LASKENTAMALLIT KUULAKEKOREAKTORIN SÄTEILYLÄMMÖNSIIRROLLE

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kandidaatintyö

Lappeenrannassa 1.12.2023

Erkka Sorvali

Työn ohjaaja: Tutkijaopettaja Heikki Suikkanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikka

Erkka Sorvali

Laskentamallit kuulakekoreaktorin säteilylämmönsiirrolle

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

37 sivua, 19 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Heikki Suikkanen

Avainsanat: kuulakekoreaktori, säteilylämmönsiirto, laskentamallit

Reaktorityyppinä kuulakekoreaktori on pitkään kehitettyä tekniikkaa, vaikka on suosiossa jäänyt vesijäähdytteisten reaktoreiden varjoon. Maailmassa on vain yksi varsinaisessa käytössä oleva kuulakekoreaktori. Normaalikäytössä reaktorin korkea lämpötila tekee säteilylämmönsiirrosta hallitsevan lämmönsiirtomekanismin konvektioon ja johtumiseen nähden.

Kandidaatintyön päätavoite on esittää kuulakekoreaktorin säteilylämmönsiirron mallintamiseen tarkoitettuja laskentamalleja. Malleilla ratkotaan reaktorisydämessä olevien polttoaine- ja/tai grafiittikuulien lämpösäteily efektiivisenä lämmönsiirtona. Yksittäisen kuulan lämmönsiirto käsitellään energiataseen avulla.

Kandidaatityössä käsitellään myös kuulakekoreaktorin tyypillinen rakenne ja sen ominaisuudet neutronien moderoinnissa, jäähdytteen kierrossa ja turvallisuudessa.

Säteilylämmönsiirron perusteista kerrataan ne asiat, jotka ovat olennaisia laskentamalleissa. Tällöin muun muassa säteilyn heijastavuus, absorbtointi, aallonpituus ja avaruuskulma jätetään tämän kandidaatintyön ulkopuolelle. Laskentamalleissa esiintyy emissivieetti, joka on todellisuudessa riippuvainen lämpötilasta aallonpituudesta ja avaruuskulmasta. Se on kuitenkin ennaltamääritetty tai on vain lämpötilan funktiona esitettävissä laskentamalleissa. Näkyvyyskerroin määritetään pääosin simuloinnilla, vaikka yhdessä laskentamallissa se laskentaan kokeellisen datan pohjalta.

Lähdemateriaalin pohjalta tutkitaan laskentamallien soveltuvuutta. Kolmesta esitetyistä laskentamalleista kaksi osoitetaan päteviksi lähdemateriaalin nähden. Säteilylämmönsiirron mallintamisessa on tulosten nähden vielä kehitettävää.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Erkka Sorvali

Thermal radiation heat transfer models for pebble bed reactor

Bachelor’s thesis

2023

37 pages, 19 pictures and 1 table

Examiners: Tutkijaopettaja Heikki Suikkanen

Keywords: pebble bed reactor, radiative heat transfer, models

The pebble bed reactor is a long-developed technology, although it has fallen out of popularity compared to water-cooled reactors. There is only one pebble bed reactor currently in actual operation worldwide. In normal operation, the high temperature of the reactor makes radiation heat transfer the dominant heat transfer form compared to convection and conduction.

The main objective of this thesis is to present models for radiation heat transfer in pebble bed reactors. These models predict the thermal radiation of fuel and/or graphite spheres in the reactor core as effective heat transfer. The heat transfer of individual pebbles is solved using the energy balance.

The thesis also discusses the typical structure of the pebble bed reactor and its characteristics in neutron moderation, coolant circulation, and safety. The basics of radiation heat transfer are reviewed, focusing on aspects relevant to the calculation models. This excludes considerations such as radiation reflectivity, absorption, wavelength, and spatial angle, from the scope of this bachelor's thesis. The models involve emissivity, which is dependent on temperature, wavelength and spatial angle. However, in calculation models, it is either predetermined or expressed as a function of temperature. The view factor is mainly determined through simulation, although one calculation model derives it from experimental data.

Based on the source material, the models are evaluated. Out of the three presented models, two are demonstrated to be valid compared to the source material. There is still demand for improvement in modeling radiation heat transfer based on the results.

KIITOKSET

Kandidaatintyö on ollut stressaavinta opinnoissani, mutta vuoden jälkeen se on valmiina. Siitä haluan kiittää.

Armatuuri – kiitos teille! Olette olleet tämän matkani perusta ja vankka tuki alusta lähtien. Olette jakaneet kanssani arvokasta tietoa, kannustaneet minua ja osoittaneet, mitä yhteisöllisyys ja yhteistyö voivat saada aikaan. Olette esimerkki siitä, miten yhdessä voimme saavuttaa suuria asioita. Kannustittehan minua kirjoittamaan tämän kiitospuheen Armatuurin fuksikursiolla 31.10.2023.

Grilliseura – kiitos teille! Olette tuoneet iloa ja rentoutumista matkalleni. Grilli-illat ja saunailtojen lämpö ovat olleet paikkoja, joissa olen voinut purkaa stressiä ja saada uutta inspiraatiota. Teidän panoksenne on ollut paljon enemmän kuin vain ruoka ja lämpö, se on ollut ystävyyttä ja yhteisöllisyyttä.

Ohjaajaani Heikki Suikkasta. Hän on harvoja ihmisiä LUT-yliopistossa, jotka tuntevat kuulakekoreaktorin toiminnan. Hänen panostuksensa kandidaatintyössä oli välttämätön.

Kaiken tämän tuen ja yhteisöllisyyden ansiosta olen pystynyt viemään kandidaatintyöni loppuun. Olen oppinut paljon, kasvanut ihmisenä ja nauttinut matkasta, kiitos teille. Matkaa on vielä opinnoissani, mutta olen varma, että valmistun hyvissä ajoin.

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m^2]
A_r	*radiation conduction area*	[m^2]
$c_{p,i}$	ominaislämpökapasiteetti	[J/ kg·K]
F	näkyvyyskerroin	[-]
F_E	dimensioton lämmönsiirtokerroin	[-]
f_k	korjauskerroin	[-]
d_p	polttoainekuulan halkaisija	[m]
E	emission	[W/m^2]
I	hitausmomentti	[kg·m^2]
J	eksisteanssi	[W/m^2]
k	johtumiskerroin	[W/m·K]
L_{bed}	kuulakeon korkeus	[m]
L_r	kuulien välinen etäisyys	[m]
M	momentti	[N·m]
m	massa	[kg]
N_c	*coordination number*	[-]
q	säteilyteho	[W]
$q_{v,avg}$	keskimääräinen lämpötehotiheys	[W/m^3]
R	etäisyys kahden pinta-ala elementin välillä	[m]
R_i	reaktorisydämen sisäseinän säde	[m]
R_o	reaktorisydämen sisäseinän säde	[m]
R_s	säteilyvastus	[m^{-2}]

r	säde kuulakeon keskiakselista	[m]
T	lämpötila	[ºC, K]
u	nopeus	[m/s]
z	apumuuttuja	[-]

