutuneet alkalit

sekä kloori ja rikki voivat höyrystyä palamisen aikana. Hiilen poltossa tuhkan höyrystyminen on sen sijaan vähäistä. Höyrystymisellä ja kemiallisilla reaktioilla on vaikutusta syntyvän kuonan koostumukseen. Sekä hiilen että biomassan tuhkat voivat sulaa palamisen aikana, mikä vaikuttaa tuhkapartikkelien tahmeuteen. Tuhkan sulamista voi seurata sulaneen tuhkan osuuden tai tuhkapartikkelin viskositeetin avulla.

2.1.1 Tuhkan koostumus

Polttoainepartikkelin sisältämä tuhka jakaantuu orgaanisesti sitoutuneeseen osaan ja mineraalihiukkasiin. Biomassoissa tuhka on sitoutunut enimmäkseen polttoaineen orgaaniseen osaan, mutta joissakin biomassoissa on myös mineraalihiukkasia. Näistä osa on peräisin ulkopuolisista lähteistä, kuten polttoaineeseen käsittelyn aikana sekoittuvasta hiekasta tai savesta. Turpeessa ja ruskohiilessä tuhka esiintyy sekä mineraalihiukkasina että orgaanisina yhdisteinä. Bitumisessa hiilessä ja antrasiitissä on vain vähän orgaanisessa muodossa olevaa tuhkaa ja suurin osa tuhkasta esiintyy niissä mineraalisulkeumina. (Skrifvars & Hupa 2002.) Orgaanisesti sitoutuneilla yhdisteillä on suurempi taipumus höyrystyä palamisen aikana kuin mineraalimuodossa olevilla, joten tuhka-komponenttien höyrystyminen on merkittävä tekijä biomassan poltossa (Lind 1999).

Yleisimmät biopolttoaineet voidaan jakaa tuhkan koostumuksen mukaan karkeasti kolmeen ryhmään: ruohokasveihin, puuperäisiin polttoaineisiin sekä ulosteperäisiin jätteisiin, kuten lanta ja viemäriete. Ruohokasveja yhdistää korkea pii- ja kaliumpitoisuus sekä matala kalsiumpitoisuus, mikä johtaa usein likaantumis- ja kuonaantumisongelmiin. Puuperäiset polttoaineet sisältävät paljon kaliumia ja kalsiumia, mutta vähemmän piitä, minkä vuoksi ne aiheuttavat vähemmän ongelmia. Ulosteperäisissä polttoaineissa on paljon kalsiumia ja fosforia. (Bryers 1996; Nutalapati et al. 2007.)

Tuhkan alkuainepitoisuus ilmoitetaan yleensä oksideina, minkä etuna on tieto hapen määrän suuruusluokasta tuhkassa. Aineet eivät kuitenkaan aina esiinny tuhkassa yksinkertaisia oksideina vaan monimutkaisempina yhdisteinä, kuten K_2SiO_3 ja $Ca(PO_4)_2$. Jotkut aineista voivat myös esiintyä klorideina, sulfideina tai karbonaateina. Raudan hapetusluku vaihtelee olosuhteiden mukaan FeO:n ja Fe₂O₃:n välillä. (Hupa 2011.)

Kemiallinen fraktionaatio eli tuhkakomponenttien erottelu liukenevuuden mukaan antaa pelkkää alkuainekoostumusta tarkempaa tietoa siitä, missä muodossa eri alkuaineet esiintyvät tuhkassa ennen palamista. Fraktionaatiossa liuotetaan polttoaine standardisoituihin vesiliuoksiin, joiden liuotusteho lisääntyy asteittain. Näin saadaan tuhkasta erotettua veteen, asetaattiin ja happoon liukenevat sekä näihin liukenemattomat osuudet. Liukenevuuden perusteella voidaan päätellä eri komponenttien kemialliset muodot. (Hupa 2011.) Kemiallinen fraktionaatio on alun perin kehitetty hiilen epäorgaanisten aineiden karakterisointiin, mutta sitä on myöhemmin muokattu sopimaan biomassojen tutkimiseen (Notalapati et al. 2007). Fraktionaation haittapuolena on kuitenkin sen aikaa vievyys ja kalleus (Stam et al. 2009).

Veteen ja asetaattiin liukenevat komponentit luokitellaan reaktiivisiksi komponenteiksi, jotka höyrystyvät helposti. Suolahappoon vain vähän liukenevat ja kokonaan liukenemattomat luokitellaan vähemmän reaktiivisiksi ja ne päätyvät todennäköisemmin

karkeisiin tuhkapartikkeleihin. Veteen liukenevia komponentteja ovat alkalisuolat, rikki ja klooriyhdisteet. Orgaanisiin aineisiin sitoutuneet yhdisteet liukenevat asetaattiin. Happoon liukenevia aineita ovat karbonaatit ja sulfaatit. Liukenematon jäännös koostuu pääosin silikaateista ja muista mineraalimuodossa olevista aineista. (Stam et al. 2009.)

Tuhkan alkuainekoostumuksen perusteella voidaan tehdä termodynaamisia tasapainolaskuja, jotka kertovat tuhkassa olevien yhdisteiden tasapainokoostumuksen eri olosuhteissa. Tasapainolaskut perustuvat systeemin Gibbssin energian minimoimiseen. Analyysin avulla voi päätellä tuhkasta haihtuneiden kaasujen ja partikkeleissa olevien kiinteiden ja sulien yhdisteiden tasapainokoostumukset eri olosuhteissa. Analyysiin annetaan lähtöarvoina tuhkan alkuainekoostumus, käytettävä ilmakerroin sekä lämpötilaväli, jossa operoidaan. Jotkut prosessit ovat kuitenkin reaktiokinetiikan rajoittamia, jolloin tasapainoa ei välttämättä saavuteta. Tällaisten prosessien mallintaminen vaatii paljon tietoa reaktioista, mitä ei välttämättä ole saatavissa. Tasapainolaskuja käytetäänkin tällä hetkellä parhaana yksinkertaistuksena todellisesta tilanteesta. (Doshi et al. 2009; Stam et al. 2009.)

Monet biomassan polton aiheuttamaa kuonaantumista ja likaantumista tarkastelevat mallit yhdistävät virtauslaskennan ja termodynaamiset tasapainolaskut (Stam et al. 2009). Mueller et al. (2003) jakavat biomassan reaktiiviseen ja reagoimattomaan osaan kemiallisella fraktionaatiolla ja määrittävät tuhkan sulamiskäyttötymisen reaktiiviselle osalle stökiometrisissä olosuhteissa tehtävien tasapainolaskujen avulla. Reagoimattoman osan oletetaan olevan kokonaan inertti. Nutalapati et al. (2007) mallintavat oljen aiheuttamaa kuonaantumista samalla tavalla, mutta testaavat mikä vaikutus sulamiskäyttötymiseen on sillä, että reaktiiviseen osaan lisätään pieni määrä reagoimatonta osaa. Reagoimattoman osan lisääntyminen lisää sulaneen tuhkan osuutta tulipesän säteilyosan lämpötila-alueella 1300–1600 °C, koska nestemäisessä muodossa olevan kaliumin määrä lisääntyy.

2.1.2 Tuhkakomponenttien höyrystyminen

Jos halutaan tuntea tuhkan käyttäytyminen palamisprosessissa tarkasti, pitää tietää, mitkä tuhkan komponentit pysyvät kiinteinä ja mitkä höyrystyvät palamisen aikana. Tuhkan höyrystynyt osa riippuu polttoaineen koostumuksesta, lämpötilasta ja ilmakertoimesta. (Lind 1999; Hupa 2011.) Hiilen poltossa höyrystymistä tapahtuu vain vähän (noin 1 % tuhkan massasta höyrystyy) ja suurin osa tuhkasta muodostuu polttoaineessa olevien mineraalipartikkelien fragmentoitua eli hajotessa ja agglomeroitua eli liimautuessa yhteen. Biomassan poltossa haihtuvien tuhkakomponenttien määrä on sen sijaan merkittävä. (Doshi et al. 2009.)

Doshi et al. (2009) tutkivat eri elementtien vapautumista puun ja kuoren poltossa. Näiden, kuten useimpien muidenkin biomassojen, tuhkat sisältävät paljon enemmän alkalimetalleja, eli kaliumia ja natriumia, kuin hiilen. Alkalit ovat sitoutuneet orgaanisesti ja höyrystyvät suurelta osin tuhkasta polttoprosessin aikana. Rikki ja kloori vapautuvat täysin kaasumaiseen muotoon. Palamisen aikana vapautuvia alkalien, rikin ja

kloorin yhdisteitä ovat muun muassa HCl, KCl, K₂SO₄, Na₂SO₄ ja NaCl. Piin ja alumiinin määrä on puussa pienempi kuin hiilessä. Nämä metallit ovat mineraalimuodossa eivätkä vapaudu tuhkasta palamisen aikana. Puupohjaisissa biomassissa on myös kalsiumia ja magnesiumia, joista puolet on orgaanisessa ja puolet mineraalimuodossa. Näistä noin puolet vapautuu palamisen aikana. Vapautuvien kaasujen koostumuksen voi määrittää termodynaamisilla tasapainolaskuilla. (Doshi et al. 2009.)

Kattilan konvektio-osissa savukaasun lämpötilan laskiessa höyrystyneet yhdisteet kondensoituvat, jos niiden höyrynpaine on riittävän matala. Kondensaatio jakaantuu heterogeeniseen ja homogeeniseen kondensaatioon, joista heterogeeninen on yleensä hallitseva. Heterogeenisessa kondensaatiossa höyry tiivistyy kiinteille partikkeleille tai pinnoille. Tämä voi tehdä partikkelin tai kerrostuman pinnasta tahmean lisäten partikkelien tarttumista. Homogeenisessa kondensaatiossa kaasu tiivistyy ilman pinnan apua synnyttäen alle mikrometriluokan partikkeleita. Kondensaation aiheuttamaa kerrostuman syntyä käsitellään enemmän luvussa 2.2.4. (Doshi et al. 2009; Stam et al. 2009.)

2.1.3 Tuhkapartikkelien mallinnus

Kiinteään muotoon jäävät osat tuhkasta muodostavat partikkeleita, jotka altistuvat sulamiselle, agglomeraatiolle ja fragmentaatiolle. Kiinteiden lentotuhkapartikkelien kokojakauma ja koostumus riippuvat siitä, mitä palamisen aikana tapahtuu. Tuhkaa muodostavat yhdisteet yhdistyvät palavan koksipartikkelin sisällä ja pinnalla. Partikkelien kokoon vaikuttaa kaksin fragmentoituminen. Fragmentaatiota aiheuttaa kaksin nopean lämpenemisen synnyttämä paine ja sen purkautuminen. Myös kaksin palaessa niin, että partikkelista tulee huokoinen, se voi hajota mekaanisten voimien, kuten kaasun virtauksen ja törmäysten johdosta. Jos koksi ei fragmentoidu, kaikki mineraalipartikkelit polttoainepartikkelin sisällä voivat muodostaa yhden tuhkapartikkelin. Fragmentaation tapahtuessa mineraalipartikkelit joutuvat eri polttoainepartikkeleihin, minkä seurauksena syntyy pienempiä tuhkapartikkeleita. (Lind 1999; Doshi et al. 2009.)

Weberin et al. (2013) mukaan lentotuhkapartikkelien kokojakauma pitää tuntea tarkasti, koska koolla on vaikutusta partikkelien liikeratoihin ja niiden kulkeutumiseen pinnoille. Artikkelin mukaan hiilen kaksin palamista seuraavat mallit yliarvioivat partikkelikoot, koska ne eivät yleensä huomioi partikkelin kutistumista ja fragmentaatiota. Koska prosessi tunnetaan huonosti, on vaikeaa saada tarkkoja tuloksia seuraamalla polttoainepartikkelin rataa polttoaineen syötöstä kerrostumispinnoille. Tämä vaatii tarkkaa tuntemusta polttoaineen käyttäytymisestä palamisen aikana.

Sen sijaan että seurattaisiin partikkelin palamista ja siinä syntyvää tuhkaa, joissain malleissa lentotuhka syötetään tulipesään valmiilla kokojakaumalla. Tämä on yleistä biomassan polttoa tarkastelevissa malleissa. Yleisin tapa on valita mittauksen perusteella muutama eri kokoluokka mallinnettaville tuhkapartikkeleille. Tällaista mallia käyttävät Mueller et al. (2003), Kaer et al. (2006), Schulze et al. (2006), Zhou et al. (2007), Mu et al. (2012) ja Borello et al. (2013).

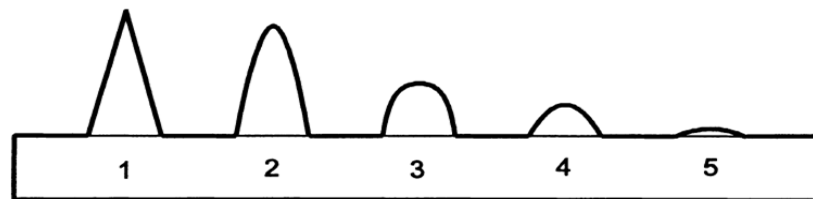
Kreutzkam et al. (2012) ovat selvittäneet tarkemmin hiilipartikkelin fragmentaation vaikutusta kerrostumien syntyyn. Yleisesti käytössä oleva tapa syöttää lentotuhkan ko-

kojakauman mukaisia partikkeleita polttoaineen syötössä on puutteellinen, koska se antaa väärät partikkeliradat. Kreuzkamin mallissa polttoainepartikkelien ratojen laskenta loppuu pisteessä, jossa fragmentaatio tapahtuu ja uusia partikkeleita injektoidaan samassa pisteessä. Mallissa oletetaan fragmentaation tapahtuvan partikkelin massan pienennyttyä 15 %:iin alkuperäisestä. Todellisuudessa fragmentaation ajankohtaan vaikuttaa haihtuvien määrä, lämmitysnopeus ja koksien palanut osuus. Tulosten mukaan fragmentoituneet partikkelit ovat täysin palaneita seinälle saapuessaan, kun taas fragmentoitumattomissa partikkeleissa on yhä palamatonta koksia jäljellä. Lisäksi fragmentoituneet partikkelit osuvat epätodennäköisemmin pinnoille kuin fragmentoitumattomat, koska ne seuraavat paremmin virtaviivoja. Myös Erickson et al. (1995) ottavat huomioon fragmentaation.

2.1.4 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen

Tuhka koostuu suuresta määrästä yhdisteitä, joilla on eri sulamispisteet. Siksi ei voi puhua täsmällisestä sulamispisteestä vaan sulaminen tapahtuu tietyllä lämpötila-alueella. Tuhkayhdisteet voivat myös muodostaa eutektisia systeemejä, joissa eri yhdisteistä koostuvan seoksen sulamispiste on alhaisempi kuin komponenttien erilliset sulamispisteet. (Moilanen et al. 2002.)

Tuhkan sulamiskäyttäytymistä voidaan selvittää eri standardimenetelmien avulla. Näissä menetelmissä tuhka valmistetaan näytekappaleita, jotka kuumennetaan. Kuumentamisen aikana seurataan, missä lämpötiloissa tuhkapartikkelin muodossa tapahtuu tietyt muutokset. Standardimenetelmä ATSM-D1857 on kehitetty hiilen tuhkan sulamiskäyttäytymisen tutkimiseksi. Menetelmän tunnuslämpötilat ovat muodonmuutoslämpötila, pehmenemislämpötila, puolipallolämpötila ja juoksevuuslämpötila. (Moilanen et al. 2002.) Ne on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Tuhkan sulamiseen liittyvät lämpötilat: 1. tuhka ennen lämmittämistä, 2. IDT muodonmuutoslämpötila, 3. ST pehmenemislämpötila, 4. HT, puolipallolämpötila, 5. FT juoksevuuslämpötila (Hansen et al. 1999).

Standardimuotoisia testejä on kritisoitu niiden huonosta toistettavuudesta. Lisäksi testeillä on vaikea kuvata tuhkan aiheuttamaa likaantumista ja kuonaantumista. Sulamista voi joillakin polttoaineilla tapahtua jo paljon ensimmäisen muodonmuutoslämpötilan alapuolella (Mu et al. 2012).

Kirjallisuudesta löytyy tuhkan kemiallisesta koostumuksesta riippuvia korrelaatioita sulamiselle. Suurin osa niistä on kehitetty hiilelle eikä niitä välttämättä voi käyttää biopolttoaineille tuhkan erilaisen koostumuksen vuoksi. (Skrifvars & Hupa 2002; Strömberg 2006.) Garba et al. (2013) ovat kehittäneet biomassan pehmenemispisteelle

korrelaation. Tutkimuksen mukaan partikkeli on täysin tahmea tuhkan pehmenemispisteessä. Pehmenemislämpötila riippuu eri komponenttien massaosuuksista seuraavasti

$$T_s = (1,81y_{CaO} + 4,20y_{Al_2O_3} - 2,41y_{K_2O} + 5,31y_{P_2O_5} + 1017) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1)$$

Korrelaation perusteella kalium alentaa tuhkan sulamislämpötilaa, kun taas kalsium, alumiini ja fosfori nostavat sitä.

Tuhkan muodonmuutoslämpötilojen lisäksi voi sulamista kuvata sulan prosentuaalisen osuuden avulla. Tätä voidaan tarkastella kemiallisilla tasapainomalleilla, joiden avulla saadaan tietoa siitä, kuinka suuri osa tuhkasta on sulanut tietyssä lämpötilassa. (Mu et al. 2012.) Kuonaantumisen kannalta tärkeitä lämpötiloja ovat lämpötilat joissa 10–15 % tuhkasta on sulanut ja lämpötilat, joissa 70–75 % tuhkasta on sulanut. Tätä käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.2. Zhou et al. (2007) esittävät korrelaation biomassojen tuhkien sulamiskäyttäytymiselle, joka riippuu emäksisten ja happamien komponenttien suhteellisesta määrästä tuhkassa sekä klooripitoisuudesta seuraavasti

$$T_i = a_i + b_i \frac{A}{B_1} + c_i \frac{A}{B_2} + d_i y_{Cl}, \quad (2)$$

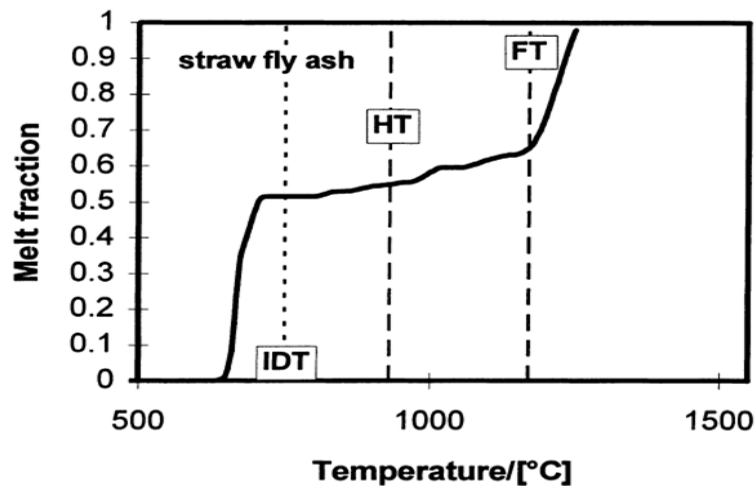
missä y_{Cl} tarkoittaa kloorin massaosuutta tuhkassa, a_i , b_i , c_i ja d_i ovat vakioita, jotka on määritetty lämpötiloille T_0 , T_{10} , T_{70} ja T_{100} . Emäksisten ja happamien oksidien suhteet lasketaan seuraavilla kaavoilla

$$\frac{A}{B_1} = \frac{y_{Fe_2O_3} + y_{CaO} + y_{MgO}}{y_{SiO_2} + y_{Al_2O_3}} \quad (3)$$

$$\frac{A}{B_2} = \frac{y_{K_2O} + y_{Na_2O}}{y_{SiO_2} + y_{Al_2O_3}}. \quad (4)$$

Koska c_i :n kerroin on aina negatiivinen, lisääntyvä kaliumin ja natriumin sekä vähenevä piin ja alumiinin määrä laskee tuhkan sulamislämpötilaa. Kertoimen b_i arvo taas on osassa sulamispisteitä negatiivinen ja osassa positiivinen.

Artikkelissaan Hansen et al. (1999) vertaavat standardimuotoista sulamistestiä tutkimuksessa tehtyyn oljen tuhkan kokeelliseen termiseen analyysiin (STA), jolla määritetään tuhkan sulamiskäyrä. Kuvassa 2.2 on esitetty Hansenin et al. määrittämä oljen sulamiskäyrä, jolle on sijoitettu standardilämpötilat.



Kuva 2.2. Oljen tuhkan eri tunnuslämpötilat ja sulanut osuus (Hansen et al. 1999).

Kuvan mukaan sulaminen alkaa paljon ennen muodonmuutoslämpötilaa. Muodonmuutoslämpötilan kohdalla tuhkasta on sulanut jo 51 % ja sen juoksevuuslämpötilassa vasta 62 %. Käyrän muodon perusteella todetaan oljen tuhkan sulamisen jakaantuvan matalassa lämpötilassa tapahtuvan eutektisten kalium- ja kalsiumsuolojen sulamiseen ja korkeassa lämpötilassa tapahtuvaan silikaattien sulamiseen. Standardimuotoinen testi kuvaa hiilen tuhkan sulamisprosessia paremmin.

Tuhkan sulamista voidaan kuvata myös tuhkan viskositeetin avulla. Kriittisen viskositeetin lämpötilassa hiilen poltossa syntyvien tuhkapartikkelien oletetaan olevan tahmeita. Kriittistä viskositeettia käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.1.

2.1.5 Kuonan koostumus

Kuonakerroksen koostumus eroaa jonkin verran tuhkan koostumuksesta. Helposti höyrystyviä aineita, kuten alkalimetalleja, klooria ja rikkiä on sulassa kuonassa vähemmän kuin tuhkassa. Nämä aineet voivat kuitenkin kondensoitua kylmille pinnoille, jolloin niitä on kondensoitumalla syntyneessä kerrostumassa suurempi osuus kuin alkuperäisessä tuhkassa. Leijupoltossa kerrostumista löytyy myös pedin hiekkaa. Hiekkaa voi päätyä seinille myös polttoaineen seassa kulkeutuvasta hiekasta.

Silvennoinen & Hedman (2013) tutkivat kuonaantumista puuta ja peltobiomassoja polttavassa BFB:ssä. Kattilassa oli kuonaantumisongelma. Tutkitulla kuonalla oli huokoinen rakenne ja se sisälsi tuhkan yhteen liimaamia hiekkapartikkeleita. Hiekka oli peräisin puusta, joka oli kontaminoitunut polttoaineen käsittelyn aikana. Artikkelin mukaan kattilan kuonaantumista aiheuttaa peltobiomassojen korkea kalium- ja fosforipitoisuus. Kaasumaiset kaliumyhdisteet reagoivat hiekassa olevan kvartsin kanssa muodostaen tahmean sulavan kerroksen. Samanaikaisesti fosforia, kalsiumia ja magnesiumia sisältävät tuhkapartikkelit tarttuvat siihen.

Latva-Somppi et al. (1998) tutkivat puun ja paperinjalostusteollisuuden lietteen yhteispoltossa tapahtuvaa kuonan muodostumista leijupetikattiloissa. Seinillä olevista kerrostumista löytyneitä yhdisteitä ovat SiO_2 , $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Al},\text{Si})_2\text{SiO}_7$ ja CaCO_3 . Kuona koostui hiekkapartikkeleista, jotka olivat tarttuneet sintraantuneeseen tuhkaan. Hiekan osuus kerrostumista oli noin 25–30 %. Lentotuhkaan verrattuna kerrostumissa oli hieman enemmän kaliumia, mutta vain vähän klooria ja rikkiä. Kerrostuman rakenne oli hauras.

Artikkeleissa (Miles et al. 1995) ja (Miles et al. 1996) tutkittiin biomassan aiheuttamaa likaantumista ja kuonaantumista BFB:ssä. Kattilassa poltettiin puuta ja maatalousjätteitä. Muurauksen alueella olevat kerrostumat olivat kovia ja yhteen sulautuneita lasimaisia kerrostumia, petipartikkeleiden agglomeraatteja ja lentotuhkan kertymiä. Tulipesän seinille kertyneen kuonan koostumus muistutti polttoaineen tuhkan koostumusta, mutta siinä oli vähemmän klooria, rikkiä, fosforia ja alkaleita. Kerrostumat sisälsivät paljon piitä alkuperäiseen koostumukseen verrattuna. Tämä viittaa siihen, että kerrostuma on petihiekan ja polttoaineen tuhkan yhdistelmä, josta helposti haihtuneet yhdisteet ovat poistuneet.

2.2 Hiukkasten kulkeutuminen lämmönsiirtopinnoille

Partikkelien kulkeutumiseen tulipesän seinille on löydetty viisi eri mekanismia: hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen, turbulenti iskeytyminen, termoforeesi, kondensaatio ja kemiallinen reaktio. Monien lähteiden, kuten (Baxter 2000), (Mueller et al. 2005), (Livingston 2006), (Kaer et al. 2006) ja (Degereji et al. 2012), mukaan partikkelin hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen seinille aiheuttaa suurimman osan likaantumiseen ja kuonaantumiseen johtavasta partikkelien massavirrasta lämpöpinnoille. Muut mekanismit ovat vallitsevia pienille (halkaisija alle 1-10 μm) partikkeleille ja niiden vaikutus kokonaisuusvirtaan on yleensä pieni. Mueller et al. (2005) määrittelevät termoforeesin merkittävimmäksi mekanismiksi halkaisijaltaan alle 1 μm partikkeleille, 1-10 μm partikkeleille turbulentin iskeytyksen ja sitä suuremmille hitausvoimien aiheuttaman iskeytyksen.

2.2.1 Hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen

Hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen on seurausta siitä, että hitausvoimien vuoksi partikkeli ei seuraa täysin kaasuvirtausta vaan osuu tulipesän pinnoille (Jokiniemi & Kauppinen 2002). Tulistinputkia mallintaessa voidaan määrittää iskeytymistodennäköisyys, joka määrittelee, kuinka suuri osa putkiston läpi virtaavista hiukkasista osuu putkiin. Tämä todennäköisyys lasketaan yleensä Stokesin luvun funktiona, joka kuvaa hitaus- ja vastusvoimien suhdetta. Tämä on esitetty muun muassa lähteissä (Huang et al. 1996), (Weber et al. 2013) ja (Jacobson 1998). Tulipesän seiniä mallinnettaessa tätä todennäköisyyttä ei kuitenkaan tarvita vaan partikkelin voidaan todeta osuvan seinään, jos sen liikerata saavuttaa seinän. Tämän ennustuksen tarkkuuteen vaikuttaa laskenta-verkon tiheys ja seinän läheisen virtauskentän mallinnuksen tarkkuus. (Jacobson 1998.)

Iskeytyminen tapahtuu pääosin suurille, yli 10 μm partikkeleille ja se synnyttää suurimman osan kerrostuman massasta (Mu et al. 2012). Iskeytymällä syntyvä kerrostuma on karkea, kun taas muut mekanismit muodostavat pienistä partikkeleista koostuvan tiheän ja tasaisen likakerroksen. Tulistinputkiin iskeytyminen aiheuttaa kerrostumia vain ylävirran puolelle putkea, kun taas muut mekanismit synnyttävät kerrostuman tasaisesti putken ympärille. (Zbogor et al. 2009.)

Hitausvoimista johtuvaan kerrostuvien partikkelien massavirtaan vaikuttavat partikkeliradat, jotka riippuvat virtauskentästä, kohteen geometriasta sekä partikkelin koosta ja tiheydestä. Kaikki pinnalle osuvat partikkelit eivät kuitenkaan tartu vaan osa heijastuu takaisin tulipesään. Heijastuva partikkeli saattaa samalla aiheuttaa eroosiota likakerroksessa. (Baxter 2000.) Partikkelien tarttumista pinnoille käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.

2.2.2 Turbulentti iskeytyminen

Turbulentissa iskeytymisessä kevyet partikkelit saavat inertiaa pyörteistä ja iskeytyvät seinille. Pyörteet kasvattavat partikkelin liikemäärää ja muuttavat rajakerroksen pak-

suutta niin, että liikemäärä riittää pintaan osumiseen, vaikka keskimääräisten nopeuksien perusteella partikkelin hitausvoimat olisivat liian pienet. Tämä prosessi tunnetaan huonosti. Sitä ei kuitenkaan pidetä merkittävänä ellei turbulenssin intensiteetti ole erityisen suuri. (Baxter 2000.)

Turbulentin iskeytymisen mallintaminen on vaikeaa, koska siihen liittyy rajakerrosilmiöitä, jotka riippuvat pinnan geometriasta. Geometriat voivat kuitenkin olla monimutkaisia, kuten muuratut ja membraanipinnat. Lisäksi pinnalla oleva kerrostuma muuttaa pinnan muotoa tavalla, jota on vaikea ennustaa. (Jacobson 1998.)

2.2.3 Termoforeesi

Termoforeesissa hiukkaset siirtyvät kuumasta ympäristöstä kohti kylmempää, koska korkeassa lämpötilassa kaasumolekyylien törmäykset hiukkasiin ovat voimakkaampia kuin kylmässä (Jokiniemi & Kauppinen 2002). Termoforeesi tapahtuu, jos lämmönsiirtopinnan ja kaasun välillä on jyrkkiä lämpötilagradientteja eli pintojen ollessa vielä puhtaita. Kerrostuman kasvaessa lämpötilaero pienenee ja termoforeesin merkitys pienenee. (Baxter 2000.)

Termoforeesi on merkittävä mekanismi alle 3 µm hiukkasille seinien tai lämmönsiirtopintojen lähellä (Weber et al. 2013). Termoforeesi ja turbulenti iskeytyminen eli rajakerroksen ohjaamat kerrostumismekanismit ovat Kaerin et al. (2006) mukaan suuruudeltaan kertaluokkaa pienempiä kuin hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen.

2.2.4 Kondensaatio

Kiinteän partikkelin poltossa kaasufaasiin vapautuu tuhkaa muodostavia höyryjä, joiden määrä riippuu polttoaineesta ja palamislämpötilasta. Jäähdytettyjen pintojen lähellä höyryt jäähtyvät ja niiden kyllästyshöyrynpaine pienenee. Kaasun osittaispaineen ylittäessä kyllästyshöyrynpaineen höyryn kyllästystila ylittää arvon yksi ja höyryt kondensoituvat joko homogeenisesti alle mikrometrin kokoluokan aerosoleiksi tai heterogeenisesti tuhkapartikkelien pinnalle. Kondensaatio voi myös tapahtua suoraan pinnalle, jos kaasun kyllästystila pinnalla on yli yhden. (Schulze et al. 2010; Doshi et al. 2009; Jokiniemi & Kauppinen 2002.) Kondensaation mallintamiseen tarvitaan tietoa siitä, missä muodossa kondensoituvat tuhkakomponentit, kuten alkalit, sulfaatit ja kloori esiintyvät kaasufaasissa. Kondensaation merkitys biomassojen poltossa on suurempi kuin hiilen poltossa, koska helposti höyrystyvien alkalimetallien määrä biomassojen tuhkassa on suurempi. (Baxter 2000; Weber et al. 2013.)

Kondensaatio, kuten termoforeesikin, tapahtuu lämmönsiirtopintojen ollessa melko puhtaita ja tarpeeksi viileitä höyryjen kondensoitumiseen. Kondensoituvia yhdisteitä ovat pääosin alkaliyhdisteet. (Weber et al. 2013.) Kondensaation synnyttämä kerrostuma ei ole rakeinen kuten termoforeesin ja iskeytymisen muodostamat kerrostumat vaan se on yhtenäinen ja tiivis. Kerrostuma on tahmea ja muodostaa liiman, johon suuremmat partikkelit voivat tarttua. Partikkelin pinnalle tapahtuva kondensaatio tekee myös sen pinnasta tahmean, mikä kasvattaa iskeytyvien partikkelien tarttumisen todennäköisyyttä.

Pinnan tahmeuden lisäksi kondensoitunut aine lisää kerrostuneiden partikkelien välistä kontaktipintaa, mikä vaikeuttaa likakerroksen poistamista ja parantaa sen lämmönjohtavuutta. Kondensoituminen ei ole massavirran kannalta merkittävä kerrostumismekanismi kuonaantumisessa, mutta sen merkitys pinnan ja partikkelien tahmeuteen voi olla huomattava kattilan viileämmissä osissa, joissa lämpötila on tarpeeksi matala kondensaatiolle. (Baxter 2000.)

2.2.5 Kemiaallinen reaktio

Kaasujen reaktiot kerrostuman pinnalla olevien yhdisteiden kanssa vaikuttavat kerrostuman ominaisuuksiin. Alkalisulfaatteja syntyy kaliumhydroksidin tai -kloridin sulfaatioissa. Sulfaattien muodostuminen voi edistää kerrostuneiden partikkeleiden sintraantumista. Myös karbonaattien muodostus pinnalle voi lisätä partikkelien sintraantumista, mikä taas vaikeuttaa kerrostuman poistamista pinnalta. (Skrifvars & Hupa 2002, Garba et al. 2012.) Näiden lisäksi muita reaktioita ovat alkalien absorptio silikaatteihin sekä kerrostuneissa partikkeleissa olevan palamattoman hiilen hapettuminen (Baxter 2000).

2.3 Hiukkasten tarttuminen pinnoille

Osueissaan tulipesän seinään tai muuhun lämmönsiirtopintaan partikkeli voi joko tarttua tai heijastua. Tämä riippuu monesta tekijästä, kuten tuhkan ja iskeytymispinnan viskositeeteista, partikkelin koosta, pintajännityksestä, iskeytymisnopeudesta ja -kulmasta, pinnankarheudesta sekä tuhkassa olevan sulan aineen määrästä. Useimmissa malleissa otetaan kuitenkin vain osa näistä tekijöistä huomioon. (Wang & Harb 1997.)

Tarttumismallit voidaan jakaa myös probabilistisiin ja deterministisiin malleihin. Probabilistisissa malleissa lasketaan todennäköisyys, jolla partikkeli tarttuu seinään osueissaan siihen. Deterministisessä mallissa määritellään kriteerit, joiden perusteella partikkeli joko heijastuu tai tarttuu osueissaan seinään.

Hiilen ja biomassojen poltossa syntyvien tuhkapartikkelien tarttumisen mallintamiseen käytetään useimmiten erilaisia malleja. Hiilen poltossa ja kaasutuksessa käytettävät mallit perustuvat yleensä partikkelin viskositeettiin, joka kuvaa hyvin silikaattipitoisten partikkelien sulamista. Biomassapartikkelit sisältävät hiiltä vähemmän silikaatteja, mutta niissä on sen sijaan enemmän alkaliyhdisteitä, jotka sulavat ja höyrystyvät palamisen aikana. Biomassan tuhkan tarttumista käsittelevät mallit käyttävät tarttumiskriteerinä useimmiten tuhkan sulanutta osuutta. Myös kondensaatio on monesti otettu huomioon biomassan tuhkan mallinnuksessa. Tuhkan tahmeuden lisäksi pintaan osuvan partikkelin kineettisellä energialla on merkitystä.

2.3.1 Hiilen poltossa ja kaasutuksessa käytetyt mallit

Montagnaro & Salatino (2010) esittivät hiilipartikkelin jäävän pysyvästi kuonakerrokseen, jos se uppoaa kerroksen sisään. Jotta partikkeli uppoaisi, on sen kineettisen ener-

gian on oltava suurempi kuin pinnan viskoosit ja pintavoimat. Näitä vertaamalla saadaan määriteltyä uppoamiskriteeri

$$d_p u_p > \frac{36\mu_p}{\rho_p}, \quad (5)$$

joka riippuu partikkelin halkaisijasta, nopeudesta, viskositeetista ja tiheydestä. Tämä kriteeri ei kuitenkaan toteudu normaaleissa olosuhteissa ellei kyseessä ole suuret partikkelit ($d_p > 200 \mu\text{m}$) tai erittäin pienet tuhkan viskositeetit ($\mu_p < 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Tutkimuksessa ei käsitellä, tarttuuko partikkeli kerrostuman pinnalle, jos se ei mene kuonakerroksen läpi. Tuloksen perusteella Yong et al. (2012) valitsevat partikkelin tarttumisen kuonan pinnalle riittäväksi mekanismiksi eikä pinnan läpi tunkeutumista tarvitse tarkastella. Myös useimmat muut mallit tarkastelevat vain partikkelin tarttumista kuonan pinnalle.

Monissa tutkimuksissa, kuten (Huang et al. 1996), (Garba et al. 2013), (Degereji et al. 2012), (Richards et al. 1993) ja (Lee & Lockwood 1999), partikkelin tahmeus riippuu tuhkan viskositeetista. Nämä mallit määrittelevät partikkelin tahmeuden kriittisen viskositeetin avulla. Viskositeetin ollessa pienempi kuin määritelty kriittisen viskositeetin arvo, partikkeli on täysin sulanut ja se tarttuu seinään aina osuessaan siihen. Partikkelin viskositeetin kasvaessa tarttumisen todennäköisyys pienenee kääntäen verrannollisesti kohti nollaa yhtälön

$$\eta_t = \min\left(\frac{\mu_{cr}}{\mu_p}, 1\right) \quad (6)$$

mukaisesti, jossa μ_{cr} on kriittinen viskositeetti. Tämä malli on alun perin artikkelista (Walsh et al. 1990). Tuhkan viskositeetin määrittämistä on käsitelty tarkemmin luvussa 2.4.3.

Kriittinen viskositeetti tarkoittaa viskositeettia, jonka kohdalla kuonan ominaisuudet muuttuvat newtonilaisesta fluidista Bingham-plastiseksi nesteeksi. Se on kohta, jossa nestemäinen tuhka alkaa kiteytyä ja viskositeetti nousee nopeasti lämpötilan laskiessa. Newtonilaisen fluidin leikkausjännitys on riippumaton leikkausnopeudesta, kun taas Bingham-plastisella nesteellä näiden välillä on riippuvuus. (Arvelakis et al. 2006.)

Kriittiselle viskositeetille käytetyt arvot vaihtelevat $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ja $10^9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ välillä, mikä vaikuttaa paljon tuloksiin (Weber et al. 2013). Mallia onkin tästä syystä kritisoitu epätarkaksi. Kirjallisuudessa käytettyjä eri arvoja kriittiselle viskositeetille on kerätty taulukkoon 2.1. Lisäksi Kreutzkam et al. (2012) kritisoivat tuhkan viskositeetin arvojen tarkkuutta, koska niiden laskemiseen käytetään empiirisiä korrelaatioita.

Monissa malleissa on muokattu kaavaan (6) perustuvaa tarttumisen todennäköisyyttä. Schulze et al. (2006) tutkivat kriittisen viskositeetin arvon vaikutusta kerrostuneeseen massavirtaan biomassan poltossa. Seinälle tarttuneiden partikkelien massa kaksinkertaistuu nostettaessa kriittistä viskositeettia $8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$:sta $10^{6.44} \text{ Pa}\cdot\text{s}$:iin. Kriittisen viskositeetin ollessa yli 10^6 lähes kaikki partikkelit tarttuvat seinään. Jotta päästäisiin kriittisen viskositeetin arvon valinnasta, artikkelissa käytetään sen laskemiseen korrelaatiota, jossa kriittisen viskositeetin arvo on partikkelin kineettisen energian funktio

$$\log(\mu_{cr}) = -0,9699 * \log\left(\frac{E_{kin}}{E_{kin,0}}\right) + 5,5962, \quad (7)$$

jossa kineettisen energian arvo normalisoidaan arvolla $E_{kin,0} = 4,35 * 10^{-11}$ J, joka vastaa pienimmän partikkelin kineettistä energiaa. Tämä korrelaatio antaa kriittisen viskositeetin arvoksi $30-10^4$ Pa*s.

Tuhka voidaan jakaa sen fysikaalisen muodon perusteella kolmeen osaan: höyryihin, hienojakoisiin partikkeleihin sekä karkeisiin partikkeleihin. Rushdi et al. (2005) olettavat että hienojakoiset partikkelit, joiden säde on alle 3 μm , ovat aina tahmeita, koska niiden pintavoimat ovat suuret kineettiseen energiaan verrattuna. Suurempien partikkelien tarttuminen selvitetään viskositeetin avulla. Taha et al. (2013) käyttää kriittistä viskositeettia tarttumiskriteerinä, mutta olettaa vain tuhkassa olevan sulaneen osan jäävän kerrostumaan. Sulaneen osan massa ja koostumus sekä samalla viskositeetti lasketaan termodynaamisen tasapainon avulla.

Taulukko 2.1. Kirjallisuudessa käytettyjä arvoja kriittiselle viskositeetille.

Kriittinen viskositeetti (Pa*s)	Lähde	Sovellus
10	(Abbas et al. 1996)	Biomassan poltto
100	(Tominaga et al. 2000)	Hiilen kaasutus
10^4	(Huang et al. 1996)	Hiilen pölypoltto
10^4	(Richards et al. 1993)	Hiilen pölypoltto
10^4	(Wang & Harb 1997)	Hiilen pölypoltto
10^5	(Lee & Lockwood 1999)	Hiilen pölypoltto
10^5	(Erickson et al. 1995)	Hiilen poltto
10^5	(Fang et al. 2010)	Hiilen pölypoltto
10^5	(Jacobson 1998)	Silikaattipitoiset polttoainepartikkelit
10^5	(Taha et al. 2013)	Hiilen ja jätteen yhteispoltto
10^8	(Degereji et al. 2012)	Hiilen pölypoltto
10^8	(Rushdi et al. 2005)	Hiilen pölypoltto

Osassa malleista otetaan huomioon myös seinällä olevan likakerroksen viskositeetti yhtälön

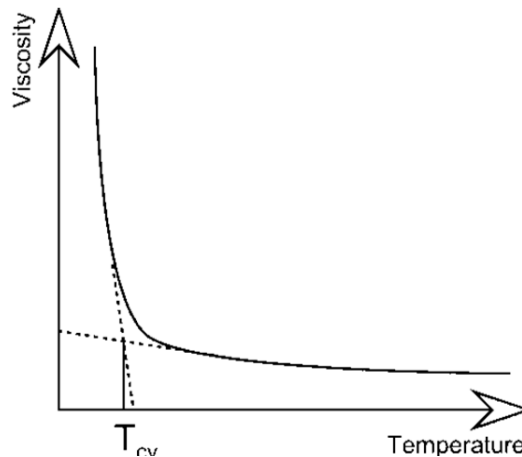
$$\eta_t = p(T_p) + (1 - p(T_p))p(T_k) \quad (8)$$

mukaan, missä $p(T_p)$ on partikkelin tarttumistodennäköisyys ja $p(T_k)$ on kuonan tarttumistodennäköisyys. Kerrostuman pinnan viskositeetti voidaan määrittää samoilla tuhkan koostumukseen perustuvilla korrelaatioilla kuin partikkeleidenkin viskositeetit. Tämän jälkeen pinnan tarttumistodennäköisyys voidaan laskea kaavalla (6).

Fang et al. (2010) valitsevat seinän tarttumistodennäköisyyden sijaan sen kriittiseksi lämpötilaksi 1450 K. Jos likakerroksen pinnan lämpötila on sitä korkeampi, seinän tarttumistodennäköisyys on 1, jos se on alempi, todennäköisyys on 0. Partikkelin tarttumis-

todennäköisyys määritetään viskositeetin avulla. Shimizu & Tominaga (2006) sen sijaan ehdottavat tarttumiskriteeriksi, että joko likakerroksen tai partikkelin viskositeetin on oltava kriittisen arvon alapuolella. Jos molempien viskositeetti on kriittistä arvoa suurempi, partikkeli heijastuu.

Jotkut mallit, kuten (Seggiani 1998) ja (Yong et al. 2012) käyttävät kriittisen viskositeetin arvon sijaan sitä lämpötilaa, jossa tuhkan rakenteen äkillinen muutos kiinteästä juoksevaksi tapahtuu. Tämän lämpötilan arvo riippuu tuhkan koostumuksesta. Kriittisen viskositeetin lämpötilan alapuolella viskositeetti riippuu vahvasti lämpötilasta, kun taas sen yläpuolella riippuvuus on heikko, mikä on havainnollistettu kuvassa 2.3 (Vargas et al. 2001).



Kuva 2.3. Tuhkan viskositeetin suhde lämpötilaan ja kriittisen viskositeetin sijoittuminen käyrälle (Vargas et al. 2001).

Kriittisen viskositeetin lämpötilojen ja kokeellisesti määritettyjen tuhkan muodonmuutoslämpötilojen välille on yritetty löytää yhteys, koska kriittisen viskositeetin lämpötilan mittaaminen viskosimetrin avulla on hidasta ja kallista. Lämpötila on yritetty laskea lisäämällä 117 °C tuhkan puolipallolämpötilaan tai käyttämällä suoraan tuhkan pehmenemislämpötilaa. (Bryers 1996.) Seggianin (1999) mukaan kriittinen lämpötila on aiemmin laskettu myös lisäämällä 111 °C tuhkan pehmenemislämpötilaan, minkä on kuitenkin huomattu antavan huonoja tuloksia.

Kriittisen viskositeetin lämpötilalle on kehitetty myös koostumuksesta riippuvia korrelaatioita. Tuhkassa olevat oksidit voidaan jakaa happamiin ja emäksisiin. Happamat yhdisteet pääsääntöisesti nostavat tuhkan sulamislämpötilaa kun taas emäksiset laskevat sitä. Seggiani (1998) määrittelee kriittisen viskositeetin lämpötilan tuhkan happo-emässuhteen avulla seuraavasti

$$\frac{A}{B} = \frac{y_{TiO_2} + y_{Al_2O_3} + y_{SiO_2}}{y_{Fe_2O_3} + y_{CaO} + y_{MgO} + y_{Na_2O} + y_{K_2O}}, \quad (9)$$

Jos happo-emässuhde on välillä 1-7, kriittisen viskositeetin lämpötila saadaan seuraavasta kaavasta

$$T_{cv} = 1358,44 + 74,1 \frac{A}{B} \quad (K) \quad (10)$$

Biomassat sisältävät usein fosforia, joka kuuluu happamiin komponentteihin. Sen vaikutusta kuonaantumiseen ei tunneta kovin hyvin. Vaikutus riippuu myös fosforin esiintymismuodosta lentotuhkassa. Fosforipentoksidi P_2O_5 alentaa tuhkan sulamislämpötilaa, joten Probnosis (2005) ehdottaa, että fosfori lisätään nimittäjään kaavassa (9), jos suurin osa fosforista esiintyy tässä muodossa.

Seggiani (1999) esittää 49 tuhkan alkuainekoostumukseen liittyvästä muuttujasta riippuvan korrelaation kriittisen viskositeetin laskemiseen sekä hiilelle että biomassoil- le. Wang et al. (2007) taas laskevat kriittisen viskositeetin lämpötilan tuhkan pehmenemispisteen avulla seuraavasti

$$T_{cv} = 0,75(T_s - 273) + 753 (K). \quad (11)$$

Tämä empiirinen yhtälö perustuu bitumisen hiilen poltossa syntyvän kuonan viskositeettimittauksiin.

Tomeczek et al. (2004) ovat tyytymättömiä suureen määrään kriittisen viskositeetin arvoja ja määrittävät seuraavan lämpötilariippuvuuden partikkelin tahmeudelle

$$\mu_t = \begin{cases} 0, & T \leq 1450 K \\ 0,1, & 1450 K < T \leq 1800 K \\ 0,1 + 10 \frac{(T_p - T_m)}{T_m}, & 1800 K < T \leq 1980 K \\ 1, & T > 1980 K \end{cases} \quad (12)$$

missä T_m on tuhkan sulamislämpötila, joka tarkoittaa tässä yhteydessä lämpötilaa, jonka yläpuolella viskositeetti on alle 9 Pa*s. Mallissa on mukana myös natrium- ja kaliumsulfaatin sekä vesihöyryn kondensaatio partikkelien pinnalle, mikä vaikuttaa kerrostuman paksuuteen kattilan konvektiivisessa osassa. Siellä kaasun lämpötilat ovat niin matalia, etteivät partikkelit tartu putken pinnalle ellei niissä ole kondensoituneen höyryn muodostamaa tahmeaa pintaa.

Yong et al. (2012) ottavat huomioon sekä partikkelin että seinän tahmeuden tarkastellessaan partikkelin tarttumista. Partikkeli tai seinämä on mallin mukaan sula, jos sen lämpötila on kriittisen viskositeetin lämpötilan yläpuolella. Partikkelin tahmeus vaatii lisäksi hiilen konversion, joka on kriittisen konversion yläpuolella. Li et al. (2010) ovat tutkineet hiilipartikkelin olevan tahmea, jos 88 % hiilestä on palanut. Tällöin sulanut tuhka on korvannut hiilen tarpeeksi suurella alueella partikkelin pinnalla tehdäkseen siitä tahmean. Tällaista kriteeriä ei ole käytetty muissa malleissa. Yongin et al. (2012) mallissa partikkeli tarttuu seinään jos sekä partikkeli että seinä ovat tahmeita. Jos kumpikaan eivät ole tahmeita, partikkeli kimpoaa aina. Muulloin partikkelin kohtalo riippuu sen kineettisestä energiasta, mitä käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.3.