Kreikkalaiset

ω	pyörimisnopeus	[rad/s]
ε	emissio	[-]
φ	porositeetti	[-]
λ	aallonpituus	[µm]
θ	kulma pinnan normaalista	[rad]
ϕ_c	*contact angle*	[rad, º]
Λ_s	kiinteän aineen dimensioton johtumiskerroin	[-]

Vakiot

σ	Stefan-Boltzmannin vakio	$5{,}670 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2·K^4)
g	putoamiskiihtyvyys	9,81 m/s^2

Yläindeksit

r,L	pitkän kantaman säteily
r,S	lyhyen kantaman säteily
W	säteily seinämäalueella
kr	critical
mit	measured

Alaindeksit

avg	keskiarvo
b	musta kappale
bulk	kuulakeon keskusalue
eff	efektiivinen
ij	pinnasta *i* pintaan *j*
m	aritmeettinen keskiarvo
n	normaali
p	kuula
r	säteily
s	kiinteä aine
t	tangetti

Lyhenteet

PLOFC	Pressurised Loss of Forced Cooling
DLOFC	Depressurised Loss of Forced Cooling
LAMMPS	Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator
LIGGGHTS	LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations
DEM	Discrete Element Method
CFD	Computational Fluid Dynamics

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Kiitokset

Symbolit ja lyhenteet

1 Johdanto 5
2 Kuulakekoreaktori 6
2.1 Polttoaine ja reaktorin sydän 6
2.2 Jäähdytteen kierto 8
2.3 Turvallisuusominaisuudet 9
3 Säteilylämmönsiirto 10
3.1 Peruskäsitteet 10
3.2 Kappaleiden välinen säteily 12
4 Säteilylämmönsiirto kuulakasassa 15
4.1 Kuulakeon geometria 15
4.2 Parametrit analyysille ja vertailulle 17
4.3 *Multi-sphere Unit Cell* -malli 18
4.3.1 Kuulakeon keskusta ja lähiseinämäalue 19
4.3.2 Seinämäalue 21
4.3.3 Kuulien johtumisen vaikutus lämpösäteilyyn 23
4.4 *Black surface* -malli 24
4.5 *Particle scale radiation* -malli 26
5 Mallien soveltuvuus kuulakekoreaktorin analyyseihin 28
5.1 *Multi-sphere Unit Cell* -malli 28
5.2 *Black Surface* -malli 30
5.3 *Particle scale radiation* -malli 32
6 Johtopäätökset 34
LÄHTEET 36

1 Johdanto

Kun maallikolta kysytään ensimmäistä ajatusta ydinvoimalaitoksesta, se voisi useimmiten liittyä kevytvesijäähdytteisiin reaktoreihin, joissa ydinpolttoaine on pakattu sauvoihin. Vesijäähdytteinen onkin yksi yleisimmistä reaktorityypeistä maailmalla.

Kaasujäähdytteiset reaktorit ovat pitkään kehitettyä teknologiaa, jossa yksi sovellus on kuulakekoreaktori. Tavallisesti tässä heliumjäähdytteisessä reaktorissa polttoaine on sintrattu pieninä jyvinä (halkaisija noin 0,5 mm) grafiittikuuliin [IAEA, 2013, s. 211]. Kuulakekoreaktorin sydämessä on suunnitellusti huomattavasti korkeampi lämpötila kuin vesijäähdytteisissä reaktoreissa. Tämä tekee säteilylämmönsiirrosta vallitsevan muodon verrattuna muihin lämmönsiirtomekanismeihin [Wu et al, 2016].

Tämän kandidaatintyön ensisijaisena tavoitteena on selvittää kuulakeon säteilylämmönsiirron ratkaisemiseen kehitetyt menetelmät ja mallit ja arvioida niiden hyödynnettävyyttä reaktorin lämmönsiirron analyyseissä. Reaktorin ulkopuolella olevat kuulat jätetään tarkastelusta pois.

Luku 2 on kirjallisuusosio, jossa esitellään kuulakekoreaktorin rakennetta, toimintaperiaatetta ja kehityshistoriaa sekä luvussa 3 säteilylämmönsiirron perusteet.

Luvussa 4 syvennytään tämän työn aiheeseen eli esitellään kirjallisuudesta löytyviä laskentamalleja polttoainekuulien väliselle säteilylämmönsiirrolle. Vaikka säteilylämmönsiirrolla on suurin huomio, kuulien välisestä kosketuksesta tuleva johtuminen ja jäähdytyskaasusta aiheutuva konvektio on tärkeää huomioida kandidaatintyössä. Luvussa 5 arvioidaan laskentamallien soveltuvuutta lähdemateriaalin pohjalta.

2 Kuulakekoreaktori

Kuulakekoreaktori on kaasujäähdytteinen, grafiittihidasteinen reaktori, joka luetaan HTGR-reaktorien joukkoon (*high-temperature gas-cooled reactor*). Reaktorissa käytettävä ydinpolttoaine on pieninä jyväsinä upottettu grafiittikuuliin, jotka kulkevat painovoiman vaikutuksesta reaktorisydäntä alaspäin. Samaa käytettyä polttoainetta voidaan syöttää takaisin sydämeen useita kertoja, kunnes suunniteltu poistopalama on saavutettu. Jäähdytteenä käytetään inerttikaasua, yleensä heliumia. [Almusafir, R. S. et al, 2003, s. 2]

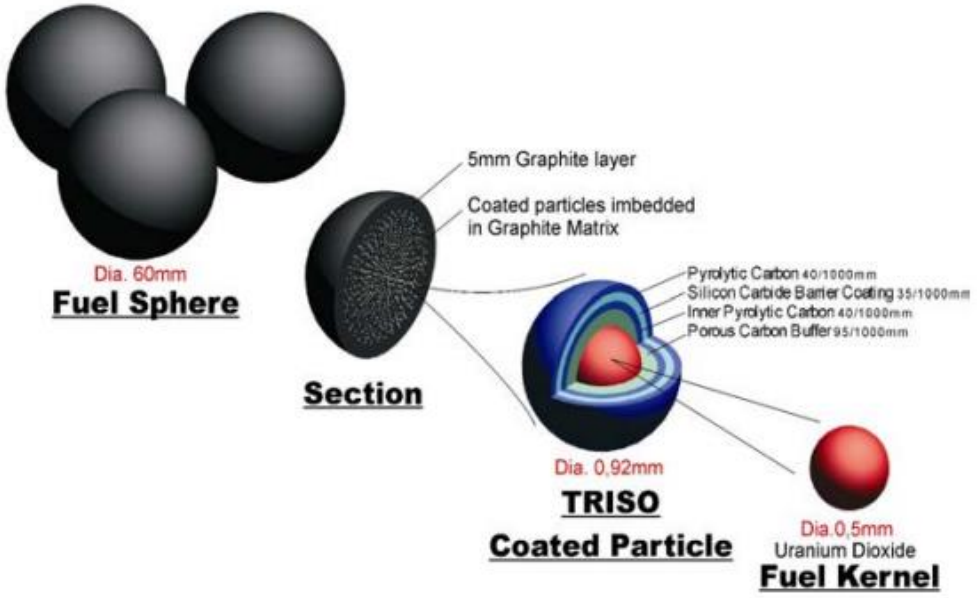
Maailmassa on tiettävästi vain yksi tosiasiallinen demonstraatio kuulakekoreaktorista, HTR-PM, joka sijaitsee Kiinan Shandongin provinssissa. Kyseinen kahden reaktorin ja yhden höyryturbiinin laitos on kehitetty HTR-10:stä. Yhden reaktorin lämpöteho on 250 MW ja laitoksen sähköteho 210 MW, mikä tarkoittaa 42 % hyötysuhdetta kokolaitokselle . [Zhang et al., 2016] . Laitoksen molemmat reaktorit saavuttivat kriittisyyden esnimmäistä kertaa vuonna 2021 [World Nuclear News, 2021].

Yksi erityispiirre kuulakekoreaktorin suunnittelussa on, että polttoaineen lämpötila ei koskaan ylitä 1600 °C rajaa. Jälkilämmön poisto voidaan toteuttaa ilman jäähdytteen pakotettua konvektiota, mikä korostaa johtumisen ja lämpösäteilyn tärkeyttä reaktorin suunnittelussa ja toiminnassa. [Almusafir, R. S. et al, 2003, s. 3]

Tässä osiossa esitellään kuulakekoreaktorin yleiset rakenteet ja ominaisuudet toiminnassa. Osiossa 2.1 käydään läpi polttoaineen rakenteita ja reaktorisydämen osia. Osiossa 2.2 ja 2.3 käydään läpi jäähdytteen kiertoa ja turvallisuusominaisuuksia vastaavasti.

2.1 Polttoaine ja reaktorin sydän

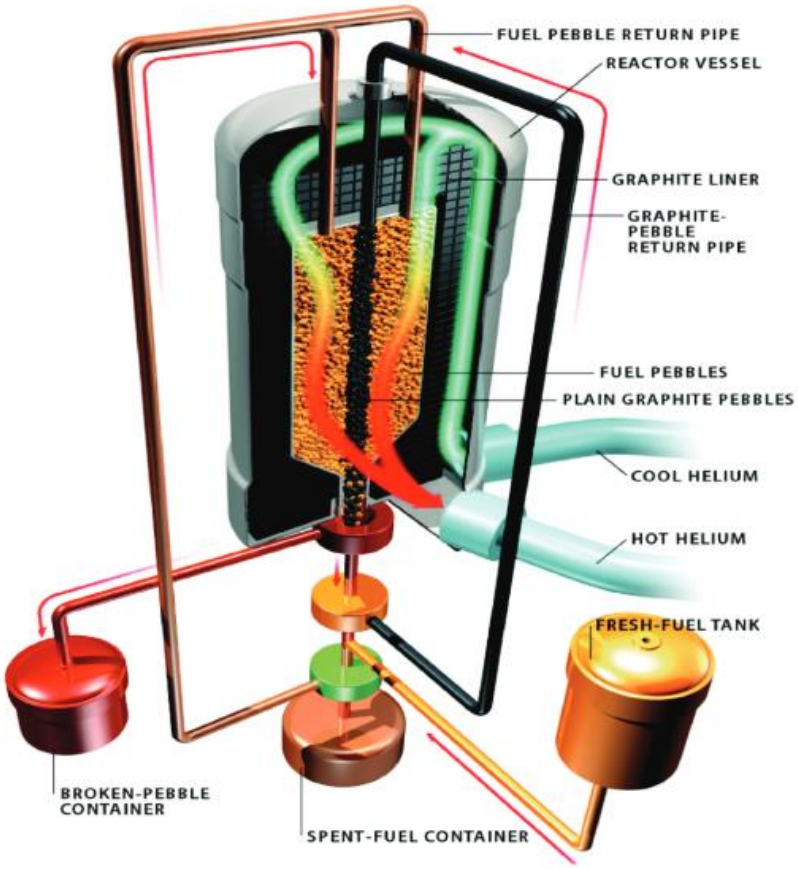
Polttoaineena käytettävä uraanidioksidijyvä päällystetään huokoisella hiilikerroksella lieventämään fissiokaasujen synnyttämää painetta. Lisäksi jyvä päällystetään pyrolyyttisellä hiilellä ja piikarbiidilla, jotka pitävät fissiotuotteet sisällään. Näin jyvistä tulee TRISO-jyviä (TRi-structural ISOtopic). Noin 15 000 päällystettyä jyvää sintrataan graafiittikuoreen, jota karkaistaan ja koneistetaan palloksi. Käyttövalmis polttoainekuula on halkaisijaltaan lähteistä riippuen 6-7,5 cm. [Langston L. S., 2014]. Polttoaineen rakenne esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Polttoaineen rakenne, jossa uraanioksidijyvät on päällystetty TRISO:lla sekä sintrattu ja koneistettu grafiittikuuliin. Lähde [IAEA, 2013, s. 211]

Reaktorisydän täydennetään jatkuvasti uusilla ja uudelleenkäytettävillä polttoainekuulilla. Kuulat syötetään reaktoriastian huipulta, jolloin ne vajoavat reaktorisydämen läpi ja sieltä mittalaitteiden tarkastettavaksi vaurioiden varalta. Jokainen polttoainekuula käy reaktoriastian läpi 6-10 kertaa, ennen kuin ne poistetaan lopullisesti kierrosta. [IAEA, 2013, s. 211]

Polttoainekuulien lisäksi, kuulakekoreaktorin mallin mukaan, reaktorisydämessä on pelkästä grafiitista valmistettuja kuulia sekä voimakkaasti neutroneja absorboivia kuulia. Absorboivat kuulat sijoitetaan heijastinharkkojen sisällä oleviin reikiin. Näin reaktorin tehoa voidaan hallita ja sammuttaa säätösauvojen tavoin. [IAEA, 2001, s. 35]



Kuva 2. Havainnollistava kuva kuulakekoreaktorin yleisestä rakenteesta. [IAEA, 2013, s. 210]