Shimizu & Tominaga (2006) esittävät hiilen kaasutukseen mallin, jossa tarttuminen ei riipu partikkelin ominaisuuksista. Tarkasteltaessa pintaa, joka on osittain peittynyt reagoimattomiin partikkeleihin, partikkeli tarttuu osuessaan sellaiseen kohtaan pinnassa, jossa on vain sulaa kuonaa. Osuessaan kohtaan jossa on reagoimattomia partikkeleita, partikkeli kimpoaa seinältä. Seinällä olevan partikkelin oletetaan kelluvan täysin kuonan pinnalla tiheyserojen vuoksi ja yhden partikkelin varaaman alueen oletetaan olevan suu-

ruudeltaan πd_p^2 . Jos seinää kohti tulevan partikkelin keskipiste tulee tämän alueen sisälle, partikkeli heijastuu. Pinta muuttuu vapaaksi partikkelissa olevan hiilen kaasuunnettua kokonaan.

2.3.2 Biomassan poltossa käytetyt mallit

Joidenkin lähteiden, kuten Garba et al. (2013), mukaan viskositeetin käyttö biomassan poltossa syntyvien tuhkapartikkelien tahmeuden tarkasteluun on kyseenalaista. Viskositeetti mittaa silikaattipitoisten partikkelien tahmeutta hyvin, mutta biomassat sisältävät yleensä hiileen verrattuna paljon alkaleja ja vähän silikaatteja. Borello et al. (2013) ja Abbas et al. (1996) käyttävät kuitenkin kriittistä viskositeettia tarttumiskriteerinä biomassan poltossa. Hiiltä käsittelevät mallit tutkivat yleensä pelkästään hitausvoimien aiheuttamaa iskeytymistä, kun taas monet biomassaa käsittelevät mallit ottavat huomioon myös muita mekanismeja. Erityisesti kondensaatiolla on todettu olevan merkitystä biomassan sisältämien höyrystyvien tuhkakomponenttien vuoksi. Kondensaatio vaikuttaa sekä lämmönsiirtopintojen että partikkelien pintojen tahmeuteen tulipesän konvektiivisessa osassa, missä kaasun lämpötilat ovat tarpeeksi viileitä höyryjen kondensoitumiseen.

Monet biomassaa käsittelevät likaantumis- ja kuonaantumismallit, kuten (Kaer et al. 2006), (Mueller et al. 2003) ja (Zhou et al. 2007), perustuvat siihen, kuinka suuri osuus tuhkapartikkelista on sulanut. Kreutzkam et al. (2012) käyttävät sulaneeseen osuuteen perustuvaa lähestymistapaa myös hiilen poltossa. Yleensä partikkeli määritellään tahmeaksi tuhkan sulaneen osuuden ylittäessä 15 %. Tuhkan sulaneen osuuden ylittäessä 70 % tuhkasta tulee juoksevaa ja pinnalle kertyvä tuhka alkaa valua pintaa pitkin eikä kerrostuma enää kasva. Puhutaan tuhkan lämpötiloista T_0 , T_{15} , T_{70} ja T_{100} , joista T_0 on tuhkan ensisulamispiste ja T_{100} tuhkan täydellinen sulamispiste (Skrifvars & Hupa 2002). T_{70} -lämpötilan sijaan Strömberg (2006) määrittää tuhkan valumislämpötilaksi lämpötilan, jossa 75 % partikkelista on sulanut. Zhou et al. (2007) taas käyttävät tahmeuden määrittämiseen lämpötilaa, jossa 10 % tuhkasta on sulanut. T_{15} -menetelmä perustuu empiirisiin tuloksiin tuhkan tahmeudesta. Sulanut tuhka toimii liimana, joka kiinnittää partikkelin seinään, ja 15 % sulaneen osuuden kohdalla tämän liiman määrä on riittävä tarttumisen mahdollistamiseksi.

Mueller et al. (2005) tutkivat alkalisuolapartikkelien tarttumista. Mallissa oletetaan, että partikkelin lämpötilan ollessa korkeampi kuin T_{15} partikkeli tarttuu aina osuessaan seinään ja että kerrostuma kasvaa, kunnes tuhka muuttuu juoksevaksi. Koska malli yliarvioi mittauksiin verrattuna tarttuneiden partikkelien massavirran, otetaan tutkimuksessa käyttöön myös tarttumiskriteeri, joka riippuu partikkelin kineettisestä energiasta. Tämä kriteeri on esitetty tarkemmin luvussa 2.3.3.

Kaer et al. (2006), Zhou et al. (2007) ja Schulze et al. (2011) olettavat tarttumisen todennäköisyyden η_t nousevan lineaarisesti arvosta 0 arvoon 1 sulaneen tuhkan massaosuuden kasvaessa. Todennäköisyyksiä 0 ja 1 vastaavat lämpötilat ovat yleensä T_{15} - ja T_{70} -lämpötilat seuraavan yhtälön mukaisesti

$$\eta_t = \begin{cases} 0, & f < 0,15 \\ \frac{f-0,15}{0,7-0,15}, & 0,15 \leq f \leq 0,7, \\ 1, & f > 0,7 \end{cases} \quad (13)$$

missä f on sulaneen tuhkan massaosuus. Zhou et al. (2007) käyttävät biomassan arinapolton tulistinten likaantumista tarkastellessaan tarttumisehtona 10 % sulanutta osuutta 15 % sijaan ja soveltavat tarttumistodennäköisyyteen yhtälöä (13). Todennäköisyyden siis oletetaan kasvavan lineaarisesti arvosta 0 arvoon 1 sulaneen osuuden noustessa 10 %:sta 70 %:iin. T_{10} - ja T_{70} -lämpötilat lasketaan yhtälöistä (2)-(4). Mallissa otetaan huomioon myös termoforeesi ja turbulenti iskeytyminen.

Artikkeleissa (Schulze et al. 2006) ja (Schulze et al. 2011) kehitetään biomassan polttoon CFD-mallia, jossa otetaan huomioon sekä lentotuhkapartikkelien että tuhkaa muodostavien höyryjen aiheuttama kuonaantuminen ja likaantuminen. Höyryjä muodostaville aineille lasketaan erilliset siirtoyhtälöt ja niiden muodostamien yhdisteiden pitoisuudet lasketaan termodynaamisten tasapainolaskujen ja reaktiokinetiikan avulla. Höyryjen kondensoituminen pinnoille lasketaan käyttämällä massansiirron ja konvektiivisen lämmönsiirron analogiaa.

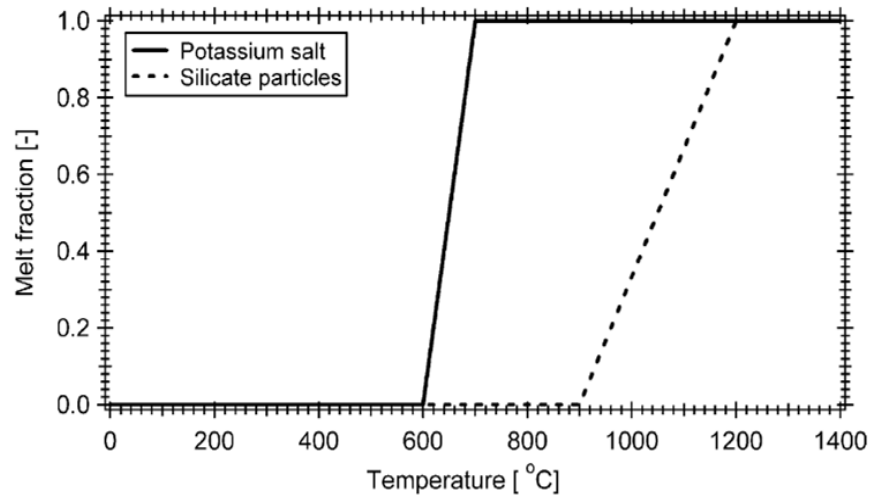
Schulzen et al. artikkelien mukaan silikaattipitoisen tuhkan tahmeus on viskositeetin ja alkalipitoisen tuhkan sulaneen osuuden funktio. Koska partikkeli ja kerrostuma sisältävät sekä alkali- että silikaattipitoista materiaalia, tarttumistodennäköisyys lasketaan kaavojen (6) ja (13) antamien todennäköisyyksien massakeskiarvona. Mu et al. (2012) käyttävät myös sulamisasteen ja viskositeetin yhdistelmää tarttumiskriteerinä, mutta asettaa pinnan tahmeudeksi arvon 0. Plaza et al. (2012) kertovat viskositeettiin perustuvan tarttumistodennäköisyyden tuhkan sulaneella osuudella mallintaessaan biomassan ja hiilen polttoa. Malleissa yhdistyvät viskositeettiin ja tuhkan sulamiseen perustuvat tarttumiskriteerit.

Kaer et al. (2001) mallintaa oljen palamista arinakattilassa. Malli ottaa huomioon sekä turbulentin että hitausvoimien aiheuttaman iskeytymisen ja termoforeesin. Oljen tuhka sisältää paljon alkalisuoloja, jotka vapautuvat polttoaineesta höyrystymällä jo 200–400 °C lämpötiloissa. Nämä kondensoituvat partikkelien ja putkien pinnoille pääosin KCl:na. Tämän prosessin mallintaminen tarkasti on kuitenkin vaikeaa, koska kaliumin vapautumista polttoaineesta ei tunneta tarpeeksi hyvin.

Seinän ja partikkelin pinnalle kondensoitunut sulanut alkalisuola parantaa piipitoisten partikkelien tarttumista pinnalle. Mallissa partikkelin sulamisen oletetaan koostuvan kahdesta osasta: alkalisuolojen sulamisesta ja silikaattien sulamisesta. Tämä oletus perustuu oljen poltossa tulistinpinnoilta, tulipesän seiniltä ja pohjatuhkasta otettujen näytteen sulamisen tarkasteluun. Periaate on esitetty seuraavassa yhtälössä

$$\eta_t = f_{KCl}(T_p) \frac{m_{KCl}}{m_{tot}} + f_{silikaatti}(T_p) \frac{m_{silikaatti}}{m_{tot}}, \quad (14)$$

johon sulaneen tuhkan osuudet eri lämpötiloissa saadaan kuvasta 2.4.



Kuva 2.4. Kaliumsuolojen ja silikaattien sulaminen lämpötilan funktiona (Kaer 2001).

Tarttumistodennäköisyys nousee lineaarisesti sulaneen osuuden noustessa 0 %:sta 100 %:iin. Seinän ja partikkelin tahmeus otetaan huomioon yhtälön (8) mukaan. Myös Garba et al. (2013) käyttävät tätä mallia biomassan tuhkalle mallintaessaan hiilen ja biomassan yhteispolttoa. Kaer (2001) vertaa yllä esitettyä menetelmää kriittisen viskositeetin avulla laskettuun tarttumistodennäköisyyteen käyttäen kriittisen viskositeetin arvoa $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Nämä menetelmät antavat samankaltaiset todennäköisyydet tarttumiselle, mutta erityisesti viskositeettiin perustuva lähestymistapa on hyvin herkkä valituille parametreille, kuten kriittisen viskositeetin arvolle.

Petersen (2012) käyttää myös Kaerin (2001) mallia partikkelin tahmeuden ennustamiseen tarkastellessaan karkeiden partikkelien kerrostumista biomassaa polttavan kattilan tulistimille. Petersen kuitenkin epäilee kaavan (8) tuottavan liian suurta likaantumista tulipesän säteilyosassa, jossa kaasun lämpötilat ovat suuria ja ehdottaa käytettävän todennäköisyyttä, jossa sekä partikkelin että seinän on oltava tahmeita. Malliin on lisätty iskeytymiskulman vaikutus seuraavan kaavan mukaisesti

$$\mu_t = p(T_p) * p(T_k) * p(\alpha). \quad (15)$$

Iskeytymiskulmasta riippuva todennäköisyys on Gaussin käyrä, jossa todennäköisyys on 0 iskeytymiskulman ollessa 0° ja 1 kulman ollessa 90° .

2.3.3 Hiukkasen kineettisen energian vaikutus tarttumiseen

Joissakin malleissa partikkelin tahmeus ei ole ainoa tarttumiskriteeri. Jos partikkelilla on enemmän kineettistä energiaa kuin törmäyksessä dissipoitava energia, partikkelin voi olettaa heijastuvan. Näiden energioiden suhdetta on kuvattu ainakin kahdella eri tavalla.

Iskeytyvän partikkelin kineettisen energian sekä partikkelin ja seinän välisen pintaenergian suhdetta voidaan kuvata yksinkertaisesti Weberin luvun avulla (Yong et al. 2012)

$$We = \frac{\rho_p u_p^2 d_p}{\sigma_{k,p}}, \quad (16)$$

jossa pintajännitys $\sigma_{k,p}$ on partikkelin pintajännitys, jos pelkästään partikkeli on sulanut, tai kuonakerroksen, jos pelkästään se on sula. Jos sula partikkeli iskeytyy märkään seinään, pintajännityksen arvo saadaan Youngin yhtälön avulla

$$\sigma_{k,p} = \sigma_p - \sigma_k \cos \theta \quad (17)$$

missä σ_p ja σ_k ovat partikkelin ja kuonan pintajännitykset. Suure θ on kuonan ja partikkelin välinen kontaktikulma. Lähteen Ni et al. (2011) mukaan kontaktikulma kasvaa 50° :sta 120° :een lämpötilan noustessa. Kontaktikulmaan vaikuttaa myös lämpötila ja tuhkan koostumus. Mueller et al. (2005) sen sijaan käyttävät kulmaa 37° , joka perustuu kokeellisiin tutkimuksiin.

Yong et al. (2012) valitsevat kriittiseksi Weberin luvun arvoksi 1. Weberin luvun saadessa suurempia arvoja, partikkeli kimpoaa, kun taas pienemmillä arvoilla partikkeli tarttuu. Tätä kriteeriä käytetään kuitenkin vain tahmean partikkelin osuessa ei-tahmeaan seinään tai ei-tahmean partikkelin osuessa tahmeaan seinään. Muissa tapauksissa partikkelin kineettisellä energialla ei ole merkitystä.

Nin et al. (2011) mukaan ennen iskeytymistä partikkelin energia koostuu sen kineettisestä energiasta sekä pinta- ja potentiaalienergiasta. Pisara saavuttaa maksimihalkaisijansa seinällä sen pintaenergian ollessa pienimmillään ja kineettisen energian ollessa nolla. Tätä seuraa joko partikkelin hajoaminen, heijastuminen tai tarttuminen. Hajoamista ei ole kuitenkaan tarkasteltu tarkemmin Nin et al. tutkimuksessa.

Mueller et al. (2005), Ni et al. (2011), Degereji et al. (2012) ja Garba et al. (2013) käyttävät tarttumiskriteerinä samaa lauseketta, joka on alun perin lähteestä (Mao et al. 1997). Kuonapisaran iskeytymisnopeus, iskeytymiskulma, kuonan kontaktikulma ja seinälämpötila muuttuvat olosuhteiden muuttuessa ja ne pitäisi ottaa huomioon heijastumista tarkasteltaessa. Partikkelin iskeytymisenergia esitetään riippuvaisena sen maksimaalisesta halkaisijasta iskeytymisen aikana.

Maksimaalisen ja alkuperäisen halkaisijan suhde D saadaan partikkelin ja kerrostuman välisen kontaktikulman sekä partikkelin Reynoldsin ja Weberin lukujen funktiona yhtälöstä (Mueller et al. 2005)

$$D = \sqrt{\frac{12+We}{3(1-\cos\theta)+4\frac{We}{\sqrt{Re}}}} \quad (18)$$

Tarttumiskriteerinä käytetään iskeytymisenergiaa. Jos partikkelilla on ylimääräistä kineettistä energiaa sen iskeytyessä seinään eli

$$E_{kin} = \frac{D^2}{4} (1 - \cos\theta) - \frac{3D^{2,3}}{25} (1 - \cos\theta)^{0,63} + \frac{2}{3D} - 1 \quad (19)$$

on suurempi kuin 0, partikkeli heijastuu (Mueller et al. 2005).

Näiden sijaan Weber et al. (2013) käyttävät tarttumiskriteerinä partikkelin nopeutta, jonka on oltava pienempi kuin kriittinen nopeus tai partikkeli kimpoaa. Mu et al. (2012) taas käyttävät kriittistä seinämän leikkausnopeutta. Paikallisen turbulentin leikkausnopeuden on oltava tätä pienempi partikkelin tarttumiseksi. Myös kaavan (7) antama kriit-

tisen viskositeetin riippuvuus partikkelin kineettisestä energiasta voidaan laskea malleihin, jotka ottavat huomioon tahmeuden lisäksi partikkelin kineettisen energian.

2.4 Kuonakerroksen kasvu

Pinnalle tarttuva partikkeli aiheuttaa kerrostuman kasvua. Useimmiten tätä mallinnetaan vain laskemalla partikkelien massat yhteen ja määrittelemällä tämän avulla kerroksen paksuus. Todellisuudessa kerrostuman ominaisuudet muuttuvat ajan kuluessa. Partikkelien sintraantuminen vaikuttaa kerrostuman huokoisuuteen ja samalla lämmönjohtavuuteen, tiheyteen sekä lujuuteen. Kerroksen kasvunopeuteen vaikuttavat myös likakerroksen sulaminen, eroosio ja irtoaminen, likaisten pintojen puhdistus sekä sulan kuonan valuminen pintaa pitkin. (Abbas et al. 1996; Lee & Lockwood 1999; Weber et al. 2013.)

2.4.1 Kerrostuman kasvu

Richards et al. (1993) mallintavat kerrostuman kasvua aikariippuvana prosessina. Ensin lasketaan kerrostuman ominaisuudet aika-askeleen alussa. Partikkelien kertymisnopeudesta saadaan aika-askeleen aikana kertyneen kerrostuman paksuus yhtälön

$$\delta_k = \frac{\dot{m}_k''}{\rho_k(1-\phi_k)} \quad (20)$$

avulla, missä ϕ_k on kerrostuman huokoisuus. Tämän jälkeen lasketaan lämmönsiirto likakerroksen pintaan ja sen läpi jäähdytettyyn seinään. Seggiani (1998) ja Kaer et al. (2006) laskevat likakerroksen kertymistä vastaavalla menetelmällä. Kerrostuman paksuuden kasvaessa sen pintalämpötila kasvaa, mikä lisää partikkelien tarttumista pinnalle malleissa, jotka ottavat seinän lämpötilan huomioon. Kasvava pintalämpötila nostaa lisäksi kaasun lämpötilaa lämmönsiirron heikentyessä, mikä lisää partikkelien tarttumista.

Cundick et al. (2007) jakavat kerrostuman osiin, joilla on eri ominaisuudet, kuten tiheys ja lämmönjohtavuus. Lähimpänä seinää on irtonainen kerros, jossa partikkelit eivät ole sintraantuneita. Tämän päällä on sintraantuneista kiinteistä partikkeleista koostuva kerros. Päällimmäisenä on kuonakerros, joka koostuu kaasun kanssa vuorovaikutuksessa olevasta sulasta osasta ja sen alla olevasta osittain jähmettyneestä osasta.

Kiinteän kerroksen maksimipaksuutena pidetään paksuutta, jossa kerrostuman pinta saavuttaa tuhkan T_{70} -lämpötilan, jolloin tuhka alkaa valua pintaa pitkin. Tämän perusteella Mueller et al. (2005) ovat määrittäneet kuonakerrokselle tasapainopaksuuden

$$\delta_{max} = \frac{k(T_{70}-T_w)}{h(T_g-T_{70})+\sigma\varepsilon(T_g^4-T_{70}^4)}, \quad (21)$$

jossa osoittaja kuvaa lämmön johtumista kerrostuman läpi ja nimittäjä konvektion ja säteilyn summaa. T_{70} -lämpötilan sijaan virtauslämpötilana käytetään myös kriittisen viskositeetin lämpötilaa (Wang et al. 2007; Yong et al. 2012). Muellerin et al. malli perustuu oletukseen, että tuhkan muuttuessa juoksevaksi se valuu pois seinältä vaikutta-

matta lämmönsiirtoon. Jos sulaa tuhkaa on paljon, on kuonan virtaus hyvä ottaa huomioon, koska valuvan kerroksen ollessa paksu kerroksella on vaikutusta lämmönsiirtoon.

2.4.2 Kuonan virtausmallit

Kuona virtaa pois pinnalta, jos sen lämpötila on T_{70} -lämpötilan tai kriittisen viskositeetin lämpötilan yläpuolella. Kuonan pinnan saavuttaessa tämän lämpötilan kiinteän kerroksen ei katsota enää kasvavan. Jos partikkeleita tarttuu pinnalle vähän, on virtaavan kuonan määrä hyvin pieni. Lisäksi monissa sovelluksissa kaasun lämpötilat eivät ole niin suuria, että kuonan pintalämpötila saavuttaisi lämpötilaa, jossa se on juoksevaa. Muun muassa Seggiani (1998), Wang et al. (2007), Li et al. (2009), Yong et al. (2012) ja Li et al. (2013) ovat kehittäneet malleja kuonan virtaukselle ja virtaavan kerroksen paksuudelle. Niitä käsitellään tässä tarkemmin. Li et al. (2013) käyttävät tulistinputkien pinnalle syntyvän valuvan kerroksen mallintamiseen Lin et al. (2009) mallia, joka perustuu suoraan Seggianin (1998) artikkeliin. Wang et al. (2007) ja Yong & Ghoniem (2012) ottavat kuonan valumisen lisäksi huomioon myös partikkelien palamisen seinällä.

Yong et al. (2012) mallintavat hiilen kaasutuksessa tapahtuvaa kuonaantumista ja lähtevät liikkeelle oletuksista, että kuonan virtauksella on vain yksi suunta ilman takaisinvirtausta eikä virtausta rajoita esteet. Laskemalla kuonalle massa-, voima- ja energiataseet seinillä olevissa laskentakopeissa saadaan määritettyä kuonan paksuus sekä nopeus- ja lämpötilaprofiilit. Yong et al. (2012) ja Wang et al. (2007) määrittävät seuraavan massataseen laskentakopille

$$\dot{m}'_{ulos} - \dot{m}'_{sisään} = \dot{m}''_t \Delta x - \dot{m}'''_r \delta_k \Delta x, \quad (22)$$

missä ulos ja sisään tulevien massavirtojen erotus on tarttuvien partikkelien ja reagoineen hiilen massavirtojen erotus ja Δx on laskentakopin leveys. Kopista ulos virtaava massavirta voidaan määrittää myös kerroksen paksuuden ja kuonan keskimääräisen valumisnopeuden avulla seuraavasti

$$\dot{m}'_{ulos} = \rho_k \int_0^{\delta_k} u(y) dy = \rho_k \delta_k u_{avg}. \quad (23)$$

Kaikki mallit käyttävät samankaltaista massatasetta. Yongin et al. mukaan reagoiva massavirta on kaasuuntuneiden hiilipartikkelien massa, Wangin et al. mukaan taas polttoaineesta haihtuvien yhdisteiden ja palavan koksen massa. Seggiani (1998) olettaa, että seinällä oleva palamaton polttoaine ei reagoi ollenkaan. Seggiani laskee virtauksen aikariippuvana prosessina, joten sekä massa- että energiataseessa on aikariippuvuus mukana.

Valuvan kuonan voimatasapaino on seuraavanlainen

$$\frac{d}{dy} \left(\mu_k \frac{du}{dy} \right) = -\rho_k g \sin \alpha. \quad (24)$$

Kulma α on pinnan kaltevuus. Reunaehto valuvan kuonan ja kiinteän pinnan rajalla on $u=0$. Kuonan ja ilman rajalla reunaehto on Seggianin mallissa $du/dy=0$. Wangin et al.

mukaan pinnalle iskeytyvät partikkelit hallitsevat kuonan pinnan leikkausjännitystä seuraavasti

$$\mu_k \frac{du}{dy} = -\tau_p = -\frac{u_p^2 m_p''}{u_{avg}}. \quad (25)$$

Tämän reunaehdon ovat myös Yong et al. ottaneet käyttöön.

Yong et al. ja Wang et al. käyttävät kuonan viskositeetille sen arvoa kerrostuman keskilämpötilassa ja laskevat edellisten yhtälöiden perusteella valuvan kuonan nopeuden ja paksuuden

$$u(y) = -\frac{\rho_k g \delta_k \sin \alpha}{2\mu_k} \left(1 - \frac{y}{\delta_k}\right)^2 + \left(\tau_p \delta_k + \frac{\rho_k g \delta_k \sin \alpha}{2\mu_k}\right) \left(1 - \frac{y}{\delta_k}\right) \quad (26)$$

$$\delta_k = \left(\frac{\dot{m}'_{ulos}}{\frac{\rho_k^2 u_p^2 m_t''}{4\mu_k \dot{m}'_{ulos}} + \frac{\rho_k \rho_p g \sin \alpha}{3\mu_k}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (27)$$

Seggiani taas käyttää viskositeetille lämpötilariippuvuutta. Käytettäessä kuonakerrokselle lineaarista lämpötilaprofiilia, saadaan viskositeetille riippuvuus sijainnista kerrostuman sisällä

$$\mu(y) = \mu(0) \exp\left(-\frac{\alpha y}{\delta_k}\right). \quad (28)$$

Käytettäessä voimatasapainosta saatua reunaehto ja yhtälöitä (24) ja (28) saadaan kuonan valumisnopeudeksi

$$u(y) = \frac{\rho_k g \delta_k^2 \sin \alpha}{\mu_k(0)} \left(e^{\alpha \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\right)} - e^{\frac{\alpha y}{\delta_k} \left(\frac{y}{\alpha \delta_k} - \frac{1}{\alpha^2}\right)} \right). \quad (29)$$

Keskinopeuden laskeminen on yksinkertaista, kun saadaan kopista ulos virtaava massavirta massataseesta

$$u_{avg} = \frac{\dot{m}'_{ulos}}{\rho_k \delta_k}. \quad (30)$$

Wang et al. eivät määrittele kuonakerrokselle lämpötilaprofiilia. Artikkelissa oletetaan seinällä olevan hiilen palamisessa syntyvän energian siirtyvän suoraan kaasufaasiin. Seggiani ottaa energiatasapainossa huomioon säteilyn ja konvektion lisäksi seinälle tarttuvien partikkelien mukana tulevan lämpöenergian. Yong et al. ottavat huomioon lisäksi kaasutusreaktiossa kuluvan energian ja kuonan jähmettyessä tai sulaessa syntyvän faasimuutosenergian.

$$Q'_{ulos} - Q'_{sisään} = q_g \Delta x - q_s \Delta x - m_f'' h_f \Delta x + m_t'' c_{p,p} T_p \Delta x \quad (31)$$

Seggiani olettaa kuonakerroksen lämpötilaprofiilin lineaariseksi. Myös Yong et al. olettavat kiinteän kuonakerroksen lämpötilaprofiilin lineaariseksi, mutta ehdottaa valulle kerrokselle kuutiollista profiilia. Lämpötila- ja nopeusprofiilin perusteella saadaan laskettua yhdestä kopista lähtevä lämpövuoto seuraavan kaavan mukaisesti

$$Q'_{ulos} = \rho_k c_p \int_0^{\delta_k} u(y) T(y) dy. \quad (32)$$

2.4.3 Kerrostuman poistomekanismit

Kaavan (8) tarrautumistodennäköisyyteen voidaan myös lisätä eroosion vaikutus seuraavalla yhtälöllä (Petersen, 2012; Kaer, 2001)

$$\mu_t = p(T_p) + (1 - p(T_p))p(T_k) - e_p(1 - p(T_k))(1 - p(T_k)). \quad (33)$$

Kerroin e_p kertoo, kuinka paljon heijastuvat partikkelit aiheuttavat eroosiota.

Eroosiota tapahtuu partikkelin kimmotessa seinältä. Strandström et al. (2007) tutkivat hiekkapartikkelien aiheuttamaa eroosiota tekijänä kerrostuman pienenemisessä. Tulipesään syötetään hiekkapartikkeleita, jotka ovat kovia ja abrasiivisia ja joilla on korkeat sulamislämpötilat. Osuessaan seinään partikkeli joko tarttuu tai heijastuu irrottaen samalla pinnalta materiaalia. Eroosiokriteerinä käytetään hiekkapartikkelin kineettisen energian ja pintaenergian suhdetta. Jos kineettinen energia on suurempi kuin pintaenergia, hiekkapartikkeli irrottaa seinällä olevan kuonapartikkelin. Koska iskeytyvät partikkelit ovat paljon pienempiä kuin laskentakoppi, on määritettävä myös todennäköisyys, jolla hiekkapartikkeli osuu kerrostuneeseen partikkeliin. Malli kuitenkin aliarvioi tarttuneiden hiekkapartikkelien määrän. Zbogor et al. (2009) toteavat, että ajan kuluessa seinällä olevat partikkelit sintraantuvat ja vastustavat eroosiota paremmin, joten tämänkaltaisen lähestymistapa sopii vain erillisistä partikkeleista koostuvaan kerrostumaan.

Myös Schulze et al. (2010) ovat tutkineet likapinnan eroosiota. Artikkelin mukaan eroosionopeus riippuu partikkelin nopeudesta ja iskeytymiskulmasta. Sen voi jakaa hauraseen ja sitkeään osaan. Hauras eroosio tapahtuu partikkelin iskeytyessä pinnalle ja sen kineettisen energian vaimentuessa aiheuttaen pinnan muodonmuutosta tai säröilyä. Hauras eroosio on suurimmillaan partikkelin iskeytyessä seinään kohtisuoraan. Pienillä iskeytymiskulmilla sitkeän eroosion merkitys kasvaa. Sitä voi kuvailla materiaalin leikkaamisena kerrostumasta. Näiden prosessien suuruus riippuu partikkelin ja kerrostuman ominaisuuksista, iskeytymiskulmasta sekä partikkelin kineettisestä energiasta (Zbogor et al. 2009). Kerrostuman käyttäytyminen on kiinteänä haurasta. Tuhkan sulaminen muuttaa käyttäytymisen sitkeäksi. (Strandström et al. 2007.)

Eroosiota tapahtuu enimmäkseen tulipesän konvektiivisessa osassa, missä kerrostumat eivät ole sulaneita. Prosessi liittyy enimmäkseen koviin partikkeleihin. Biomassan tuhkat aiheuttavat vähemmän eroosiota kuin hiilen, koska niissä on vähemmän kovaa kvartsia ja pyriittiä kuin hiilen tuhkissa. (Livingston 2006.)

Kuonaa voi irrota seinältä muillakin mekanismeilla. Kaasun virtaus irrottaa seinillä olevia partikkeleita (Kaer 2001). Gravitaatio voi irrottaa kerrostuman, jos se on tarpeeksi voimakas aiheuttamaan särön kerrostuman sisälle tai ollessaan voimakkaampi kuin kuonan ja pinnan välinen adheesio. Myös sulan kuonan virtaus pinnalla on gravitaation aiheuttama poistomekanismi. Gravitaation aiheuttamaa irtoamista tapahtuu yleensä kerrostumien kasvaessa suuriksi. Esimerkiksi yhtäkkinen lämpötilagradientti voi aiheuttaa

erisuuruisen lämpölaajenemisen kerrostuman ja pinnan välillä, mikä voi johtaa kerrostuman irtoamiseen pinnalta. (Zbogor et al. 2009.)

Likakerrosten poistoon käytetään useimmiten puhallusnuohousta, jossa ohjataan suurinopeuksinen höyry-, vesi- tai ilmavirta tulistinputkilla oleviin kerrostumiin, mikä johtaa niiden rikkoutumiseen ja irtoamiseen. Puhallin synnyttää sekä paineen aiheuttaman mekaanisen voiman että termisen voiman, joka aiheutuu puhalluksen synnyttämästä paikallisesta jäähtymisestä. Puhdistustehokkuus riippuu kerrostuman paksuudesta ja lujuudesta, mutta myös puhaltimen ominaisuuksista. Irtonainen likakerros on helppo poistaa pinnalta, kun taas sintraantunut kerrostuma voi tuottaa ongelmia. (Vargas et al. 2001; Livingston 2006; Pophali et al. 2013.)

Seinältä eri mekanismeilla irronneet partikkelit voivat tarttua uudelleen pinnoille tulipesän muissa osissa. Tämä voi myös olla merkittävä mekanismi pitkäaikaisessa kuonaantumisen ja likaantumisen mallintamisessa. (Stam et al. 2009.)

Eräs kuonaantumisen aiheuttama ongelma leijupoltossa ovat seinille syntyvät paksut kuonakerrokset, jotka voivat murtuessaan pudota suurina kappaleina petiin. Tämä saattaa aiheuttaa paikallista pedin defluidisaatiota, joka voi johtaa petipartikkeleiden agglomeraatioon. Tätä voidaan ehkäistä puhdistamalla seiniä säännöllisesti, esimerkiksi vesitykillä kerrostumien ollessa vielä pieniä. Irronneet kappaleet voidaan poistaa pedistä pohjatuhkan mukana. (Silvennoinen & Hedman 2013.)

2.5 Tuhkan ja kuonan ominaisuudet

Tuhkan ominaisuudet, kuten sen pintajännitys ja viskositeetti vaikuttavat tuhkan tahmeuteen. Kuonakerroksen ominaisuuksista tärkeimmät ovat tiheys, lämmönsiirtokerroin ja emissiviteetti, jotka vaikuttavat kerrostuman paksuuteen ja lämmönsiirtoon. Nämä ominaisuuden riippuvat tuhkan kemiallisesta koostumuksesta ja tulipesän olosuhteista.

2.5.1 Tiheys

Tulipesään syötettävän polttoainepartikkelin tiheys riippuu polttoaineesta. Biomassa ei yleensä ole niin tiheää kuin hiili. Seinään osuvan partikkelin mallinnettuun tiheyteen vaikuttaa käytetty palamismalli (Mills 1986). Jos oletetaan partikkelin palavan vakiohalkaisijalla, tiheys on pienempi kuin jos sen oletettaisiin palavan vakiotiheydellä. Myös palamattoman koksen määrä vaikuttaa tiheyteen. Mallinnettaessa kuonaantumista syötämällä tulipesään lentotuhkaa valmiilla kokojakaumalla, tiheyden arvot vaihtelevat arvosta 1500 kg/m^3 (Borello et al. 2013) arvoon 2600 kg/m^3 (Mu et al. 2012).

Pinnalle syntyvän kuona- tai likakerroksen tiheys ei ole sama kuin pinnalle osuvien partikkelien. Tämä johtuu partikkelien hajoamisesta, sintraantumisesta ja sulamisesta. Jos halutaan laskea pinnalle tarttuvien partikkelien massavirran avulla kuonakerroksen paksuus, täytyy kuonan tiheys tuntea. Kirjallisuudesta löytyvät arvot kuonan tiheydelle vaihtelevat paljon, mutta ne ovat pääosin lentotuhkan tiheyttä suurempia. Joitakin arvoja eri lähteistä on esitetty taulukossa 2.2.

Taulukko 2.2. Kirjallisuudessa käytettyjä arvoja kuona- tai likakerroksen tiheydelle.

Kerrostuman tiheys (kg/m ³)	Lähde	Sovellus
1050–1375	(Kosmatka et al. 2002)	Jähmettynyt seinältä poistettu kuona
2400–3000	(Shannon et al. 2008)	Sula kuona, hiilen poltto
2000	(Kekkonen et al. 2012)	Sula kuona, hiilen poltto
1200	(Borello et al. 2013)	Puun poltossa syntyvä kuonakerros
1500	(Zhou et al. 2007)	Biomassan poltto, tulistinputket
2500	(Petersen 2012)	Biomassan poltto, tulistinputket
2200	(Robinson et al. 2001)	Hiilen ja oljen poltto
1923	(Li et al. 2009)	Soodakattilan kuona
2500	(Li et al. 2009)	Hiilen poltossa syntyvä kuona
2200	(Baxter 2000)	Kiinteä kerrostuma, hiilen poltto
1500	(Venturini et al. 2012)	Kiinteä kerrostuma tulistinputkella

Kuonan tiheyteen vaikuttaa muun muassa sen alkuainekoostumus. Tiheys kasvaa kuonan sisältäessä paljon rauta- tai mangaanioksideja (Mills 1986). Tämän perusteella Ni et al. (2010) käyttävät seuraavaa korrelaatiota kuonan tiheyden laskemiseksi

$$\rho_k = 2460 + 18(y_{FeO} + y_{Fe_2O_3} + y_{MnO}) \left(\frac{kg}{m^3}\right). \quad (34)$$

Kiinteän kerrostuman tiheyteen vaikuttaa alkuainekoostumuksen lisäksi sen huokoisuus. Kerrostuman pinnan saavuttaessa lämpötilan, jossa tuhka on juoksevaa, kerrostuma lakkaa kasvamasta. Sen tiheys voi kuitenkin kasvaa partikkelien sintraantuessa ja huokoisuuden pienentyessä. Sintraantumisella tarkoitetaan partikkelien hitsautumista yhteen lämpötilan lähestyessä tuhkan sulamislämpötilaa. Lentotuhkan huokoisuuden vuoksi partikkelin tiheys kasvaa huomattavasti myös sen sulaessa, mutta sulan kuonan tiheys muuttuu vain lämpölaajenemisen seurauksena. (Erickson et al. 1995; Baxter 2000; Vargas et al. 2001; Shannon et al. 2008.)

2.5.2 Pintajännitys

Pintajännityksen arvoa käytetään partikkelien tarttumista tarkasteltaessa Weberin luvun laskemiseen. Se riippuu lämpötilasta ja tuhkan kemiallisesta koostumuksesta ja lämpötilan nousu laskee sitä (Mills 2011). Kirjallisuudesta löytyy vain vähän tietoa sulaneen tuhkan pintajännityksestä. Mueller et al. (2005) käyttävät sulaneiden alkalisuolojen pintajännitykselle arvoa 0,15 N/m, joka on saatu lähteestä (Tanaka & Hara 1999). Melchiorin et al. (2011) mukaan hiilen kuonan arvot ovat 0,4-0,7 N/m yli 1300 °C lämpötilassa pelkistävässä olosuhteissa. Montagnaron & Salatinon (2010) mukaan hiilen tuhkalta tyypillinen pintajännitys on 0,2 N/m.

Nin et al. (2011) mukaan hiilen kuonan pintajännityksen arvon voi laskea suoraan sen sisältämien oksidien pintajännitysten avulla seuraavasti

$$\sigma = \sum x_i \sigma_i. \quad (35)$$

Yhtälössä x_i on oksidin mooliosuus. Mallin mukaan pintajännitys riippuu myös lämpötilasta nouden $0,004 \text{ N/m}$ 100 °C lämpötilan nousua kohden. Erityisesti kaliumilla, mutta jonkin verran myös titaanilla, piillä ja natriumilla on matalat pintajännitykset, kun taas raudalla ja mangaanilla on erityisen korkeat pintajännitykset.

Millsin (2011) mukaan pintajännitys ei kuitenkaan ole tasa-aineinen ominaisuus. Pinta-aktiivisilla komponenteilla, kuten B_2O_3 , K_2O , Na_2O ja SiO_2 , on alhainen pintajännitys ja ne esiintyvät pinnalla paljon suuremmissa konsentraatioissa kuin keskimäärin muualla. Lisäksi pintajännitykseen vaikuttaa raudan hapetusluku, joka riippuu ilmaker-toimesta ja lämpötilasta (Mills 1986). Lähteen (Mills 2011) mallilla, joka ottaa huomi-oon pinta-aktiiviset komponentit, laskettuna tuhkan pintajännitys on kuoren alku-ainekoostumusta käyttämällä tulipesän lämpötiloissa $0,3\text{-}0,4 \text{ N/m}$. Lämpötilan muutos ei aiheuta suurta muutosta höyrystimen alueen lämpötiloissa.

Zhoun et al. (2007) mukaan osittain sulaneen tuhkan tehollisen pintajännityksen las-kemiseen pitäisi ottaa mukaan myös kiinteän aineen vaikutus seuraan kaavan mukaan

$$\sigma_{th} = \left(\frac{1,75 - 0,75f}{f} \right)^2 \sigma, \quad (36)$$

missä kiinteän faasin vaikutus lasketaan sulaneen osuuden avulla.

2.5.3 Viskositeetti

Monissa malleissa käytetään tuhkan tahmeuden osoittajana viskositeettia, joka on tärkeä suure myös mallinnettaessa kuonakerroksen valumista seinää pitkin. Viskositeetti voi-daan määrittää kokeellisesti ja sille on olemassa useita empiirisiä lämpötilasta ja koos-tumuksesta riippuvia korrelaatioita.

Eniten likaantumisen ja kuonaantumisen mallintamisessa käytetty malli on Urbain-malli, joka on alun perin lähteestä (Urbain 1981). Tätä mallia käyttävät muun muassa Abbas et al. (1996), Lee & Lockwood (1999), Schulze et al. (2006), Sandberg (2007), Zhou et al. (2007), Schulze et al. (2011), Venturini et al. (2012) ja Borello et al. (2013). Mallissa yhdisteet jaetaan lasia muodostaviksi, lasia muokkaaviksi sekä amfoteerisiksi yhdisteiksi, joiden mooliosuudet lasketaan seuraavasti

$$x_{muod} = x_{SiO_2} + x_{P_2O_5} \quad (37)$$

$$x_{muok} = x_{FeO} + x_{CaO} + x_{MgO} + x_{Na_2O} + x_{K_2O} + x_{MnO} + x_{NiO} + 2(x_{TiO_2} + x_{ZrO_2}) + 3x_{CaF_2} \quad (38)$$

$$x_{amf} = x_{Al_2O_3} + x_{Fe_2O_3} + x_{B_2O_3}. \quad (39)$$

Viskositeetin laskemiseen käytetään seuraavia brittiläisten kivihiiilen tuhkien visko-siteettien mittauksiin perustuvia korrelaatioita: (Vargas et al. 2001)

$$\alpha = \frac{x_{muok}}{x_{muok} + x_{amf}} \quad (40)$$

$$b_0 = 13,8 + 39,9355\alpha - 22,049\alpha^2 \quad (41)$$

$$b_1 = 30,481 - 117,1505\alpha + 129,9978\alpha^2 \quad (42)$$

$$b_2 = -40,9429 + 234,0486\alpha - 300,04\alpha^2 \quad (43)$$

$$b_3 = 60,7619 - 153,9276\alpha + 211,1616\alpha^2 \quad (44)$$

$$b = b_0 + b_1x_{SiO_2} + b_2x_{SiO_2}^2 + b_3x_{SiO_2}^3 \quad (45)$$

$$-\ln(A) = 0,2693b + 13,9751 \quad (46)$$

$$\mu = ATe^{\frac{1000b}{T}}. \quad (47)$$

Tuhkapartikkeli ei välttämättä ole täysin sula osuessaan seinään. Zhou et al. (2007) ovat lisänneet Urbain-mallilla laskettuun viskositeettiin kaavalla (36) lasketun kiinteän aineksen vaikutuksen, koska heidän mukaansa Urbain-malli on tarkoitettu vain täysin sulaneelle tuhkalke.

Muokatussa Urbain-mallissa, joka on alun perin lähteestä Kalmanovitch & Frank (1988), on mittausten perusteella määritelty A:n ja b:n suhde uudelleen

$$-\ln(A) = 0,2812b + 14,1305. \quad (48)$$

Tätä mallia käyttävät Richards et al. (1993) ja Ni et al. (2011).

Seniorin & Srinivasacharin (1995) mukaan Urbain-malli kattaa vain pienet viskositeetit. He kehittivät korrelaation, joka kattaa myös korkeampia viskositeetteja määrittämällä erilliset kertoimet yli ja alle 10^4 Pa*s viskositeeteille. Pienillä viskositeeteilla arvot ovat huonompia kokeellisiin tuloksiin verrattuna kuin muokatulla Urbain-mallilla, kun taas välillä 10^4 – 10^9 Pa*s ne ovat parempia. Tätä suuremmille viskositeeteille kumpikaan malli ei anna hyviä tuloksia. Seniorin ja Srinivasacharin mallia käyttävät Kweon et al. (2003), Fang et al. (2010) ja Losurdo et al. (2012).

Huang et al. (1996), Degereji et al. (2012), Degereji et al. (2013) ja Garba et al. (2013) käyttävät Watt-Fereday-mallia, joka on alun perin lähteestä (Watt & Fereday 1968), tuhkan viskositeetin laskemiseen. Mallissa lasketaan viskositeetti seuraavien yhtälöiden avulla (Garba et al. 2013)

$$\mu = 10^{y-1} \quad (49)$$

$$y = \frac{10^7 m}{(T-423)^2} + c \quad (50)$$

$$m = 0,00835y_{SiO_2} + 0,00601y_{Al_2O_3} - 0,109 \quad (51)$$

$$c = 0,0415y_{SiO_2} + 0,0192y_{Al_2O_3} + 0,0276y_{Ekviv.Fe_2O_3} + 0,016y_{CaO} - 3,92 \quad (52)$$

$$y_{SiO_2} + y_{Al_2O_3} + y_{Ekviv.Fe_2O_3} + y_{CaO} + y_{MgO} = 100 (m - \%). \quad (53)$$

Nämä mallit on kehitetty hiilen poltossa syntyvien tuhkien viskositeettien mallintamiseen. Biomassojen tuhkien erilaisen koostumuksen vuoksi mallit eivät anna välttämättä yhtä tarkkoja arvoja niiden viskositeeteille. Sandberg (2007), Zhou et al. (2007) ja Borello et al. (2013) kuitenkin käyttävät yllä esitettyjä malleja biomassan poltossa.

Biomassan ja hiilen yhteispolttoon ovat Garba et al. (2013) kehittäneet seuraavan muunnoksen Watt-Fereday-mallista

$$\log \mu = \frac{10^7 m}{T_s^2} + c, \quad (54)$$

missä pehmenemispiste T_s riippuu biomassan ja hiilen tuhkien pehmenemispisteistä

$$T_s^2 = y_h T_{s,h}^2 + \frac{y_b}{\kappa} T_{s,b}^2 \quad (55)$$

ja κ on sulavien ja sintraantuvien oksidien suhde

$$\kappa = \frac{y_{Fe_2O_3} + y_{CaO} + y_{MgO} + y_{Na_2O} + y_{K_2O} + y_{P_2O_5}}{y_{SiO_2} + y_{Al_2O_3} + y_{TiO_2}}. \quad (56)$$

Tämän luvun korrelaatioita käytetään yleensä laboratoriossa mitatulle tuhkan koostumukselle. Näin saadaan viskositeetille lämpötilariippuvuus, jonka mukaan voi määrittää tarttumistodennäköisyyden partikkelin osuessa pintaan. Tällainen menetelmä ei kuitenkaan ota huomioon palamisen aikana tapahtuvia muutoksia tuhkan koostumuksessa tai paikallisen ilmakertoimen vaikutusta. Taha et al. (2013) laskevat tämän vuoksi tuhkan tasapainokoostumuksen eri olosuhteissa termodynaamisilla tasapainolaskuilla ja määrittävät viskositeetin tämän koostumuksen avulla.

2.5.4 Lämmönjohtavuus

Kuonan lämmönjohtavuuteen vaikuttaa monta tekijää, joista tärkeimpiä ovat kerrostuman huokoisuus, partikkelien sintraantuminen, kerrostuman kemiallinen koostumus, lämpötila ja partikkelikoko.

Paikallinen huokoisuus on tärkeä ominaisuus kerrostuman mallintamisessa, koska se vaikuttaa kerrostuman paksuuteen, lämmönjohtavuuteen ja lujuuteen. Huokoisesta erillisistä partikkeleista koostuvan kerrostuman lämmönjohtavuus on pienempi kuin sulan tai osittain sulan kuonan. (Zbogor et al. 2005.) Lämmönsiirto huokoisen väliaineen läpi voi olla jopa kertaluokkaa pienempi kuin vastaavan aineen, joka ei ole huokoinen. Ensimmäinen puhtaalle ja kylmälle pinnalle syntyvä kerrostuma koostuu yleensä irrallisista sintraantumattomista partikkeleista. Kerrostuman kasvaessa sen pintalämpötila nousee ja partikkelit alkavat sintraantua ja sulaa. Sintraantuminen saa partikkelit tarttumaan kiinni toisiinsa, mikä kasvattaa partikkelien välistä kontaktipinta-alaa. Tällä on positiivinen vaikutus lämmönjohtavuuteen. (Baxter 2000.) Kuonan sulaminen pienentää huokoisuutta nesteen täyttäessä kiinteiden partikkelien väliin jäävät raot (Richards et al. 1993; Sandberg 2007).

Lämmönjohtavuus on vain vähän riippuvainen lämpötilasta ensimmäisen sintraantumislämpötilan alapuolella. Tämän lämpötilan yläpuolella lämpötilan ja lämmönjohtavuuden välillä on vahva riippuvuus. Lämpötilan noustessa ensimmäisen sintraantumislämpötilan yläpuolelle partikkelit alkavat sintraantua, minkä aiheuttama lämmönjohtavuuden kasvaminen on irreversiibeli prosessi. Hiilen tuhka sintraantuu 900–1200 °C lämpötilassa. Lämpötilan kasvaessa myös huokoisen materiaalin sisällä tapahtuva sätei-

ly kasvaa merkittäväksi tekijäksi kokonaislämmönsiirtoa tarkasteltaessa. (Zbogar et al. 2005.)

Sulamattomista partikkeleista koostuvassa kerrostumassa suuret partikkelit nostavat kerrostuman lämmönjohtavuutta (Rezaei et al. 2000). Tuhkan kemiallinen koostumus vaikuttaa lämmönjohtavuuteen sekä suoraan että epäsuorasti. Tuhkan sisältämällä oksideilla on erisuuruiset lämmönjohtavuudet, millä on pieni vaikutus kokonaislämmönsiirtoon. Epäsuora vaikutus on suoraa vaikutusta suurempi, sillä kemiallisella koostumuksella on suuri vaikutus partikkelien sintraantumis- ja sulamislämpötiloihin. (Robinson et al. 2001.)

Kirjallisuudessa on raportoitu kerrostuman lämmönjohtavuudelle välillä 0,012-15 W/mK vaihtelevia arvoja. Irrallisten sintraantumattomien partikkelien muodostaman kerrostuman keskimääräisen lämmönjohtavuuden on mitattu olevan $0,14 \pm 0,03$ W/mK (Robinson et al. 2001). Taulukossa 2.3 on esitetty eri malleissa käytettyjä arvoja lika- tai kuonakerroksen lämmönjohtavuudelle.

Taulukko 2.3. Kirjallisuudessa käytettäviä lika- tai kuonakerroksen lämmönjohtavuuksia.

Lämmönjohtavuus (W/(m K))	Lähde	Sovellus
0,01-2	(Furmanski 1995)	Hiilen poltossa syntyvät kerrostumat
1,89	(Seggiani 1998)	Hiilen kaasutuksessa syntyvä kuona
1,73–1,80	(Yong et al. 2012)	Hiilen kaasutuksessa syntyvä kuona
0,5-2	(Mueller et al. 2005)	Biomassan alkalipitoisen lentotuhkan synnyttämä kerrostuma
0,14-3	(Robinson et al. 2001)	Hiilen tuhka, pienimmät arvot irrallisille, suurimmat sintraantuneille partikkeleille
0,4-1,5	(Sandberg 2007)	Kovat kerrostumat korkeassa lämpötilassa
5,5–6,7	(Zhou et al. 2007)	Kiinteän faasin arvo, tehollinen arvo lasketaan kaavalla (61), biomassan poltto arinakattilassa
0,45	(Richards et al. 1993)	Laskettu kaavalla (61), hiilen poltto pilottiskaalan reaktorissa
0,88	(Li et al. 2013)	Kiinteä kerros, soodakattila
0,45		Nestemäinen kerros, soodakattila

Kiinteän kerroksen lämmönjohtavuuteen vaikuttaa sekä kiinteän että kaasufaasin lämmönjohtavuus. Zbogar et al. (2005) toteavat kiinteän faasin lämmönjohtavuuden olevan jopa 2-3 kertaluokkaa suurempi kuin kaasufaasin, joten lämmön johtuminen tapahtuu pääosin kiinteän faasin läpi. Artikkelissa esitellään monta eri mallia huokoisen kerroksen lämmönjohtavuuden laskemiseksi. Näistä yksinkertaisimmat ovat huokoisen aineen lämmönjohtavuuden ylä- ja alarajat. Ylärajalla oletetaan, että kaasu ja kiinteä faasi on kytketty rinnan, kun taas alarajalla ne oletetaan sarjaan kytketyiksi. Rajat voi laskea seuraavista yhtälöistä

$$k_{th,max} = k_g \phi + (1 - \phi)k_s \quad (57)$$

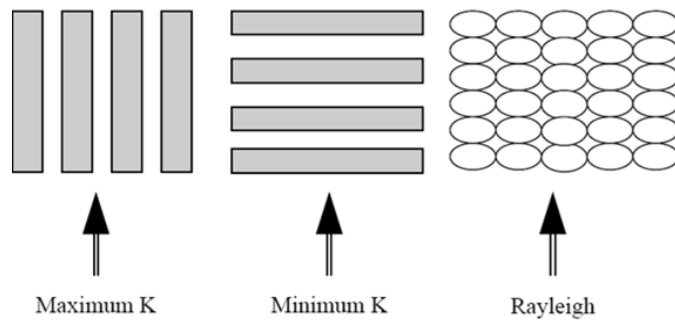
$$k_{th,min} = \frac{k_g}{\phi + \frac{1-\phi}{\frac{k_s}{k_g}}} \quad (58)$$

Näissä yhtälöissä ei kuitenkaan oteta huomioon säteilyn vaikutusta, joten ne eivät ole absoluuttinen ylä- ja alaraja vaan suuntaa antavia arvoja. Kuvassa 2.5 on havainnollistettu lämmönjohtavuuden ylä- ja alarajoja.

Kuvassa 2.5 on myös esitetty Rayleighin malli kolmiulotteiselle samankokoisista palloista koostuvalle kerrostumalle. Malli käy arvoa 0,52 suuremmille huokoisuuksille niin kuin useimmat samankokoisia palloja käsittelevät mallit. Vaikka tämä malli on matemaattisesti eksakti, se on keinotekoinen, koska huokoiset aineet eivät todellisuudessa järjestäydy kuvan mukaisesti. Kyseisen asetelman efektiivisen lämmönjohtavuuden voi laskea partikkelien säteen avulla seuraavasta yhtälöstä

$$\frac{k_{th}}{k_g} = \frac{\frac{2+r}{1-r} - 2(1-\phi)}{\frac{2+r}{1-r} + (1-\phi)} \quad (59)$$

Yhtälön voi muokata kattamaan matalampiakin huokoisuuden arvoja.



Kuva 2.5. Kerrostuman lämmönjohtavuuden laskemiseksi käytettäviä konfiguraatioita. Nuolet osoittavat lämmönsiirron suunnan. Muokattu lähteestä (Zbogar et al 2005).

Kiinteän ja kaasufaasin yhdistävien lämmönsiirtokertoimien mallien käyttämiseksi on tunnettava kerrostuman huokoisuus, jolle löytyy hyvin vähän korrelaatioita. Richards et al. (1993) ehdottavat huokoisuuden laskemiseksi seuraavaa yhtälöä

$$\phi_k = 1 - \left((1 - \phi_0) + \frac{V_l}{V_s} (1 - \phi_0) \right), \quad (60)$$

jossa huokoisuus riippuu kiinteän ja nestemäisen faasin tilavuuksien suhteesta. Kerrostuman lähtöhuokoisuuden ϕ_0 arvon oletetaan olevan 0,6. Richardsin et al. (1993) mallissa lämmönjohtavuuden oletetaan riippuvan huokoisuudesta seuraavan yhtälön mukaisesti

$$k = (1 - F)k_s + Fk_g, \quad (61)$$

missä F riippuu huokoisuudesta seuraavalla tavalla

$$F = \frac{2^{6,5}}{2^{6,5}-1} \left(1 - \frac{1}{(1+\phi_k)^{6,5}} \right). \quad (62)$$

Valuva kuona on enimmäkseen sulaa, joten huokoisuudella ei ole merkitystä sen lämmönjohtavuuteen. Valuvan kuonan lämmönjohtavuuden riippuvuudelle lämpötilasta ovat Wang et al. (2007) esittäneet seuraavat yhtälöt

$$k = 0,105 + 2,99 * 10^{-4}(T_k - 273,15), T_k \leq (1170 + 273,15) \quad (63)$$

$$k = 24,3 - 0,0416(T_k - 273,15) + 1,81 * 10^{-5}(T_k - 273,15)^2, T_k \geq (1170 + 273,15)K, \quad (64)$$

joissa T_k on kuonan keskilämpötila.

2.5.5 Emissiviteetti

Lämmönsiirto savukaasuista kuonan pinnalle tapahtuu säteilemällä ja konvektiolla. Näistä säteily on hallitseva mekanismi höyrystimen alueella, kun taas konvektion merkitys kasvaa mentäessä tulistinalueelle. Koska tässä työssä käsitellään tulipesän säteilyosaa, on emissiviteetti tärkeä muuttuja tarkasteltaessa lämmönsiirtoa kuonakerroksen läpi. Kirjallisuuden antamia arvoja kuonaantuneille ja likaantuneille lämmönsiirtopinnoille on koottu taulukkoon 2.4.

Taulukko 2.4. Kirjallisuudessa käytettäviä arvoja kerrostuman pinnan emissiviteetille.

Emissiviteetti	Lähde	Sovellus
0,83	(Yong et al. 2012)	Hiilen kaasutuksessa syntyvä valuva kuona
0,75	(Mueller et al. 2005)	Biomassan alkalipitoisen lentotuhkan synnyttämä kerrostuma
0,8±0,1	(Mills 1986)	Hiilen polton ja metallurgian kuonat lämpötiloissa 1100–1900 K
0,4	(Wang et al. 2007)	Hiiltä polttava kuonaava poltin
0,83	(Seggiani 1998)	Hiilen kaasutus
0,8	(Kaer et al. 2006)	Olkea polttava kattila
0,8	(Zhou et al. 2007)	Biomassan poltto arinakattilassa
> 0,9	(Wall et al. 1995)	Sulanut kuona hiilen poltossa
0,8	(Li et al. 2009)	Soodakattila
0,83	(Li et al. 2009)	Hiilen kaasutus
0,8-0,95	(Ots 2011)	Sintraantunut tai sulanut kuona
0,3-0,4	(Ots 2011)	Kerrostuma irrallisista partikkeleista

Kuonaantuneen pinnan emissiviteetti eroaa puhtaan seinän emissiviteetistä. Otsin, (2011) mukaan puhtaan putken emissiviteetti on 0,8. Putken, jossa on irrallisista partikkeleista koostuva kerrostuma, emissiviteetti on 0,3-0,4. Sintraantuneen tai sulaneen kerrostuman emissiviteetti on 0,8-0,95 eli jopa suurempi kuin täysin puhtaan putken.

Emissiviteetin arvoon vaikuttaa muun muassa partikkelikoko, likakerroksen pinnan lämpötila, partikkelien sintraantuminen ja sulaminen sekä tuhkan kemiallinen koostumus. Useimmissa malleissa oletetaan likakerros harmaaksi kappaleeksi eli kuonan emissiviteetin olevan riippumaton säteilyn aallonpituudesta. Furmanski (1995) olettaa ker-

rostuman olevan myös täysin läpinäkymätön säteilylle sen paksuuden ollessa yli 0,7 mm.

Lämpötilan nousu laskee emissiviteetin arvoa sintraantumislämpötilan alapuolella. Tämä johtuu siitä, että kuonan emissiviteetti ei todellisuudessa ole riippumaton aallonpituudesta. Lämpötilan noustessa pinnan emittoima säteily siirtyy kohti pieniä aallonpituuksia, joilla emissiviteetin arvo on pienempi kuin suurilla aallonpituuksilla. (Furmanski 1995.) Sintraantumisen edetessä emissiviteetti kuitenkin nousee pinnan muuttuessa yhtenäisemmäksi. Kerrostuman sulaessa emissiviteetti lähestyy arvoa 0,9. Sulaneen pinnan emissiviteetti on kuitenkin vain vähän suurempi kuin pinnan, jossa kiinteät partikkelit ovat sintraantuneet täysin. (Zbogar et al. 2005.)

Likakerroksen väri riippuu sen kemiallisesta koostumuksesta. Kalsium-, pii- ja alumiinioksidi tekevät pinnasta vaalean, rautaoksidit taas punertavan tai keltaisen. Korkea hiilipitoisuus tekee pinnasta tumman. Näiden aineiden emissiviteetin riippuvuus aallonpituudesta on erilainen. (Furmanski 1995.) Värillisten yhdisteiden, erityisesti rautaoksidin, on todettu nostavan emissiviteettiä (Zbogar et al. 2005).

3 LÄHTÖTIEDOT JA KÄYTETYT MALLIT

Työn tavoitteena on mallintaa kuonaantumista BFB-kattilan tulipesässä ja verrata kirjallisuuteen perustuvien mallien toimivuutta käytännön sovelluksissa. Esimerkkitapauksena käytetään Rauman BFB-kattilaa, jossa poltetaan kuorta sekä kuoren ja lietteen seosta. Kuonaantumismalli koostuu partikkelien tarttumismallista ja höyrystimen seinille asetettavista reunaehdoista, jotka ottavat huomioon kuonaantumisen vaikutukset tulipesässä. Tarttumismallilla mallinnetaan, kuinka höyrystimen seinille osuvat partikkelit tarttuvat seiniin. Sen jälkeen kun on laskettu tarttuvien partikkelien määrä, voidaan mallintaa kuonakerroksen paksuutta tulipesän eri osissa ja kuonaantumisen vaikutusta tulipesän lämmönsiirtoon. Kuonaantumismalli on kehitetty, jotta saataisiin tietoa mahdollisten kuonaantumisongelmien sijainnista kattilassa. Lisäksi sen tavoitteena on saada määritettyä vakiolämpötilaa ja -emissiviteettiä tarkemmat reunaehdot tulipesän seinille.

Malli on toteutettu CFD-ohjelmisto FLUENT 12.1:llä käyttäen UDF-funktioita (user defined function). Käytetyssä laskentaverkossa on 1,1 miljoonaa kappaletta. Partikkelien tarttumista tarkastellaan partikkelien jälkilaskentana tasapainotilaan ratkaistusta tapauksesta. Partikkelien tarttumismallin tulosten perusteella määritetään paikallinen kuonakerroksen pintalämpötila tai paksuus, minkä jälkeen lasketaan kerrostuman vaikutus lämmönsiirtoon ja kaasun lämpötilaan.

3.1 Rauman laskentatapauksen kuvaus

Mallinnettavassa Rauman BFB-kattilassa on tehty kolmena eri päivänä mittauksia lämpötiloista, lämpövirran tiheyksistä ja eri kaasujen konsentraatioista. Ensimmäisenä päivänä polttoaineena oli kuori, toisena päivänä kattilassa poltettiin kuoren ja lietteen seosta ja kolmantena päivänä käytetyt polttoaineet olivat kuori, liete sekä kierrätyspolttoaine. Tarkemmat kuvaukset polttoaineista, kattilan ajotilanteista ja mittauksista löytyvät artikkeleista (Vainio et al. 2012) ja (Vainio et al. 2013). Kolmen mittauspäivän tapauksista palamista on mallinnettu päivinä 1 ja 2 ja näiden päivien mittaustuloksia on käytetty tulosten validointiin. Joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta simuloinnin tulokset vastaavat melko hyvin mittauksia. Mittauksista tämän työn kannalta keskeisiä ovat ensimmäisenä päivänä tehdyt höyrystimen seinien lämpötilojen mittaukset, joiden avulla on arvioitu myös kerrostumien paksuutta.

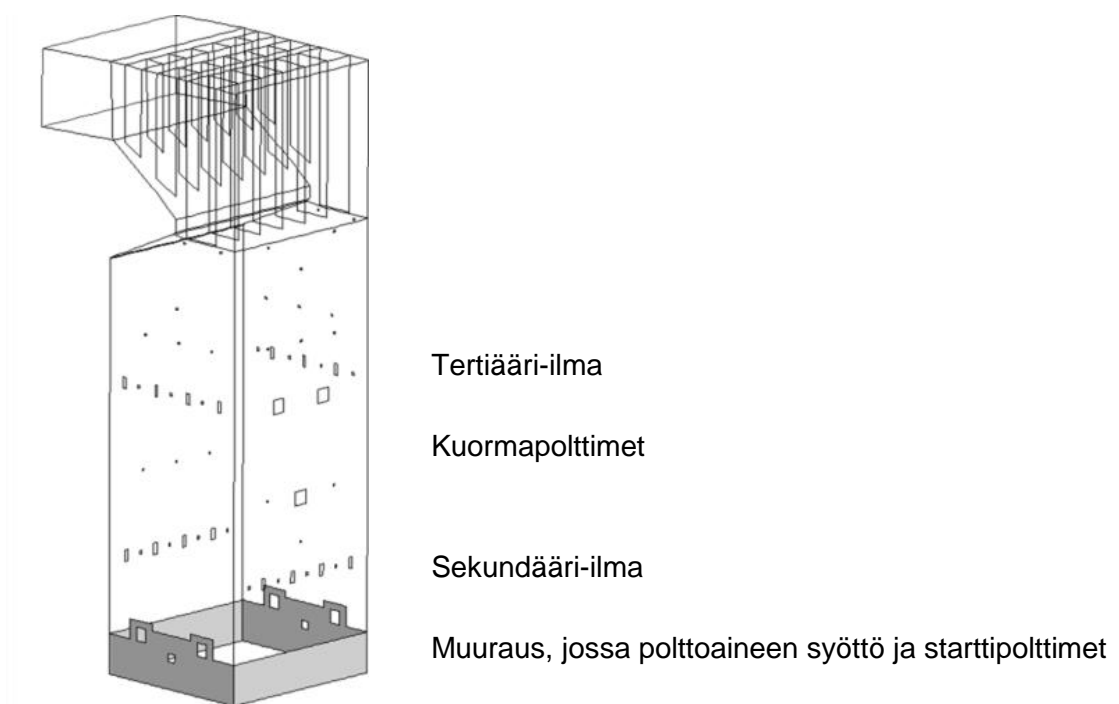
3.1.1 Kattilan mitat ja ilman jako

Ilman syöttö kattilaan on vaiheistettu leijutus-, sekundääri- ja tertiääri-ilman avulla. Lisäksi ilmaa syötetään polttoaineen syötössä heittoilmana, muurauksen alueella olevista

starttipolttimista sekä etuseinällä olevista kuormapolttimista. Kokonaisilmakerroin on molemmissa tapauksissa 1,34. Ilman syöttö on esitetty tarkemmin taulukossa 3.1. Polttoaineen syöttö tapahtuu kahdesta aukosta vasemmalla seinällä ja kahdesta aukosta oikealla seinällä. Kaaviokuva kattilasta, johon on merkitty ilma-aukkojen ja polttoaineen syötön sijainnit, on esitetty kuvassa 3.1.

Taulukko 3.1. Ilman jako laskentatapauksissa.

Ilman vaiheistus	Massavirta (kg/s)	Kumulatiivinen ilmakerroin
Primääri-ilma	21,0	0,50
Heittoilma	2,1	0,55
Starttipoltin	1,9	0,59
Sekundääri-ilma	13,9	0,92
Kuormapolttimet	3,2	1,00
Tertiääri-ilma	14,5	1,34
Yhteensä	56,5	1,34



Kuva 3.1. Kattilan periaatekuva, jossa näkyy ilman ja polttoaineen syötöt.

Kattilan leveys ja syvyys ovat 7,8 ja 7,4 metriä, ja korkeus on noin 40 metriä. Seini- en lämpötilaksi on alkuperäisessä laskentatapauksessa asetettu 327 °C, mikä vastaa höyrystinputkissa kulkevan veden lämpötilaa. Pedin yläpuolisen tilan eli freeboardin alaosassa seinillä on muuraus, jossa seinälämpötilat nousevat tätä korkeammiksi. Tulistimet ovat nokan tason yläpuolella, mutta niiden likaantumista ei käsitellä tässä työssä vaan keskitytään höyrystimen alueella eli tulipesässä tapahtuvaan kuonaantumiseen.

3.1.2 Polttoaineet

Ensimmäisenä päivänä polttoaineena oli kuusen kuori, jonka massavirta on 14,2 kg/s. Alempi polttoainetehto on 107 MW. Toisena päivänä poltettiin kuoren ja lietteen seosta. Seoksessa on 13,2 kg/s kuorta ja 2,5 kg/s lietettä. Seoksessa kuoren polttoainetehto oli 103 MW ja lietteen 4 MW. Lietteen pieni osuus tehosta johtuu sen suuresta kosteus- ja tuhkapitoisuudesta. Kuoren ja lietteen koostumukset ja lämpöarvot on esitetty taulukossa 3.2. Taulukossa 3.3 on esitetty polttoaineiden tuhkan koostumus.

Taulukko 3.2. Kuoren ja lietteen koostumus massaosuuksina sekä niiden lämpöarvot.

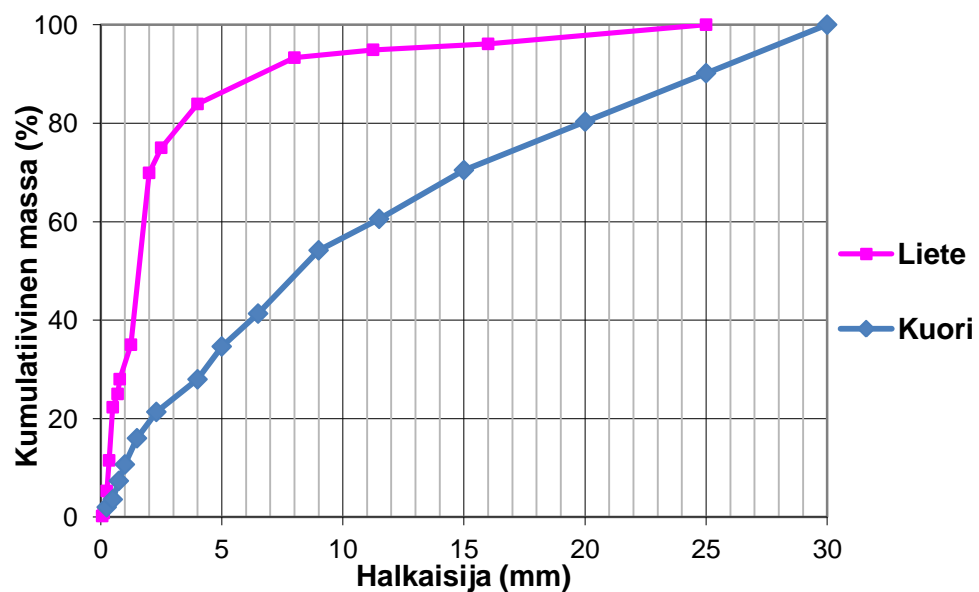
	Kuori	Liete
Kuiva-ainetta (%)	48,0	24,4
Kosteutta (%)	52,0	75,6
Kuivan polttoaineen LHV (MJ/kg)	18,1	13,2
Kostean polttoaineen LHV (MJ/kg)	7,5	1,5
Kuiva-aineen koostumus (%)		
Koksi	15,0	7,1
Haihtuvat	80,0	61,5
Tuhka (sisältää myös N ja S)	5,0	31,4
Alkuainekoostumus (%)		
C	51,2	38,2
H	5,7	4,6
N	0,38	1,9
O	38,1	25,8
S	0,044	0,9
Tuhka	4,5	28,6

Taulukko 3.3. Kuoren ja lietteen tuhkan koostumus massaosuuksina.

	Kuoren tuhka (%)	Lietteen tuhka (%)
Si	28,3	33,2
Al	5,41	23,1
Ca	44,8	8,40
Fe	2,95	23,6
K	9,05	2,39
Mg	4,13	29,0
Mn	1,30	8,60
Na	1,82	2,55
P	2,31	2,35
Cl	0	0,590
Br	0	0,0627
Yhteensä	100	100

Koska kuori ja liete ovat biopolttoaineita, niitä yhdistää suuri haihtuvien aineiden pitoisuus. Molemmilla on myös suuri kosteuspitoisuus. Kuoren tuhka sisältää paljon kalsiumia, piitä ja kaliumia. Lietteen tuhkan tärkeimmät komponentit ovat pii, magnesium ja alumiini ja lisäksi sen tuhkassa on paljon mangaania ja kalsiumia. Huomionarvoista polttoaineiden alkuainekoostumuksessa on kuoren tuhkan piipitoisuus, joka on lähes 30 % kuoren tuhkan massasta. Se on moninkertainen kuoren normaaliin piipitoisuuteen verrattuna, minkä seurauksena tuhkan koostumus vaikuttaa oljen tuhkan koostumukselta verrattaessa esimerkiksi lähteeseen (Skrifvars & Hupa 2002). Oljen poltto aiheuttaa kuonaantumisoongelmia korkeiden silikaatti- ja alkalipitoisuuksien vuoksi. Lisäksi kuoren alkuaineanalyysin antama tuhkapitoisuus on korkeampi kuin kuorella yleensä. Tämän vuoksi epäiltiin, että kuoren sekaan olisi prosessoinnin aikana sekoittunut hiekkaa.

Kuori- ja lietepartikkelien kokojakauma on esitetty kuvassa 3.2. Kuoripartikkelien halkaisijat vaihtelevat välillä 0,25–30 mm. Näistä suurimmat päätyvät kuitenkin petiin heti polttoaineen syötön jälkeen ja palavat siellä. Kuonaantumismallin kannalta kiinnostavimpia ovat suurimmaksi osaksi freeboardiin jäävät ja siellä palavat partikkelikoot, joita ovat halkaisijaltaan 0,25–1 mm partikkelit.



Kuva 3.2. Tulipesään syötettävien polttoainepartikkelien kokojakaumat.

Tässä työssä puhutaan yksinkertaisuuden vuoksi lietepartikkeleista, vaikka liete esiintyy suuren kosteuspitoisuutensa vuoksi enemmän pisaroina. Lietepartikkelit ovat kuoripartikkeleita pienempiä. Niiden koot vaihtelevat 0,0625 ja 25 mm välillä. Näistä freeboardiin jäävät pääosin 0,0625–0,5 mm partikkelit. Lietepartikkeleilla on suurempi tiheys kuin kuoripartikkeleilla, mikä selittää miksi petiin päätyy pienempiä liete- kuin kuoripartikkeleita.

3.1.3 Tulipesän seinien lämpötilamittaukset

Ensimmäisen ja kolmannen mittauspäivän aikana oli tehty mittauksia höyrytimen seinien lämpötiloista ja niille tulevasta lämpövirroista. Tuloksia on raportoitu lähteissä

(Koschack 2009) ja (Brink et al. 2011). Näiden mittausten perusteella on myös arvioitu kerrostumien paksuutta ja höyrypuolelle siirtyvää lämpövirtaa. Kuonan pintalämpötilat on mitattu lämpökameralla ja suurin osa esitetyistä mittaustuloksista on sekundääri-ilman ja nokan tason välissä. Mittauksia on paljon sivuseiniltä ja takaseinältä, kun taas etuseinältä ja tulipesän alaosista on vain vähän tuloksia. Tieto höyrystimen seinän lämpötiloista ja kerrostumien paksuuksista auttaa arvioimaan, kuinka hyvin kuonaantumismallit vastaavat todellisuutta.

Kuonan pintalämpötilojen suuruusluokkaa ensimmäisenä päivänä tulipesän eri osissa on havainnollistettu taulukossa 3.4. Tarkat mitatut lämpötilat vaihtelivat välillä 510–840 °C. Seinälämpötilojen mittaustarkkuuden on arvioitu olevan $\pm 20\text{--}40$ °C. Tulosten perusteella pintalämpötilat eivät ole koko seinällä läheskään vakioita, mutta muutokset eivät kuitenkaan ole kovin jyrkkiä. Lämpötilat seinillä ovat korkeimmillaan takaseinällä sekundääri- ja tertiääri-ilmojen tasolla. Sivuseinien lämpötilat ovat takaseinän puolella selvästi korkeammat kuin etuseinän puolella ja etuseinä on selvästi takaseinää kylmempi. Mittausten mukaan pintalämpötilat myös vaihtelevat nopeasti ajan funktiona savukaasujen lämpötilan vaihdellessa ja tulokset onkin annettu aikakeskiarvoina.

Taulukko 3.4. Kuonan mitattujen pintalämpötilojen suuruusluokka tulipesän eri osissa ensimmäisenä mittauspäivänä.

	Vasen seinä	Takaseinä	Oikea seinä	Etuseinä
Tertiääri-ilman ja nokan välinen taso	~550–750 °C	~650–750 °C	~500–700 °C	~550–650 °C
Tertiääri-ilman taso		~750–800 °C		~700 °C
Sekundääri- ja tertiääri-ilman välinen taso	~500–800 °C	~700–800 °C	~650–700 °C	
Sekundääri-ilman taso	~800 °C	~800 °C	~700–850 °C	

Mitattujen seinien lämpötilojen ja seinälle tulevien lämpövirtojen avulla on raportissa (Koschack 2009) myös arvioitu kuonakerroksen paksuuksia. Nämä arviot on tehty olettamalla kerrostuman lämmönjohtavuudeksi 1 W/mK. Mittaustulosten mukaan kuonakerroksen paksuudet vaihtelevat välillä 3–20 mm. Kohtia, joissa paksuutta on arvioitu, on melko vähän, joten on mahdotonta arvioida millä alueilla kuonaantumista tapahtuu eniten. Mittauksista on hyötyä ennemmin kuonakerroksen paksuuden suuruusluokan arvioinnissa.

3.2 Laskentatapausten yleinen mallinnus ja kuonaantumismallin lähtöoletukset

Tulipesän virtauslaskenta perustuu FLUENT-version 12.1 malleihin ja VTT:n omiin alimalleihin. Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti periaatteet, joihin tulipesän mallinnus

perustuu. Käytettyjä malleja ei käsitellä tässä työssä tarkemmin lukuun ottamatta kuonaantumismalleja. Kuonaantumismallit on toteutettu luomalla partikkelien tarttumiseen sekä seinän lämpötilalle ja emissiviteetille UDF-mallit, joiden periaatteet esitellään luvuissa 3.3–3.5. Tässä luvussa käydään myös läpi yksinkertaistukset, joista kuonaantumismallin kehityksessä lähdetään liikkeelle.

3.2.1 Tulipesän virtauslaskenta

Palavien virtausten mallinnus perustuu jatkuvuus-, liike- ja energiayhtälöiden sekä las-kennassa mukana olevien yhdisteiden siirtoyhtälöiden ratkaisemiseen. Samalla ratkai-sitaan yhtälöt säteilylämmönsiirrolle ja polttoainepartikkelien liikkeelle. Virtausta kuvaav-at yhtälöt voidaan esittää yleisesti seuraavassa muodossa

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \phi) - \nabla \cdot (D \nabla \phi) = S_{\phi}, \quad (65)$$

jossa ϕ on tarkasteltava suure. Yhtälön ensimmäinen termi kuvaa tarkasteltavan suureen aikariippuvuutta, toinen termi konvektiota ja kolmas diffuusiota. Yhtälön oikealla puo-lella oleva termi kuvaa lähdetermejä. Näiden virtausta kuvaavien yhtälöiden ryhmä on ratkaistava iteratiivisesti. (Kjälldman 2002; Versteeg & Malalasekera 2007.)

Polttoainepartikkelien liikeradat mallinnetaan Lagrangen menetelmällä eli partikke-leille annetaan kokojakauma ja koostumus ja ne kuvataan diskreetteinä partikkeleina, joiden liikeradat ja vuorovaikutus kaasufaasin kanssa ratkaistaan. Liikeradalla lasketaan partikkelin kuivuminen, pyrolyysikaasujen haihtuminen ja kiinteän aineen palaminen. Kuivumisen, pyrolyysin sekä kaasumaisen ja kiinteän polttoaineen palamisen mallinta-misessa käytettiin VTT:n omia malleja. Palamisen jälkeen partikkelista jää jäljelle pelk-kä tuhkaa jäännös. Alkuperäisessä mallissa partikkelin osuessa tulipesän seiniin reunaeh-tona on partikkelin heijastuminen, kun taas työssä kuvatussa partikkelien tarttumismal-lissa vaihtoehtona on myös tarttuminen.

3.2.2 Kuonaantumismallissa tehdyt oletukset

Tässä työssä käytetyissä kuonaantumismalleissa on tehty yksinkertaistavia oletuksia. Työn laajuus ei esimerkiksi riitä ottamaan huomioon tuhkakomponenttien höyrystymis-tä ja kondensaatiota, mitä tapahtuu biomassaa poltettaessa. Tässä työssä käytetty malli ottaa huomioon vain hitausvoimien aiheuttaman iskeytymisen. Toisaalta luvun 2.2 mu-kaan partikkelien kokojakaumaa tarkasteltaessa iskeytyminen on tässä tapauksessa sel-västi hallitseva mekanismi, koska pienin tarkasteltava partikkelikoko on 62,5 μm . Muita yksinkertaistuksia on tehty myös lähtöarvoja valittaessa, kuten esimerkiksi kuonaker-roksen lämmönjohtavuuden on oletettu olevan vakio, vaikka luvun 2.5.4 mukaan tämä ei pidä paikkaansa.

Partikkelit mallinnetaan Lagrangen menetelmällä niin, että saman polttoaineen kai-killä partikkeleilla on sama koostumus. Ne syötetään tulipesään kuvan 3.2 mukaisesti 15 eri kokoluokassa. Petiin osuvien partikkelien oletetaan jäävän petiin ja niissä olevan koksien palavan siellä niin, ettei tuhka enää päädy freeboard-tilaan. Partikkelin halkaisi-

jan oletetaan pysyvän vakiona palamisen aikana eli syntyvällä tuhkapartikkelilla on siis sama halkaisija kuin alkuperäisellä polttoainepartikkelilla. Tuhkapartikkelien agglomeraatiota ja fragmentaatiota ei oteta huomioon vaan partikkelin sisältämän tuhkan oletetaan pysyvän yhtenä kappaleena. Kuoren ja lietteen tuhkan ei oleteta myöskään vuorovaikuttavan ennen partikkelien tarttumista höyrystimen seinille. Siksi toisena päivänä kuori- ja lietepartikkelien tarttuminen ja heijastuminen käsitellään niiden erillisten T_{15} -lämpötilojen avulla eikä niiden seoksen T_{15} -lämpötilalla. Seinillä oleva tuhka käsitellään ensimmäisenä päivänä kuoren tuhkana ja toisena päivänä kuoren ja lietteen tuhkan seoksena. Seinillä olevan tuhkan sulamisen tarkastelussa oletetaan kuonan koostuvan vain sillä hetkellä poltettavan polttoaineseoksen tuhkasta. Näinhän ei todellisuudessa ole, koska mittausten aikana polttoaineseos vaihtuu kerran vuorokaudessa ja seinillä on myös aiempina päivinä kertynyttä kuonaa.

Täydellisesti palaneiden partikkelien tiheydet ovat melko pieniä, koska partikkelin halkaisijan ei oleteta muuttuvan palamisen edetessä. Tämä tehdään, koska käytössä olevassa palamismallissa on tehty tällainen oletus eikä tämän työn laajuus riitä aiheen käsittelyyn. Kuoren tiheys on 700 kg/m^3 , kun se syötetään tulipesään, mutta kun siitä on jäljellä vain tuhka, tiheys on 18 kg/m^3 . Lietepartikkelin tiheys laskee arvosta 850 kg/m^3 arvoon 73 kg/m^3 . Nämä tiheydet ovat pieniä verrattuna lentotuhkan tiheyteen, joka on luvun 2.5.1 mukaan yli 1000 kg/m^3 . Seinälle tarttuvassa partikkelissa voi olla jäljellä reagoimatonta koksia, mikä lisää partikkelin tiheyttä. Partikkelin tartuttua seinään koksien ei kuitenkaan oleteta enää reagoivan eikä sen myöskään oleteta vaikuttavan partikkelien tahmeuteen.

Tuhkan koostumuksen oletetaan pysyvän vakiona palamisen ajan eikä sen höyrystymistä oteta huomioon partikkelien massassa. T_{15} - ja T_{70} -lämpötilojen löytämiseksi tehtyjen tasapainolaskujen mukaan tuhkassa oleva kalium ja natrium höyrystyvät palamislämpötiloissa. Tasapainolaskujen mukaan kalium höyrystyy $750\text{--}1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ja natrium $800\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa. Höyrystyminen on kuitenkin otettu huomioon T_{15} - ja T_{70} -lämpötilojen laskennassa. Kattilan konvektiivisessa osassa höyrystyneet kaasut voivat kondensoitua joko suoraan lämmönsiirtopinnoille tai polttoainepartikkelien pinnalle tehden niistä tahmeita matalissakin lämpötiloissa. Tällä ei oleteta olevan merkitystä höyrystimen alueella, missä kaasun lämpötilat ovat korkeita.

3.3 Partikkelien tarttumismalli

Jotta voidaan mallintaa kuonaantumisen vaikutusta tulipesän olosuhteisiin, on ensin selvitettävä, millä alueilla kuonaantumista tapahtuu. Partikkelien tarttumismallin tavoitteena on kvalitatiivisesti löytää alueet, joilla kuonaantumista tapahtuu. Tulosten antamat lukuarvot tarttuvien partikkelien massavirrasta ovat vain viitteellisiä. Tarttumisen oletetaan riippuvan tuhkan tahmeudesta ja iskeytyvien partikkelien kineettisestä energiasta. Käytetyt tarttumiskriteerit perustuvat luvussa 2.3.2 esitettyihin malleihin.

3.3.1 Tarttumiskriteerit

Partikkeliratojen laskentaan ei tässä työssä oteta kantaa vaan tarttumismallin tarkastelu lähtee pisteestä, jossa partikkeli osuu seinään. Partikkeleille on määritelty oma reunaeh-tofunktionsa, joka suoritetaan aina partikkelin osuessa tulipesän seinään. Alkuperäisessä mallissa kaikki seinälle osuvat partikkelit heijastuvat, kun taas kuonaantumisen huomi-oonottavassa mallissa asetetaan vaihtoehdoksi myös partikkelin tarttuminen. Jos partik-kelin ja seinän ominaisuudet mahdollistavat tarttumisen, partikkeliradan laskenta loppuu siihen pisteeseen. Partikkelin heijastuessa radan laskenta jatkuu kuten alkuperäisessäkin mallissa.

Käytetyssä mallissa otetaan huomioon vain hitausvoimien aiheuttama iskeytyminen. Muiden mekanismien mallintaminen olisi monimutkaista verrattuna iskeytymiseen ja niiden vaikutus seinille osuvaan massavirtaan olisi todennäköisesti luvun 2.2 perusteella pieni. Partikkelin oletetaan osuvan seinään, jos sen liikerata tavoittaa seinän.

Partikkelin tarttumisen mallintaminen perustuu Yongin et al. (2012) ja Muellerin et al. (2005) deterministisiin malleihin. Tuhkan tahmeuden mallintamiseen käytetään T_{15} - ja T_{70} -lämpötiloihin perustuvaa menetelmää, koska se on yleisin biomassojen tuhkille käytettävä menetelmä. Sekä tuhkan että seinän lämpötilan ollessa T_{15} -lämpötilan ylä- puolella, partikkeli tarttuu aina. Jos partikkelin lämpötila on T_{15} -lämpötilan yläpuolella ja seinän lämpötila taas sen alapuolella tai päinvastoin, partikkelin tarttuminen riippuu Weberin luvusta. Weberin luku, kaava (16), kuvaa seinään osuvan partikkelin kineetti- sen ja pintaenergian suhdetta. Jos sen arvo on kriittisen arvon alapuolella, partikkeli tarttuu, kun taas sen ollessa kriittisen arvon yläpuolella, partikkelin kineettinen energia on niin suuri, että se heijastuu. Kriittisenä Weberin lukuna käytetään arvoa 1 Yongin et al. (2012) mukaan. Jos sekä partikkelin että seinän lämpötila on pienempi kuin T_{15} , par- tikkeli heijastuu. Nämä kriteerit on koottu taulukkoon 3.5.

Taulukko 3.5. Koonti partikkelien tarttumismallissa käytettävistä kriteereistä.

	Tahmea partikkeli		Ei-tahmea partikkeli	
	$We < We_{cr}$	$We > We_{cr}$	$We < We_{cr}$	$We > We_{cr}$
Tahmea seinä	Tarttuu	Tarttuu	Tarttuu	Heijastuu
Ei-tahmea seinä	Tarttuu	Heijastuu	Heijastuu	Heijastuu

Höyrystimen seinä mallinnetaan tasaisena pintana. Weberin luvun laskentaan käytetään nopeutta, joka on seinää vasten kohtisuora. Tämä lähestymistapa on hieman keino- tekoinen, koska höyrystimen seinä ei todellisuudessa ole tasainen pinta. Rakenteiden muodon lisäksi pinnalle kertyneet kerrostumat muuttavat pinnan muotoa. Mallinnettua tasaista pintaa vasten kohtisuoraa nopeutta kuitenkin käytetään, koska pinnan muodon tarkempi mallintaminen olisi liian monimutkaista.

Weberin luvun laskemiseen tarvitaan tietoa tuhkapartikkelin pintajännityksestä. Pin- tajännityksen arvoksi valittiin kuorelle 0,35 N/m, joka on keskiarvo Millsin (2011) korrelaatioiden antamista arvoista kaliumia ja natriumia sisältäville tuhkille 1000 °C

lämpötilassa. Käyttämällä lietteen koostumusta saatiin pintajännitykseksi 0,3 N/m. Korrelaatiot on tarkoitettu hiilen tuhkalle, mutta saadut arvot ovat samaa suuruusluokkaa muiden kappaleessa 2.5.2 esitettyjen arvojen kanssa. Jos halutaan tarkentaa Weberin luvun arvoa selvittämällä pintajännityksen lämpötilariippuvuus, saadaan Weberin luvulle lämpötilariippuvuus. Koska tarkkoja lämpötilariippuvuuksia on vaikea löytää kirjallisuudesta sulaneen tuhkan pintajännitykselle, käytetään tässä työssä yksinkertaistuksena lämpötilasta riippumatonta vakioarvoa.

Weberin luvun lisäksi tässä työssä testattiin kineettisen energian vaikutusta myös yleisemmin käytetyn kaavan (19) energian avulla, jonka arvon on oltava pienempi kuin nolla partikkelin tarttumiseksi. Kriteerin perusteella tässä sovelluksessa kaikki seinälle osuvat partikkelit heijastuvat, joten sitä ei tarkastella tarkemmin Tulokset-luvussa.

Vertailuksi käytetään tarttumiskriteerinä myös Kaerin et al. (2006), Zhoun et al. (2007) ja Schulzen et al. (2011) käyttämää menetelmää (kaava (13)) niin, että osuvan partikkelin tarttumistodennäköisyys nousee lineaarisesti arvosta 0 arvoon 1 sulaneen osuuden noustessa 15 %:sta 70 %:iin. Sulaneen osuuden oletetaan kasvavan lineaarisesti lämpötilan noustessa, mikä ei vastaa todellisuutta. Tarkemman tuhka-analyysin avulla todellinen sulamiskäyrä voitaisiin huomioida. Tässä mallissa ei yksinkertaisuuden vuoksi oteta huomioon seinän lämpötilaa vaan todennäköisyys perustuu pelkästään partikkelin lämpötilaan.

3.3.2 Tuhkan sulamislämpötilat

T_{15} -lämpötilan sijaan tarttumiskriteerinä käytettiin aluksi kaavan (2) antamaa T_{10} -lämpötilaa (Zhou et al. 2007), jonka arvoksi saatiin kuorelle 628 °C ja lietteelle 645 °C. T_{70} -lämpötilan arvoksi saatiin samalla kaavalla kuorelle 1271 °C ja lietteelle 1252 °C. T_{10} -lämpötilaa käytettiin, koska Zhoun et al. korrelaatio oli ainoa biomassan tuhkan sulamiskäyttäytymiselle kirjallisuudesta löytynyt korrelaatio ja siinä tarttumislämpötilaksi oli valittu T_{10} -lämpötila. Kirjallisuudesta löytyvien arvojen ja korrelaatioiden vähäisyyden vuoksi turvaututtiin termodynaamisiin tasapainolaskuihin sulamislämpötilojen löytämiseksi.

Lopullisissa laskuissa käytetään termodynaamisella tasapainoanalyysillä saatuja arvoja kuorelle ja lietteelle. Analyysin teki VTT:n tutkija Cyril Bajamundi ohjelmalla FactSage 6.3 ja siihen annettiin lähtötiedoksi polttoaineen alkuainekoostumus, kokonaisilmakerroin ja lämpötilaväli, jolla kattilassa operoidaan. Tulokset on koottu taulukkoon 3.6. Kuorelle saadut arvot käyttämällä tulipesän kokonaisilmakerrointa 1,34 ovat $T_{15} = 694$ °C ja $T_{70} = 1272$ °C. Lietteelle arvot ovat $T_{15} = 860$ °C ja $T_{70} = 1285$ °C. Kuorelle nämä arvot vastaavat Zhoun et al. kaavan antamia arvoja, mutta lietteelle lämpötilat ovat erisuuruiset. Koska kuori ja liete todennäköisesti vuorovaikuttavat keskenään tartuttuaan pinnoille, lämpötilat laskettiin myös kuoren ja lietteen seokselle, jonka sulamislämpötilat ovat $T_{15} = 740$ °C ja $T_{70} = 1240$ °C.

Taulukko 3.6. T_{15} - ja T_{70} -lämpötilojen arvot eri ilmakertoimilla ja tuhkan koostumuksilla (Bajamundi 2013).

Ilmakerroin	T_{15} (°C)			T_{70} (°C)		
	$\lambda = 0,50$	$\lambda = 0,92$	$\lambda = 1,34$	$\lambda = 0,50$	$\lambda = 0,92$	$\lambda = 1,34$
Kuori	616	456	694	1272	1272	1272
Liete	859	860	860	1136	1147	1285
Kuori ja liete	622	550	740	1087	1087	1240
Kuori jossa piitä 10 % alkuperäisestä määrästä	761, 961 ja 1258	786, 939 ja 1234	1176	2066	2026	2020
Kuori jossa piitä 50 % alkuperäisestä määrästä	759, 935 ja 1262	781, 912 ja 1243	1144	1473	1434	1434

Koska näytteeseen, josta kuoren alkuainekoostumus oli määritetty, epäiltiin sekoituneen hiekkaa, laskettiin myös tapaukset, joissa piin määrä polttoaineessa oli 50 % ja 10 % analyysissä ilmoitetusta määrästä. Kokonaisilmakertoimella laskettuna lämpötilat kuorelle, jossa piitä on 10 % alkuperäisestä, ovat $T_{15} = 1176$ °C ja $T_{70} = 2020$ °C. Kuorelle, jossa piitä on 50 % alkuperäisestä, arvot ovat $T_{15} = 1144$ °C ja $T_{70} = 1434$ °C. Piin määrän vaikutus näihin lämpötiloihin on siis erittäin suuri.

Joissakin tapauksissa havaittiin ilmakertoimellakin olevan suuri merkitys sulamislämpötiloihin. Koska ilman syöttö on vaiheistettu ja tulipesässä on paljon ali-ilmaisia alueita, tämä tulisi ottaa huomioon varsinkin freeboardin alistökiömetrisissä alaosissa. Kuorella ilmakertoimen vaikutus T_{15} -lämpötilaan on suuri, mutta T_{70} -lämpötilaan pieni. Lietteellä taas vaikutus T_{15} -lämpötilaan on pieni mutta T_{70} -lämpötilaan suuri. Kuoren ja lietteen seosta tarkasteltaessa ilmakertoimella on vaikutus molempiin lämpötiloihin. Ilmakertoimen vaikutusta partikkelien tarttumiseen tarkastellaan jonkin verran tässä työssä.

Myös kuorilla, jotka sisältävät 50 % ja 10 % alkuperäisestä piin määrästä, on T_{70} -lämpötilat, jotka ovat lähes riippumattomat ilmakertoimesta. T_{15} -lämpötilat taas muuttuvat olosuhteiden muuttuessa yli-ilmaisista ali-ilmaisiksi. Ali-ilmaisissa olosuhteissa T_{15} -lämpötiloja on kolme. Esimerkiksi tapauksessa, jossa ilmakerroin on 0,92 ja piin osuus 50 % alkuperäisestä, sulaneen tuhkan osuus on 15 % yläpuolella välillä 781–912 °C, minkä jälkeen tuhkan höyrystyminen aiheuttaa sulaneen osuuden hetkellisen piene-
nemisen. Sulanut osuus nousee lopullisesti 15 % yläpuolelle lämpötilan ylittäessä 1243 °C.