2.2 Jäähdytteen kierto

Kuulakekoreaktorin primääripiirissä virtaa heliumkaasu grafiittikuulien välistä, kuumentuen 900 °C lämpötilaan. Helium on inertti kaasu niin kemiallisesti kuin ydinreaktioiden suhteen, joten heliumkaasu ei vaikuta fissioneutronien määrään reaktorin sydämessä. Näin kuumentuneella heliumilla voidaan höyrystää sekundääripiirin vettä pyörittämään turbiinia. Vaihtoehtoisesti heliumkaasu voidaan syöttää suoraan kaasuturbiiniin. Jäähtynyt heliumkaasu palaa takaisin reaktoriin kuumentumaan. Tälle yhden suljetun piirin prosessille on arvioitu 41 prosentin hyötysuhde sähköntuotannossa, mikä on parempi verrattuna vesijäähdytteisten reaktoreiden hyötysuhteisiin 30 – 35 %. [Langston L. S., 2014]

Tarkemmin tarkasteltuna heliumkaasu kulkee ensin ylös sivuheijastimien läpi porattujen kanavien kautta. Kanavat ovat suojattu lämpöä eristävällä ja hyvin joustavalla vaipalla minimoimaan kaasuvuotoa. Helium virtaa sitten kuulakeon läpi alas reaktorin pohjalle. [IAEA, 2001, s. 35]

2.3 Turvallisuusominaisuudet

Kuulakekoreaktorin turvallisuus nojautuu vahvasti passiivisiin ominaisuuksiin, pakotetun heliumkierron ollessa mukana reaktorin operoinnissa. Varsinkin modulaaristen kuulakekoreaktorien kohdalla pitkällä, kapealla rakennelmalla reaktoria voidaan jäähdyttää passiivisesti, vaikka ei olisi jäähdytekiertoa tai jäähdytteen paine alenisi reaktoriastiassa. [IAEA, 2001, s. 61]

Seuraavaksi käydään läpi muita turvallisuusominaisuuksia kuulakekoreaktorissa.

Pieni ylimääräreaktiivisuus, toisin sanoen pieni ylikriittisyys, on mahdollista, kun ydinpolttoainetta syötetään jatkuvasti reaktorisydämen läpi, jolloin reaktorisydämessä polttoaineen määrä pysyy tasaisena. Tällöin fissioiden ketjureaktiota pystytään ylläpitämään ilman suurempaa ylijäämäreaktiivisuutta. Vertailuna, tavanomaisiin reaktoreihin syötetään kerralla iso määrä tuoretta polttoainetta, jonka palamalle vaaditaan suurempi ylijäämäreaktiivisuus. Ylijäämäreaktiivisuudella voidaan kompensoida tehon vaihtelua sekä siitä aiheutuvaa ksenonmyrkytystä. [IAEA ARIS, 2011] [IAEA, 2001, s. 62]

Uraanioksidijyvien pinnoitteet pitävät radioaktiivisia aineita sisällään reaktorisydämen ollessa korkeammassakin lämpötilassa, kuin missä reaktori tavallisesti ajetaan. [IAEA, 2001, s. 61]

Reaktorisydämen lämpötilan noustessa polttoaineen U-238-isotooppi absorboi enemmän neutroneja. Tämä selittyy Dopplerin ilmiöllä, jossa U-238:n kaappausresonanssit laajenevat lämpötilan noustessa. Hidasteen kasvavan absorption kanssa polttoainekuulat nopeasti hillitsevät lämpötilan nousua vähentämällä neutronien määrää, siten myös reaktorin tehoa. [IAEA, 2001, s. 62]

3 Säteilylämmönsiirto

Korkeissa lämpötiloissa säteily on hallitseva lämmönsiirtomekanismi. Siinä säteilyteho on lämpötilan neljännen potenssin funktiona, kun taas konvektiossa tai johtumisessa vastaava lämpötilan potenssi on 1-2 välillä [Howell et al., 2015]. Tyhjiössäkin säteily on merkittävä matalalla lämpötilalla, kun konvektiota ja johtumista ei esiinny ilman väliainetta.

Säteilylämmönsiirtoon vaikuttaa isompi joukko tekijöitä kuin lämmönjohtumisessa tai konvektiossa. Säteilynä siirtyvään lämpötehoon vaikuttavat lämpötilan lisäksi muun muassa säteilyn aallonpituus ja suunta. Tässä osiossa käydään läpi säteilylämmönsiirron perusteita ja yksinkertaistuksia, joita käytetään osion 4 esitettävissä laskentamalleissa.

3.1 Peruskäsitteet

Kaikki aineen muodot lähettävät eli emittoivat lämpösäteilyä lämpötilan ollessa suurempi kuin 0 K. Siksi kaikissa systeemeissä esiintyy säteilylämmönsiirtoa kiinteiden aineiden ja fluidien välillä. Ne kaikki paitsi emittoivat säteilyä, myös absorboivat, läpäisevät tai heijastavat säteilyä, tehden säteilylämmönsiirrosta monimutkaisemman ilmiön [Bergman et al. 2017, s. 715-716].

Tässä työssä esitetyt laskentamallit eivät huomioi säteilyn absorbointia, läpöisyä tai heijastusta, joten niitä ei käsitellä tässä työssä tämän tarkemmin.

Todellisen pinnan säteilytehon käsittelyssä on esitettävä mustan kappaleen konsepti [Bergman et al. 2017, s. 726]:

1. Musta kappale absorboi kaiken tulevan säteilyn suunnasta tai aallonpituudesta riippumatta (ideaalinen absorboija).
2. Määrätyllä lämpötilalla ja aallonpituudella, mikään pinta ei emittoi enemmän säteilyä kuin musta kappale (ideaalinen emittoija).
3. Mustan kappaleen emissio on riippumaton suunnasta (diffuusi emittoija).

Niin täydellisenä absorboijana kuin emittoijana, musta kappale käsitellään standardina vertailukohteena oikeiden pintojen säteilyominaisuuksia tarkastellessa. On tärkeää tietää, että

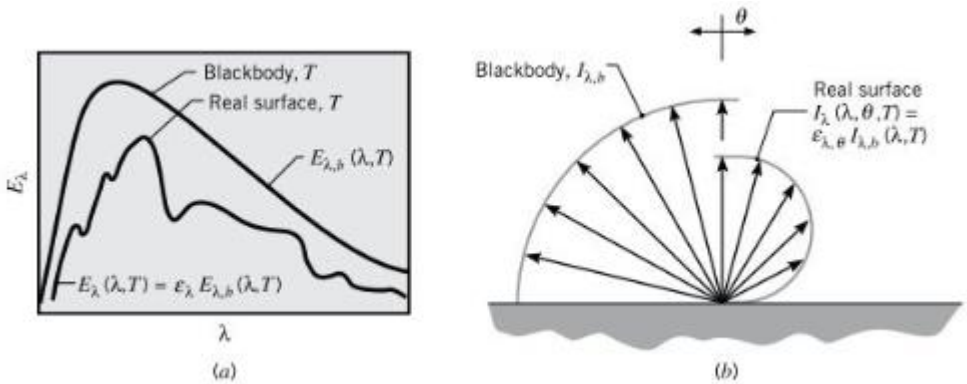
mikään pinta ei käyttäydy täydellisesti mustan kappaleen tavoin. [Bergman et al. 2017, s. 726-727]