Taulukkoon 3.6 valitut ilmakertoimet perustuvat sekundääri- ja tertiääri-ilmojen alapuolella sekä tertiääri-ilman yläpuolella oleviin kumulatiivisiin ilmakertoimiin. Laskettaessa ilmakertoimen vaikutusta tarttumiseen käytetään kolmea eri T_{15} -lämpötilaa. Seinillä sekundääri-ilma-aukkojen alapuolella käytetään ilmakerrointa 0,5 vastaavaa arvoa. Tertiääri-ilma-aukkojen alapuolella käytetään ilmakerrointa 0,92 vastaavaa arvoa. Tertiääri-ilman yläpuolella käytetään ilmakerrointa 1,34. Nämä eivät vastaa paikal-

lisiä ilmakertoimia, jotka vaihtelevat hyvin nopeasti nolasta hyvin suuriin arvoihin, mutta antavat paremman käsityksen alueen stökiometriasta.

3.4 Lämmönsiirron mallinnus: reunaehtona kuonan pintalämpötila

Kuonaantuminen synnyttää höyrystimen seinille kerrostumia, jotka heikentävät pinnan läpi tapahtuvaa lämmönsiirtoa. Kuonakerroksen pinnan lämpötila nousee kerrostuman kasvaessa, koska lämmönsiirto pinnan läpi heikkenee. Kuonaantuminen vaikuttaa myös pinnan emissiviteettiin. Kerrostuman vaikutusta lämmönsiirtoon voi mallintaa määrittämällä kuonakerrokselle joko paksuuden ja lämmönsiirtokertoimen tai pintalämpötilan, ja laskemalla näiden tietojen avulla pinnan läpi kulkevan lämpövuon.

Partikkelien tarttumisen mallintamiseen löytyy kirjallisuudesta paljon eri menetelmiä. Monet mallit rajaavat kuonaantumisen ja likaantumisen mallinnuksen pelkkään partikkelien tarttumiseen, joten lämmönsiirron mallinnukseen menetelmiä on olemassa paljon vähemmän. Yleisin kirjallisuudessa käytettävä tapa on kerrostuman paksuuden aikariippuva laskenta, jonka perusteella lasketaan kerrostuman pintalämpötila. Tässä työssä etsitään kuitenkin ajasta riippumatonta mallia kuonaantumisen vaikutuksille tulipesässä. Tällainen malli on esimerkiksi Muellerin et al. (2005) T_{70} -lämpötilaan perustuva tasapainopaksuus.

Alkuperäisessä mallissa oletetaan höyrystimen pinnalle vakiolämpötila 327 °C , joka perustuu höyrypuolen lämpötilaan. Emissiviteetille käytetään vakioarvoa tai iteroidaan arvo, jolla tulipesän kokonaislämmönsiirto vastaa laitosdatan antamaa kokonaislämmönsiirtoa. Kuonaantumisen vaikutusta mallinnetaan määrittelemällä uudelleen nämä reunaehdot.

3.4.1 Pinnan lämpötilan määrittäminen

Seinien lämpötilalla on suuri vaikutus lämmönsiirtoon, koska pinnan emittoima säteily on verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Kokonaislämmönsiirto pienenee pinnan lämpötilan noustessa kuonakerroksen pinnan energiataseen mukaan

$$q = q_{conv} + q_{rad} = q_{inc} - (1 - \varepsilon)q_{inc} - \varepsilon\sigma T_k^4 + q_{conv}. \quad (66)$$

Yhtälön oikean puolen termit vasemmalta luettuna ovat tuleva säteily, heijastuva säteily, seinän emittoima säteily ja konvektio.

Ensimmäisenä oletuksena oletetaan kerrostuman kasvavan, kunnes sen pinta on niin kuuma, että siihen tarttuva tuhka valuu pinnalta pois. Tällöin kerrostuman paksuus lasketaan kaavan (21) tasapainopaksuuden avulla. Yksinkertaisimmassa mallissa kuonan pintalämpötila asetetaan arvoon T_{70} niissä osissa seiniä, joihin tarttuu partikkeleita. Tämän avulla lasketaan likakerroksen paksuus yhtälöstä

$$\delta_{max} = \frac{k(T_{70} - T_w)}{q}, \quad (67)$$

jossa q on yhtälön (66) nettolämpövuono, jonka FLUENT laskee virtaus- ja säteily-

yhtälöiden avulla. Tällainen malli ei kuitenkaan ota huomioon kuinka suuri massavirta partikkeleita tarttuu kuhunkin kohtaan.

Kuoren tuhkan T_{70} -lämpötila on 1272 °C , joka on niin korkea suhteessa kaasun lämpötilaan, ettei kerrostuman pinnan lämpötila saavuta sitä höyrystimen alueella. Kuoren ja lietteen seoksen T_{70} -lämpötila, 1240 °C , on vain hieman pienempi. Tämän mallin perusteella kerrostuma kasvaisi loputtomasti, mikä ei kuitenkaan todellisuudessa pidä paikkaansa. Mallia ei siis voi käyttää tässä sovelluksessa, joten sille etsittiin vaihtoehtoinen lähestymistapa. Korkeammassa lämpötilassa tapahtuvaan palamiseen tai matalammissa lämpötiloissa sulavalle tuhkalta malli voi kuitenkin sopia. Koska kuona ei muutu juokseväksi seinällä, ei kuonan valumista tarvitse ottaa huomioon tässä tapauksessa.

Vaikka kattilan kuonaantumisen ei ole tarkkaa mittaustietoa, voidaan sulamisen sijaan kuitenkin olettaa jonkin muun mekanismin rajoittavan kerrostuman paksuutta. Vaihtoehtoisena menetelmänä oletetaan kerrostuman pinnan saavan seinään osuvien partikkelien lämpötilan. Lämpötila lasketaan seinään osuvien partikkelien lämpötilan massakeskiarvona. Partikkelien massavirta seinille on niin pieni, etteivät partikkelien lämpötilat todellisuudessa määrää kerrostuman lämpötilaa. Partikkelien lämpötila on kuitenkin lähellä kaasun lämpötilaa, joten voi olettaa, ettei kerrostuman pinnan lämpötila voi nousta tätä korkeammaksi. Kerrostuman pintalämpötilan lähestyessä kaasun lämpötilaa lämmönsiirto lähestyy nollaa eikä absoluuttisella kerrostuman paksuudella ole merkitystä.

Edelliset menetelmät perustuvat siihen, että lasketaan kerrostuman paksuus jonkin tasapainolämpötilan avulla. Tällaiset mallit eivät ota huomioon kuinka suuri partikkeli-
vuo seinille tarttuu. Käytettäessä kaasun lämpötilaa lähestyvää arvoa kaikilla höyrystin-
pinoilla lähestyisi kokonaislämmönsiirto nollaa. Joissakin kohdissa tarttuvien partikke-
lien massavirta kuitenkin on niin pieni, ettei tasapainoarvoa todennäköisesti saavuteta
ennen kuin kerrostumat irtoavat seiniltä jollakin mekanismilla. Tasapainomallin käyt-
täminen liioittelee näissä kohdissa lämmönsiirron pienenemistä. Ongelman ratkaisemi-
seksi käytetään seinälle osuvien partikkelien lämpötilaa vain alueilla, joilla seinään tart-
tuvien partikkelien massavirta on suuri. Suuren ja pienen massavirran välinen raja mää-
ritellään valitsemalla rajaksi kriittisen massavirran arvo. Alueilla, joilla massavirta on
pieni, lämpötilan oletetaan riippuvan lineaarisesti seinään tarttuvien partikkelien massa-
virran ja kriittisenä arvona käytettävän massavirran suhteesta seuraavasti

$$T_k = \begin{cases} T_p, & \dot{m}_t'' > \dot{m}_{cr}'' \\ T_w + \frac{\dot{m}_t''}{\dot{m}_{cr}''} (T_p - T_w), & \dot{m}_t'' < \dot{m}_{cr}'' \end{cases} \quad (68)$$

missä T_w on alkuperäinen seinän lämpötila, joka on tässä tapauksessa 327 °C .

Samaa menetelmää voi soveltaa myös käyttämällä muitakin lämpötiloja kuin partikkelien lämpötiloja. Esimerkiksi kaasun lämpötilan ollessa T_{70} -lämpötilaa suurempi, partikkelien lämpötilan voi korvata yhtälössä T_{70} -lämpötilalla. Ongelmana on kuitenkin kriittisen massavirran \dot{m}_{cr}'' valinta. Kriittinen massavirta jakaa tulipesän seinät nopeammin ja hitaammin kuonaantuviin alueisiin. Tässä työssä tulipesää mallinnetaan ar-

voilla $0,5 \text{ g/s/m}^2$ ja $0,1 \text{ g/s/m}^2$, jotka perustuvat tarttuneiden partikkelien massavirtoihin. Todellisuutta vastaava arvo on todennäköisesti tapauskohtainen ja sen määrittämiseksi tarvitaan tietoa tulipesän seinien kuonaantumisesta.

Muuraukselle on määritetty alkuperäisessä tapauksessa lämpötilan sijaan lämmönsiirtokerroin ja paksuus eikä tätä reunaehto muokata. Partikkelien tarttuminen laskeaan muurauksen alueella kuten höyrystimenkin alueella. Muuraukselle ei kuitenkaan lasketa kerrostuman paksuutta tai uutta lämpötilaa, koska sen läpi kulkeva lämpövuoto on pieni ja uuden pintalämpötilan vaikutus lämmönsiirtoon olisi hyvin pieni.

3.4.2 Pinnan emissiviteetin määrittäminen

Pinnan emissiviteetin noustessa säteilylämmönsiirto paranee kaavan (66) mukaisesti. Sekä likainen että puhdas pinta käsitellään yleensä harmaana pintana, mikä tarkoittaa emissiviteetin olevan vakio kaikilla aallonpituuksilla ja riippumaton pinnan lämpötilasta. (Öhman 2002.) Kirjallisuudessa yleisin kuonakerroksen emissiviteetille käytetty arvo on 0,8, mitä on havainnollistettu taulukossa 2.4. Puhtaan pinnan emissiviteetti riippuu materiaalista. Kiillotetun teräksen emissiviteetti on 0,066 ja oksidoituneen 0,79 (Raiko et al. 2002, liite B).

Alkuperäisessä mallissa kokonaislämmönsiirto vastaa laitosdatasta saatua arvoa. Seinien lämpötiloja nostettaessa kokonaislämmönsiirto pienenee. Jos halutaan pitää kokonaislämmönsiirto todellisuutta vastaavassa arvossa, lämmönsiirron heikentyessä kuonaantuneilla alueilla on sen samalla parannuttava muilla alueilla. Kokonaislämmönsiirtoon on yksinkertaista vaikuttaa säätämällä seinien emissiviteettiä.

Kuonaantumista voi mallintaa asettamalla kuonaantuneen pinnan emissiviteetin arvo kohtiin, joihin tarttuu partikkeleita, ja puhtaan pinnan emissiviteetin arvo kohtiin, joihin partikkeleita ei tartu. Ongelmana menetelmässä on kuitenkin se, että lasketuissa tapauksissa lähes kaikkialle höyrystinpinnoille tarttuu jonkin verran partikkeleita. Menetelmän käyttäminen vaatii kriteerin, jonka mukaan pinnat jaetaan kuonaantuneisiin ja kuonaantumattomiin. Toisena ongelmana on kokonaislämmönsiirto, jota on vaikea saada vastaamaan todellisuutta käyttämällä kahta vakioarvoa emissiviteetille. Menetelmä hylättiin tässä työssä juuri vaikean kokonaislämmönsiirron määrittämisen vuoksi.

Toinen vaihtoehto on etsiä yksi emissiviteetti kaikille pinnoille, jota käyttämällä saavutetaan todellisuutta vastaava kokonaislämmönsiirto. Tällä periaatteella lämpötilaa voi käyttää kuonaantumisen vaikutusten mallintamiseen ja samalla emissiviteetin avulla pitää kokonaislämmönsiirron vakiona. Emissiviteetin säätö perustuu menetelmään, jossa emissiviteetin arvoa muutetaan kaasufaasia iteroitaessa niin, että saavutetaan todellisuutta vastaava kokonaislämmönsiirto. Käytännössä tämä tarkoittaa emissiviteetin nostoa seinien lämpötilojen noustessa. Tässä työssä emissiviteetin ylärajaksi on asetettu 0,9, joten liian korkeilla seinälämpötiloilla emissiviteetin nosto ei riitä halutun kokonaislämmönsiirron saavuttamiseen. Useimmat tässä työssä mallinnetut tapaukset käyttävät tätä lähestymistapaa ja lähes kaikissa lasketuissa tapauksissa saavutetaan todellisuutta vastaava kokonaislämmönsiirto.

Kolmas vaihtoehto on asettaa vakio emissiviteetti joko kuonaantuneelle tai kuonaantumattomalle pinnalle. Toisen pinnan emissiviteetti iteroidaan niin, että päästään todellisuutta vastaavaan kokonaislämmönsiirtoon samalla periaatteella kuin yhden emissiviteetin tapauksessa. Ensimmäisen päivän tapausta mallinnetaan myös tällä tavalla. Mallissa oletetaan, että seinillä, joille tarttuu vain vähän partikkeleita, on irrallisista partikkeleista koostuvat kerrostumat ja emissiviteetti on pieni. Seinillä, joille partikkeleita tarttuu enemmän, oletetaan kerrostuman lämpötilan olevan niin suuri, että tuhka on osittain sulaa. Näillä alueilla emissiviteetti on suuri. Käytetyt arvot perustuvat Otsin (2011) artikkeliin. Mallissa on käytössä tarttuvien partikkelien massavirran arvo, jonka perusteella pinta jaetaan kuonaantuneisiin ja kuonaantumattomiin pintoihin. Tämä massavirta on kuitenkin eri kuin seinän lämpötilaa määrittäessä käytettävä kriittinen massavirta. Emissiviteettiä säädettäessä valitaan silmämääräisesti massavirran arvo, joka jakaa pinnan puoliksi enemmän ja vähemmän kuonaantuneisiin alueisiin. Vaihtoehtoisesti voisi valita sellaisen kuonan pintalämpötilan, jossa tuhkasta on sulanut tietty määrä.

3.4.3 Kuonakerroksen paksuuden laskeminen

Kuonakerroksen paksuus on yhteydessä lämmönsiirtoon lämmönjohtumisyhtälön

$$q = \frac{k}{\delta_k} (T_k - T_w) \quad (69)$$

mukaisesti. Lämpövirran tiheys q on kaavan (66) seinälle tulevan nettosäteilyvirran ja konvektion summa, jonka FLUENT laskee virtaus- ja säteilylämmönsiirron yhtälöistä. Seinämän paksuuden laskenta ei vaikuta lämmönsiirtoon, mutta sen avulla voi selvittää, kuinka suurta paksuutta laskettu lämmönsiirron pieneneminen vastaa ja verrata suhteellisia paksuuksia toisiinsa.

Lämmönjohtavuudelle valittiin vakioarvo 1 W/mK , koska se on kirjallisuudessa käytettyjen taulukon 2.3 arvojen suuruusluokkaa. Tarkemman huokoisuudesta riippuvan arvon laskeminen vaatisi enemmän tietoa tuhkan sintraantumisesta ja sulamisesta seinällä. Kuonakerroksen paksuus on kääntäen verrannollinen kerroksen lämmönjohtavuuteen, joten lämmönjohtavuuden kaksinkertaistaminen pienentää kerroksen paksuuden puoleen. Vakioarvo riittää kuitenkin tämän työn tarkkuuteen.

Kerrostuman paksuutta voi myös laskea aikariippuvana tarttuvien partikkelien massavirran avulla. Tähän tarvitaan tietoa siitä, kuinka paksuksi kerrostumat saavat kasvaa ennen kuin ne irtoavat tai puhdistetaan seiniltä. Ilman poistomekanismeja kerrostumat kasvavat loputtomasti, koska niiden lämpötila ei näissä laskentatapauksissa saavuta lämpötilaa, jossa kuona valuu pois seinältä. Laskettaessa kerrostuman kasvunopeutta partikkelien massavirran avulla tarvitaan tietoa kuonan tiheydestä. Tälle on esitetty arvoja taulukossa 2.2. Kun tiedetään partikkelien massavirta seinälle ja kuonan tiheys, voi kuonakerroksen paksuuden laskea kaavalla

$$\delta_k = \frac{\dot{m}_t''}{\rho} * t . \quad (70)$$

Tässä työssä haetaan kuitenkin jonkinlaista ajasta riippumatonta approksimaatiota kuo-

nakerroksen paksuudesta. Tällä periaatteella kuitenkin voi arvioida aikaa, joka kuluu tietyn kuonakerroksen paksuuden saavuttamiseen.

3.5 Lämmönsiirron mallinnus: reunaehtona kerrostuman paksuus

Koschackin (2009) tulipesän seinien lämpötilamittausten perusteella on tehty arvioita kerrostuman paksuuksista tulipesässä. Näitä tuloksia haluttiin käyttää simuloinneissa hyväksi, joten molemmille päiville laskettiin myös tapaus, jossa reunaehdoiksi asetettiin mittaustuloksiin perustuvat kerrostuman paksuudet. Tällainen menetelmä on hyvä, jos tiedetään, kuinka paksut kerrostumat tulipesässä on.

Mittaustulokset vaihtelevat välillä 3–20 mm. Käytetyssä mallissa ei huomioida, millä alueilla mittausten mukaan kerrostumat ovat paksuja ja millä ohuita. Tällainen lähestymistapa olisi hyvin vaikea toteuttaa, koska mittauspisteitä on harvassa eivätkä ne kata koko höyrystimen aluetta. Sen sijaan kerrostumalle valittiin kolme eri paksuutta, jotka riippuvat tarttuneiden partikkelien määrästä.

Koska kaikissa mittauspisteissä seinän lämpötila on selvästi korkeampi kuin höyrypuolen lämpötila eli mittausten perusteella kaikkialla on kerrostumia, asetetaan alueille, joille tarttuu vähemmän kuin $0,02 \text{ g/s/m}^2$ partikkeleita, kerrostuman paksuudeksi 1 mm. Alueille, joille partikkeleita tarttuu $0,02\text{--}0,2 \text{ g/s/m}^2$, paksuudeksi asetetaan 5 mm. Jos partikkeleita tarttuu enemmän kuin $0,2 \text{ g/s/m}^2$, paksuudelle käytetään arvoa 2 cm, joka on suurin seinällä mitattu kerrostuman paksuus. Nämä arvot perustuvat partikkelien tarttumismallin tuloksiin ja mitattuihin kerrostuman paksuuksiin. Emissiviteetille käytetään luvun 3.4.2 mukaisesti arvoa, jolla kokonaislämmönsiirto vastaa prosessidatan antamaa arvoa.

FLUENT antaa asettaa reunaehtona seinän paksuudeksi vain vakioarvon. Sen sijaan lämpötilalle voi määrittää oman UDF-funktion. Siksi höyrystimen reunaehto on tässäkin tapauksessa implementoitava lämpötilan kautta yhtälön

$$T_k = T_w + \frac{q\delta_k}{k} \quad (71)$$

mukaisesti. Lämpövirran tiheyden arvona käytetään edellisellä iteraatiokierroksella laskettua arvoa.

Näissä laskuissa kerrostuman lämmönjohtavuudelle käytetään arvoa 1 W/mK . Myös arvioitaessa mittausten perusteella kerrostuman paksuuksia käytettiin arvoa 1 W/mK , joten mittaukset ovat siltä osin vertailukelpoisia simulointien kanssa. Jos asetetaan kerrostuman paksuus reunaehdoksi, on lämmönjohtavuuden arvolla suuri merkitys. Luvun 2.5.4 mukaan lämmönjohtavuus vaihtelee paljon varsinkin huokoiselle kerrostumalle.

3.6 Tulipesän olosuhteet

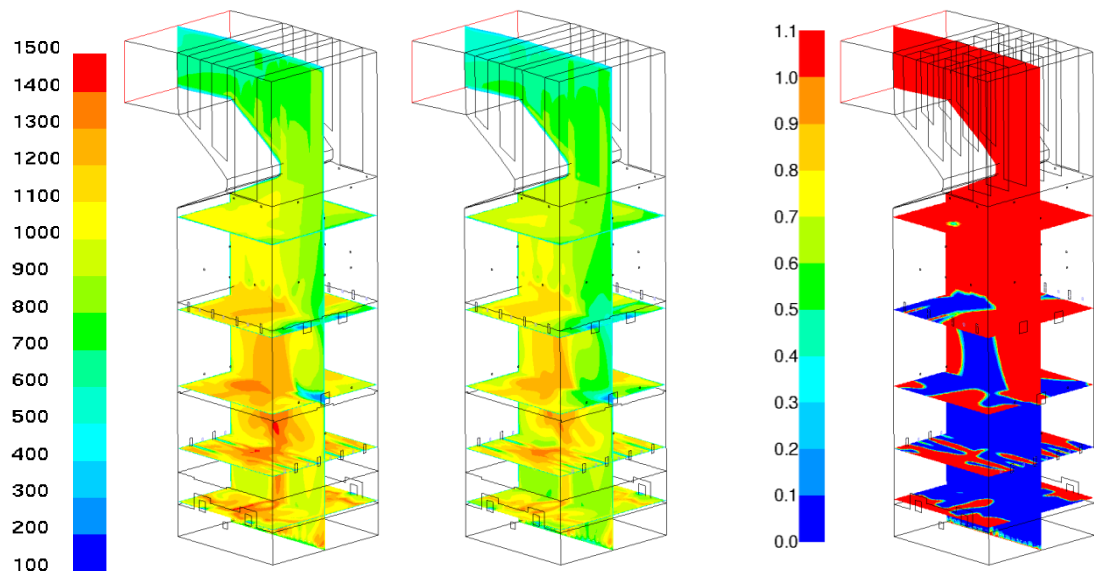
Kuonaantumismallin vaikutusta laskentatuloksiin arvioidaan vertaamalla saatuja tuloksia alkuperäisellä mallilla laskettuihin tapauksiin, joita laskettaessa kuonaantumismalli

ei ollut käytössä. Jotta saataisiin käsitys tulipesän olosuhteista, esitetään tässä luvussa joitakin tuloksia alkuperäisestä tapauksesta. Tästä on apua kuonaantumismallin tulosten tulkinnassa.

Kuvassa 3.3 on esitetty kaasun lämpötiloja päivien 1 ja 2 tapauksissa. Toisena päivänä lämpötilat ovat matalampia kuin ensimmäisenä lietteen korkean kosteuspitoisuuden ja matalan lämpöarvon vuoksi. Ensimmäisenä päivänä maksimilämpötilat ovat noin 1500 °C ja toisena hieman matalammat.

Freeboardin alaosassa kaasun lämpötila ylittää kuoren ja lietteen T_{15} -lämpötilat, minkä perusteella voi odottaa partikkelien tarttuvan seinille. Ylempänä varsinkin toisena päivänä lämpötilat ovat matalampia, minkä perusteella voisi olettaa näillä alueilla partikkelien heijastuvan osuessaan seiiniin. Partikkelien tarttumista mallinnetaan vain nokan tasolle asti, mutta tulistinalueen lämpötiloista voi päätellä, että partikkelit eivät välttämättä ole tarpeeksi kuumia tarttuakseen tulistinpinnoille.

Höyrystimen seinien lämpötilaksi on asetettu alkuperäisessä mallissa 327 °C. Muurauksen alueella lämpötilat sen sijaan riippuvat kaasun lämpötilasta. Ensimmäisenä päivänä muurauksen pinnan lämpötilat vaihtelevat 850 °C ja 1050 °C välillä. Toisena päivänä muurauksen lämpötilat vaihtelevat välillä 800–950 °C. Nämä lämpötilat ylittävät sekä kuoren että lietteen T_{15} -lämpötilat, joten muurauksen alueella seinät ovat tahmeita.

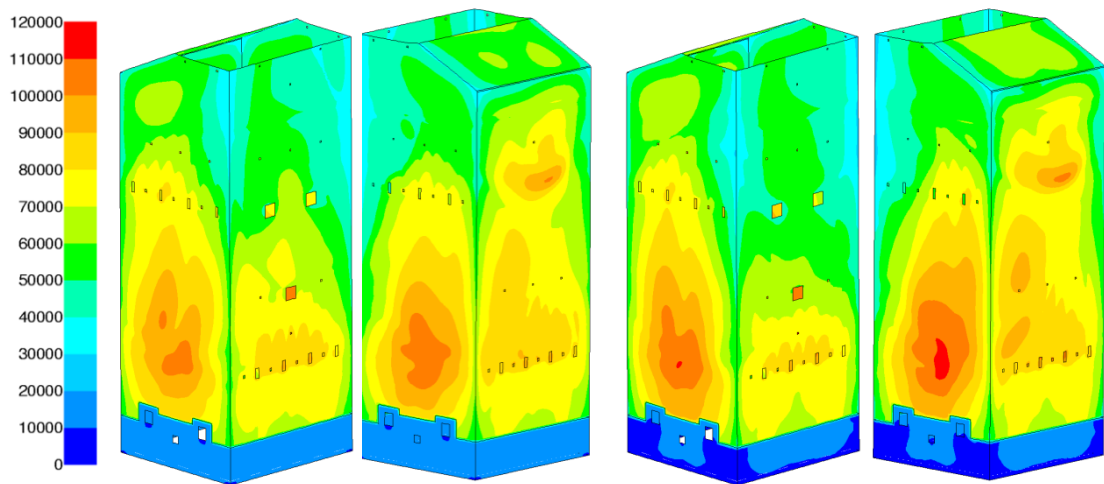


Kuva 3.3. Tulipesän kaasun lämpötilat (°C) päivinä 1 (vasemmalla) ja 2 (keskellä) sekä paikallinen ilmakerroin päivänä 1 (oikealla). Skaala katkaistu ilmakertoimen kuvasta.

Tulipesän paikalliset kaasufaasin ilmakertoimet, joita on havainnollistettu kuvassa 3.3, vaihtelevat nollan ja hyvin suurten arvojen välillä. Ilmakertoimen gradientit ovat hyvin suuria ali-ilmaisten olosuhteiden muuttuessa yli-ilmaisiksi. Ali-ilmaiset alueet katoavat vasta tertiääri-ilman yläpuolella, missä kumulatiivinen ilmakerroin nousee yli yhden. Paikallisista ilmakertoimista voi erottaa ilma-aukkojen sijainnit. Kuvassa on ilmakertoimet vain ensimmäiseltä päivästä, mutta toinen päivä ei juuri eroa ensimmäisestä.

Tulipesän kokonaislämmönsiirron pitäminen todellisuutta vastaavassa arvossa on yksi kuonaantumismallin tavoitteista. Laitosdatan antamat arvot näille suureille ovat ensimmäisen päivän tapauksessa 42,3 MW ja toisena päivänä 41,4 MW. Mallinnetussa alkuperäisessä tapauksessa ensimmäisenä päivänä kokonaislämpövuoto on 42,7 MW ja toisena 43,0 MW. Siis tapauksissa, joissa kuonaantumista ei ole mallinnettu, kokonaislämpövirrat vastaavat hyvin todellisia lämpövirtoja.

Paikalliset lämpövuotot on piirretty kuvaan 3.4. Alkuperäisessä tapauksessa suurimmat lämpövirran tiheydet ovat sivuseinillä sekundääri-ilmojen korkeudella. Etu- ja takaseinillä lämpövuotot ovat selvästi pienemmät kuin sivuseinillä. Muurauksen alueella lämpövirran tiheydet ovat pienimmillään. Keskimäärin lämpövuotot kuitenkin pienenevät höyrystinpinnoilla mentäessä ylöspäin kattilassa. Koska kokonaislämmönsiirto pysyy suunnilleen samassa arvossa ensimmäisenä ja toisena päivänä ei tapauksissa ole suurta eroa. Toisen päivän maksimilämpövuotot ovat ensimmäistä päivää hieman suurempia, mihin vaikuttaa toisena päivänä käytössä ollut korkeampi emissiviteetti.



Kuva 3.4. Seinien läpi menevä lämpövuoto (W/m^2) päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) alkuperäisissä tapauksissa. Seinämän emissiviteetti 1. päivänä $\varepsilon=0,44$ ja 2. päivänä $\varepsilon=0,60$.

Kuonaantumista mallinnettaessa lämpövirran tiheys pienenee kuonaantuvilla alueilla seinien lämpötilojen noustessa. Toisaalta kokonaislämmönsiirron pysyessä todellisuutta vastaavassa arvossa lämmönsiirto paranee alueilla, joilla seinän lämpötila pysyy lähellä alkuperäistä arvoa. Tämä johtuu emissiviteetin nostamisesta.

4 TULOKSET

Edellisessä luvussa esitellyillä menetelmillä lasketut tulokset on esitetty kirjallisesti ja kuvina tässä luvussa. Kuvat esittävät useimmiten jonkin suuren arvoa höyrystimen seinillä. Nokan tason yläpuolista aluetta ei ole piirretty kuviin, koska se ei ole oleellinen tämän työn kannalta. Kuonaantumista mallinnetaan sekä ensimmäiselle päivälle, jossa poltetaan kuorta, että toiselle päivälle, jossa poltetaan kuoren ja lietteen seosta.

Luvussa 4.1 on esitetty partikkelien tarttumismallin tulokset. Luvussa testataan Weberin lukuun ja T_{15} -lämpötilaan perustuvaa tarttumiskriteeriä sekä tuhkan sulaneeseen osuuteen perustuvaa tarttumistodennäköisyyttä. Lisäksi tarkastellaan eri tekijöiden vaikutusta tarttumiseen ja heijastumiseen sekä testataan tarttumismallien herkkyyttä tuhkan piipitoisuuden ja ilmakertoimen vaihtelulle.

Luvuissa 4.2 ja 4.3 testataan, miten eri mallit toimivat mallinnettaessa kuonaantumisen vaikutusta tulipesän lämmönsiirtoon. Lähestymistavaksi otetaan luvussa 4.2 ennalta määrätty kuonan pintalämpötila ja luvussa 4.3 ennalta määrätty kuonakerroksen paksuus. Taulukkoon 4.1 on koottu luvuissa 4.2 ja 4.3 testatut mallit.

Taulukko 4.1. Yhteenveto laskettavista tapauksista ja niihin valituista parametreista.

Tapaus	Reunaehto lämmönsiirrolle	Valitut parametrit	Emissiviteetti	Valitut parametrit
Alku- peräinen	Seinän lämpötila vakio 327 °C		Vakio tai iteroitu, sama koko pinnalla	
Tapaus 1	Seinän lämpötila, kaava (68)	$\dot{m}_{cr}''=0,5\text{g/s/m}^2$	Yksi iteroitu arvo koko pinnalle	
Tapaus 2	Seinän lämpötila, kaava (68)	$\dot{m}_{cr}''=0,1\text{g/s/m}^2$	Yksi iteroitu arvo koko pinnalle	
Tapaus 3	Seinän lämpötila, kaava (68)	$\dot{m}_{cr}''=0,5\text{g/s/m}^2$	Kuonaantunut pinta 0,8, kuonaantumaton pinta iteroitu	Kuonaantunut pinta $\dot{m}_t''>0,05\text{g/s/m}^2$
Tapaus 4	Seinän lämpötila, kaava (68)	$\dot{m}_{cr}''=0,5\text{g/s/m}^2$	Kuonaantumaton pinta 0,3, kuonaantu- nut pinta iteroitu	Kuonaantunut pinta $\dot{m}_t''>0,05\text{g/s/m}^2$
Tapaus 5	Kerrostuman paksuus, joka perustuu mittaus- tuloksiin	$\dot{m}_t''<0,02\text{g/s/m}^2$: $\delta_k=1\text{mm}$, $0,02\text{g/s/m}^2<\dot{m}_t''<$ $0,2\text{g/s/m}^2$: $\delta_k=5\text{mm}$, $\dot{m}_t''>0,2\text{g/s/m}^2$: $\delta_k=2\text{cm}$	Yksi iteroitu arvo koko pinnalle	

Alkuperäisessä tapauksessa kuonaantumismalli ei ole käytössä. Tapaukset 1-4 perustuvat lukuun 3.4 ja tapaus 5 lukuun 3.5. Tapaukset 1 ja 2 ovat kaavan (68) lineaarisesti massavirrasta riippuvaa lämpötilaprofiilia käyttävät tapaukset, joissa käytetään vain yhtä emissiviteettiä. Näissä kahdessa tapauksessa on vain erilaiset kriittisen massavirran arvot. Tapaukset 3 ja 4 ovat samat kuin tapaus 1, mutta niissä käytetään eri emissiviteettejä kuonaantuneelle ja kuonaantumattomalle pinnalle. Tapauksessa 5 hyödynnetään tulipesässä tehtyjä mittauksia, joiden perusteella on arvioitu kerrostumien paksuutta. Kaikki lukujen 4.2 ja 4.3 laskut on tehty käyttämällä kriittiseen Weberin lukuun ja T_{15} -lämpötilaan perustuvaa tarttumismallia.

Kuonaantumismallin vaikutusta tulipesän muihin olosuhteisiin käsitellään luvussa 4.4. Luvussa verrataan myös tapauksen 1 avulla kuonaantumisen mallintamisen vaikutusta partikkelien tarttumiseen. Luvut 4.1–4.4 keskittyvät Rauman kattilan tuloksiin, kun taas luvussa 4.5 on testattu kehitettyjä malleja toiseen kattilaan. Tarkat tiedot toisesta kattilasta ovat luottamuksellisia, mutta joitakin päätuloksia on esitetty. Varsinkin tässä työssä kehitetyissä malleissa, joissa valittavia parametreja on useita, on tärkeä testata mallien toimivuutta useampiin tapauksiin. Muuten voi epäillä mallien toimivuutta muissa kattiloissa.

4.1 Partikkelien tarttuminen tulipesän seinille

Partikkelien tarttumista mallinnetaan kahdella eri menetelmällä ja tarkastellaan eri suurten vaikutusta tarttumiseen ja heijastumiseen. Tarttuminen on tässä luvussa aina laskettu alkuperäiselle tapaukselle eli seinille, joille ei ole vielä mallinnettu kuonakerrosta. Tämä on tehty yksinkertaistukseksi, jotta tulokset olisivat riippumattomia valitusta kuonaantumismallista. Kuonaantumisen mallinnus voi vaikuttaa partikkelien tarttumiseen, koska käytetyt mallit muuttavat seinien lämpötilaa, mikä vaikuttaa seinien tahmeuteen ja kaasun lämpötilajakaumaan. Luvussa 4.4.4 käsitellään mallinnetun kuonakerroksen vaikutusta partikkelien tarttumiseen.

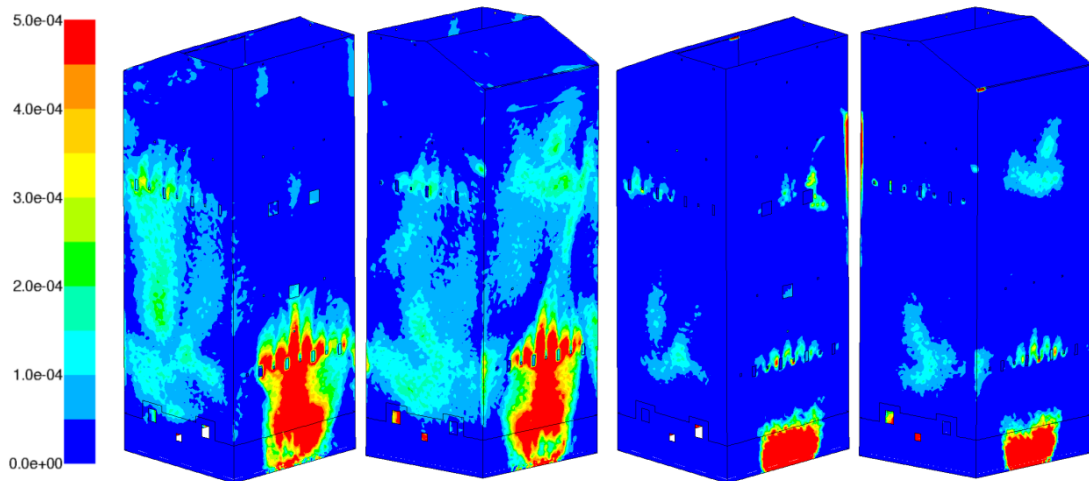
Partikkelien tarttuminen ja heijastuminen on esitetty massavirtoina pinta-alayksikköä kohden. Partikkelien lämpötilat, sulamisasteet ja Weberin luvut on esitetty seinille osuvien partikkelien massakeskiarvoina. Näissä tuloksissa ei kuitenkaan ole otettu huomioon eri partikkelikokojen vaikutusta. Suuret partikkelit vaikuttavat massakeskiarvoihin pieniä enemmän, mutta arvot voivat kuitenkin erota paljon verrattaessa pieniä ja suuria partikkeleita. Pienet partikkelit seuraavat paremmin kaasun lämpötilaa kuin suuret. Lisäksi pienillä partikkeleilla on lähtökohtaisesti pienempi Weberin luku kuin suurilla niiden pienempien halkaisijoiden vuoksi. Pienempään Weberin lukuun vaikuttaa myös pienissä partikkeleissa olevan koksen reagoiminen nopeammin kuin suurissa, minkä vuoksi pienillä partikkeleilla on todennäköisemmin pieni tiheys niiden osuessa seinään.

4.1.1 T₁₅-lämpötilaan ja Weberin lukuun perustuva tarttumiskriteeri

Partikkelien tarttuminen laskettiin sekä ensimmäiselle että toiselle päivälle taulukon 3.5 kriteerien mukaan. Lämpötilan ja Weberin luvun vaikutusta tarkastellaan piirtämällä niiden massakeskiarvot seinillä. Lämpötilan vaikutusta tarkastellaan myös sulamisasteen avulla.

Koska tarttumista mallinnetaan pinnalle, jolle ei ole vielä mallinnettu kuonakerrosta, on seinän lämpötila kaikilla höyrystinpinnoilla alkuperäistä mallia vastaava 327 °C. Tällöin seinän lämpötilakriteeri ei ylity. Muurauksen alueen seinän lämpötilat nousevat T₁₅-lämpötilojen yläpuolelle molempina päivinä. Kun kuonaantuminen otetaan huomioon, höyrystinpintojen lämpötilojen nousu voi tehdä joillakin alueilla myös seinistä tahmeita. Tätä käsitellään luvussa 4.4.4.

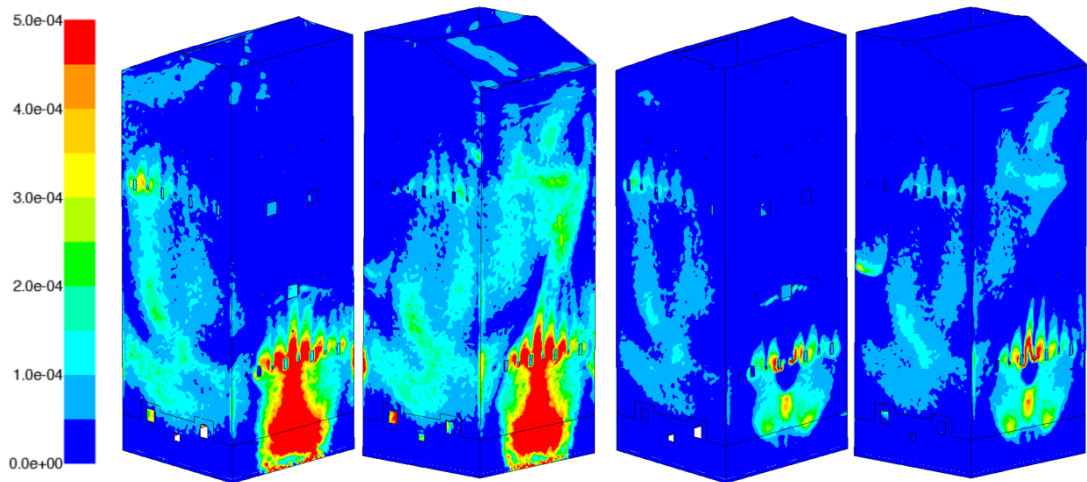
Kuoripartikkelien tarttuminen ja heijastuminen on esitetty kuvassa 4.1. Kuonaantumista tapahtuu eniten tulipesän etu- ja takaseinillä sekundääri-ilman korkeudella ja sen alapuolella. Takaseinillä kuonaantumista tapahtuu myös tertiääri-ilman korkeudella. Sivuseinillä kuonaantumista tapahtuu sekundääri- ja tertiääri-ilmojen välillä. Partikkeleita tarttuu pieniä määriä kaikkialle höyrystimen alueelle aivan muurauksen alaosaan lukuun ottamatta, jonne partikkeleita osuu hyvin vähän. Tätä ei kuitenkaan voi erottaa kuvan 4.1 skaalassa. Vasta tulistinalueella kaasun lämpötila laskee niin matalaksi, että partikkeleita ei tartu ollenkaan. Kuoripartikkelien heijastumista tapahtuu eniten muurauksen alueella etu- ja takaseinillä. Lisäksi sekundääri- ja tertiääri-ilmojen korkeudella on alueita, joilla partikkeleita heijastuu paljon.



Kuva 4.1. Päivän 1 tarttuneiden (vasen) ja heijastuneiden (oikea) kuoripartikkelien massavirta höyrystimen seinillä (kg/s/m^2), kuvien skaala katkaistu.

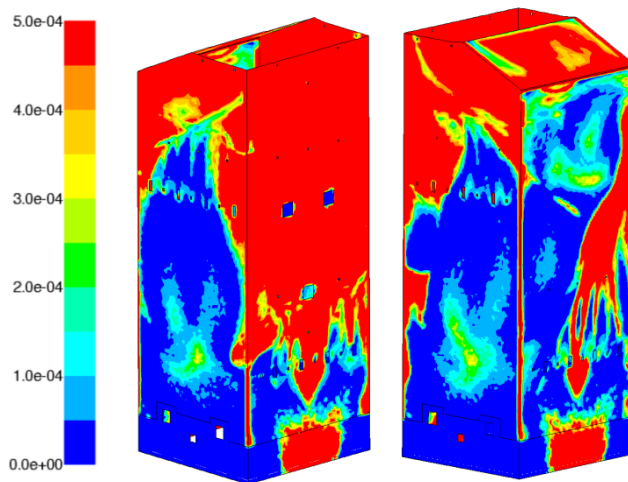
Kuvassa 4.2 on esitetty erikseen toisen päivän tarttuvien kuori- ja lietepartikkelien massavirrat. Kuoripartikkelit tarttuvat samoille alueille kuin ensimmäisenä päivänä. Massavirrat ovat molempina päivinä suunnilleen samat. Toisena päivänä kuoren massavirta on hieman pienempi kuin ensimmäisenä, mutta matalammista lämpötiloista johtuvan hitaamman palamisen vuoksi toisena päivänä seinille päätyy hieman enemmän koksia. Alueet, joille lietepartikkeleita tarttuu, ovat kuoripartikkeleihin verrattuna lähes samat, mutta partikkelien määrä on pienempi lietteen pienemmän massavirran vuoksi.

Myös lietteen korkeampi T_{15} -lämpötila vähentää partikkelien tarttumista. Lietteen korkean tuhkapitoisuuden vuoksi kuoren ja lietteen yhteenlaskettu kuonaantumisenopeus on kuitenkin enimmäkseen suurempi kuin ensimmäisenä päivänä.



Kuva 4.2. Päivän 2 tarttuneiden kuori- (vasen) ja lietepartikkelien (oikea) massavirta höyrystimen seinille (kg/s/m^2). Kuvien skaala on katkaistu.

Toisena päivänä heijastuvien partikkelien massavirta on esitetty kuvassa 4.3. Pelkän kuoren tapaukseen verrattuna heijastuneiden partikkeleiden määrä on selvästi suurempi, mikä johtuu lietteen korkeasta T_{15} -lämpötilasta ja matalammista kaasun lämpötiloista. Kuvassa näkyvät selvät rajat alueille, joilla lietepartikkelien lämpötilat ovat liian alhaisia tarttumiseen. Etuseinällä nämä alueet alkavat jo sekundääri-ilman yläpuolella.

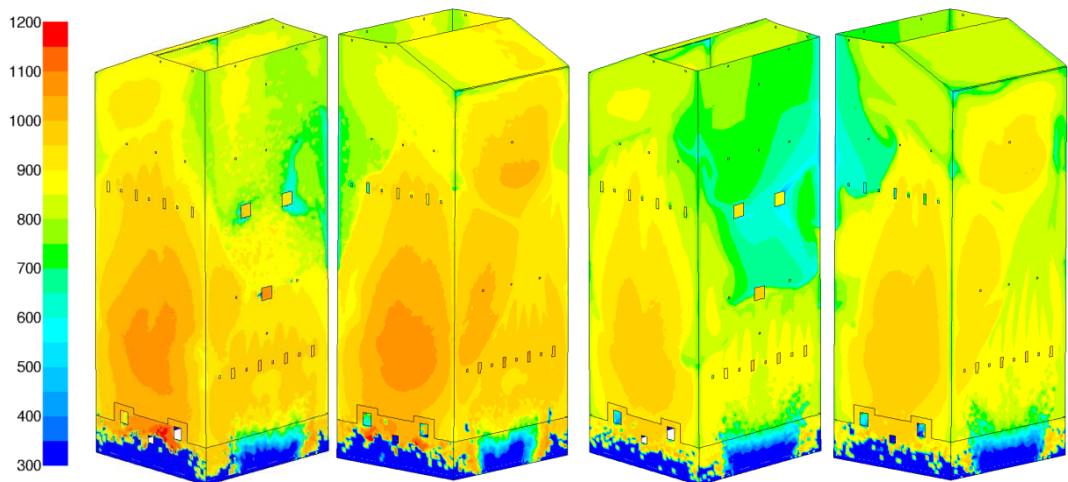


Kuva 4.3. Päivän 2 heijastuneiden kuori- ja lietepartikkelien yhteenlaskettu massavirta höyrystimen seinille (kg/s/m^2). Kuvan skaala on katkaistu.

Koska kuoren T_{15} -lämpötila on matala verrattuna tulipesän säteilyosan lämpötiloihin, seinälle osuvan partikkelin liian matala lämpötila (kuva 4.4) on vain harvoissa tapauksissa syy kuoripartikkelin heijastumiseen. Näin tapahtuu lähinnä muurauksen alueella ja etuseinällä kuormailma-aukkojen lähistöllä, koska kuormailma-aukoista pienellä nopeudella tuleva ilma madaltaa etuseinän alueen lämpötilaa. Toisena päivänä seinään osuvien partikkelien lämpötila laskee kuoren T_{15} -lämpötilan alapuolelle laajemmalla alueella kuin ensimmäisenä. Muurauksen alueelle osuvien partikkelien matalien lämpö-

tilojen syynä ovat suuret partikkelikoot, joiden vuoksi partikkelin lämpötila ei ehdi nousta tarpeeksi korkeaksi. Muurauksen alueella seinän lämpötila on kuitenkin T_{15} -lämpötilan yläpuolella, joten kuoripartikkelien heijastumiseen vaikuttaa myös suuri Weberin luku.

Lämpötilalla on suurempi vaikutus liete- kuin kuoripartikkelien heijastumiseen. Seinille osuvien partikkelien lämpötilat jäävät T_{15} -lämpötilan alapuolelle laajoilla alueilla etuseinällä ja höyrystimen yläosassa, minkä voi nähdä kuvassa 4.4. Heijastumista tapahtuu myös alueilla, joilla partikkelien lämpötilat ovat T_{15} -lämpötilan yläpuolella, mikä johtuu suurista Weberin luvista. Lämpötilajakaumaa voi verrata myös kuviin 4.6 ja 4.7 piirrettyihin tuhkan sulaneisiin osuuksiin.

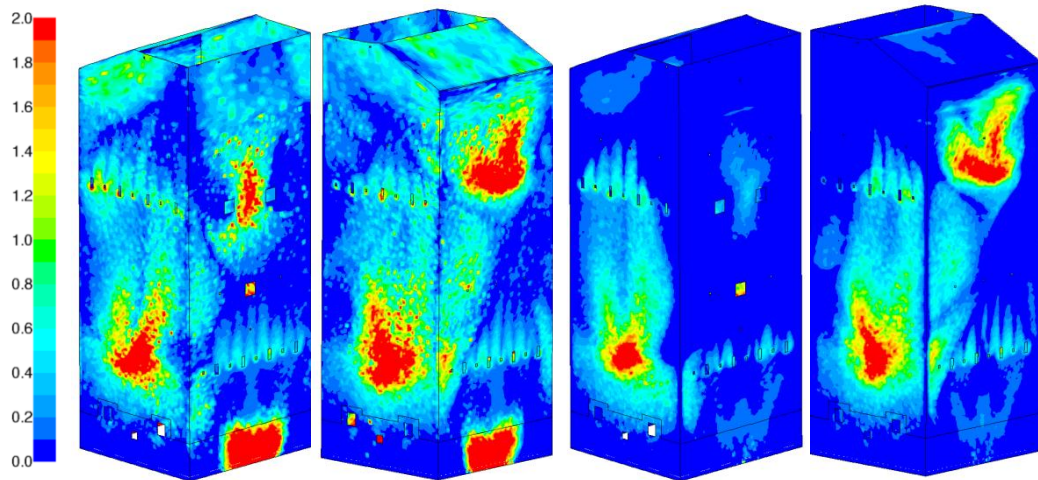


Kuva 4.4. Päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) seinään osuvien partikkelien massakeskiarvotettu lämpötila ($^{\circ}\text{C}$).

Lämpötilaa enemmän kuoripartikkelien heijastumista aiheuttaa ensimmäisenä päivänä Weberin luku. Kuvassa 4.5 on esitetty Weberin luvut kuoripartikkeleille päivänä 1 ja lietepartikkeleille päivänä 2. Kuoripartikkeleita ei ole piirretty päivälle 2, koska tulokset eivät eroa päivän 1 tapauksesta. Muurauksen alueella suuren Weberin luvun aiheuttavat kuorella suuret partikkelikoot, kun taas tertiääri- ja sekundääri-ilmojen korkeudella suuret partikkelien nopeudet. Kuvan perusteella voi arvioida liian korkean Weberin luvun aiheuttavan heijastumista vain pienillä alueilla. Näillä alueilla tapahtuu myös tarttumista, joten osalla partikkeleista on pieni Weberin luku. Jos valittaisiin pienempi kriittisen Weberin luvun arvo, heijastumista tapahtuisi selvästi enemmän.

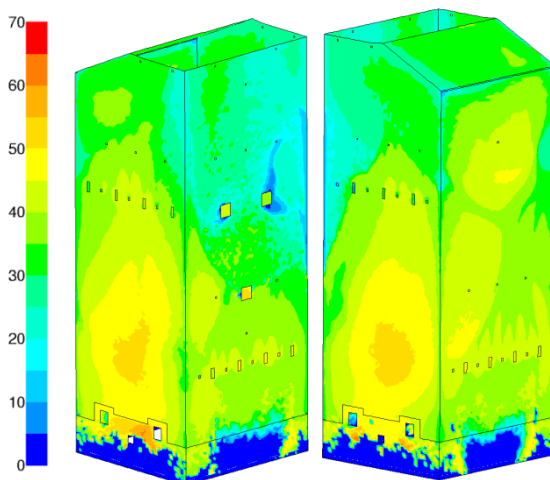
Suuri Weberin luku aiheuttaa lietepartikkelienkin heijastumista sivuseinillä ja takaseinän yläosassa, mikä johtuu suurista partikkelien nopeuksista. Weberin luvun vuoksi heijastuvien partikkelien määrä on kuitenkin pieni verrattuna liian matalan lämpötilan vuoksi heijastuviin, joten lämpötilalla on siis toisenakin päivänä enemmän merkitystä kuin Weberin luvulla. Kuorella on keskimäärin korkeammat Weberin luvut kuin lietepartikkeleilla. Alueet, joilla Weberin luvut ovat suuria, ovat pääosin samat molemmilla polttoaineilla, koska ne ovat seurausta sekundääri- ja tertiääri-ilman syötön aiheuttamista suurista kaasun nopeuksista. Ainoa poikkeus on muurauksen alue etu- ja takaseinällä, missä lietteen tapauksessa ei esiinny suuria Weberin lukuja. Alueelle osuu vain vähän

lietepartikkeleja. Näillä partikkeleilla on hieman suurempi halkaisija kuin muilla alueilla, mutta pienempi nopeus kuin kuorella, ja ne tarttuvat seinään, koska sekä partikkelien että seinän lämpötilat ylittävät T_{15} -lämpötilan.



Kuva 4.5. Päivän 1 kuori- (vasen) ja päivän 2 lietepartikkelien (oikea) massakeskiarvotettu Weberin luku. Kuvien skaala on katkaistu.

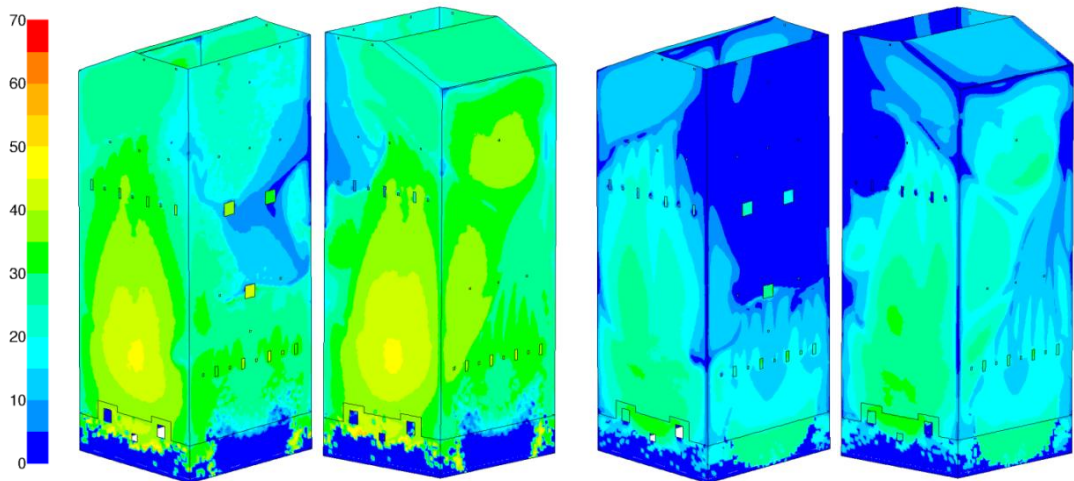
Koska pintajännitys ei tässä mallissa riipu lämpötilasta, samaa polttoainetta olevia partikkeleita tarkasteltaessa muuttujia Weberin luvussa ovat partikkelin nopeus, tiheys ja halkaisija. Partikkelin tiheys laskee mentäessä ylöspäin seinillä, koska palamattoman koksen määrä pienenee, millä ei kuitenkaan näytä olevan suurta vaikutusta tarttumiseen. Pelkästä tuhkasta koostuvan partikkelin tiheys on vakio. Seinälle osuvien partikkelien nopeudet ovat suurimmillaan sekundääri- ja tertiääri-ilma-aukkojen korkeudella niiden viereisillä seinillä. Näillä alueilla myös Weberin luvut ovat suurimmillaan. Muurauksen alueelle osuvien kuoripartikkelien halkaisijat ovat selvästi muille alueille osuvia suurempia. Muualla höyrystimen alueella ei halkaisijoissa ole suurta eroa. Kolmesta tarkastellusta muuttujasta siis nopeus aiheuttaa eniten muutoksia Weberin lukuun höyrystimen alueella ja siksi suurimmat Weberin luvut löytyvät ilma-aukkojen korkeudelta. Weberin luvussa käytetyt nopeudet ovat seinää kohti kohtisuoria nopeuksia, joten kohtisuoraan seinään iskeytyvät partikkelit heijastuvat todennäköisemmin kuin vinosti tulevat.



Kuva 4.6. Päivän 1 seinään osuvien partikkelien tuhkan sulanut massaosuus (%).

Tuhkan sulamisen havainnollistamiseksi on piirretty sekä päivälle 1 (kuva 4.6) että päivälle 2 (kuva 4.7) seinälle osuvien partikkelien massakeskiarvotettu sulamisaste. Arvoja vertailtaessa on otettava huomioon, että sulaneen osuuden oletetaan nousevan lineaarisesti lämpötilan noustessa T_{15} - ja T_{70} -lämpötilojen välillä. Tämä ei kuitenkaan tuhkan sulamisanalyysin perusteella pidä paikkaansa.

Ensimmäisenä päivänä partikkelien tuhka on enimmillään 55 % sulaa. Partikkelien osuessa seinään tuhkasta on lähes kaikkialla sulanut yli 15 %. Ainoita poikkeuksia ovat etu- ja takaseinän alaosan muurattu alue sekä kuormailma-aukkojen lähistö etuseinällä. Aivan muurauksen alaosassa on alueita, joille ei osu lainkaan partikkeleita.



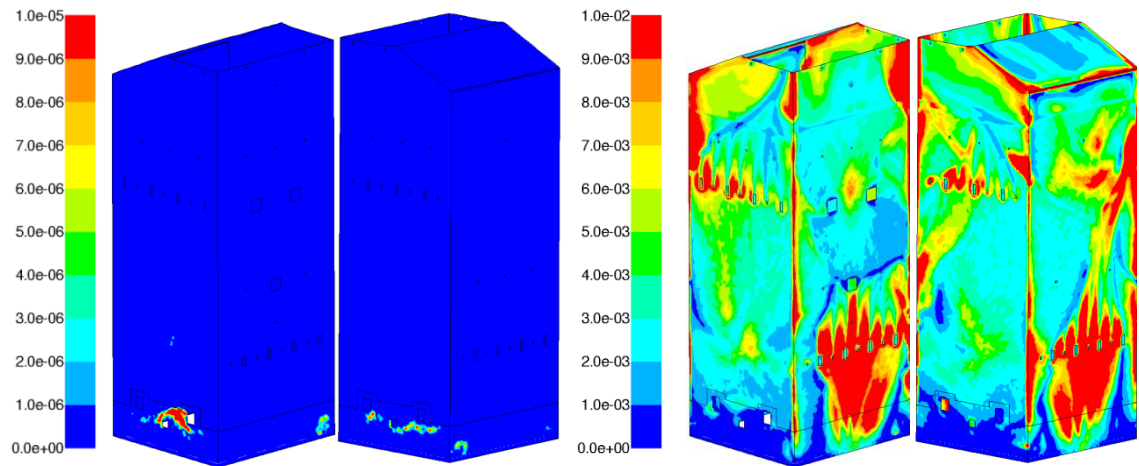
Kuva 4.7. Päivän 2 seinään osuvien kuori- (vasen) ja lietepartikkelien (oikea) tuhkan sulanut massaosuus (%).

Toisenakin päivänä lähes kaikkialla kuoren tuhkasta on sulanut vähintään 15 %. Kuormailma-aukkojen lähellä ja muurauksen alaosassa on tässä tapauksessa kuitenkin suuremmat alueet, joilla partikkelien lämpötila on liian alhainen tarttumiseen. Kuumimpienkin partikkelien sulamisaste on alle 50 %. Lietepartikkeleilla on korkeamman sulamislämpötilan vuoksi selvästi pienempi sulamisaste, joka vaihtelee välillä 0–35 %. Seinillä on laajoja alueita, joilla iskeytyvät partikkelit ovat täysin kiinteitä. Muurauksen alueella etu- ja takaseinällä lietepartikkelien sulamisaste on poikkeuksellisesti suurempi kuin kuoripartikkelien. Tähän vaikuttavat erisuuruisten ja -tiheyksisten partikkelien erilaiset lentoradat.

4.1.2 Piipitoisuuden vaikutus kuoripartikkelien tarttumiseen

Partikkelien tarttumista mallinnettiin myös kuusen kuorelle tyypillisellä pienemmällä tuhkassa olevan piin määrällä. Tämä perustui epäilykseen, että polttoaineen koostumuksen määrittämiseen käytettyyn kuoreen olisi sekoittunut hiekkaa. Näiden 50 % ja 10 % alkuperäisestä piin määrästä sisältävien polttoainepartikkelien T_{15} -lämpötilat (1140 °C ja 1176 °C) ovat paljon korkeammat kuin alkuperäisellä kuoren koostumuksella. Kuvan 4.4 perusteella seinään osuvien kuoripartikkelien massakeskiarvotetut lämpötilat jäävät selvästi näiden arvojen alapuolelle koko tulipesän alueella.

Näillä arvoilla laskettaessa vain yksittäisiä polttoainepartikkeleita tarttuu muurauksen alueelle molemmissa tapauksissa, mitä on havainnollistettu kuvassa 4.8. Heijastuneiden partikkelien massavirta tapauksessa, jossa piitä on 50 % alkuperäisestä pitoisuudesta, on myös esitetty kuvassa 4.8. Heijastuneiden partikkelien massavirrat ovat suuria verrattuna aiempiin tapauksiin, sillä jos partikkelit eivät tartu, ne osuvat seinälle monta kertaa ennen poistumistaan höyrytimen alueelta. Kuvasta näkee, että höyrytimen seinillä on myös alueita, kuten muurauksen alareuna, joille partikkeleita osuu hyvin vähän. Sekundääri-ilman tason alapuolella ja hieman sen yläpuolella sekä tertiääri-ilman tasolla sen sijaan partikkeleita iskeytyy seinille paljon.



Kuva 4.8. Tarttuneiden (vasen) ja heijastuneiden (oikea) partikkelien massavirta kuoren tuhkan koostumuksella, jossa piitä on 50 % alkuperäisestä määrästä (kg/s/m^3). Kuvien skaala katkaistu.

Jos oletetaan kuoren sisältävän paljon vähemmän piitä kuin alkuperäinen koostumus antaa ymmärtää, kuonaantumista ei tapahdu lähes ollenkaan poltettaessa pelkkää kuorta. Poltettaessa kuoren ja lietteen seosta vain lietepartikkelit aiheuttavat kuonaantumista, jolloin tilanne voidaan olettaa kuvan 4.2 oikean puolen kaltaiseksi.

4.1.3 Ilmakertoimen vaikutus partikkelien tarttumiseen

Ilmakertoimen vaikutusta tarkasteltiin jakamalla tulipesä kolmeen alueeseen, joissa on kumulatiivisesta ilmakertoimesta riippuva T_{15} -lämpötilan arvo. Alueet, joiden ilmakertoimet määriteltiin luvussa 3.3.2, ovat sekundääri-ilman alapuolinen alue, sekundääri- ja tertiääri-ilman välinen alue ja tertiääri-ilman yläpuolinen alue. Kuoren T_{15} -lämpötila on matalampi alistökiömetrisissä olosuhteissa kuin kokonaisilmakertoimella laskettu arvo. Toisaalta kuoren T_{15} -lämpötilat ovat kaikilla ilmakertoimilla niin matalat, että partikkelien lämpötila pääosin ylittää höyrytimen alueella nämä arvot. Tämän perusteella voi päätellä, että ilmakertoimella ei ole merkitystä kuoren aiheuttamaan kuonaantumiseen. Simulointi osoittaa todeksi tämän oletuksen. Tuloksia ei ole esitetty kuvina, koska ne eivät eroa kuvissa 4.1 ja 4.2 esitetyistä kokonaisilmakertoimella lasketuista tapauksista.

Lietteen T_{15} -lämpötila ei riipu ilmakertoimesta, joten ilman vaiheistuksen vaikutusta lietepartikkelin tahmeuteen ei tarvitse tarkastella. Kuoren ja lietteen seoksen T_{15} -lämpötilaan ilmakerroin taas vaikuttaa samalla tavalla kuin kuoreen. Seinän tahmeutta

tarkasteltaessa tämä on otettava huomioon. Laskettaessa partikkelien tarttumista alkupe-
räiselle tapaukselle seinän lämpötila ylittää höyrypuolen 327 °C lämpötilan vain muura-
uksen alueella. Muurauksen lämpötila kuitenkin ylittää kuoren ja lietteen T_{15} -lämpötilat
kaikilla kolmella ilmakertoimella, joten ilmakertoimen muutoksella ei ole vaikutusta
tarttumiseen muurauksen alueella.

Laskettaessa partikkelien tarttumista pinnalle, jolle on mallinnettu kuonakerros, il-
makertoimella on kuitenkin jonkin verran vaikutusta. Ilmakerroin saattaa vaikuttaa höy-
rystinpinnan T_{15} -lämpötilan ylittymiseen riippuen siitä, kuinka korkeita kuonaantumis-
mallin antamat seinälämpötilat ovat. Tätä ei kuitenkaan ole selvitetty tarkemmin.

Kuorilla, joissa on piitä 10 % ja 50 % alkuperäisestä pitoisuudesta, on ali-ilmaisissa
olosuhteissa useampi T_{15} -lämpötilan arvo. Vaikka kokonaisilmakertoimella laskettu T_{15} -
lämpötila on liian korkea partikkelien tarttumiseen, on osa pienemmillä ilmakertoimilla
lasketuista T_{15} -lämpötiloista selvästi matalampia. Lämpötilan noustessa sulanut osuus
kasvaa, mutta lämpötilan noustua tietyn arvon yläpuolelle sulanut osuus lähtee pie-
nentymään. Yksi vaihtoehto mallintaa tätä olisi seurata partikkelin lämpötilaa sen radal-
la. Jos partikkelin lämpötila ylittää keskimmäisen T_{15} -lämpötilan, jossa sulanut osuus
painuu takaisin 15 prosentin alapuolelle, käytettäisiin ylintä T_{15} -lämpötilaa tarttumiskri-
teerinä. Jos taas lämpötila pysyy keskimmäisen T_{15} -lämpötilan alapuolella, käytettäisiin
tarttumiskriteerinä alinta lämpötilaa. Tämä kuitenkin vaatisi partikkelin lämpötilan seu-
raamista koko sen liikeradan ajan eikä sitä ole toteutettu tässä työssä.

4.1.4 Sulamisasteesta riippuva tarttumistodennäköisyys

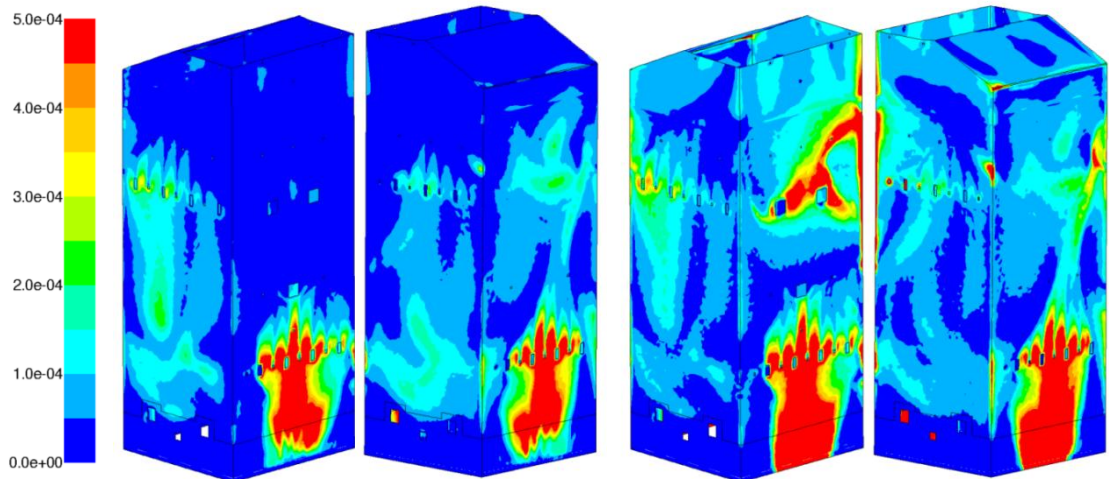
Kuonaantumista tarkasteltiin myös yhtälön (13) mukaisella mallilla, jossa tarttumisto-
dennäköisyys nousee lineaarisesti nolasta yhteen sulaneen osuuden noustessa 0,15:sta
0,7:ään. Tämä malli on herkempi partikkelin lämpötilan muutoksille, koska pelkkä T_{15} -
lämpötilan ylitys ei riitä täyttämään tarttumiseen vaadittavaa lämpötilakriteeriä. Tarttu-
misen todennäköisyyttä voi tarkastella kuvan 4.4 seinään osuvien partikkelien lämpöti-
lan ja kuviin 4.6 ja 4.7 piirretyn tuhkan sulaneen osuuden avulla. Partikkeleita tarttuu
eniten samoilla alueilla kuin T_{15} -lämpötilasta ja Weberin luvusta riippuvalla mallilla.
Malli ennustaa kuitenkin enemmän heijastumista.

Tarttuneiden partikkelien massavirrat (kuva 4.9) ovat lähes samat kuin edellisessä
luvussa. Koska kuvan 4.6 sulaneen osuuden mukaiset tarttumistodennäköisyydet ovat
50 %:n molemmiin puolin, voisi odottaa tarttuvien partikkelien määrän olevan selvästi
pienempi. Partikkeli kuitenkin tarttuu tietylle alueelle todennäköisemmin kuin yksittäi-
seen iskeytymiseen liittyvä tarttumistodennäköisyys antaa ymmärtää, sillä heijastuttuaan
seinältä partikkeli voi iskeytyä uudelleen samalla alueella. Yksittäisten partikkeliratojen
tarkastelu tukee tätä selitystä. Ilmiötä voi pitää probabilistisen menetelmän huonona
puolena verrattuna deterministiseen malliin, jossa partikkelin ominaisuudet joko mah-
dollistavat tarttumisen tai estävät sen.

Heijastumista tapahtuu samoilla alueilla kuin tarttumistakin, koska sulaneiden par-
tikkelien lämpötila on kaikkialla T_{70} -lämpötilaa alhaisempi eli tarttumistodennäköisyyt-

tä 1 ei saavuteta. Heijastumista tapahtuu paljon myös etuseinällä ylempien kuormailma-aukkojen lähellä, missä lämpötilat ovat matalat. Tällä alueella partikkeleita tarttuu hyvin vähän. Heijastumista tapahtuu tässä mallissa enemmän myös alueilla, joilla Weberin luku aiheuttaa toisessa mallissa partikkelien heijastumisen.

Vaikka ilmakertoimella ei ole vaikutusta laskettaessa kuoripartikkelien tarttumista perusmallilla, ilmakertoimen muuttumisen aiheuttama T_{15} -lämpötilan pieneneminen T_{70} -lämpötilan pysyessä vakiona nostaa partikkelien tarttumistodennäköisyyttä tulipesän alaosissa. Linearisella mallilla laskettaessa tarttuneiden partikkelien massavirta siis nousee tertiääri-ilman alapuolella, mikä vähentää tarttumista tertiääri-ilman yläpuolella seinään osuvien partikkelien vähentyessä. Aiheutuneet muutokset ovat kuitenkin pieniä.



Kuva 4.9. Päivän 1 tarttuneiden (vasen) ja heijastuneiden (oikea) kuoripartikkelien massavirta (kg/s/m^2). Kuvien skaala on katkaistu.

Menetelmää testattiin toisellekin päivälle, mutta tuloksia ei ole esitetty, koska tarttuneiden partikkelien massavirrat pysyivät samansuuruisina kuin aiemmassa tapauksessa. Tarkasteltaessa päivän 2 kuori- ja lietepartikkelien tuhkan sulanutta osuutta kuvasta 4.7 voi päätellä heijastumista tapahtuvan selvästi enemmän kuin T_{15} -lämpötilaa ja Weberin lukua kriteerinä käyttävässä tapauksessa. Alueilla, joilla lietepartikkeleita tarttuu, sulanut osuus on lähes aina alle 30 %, mikä vastaa 26 % tarttumistodennäköisyyttä. Kuoripartikkeleidenkin sulamisaste on alle 45 %, mikä vastaa alle 55 % todennäköisyyttä. Vaikka heijastumista tapahtuu paljon, ovat tarttuneiden partikkelien massavirrat tässäkin tapauksessa suunnilleen samansuuruiset kuin luvun 4.1.1 tuloksissa. Tämä johtuu todennäköisesti samoista tekijöistä kuin ensimmäisenäkin päivänä.

4.2 Seinän lämpötilaan perustuva kuonaantumismalli

Kuonaantumismallin tulokset riippuvat valitusta partikkelien tarttumismallista. Koska kaikkia luvussa 4.1 laskettuja tapauksia ei tässä työssä ole mahdollista vertailla, käytetään luvun 4.1.1 tuloksia, jotka on laskettu käyttämällä T_{15} -lämpötilaa ja Weberin lukua kriteerinä tarttumiselle. Linearisesti lämpötilasta riippuvan tarttumistodennäköisyyden käyttäminen tai ilmakertoimen huomioonottaminen ei muuttaisi tuloksia juuri lainkaan. Jos oletettaisiin pienemmän piipitoisuuden avulla lasketut tarttumismallin tulokset to-

dellisuutta vastaaviksi, ei tässä luvuissa käytetyillä malleilla olisi ensimmäisenä päivänä vaikutusta, koska partikkelit eivät tarttuisi seinille.

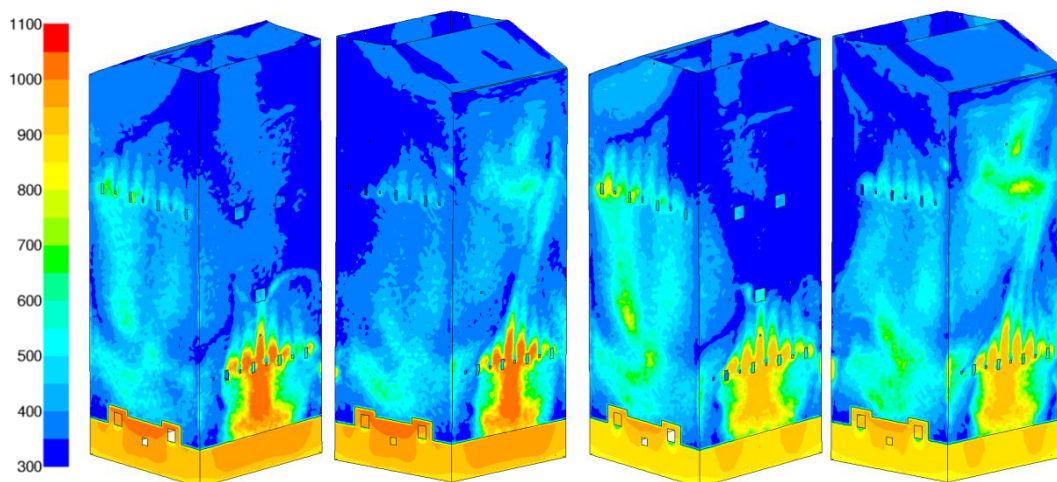
Kuonaantumisen vaikutusten mallintaminen on iteratiivinen prosessi. Kun kuonaantumismalli otetaan käyttöön, tulipesän lämpötilajakauma muuttuu. Tulipesän seinien lämpötilan noustessa seinä voi muuttua tahmeaksi. Muuttuvat lämpötilat vaikuttavat seinille osuvien partikkelien lämpötiloihin ja kaasusta seinille siirtyvään lämpövuohon. Nämä tekijät vaikuttavat partikkelien tarttumiseen, mikä taas vaikuttaa seinän lämpötilaan. Ratkaisua on iteroitava, kunnes päästään tasapainotilanteeseen.

Tässä luvussa mallinnetaan kuonaantumista kaavan (68) mukaisella partikkelien lämpötilasta, lineaarisesti tarttuneiden partikkelien massavirrasta ja höyrystinpinnan lämpötilasta riippuvalla kuonakerroksen pinnan lämpötilalla. Tälle mallille tarkastellaan myös emissiviteetin valinnan vaikutusta tuloksiin.

4.2.1 Seinien lämpötilat

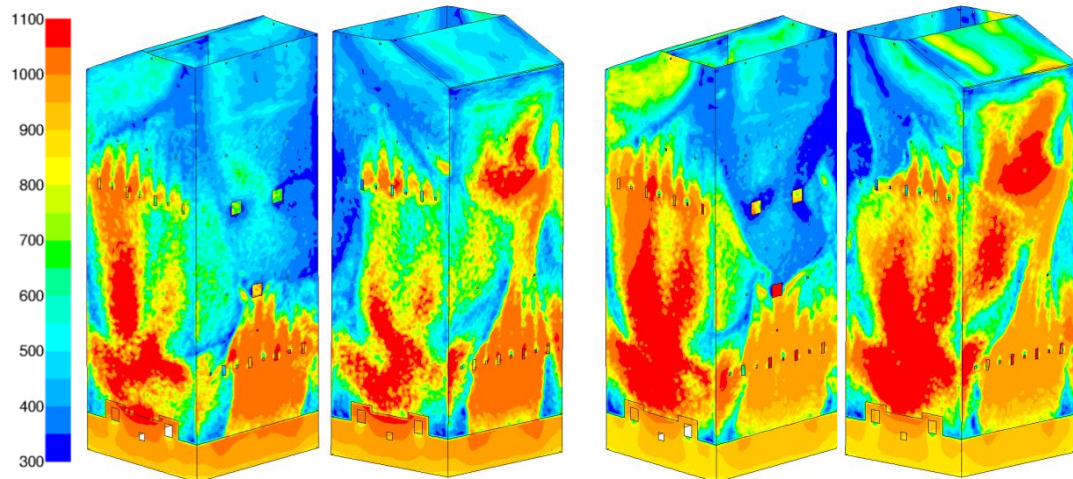
Kriittisen massavirran arvo on valittu tarkastelemalla kuvia 4.1 ja 4.2. Tapaus 1 on laskettu arvolla $0,5 \text{ g/s/m}^2$ ja tapaus 2 arvolla $0,1 \text{ g/s/m}^2$. Molemmat tapaukset on laskettu sekä päivälle 1 että päivälle 2. Tapaukselle 1 kriittisen massavirran arvo valittiin niin, että partikkelien lämpötilaa käytetään vain kaikkein eniten kuonaantuvilla alueilla. Muilla alueilla kuonaantuminen otetaan huomioon lineaarisesti massavirrasta riippuvan lämpötilan avulla. Tapauksessa 2 partikkelien lämpötilaa käytetään selvästi laajemmilla alueilla ja massavirrasta riippuvaa lämpötilaa vain näiden alueiden reunoilla.

Päivän 1 tapauksessa 1 (kuva 4.10) höyrystimen seinillä on mallin mukaan korkeita lämpötiloja vain etu- ja takaseinillä sekundääri-ilman alapuolella, missä lämpötilat ovat noin $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Näin korkeita mittausarvoja (taulukko 3.4) ei tulipesän seiniltä löydy vaan maksimi on $840 \text{ }^\circ\text{C}$. Tulipesän alaosaista seinälämpötilojen mittauksia on kuitenkin vain muutamasta pisteestä. Muualla seinien mallinnettu lämpötila on tarttuneiden partikkelien määrästä riippuen $300\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$. Nämä arvot ovat pienempiä, kuin mitatut arvot, jotka vaihtelevat 500 ja $800 \text{ }^\circ\text{C}$ välillä.



Kuva 4.10. Seinien lämpötila ($^\circ\text{C}$) päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksissa 1, joissa $m_{cr}''=0,5 \text{ g/s/m}^2$.

Tapaus 2 (kuva 4.11) antaa paljon jyrkempiä lämpötilagradientteja seinille kuin tapaus 1. Maksimilämpötilat sivuseinillä ja etuseinällä tertiääri-ilman korkeudella ovat noin 1100 °C. Sivuseinien lämpötilat ovat etu- ja takaseinien alaosien nopeasti kuonaantuvien osien lämpötiloja korkeampia, koska sivuseinille osuvien partikkelien lämpötilat ovat korkeampia. Nämä lämpötilat ovat selvästi liian korkeita verrattuna mitattuihin arvoihin. Seinällä olevat suuret lämpötilagradientit eivät myöskään vastaa mittauksia, joiden perusteella seinien lämpötilat muuttuvat tasaisemmin.



Kuva 4.11. Seinien lämpötila (°C) päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksissa 2, joissa $m_{cr}'' = 0,1$ g/s/m². Kuvien skaala on katkaistu.

Toisen päivän tapaukset ovat hyvin samanlaiset kuin ensimmäisen. Huippulämpötilat ovat matalampia kuin ensimmäisenä päivänä, mikä johtuu matalammista kaasun lämpötiloista. Alueilla, joilla partikkeleita tarttuu vähemmän kuin kriittisen massavirran verran, lämpötilat ovat sen sijaan korkeampia kuin päivän 1 tapauksissa, koska seinille tarttuu enemmän partikkeleita. Varsinkin tapauksessa 2 on suuret alueet, joille käytetään suoraan partikkelien lämpötilaa, joten tarttuneiden partikkelien suhteellisella määrällä ei ole suurta merkitystä tässä tapauksessa.

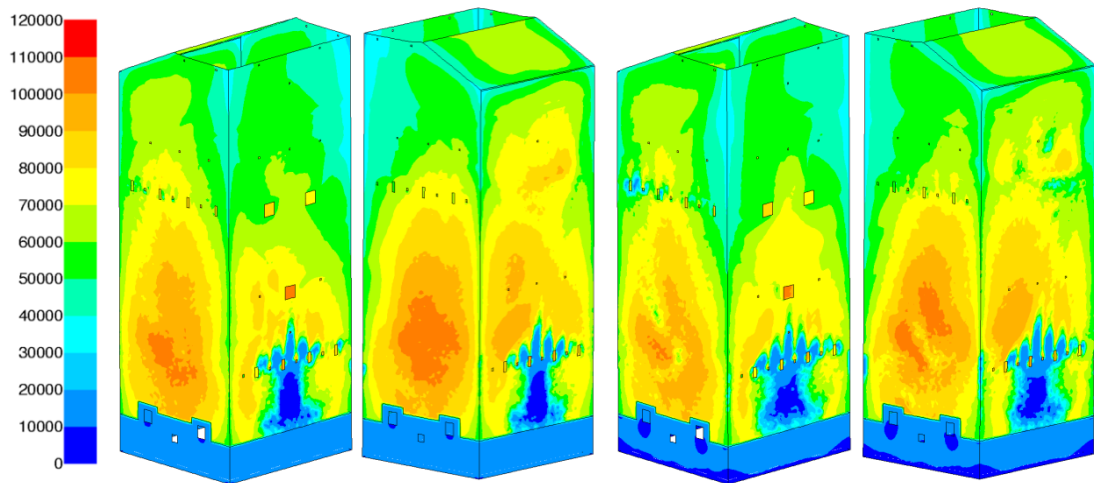
Päivältä 2 ei ole mittausdataa seinien lämpötiloista. Niiden voi kuitenkin olettaa olevan matalampia kuin ensimmäisenä päivänä matalampien kaasun lämpötilojen vuoksi. Vaikka mallinnuksen mukaan toisena päivänä tarttuu enemmän partikkeleita kuin ensimmäisenä, kuonakerroksen paksuuden ei voi todellisuudessa olettaa muuttuvan merkittävästi yhden vuorokauden aikana.

4.2.2 Vaikutus lämmönsiirtoon ja emissiviteettiin

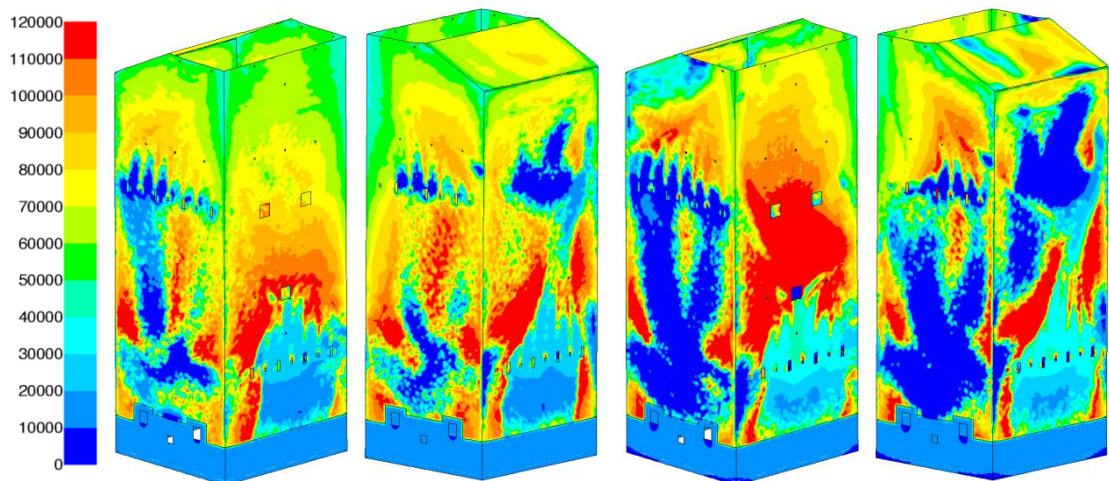
Kuonaantumismallin vaikutusta lämmönsiirtoon voi arvioida höyrystimen seinien läpi kulkevan lämpövuon avulla. Alkuperäisessä tapauksessa, jossa ei ole käytössä kuonaantumismallia, lämpövirran tiheys (kuva 3.4) riippuu kaasun lämpötilasta, virtausolosuhteista ja seinän emissiviteetistä. Kuonaantumismallia käytettäessä vaikutusta on lisäksi muuttuvalla kuonakerroksen pinnan lämpötilalla, joka vaikuttaa pinnan emittoiman säteilyn määrään. Seinien lämpötilojen noustessa on emissiviteetinkin arvon noustava, koska kokonaislämmönsiirto jää muutoin todellisuutta pienemmäksi. Laskuissa on käy-

tetty jokaiselle tapaukselle vain yhtä emissiviteettiä. Todellisuutta vastaava kokonaislämmönsiirto saavutettiin kaikissa tapauksissa paitsi päivän 2 tapauksessa 2. Lämpövirran tiheydet tapauksille 1 ja 2 on esitetty kuvissa 4.12 ja 4.13.

Jakauma on molempina päivinä tapauksessa 1 (kuva 4.12) melko tasainen ja eroaa alkuperäisestä tapauksesta selvästi vain etu- ja takaseinän alaosan nopeasti kuonaantuvalla alueella, jossa lämpövirran tiheydet ovat lähellä nollaa. Sivuseinilläkin lämpövuot pienenevät hieman. Nämä erot ovat toisena päivänä suurempia kuin ensimmäisenä tarttuvien partikkelien suuremman määrän vuoksi. Kuvatekstissä esitetyt emissiviteetit ovat molemmissa tapauksissa vain hieman alkuperäisiä arvoja suurempia, mikä kertoo mallin vaikutuksen lämmönsiirtoon olevan melko pieni. Näissä tapauksissa ei myöskään synny negatiivisia lämpövirran tiheyksiä, jotka ovat ongelmana tapauksessa 2.



Kuva 4.12. Seinien läpi menevä lämpövuoto (W/m^2) päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksissa 1, joissa $m_{cr}''=0,5$ g/s/m². Seinän emissiviteetti 1. päivänä $\varepsilon=0,47$ ja 2. päivänä 0,62.



Kuva 4.13. Seinien läpi menevä lämpövuoto (W/m^2) päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksissa 2, joissa $m_{cr}''=0,1$ g/s/m². Seinän emissiviteetti 1. päivänä $\varepsilon=0,67$ ja 2. päivänä $\varepsilon=0,90$. Kuvien skaala on katkaistu.

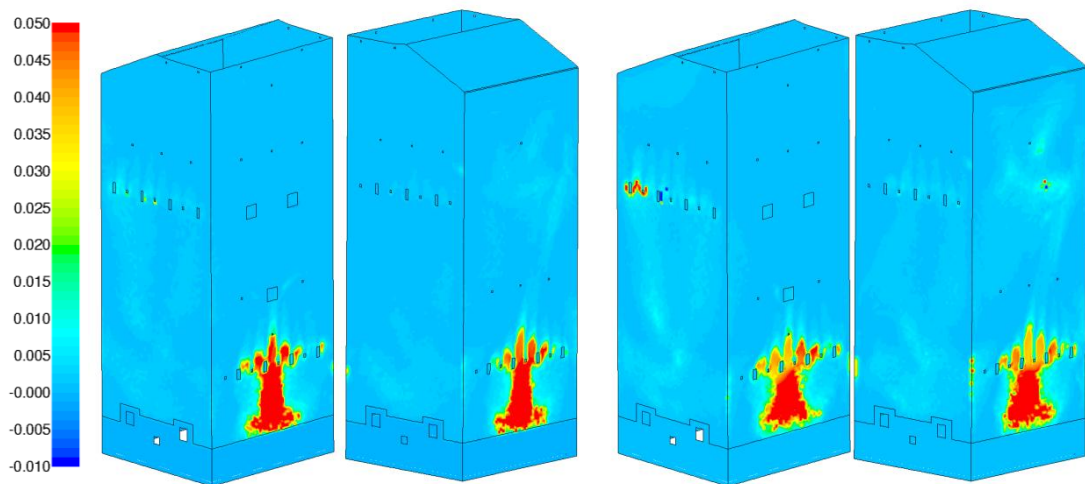
Suurten lämpötilagradienttien vuoksi tapauksessa 2 (kuva 4.13) myös lämpövirran tiheydet vaihtelevat jyrkästi varsinkin toisena päivänä. Emissiviteetit ovat selvästi kor-

keammat kuin alkuperäisessä tapauksessa. Toisena päivänä emissiviteetti on maksimiarvossaan $\varepsilon = 0,9$, mutta kokonaislämpövuosi on pienempi kuin todellisuutta vastaava arvo. Tämä johtuu liian korkeista seinälämpötiloista.

Alueilla, joille partikkeleita tarttuu vain vähän, lämpövuosi on selvästi suurempi kuin alkuperäisessä tapauksessa korkeamman emissiviteetin vuoksi. Sitä vastoin kohdissa, joihin tarttuu paljon partikkeleita, lämpövirran tiheys on hyvin lähellä nollaa. Seinän lämpötilat ovat joissakin kohdissa niin korkeat, että lämpövirran tiheys on negatiivinen, mitä ei kuitenkaan erota näiden kuvien skaalasta. Tätä ongelmaa käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Negatiivisten lämpövirran tiheyksien ei kuitenkaan voi olettaa vastaavan todellisuutta, koska jos seinällä olevassa kerrostumassa ei tapahdu palamista, ei lämmönsiirron suunta voi olla kuin hetkellisesti kuonakerroksesta kaasuun.

4.2.3 Kuonakerroksen paksuus

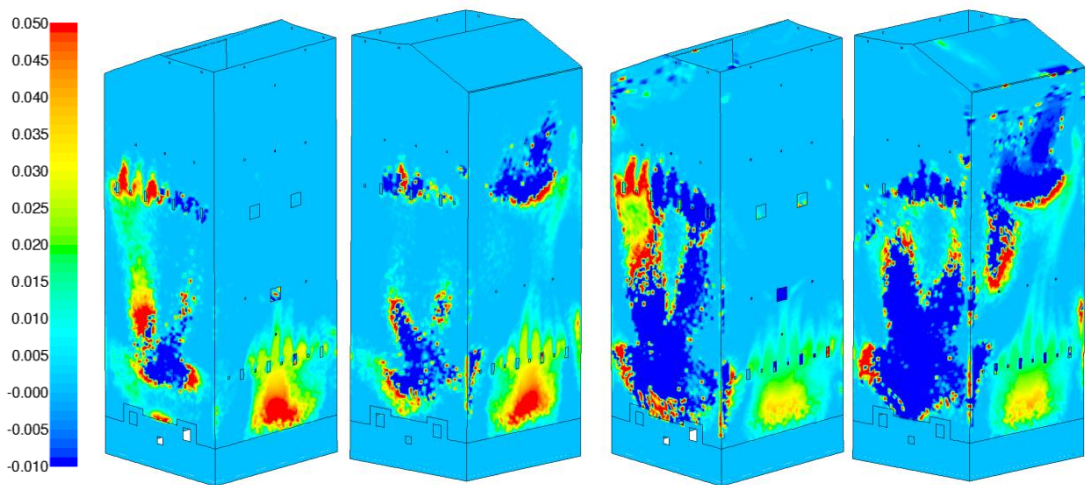
Kuonakerroksen paksuus voidaan laskea seinien lämpötilan ja ratkaistun lämpövuon perusteella kaavasta (69). Tapauksen 1 maksimipaksuudet (kuva 4.14) ovat 5-20 cm ensimmäisenä päivänä kun taas muualla höyrystimen alueella paksuudet ovat suurimaksi osaksi alle 1 cm. Tämän mallin mukaan tarttuvien partikkelien massavirralla on hyvin suuri vaikutus kerrostuman paksuuteen eli kerrostumat ovat paksuimmillaan siellä, missä partikkeleita tarttuu eniten.



Kuva 4.14. Seinän lämpötilaa vastaava kuonakerroksen paksuus (m) päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksissa 1, joissa $m_{cr}'' = 0,5 \text{ g/s/m}^2$. Kuvien skaala on katkaistu.

Kerrostuman paksuudet 5-20 cm kuulostavat hyvin suurilta, mutta todellisuudessa tarkalla arvolla ei ole merkitystä. Monen sentin paksuisen kerrostuman läpi kulkeva lämpövuosi on joka tapauksessa mitätön verrattuna puhtaampiin seiniin eikä paksuuden tarkalla arvolla ole merkitystä kokonaislämmönsiirron kannalta. Kiinnostavampia ovat alueet, joilla käytetään lineaarisesti massavirrasta riippuvaa kuonan pintalämpötilaa. Kuvasta näkee, että näillä alueilla kerrostumat ovat muutaman millin paksuisia ja lämpövirta kerrostuman läpi on lähes yhtä suuri kuin alkuperäisessä tapauksessa. Vaikka lämpövirta on lähellä alkuperäistä arvoa, on paksuuden muutoksella kuitenkin suurempi vaikutus lämmönsiirtoon kuin alueilla, joilla kerrostumat ovat hyvin paksuja.

Kuvassa 4.15 esitetty toinen tapaus antaa todellisuutta vastaavia paksuuksia vain etu- ja takaseinän alaosassa. Kuumimpien seinien liian korkeat lämpötilat johtavat negatiivisiin lämpövirran tiheyksiin, jotka aiheuttavat negatiivisia kerrostuman paksuuksia. Näitä negatiivisia paksuuksia on suurella alueella erityisesti toisen päivän tapauksessa. Tämä tarkoittaa, että kerrostuma ikään kuin toimii lämmönlähteenä tulipesään. Todellisuudessa kuonan pintalämpötila ei voi nousta kaasun lämpötilaa korkeammaksi vaan se lähestyy kaasun lämpötilaa, kunnes kerrostuman paksuuden kasvu ei enää nosta kuonan pintalämpötilaa. Ongelmalta voisi välttyä asettamalla lämpötilalle ylärajan, joka vastaisi esimerkiksi lämpötilaa, jossa kaasun ja seinän välinen lämmönsiirto olisi nolla. Sitä ei kuitenkaan ole tässä työssä toteutettu, koska mittausten mukaan kuonakerroksen pintalämpötilat eivät saavuta kaasun lämpötilaa vaan ovat selvästi matalampia.



Kuva 4.15. Seinän lämpötilaa vastaava kuonakerroksen paksuus (m) päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksissa 2, joissa $m_{cr}'' = 0,1 \text{ g/s/m}^2$. Kuvien skaala on katkaistu.

Kuvissa 4.14 ja 4.15 esiintyy myös hyvin suuria, jopa monen kymmenen senttimetrin paksuisia kerrostumia kohdissa, joissa seinän lämpötila lähestyy kaasun lämpötilaa. Tätä ei näy kuvien skaalassa. Todellisuudessa jokin mekanismi, kuten eroosio tai gravitaatio, irrottaa kerrostuman ennen kuin se kasvaa useiden kymmenien senttimetrin paksuiseksi. Seinälämpötilojen mittauksissa laskettiin suurimmillaan 2 cm kuonakerroksen paksuuksia.

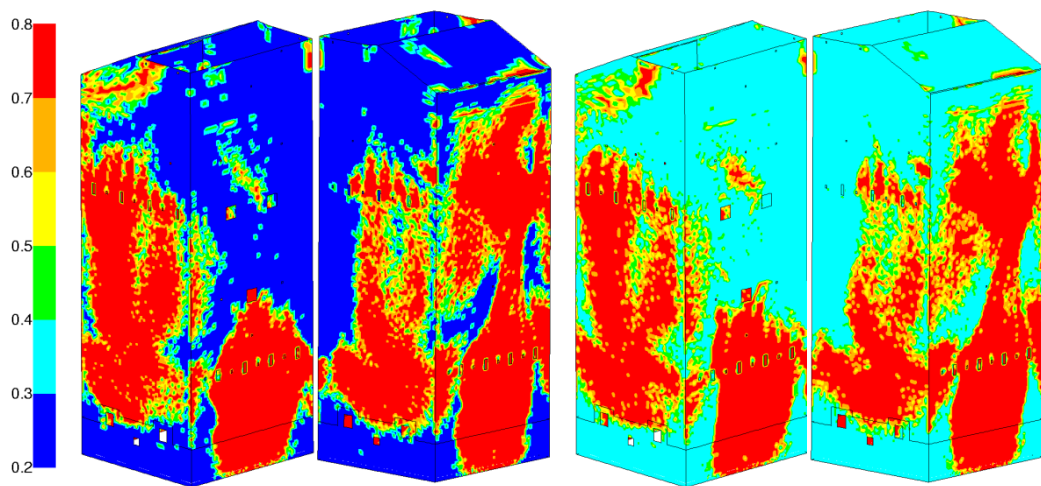
4.2.4 Eri emissiviteetin käyttö likaiselle ja puhtaalle pinnalle

Tässä luvussa esitetään tulokset luvussa 3.4.2 esitetylle mallille, jossa kuonaantuneella ja kuonaantumattomalla seinällä on eri emissiviteetit. Nämä tulokset on laskettu vain ensimmäisen päivän tapaukselle, jossa kriittinen massavirta on $0,5 \text{ g/s/m}^2$. Näissä malleissa oletetaan seinällä olevan kuonakerros, jos seinälle tarttuvien partikkelien massavirta on suurempi kuin $0,05 \text{ g/s/m}^2$. Jos massavirta on pienempi, oletetaan, että seinälle on tarttunut vain irrallisia partikkeleita ja sen emissiviteetti on pieni.