Mustan kappaleen kokonaisemissioteho pinta-alaa E_b kohden määritetään Stefan-Boltzmannin lailla (3.2)

$$E_b = \sigma T^4 \tag{3.2}$$

Tämä emissioteho sisältää säteilyn kaikilla aallonpituuksilla kaikkiin suuntiin. Yhtälössä (3.2) esiintyy Stefan-Boltzmannin vakio σ = 5,670·10^{-8} W/(m^2·K^4). [Bergman et al. 2017, s. 729]

Nyt oikean kappaleen säteilyn käsittelyssä tarvitaan mustan kappaleen ohella toinen suure, emissiviteetti. Oikean pinnan emissiviteetti vaihtelee säteilyn aallonpituuden ja suunnan mukaan, mutta keskimääräinen emissiviteetti on yleisesti käytössä [Howell et al., 2015]. Emissiviteetti ε määritetään oikean pinnan emission ja mustan kappaleen emission suhteena. Tätä havainnollistetaan kuvassa 3. [Bergman et al. 2017, s. 736]



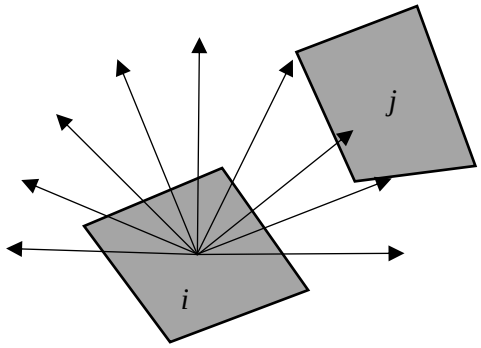
Kuva 3. Mustan kappaleen ja oikean pinnan emissioiden vertailu a) aallonpituusjakaumalla ja b) suuntajakaumalla. [Bergman et al. 2017, s. 736]

Kun kaikkia aallonpituuksia ja kulmia sisältävä kokonaisemissiviteetti ε tunnetaan, oikean pinnan emissio voidaan määrittää mustan kappaleen säteilyllä kaavan (3.3) avulla. [Bergman et al. 2017, s. 737]

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4 \tag{3.3}$$

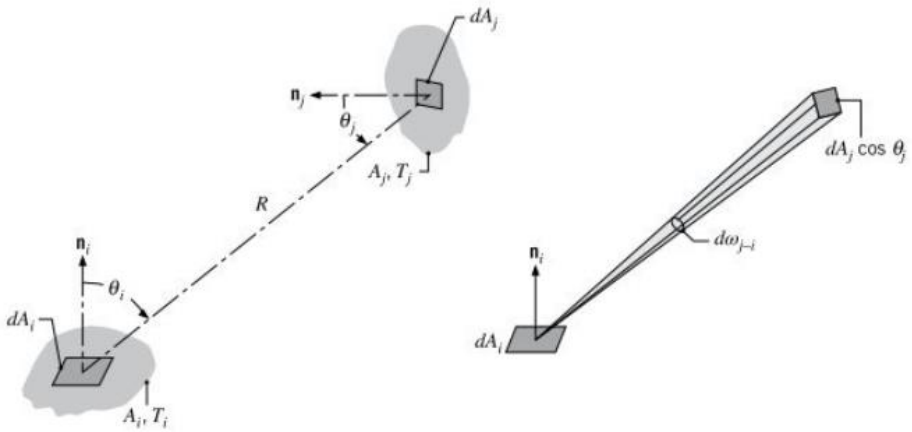
3.2 Kappaleiden välinen säteily

Kuvitellaan pinnan *i* emittoivan säteilyä toiseen pintaan *j*, mutta säteilytehosta vain osa pääsee pintaan *j* esteiden tai sen oman pinnan rajallisen koon takia. Se osuus säteilystä, joka päätyy pinnalle *j*, määritetään näkyvyyskertoimella F_{ij}. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Pinnan *i* säteily pintaan *j*.

Näkyvyyskerroin F_{ij} määritetään pinnasta *i* lähtevän säteilyn osuutena, joka päättyy pinnalle *j*. Yleistä yhtälöä näkyvyyskertoimelle muodostetaan kuvan 5 mielivaltaisilla pinta-aloilla dA_i ja dA_j.



Kuva 5. Havainnekuva kahden pinnan geometriasta. Pintojen välinen etäisyys *R* muodostaa pintojen normaalien $\boldsymbol{n}_i$ ja $\boldsymbol{n}_j$ kanssa kulmat θ_i ja θ_j vastaavasti. [Bergman et al. 2017, s. 798]

Näkyvyyskertoimelle F_{ij} johdatetaan yhtälö (3.4) [Bergman et al., 2017, s. 799].

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_j dA_i \tag{3.4}$$

Vastaavasti näkyvyyskerroin F_{ji} määritetään pinnasta *j* lähtevän säteilyn osuutena, joka päättyy pinnalle *i*. Sen yhtälö on (3.5).

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_j dA_i \tag{3.5}$$

Kirjallisuudesta löytyy näkyvyyskertoimien kaavoja yksinkertaisille geometrioille, kun taas kuulakeossa kuulien näkyvyyskerroin joudutaan määrittämään simulaatioita ja säteenseurantaa hyödyntäen.

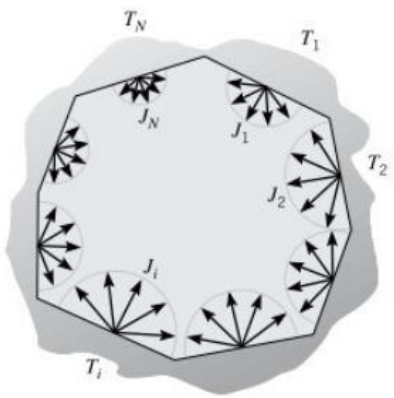
Kahden pinnan *i* ja *j* näkyvyyskertoimien välillä pätee käänteislakia kuvaava yhtälö (3.6) [Bergman et al., 2017, s. 799]

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \tag{3.6}$$

missä A_i ja A_j ovat pintojen *i* ja *j* pinta-alat.

Kuvassa 6 esitetyn ontelon tapauksessa, jonka seinien lukumäärä on *n*, näkyvyyskertoimia koskee summalaki 3.7.

$$\sum_{j=1}^{n} F_{ij} = F_{ii} + F_{ij} + \ldots + F_{in} = 1 \tag{3.7}$$



Kuva 6. Säteily ontelossa. [Bergman et al. 2017, s. 800]

Yhtälössä (4) esiintyvä termi F_{ii} ilmaisee pinnasta *i* lähtevästä säteilystä osan päätyvän pintaan *i*.

Kuulakeon tapauksessa on aiheellista käsitellä onteloa, jos se on kyseessä olevan laskentamenetelmän kannalta tarpeen.