Ensimmäisessä lasketussa tapauksessa kuonakerroksen emissiviteetti on asetettu arvoon 0,8 kuonaantuneelle seinälle. Muille pinnoille emissiviteetti iteroidaan niin, että päästää haluttuun kokonaislämmönsiirtoon. Toisessa tapauksessa taas asetetaan emissi-

viteetti 0,3 pinnalle, jossa ei ole kuonakerrosta, ja kuonaantuneen pinnan emissiviteetti iteroidaan. Molemmissa tapauksissa eli taulukon 4.1 tapauksissa 3 ja 4 saavutettiin todellisuutta vastaava kokonaislämmönsiirto.

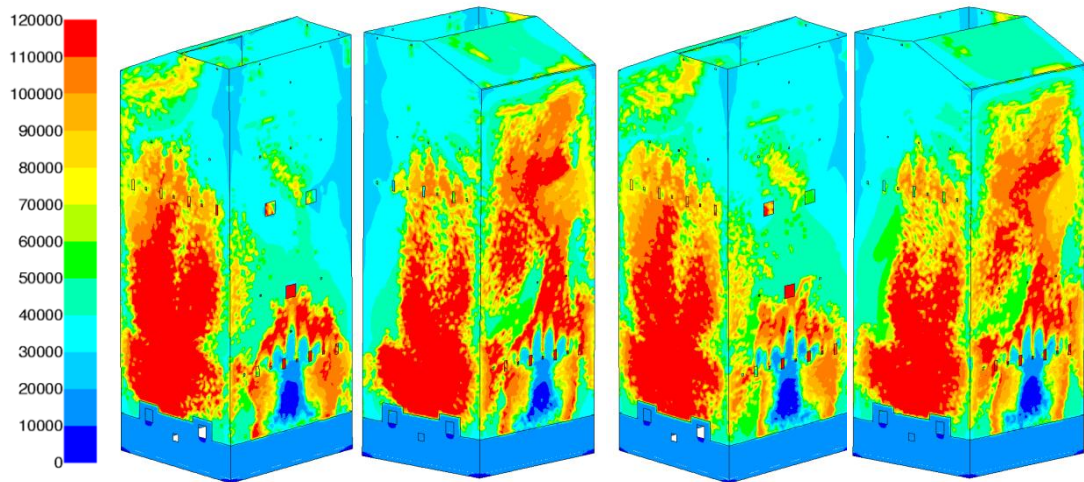
Kuvassa 4.16 on esitetty emissiviteettien arvot höyrystimen alueella. Tapauksessa 3 on asetettu kuonaantuneen seinän emissiviteetti arvoon 0,8 ja muille alueille on iteroimalla saatu arvo 0,28. Tapauksessa 4 on valittu kuonaantumattomalle pinnalle emissiviteetin arvo 0,3 ja iteroimalla saatu kuonaantuneelle pinnalle arvo 0,75. Koska näiden kahden tapauksen emissiviteetit eroavat vain vähän toisistaan, on tapauksilla käytännössä vain vähän eroa. Kuonaantuneen ja kuonaantumattoman pinnan raja on suunnilleen samassa kohdassa molemmissa tapauksissa. Pienet erot johtuvat todennäköisesti siitä, että laskettuja partikkeleita on rajallinen määrä, ja että iteroidut ratkaisut eivät välttämättä ole täysin vakio-tilassa.



Kuva 4.16. Emissiviteetin arvot tapauksille 3 ja 4, joissa kuonaantumattoman (vasen) tai kuonaantuneen (oikea) seinän arvo on iteroitu. Kuvien skaala on katkaistu.

Seinän lämpötiloja ei ole esitetty kuvina näille tapauksille, mutta kuvassa 4.17 on esitetty lämpövirran tiheydet tulipesän seinien läpi. Seinälämpötilat eivät juuri poikkea tapauksesta 1, jossa käytetään vain yhtä emissiviteettiä. Kahden emissiviteetin käyttö yhden sijaan vaikuttaa vain hieman kaasun lämpötiloihin eikä seinään osuvien partikkelien lämpötiloissa ja tarttuvien partikkeleiden määrässä ole suurta eroa. Sen sijaan vaikutus lämmönsiirtoon on suuri.

Lämpövirran tiheydet eroavat selvästi sekä yhdellä emissiviteetillä lasketuista arvoista (kuva 4.12) että alkuperäisestä tapauksesta (kuva 3.4). Emissiviteetin pieneneminen alueilla, jolle tarttuu vain vähän partikkeleita, johtaa lämmönsiirron heikkenemiseen, vaikka todellisuudessa näillä alueilla lämmönsiirron pitäisi olla tehokasta. Kuonakerroksen ollessa paksuimmillaan lämpövuoto on lähellä nollaa niin kuin yhtä emissiviteettiä käyttävässä mallissakin. Alueilla, joilla tarttuu partikkeleita hieman enemmän kuin mikä on kuonaantuneen ja kuonaantumattoman seinän välinen raja, lämpövirran tiheydet ovat sen sijaan hyvin suuria. Tämä johtuu siitä, että näiden alueiden seinälämpötilat ovat vain vähän korkeampia kuin alueilla, joilla käytetään matalampaa emissiviteettiä. Korkeampien emissiviteettien vuoksi lämpövuotot kasvavat moninkertaisiksi verrattuna läheisiin vähemmän kuonaantuneisiin alueisiin.



Kuva 4.17. Lämpövirran tiheydet seinältä höyrypuolelle (W/m^2) tapauksissa 3 ja 4, joissa kuonaantumattoman (vasen) tai kuonaantuneen (oikea) seinän arvo on iteroitu. Kuvien skaala on katkaistu.

Lämpövirran tiheyksien perusteella malli ei ennusta alkuperäiseen malliin verrattuna pienempää lämmönsiirtoa kuonaantuneelle pinnalle, mikä on ristiriidassa todellisen tilanteen kanssa. Toisaalta valitsemalla kuonaantuneen ja kuonaantumattoman pinnan raja paremmin voitaisiin saada paremmin todellisuutta kuvaavia tuloksia. Käyttämällä yhtä emissiviteettiä yksinkertaistetaan tilannetta ja vältytään monen parametrin valinnalta.

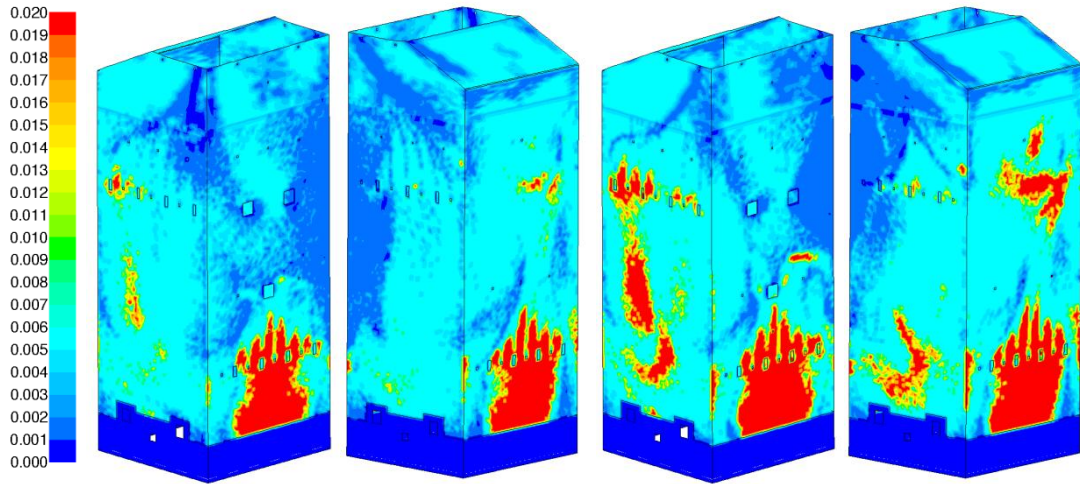
4.3 Kerrostuman paksuuteen perustuva kuonaantumismalli

Luvussa 4.2 lähdettiin liikkeelle oletuksesta, jonka mukaan lämpötila rajoittaa kerrostuman paksuutta ja lämmönsiirtoa. Tässä lähestymistavassa osoittautui kuitenkin olevan ongelmia eikä yhteensopivuus mitattujen seinälämpötilojen kanssa ollut kovin hyvä. Kuonaantumista lähdettiin siksi tarkastelemaan myös mittaustulosten perusteella valittujen kerrostuman paksuuksien avulla. Kerrostuman paksuuteen perustuvalla mallilla laskettiin tapaus 5. Mittaustuloksista valittiin kolme paksuutta, joita käytetään sen mukaan, kuinka suuri partikkelivuo seinälle tarttuu. Yksinkertaisuuden vuoksi tässä luvussa on laskettu vain yksi tapaus sekä ensimmäiselle että toiselle päivälle. Vaikka paksuuksien valinta perustuu mitattuihin arvoihin, ne ovat kuitenkin vain yksittäisten pisteiden arvoja. Kokeilemalla eri kerrostuman paksuuksia voisi mallin toimivuutta arvioida paremmin.

4.3.1 Valitut kuonakerroksen paksuudet

Nopeimmin kuonaantuvilla alueilla käytetään kerrostuman paksuutta 2 cm, joka on mitattujen arvojen maksimi. Alueilla, joilla tapahtuu jonkin verran kuonaantumista, käytetään 5 mm paksuutta. Koska lähes kaikkialle tarttuu jonkin verran partikkeleita ja kaikki mitatut arvot ovat suurempia kuin nolla, käytetään lopuilla pinoilla kerrostumalle 1 mm paksuutta. Eri paksuuksien väliset rajat, jotka on esitetty taulukossa 4.1, on määri-

telty niin, että ohuita ja paksuja kerrostumia on suunnilleen samassa suhteessa mallinnuksessa tapauksessa kuin mittauksissa. Arvio on kuitenkin tehty vain silmämääräisesti pienestä määrästä mittauspisteistä eikä ole kovin tarkka. Seinille asetettuja kerrostuman paksuuksia on havainnollistettu kuvassa 4.18.



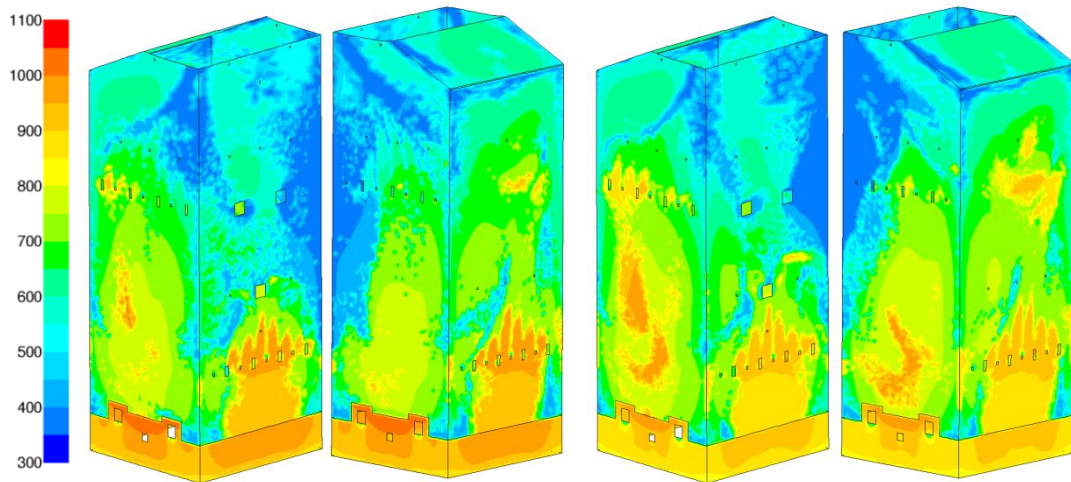
Kuva 4.18. Valitut kuonakerroksen paksuudet (m), päivät 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksessa 5.

Kuonakerroksen maksimipaksuudet ovat pienempiä kuin seinän lämpötilojen perusteella lasketut tapausten 1 ja 2 arvot kuvissa 4.14 ja 4.15. Tapaukseen 1 verrattuna paksuudet ovat suurempia alueilla, joilla partikkeleita tarttuu vähän. Mallin etuna on negatiivisten lämpövirran tiheyksien ja kerrostuman paksuuksien välttäminen. Päivät 1 ja 2 eroavat vain hieman toisistaan. Toisena päivänä 2 cm ja 5 mm kerrostumat ovat laajemmalla alueella kuin ensimmäisenä tarttuvien partikkelien suurempien massavirtojen vuoksi.

4.3.2 Seinien lämpötilat

Tapaus 5 antaa melko tasaisen lämpötilajakauman höyrystimen seinille, mikä on esitetty kuvassa 4.19. Kerrostuman paksuuden pysyessä vakiona kerrostuman pintalämpötilat ovat korkeampia alueilla, joilla kaasun lämpötilat ovat korkeampia. Maksimilämpötilat ovat molempina päivinä hieman 1000 °C alapuolella. Pienimmillään lämpötilat ovat alle 400 °C 1 mm kerrostuman alueilla.

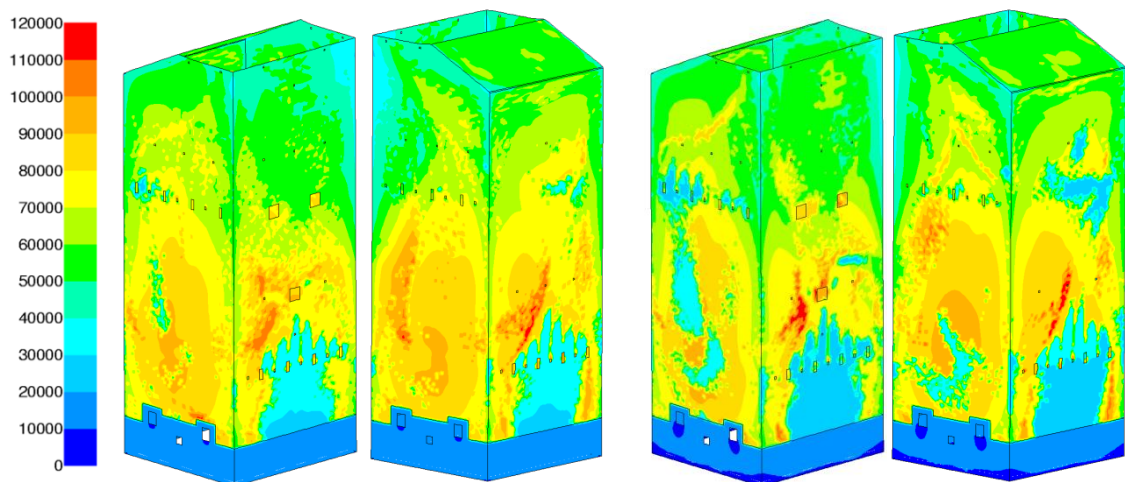
Verrattuna tapaukseen 1 seinälämpötilat ovat yleisesti korkeampia ja paremmin mitaustuloksia vastaavia. Maksimilämpötilat ovat sen sijaan matalampia, mutta sijaitsevat kuitenkin molemmissa tapauksissa samoilla alueilla. Vaikka kerrostuman paksuudella on vain kolme vakioarvoa, seinän lämpötilat eivät ole vakioita vaan riippuvat kaasun lämpötilasta. Myös seinän lämpötilaan perustuvat mallit ottavat kaasun lämpötilan huomioon, koska partikkelien lämpötila on lähellä kaasun lämpötilaa, mutta tässä mallissa sillä on kuitenkin suurempi vaikutus.



Kuva 4.19. Kuonakerroksen paksuuden perusteella laskettu seinän lämpötila (°C), päivät 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksessa 5.

4.3.3 Vaikutus lämmönsiirtoon ja emissiviteettiin

Tässäkin tapauksessa kokonaislämmönsiirto pidetään todellisuutta vastaavassa arvossa emissiviteettiä säätämällä. Paikalliset lämpövuot (kuva 4.20) pienenevät alkuperäiseen malliin (kuva 3.4) verrattuna lähes koko tulipesän alaosassa. Suurinta pieneneminen on etu- ja takaseinällä sekundääri-ilman alapuolella, mutta myös sivuseinillä vuot pienenevät selvästi. Suurimmat lämpövirran tiheydet eivät tällä mallilla löydy sieltä, missä kaasun lämpötila on korkeimmillaan, vaan yksittäisiltä alueilta tulipesän alaosassa, joissa kerrostuman paksuudet ovat pieniä.



Kuva 4.20. Lämpövirran tiheys seinän läpi (W/m^2), päivät 1 (vasen) ja 2 (oikea) tapauksessa 5. Seinän emissiviteetti 1. päivänä $\varepsilon=0,61$ ja 2. päivänä $\varepsilon=0,81$.

Emissiviteetit ovat selvästi suurempia näissä tapauksissa verrattuna alkuperäisiin tapauksiin. Tämän vuoksi tulipesän yläosassa, missä käytetään 1 mm kerrostuman paksuuksia, lämpövuot ovat pääosin suurempia kuin alkuperäisessä tapauksessa. Poikkeus tälle on tertiääri-ilman taso, jossa kuonaantumisen vuoksi esiintyy alkuperäisiä arvoja selvästi pienempiä lämpövirran tiheyksiä varsinkin toisena päivänä. Toisena päivänä

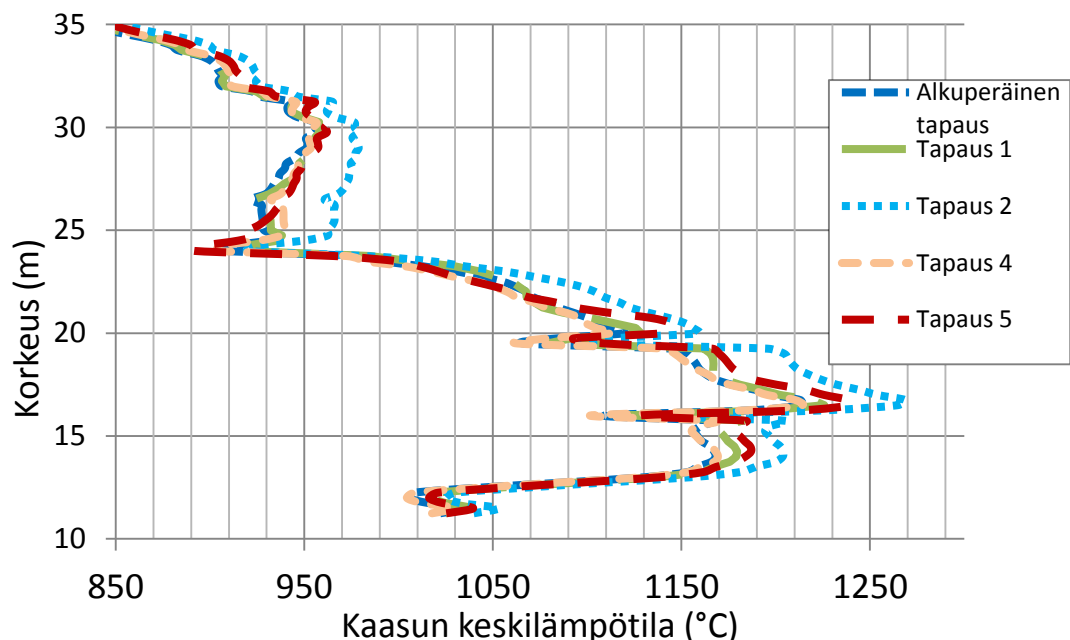
emissiviteetti on lähellä maksimiarvoaan, minkä perusteella kerrostuman paksuuksia ei pitäisi ainakaan suurentaa.

4.4 Kuonaantumismallin vaikutukset tulipesässä

Muutetut höyrystimen seinien reunaehdot vaikuttavat siihen, millä alueilla lämmönsiirto tulipesästä höyrypuolelle on tehokkainta. Tällä taas on vaikutusta tulipesän lämpötilajakaumaan. Lämpötilojen muuttuminen voi vaikuttaa myös muihin laskettaviin suureisiin. Tässä luvussa verrataan eri suureiden arvoja alkuperäisen tapauksen ja tässä työssä laskettujen tapausten välillä. Tarkasteltavia asioita ovat lämpötilan lisäksi eri kaasujen konsentraatiot, palaminen ja säteilylämmönsiirto. Kaikkien mallien vaikutusta kaikkiin laskettaviin suureisiin ei ole mahdollista verrata. Koska tapaukset 3 ja 4 antavat todellisuutta huonosti vastaavat lämpövirran tiheyden jakaumat tulipesän seinillä, ne jätetään huomioimatta. Myös tapaus 2 antaa epäluotettavia tuloksia negatiivisten lämpövirran tiheyksien vuoksi. Tässä luvussa keskitytään tapauksiin 1 ja 5, jotka näyttävät antavan parhaiten todellisuutta vastaavia tuloksia, mutta joitakin vertailuja tehdään muillekin tapauksille.

4.4.1 Vaikutus tulipesän lämpötilaprofiiliin

Tulipesän lämpötiloja tarkastellaan vertaamalla horisontaalisten tasojen keskilämpötiloja. Tapausten lämpötilaprofiilit on piirretty kuviin 4.21 ja 4.22. Kuvaajan selkeyden vuoksi ensimmäiselle päivälle laskettu tapaus 3 on kuitenkin jätetty piirtämättä, koska se on hyvin samankaltainen tapauksen 4 kanssa.

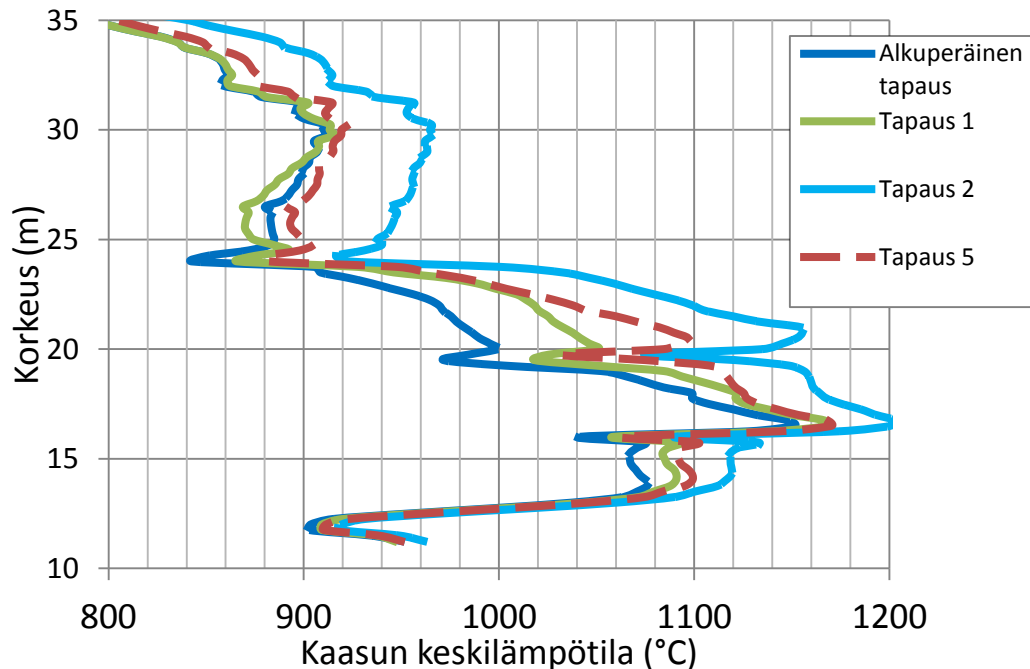


Kuva 4.21. Kaasun keskilämpötilan riippuvuus korkeudesta tulipesässä eri laskentatapauksille ensimmäisenä päivänä.

Kuvissa peti on 11 metrin tason alapuolella ja nokka on 31 metrin korkeudella. Keskilämpötiloissa tapahtuu neljä selvästi erottuvaa pudotusta. Aivan freeboardin alaosassa tapahtuva pudotus johtuu polttoaineen syötöstä. Toinen pudotus korkeudella 16 m johtuu sekundääri-ilmoista. Kolmannen pudotuksen aiheuttaa alemman kuormailman syöttö. Neljäs pudotus johtuu tertiääri-ilmasta ja ylemmistä kuormailmoista.

Lämpötilaprofiileissa ei ole ensimmäisenä päivänä suuria eroja. Tapausten välinen ero on suurimmillaan noin 50 °C, ja selvästi korkeimpia lämpötiloja antaa tapaus 2. Lämpötilaero pienenee nokan tasoa lähestyttäessä, koska höyrystimen yläosissa lämmönsiirto kaasusta seinille on tehokkaampaa kuin alkuperäisessä tapauksessa korkean emissiviteetin vuoksi. Myös tapaus 5, jossa on asetettu vakioarvot kerrostumien paksuuksille, eroaa tulipesän alaosassa selvästi alkuperäisestä tapauksesta. Freeboardin alaosissa lämpötilat ovat alkuperäistä korkeampia, mutta lämpötilaero tasoittuu kuitenkin nopeasti sekundääri-ilman yläpuolella, koska tässäkin tapauksessa paksuimmat kerrostumat ovat freeboardin alaosassa.

Tapaukset 1 ja 4 ovat hyvin samanlaiset. Niiden ainoa ero on se, että tapauksessa 4 käytetään kahta emissiviteetin arvoa kun taas tapauksessa 1 käytetään vain yhtä. Tapauksessa 4 tulipesän alaosissa lämmönsiirto on tehokasta, kun taas tapauksessa 1 saman alueen lämpövirran tiheydet ovat selvästi pienemmät, joten lämpötilat ovat tapauksessa 1 hieman korkeampia tällä alueella. Nämä tapaukset ovat hyvin lähellä alkuperäistä tapausta, koska partikkelien kriittisen massavirran $0,5 \text{ g/s/m}^2$ avulla määritetyt seinän lämpötilat ovat niin matalia, että vaikutus tulipesän lämpötilajakaumaan on pieni.



Kuva 4.22. Kaasun keskilämpötilan riippuvuus korkeudesta tulipesässä eri laskentatapauksille toisena päivänä.

Toisena päivänä tapausten väliset erot ovat suurempia, koska tarttuvien partikkelien määrä on suurempi. Tapauksessa 2 on korkeimmat lämpötilat. Suurimmillaan lämpötilaero tapausten välillä on 150 °C sekundääri- ja tertiääri-ilman välissä. Ero on suuri,

koska tapauksessa 2 seinien lämpötilat ovat niin korkeat, että emissiviteetin säätö ei riitä nostamaan kokonaislämmönsiirtoa todellisuutta vastaavalle tasolle vaan se jää liian pieneksi. Lisäksi lämpövirrat ovat negatiivisia suurilla alueilla tässä tapauksessa, mikä kasvattaa lämpötilaeroa seinän toimiessa lämmönlähteenä. Koska kokonaislämmönsiirto on pienempi kuin muissa tapauksissa, eivät lämpötilaerot tasoitu edes ylempänä tulipesässä.

Toisena päivänä tapauksessa 5, 2 cm ja 5 mm paksuudet esiintyvät laajemmalla alueella kuin ensimmäisenä päivänä, joten lämpötilaero sen ja alkuperäisen tapauksen välillä on suurempi. Tapaus antaa toiseksi korkeimmat lämpötilat kuten ensimmäisenä päivänäkin. Lämpötilaerot kuitenkin tasoittuvat tertiääri-ilman tasolla korkeamman emissiviteetin vuoksi. Myös tapaus 1 antaa alkuperäistä tapausta selvästi korkeammat lämpötilat tertiääri-ilman alapuolella, koska tarttuvien partikkelien suuren määrän vuoksi seinän lämpötilat ovat laajalla alueella korkeat.

Kokonaisuudessaan vaikutus keskilämpötilaan ei ole kovin suuri tapauksissa, joissa kokonaislämmönsiirto pysyy halutulla tasolla. Muurauksen alueella eli 13 m tason alapuolella ei reunaehtoja ole muutettu. Lämpötila onkin lähes sama kaikilla malleilla tällä alueella. Höyrystimen alaosaan on mallinnettu suurimmat kerrostuman paksuudet, minä vuoksi lämpötilaerot ovat siellä suurimmillaan. Nokan tasoa lähestyttäessä lämpötiloissa ei ole suurta eroa.

Paikalliset lämpötilat ovat alkuperäistä mallia korkeammat lähellä niitä seiniä, joissa on korkeat lämpötilat. Heikentyneen lämmönsiirron vuoksi nämä pinnat eivät jäähdytä savukaasuja yhtä tehokkaasti kuin puhtaammat seinät.

4.4.2 Vaikutus typpiyhdisteiden muodostumiseen

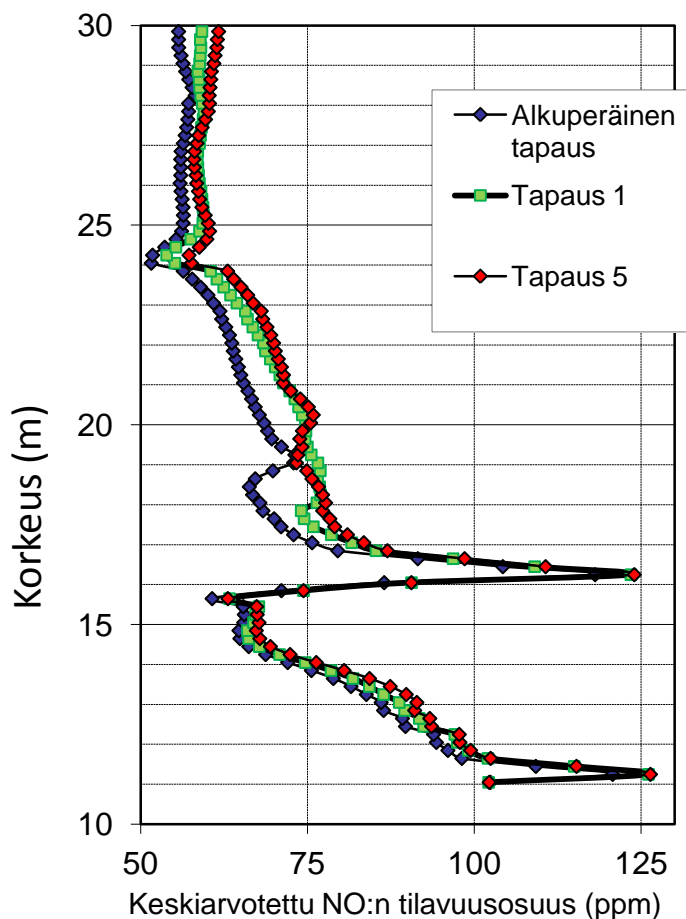
Koska kuonaantumismallin käyttö vaikuttaa tulipesän lämpötilajakaumaan, sillä on todennäköisesti myös vaikutusta muihin suureisiin. Typpiyhdisteiden muodostuminen tulipesässä on merkittävä prosessi ympäristön kannalta ja siksi onkin tärkeä tietää, millainen vaikutus kuonaantumismallilla on mallinnettuihin NO_x -päästöihin. Typpioksidien muodostuminen laskettiin VTT:n mallilla jälkilaskentana alkuperäiselle ja kuonaantumismallia käyttäville tapauksille. Tarkasteltavat typpiyhdisteet ovat NO , NH_3 ja HCN . Laskenta tehtiin molemmille päiville sekä tapaukselle 1 että tapaukselle 5. Tulosten mukaan kuonaantumismallilla on hyvin pieni vaikutus typpiyhdisteiden muodostumiseen. Vaikka joitakin pieniä eroja tapausten välille syntyi, päästöarvot ovat käytännössä samat.

Typpioksidipäästöt eri tapauksissa on koottu taulukkoon 4.2. Lisäksi taulukkoon on koottu CO -päästöt, joita käsitellään luvussa 4.4.3. Typpipäästöt eivät juuri eroa tapauksia vertailtaessa. Sekä ensimmäisenä että toisena päivänä tapaukset 1 ja 5 antavat vain hieman suuremmat päästöarvot kuin alkuperäinen tapaus. Käytännössä tämä ero on kuitenkin merkityksetön. Tapauksessa 5 tämä ero on selkeämpi, kuten lämpötilajakaumienkin erot.

Taulukko 4.2. Eri tapauksen NO- ja CO-päästöt tilavuusosuuksina.

Tapaus	NO-päästö (vol-ppm)	CO-päästö (vol-ppm)
1. päivä		
Alkuperäinen tapaus	63	2,4
Tapaus 1	66	2,1
Tapaus 5	66	1,9
2. päivä		
Alkuperäinen tapaus	57	5,3
Tapaus 1	58	3,4
Tapaus 5	61	3,6

Toisen päivän NO-konsentraatioiden riippuvuus korkeudesta on piirretty kuvaan 4.23. Alkuperäinen tapaus antaa pienimpiä NO-konsentraatioita lähes kaikilla korkeuksilla, kun taas tapauksessa 5 ne ovat taas enimmäkseen suurimpia. Samat trendit toistuvat enimmäkseen myös ensimmäisenä päivänä, mutta tapauksen väliset erot ovat pienemmät.



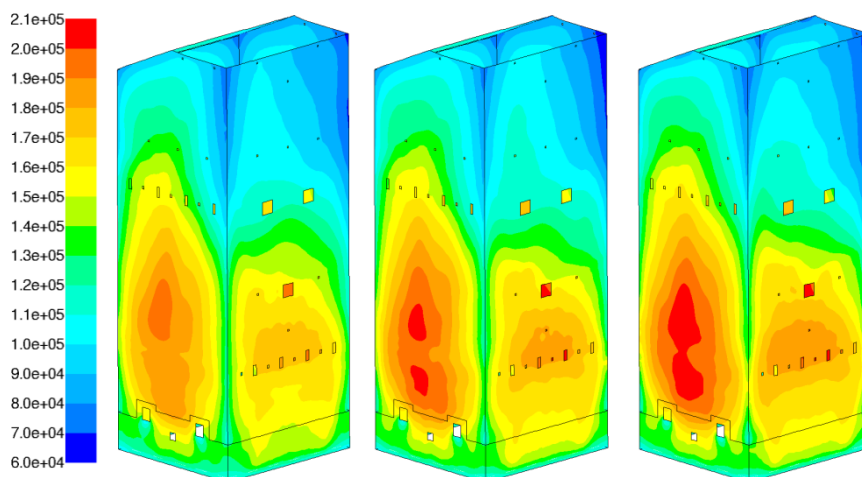
Kuva 4.23. Toiselle päivälle laskettujen tapauksen keskiarvotettujen NO-konsentraatioiden korkeudesta tulipesässä.

Tulipesän alaosissa yhteenlasketut NH_3 - ja HCN -konsentraatiot ovat suurempia alkuperäisessä tapauksessa kuin tapauksissa 1 ja 5 molempina päivinä. Koska lämpötila on matalampi tulipesän alaosissa alkuperäisessä tapauksessa, NH_3 - ja HCN reagoivat NO :ksi hitaammin. Ylempänä tulipesässä konsentraatiot ovat hyvin pieniä eikä niiden välillä ole merkittäviä eroja. Tapausten 1 ja 5 NH_3 - ja HCN -konsentraatioiden väliset erot riippuvat päivästä ja korkeudesta.

4.4.3 Muut vaikutukset tulipesässä

Kuonaantumismallin käyttö vaikuttaa jonkin verran myös muihin tulipesän olosuhteisiin. Tässä luvussa käsitellyt havainnot pätevät tapauksiin 1, 2 ja 5 molempina päivinä. Toisena päivänä erot tapausten välillä ovat keskimäärin suuremmat kuin ensimmäisenä, mikä johtuu suuremmasta seinille tarttuvien partikkelien määrästä. Vaikutukset ovat molempina päivinä suurimmat tapaukselle 2, jossa $\dot{m}_{cr}'' = 0,1 \text{ g/s/m}^2$. Toiseksi suurin vaikutus on tapauksen 5 mallilla, jossa kerrostuman paksuudet on määritelty ennalta. Pienimmät erot ovat tapauksen 1 ja alkuperäisen tapauksen välillä. Tämä järjestys pätee myös luvussa 4.4.1 vertailuille kaasun keskilämpötiloille. Varsinkin ensimmäisenä päivänä erot alkuperäisen ja muiden tapausten välillä ovat kuitenkin melko pienet. Tapauksia 3 ja 4 ei tarkasteltu tarkemmin.

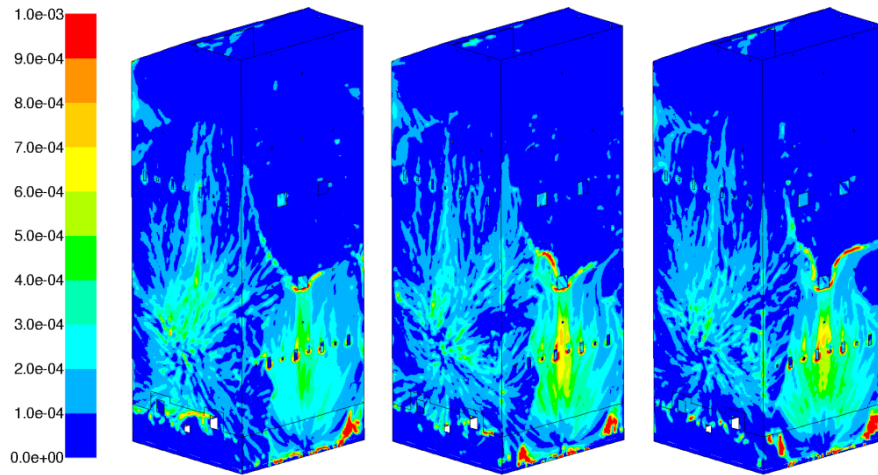
Seinille tulevan säteilyn määrä kasvaa kaikissa tapauksissa varsinkin tulipesän alaosissa. Pinnan lämpötilan ja emissiviteetin kasvaessa myös seinän emittoiman säteilyn määrä kasvaa, joten kasvava tulevan säteilyn määrä ei tarkoita tehokkaampaa kokonaislämmönsiirtoa. Säteilymäärän kasvamista on havainnollistettu kuvassa 4.24. Seinän lämpötilan noustessa seinän ja kaasun väliset lämpötilaerot pienentyvät ja konvektion merkitys pienenee. Alkuperäisessä tapauksessa ensimmäisenä päivänä säteilylämmönsiirron osuus kokonaislämmönsiirrosta on 86 %. Tapauksessa 1 osuus on 87 % ja tapauksessa 5 91 %. Toisena päivänä vastaavat luvut ovat 86, 88 ja 93 %.



Kuva 4.24. Höyrystimen seinille tuleva säteily (W/m^2) 1. päivän alkuperäisessä tapauksessa (vasen), tapauksessa 1 (keskimmäinen) sekä tapauksessa 5 (oikea).

Lämpötilan nousu vaikuttaa myös palamiseen. Seinien lämpötilan noustessa koksien palamisnopeus seinien lähistöllä kasvaa, mitä on havainnollistettu kuvassa 4.25. Tämä

näkyvyyttä selvimmin alueilla, joilla seinät ovat kuumimmat eli sekundääri-ilmojen alapuolella etu- ja takaseinillä.



Kuva 4.25. Koksen palamisnopeus (kg/s/m^3) höyrytimen seinillä 1. päivän alkuperäisessä tapauksessa (vasen), tapauksessa 1 (keskellä) sekä tapauksessa 5 (oikea).

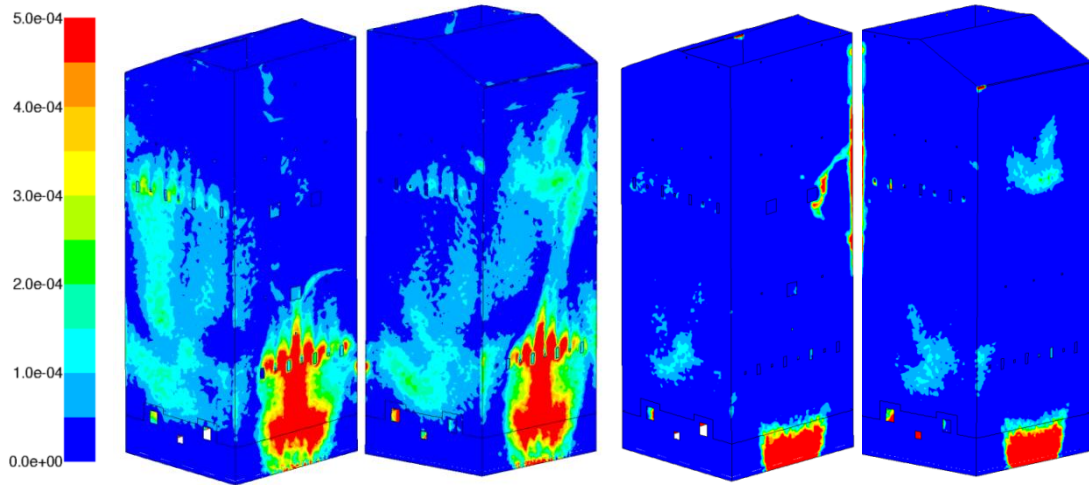
Kuonaantumismallin käytön vaikutukset eri kaasujen konsentraatioihin ovat pieniä. Joitakin eroja on esimerkiksi happipitoisuuksissa, mutta selvästi erottuvia trendejä on vaikea huomata. Häkäpitoisuuksissa tulipesän yläosissa on kuitenkin jonkin verran eroja. Alkuperäisessä tapauksessa konsentraatiot ovat suurempia kuin tämän työn malleilla lasketuissa tapauksissa. Tämä johtuu todennäköisesti kuonaantumismallin nostamista tulipesän alaosan lämpötiloista. Taulukkoon 4.2 on koottu alkuperäisen tapauksen sekä tapauksien 1 ja 5 savukaasujen CO-konsentraatiot.

4.4.4 Kuonaantumisen vaikutus partikkelien tarttumiseen

Koska partikkelien tarttuminen luvussa 4.1 on laskettu alkuperäiselle tapaukselle, jossa seinien lämpötila on vakio eikä kuonaantumista ole otettu huomioon, eivät tulokset täysin vastaa tuloksia, jotka saadaan tapauksesta, jossa kuonaantuminen on otettu huomioon. On hyvä selvittää, kuinka suuren eron partikkelien tarttumiseen kuonaantumisen huomioonottaminen aiheuttaa, koska muuttuvat höyrystinpinnan ja kaasun lämpötilat vaikuttavat partikkelien tarttumiseen. Näillä voi olla vaikutusta myös muihin suureisiin, kuten partikkeliratoihin ja partikkelien palamiseen, jotka vaikuttavat siihen, mihin partikkelit osuvat ja tarttuvat. Partikkelien tarttuminen kuonaantuneelle seinälle on laskettu tapaukselle 1 Weberin lukuun ja T_{15} -lämpötilaan perustuvalla mallilla. Päivän 1 tulokset on esitetty kuvassa 4.26 ja päivän 2 kuvassa 4.27.

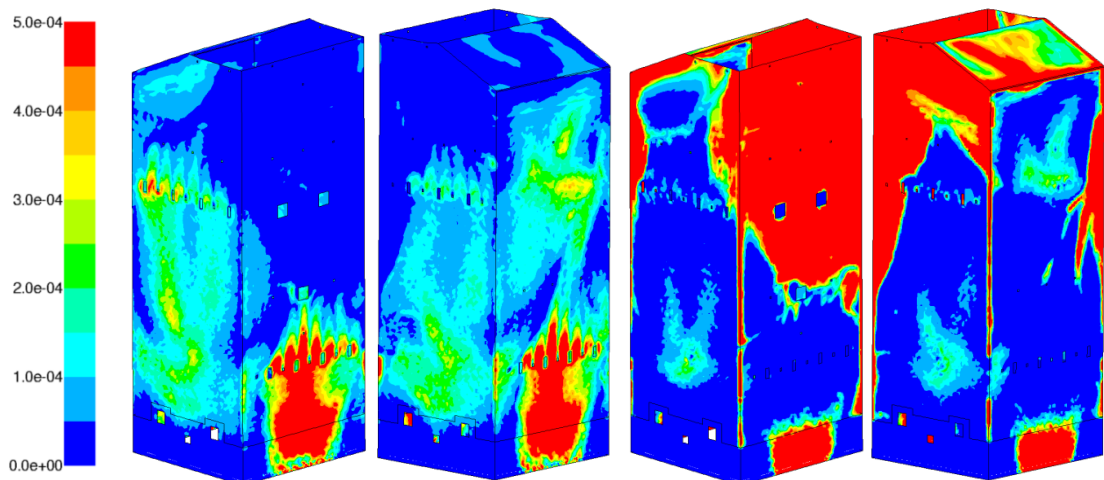
Kuonaantumisella on hyvin pieni vaikutus partikkelien tarttumiseen pelkän kuoren tapauksessa. Kuvien 4.26 ja 4.1 välillä on vain pieniä eroja. Tapauksissa on laskettu äärellinen määrä partikkeliratoja, minkä vuoksi aivan pieniä eroja partikkelien jakaumissa ei kannata vertailla. Heijastumista tapahtuu vähemmän sivuseinillä sekundääri-ilman korkeudella sekä sekundääri- ja tertiääri-ilma-aukkojen alueella verrattuna tapaukseen, jossa kuonaantumista ei ole mallinnettu. Höyrystinpintojen lämpötila on ku-

van 4.10 perusteella tapauksessa 1 suurimmaksi osaksi alle kuoren T_{15} -lämpötilan, joten seinät eivät enimmäkseen ole tahmeita.



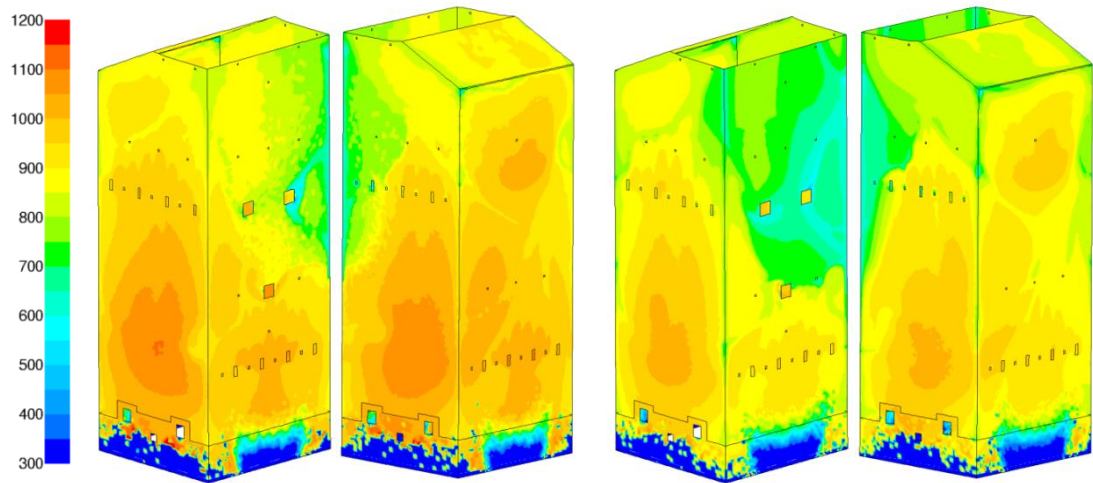
Kuva 4.26. Päivän 1 tarttuneiden (vasen) ja heijastuneiden (oikea) kuoripartikkelien massavirta höyrytimen seinille ($\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$), kun kuonaantuminen on otettu huomioon. Kuvien skaala on katkaistu.

Päivän 2 tapauksessa kuonaantumisella on suurempi vaikutus partikkelien tarttumiseen. Tämä johtuu suuremmista tarttuvien partikkelien määristä, matalammista tulipesän lämpötiloista sekä lietteen korkeasta T_{15} -lämpötilasta. Pienikin kaasun lämpötilajakauman muutos siirtää rajaa, jonka kohdalla seinään osuvien lietepartikkelien lämpötila on liian alhainen tarttumiseen. Kuvien 4.27 ja 4.2 perusteella erot tarttuneiden partikkelien määrässä ovat kuitenkin pieniä ja erot ovatkin paremmin nähtävissä heijastuneiden partikkeleiden määrässä. Kuvien mukaan raja, jossa lietepartikkelien lämpötila laskee liian matalaksi tarttumiseen, siirtyy ylemmäksi tulipesässä. Lisäksi etuseinällä on alkuperäisessä mallissa sekundääri-ilman korkeudella kohta, jossa heijastuu paljon lietepartikkeleita niiden matalien lämpötilojen vuoksi. Kuitenkin kuonaantumisen huomioonotavassa mallissa seinän lämpötilat ovat tällä alueella nousseet T_{15} -lämpötilan yläpuolelle, joten heijastumista ei tapahdu.



Kuva 4.27. Päivän 2 tarttuneiden (vasen) ja heijastuneiden (oikea) kuori- ja lietepartikkelien massavirta ($\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$), kun kuonaantuminen on otettu huomioon. Kuvien skaala on katkaistu.

Seinään osuvien partikkelien lämpötilat (kuva 4.28) ovat jonkin verran korkeammat kuonaantumisen huomioonottavassa tapauksessa kuin alkuperäisessä tapauksessa (kuva 4.4). Tämä näkyy varsinkin tulipesän alaosissa, missä kuonaantumista tapahtuu eniten ja kaasun lämpötila on korkeampi kuin alkuperäisessä tapauksessa.



Kuva 4.28. Päivien 1 (vasen) ja 2 (oikea) seinään osuvien partikkelien massakeskiarvotettu lämpötila ($^{\circ}\text{C}$), kun kuonaantuminen on otettu huomioon.

Tapausten 2 ja 5 mallit vaikuttavat partikkelien tarttumiseen todennäköisesti enemmän kuin tapaus 1, koska mallien vaikutus kaasun lämpötilaan ja muihin olosuhteisiin on suurempi. Erot ovat todennäköisesti kuitenkin niin pieniä, etteivät ne vaikuta siihen, mille alueille partikkeleita tarttuu eniten. Tämän luvun tulosten perusteella ei ole suurta merkitystä, lasketaanko partikkelien tarttuminen seinälle ilman mallinnettua kerrostumaa vai seinälle, jolle on mallinnettu kerrostuma.

4.5 Mallien soveltaminen toiseen kattilaan

Mallien toimivuuden testaamiseksi partikkelien tarttuminen ja kuonaantumisen vaikutus lämmönsiirtoon laskettiin Rauman kattilan lisäksi myös toiselle saman kokoluokan BFB-kattilalle. Tapaus on luottamuksellinen, joten siitä ei voi kertoa tarkkoja tietoja. Kuonaantumisen mallintamisen tärkeimmät tulokset kuitenkin esitetään. Tälle kattilalle on havaintoja siitä, millä alueilla höyrystimen seinillä on kerrostumia.

Kattilassa poltetaan biomassan ja turpeen seosta, jossa turpeen massaosuus on noin 10 %. Biomassojen korkean alkalipitoisuuden vuoksi ja koska vain pieni osa polttoaineesta on turvetta, oletetaan biomassan aiheuttavan kaikki kattilan kuonaantumisongelmat. Skrifvarsin et al. (1998) mukaan turpeen tuhka sulaa vain vähän tulipesän lämpötiloissa. Yleisesti turvetta pidetään melko ongelmattomana polttoaineena kuonaantumisen kannalta. Joissakin tapauksissa kuonaantumisongelmia kuitenkin esiintyy (Heikkinen et al. 1998).

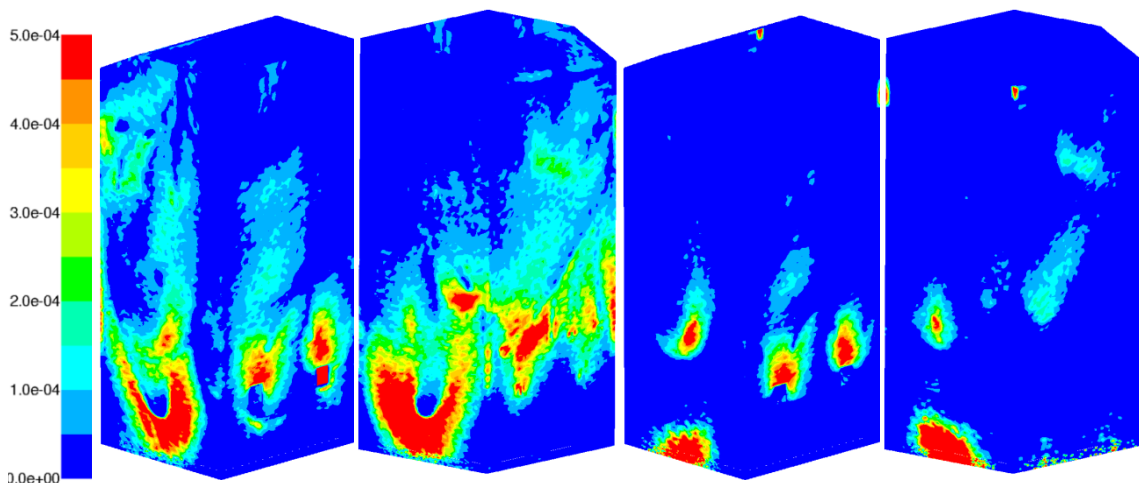
4.5.1 Partikkelien tarttuminen

Partikkelien tarttumismalli on käytössä vain biomassapartikkeleille. Turvepartikkelin osuessa seinään sen oletetaan heijastuvan aina. Biomassapartikkelin tarttumiskriteerinä käytetään T_{15} -lämpötilaan ja Weberin lukuun perustuvaa mallia. Tarkempien tietojen puuttuessa T_{15} -lämpötilalle käytetään samaa arvoa kuin Rauman tapauksessa kuorelle.

Tulipesästä tehtyjen havaintojen mukaan alueet, joista löytyy kerrostumia, ovat takaseinällä sekundääri-ilman taso sekä etuseinällä sekundääri- ja tertiääri-ilmojen välinen alue. Kuonaantumista tapahtuu eniten takaseinällä. Sivuseinistä vasemmalla seinällä tapahtuu enemmän kuonaantumista kuin oikealla.

Kuvassa 4.29 on esitetty biomassapartikkelien tarttuminen höyrystinpinnoille ja heijastuminen niiltä. Mallin mukaan pahimmin kuonaantuneet alueet ovat sivuseinillä muurauksen alue sekä etu- ja takaseinillä höyrystimen alaosa. Takaseinällä partikkeleita tarttuu ylempänäkin paljon. Nämä alueet osuvat osittain päällekkäin niiden alueiden kanssa, joissa kattilassa on havaittu olevan kerrostumia. Korkeudet, joilla partikkeleita tarttuu, vastaavat suunnilleen havaintoja. Takaseinälle tarttui havaintojen mukaan eniten partikkeleita, minkä malli myös ennustaa hyvin jos muurauksen aluetta kattilan alaosassa ei oteta huomioon. Simulointien mukaan vasemmalla seinällä partikkelit tarttuvat laajemmalle alueelle kuin oikealla. Partikkelien lämpötilat ovat tässäkin tapauksessa niin suuria, että ne ylittävät kuoren T_{15} -lämpötilan lähes koko höyrystimen alueella, joten heijastumista aiheuttaa pääosin korkea Weberin luku.

Tuhkan sulamiskäyttäytymistä ei laskettu tälle tapaukselle erikseen vaan simuloinnissa käytettiin Rauman tapaukselle määritettyä kuoren T_{15} -lämpötilaa. Rauman tapauksen T_{15} -lämpötila oli melko alhainen kuoren tuhkan korkean piipitoisuuden vuoksi. Sen vuoksi tälle tapaukselle testattiin T_{15} -lämpötilan nousun vaikutusta. Tarttumista tarkasteltiin käyttämällä T_{15} -lämpötilaa 900 °C . Tämä ei vaikuta tuloksiin muutoin kuin vähentämällä tarttumista aivan höyrystimen yläosassa. Seinille osuvien partikkelien lämpötilat ovat yli 900 °C lähes koko tulipesän alueella.



Kuva 4.29. Tarttuvien (vasen) ja heijastuvien (oikea) biomassapartikkelien massavirta höyrystimen seinillä (kg/s/m^2) toisessa simuloitavassa kattilassa, kun käytetään kuoren T_{15} -lämpötilaa. Kuvien skaala on katkaistu.

Tarttumista testattiin myös lämpötilalla $T_{15} = 1000$ °C. Tällöin tarttuminen väheni selvästi muurauksen alueella ja höyrystimen yläosissa. Alueet, joilla kuonaantumista tapahtuu eniten, pysyivät kuitenkin samoina. Jos T_{15} -lämpötilat ovat selvästi kaasun lämpötiloja matalampia, ei malli ole herkkä sulamislämpötilojen vaihteluille. Kun T_{15} -lämpötila lähestyy kaasun lämpötilaa, vaikutus on selvästi suurempi. Siksi olisi hyvä määritellä polttoaineen sulamiskäyttäytyminen tapauskohtaisesti.

4.5.2 Kuonaantumisen vaikutus lämmönsiirtoon

Kuonaantumismallin toimivuuden testaamiseksi tarkasteltiin tällekin tapaukselle kuonaantumisen vaikutusta lämmönsiirtoon. Tarkastelu tehtiin määrittämällä kuonakerroksen lämpötila käyttäen kriittisen massavirran arvoa $0,5 \text{ g/s/m}^2$, eli taulukon 4.1 tapausta 1. Tapauksessa 2 oli Rauman kattilassa ongelmia, joten se jätettiin pois tästä tarkastelusta. Tarkastelu tehtiin myös tapaukselle 5 käyttämällä samoja kerrostuman paksuuksia samoilla tarttuvien partikkelien massavirroilla kuin Rauman tapauksessa. Rauman mittauksiin perustuvia paksuuksia käytetään, koska todellisesta tilanteesta tässä kattilassa ei ole tietoa. Kokonaislämmönsiirto pidetään alkuperäistä tapausta vastaavassa arvossa emissiviteettiä säätämällä. Alkuperäisessä tapauksessa emissiviteetti on 0,6. Tuloksia ei esitetä kuvina, mutta tärkeimmät havainnot esitetään kirjallisesti.

Tapaus 1 antaa jopa 1100 °C seinien lämpötilaksi alueilla, joilla partikkeleita tarttuu seinille yli $0,5 \text{ g/s/m}^2$. Lämpövirran tiheys on näillä alueilla lähellä nollaa. Muualla lämpötilat pysyvät enimmäkseen 700 °C alapuolella ja lämmönsiirto pienenee vain vähän. Etuseinällä ja oikealla seinällä on laajoja alueita, joille tarttuu vain vähän partikkeleita. Näillä alueilla lämmönsiirto on hieman tehokkaampaa kuin alkuperäisessä tapauksessa korkeamman emissiviteetin vuoksi. Erot lämpövirtojen tiheyksissä ovat enimmäkseen pieniä. Tapauksessa 1 emissiviteetti on 0,66, joka on vain vähän suurempi kuin alkuperäisessä tapauksessa, joten voi päätellä, ettei mallilla ole suurta vaikutusta lämmönsiirtoon. Tämä vastaa Rauman tuloksista tehtyjä havaintoja.

Tapauksessa 5 kerrostuman paksuudet ovat suurimmillaan höyrystimen alaosissa, missä kuonaantuneen pinnan lämpötilat ovat jopa 1000 – 1100 °C. Muilla alueilla seinän lämpötilat ovat matalampia, mutta korkeampia kuin tapauksessa 1. Tapauksessa 5 lämpövirran tiheydet eroavat selvästi alkuperäisestä tapauksesta. Lämpövuot ovat pienimmillään, kun tarttuvien partikkelien massavirta ylittää $0,5 \text{ g/s/m}^2$ eli kerrostuman paksuus on 2 cm. Alueilla, joilla käytetään 5 mm kerrostuman paksuutta lämpövuot pienenevät vain hieman alkuperäiseen verrattuna. Käytettäessä 1 mm kerrostuman paksuutta hitaasti kuonaantuvilla alueilla korkea emissiviteetti antaa korkeampia lämpövirran tiheyksiä verrattuna alkuperäiseen tapaukseen. Emissiviteetin arvo on $0,9$, mikä on emissiviteetin yläraja. Kokonaislämmönsiirto jääkin 2 % pienemmäksi kuin alkuperäisessä tapauksessa, minkä perusteella käytetyt kerrostuman paksuudet ovat liian suuria.

Tulipesän vaakatasojen keskiarvotettuja lämpötiloja verrattiin eri malleille. Tässäkin tapauksessa kuonaantumismalli nostaa tulipesän alaosan lämpötiloja. Tapaus 5 antaa korkeimmat lämpötilat koko tulipesän alueella, mutta lämpötilaero sen ja alkuperäisen

tapauksen välillä kuitenkin pysyy suurimmillaankin 40 °C alapuolella ja on keskimäärin 20 °C. Lämpötilaeroa kasvattaa hieman se, että kokonaislämmönsiirto ei aivan saavuta tapauksessa alkuperäistä arvoa. Tapaus 1 antaa alkuperäistä tapausta korkeammat lämpötilat vain tulipesän alaosissa. Suurimmillaan ero alkuperäiseen tapaukseen on 15 °C, mutta keskimäärin se on vain noin 5 °C. Näiltäkin osin tulokset vastaavat Rauman tuloksia.

5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Edellisessä luvussa esitettiin laskettujen tapausten tulokset. Tässä luvussa vertaillaan ja tulkitaan tuloksia sekä tehdään niistä johtopäätöksiä. Tarkasteltavana ovat myös tuloksiin vaikuttavat eri tekijät ja virhelähteet sekä mallien käyttökelpoisuus muissa laskentatapauksissa. Tarkastelu jaetaan partikkelien tarttumismallin ja kuonaantumisen mallintamisen vaikutuksiin. Lopuksi pohditaan, miten mallinnustyötä voisi jatkaa tästä eteenpäin.

5.1 Partikkelien tarttumisen tarkastelu

Partikkelien tarttumismallin tuloksiin vaikuttavat tuhkan sulamislämpötilat, tuhkan muodostuminen ja kulkeutuminen seinille sekä tulipesän olosuhteet. Tuhkapartikkelien tarttumista seinille on tutkittu paljon eri kattiloissa, mutta tapausten välinen vertailu on vaikeaa niiden erilaisuuden vuoksi. Tarttumismallin tulokset eivät juuri eroa toisistaan tässä työssä lasketuissa tapauksissa kuoren tuhkan matalan sulamislämpötilan vuoksi. Koska kuoren tuhkan T_{15} -lämpötila ylittyy lähes kaikkialla tulipesässä, useimmat höyrystimen alueella seiniin osuvat partikkelit tarttuvat. Poikkeus tälle on alkuperäistä vähemmän piitä sisältävä kuori. Sen T_{15} -lämpötila on niin korkea, ettei partikkeleita tartu juuri lainkaan. Lietteen tuhka sulaa korkeammissa lämpötiloissa kuin kuoren, mutta tällä ei ole suurta merkitystä lietteen pienen massavirran vuoksi.

Toisen mallinnetun kattilan tulokset vastaavat kattilassa tehtyjä havaintoja eniten kuonaantuvista alueista kohtalaisen hyvin. Tämän perusteella voi olettaa T_{15} -lämpötilaan ja Weberin lukuun perustuvan tarttumismallin toimivan tyydyttävästi tarkasteltaessa vain kuonaantumisongelmien sijaintia eikä tarttuvien partikkelien massavirran suuruutta. Rauman kattilasta on vaikea tehdä samanlaisia vertailuita mittauspisteiden pienen määrän vuoksi.

5.1.1 Eri tarttumismallien vertailu

Tuhkapartikkelien tarttumista seinille voi tarkastella monella eri menetelmällä, joista useimpien perustana on tuhkan muuttuminen tahmeaksi lämpötilan noustessa. Tässä työssä tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella on kuitenkin vaikea sanoa, mikä menetelmä on paras. Biomassoille kehitetty ja niille eniten käytetty T_{15} -menetelmä antaa tässä työssä käsitellyille polttoaineille niin matalat sulamislämpötilat, että suurin osa seinille osuvista partikkeleista tarttuu. Kuonaantumista siis tapahtuu siellä, missä partikkeleita osuu seinille. Yleisesti eniten käytetty menetelmä eli tuhkan viskositeettiin perustuva

tarttumiskriteeri on taas kehitetty hiilille ja sitä on sovellettu biomassoille vain vähän, joten sitä ei käytetä tässäkään työssä.

T_{15} -menetelmä perustuu kokeellisiin tuloksiin biomassan tuhkan tahmeudesta. Kirjallisuudesta on vaikea löytää korrelaatioita T_{15} -lämpötiloille ja valmiita arvoja on olemassa vain joillekin polttoaineille. Sulamislämpötilat riippuvat tuhkan tarkasta koostumuksesta, joka voi vaihdella vuodenajan ja kasvupaikan mukaan. Tasapainolaskut ottavat koostumuksen huomioon, joten ne ovat siten valmiita arvoja ja korrelaatioita parempia. Tuhka ei kuitenkaan välttämättä ehdi reagoida tasapainoon asti. Myös epätarkkuudet tuhkan koostumuksessa, kuten polttoaineen mukana kulkeutuva hiekka, voivat vaikuttaa tuloksiin. Tällä hetkellä termodynaamista tasapainoanalyysiä voi kuitenkin pitää melko hyvänä menetelmänä tuhkan tahmeuden määrittämiseen tällaisessa mallinnuksessa. Se vie suhteellisen vähän aikaa verrattuna kokeellisiin mittauksiin ja ottaa tuhkan koostumuksen huomioon paremmin kuin kirjallisuudesta löydetty korrelaatiot ja valmiit arvot.

Jotta nähtäisiin kuinka paljon viskositeettiin perustuva tarttumismalli eroaa T_{15} -lämpötilaan perustuvasta mallista, verrataan sekä kuoren että lietteen tuhkan viskositeetin lämpötilariippuvuutta tuhkan sulaneeseen osuuteen. Viskositeetit laskettiin Urbainmallilla (kaavat (37)-(47)). Liete muuttuu tahmeaksi korkeammissa lämpötiloissa kuin kuori sekä viskositeetin että T_{15} -lämpötilan perusteella. Jos tarttumista tarkasteltaisiin viskositeetin avulla ja käytettäisiin yleisimpiä kriittisen viskositeetin arvoja 10^4 Pa*s tai 10^5 Pa*s, malli ennustaisi tarttumista vielä matalammassa lämpötiloissa kuin T_{15} -lämpötilaan perustuva malli. Viskositeetti 10^5 Pa*s esiintyy kuorella jo 611 °C ja lietteellä 778 °C lämpötilassa. Arvo 10^4 Pa*s taas esiintyy kuorella 707 °C ja lietteellä 885 °C lämpötilassa. Käytettäessä viskositeetista riippuvaa tarttumistodennäköisyyttä (kaava (6)) partikkeleita tarttuu jonkin verran jo kriittistä viskositeettia korkeammilla viskositeeteilla. Kriittisen viskositeetin arvon valinnalla on hyvin suuri merkitys tuloksiin. Viskositeetin etu T_{15} -lämpötilaan verrattuna on valmiiden koostumuksesta riippuvien korrelaatioiden olemassaolo, mutta niitä ole sovitettu biomassoille, joten ne voivat antaa kaukana todellisuudesta olevia tuloksia. Tämän sovelluksen kannalta ei kuitenkaan juuri ole merkitystä, käytetäänkö tarttumiskriteerinä T_{15} -lämpötilaa vai viskositeettia, koska tulipesän lämpötiloissa partikkelit ovat molempien menetelmien mukaan enimmäkseen tahmeita. Yleisiä johtopäätöksiä on kuitenkin mahdoton tehdä vain kahden polttoaineen perusteella.

Tarttumismallit voidaan myös jakaa probabilistisiin malleihin, joissa määritellään tuhkan sulamisasteesta tai viskositeetista riippuva partikkelin tarttumistodennäköisyys, sekä deterministisiin malleihin, joissa tarttumiseen riittää tarttumiskriteerien toteutuminen eli esimerkiksi T_{15} -lämpötilan tai kriittisen viskositeetin lämpötilan ylittyminen ja kineettiseen energiaan liittyvän kriteerin toteutuminen. Tässä työssä käytetty probabilistinen ja deterministinen malli eivät kuitenkaan juuri eroa toisistaan tarttuneiden partikkelien massavirtaa tarkasteltaessa. Vaikka lineaarisesti sulamisasteesta riippuvassa mallissa heijastumista tapahtuu paljon enemmän, partikkelit tarttuvat kuitenkin lopulta sa-

moille alueille. Siten ainakaan tässä tapauksessa ei ole merkitystä, kumpaa mallia käyttää.

Sulamiskäyttäytymisen vaihtelu ilmakertoimen mukaan ei tässä työssä lasketuissa tapauksissa vaikuta partikkelien tarttumiseen, koska sulamislämpötilat ovat kaikilla ilmakertoimilla hyvin matalia. Ilmakerroin on kuitenkin tekijä, jolla saattaa olla suuri merkitys partikkelien tarttumiseen jossakin toisessa tapauksessa, koska ilmakerroin voi vaikuttaa T_{15} -lämpötilaan paljon. Paikallinen ilmakerroin, joka vaihtelee nollan ja hyvin suurten arvojen välillä on vaikea ottaa huomioon, koska partikkeli todennäköisesti kulkee sekä yli- että ali-ilmaisilla alueille, mutta ei välttämättä ehdi reagoida tasapainotilanteeseen. Tulipesän jakaminen osiin kumulatiivisen ilmakertoimen perusteella antaa kuitenkin jonkinlaisen approksimaation todellisesta tilanteesta. Jaon voi tehdä useampaankin osaan kuin tässä työssä on tehty sen mukaan, kuinka monelta tasolta ilmaa syötetään. Ilmakertoimen vaikutuksen voisi myös ottaa huomioon jakamalla tulipesän seinät ali- ja yli-ilmaisiin alueisiin, jotka määräytyvät seinän viereisen paikallisen ilmakertoimen perusteella. Kuvan 3.3 perusteella tällainen jako olisi hyvin selkeä, koska rajat selvästi yli-ilmaisten ja selvästi ali-ilmaisten alueiden välillä ovat jyrkät. Sulamiskäyttäytymistä voisi tällöin tarkastella kahdella ilmakertoimella, joista toinen olisi nolla ja toinen selvästi yli yksi.

5.1.2 Tuhkan muodostumisen ja kulkeutumisen mallintamisen ongelmat

Koska varsinkin kuoren T_{15} -lämpötila on matala ja Weberin luku rajoittaa tarttumista vain pienillä alueille, mallin mukaan lähes kaikki seinään osuvat kuoripartikkelit tarttuvat. Lietepartikkeleita heijastuu paljon höyrystinalueen yläosissa, mutta suuremman massavirtansa takia kuoren käyttäytyminen määrää pahimmin kuonaantuvat alueet toisenakin päivänä. Partikkeliratojen laskenta siis määrää pitkälti, missä kuonaantumista mallinnetaan tapahtuvan. Ratojen laskentaan ei tässä työssä kuitenkaan ole vaikutettu muuten kuin poistamalla seinille tarttuvat partikkelit laskennasta. Tulipesän alaosissa tapahtuva kuonaantuminen määrää osittain ylempänä tarttuvien partikkelien määrän. Jos tulipesän alaosissa tarttuu paljon partikkeleita, ylempänä niitä iskeytyy seinille vähemmän.

Tuhkapartikkelien tarkempi mallintaminen vaatii tietoa siitä, mitä tuhkalta tapahtuu palamisen aikana. Verrattaessa mallinnettujen partikkelien tiheyksiä biomassan lentotuhkan tiheyteen on epätodennäköistä, että tuhkapartikkelin halkaisija on todellisuudessa alkuperäisen polttoainepartikkelin halkaisijan suuruinen vielä palamisen jälkeenkin, mikä oli eräs tämän työn oletuksista. Tiheydellä ja halkaisijalla on vaikutusta partikkeliratoihin ja Weberin lukuun. Suuremmilla tiheyksillä ja pienemmillä halkaisijoilla partikkelit saattaisivat osua seinille eri alueille kuin nykyisellä mallilla. Koska massa on verrannollinen halkaisijan kolmannen potenssin ja tiheyden tuloon, mutta Weberin luku sen sijaan halkaisijan ja tiheyden tuloon, nostaisi tiheyden kasvaminen massan pysyessä vakiona Weberin luvun arvoja, mikä lisäisi partikkelien heijastumista.

Tämän työn tarkastelusta puuttuu kokonaan mikrometrin kokoluokan ja sitä pienemmät partikkelit, joita syntyy muun muassa haihtuneen tuhkan kondensoituessa ja

partikkelien fragmentoituuessa. Näiden partikkelien kerrostumisessa merkittäviä mekanismeja ovat iskeytymisen lisäksi termoforeesi ja kondensaatio. Partikkelin tarttumiseksi näillä mekanismeilla tuhkan ei tarvitse olla tahmeaa, joten kerrostumia syntyy myös alueilla, joilla iskeytyvät partikkelit ovat T_{15} -lämpötilaa kylmempiä. Kerrostuvien partikkelien kokonaismassavirtaan on kondensaatiolla ja termoforeesilla tutkittu olevan vain pieni merkitys, joten pienten partikkelikokojen huomioimatta jättäminen ei aiheuta suurta virhettä kuonaantumisenopeuteen tulipesän säteilyosassa.

Jos otetaan huomioon tuhkan höyrystyminen, jäljelle jäävän partikkelin massa pienenee. Muutos ei ole suuri, mutta kuonaantumisenopeus saattaa hieman pienentyä pienempien partikkelien seurattessa paremmin kaasun virtausta. Höyrystyvä tuhka muodostaa kondensoituessaan tarkastelusta nyt puuttuvia pieniä partikkeleita. Tuhkan höyrystyminen voidaan ottaa huomioon käyttämällä termodynaamisia tasapainolaskuja, joiden avulla voi selvittää höyrystyneen ja kiinteäksi tai nesteeksi jäävän tuhkan koostumuksen ja massan eri lämpötiloissa ja ilmakertoimilla.

Myös tuhkapartikkelien fragmentaatiolla ja agglomeraatiolla on merkitystä partikkeliratoja laskettaessa. Lähestymistapa, jossa oletetaan, että partikkeli ei hajoa, yliarvioi kuonaantumisenopeuden, koska partikkelien hajotessa syntyvät pienemmät partikkelit seuraisivat paremmin kaasun virtausta. Toisaalta agglomeraatio tekee partikkeleista suurempia, mikä saattaisi lisätä partikkelien tarttumista.

5.1.3 Muut tarttumismallin ongelmat

Partikkelin tahmeuden tarkastelussa ei oteta huomioon siinä jäljellä olevaa palamatonta koksia. T_{15} -lämpötilassa tuhkasta on sulanut 15 %. Sulaneen tuhkan massa voi kuitenkin olla paljon pienempi osuus partikkelin kokonaismassasta, jos palamaton koksi otetaan huomioon. Jos oletetaan, että koko partikkelista on oltava sulanut 15 %, on tunnettava tuhkan sulamiskäyrä. Esimerkiksi tapauksessa, jossa tuhkaa ja koksia on partikkelissa yhtä paljon, vastaa 15 % sulanutta osuutta lämpötila, jossa tuhkasta on sulanut 30 %. Lin et al. (2010) mukaan hiilen palaessa partikkelit muuttuvat tahmeiksi, kun koksista on palanut 88 %. Tämän uskotaan perustuvan siihen, että koksien määrän pienentyessä partikkelin pinnasta suurempi osa koostuu tahmeasta tuhkasta. Vastaavia tutkimuksia biomassan poltosta ei löytynyt, mutta käyttäytyminen saattaa erota haihtuvien aineiden suurten pitoisuuksien ja tuhkan erilaisen rakenteen vuoksi.

Jos höyrystinpinnoille päätyy paljon koksia, se palaa todennäköisesti ainakin osittain seinällä. Tämän huomioonottaminen muuttaisi tulipesän lämpötilajakaumaa ja pienentäisi seinillä olevan kerrostuman massaa. Toisaalta seinien lämpötilojen mittauksissa ei havaittu niin korkeita lämpötiloja, joita koksien palaminen todennäköisesti aiheuttaisi. Kuonassa oleva hiili voi myös palaa kerrostumien irrottua seiniltä.

Vaikka kuoren tarkka koostumus on mitattu, on sen piipitoisuudesta epäselvyyttä. Jos oletetaan tuhkan piipitoisuus puolet pienemmäksi, mikä vastaisi normaalia kuoren piipitoisuutta, ei pelkän kuoren tapauksessa kuonaantumista tapahtuisi juuri ollenkaan. Seinien lämpötilojen mittausten mukaan kaikilla höyrystimen pinnoilla on kuitenkin jonkinlainen kerrostuma. Näiden syntyperää ei kuitenkaan tunneta, koska käytetyt polt-

toainekoostumukset olivat käytössä vain mittauspäivinä eikä kattilassa aiemmin poltetuista polttoaineseoksista ole tarkempaa tietoa. Lisäksi kerrostumia voi aiheuttaa muut mekanismit, kuten termoforeesi ja kondensaatio, joita ei tässä työssä ole otettu huomioon. Muokattu koostumus saattaisi siis olla lähellä todellista koostumusta ja T_{15} -lämpötila selvästi laskettua korkeampi. Tällöin mallinnetuista polttoaineista vain liete aiheuttaisi kuonaantumista, mikä muuttaisi myös käytettyjen reunaehtojen vaikutusta. Mallinnuksessa käytettyä T_{15} -lämpötilaa korkeampaan todelliseen T_{15} -lämpötilaan viittaa myös se, että pedin lämpötilan oletetaan olevan 800 °C, jolloin nykyisellä mallilla pedissä olevasta tuhkasta olisi sulanut noin 25 %, jolloin kuonaantumisen lisäksi myös petipartikkelien agglomeraatio olisi ongelma.

Kemiallista fraktionaatiota on joissakin tutkimuksissa käytetty selvittämään, mikä osa tuhkasta on maa-ainesta ja hiekkaa, joka joutuu polttoaineen sekaan prosessoinnin aikana. Muellerin et al. (2003) mukaan ulkopuolinen aines ei pääse reagoimaan tuhkan kanssa palamisen aikana, joten sitä on tarkasteltava erillisenä muusta tuhkasta. Toisaalta Lindströmin et al. (2008) ja (2010) mukaan hiekan sekoittuminen polttoaineen joukkoon lisää kuonaantumista. Asiaa on tutkittu biomassapellettejä polttavassa 20 kW kattilassa sekä kuoren ja metsätähteen poltossa. Kaikissa tutkituissa tapauksissa sekoittunut hiekka lisää kuonaantumista, koska sulanut tuhka reagoi hiekan kanssa, mikä johtaa suurempaan määrään piipitoista sulaa. Seinille syntynyt kuonakerros koostuu sulaneesta tuhkasta ja siihen tarttuneista hiekkapartikkeleista. Leijupoltossa myös petimateriaali on hiekan lähde.

Mallin oletus petiin päätyvien polttoainepartikkelien sisältämän tuhkan pysymisestä pedissä pienentää seinille päätyvän tuhkan määrää, mutta todellisuudessa tuhkan sisältämät haihtuvat komponentit voivat vapautua pedistä ja lopulta päätyä lämmönsiirtopinnoille. Jos tuhkakomponenttien höyrystyminen huomioidaan mallin kehityksen jossakin vaiheessa, voi haihtuvat tuhkakomponentit vapauttaa pedistä samalla periaatteella kuin polttoaineen sisältämät palavat haihtuvat komponentit vapautetaan.

5.1.4 Vertailu muihin tutkimuksiin

Tämän tutkimuksen tuloksia on vaikea verrata muihin tutkimuksiin, koska partikkelien tarttuminen riippuu paljon tulipesän lämpötiloista, ilma-aukkojen sijoittelusta, kattilan geometriasta ja koosta sekä polttoaineesta. Lisäksi biomassan poltosta on julkaistu vain vähän tutkimuksia. Monet tutkimukset käsittelevät kuonaantumisen sijaan tulistinten likaantumista. Tässä kuitenkin verrataan muutamaa samankaltaista biomassan aiheuttamaa kuonaantumista käsittelevää tapausta kirjallisuudesta.

Pahimmin kuonaantuvien alueiden sijaintia on mahdoton verrata muihin tutkimuksiin erilaisten geometrioiden vuoksi. Jopa tässä työssä verrattujen kahden BFB:n välillä on suuret erot erilaisten ilman syöttöjen vuoksi. Muiden tutkimusten antamia kuonaantumisnopeuksia voi kuitenkin jonkin verran verrata, jotta saadaan käsitys tarttuvien partikkelien massavirtojen suuruusluokasta näissä tutkimuksissa. Muissakin biomassan polton aiheuttamaa höyrystimen kuonaantumista käsittelevissä tutkimuksissa tarttuvien

partikkelien massavirta vaihtelee paljon eri puolilla kattilaa. Tästä syystä on ehkä helpointa verrata nopeimmin kuonaantuvien alueiden massavirtoja. Rauman kattilassa näiden alueiden massavirrat ovat $0,5 \text{ g/s/m}^2$ ylä- ja alapuolella. Toisenkin mallinnetun kattilan massavirrat ovat samaa suuruusluokkaa.

Kaerin (2001) tulosten mukaan poltettaessa olkea arinakattilassa suurin kuonaantumisenopeus höyrystimen alueella on melkein kertaluokkaa pienempi kuin tässä työssä. Tarkkaa vertailua on kuitenkin vaikea tehdä tuloksia havainnollistavien kuvien skaalan vuoksi. Petersen (2012) käyttää myös Kaerin mallia oljen arinapoltossa. Tulosten perusteella pahimmin kuonaantuvien alueiden massavirrat ovat samaa suuruusluokkaa kuin tässä työssä. Petersenin työssä kehitetyllä muokatulla Kaerin mallilla massavirrat ovat sen sijaan paljon pienempiä. Oljen polton tiedetään aiheuttavan suuria kuonaantumisongelmiä, minkä perusteella tässä työssä käytettävän mallin pitäisi antaa pienempiä kuonaantumisenopeuksia kuin olkea käsittelevien mallien.

Schulzen et al. (2006) malli antaa myös kertaluokkaa pienempiä kerrostumisnopeuksia pinta-alaa kohden biomassan poltossa, mutta simuloitava kattila on pilottikokoluokkaa. Borellon et al. (2013) malli sen sijaan antaa biomassan poltossa tarttuvien partikkelien massavirraksi enimmillään vain $5 \text{ } \mu\text{g/s/m}^2$, joka on hyvin pieni verrattuna tässä luvussa käsiteltyjen mallien tuloksiin.

Tarttuvien partikkelien massavirrat ovat tässä työssä tarkastelujen perusteella melko suuria verrattuna muihin samankaltaisiin tutkimuksiin. Näissä kirjallisuudesta poimituissa tutkimuksissa tuhkan muodostusta ei kuitenkaan ole mallinnettu polttoainepartikkelin palamisen kautta vaan tuhka on injektoitu tulipesään valmiilla kokojakaumalla. Tällöin partikkelit ovat pienempiä, joten ne seuraavat kaasun virtausta paremmin eikä niissä myöskään ole palamatonta koksia, joka lisää tarttuvien partikkelien massaa tässä työssä.

5.2 Kuonaantumisen vaikutusten mallintaminen

Tässä työssä laskettiin viisi eri tapausta kuonaantumisen vaikutuksista, joista osa laskettiin sekä ensimmäiselle että toiselle päivälle. Näillä tapauksilla on osittain samanlaiset tulokset ja vaikutukset tulipesään. Jonkin verran eroja tapausten välillä kuitenkin on.

Tietoja kuonaantumisesta käytännön tapauksissa on vaikea löytää kirjallisuudesta. Tässä työssä on tulosten oikeellisuutta tarkasteltu seinien lämpötilamittausten ja toisesta mallinnetusta kattilasta tehtyjen havaintojen perusteella. Kovin kattavaa tarkastelua ei näiden avulla kuitenkaan ole mahdollista tehdä.

5.2.1 Laskettujen tapausten vertailu

Kuonaantumisen vaikutusta mallinnettiin viiden eri tapauksen avulla. Tässä luvussa vertaillaan tapauksia 1, 2 ja 5, jotka laskettiin Rauman tapauksessa molemmille päiville. Tapauksia 3 ja 4 käsitellään erikseen luvussa 5.2.2.

Kuonakerroksen lämpövastuksen määrittämiseksi on tunnettava joko kerrostuman paksuus ja lämmönjohtavuus tai kerrostuman pintalämpötila. Jos näistä ei ole mittaustu-

loksia, on tehtävä jonkinlainen lähtöoletus. Tässä työssä lähdettiin liikkeelle oletuksesta, että kerrostuman paksuutta ei tunneta. Kerrostuman oletettiin kasvavan, kunnes pinnalla oleva tuhka alkaa valua pitkin seinää. Tuhka-analyysin mukaan tällaista tilannetta ei tässä sovelluksessa saavuteta tuhkien korkeiden T_{70} -lämpötilojen vuoksi. Tuhkan valumista on kuitenkin onnistuneesti mallinnettu soodakattiloissa (Li et al. 2009) sekä joissakin tapauksissa hiilen kaasutuksessa (Yong & Ghoniem 2012) ja poltossa (Wang et al. 2007).

Tuhkan valumisen sijaan tapauksissa 1-4 oletettiin kerrostuman kasvavan, kunnes se saavuttaa pintaan iskeytyvien partikkelien lämpötilan. Tämä lämpötila on lähellä sitä lämpötilaa, jossa kaasun ja kuonan pinnan välinen lämmönsiirto on nolla. Malli siis olettaa lämmönsiirron olevan hyvin pieni eniten kuonaantuvilla alueilla. Kuonakerros kasvaa joillakin alueilla hitaasti. Näiden alueiden lämpötilojen oletetaan nousevan tarttuvien partikkelien massavirran kasvaessa. Oletukset ovat yksinkertaistuksia ja niiden avulla kuonaantumismallissa yritetään ottaa huomioon kuonaantumisenopeus ja kaasun lämpötila.

Tapauksissa 1-4 oli useita ongelmakohtia. Lämpötilat saattavat nousta liian korkeiksi alueilla, joilla seinään osuvien partikkelien lämpötila on kaasun lämpötilaa korkeampi. Lisäksi malli liioittelee nopeasti kuonaantuvien seinien lämpötiloja, jos kerrostumat eivät kasvakaan niin paksuiksi, että lämmönsiirto näillä alueilla lähestyisi nollaa. Lisäksi kriittisen massavirran \dot{m}_{cr} valinta tuottaa ongelmia. Jos valitaan pieni arvo suhteessa tarttuvien partikkelien massavirtoihin, oletetaan kerrostumien olevan hyvin paksuja suuressa osassa tulipesää. Suuren arvon valinta sen sijaan antaa ratkaisun, joka ei juuri eroa alkuperäisestä. Valittaessa liian suuri arvo kuonaantumismallista ei ole lisähyötyä mallinnukseen. Liian suuren arvon valinta on kuitenkin parempi kuin liian pienen. Liian pieni arvo liioittelee kuonaantumisongelman vaikutuksia tulipesässä sekä johtaa liian pieneen kokonaislämmönsiirtoon ja huonosti todellisuutta vastaavaan tilanteeseen. Kriittisen massavirran arvon valinta vaatii partikkelien tarttumismallin tulosten silmä-määräistä tarkastelua. Myös kokeelliset tulokset seinien lämpötiloista auttaisivat valinnassa, jotta tiedettäisiin seinien todelliset lämpötilat.

Tapauksessa 1 on melko suuri kriittisen massavirran arvo. Malli toimii ongelmitta molempina päivinä Rauman tapauksessa sekä toisessa mallinnetussa kattilassa. Toisaalta erot alkuperäiseen tapaukseen nähden ovat melko pieniä. Seinän lämpötilat ovat Rauman tapauksessa lähellä kaasun lämpötilaa vain etu- ja takaseinillä sekundääri-ilman alapuolella. Muillakin alueilla seinän lämpötilat nousevat alkuperäisen lämpötilan yläpuolelle, mutta vaikutus lämmönsiirtoon jää pienemmäksi kuin muilla malleilla. Vaikutus emissiviteetteihin on myös melko pieni.

Tapaus 2, jossa kriittisen massavirran arvo on melko pieni, eroaa selvästi tapausta 1 enemmän alkuperäisestä, koska höyrystimen pinnat saavat partikkelien lämpötilan hyvin suuremmalla alueella. Seinän lämpötilat ovatkin hyvin korkeita näillä alueilla ja joissain kohdissa jopa kaasun lämpötilaa korkeampia. Tällä on suuri vaikutus lämmönsiirtoon ja tulipesän olosuhteisiin varsinkin toisena päivänä. Lämpötiloissa on hyvin suuria gradientteja kuonaantuvien ja puhtaampien pintojen välillä. Korkeat lämpötilat ja

suuret gradientit vastaavat huonosti mittaustuloksia. Koska lämpövirran tiheydet ovat hyvin pieniä tai jopa negatiivisia kuonaantuneilla alueilla, emissiviteetti nousee niin korkeaksi, että puhtaammilla pinoilla saavutetaan hyvin suuria lämpövirran tiheyksiä. Tämän vuoksi myös lämmönsiirrossa esiintyy suuria gradientteja seinän lämpötilan muuttuessa äkillisesti. Toisena päivänä emissiviteetin säätö ei riitä halutun kokonaislämmönsiirron saavuttamiseen. Näiden huomioiden perusteella valittu kriittinen massavirta on liian pieni.

Tapaus 2 sopii kattilaan jossa tiedetään kuonaantumisen nostavan seinien lämpötiloja paljon. Muuten se liioittelee kuonaantumisen vaikutusta tulipesään. Mallia käytettäessä on asetettava seinän lämpötilalle yläraja, jotta negatiivisia lämpövirtoja ei synny.

Lämmönsiirron ja seinien lämpötilojen avulla laskettiin, millaista kerrostuman paksuutta seinien lämpötilan nousu vastaa. Kerrostuman paksuudet kasvavat hyvin suuriksi seinien lämpötilan saavuttaessa partikkelien lämpötilan. Tarkalla arvolla ei tässä tapauksessa ole kuitenkaan merkitystä, koska lämmönsiirto on lähellä nollaa eikä paksuuden muuttuminen vaikuttaisi siihen merkittävästi. Muilla alueilla paksuudet ovat sen sijaan hyvin pieniä. Käytettäessä partikkelien lämpötilaa kerrostuman paksuus ei ole välttämättä suurin siellä, missä tarttuu eniten partikkeleita. Tällainen tilanne olisi myös tapauksessa, jossa pinnan lämpötilaksi on asetettu T_{70} -lämpötila tai jokin muu vakiolämpötila.

Mittaustulosten perusteella seinien lämpötilat eivät nouse lähelle kaasun lämpötilaa missään mittauspisteessä, minkä perusteella voi olettaa vääräksi tapauksissa 1-4 tehdyn oletuksen siitä, että kuonan pintalämpötila saavuttaa partikkelien lämpötilan. Toisaalta mitattuja arvoja on vain vähän sekundääri-ilman tasolla ja sen alapuolella eli alueilla, joilla tapauksessa 1 on korkeimmat mallinnetut seinän lämpötilat. Ylempänä tulipesässä tapauksessa 1 ei saavuteta mitattujen suuruisia seinien lämpötiloja, kun taas tapauksessa 2 lämpötilat ovat taas selvästi liian korkeita näillä alueilla.

Lämpötilan lineaarinen riippuvuus massavirrasta on hyvin herkkä tarttuvien partikkelien massavirran muutoksille verrattuna mittaustulosten lämpötilajakaumaan. Lämpötilat ovat liian korkeita alueilla, joilla käytetään suoraan partikkelien lämpötilaa, kun taas lineaarista lämpötilajakaumaa käytävillä alueilla massavirran pienentyessä lämpötila laskee selvästi mittausarvojen alapuolelle. Mittaustulosten mukaan kuonan pintalämpötilat vaihtelevat välillä 510–840 °C, mikä vastaa 183–513 °C lämpötilaeroa kuonan ulkopinnan ja höyrystimen metallipinnan välillä. Suurin lämpötilaero on siis vain kolminkertainen verrattuna pienimpään eroon. Kriittinen massavirta voi olla kuitenkin jopa 100-kertainen verrattuna tietyn kopin tarttuvien partikkelien massavirtaan. Tällöin lämpötilaero kuonan pinnan ja höyrystinpinnan välillä pienenee sadasosaan verrattuna tilanteeseen, jossa käytetään suoraan partikkelien lämpötilaa. Käytännössä tällöin pintalämpötila ei eroa alkuperäisestä tapauksesta. Mittausten mukaan seinän lämpötilat ovat kuitenkin metallipinnan lämpötilaa korkeampia kaikkialla. Lineaarisen riippuvuuden sijaan voisi yrittää soveltaa muuta riippuvuutta, joka olisi vähemmän herkkä massavirran muutoksille. Toinen vaihtoehto on asettaa seinille kerrostuman minimipaksuus tai

minimilämpötila. Rauman tapauksessa minimilämpötila voisi olla mitattu 510 °C tai minimipaksuus samalla periaatteella 3 mm luokkaa.

Lineaarisesti massavirrasta riippuvan lämpötilan sijaan voi myös valita kuonalle maksimipaksuuden, ja olettaa kriittisen massavirran alapuolella kuonakerroksen paksuuden riippuvan lineaarisesti partikkelien massavirrasta. Tässä on kuitenkin samat ongelmat kuin lineaarisessa lämpötilassakin lukuun ottamatta negatiivisia seinämän paksuuksia. Tapaukseen 5 valittiinkin lineaarisen riippuvuuden sijaan kolme vakiopaksuutta.

Koska kerrostuman paksuudesta on myös jonkin verran kokeellista tietoa, tapauksessa 5 käytettiin mittaustuloksiin perustuvaa, mutta samalla kuonaantumisenopeuden huomioonottavaa kerrostuman paksuutta. Kerrostuman paksuuteen perustuvan kuonaantumismallin käyttö vaatii kuitenkin tietoa kattilan kerrostumien paksuuksista. Malli ei välttämättä anna todellisuutta vastaavia tuloksia jos kerrostuman paksuuksien arvot on otettu eri kattilasta, kuten tässä työssä tehtiin toiselle mallinnetulle kattilalle. Menetelmän etuna on lämpövirran tiheyden pysyminen positiivisena. Kerrostuman paksuuden kasvaessa sen pinnan lämpötila lähestyy kaasun lämpötilaa, mikä vastaa todellisuutta paremmin kuin liian korkeaksi nouseva lämpötila.

Tapauksiin 1 ja 2 verrattuna tapaus 5 antaa seinille tasaisemman lämpötilajakauman. Seinien minimilämpötilat ovat selvästi alkuperäisen mallin antamia arvoja korkeammat. Korkeimmat lämpötilat ovat taas tapauksia 1 ja 2 matalammat. Nämä tulokset vastaavat paremmin mitattuja lämpötiloja. Koska kerrostuman paksuudelle käytetään yksittäisiä paksuuden arvoja, syntyy seinien lämpötilajakaumiin jyrkkäreunaisia muutoksia kerrostuman paksuuden muuttuessa. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä poistuttaessa seinien välittömästä läheisyydestä.

Käytettäessä lämpötilaa reunaehtona lämmönjohtavuuden arvolla ei ole lämmönsiirron kannalta merkitystä. Sitä käytetään vain laskettaessa kuonakerroksen paksuutta lämpövuon ja kerrostuman pintalämpötilan avulla. Sen sijaan käytettäessä kerrostuman paksuutta reunaehtona lämmönjohtavuudella on merkitystä tuloksiin. Tässä työssä oletettu vakio lämmönjohtavuus ei kuitenkaan välttämättä vastaa todellisuutta. Lämpötilamittausten mukaan kuumimmilla pinnoilla kuoren tuhkasta on sulanut jopa 30 %. Kerrostuman pinnoilla on myös lämpötiloja, joissa tuhka on täysin kiinteää. Näissä lämpötiloissa huokoisuudella saattaa olla suuri merkitys lämmönsiirtoon eivätkä vakio lämmönjohtavuudella arvioidut lämpövastukset välttämättä päde. Tällaisilla alueilla myös emissiviteetit voivat olla pieniä verrattuna sulaneisiin pintoihin. Seinälämpötilojen mittausten perusteella Koschackin (2009) arvioimat kerrostuman paksuudet perustuvat kuitenkin samaan lämmönjohtavuuden vakioarvoon, jota on käytetty tässäkin työssä.

Lietteen tuhkapitoisuus on hyvin korkea, minkä vuoksi se aiheuttaa suhteessa massavirtaansa enemmän kuonaantumista kuin kuori. Tämän vuoksi partikkelien massavirrat seinille ovat suuremmat toisena kuin ensimmäisenä päivänä. Suurempien massavirtojen vuoksi kuonaantumismalleilla on suurempi vaikutus toisena päivänä kuin ensimmäisenä. Tuhkan määrällä onkin suurempi vaikutus kuonaantumiseen kuin sulamislämpötilalla tarkasteltaessa polttoaineita, joilla on matalat sulamislämpötilat. Kuumia seinä

on toisena päivänä laajemmilla alueilla kuin ensimmäisenä, koska kriittiset massavirrat ja tapauksessa 5 rajat eripaksuisten kerrostumien välillä pysyvät samansuuruisina. Todellisuudessa kuonan paksuus ei todennäköisesti juuri muuttunut sen yhden vuorokauden aikana, jolloin kuoren ja lietteen seosta poltettiin.