Lopulta säteilyteho pinnalta i pinnalle j voidaan ilmaista kaavalla (3.8)

$$q_{i \to j} = A_i E_i F_{ij} \tag{3.8}$$

Toiseen suuntaan teholle saadaan kaava (3.9)

$$q_{j \to i} = A_j E_j F_{ji} \tag{3.9}$$

Nettosäteilyteho näiden pintojen välillä lasketaan näiden säteilytehojen erotuksena.

Kaavoissa (3.8) ja (3.9) esiintyvä emissio *E* voidaan tapauskohtaisesti tulkita koskevan mustan kappaleen tai oikean pinnan säteilyä. Oikean pinna tapauksessa on tunnettava emissiviteetti.

4 Säteilylämmönsiirto kuulakasassa

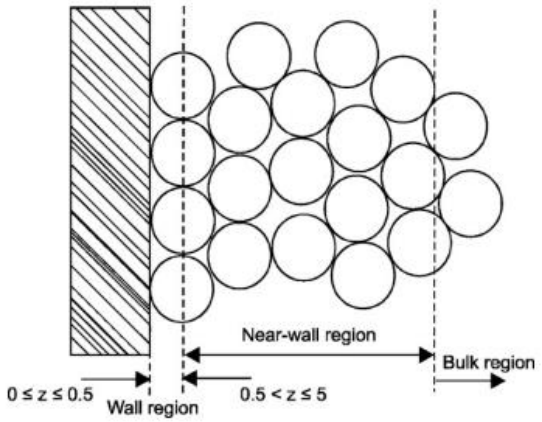
Kuulakasan monimutkainen, epäsäännöllinen, vaihteleva geometria luo haasteita säteilylämmönsiirron mallintamisessa, jos tuloksista haluaa yksityiskohtaisia [van Antwerpen et al. 2008]. Tässä osiossa päästään kandidaattityön aiheeseen, kuulakeon säteilylämmönsiirron laskentamenetelmät.

4.1 Kuulakeon geometria

Kuulakasassa on tietenkin tyhjiä tilavuuksia, joiden kautta jäähdyte pääsee virtaamaan, ja joista lämpösäteily pääsee läpi, päättyen muihin kuuliin. Tämä tekee lämpösäteilyn laskennasta monimutkaisempaa, mutta osassa esitettävistä malleista on käytettävissä kuulakeon geometriaa kuvaavia parametreja. Tässä työssä kaikkien kuulien oletetaan olevan kooltaan yhdenmukaisia.

Tyhjän tilavuuden osuutta koko tarkasteltavassa tilavuudessa nimetään porositeetiksi φ (*porosity* tai *void fraction*) [van Antwerpen et al. 2012]. Du Toit et al. (2009) esittää, että kuulakeon geometriaa voidaan kuvata yksityiskohtaisemmin suureilla N_c ja ϕ_c. N_c (*coordination number*) on niiden kuulien lukumäärä, joiden kanssa tarkasteltava kuula on suorassa kontaktissa. Vastaavasti ϕ_c (*contact angle*) on kulma, jonka muodostavat kahden toisiaan koskettavien kuulien keskipisteitä yhdistävä jana ja toinen jana kohtisuorassa lämpövuon suunnan kanssa.

Säteilyä käsitellään vielä kolmessa vyöhykkeessä, jotka ovat kuvassa 7 ilmaisuna $0 \leq z \leq 0{,}5$; $0{,}5 \leq z \leq 5$ ja $z \geq 5$. Kerroin z on kuulan keskipisteen etäisyys seinästä, kuulan halkaisijan kerrannaisena ilmaistuna. [van Antwerpen et al. 2012 s. 186]



Kuva 7. Kuulakeon vyöhykkeet. [van Antwerpen et al. 2012 s. 186]

Kuulakeon epäsäännölliselle geometrialle De Klerk (2003) on kehittänyt ryhmä kaavoja kuulakeon porositeetin φ laskemiseksi

$$\varphi = 2{,}14z^2 - 2{,}53z + 1 \quad z \leq 0{,}637 \tag{4.4}$$

$$\varphi = \varphi_{bulk} + 0{,}29\mathrm{e}^{-0{,}6z} \cdot \left[\cos\left(2{,}3\pi(z - 0{,}16)\right)\right] + 0{,}15\mathrm{e}^{-0{,}9z} \tag{4.5}$$

$$z > 0{,}637$$

$$z = (r - R_i)/d_p, \qquad R_i \leq r \leq (R_o + R_i)/2 \tag{4.6}$$

$$z = (R_o - r)/d_p, \qquad (R_o + R_i)/2 \leq r \leq R_o \tag{4.7}$$

jossa r on etäisyys kuulakeon sisäseinästä, d_p kuulan halkaisija R_i sisäseinän säde, R_o ulkoseinän säde ja φ_{bulk} kuulakeon sisempien alueiden porositeetti (*porosity in bulk region*). Reaktorimallin mukaan R_i = 0 m, jos reaktorisydämessä ei ole keskiheijastinta.

Du Toit et al. (2009) kehitti empiirisen korrelaation, jolla lasketaan keskimääräinen koordinaatioluvu $\bar{N}_c$ yksin porositeetilla φ. Kaava on tarkoitettu etäisyydelle z > 0,5.

$$\bar{N}_c = 25{,}952\varphi^3 - 62{,}364\varphi^2 + 39{,}724\varphi - 2{,}0233 \tag{4.8}$$

$$0{,}2398 \leq \varphi \leq 0{,}54$$

Du Toit et al. (2009) kehitti myös yhteyden keskimääräisen koordinaatioluvun $\bar{N}_c$ ja keskimääräisen kontaktikulman $\bar{\phi}_c$ välille. Säteensuuntaisesti tarkasteltuna kun $\bar{\phi}_c = 0°$, kontaktissa oleva kuula ei vaikuta kokonaislämmönsiirtoon kahden kuulan välillä. Vastaavasti kulmalla $\bar{\phi}_c = 90°$ kuulasta siirtyy lämpöä maksimilämpövirralla toiseen kuulaan. $\bar{N}_c$:n ja $\bar{\phi}_c$:n välistä riippuvuutta kuvaa korrelaatio:

$$\bar{\phi}_c = -6{,}1248\bar{N}_c^2 + 73{,}419\bar{N}_c - 186{,}68 \tag{4.9}$$

Lähiseinämäalueella, $0{,}5 \leq z \leq 5$ (*near-wall region*), on erikseen korjattu porositeetti φ^*, jonka korrelaatiota on kehitetty sen mukaan, missä on todennäköisimmin kuulan keskipiste lähiseinämäalueella. Korrelaatio on validi välillä $0{,}5 < z < 3{,}8$ ja on muotoa

$$\varphi^* = -0{,}0127z^2 + 0{,}0967z + 0{,}2011 \tag{4.10}$$

jossa kerroin z lasketaan yhtäöillä (4.6) ja (4.7). [van Antwerpen et al. 2012 s. 186]

4.2 Parametrit analyysille ja vertailulle

Vertaillakseen laskentamallia muihin laskentamalleihin ja korrelaatioihin kaikki lämmönsiirtomekanismit voidaan kuvata yksittäisellä suureella, efektiivisellä johtumiskertoimella (*effective thermal conductivity*) [van Antwerpen et al. 2010, s. 1809]. Tätä suuretta voidaan erikseen jaotella jokaiselle lämmönsiirtomekanismille tarkastamaan lämmönsiirtoa yksityiskohtaisemmin. Säteilyllekin voidaan eritellä oma efektiivinen johtumiskerroin (*effective thermal conductivity due to radiation*), ja menetelmät sen laskemiseksi vaihtelevat laskentamallin mukaan.