Seinien lämpötilat vastaavat tapauksissa 1 ja 5 kohtalaisen hyvin mittaustuloksia ja sopivat tässä luvussa tehtyjen tarkastelujen perusteella parhaiten kuonaantumisen mallintamiseen. Tapauksessa 5 tämä on odotettavaa, koska malliin valitut reunaehdot perustuvat mittauksiin. Kuonaantumismallin tulosten vertailua seinälämpötilojen mittaustuloksiin vaikeuttaa simuloinnin oletus pitkään samana pysyneestä polttoaineesta. Mittausten aikana polttoaineseos vaihtui joka päivä eikä välttämättä vastannut kattilassa aiemmin poltettuja seoksia. Tällä perusteella kattilassa poltettu kuori voi olla hyvinkin kuonaava polttoaine, mutta se ei vain ole ehtinyt vaikuttaa kerrostumien paksuuteen. Toinen ääripää on, että kuori ei aiheuta lainkaan kuonaantumista vaan mitatut kerrostumat ovat syntyneet muiden polttoaineiden poltossa.

Tapaukset 1 ja 5 laskettiin myös toiselle kattilalle. Tulokset olivat samankaltaiset kuin Rauman tapauksessa. Tapauksessa 5 kokonaislämmönsiirto jäi hieman haluttua pienemmäksi, koska emissiviteetti saavutti ylärajansa. Vaikka tarkempia tarkasteluja kuonaantumismallin käytön vaikutuksista ei tehty toiselle kattilalle, voi kuitenkin todeta kehitettyjen mallien toimivan lähes ongelmitta tällekin kattilalle. Kerrostuman pinnan lämpötilat ja vaikutukset lämmönsiirtoon seinillä muistuttavat Rauman tapausta. Emissiviteetit kasvavat suunnilleen saman verran molemmissa tapauksissa ja mallin vaikutukset tulipesän lämpötiloihin ovat samankaltaisia. Tässäkään kattilassa ei kuonaantumismallin käytöllä ole kovin suurta vaikutusta poistuttaessa seinien läheisyydestä. Toisessa kattilassa tehdyt simuloinnit lupaavat kuitenkin hyvää mallien toimivuudelle muissakin laskentatapauksissa.

5.2.2 Emissiviteetin vaikutus tuloksiin

Kuonaantuminen vaikuttaa myös pinnan emissiviteettiin. Tässä työssä verrattiin menetelmiä, joissa määritettiin joko yksi emissiviteetti koko höyrystinpinnalle tai eri emissiviteetit kuonaantuneelle ja kuonaantumattomalle pinnalle. Kahta emissiviteettiä käyttävät tapaukset 3 ja 4 antoivat huonosti todellista tilannetta vastaavia tuloksia. Lämpövuot kasvoivat kuonaantuneilla alueilla suuren emissiviteetin vuoksi ja pienenevät puhtaammilla seinillä, joilla emissiviteetti oli pieni. Muuten tulokset eivät juuri eronneet alkupe räisestä tapauksesta tai tapauksesta 1, johon ne perustuivat. Näitä tapauksia ei suositellakaan käytettäväksi sovellettaessa kuonaantumismallia muihin kattiloihin.

Koska ainakin tässä työssä lasketuissa tapauksissa kaikkialla höyrystimen alueella pinnoille tarttuu jonkin verran partikkeleita, voi myös olettaa kuonakerroksen kasvavan ajan myötä niin paksuksi, että emissiviteetti on suunnilleen vakio. Tämä yksinkertaistaa tilannetta huomattavasti, koska ei tarvitse etsiä kriteeriä, joka erottaa enemmän ja vähemmän kuonaantuneet pinnat. Tällainen jyrkkäreunainen kriteeri ei muutenkaan vastaa todellisuutta, koska todellisuudessa emissiviteetti muuttuisi tasaisemmin kerrostuman paksuuden muuttuessa. Yhdellä emissiviteetillä lasketut tapaukset ovat yksinkertaisem-

pia senkin vuoksi, että seinän lämpötila on ainoa suure, jonka avulla kuonaantuminen otetaan huomioon.

Yhtä emissiviteettiä käyttävässä mallissa emissiviteettiä nostetaan, jotta saavutetaan haluttu kokonaislämmönsiirto. Emissiviteetin noston suuruuden avulla voi arvioida kuonaantumismallin vaikutusten suuruutta. Jos emissiviteettiä on nostettava paljon, ovat seinän lämpötilat hyvin korkeat verrattuna alkuperäiseen tapaukseen. Jos emissiviteetti kasvaa vain vähän, on seinien lämpötiloissa tapahtunut vain pieni tai paikallinen nousu.

5.2.3 Kuonaantumismallien vaikutus tulipesässä

Kuonaantumismallin vaikutusta tulipesän keskilämpötiloihin ja muihin suureisiin tarkasteltiin jonkin verran. Vaikutukset ovat kaikissa tapauksissa samansuuntaiset, mutta niiden suuruudet vaihtelevat. Toisena päivänä tapahtuvat muutokset ovat suurempia kuin ensimmäisenä, koska tarttuvien partikkelien massavirta on suurempi. Tapauksessa 2 käytettävä malli aiheuttaa suurimmat muutokset. Toiseksi suurimmat muutokset aiheuttaa tapaus 5 ja pienimmät tapaus 1. Tämä on seurausta suoraan siitä, kuinka paljon seinien lämpötilat muuttuvat alkuperäiseen tapaukseen verrattuna. Tapaukset 3 ja 4 jätettiin pois vertailusta, koska kahta emissiviteettiä käyttävä malli todettiin huonosti toimivaksi. Kokonaisuudessaan kuonaantumisen mallintamisella on vain pieni vaikutus tulipesään, kun siirrytään kauemmaksi seiniltä. Tämä johtuu suurelta osin kokonaislämmönsiirron pysymisestä vakiona. Lämmönsiirto saatiin vastaamaan todellisuutta kaikissa tapauksissa lukuun ottamatta Rauman kattilan toisen päivän tapausta 2 ja toisen mallinnetun kattilan tapausta 5.

Kuonaantumismallin käyttö nostaa tulipesän lämpötilaa höyrystimen alaosissa. Nousu on kuitenkin useimmissa tapauksissa melko pieni. Ylempänä lämpötilaero tapausten välillä tasoittuu lämmönsiirron kasvaessa kuonaantumismallia käyttävissä tapauksissa. Lämpötilaprofiilin muutoksella on kuitenkin vain pieni vaikutus siihen, mitä palamisen aikana tapahtuu. Savukaasujen NO-konsentraatioissa tapahtuu hyvin pieni nousu vaihdettaessa alkuperäisestä mallista kuonaantumisen huomioon ottavaan malliin. Savukaasujen häikäpitoisuus sen sijaan pienenee, mutta tämäkin ero on pieni. Nämä muutokset aiheuttaa todennäköisesti lämpötilojen nousu tulipesän alaosassa.

Seinille tulevan säteilyn määrä kasvaa kaasun lämpötilan noustessa, mutta sillä ei ole merkitystä lämmönsiirron kannalta, koska myös heijastuvan ja seinän emittoiman säteilyn määrä kasvaa. Konvektion merkitys pienenee tulipesän seinien ja kaasun välisen lämpötilagradienttien pienentyessä. Sitä vastoin palaminen seinien lähellä kiihtyy lämpötilan noustessa.

Tapauksen 1 tuloksista tarkasteltiin myös, kuinka paljon kuonaantumismallin käyttö vaikuttaa tarttuvien partikkelien massavirtaan. Heijastuneiden partikkelien määrä pienenee varsinkin toisena päivänä tulipesän alaosien lämpötilan ja seinälämpötilojen nousun myötä, mutta tarttuvien partikkelien määrässä ei ole havaittavissa merkittäviä eroja. Vaikutusten voi olettaa olevan samanlaiset muillekin tapauksille.

5.2.4 Kuonakerroksen paksuutta rajoittavat tekijät

Jos tarkastellaan seinille tarttuvien partikkelien massavirtojen suuruutta, on kattilassa melko suuri kuonaantumisongelma. Kuonakerroksen kasvunopeuden voi laskea kaavan (70) avulla. Pahimmin kuonaantuville höyrystimen seinän alueille tuleva tarttuvien partikkelien massavirta on noin $0,5 \text{ g/s/m}^2$. Jos oletetaan kuonan tiheyden olevan 1500 kg/m^3 , kuonakerros saavuttaa 10 cm paksuuden 3,5 vuorokaudessa näillä alueilla. Lämmönsiirto näin paksun kerrostuman läpi on lähellä nollaa. Tällainen kasvunopeus johtaisi lämmönsiirron pienentymiseen hyvin nopeasti.

Seinille tarttuvien partikkelien massavirtojen avulla voi myös arvioida, kuinka kauan kestää saavuttaa tapauksessa 5 käytetyt ennalta määrätyt kuonakerroksen paksuudet. Massavirrat, joiden kohdalla kerrostuman paksuus kasvaa 1 mm:stä 5 mm:iin ja 5 mm:stä 2 cm:iin ovat $0,02 \text{ g/s/m}^2$ ja $0,2 \text{ g/s/m}^2$. Alueilla, joilla käytetään paksuutta 1 mm, tämän paksuuden saavuttamiseen kuluu vähintään 21 tuntia. 5 mm paksuutta käytävillä alueilla paksuus saavutetaan 10–104 tunnissa. Alueilla, joilla paksuus on 2 cm, arvon saavuttaminen vie enintään 42 tuntia. Jos mallinnetut tarttuvien partikkelien massavirrat ovat oikeaa suuruusluokkaa, on kerrostumia poistavien mekanismien oltava tehokkaita.

Kuonaantumismallissa ei ole otettu huomioon partikkelissa jäljellä olevan kaksin mahdollista palamista tai tuhkakomponenttien höyrystymistä, mutta kuonakerroksen kasvunopeuden suuruusluokka pysyisi samana, vaikka nämä otettaisiinkin huomioon. Kuonakerroksen kasvunopeuden perusteella voi olettaa tarttuvien partikkelien määrän olevan yliarvioitu. Tähän viittaa myös vertailu muiden tutkimusten tuloksiin. Toisaalta kerrostumien irtoamista aiheuttaa ja kasvua rajoittaa todennäköisesti moni tekijä, kuten gravitaatio ja eroosio, joita on hyvin vaikea mallintaa. Tarttumismallin tuloksia voikin ennemmin pitää indikatiivisina tuloksina pahimpien kuonaantumisongelmien sijainnista kuin tarkkoina arvoina seinälle tarttuvien partikkelien massavirrasta. Kuonaantumista ei myöskään voi näiden massavirtojen avulla mallintaa aikariippuvasti.

Tieto kuonakerroksen paksuuseroista höyrystimen seinillä olisi tärkeä kuonaantumismallin kannalta. Jos alueilla, joille tarttuu eniten partikkeleita on todellisuudessa paksummat kerrostumat kuin alueilla, joille niitä tarttuu vähemmän, kuonaantumisnopeudesta riippuvan lämpötilaprofiilin kaltainen lähestymistapa on hyvä. Toisaalta kerrostuman kasvua voi rajoittaa jokin tekijä, kuten eroosio, nuohous, tuhkan sulaminen tai kaasun virtaus, sen kasvaessa tietyn paksuiseksi. Tällöin ei tarttuvien partikkelien määrällä ole suurta merkitystä ja mallissa voisi käyttää kerrostumalle vakiopaksuutta. Rauman seinälämpötilojen mittausten mukaan tilanne on jotain tältä väliltä. Mitattujen paksuuksien maksimiarvo on vain 2 cm, joten kerrostumat eivät kasva kovin suuriksi. Arvot kuitenkin vaihtelevat 3 mm ja 2 cm välillä eli paksuus ei ole vakio. Ei tiedetä, rajoitaa kerrostuman paksuutta tarttuvien partikkelien pieni määrä, eroosio, kaasun virtaus vai jokin muu tekijä eikä myöskään tiedetä, onko kerrostuma todellisuudessa paksuimmillaan alueilla, joille tarttuu eniten partikkeleita.

Yksinkertaisimmillaan eroosion voisi ottaa huomioon yhtälön (33) avulla, jossa heijastuva partikkeli ottaa mukaansa osan kerrostumasta. Tällainen malli olisi yksinkertainen toteuttaa, mutta käytettäessä yhtälössä vakiokerrointa e_p eroosio vain joko hidastaisi kerrostuman kasvua tai sen ollessa tarpeeksi suuri aiheuttaisi kerrostuman kulumisen kokonaan pois. Tällaisella mallilla olisi vaikea löytää kuonalle tasapainopaksuutta. Ottamalla huomioon myös kaasun virtauksen, gravitaation, puhdistusmekanismien ja muiden tekijöiden aiheuttaman kuonan irtoamisen, saattaisi olla mahdollista löytää kerrostumalle jonkinlainen tasapainotila. Tällaista tilannetta ei ole kirjallisuuden perusteella kuitenkaan koskaan mallinnettu, koska kaikkia ilmiöitä ei tunneta tarpeeksi hyvin niiden huomioonottamiseksi.

Jos kerrostuman paksuutta rajoittaa tarttuvien partikkelien pieni määrä, voi todellisuus muistuttaa tapausta, jossa piitä on vähemmän kuin mitatussa tuhkan koostumuksessa. Tulosten mukaan tällöin partikkeleita tarttuu vain hieman muurauksen alueella eikä höyrystinpinnoilla lainkaan. Kattilasta mitatut kerrostumat ovat voineet syntyä pitkällä aikavälillä esimerkiksi satunnaisesta partikkelien tarttumisesta, höyrystyneen tuhkan kondensaatiosta tai aiemmasta kattilassa poltetusta polttoaineseoksesta.

5.3 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Partikkelien tarttumismalli antaa indikatiivisia tuloksia pahimpien kuonaantumisongelmien sijainnista. Rauman kattilalle vertailua mittauksiin on vaikea tehdä, koska mitattuja kerrostuman paksuuksia oli vain muutamasta mittauspisteestä. Mallinnus toiselle kattilalle antaa kuitenkin kohtalaisen hyvin havaintojen kanssa yhteensopivia tuloksia. Ei kuitenkaan tiedetä, pystyykö malli erottamaan kattiloita, joissa on ongelmia kuonaantumisen kanssa. Tämä riippuu tuhkan sulamisanalyysin tulosten luotettavuudesta. Jos polttoaineen tuhkan T_{15} -lämpötila on tulipesän lämpötilojen alapuolella, mallin mukaan kuonaantumista tapahtuu paljon. Tällöin partikkelit tarttuvat lähes aina osuessaan seinäin. T_{15} -lämpötilan ollessa kaasun lämpötilan luokkaa, kuten lietteen tapauksessa, jakaantuvat seinät alueisiin, joilla partikkelit enimmäkseen tarttuvat ja joilla ne eivät tartu. Korkeilla sulamislämpötiloilla mallin perusteella kuonaantumista ei tapahdu ollenkaan. Malli vaatii kuitenkin testausta muihin kattiloihin. Tässä työssä tarkasteltujen polttoainneiden matalien sulamislämpötilojen vuoksi esimerkiksi lämpötilan ja ilmakertoimen muutosten vaikutusta kuonaantumiseen on vaikea tarkastella.

Kuonaantumisen vaikutusta tarkastelevissa malleissa on tarttumismallia enemmän epävarmuustekijöitä. Seinien lämpötiloiksi valitut lämpötilat eivät perustu kirjallisuuteen eikä samanlaista mallia ole käytetty muissa tutkimuksissa. Vaikka toiselle kattilalle tehdyt simuloinnit antoivat havaintoihin verrattuna kohtalaisen hyviä tuloksia, on epäselvää, ovatko kerrostumat todellisuudessa paksuimmillaan siellä, missä partikkeleita tarttuu mallin mukaan eniten. Kerrostuman paksuuteen saattaa partikkelien tarttumisen lisäksi vaikuttaa moni muukin tekijä, ja paksuus vaihtelee myös ajan kuluessa. Kuona-kerroksen paksuutta reunaehtona käyttävä malli on kuitenkin hyvä vertailukohta lämpötilaa reunaehtona käyttävälle mallille, koska se perustuu osittain mittaustuloksiin.

Tapauksissa 1 ja 5 käytetyt mallit ovat käyttökelpoisimmat tässä työssä lasketuista tapauksista. Ennalta asetettuja kerrostuman paksuuksia käyttävä tapaus 5 sopii hyvin tapaukseen, jonka kerrostumien paksuudet ovat tunnettuja. Tapausta 1 voi käyttää tulipesään, josta ei ole kokeellista tietoa. Kriittisen massavirran arvon suhde tarttuvien partikkelien massavirtaan on kuitenkin hyvä tarkistaa kussakin tapauksessa erikseen. Tällä hetkellä kriittinen massavirta on silmämääräisesti tarttumismallin tuloksista valittu, mutta sen määrittämiseen voisi yrittää kehittää systemaattisempaa menetelmää. Ainakin Rauman tapaukselle malli antaisi myös parempia tuloksia, jos kaavassa (68) höyrystimen metallipinnan lämpötila korvattaisiin korkeammalla minimilämpötilalla. Muutoksen testaamiseen tämän työn puitteissa ei ollut aikaa.

Kuonaantumismallin kehittämiseksi voisi ottaa huomioon kaikki luvussa 2 käsitellyt asiat. Kaikkea ei kuitenkaan ole mahdollista mallintaa puutteellisen tiedon, mallien kehittämiseen kuluvan ajan ja rajallisten laskentaresurssien vuoksi. Partikkeleiden tarttumismallia olisi kuitenkin hyvä parantaa mallintamalla tarkemmin tuhkan kulkeutumista seinille sekä eri tuhkakomponenttien höyrystymistä ja kondensaatiota. Tuhkamallia voisi tarkentaa esimerkiksi liittämällä tasapainolaskuihin perustuvan tuhkamallin FLUEN-Tiin. Käytettäessä ennalta asetettua kerrostuman paksuutta kerrostuman lämmönjohtavuudella on myös suuri merkitys, joten kuonan lämmönjohtavuuden mallintamista olisi hyvä tutkia tarkemmin.

Seinien reunaehtoja on vaikea kehittää tarkemmiksi ilman tietoa kattiloissa olevista kerrostumista. Mallien validointiin tarvitaan mittausdataa kattilasta. Ideaalinen tapaus olisi sellainen, jossa samaa polttoainetta on poltettu samoissa olosuhteissa pitkään. Näin päästäisiin mahdollisimman lähelle tasapainotilannetta, jossa kaikki seinillä olevat kerrostumat olisivat syntyneet saman polttoaineseoksen poltossa suunnilleen samoissa olosuhteissa. Seinälämpötilojen mittausten lisäksi pitäisi saada havaintoja kerrostumien paksuudesta. Olisi tärkeää selvittää, ovatko kerrostumat todellisuudessa paksuimmillaan kohdissa, joihin simulointien mukaan tarttuu eniten partikkeleita, koska tähän oletukseen perustuu koko työssä kehitetty kuonaantumismalli.

Pienillä muutoksilla mallia voisi yrittää soveltaa myös tulistinalueiden likaantumisen mallintamiseen. Tällöin pitäisi kuitenkin ottaa huomioon kaasufaasissa olevien tuhkakomponenttien kondensaatio pinnoille sekä mikrometriluokan tuhkapartikkelit, joiden termoforeesi saattaa tulistinalueella olla merkittävä tekijä, koska kaasun lämpötilat eivät viileämmillä alueilla aina ylitä tuhkan T_{15} -lämpötiloja.

Kuonaantumismallin hyöty mallinnuksessa riippuu siitä, mitä halutaan tarkastella. Jos halutaan tietoa savukaasujen komponenttien pitoisuuksista ja tulipesän yläosan lämpötiloista, kuonaantumismallilla ei ole suurta merkitystä tuloksiin. Jos halutaan tarkastella tarkemmin seinien läheisiä alueita ja lämmönsiirtoa, antaa kuonaantumismalli todennäköisesti tarkemmat tulokset verrattuna alkuperäiseen tapaukseen. Tämä oletus perustuu siihen, että Rauman tapauksessa kuonaantumismallilla mallinnetut seinän lämpötilat olivat lähempänä mittaustuloksia kuin alkuperäisessä tapauksessa.

6 YHTEENVETO

Tuhkan sulaminen on usein ongelma biomassan poltossa sen matalan sulamislämpötilan vuoksi. Seinille tarttuva sulanut tai osittain sulanut tuhka aiheuttaa kuonaantumista tulipesän säteilyalueen lämmönsiirtopinnoilla. Höyrystinpinnoille syntyvät kerrostumat heikentävät kaasun ja höyrypuolen välistä lämmönsiirtoa. Ne voivat myös aiheuttaa korroosiota ja kasvaessaan suuriksi rajoittaa kaasun virtausta. Leijupoltossa ongelmia aiheuttavat myös petiin putoavat suuret kuonakappaleet.

Kuonaantumisen yksityiskohtainen mallinnus koostuu monen osaprosessin mallintamisesta, joita on käsitelty tämän työn teoriaosassa. Palamisprosessin aikana tuhka-komponentit reagoivat keskenään ja höyrystyvät, sulavat tai pysyvät kiinteinä. Tuhka kulkeutuu seinille eri mekanismeilla, kuten iskeytymällä, kondensaatiolla tai termoforeesilla. Tärkeimmät seinään iskeytyvän partikkelin tarttumiseen vaikuttavat tekijät ovat partikkelin ja seinän tahmeus, jotka liittyvät tuhkan sulamiseen. Seinälle tarttuvien partikkelien massavirran perusteella voidaan laskea kerrostuman kasvunopeus.

Kerrostuman kasvuun ja lämmönsiirto-ominaisuuksiin vaikuttaa moni tekijä, kuten sen huokoisuus, tiheys, lämmönjohtavuus ja emissiviteetti. Kerrostumat eivät myöskään kasva loputtomasti. Tässä työssä käsitellyn Rauman BFB-kattilan mittaustulosten mukaan korkein kattilassa havaittu kerrostuman paksuus oli 2 cm. Kerrostumien paksuutta voivat rajoittaa sulaneen tuhkan valuminen, eroosio sekä gravitaation ja kaasun virtauksen aiheuttama kerrostumien irtoaminen.

Kaikkia teoriaosassa käsiteltyjä asioita ei ole mahdollista ottaa huomioon käytetyissä malleissa. Sen sijaan työssä käytetään yksinkertaistettua mallia, jossa tarkasteltiin seinille iskeytyvien partikkelien tarttumista. Kuonaantumisen vaikutus lämmönsiirtoon otetaan huomioon muokkaamalla höyrystinpintojen reunaehtoja, minkä jälkeen tuloksia verrataan alkuperäiseen tapaukseen, jossa reunaehtoina ovat vakioämpötila ja -emissiviteetti. Malleja testataan käyttämällä biomassaa polttavaa Rauman BFB-kattilaa esimerkkitapauksena. Mallinnettavana on kaksi tapausta, joissa poltettiin kuorta sekä kuoren ja lietteen seosta.

Käytetty tarttumismalli perustuu tuhkan sulaneeseen osuuteen sekä partikkelin Weberin lukuun. Koska kuoren tuhkan T_{15} -lämpötila on matala verrattuna höyrystimen alueen lämpötiloihin, kuoripartikkelit ovat useimmiten seinään osuessaan tahmeita. Lietteen tuhka sulaa korkeammassa lämpötiloissa, joten lietepartikkeleita heijastuu enemmän. Weberin luku rajoittaa tarttumista molemmilla polttoaineilla vain pienillä alueilla. Heijastuneiden partikkelien pienen määrän vuoksi partikkeliratojen laskenta määrää kuonaantumisenopeuden. Eniten kuonaantumista tapahtuu tulosten perusteella etu- ja takaseinällä sekundääri-ilman korkeudella ja sen alapuolella. Kerrostumien kas-

vunopeudet ovat nopeasti kuonaantuvilla alueilla suuria ja saavuttavat mitatut paksuudet joillakin alueilla alle vuorokaudessa.

Kuonaantumisen vaikutuksia mallinnetaan asettamalla höyrystinpinnan reunaehdoksi joko lämpötila tai kerrostuman paksuus. Emissiviteetin säädöllä saadaan kokonaislämmönsiirto vastaamaan todellisuutta. Usein lämpötila, jossa tuhka alkaa virrata, on asetettu kuonakerroksen pintalämpötilaksi, mutta tässä sovelluksessa lämpötilat eivät nouse niin korkeiksi. Siksi reunaehdoksi asetetaan iskeytyvien partikkelien lämpötila. Mallissa oletetaan nopeasti kuonaantuvilla alueilla kuonakerroksen pinnan lämpötilan kasvavan kuonakerroksen kasvaessa, kunnes se saavuttaa kaasun lämpötilan. Hitaammin kuonaantuvilla alueilla lämpötilan oletetaan riippuvan tarttuvien partikkelien massavirrasta. Tätä mallia käytettäessä pitää kuitenkin valita kriteeri, jonka avulla pinnat jaetaan hitaasti ja nopeasti kuonaantuviin.

Koska seinälämpötilaan perustuva malli aiheuttaa ongelmia mallinnuksessa eikä aivan vastaa mitattuja arvoja, mallinnetaan tapausta myös mittaustuloksiin perustuvien kerrostuman paksuuksien avulla. Malli antaa odotetusti paremmin mittauksia vastaavia kuonan pintalämpötiloja, mutta sitä käytettäessä pitäisi olla havaintoja kerrostumien suuruudesta.

Verrattuna alkuperäiseen malliin molemmat lähestymistavat antavat pienemmän lämmönsiirron alueilla, joille tarttuu paljon partikkeleita. Korkeamman emissiviteetin vuoksi lämmönsiirto kasvaa alueilla, joille tarttuu vähemmän partikkeleita. Kuonaantumismallin käyttö nostaa tulipesän alaosien lämpötiloja, mutta erot tasoittuvat lähestyttäessä nokan tasoa. Mallin käyttö aiheuttaa tulipesässä muitakin muutoksia, joiden suuruudet riippuvat tapauksesta. Pääosin muutokset ovat kuitenkin melko pieniä.

Osa tapauksista laskettiin myös toiselle saman suuruusluokan kattilalle, jonka kerrostumien sijainnista on havaintoja. Simulointi antaa kohtalaisen hyvin havaintoja vastaavia tuloksia. Rauman tapauksissa käytetyt reunaehdot toimivat hyvin tässäkin kattilassa ja antavat järkevän suuruisia tuloksia. Myös vaikutus tulipesän lämpötilaprofiiliin on samanlainen molemmissa kattiloissa.

Tällä hetkellä mallia voi käyttää löytämään alueet, joilla on kuonaantumisongelmien riski. Mallia voi myös käyttää ottamaan karkeasti huomioon kuonaantumisen vaikutuksen lämmönsiirtoon. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin oltava kriittinen ja jonkinlainen tietoa mallinnettavan kattilan kuonaantumisesta olisi hyvä olla. Tuhkan sulamisanalyysin antamia T_{15} -lämpötiloja on hyvä verrata kirjallisuudesta löytyviin arvoihin, koska lämpötilalla, jossa tuhka muuttuu tahmeaksi, on suuri vaikutus tuloksiin. Käytettäessä lämpötilaa reunaehtona seinällä on myös kriittisen massavirran valintaan kiinnitettävä huomiota.

Jatkotutkimuksissa tuhkan höyrystymisen huomioonottaminen toisi todennäköisesti lisää tarkkuutta kuonaantumismalliin, koska höyrystyvän tuhkan määrä voi biomassan poltossa olla merkittävä. Tarttumismallin tuloksia parantaisi todennäköisesti tuhkan muodostumisen tarkempi mallinnus ja palamattoman koksen huomioiminen. Kuonaa seinältä irrottavat tekijät olisi hyvä ottaa huomioon mallinnettaessa kuonaantumisnopeutta. Näin saataisiin parempi kuva kuonakerroksen todellisesta kasvunopeudesta verrat-

tuna pelkkään tarttuvien partikkelien massavirtaan. Lisäksi partikkelin sisältämä palamaton koksi pitäisi ottaa jollakin tavalla huomioon tarttumismallissa. Jos mallinnettavan kattilan kerrostumien paksuuksista on havaintoja, näitä kannattaa käyttää reunaehtoina. Yleisesti reunaehtona voi kuitenkin käyttää sekä kuonan pintalämpötilaan että kerrostuman paksuuteen perustuvaa lähestymistapaa.

LÄHTEET

Abbas, T., Costen, P. & Lockwood, F. 1996. Solid fuel utilization: From coal to biomass. Twenty-Sixth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 3041-3058.

Arvelakis, S., Folkedahl, B., Dam-Johansen, K. & Hurley, J. 2006. Studying the melting behaviour of coal, biomass and coal/biomass ash using viscosity and heated stage XRD data. *Energy Fuels*, Volume 20, pp. 1329-1340.

Bajamundi, C. 2013. Ash melting analysis reports for bark and sludge, Jyväskylä. Not published.

Baxter, L. 2000. Ash deposit formation and deposit properties, a comprehensive summary of research conducted at Sandia's combustion research facility. Sandia National Laboratories.

Borello, D., Venturini, P., Rispoli, F. & Rafael, S. 2013. Prediction of multiphase combustion and ash deposition within a biomass furnace. *Applied Energy*, Volume 101, pp. 413-422.

Brink, A., Koschack, R., Laurén, T. & Hupa, M. 2011. Measurements of gas and surface temperatures in an industrial bubbling fluidized bed boiler firing moist bark. Estoril, 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers.

Bryers, R. 1996. Fireside slagging, fouling and high-temperature corrosion of heat-transfer surface to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 22, pp. 29-120.

Cundick, D., Maynes, D., Tree, D. & Baxter, L. 2007. Thermal transport to a reactor wall with a time-varying ash layer. Chemical and Mechanical Engineering Departments, Brigham Young University, Provo, Utah.

Degereji, M., Gubba, S., Ingham, D., Ma, L., Pourkashanian, M., Williams, A. & Williamson, J. 2013. Predicting the slagging potential of co-fired coal with sewage sludge and wood biomass. *Fuel*, Volume 108, pp. 550-556.

Degereji, M., Ingham, D., Ma, L., Pourkashanian, M. & Williams, A. 2012. Prediction of ash slagging propensity in a pulverized coal combustor furnace. *Fuel*, Volume 101, pp. 171-178.

Doshi, V., Vuthaluru, H., Korbee, R. & Kiel, J. 2009. Development of a modeling approach to predict ash formation during co-firing coal and biomass. *Fuel Processing Technology*, Volume 90, pp. 1148-1156.

- Erickson, T., Allan, S., McCollor, D., Hurley, J., Srinivasachar, S., Kang, S., Baker, J., Morgan, M., Johnson, S. & Borio, R. 1995. Modelling of fouling and slagging in coal-fired utility boilers. *Fuel Processing Technology*, Volume 44, pp. 155-171.
- Fang, Q., Wang, H., Wei, Y., Lei, L., Duan, X. & Zhou, H. 2010. Numerical simulations of the slagging characteristics in a down-fired, pulverized-coal boiler furnace. *Fuel Processing Technology*, Volume 91, pp. 88-96.
- Furmanski, P. 1995. Thermal and radiative properties of ash deposits on heat transfer surfaces of boilers, Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology.
- Garba, M., Ingham, D., Ma, L., Degereji, M., Pourkashanian, M. & Williams, A. 2013. Modelling of deposit formation and sintering for the co-combustion of coal with biomass. *Fuel*.
- Garba, M., Ingham, D., Ma, L., Porter, R., Pourkashanian, M., Tan, H. & Williams, A. 2012. Prediction of potassium chloride sulfation and its effect on deposition in biomass-fired boilers. *Energy Fuels*, Volume 26, pp. 6501-6508.
- Hansen, L., Frandsen, F., Dam-Johansen, K. & Sorensen, H. 1999. Quantification of fusion in ashes from solid fuel combustion. *Thermochemica Acta*, Volume 326, pp. 105-117.
- Heikkinen, R., Laitinen, R., Patrikainen, T., Tiainen, M. & Virtanen, M. 1998. Slagging tendency of peat ash. *Fuel Processing Technology*, Volume 56, pp. 69-80.
- Huang, L., Norman, J., Pourkashanian, M. & Williams, A. 1996. Prediction of ash deposition on superheater tubes from pulverized coal combustion. *Fuel*, 75(3), pp. 271-279.
- Hupa, M. 2011. Ash-related issues in fluidized-bed combustion of biomasses: Recent research highlights. *Energy Fuels*, Volume 26, pp. 4-14.
- Jacobson, T. 1998. Computational fluid dynamics aided combustion analysis. Espoo, Acta Polytechnica Scandinavia, Mechanical Engineering Series No. 131.
- Jokiniemi, J. & Kauppinen, E. Polttoprosessien aerosolit. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.
- Kaer, S. 2001. Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers. Aalborg, Aalborg University, Denmark.
- Kaer, S., Rosendahl, L. & Baxter, L. 2006. Towards a CFD-based mechanistic deposit formation model for straw-fired boilers. *Fuel*, Volume 85, pp. 833-848.
- Kalmanovitch, D. & Frank, M. 1988. An effective model of viscosity for ash deposition phenomena. *Proceedings of Mineral Matter and Ash Deposition from Coal*, pp. 22-26.

- Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. *Poltto ja palaminen*. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.
- Kekkonen, M., Oghbasilasie, H. & Louhenkilpi, S. 2012. *Viscosity models for molten slags*, Aalto University, Department of Materials Science and Engineering.
- Kjälldman, L. *Virtausten numeerinen simulointi*. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. *Poltto ja palaminen*. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.
- Koschack, R. 2009. *Wall temperature mapping with IR camera PYROINC 380*, ChemCom2 Rauma Campaign, Saatavuus rajoitettu projektin ChemCom2 osapuolille.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B. & Panarese, W. 2002. *Design and Control of Concrete Mixtures*, Chapter 3: Fly ash, slag, silica fume and natural pozzolans. 14th ed. Portland Cement Association.
- Kreutzkam, B., Wieland, C. & Spielthoff, H. 2012. Improved numerical prediction of ash formation and deposition using a novel developed char fragmentation model. *Fuel*, Volume 98, pp. 103-110.
- Kweon, S., Ramer, E. & Robinson, A. 2003. Measurement and simulation of ash deposit microstructure. *Energy Fuels*, Volume 17, pp. 1311-1323.
- Latva-Somppi, J., Kauppinen, E., Valmari, T., Ahonen, P., Gurav, A., Kudas, T. & Johanson, B. 1998. The ash formation during co-combustion of wood and sludge in industrial fluidized-bed boilers. *Fuel Processing Technology*, Volume 54, pp. 79-94.
- Lee, F. & Lockwood, F. 1999. Modelling ash deposition in pulverized coal-fired applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 25, pp. 117-132.
- Li, B., Brink, A. & Hupa, M. 2009. Simplified model for determining local heat flux boundary conditions for slagging wall. *Energy Fuels*, Volume 23, pp. 3418-3422.
- Li, B., Brink, A. & Hupa, M. 2013. CFD investigation of slagging on a super-heater tube in a kraft recovery boiler. *Fuel Processing Technology*, Volume 105, pp. 149-153.
- Lindström, E., Larsson, S., Boström, D. & Öhman, M. 2010. Slagging Characteristics during combustion of Woody Biomass Pellets Made from a Range of Different Forestry Assortments. *Energy Fuels*, Volume 24, pp. 3456-3461.
- Lindström, E., Öhman, M., Backman, R. & Boström, D. 2008. Influence of sand contamination on slag formation during combustion of wood derived fuels. *Energy Fuels*, Volume 22, pp. 2216-2220.
- Lind, T. 1999. *Ash formation in circulating fluidised bed combustion of coal and solid biomass*. Espoo, Technical Research Centre of Finland.
- Li, S., Wu, Y. & Whitty, K. 2010. Ash deposition behaviour during char-slag transition under simulated gasification conditions. *Energy Fuels*, Volume 24, pp. 1868-1876.

- Livingston, W. 2006. Biomass ash deposition, erosion and corrosion processes. Glasgow, IEA Task 32/Thermalnet Workshop.
- Losurdo, M., Spielthoff, H. & Kiel, J. 2012. Ash deposition modeling using a visco-elastic approach. *Fuel*, Volume 102, pp. 145-155.
- Mao, T., Kuhn, D. & Tran, H. 1997. Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces. *AIChE Journal*, 43(9), pp. 2169-2179.
- Melchior, T., Bläsing, M., Putz, G. & Muller, M. 2011. Surface tension of coal ash slags under reducing conditions at elevated pressures. *Fuel*, Volume 90, pp. 280-287.
- Miles, T., Miles, T. Jr, Barter, L., Bryers, R., Jenkins, B. & Oden, L. 1996. Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, Volume 10, pp. 125-138.
- Miles, T., Miles, T. Jr, Barter, L., Bryers, R., Jenkins, B. & Oden, L. 1995. Alkali deposits found in biomass power plants, a preliminary investigation of their extent and nature. National Renewable Energy Laboratory, Golden.
- Mills, K. 1986. Estimation of physico-chemical properties of coal slags and ashes. In: *Mineral Matter and Ash in Coal*. American Chemical Society, pp. 195-214.
- Mills, K. 2011. The estimation of slag properties, South African Pyrometallurgy.
- Moilanen, A., Nieminen, M. & Alén, R. Polttoaineiden ominaisuudet ja luokittelu. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.
- Montagnaro, F. & Salatino, P. 2010. Analysis of char-slag interaction and near-wall particle segregation in entrained-flow gasification of coal. *Combustion and Flame*, Volume 157, pp. 874-883.
- Mueller, C., Selenius, M., Theis, M., Skrifvars, B.-J., Backman, R., Hupa, M. & Tran, H. 2005. Deposit behaviour of molten alkali-rich fly ashes - development of a submodel for CFD-applications. *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 30, pp. 2991-2998.
- Mueller, C., Skrifvars, B.-J., Backman, R. & Hupa, M. 2003. Ash deposition prediction in biomass fired fluidized bed boiler - combination of CFD and advanced fuel analysis. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, Volume 3, pp. 112-120.
- Mu, L., Zhao, L. & Yin, H. 2012. Modelling and measurements of the characteristics of ash deposition and distribution in a HRSG of wastewater incineration plant. *Applied thermal engineering*, Volume 44, pp. 57-68.
- Ni, J., Yu, G., Guo, Q., Zhou, Z. & Wang, F. 2011. Submodel for predicting slag deposition formation in slagging gasification systems. *Energy Fuels*, Volume 25, pp. 1004-1019.

Ni, J., Zhou, Z., Yu, G., Liang, Q. & Wang, F. 2010. Molten slag flow and phase transformations in a slagging entrained-flow coal gasifier. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(23), pp. 12302-12310.

Nutalapati, D., Gupta, R., Moghtaderi, B. & Wall, T. 2007. Assessing slagging and fouling during biomass combustion: A thermodynamic approach allowing for alkali/ash reactions. *Fuel Processing Technology*, Volume 88, pp. 1044-1052.

Ots, A. 2011. Thermophysical properties of ash deposit on boiler heat exchanger surfaces. Crete Island, Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning.

Petersen, S. 2012. CFD modelling of a biomass incinerator for prediction of risk areas for corrosion damages. Master of Science Thesis, Technical University of Denmark.

Plaza, P., Griffiths, T., Joshi, Y. & Mulder, M. 2012. Ash deposition prediction tool for PF boilers fired with coal and biomass. Copenhagen, 2nd IEA CCC Workshop on Co-firing Biomass with Coal.

Pophali, A., Emami, B., Bussmann, M. & Tran, H. 2013. Studies on sootblower jet dynamics and ash deposit removal in industrial boilers. *Fuel Processing Technology*, Volume 105, pp. 69-76.

Probnosis, M. 2005. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. *Biomass and Bioenergy*, Volume 28, pp. 375-383.

Rezaei, H., Gupta, R., Bryant, G., Hart, J., Liu, G., Bailey, C., Wall, T., Miyamae, S., Makino, K. & Endo, Y. 2000. Thermal conductivity of coal ash and slags and models used. *Fuel*, Volume 79, pp. 1697-1710.

Richards, G., Slater, P. & Harb, J. 1993. Simulation of ash deposit growth in a pulverized coal-fired pilot scale reactor. *Energy Fuels*, Volume 7, pp. 774-781.

Robinson, A., Buckley, S. & Baxter, L. 2001. Experimental measurements of the thermal conductivity of ash deposits: Part 1. Measurement technique. *Energy Fuels*, Volume 15, pp. 66-74.

Robinson, A., Buckley, S., Yang, N. & Baxter, L. 2001. Experimental measurements of the thermal conductivity of ash deposits: Part 2. Effects of Sintering and Deposit Microstructure. *Energy Fuels*, Volume 15, pp. 75-84.

Rushdi, A., Gupta, R., Sharma, A. & Holcombe, D. 2005. Mechanistic prediction of ash deposition in a pilot-scale test facility. *Fuel*, Volume 84, pp. 1246-1258.

Sandberg, J. 2007. Fouling in biomass fired boilers. Department of Public Technology, Mälardalen University, Mälardalen University Press Licentiate Theses.

Schulze, K., Hofmeister, G., Joeller, M., Scharler, R., Obernberger, I., Korbee, R. & Cieplik, M. 2006. Development and evaluation of a flexible model for CFD simulation

of ash deposit formation in biomass fired boilers. Palo Alto, Impacts of fuel quality on Power Production.

Schulze, K., Scharler, R. & Obernberger, I. 2011. Development of an advanced CFD model for ash deposit and aerosol formation in biomass fired boilers. Estoril, Proceedings of the 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers.

Schulze, K., Scharler, R., Telian, M. & Obernberger, I. 2010. Advanced modelling of deposit formation in biomass furnaces - investigation of mechanisms and comparison with deposit measurements in a small-scale pellet boiler. Palo Alto, Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment.

Seggiani, M. 1998. Modelling and simulation of time varying slag flow in a Prenflo entrained-flow gasifier. *Fuel*, 77(14), pp. 1611-1621.

Seggiani, M. 1999. Empirical correlations of the ash fusion temperatures and temperature of critical viscosity for coal and biomass ashes. *Fuel*, Volume 78, pp. 1121-1125.

Senior, C. & Srinivasachar, S. 1995. Viscosity of ash particles in combustion systems for prediction of particle sticking. *Energy Fuels*, Volume 9, pp. 277-283.

Shannon, G., Rozelle, P., Pisupati, S. & Sridhar, S. 2008. Conditions for entrainment into a FeOx containing slag for a carbon-containing particle in an entrained coal gasifier. *Fuel Processing Technology*, Volume 89, pp. 1379-1385.

Shimizu, T. & Tominaga, H. 2006. A model of char capture by molten slag under high-temperature gasification conditions. *Fuel*, Volume 85, pp. 170-178.

Silvennoinen, J. & Hedman, M. 2013. Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler. *Fuel Processing Technology*, Volume 105, pp. 11-19.

Skrifvars, B.-J., Backman, R. & Hupa, M. 1996. Ash chemistry and sintering. *Fuel and Energy Abstracts*, 37(6), p. 422.

Skrifvars, B.-J., Backman, R., Hupa, M., Sfiris, G., Åbyhammar, T. & Lyngfelt, A. 1998. Ash behaviour in a CFB boiler during combustion of coal, peat or wood. *Fuel*, Volume 77, pp. 65-70.

Skrifvars, B.-J. & Hupa, M. Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.

Skrifvars, B.-J., Öhman, M., Nordin, A. & Hupa, M. 1998. Predicting bed agglomeration tendencies for biomass fuels fired in FBC boilers: a comparison of three different prediction methods. *Energy Fuels*, Volume 13, pp. 359-363.

Stam, A., Livingston, W., Cremers, M. & Brem, G. 2009. Review of models and tools for slagging and fouling prediction for biomass co-combustion, Arnhem.

- Strandström, K., Mueller, C. & Hupa, M. 2007. Development of an ash particle deposition model considering build-up and removal mechanisms. *Fuel Processing Technology*, Volume 88, pp. 1053-1060.
- Strömberg, B. 2006. *Fuel handbook*. Värmeforsk Service Ab.
- Taha, T., Stam, A., Stam, K. & Brem, G. 2013. CFD modeling of ash deposition for co-combustion of MBM with coal in a tangentially fired utility boiler. *Fuel Processing Technology*, Volume 114, pp. 126-134.
- Tanaka, T. & Hara, S. 1999. Thermodynamics of surface tension of molten slag mixtures. *Electrochemistry*, 67(6), pp. 573-580.
- Tomeczek, J., Palugniok, H. & Ochman, J. 2004. Modelling of deposits formation on heating tubes in pulverized coal boilers. *Fuel*, Volume 83, pp. 213-221.
- Tominaga, H., Yamashita, T., Ando, T. & Asahiro, N. 2000. Simulator development of entrained flow coal gasifiers at high temperature and high pressure atmosphere. *IFRF Combustion Journal*, pp. 1-22.
- Urbain, G. 1981. Viscosity of silicate melts. *Transactions and Journal of the British Ceramic Society*, 80(4), p. 139.
- Vainio, E., Brink, A., Hupa, M., Vesala, H. & Kajolinna, T. 2012. Fate of fuel nitrogen in the furnace of an industrial bubbling fluidized bed boiler during combustion of biomass fuel mixtures. *Energy Fuels*, Volume 26, pp. 94-101.
- Vainio, E., Yrjas, P., Zevenhoven, M., Brink, A., Laurén, T., Hupa, M., Kajolinna, T. & Vesala, H. 2013. The fate of chlorine, sulfur, and potassium during co-combustion of bark, sludge, and solid recovered fuel in an industrial scale BFB boiler. *Fuel Processing Technology*, Volume 105, pp. 59-68.
- Wall, T., Bhattacharya, S., Baxter, L., Young, B. & Grisanti, A. 1995. Ash deposit properties and radiative transfer in coal fired plant - current understanding and new developments. *Waterville Valley, Application of advanced technology to ash-related problems in boilers*.
- Walsh, P., Sayre, A., Loehden, D., Monroe, L., Beér, J. & Sarofim, A. 1990. Deposition of bituminous coal ash on an isolated heat exchanger tube: Effects of coal properties on deposit growth. *Progress in Energy and Combustion Science*, 16(4), pp. 327-345.
- Wang, H. & Harb, J. 1997. Modeling of ash deposition in large-scale combustion facilities burning pulverized coal. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 23, pp. 267-282.
- Wang, X., Zhao, D., He, L., Jiang, L., He, Q. & Chen, Y. 2007. Modeling of a coal-fired slagging combustor: Development of a slag submodel. *Combustion and Flame*, Volume 149, pp. 249-260.

- Vargas, S., Frandsen, F. & Dam-Johansen, K. 2001. Rheological properties of high-temperature melts of coal ashes and other silicates. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 27, pp. 237-429.
- Watt, J. & Fereday, F. 1968. The flow properties of slags formed from the ashes of British coals: Part 1. Viscosity of homogenous liquid slags in relation to slag composition. *Journal of the Institute of Fuel*, Volume 41, pp. 99-103.
- Weber, R., Mancini, M., Schaffel-Mancini, N. & Kupka, T. 2013. On predicting the ash behaviour using Computational Fluid Dynamics. *Fuel Processing Technology*, Volume 105, pp. 113-128.
- Venturini, P., Borello, D., Hanjalic, K. & Rispoli, F. 2012. Modelling of particles deposition in an environment relevant to solid fuel boilers. *Applied Thermal Engineering*, Volume 49, pp. 131-138.
- Versteeg, H. & Malalasekera, W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow, Pearson Education Limited.
- Yong, S., Gazzino, M. & Ghoniem, A. 2012. Modeling the slag layer in solid fuel gasification and combustion - Formulation and sensitivity analysis. *Fuel*, Volume 92, pp. 162-170.
- Yong, S. & Ghoniem, A. 2012. Modeling the slag layer in solid fuel gasification and combustion - Two-way coupling with CFD. *Fuel*, Volume 97, pp. 457-466.
- Zbogar, A., Frandsen, F., Jensen, P. & Glarborg, P. 2005. Heat transfer in ash deposits. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 31, pp. 371-421.
- Zbogar, A., Frandsen, F., Jensen, P. & Glarborg, P. 2009. Shedding of ash deposits. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 35, pp. 31-56.
- Zhou, H., Jensen, P. & Frandsen, F. 2007. Dynamic mechanistic model of superheater deposit growth and shedding in a biomass fired grate boiler. *Fuel*, Volume 86, pp. 1519-1533.
- Öhman, G. Lämmön- ja aineensiiirtoa palamisen tarpeisiin. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. *Poltto ja palaminen*. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.