Toinen vertailuun tarkoitettu suure lasketaan säteilyn efektiivisestä johtumiskertoimesta. Tämä on dimensioton lämmönsiirtokerroin (*radiation exchange factor*)

$$F_E = \frac{k_r}{4d_p\sigma T_m^3} \tag{4.11}$$

missä k_r on säteilyn efektiivinen johtumiskerroin, d_p kuulan halkaisija σ Stefan-Boltzmanin vakio ja T_m aritmeettinen keskiarvo lämpötilasta [Wu et al. 2016]. Dimensiotonta lämmönsiirtokerrointa voidaan vaihtoehtoisesti laskea korrelaatioilla, joissa huomioidaan emissiviteetti ja lämmönjohtavuus [van Antwerpen et al. 2010].

Efektiivinen johtumiskerroin ja dimensioton lämmönsiirtokerroin ovat molemmat olennaisia suureita laskentamallien analyyseissa ja vertailussa. Osioissa 4.3-4.5 syvennytään laskentamalleihin, joissa käytetään kyseisiä suureita. Ensimmäinen on *Multi-sphere Unit Cell* -malli lähteestä [van Antwerpen et al., 2012] ja kaksi muuta ovat *Black surface* ja *Particle scale radiation* -malli lähteestä [Wu et al., 2020]

4.3 *Multi-sphere Unit Cell* -malli

Multi-sphere Unit Cell -mallissa merkittävä yksinkertaistus on, että reaktorisydäntä käsitellään kaasun ja kiinteän aineen homogeenisena seoksena. Siksi säteilyä käsitellään osana kuulakeon efektiivistä johtumiskykyä k_{bed}, johon sisältyy monet lämmönsiirron muodot. k_{bed} [W/mK] määräytyy seuraavasti:

$$k_{bed} = k_{eff} + k_{f,eff} + k_{s,eff} \tag{4.1}$$

jossa effektiivinen terminen johtumiskerroin k_{eff} sisältää neljä lämmönsiirtomekanismia:

1. Johtuminen kuulissa
2. Kosketuksissa olevien kuulien välinen johtuminen
3. Johtuminen seisovan kaasun kautta
4. Lämpösäteily pintojen välillä.

$k_{f,eff}$ puolestaan käsittelee turbulenttista kaasua liikkumattomassa kuulakasassa, ja $k_{s,eff}$ huomioi kuulakasan liikkumisessa tapahtuvaa värähtelyä ja sekoittumista.

Efektiivinen terminen johtumiskerroin k_{eff} edelleen määritetään

$$k_{eff} = k_e^{g,c} + k_e^r \tag{4.2}$$

jossa $k_e^{g,c}$ on yhteinen johtumiskerroin edellä mainituille lämmönsiirtomekanismille 1–3 ja k_e^r on pintojen säteilyä huomioiva johtumiskerroin (*effective conductivity due to radiation*). Tämän kandidaatintyön- laajuuden takia keskitytään vain säteilyjohtumiskertoimen k_e^r laskemiseen. k_e^r jaetaan vielä seuraavasti.

$$k_e^r = k_e^{r,S} + k_e^{r,L} \tag{4.3}$$

$k_e^{r,S}$ on toisiaan koskettavien kuulien säteilyä käsittelevä kerroin [W/mK] (*short-range radiation*) ja $k_e^{r,L}$ [W/mK] on säteilykerroin kauimmaisempiin kuuliin (*long-range radiation*).

Osion 4.1 menetelmät on kohdennettu sattumanvaraisesti kasattuun kuulakekoon, jota ympäröivät sileät heijastinpinnat. Näin heijastimissa olevia uria ja koloja ei oteta huomioon. Reaktorisydämen halkaisija on merkittävästi suurempi kuin grafiittikuulan, jonka takia seinä käsitellään suorana tasona. Korostettakoon, että tässä osiossa käsitellään reaktorisydämen säteensuuntaista lämmönsiirtoa. [van Antwerpen et al., 2012]

4.3.1 Kuulakeon keskusta ja lähiseinämäalue

Kosketuksissa olevien kuulien (*short-range radiation*) geometriaa arvioidaan yhdensuuntaisina tasolevyinä, jotka ovat diffuuseja, harmaita emittoijia samoilla emissiviteeteillä. Säteilyteho pintojen välillä on

$$Q_r = \frac{A_s \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{2-2\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{1}{F_{1-2}}} \tag{4.11}$$

jossa ε on kuulien emissiviteetti, σ Stephan-Boltzmannin vakio, A_s kummankin kuulan pinta-ala ja F_{12} näkyvyyskerroin kuulasta toiseen. Toinen kuulista on lämpötilassa T_1 ja toinen lämpötilassa T_2.

Wakao et al. (1969) antaa tälle näkyvyyskertoimelle F_{12} arvon 0,1511, kun kyseessä on kahden puolipallon geometria. Yhdensuuntaisten levyjen eli kokonaisten pallojen tapauksessa F_{12} = 0,0756.

Kuulien keskipisteiden välinen etäisyys on L_r ja säteilyn johtumiskerroin kosketusetäisyydelle $k_e^{r,S}$ kirjoitetaan

$$k_e^{r,S} = \frac{Q_r L_r}{A_r (T_1 - T_2)} \tag{4.12}$$

jossa $A_r = d_p^2$ (*radiation conduction area*). Kaavaa (4.12) pitää muokata vastatakseen *Multi-sphere Unit Cell* -mallin mukaista tasetilavuutta sekä säteensuuntaista lämmönsiirtoa. Sisällyttämällä keskimääräistä kontaktikulmaa $\bar{\phi}_c$ ja koordinaatiolukua $\bar{N}_c$ yhtälöön (4.12), kyseinen yhtälö saa uuden muodon.

$$k_e^{r,S} = \frac{2\bar{N}_c d_p \sigma A_s \bar{T}^3}{A_r \left(\frac{2-2\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{1}{F_{1-2}}\right)} f_k \sin \bar{\phi}_c \tag{4.13}$$

jossa $A_s = 4\pi d_p^2$ on kuulan pinta-ala ja $\bar{T}$ on pintojen lämpötilojen keskiarvo. f_k on korjauskerroin emissiviteetin funktiona, johon syvennytään myöhemmin osiossa 4.1.4. Yhtälölle 4.13 on annettu ehto keskilämpötilalle ja lämpötilaerolle ΔT.

$$\Delta T / \bar{T} = |T_1 - T_2| / \bar{T} \ll 1 \tag{4.14}$$

Ehdon (4.14) toteutuessa approksimaatio on muotoa

$$4\bar{T}^3 \approx \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \tag{4.15}$$

[van Antwerpen et al., 2012, s. 191]

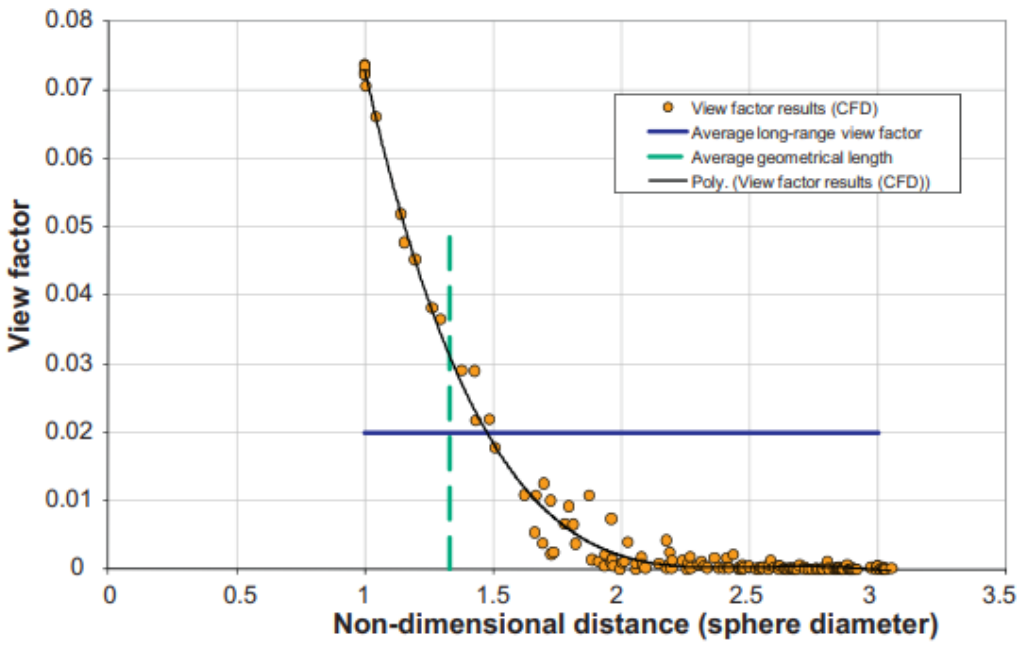
Pidemmän kantaman säteilyä (*long-range radiation*) käsitellään keskimääräisellä näkyvyyskertoimella (*average long-range diffuse view factor*). Se on kuitenkin käytössä vain keskusalueella. Lähiseinämäalueella sen määrittäminen käy monimutkaiseksi, kun se vaihtelee suuresti välillä 0,5 < z < 5. Keskusalueella porositeetti pysyy samana ja siten myös ko. näkyvyyskerroin. [van Antwerpen et al., 2012, s. 191]

Näkyvyyskerroin arvo pienenee arvoon 0 kuulien välisen etäisyyden z_r arvon ollessa lähellä 2,25. Approksimaatio näkyvyyskertoimelle $F_{1-2,avg}^L$ lasketaan keskimääräisellä geometrisella etäisyydellä $z_{r,avg}$

$$F_{1-2,avg}^L = \frac{\int_1^{2,25} F_{1-2}^L(z_r)dz_r}{1,25} \tag{4.16}$$

$$z_{r,avg} = \frac{\int_1^{2,25} F_{1-2}^L(z_r)dz_r}{0,0756} + 1 \tag{4.17}$$

Kuvaan 8 sovitetusta käyrästä saadaan keskusalueen keskimääräiselle näkyvyyskertoimelle ja geometriselle etäisyydelle arvot $F_{1-2,avg}^L = 0,0199$ ja $z_{r,avg} = 1,33$.



Kuva 8. Pitkän etäisyyden näkyvyyskerroin kuulien välillä *bulk*-alueella. Muokattu lähteestä [van Antwerpen et al. 2012 s. 192].

Oletuksina ovat yhtälö (4.14) ja, että korjauskerroin f_k pysyy vakiona kuulien välisestä etäisyydestä riippumatta. Säteilyn johtumiskerroin pidemmälle etäisyydelle $k_e^{r,L}$ kirjoitetaan

$$k_e^{r,L} = \frac{4(1{,}33d_p)\sigma A_s \bar{T}^3 \bar{n}_{long}}{A_r\left(\frac{2-2\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{1}{F_{1-2,avg}^{L}}\right)} f_k \tag{4.18}$$

$\bar{n}_{long}$ ilmaisee niiden kuulien lukumäärää, joilla on vaikutusta pitkän etäisyyden säteilyyn.

4.3.2 Seinämäalue

Niin kapealla vyöhykkeellä kuin kuvassa 9 havainnollistetulla alueella $0 \leq z \leq 0{,}5$, tasetilavuuden geometria on selvästi erilainen verrattuna keskus- ja lähiseinämäalueisiin, koska tarkasteltavaa kuulaa ympäröi muiden kuulien lisäksi seinä välittömässä läheisyydessä. Siksi seinän ja kuulan välistä säteilylämmönsiirtoa on huomioitava *Multi-sphere Unit Cell* -laskennassa. Aiemmin esitetty yhtälö (4.3) efektiiviselle johtumiskertoimelle k_e^r on suunnattu keskus- ja lähiseinämäalueille, joten seinäalueen efektiiviselle johtumiskertoimelle $k_e^{r,W}$ on oma yhtälönsä.

$$k_e^{r,W} = k_e^{r,S,W} + k_e^{r,L,W}$$

jossa $k_e^{r,S,W}$ on toisiaan koskettavien kuulien ja seinän säteilyä käsittelevä kerroin seinäalueella ja $k_e^{r,L,W}$ on säteilykerroin kauimmaisempiin kuuliin. Näistä johtumiskerroista ensimmäinen lasketaan kaavalla

$$k_e^{r,S,W} = \frac{Q_r L_r^W}{A_r(T_1 - T_2)} \tag{4.19}$$

jossa T_1 on lämpötila kuulan keskipisteessä, T_2 seinän pintalämpötila ja $L_r^W = d_p/2$. Tässä tilanteessa kuulakeon rakoisuus voidaan jättää huomiotta. Kaava (4.19) saa uuden muodon

$$k_e^{r,S,W} = \frac{2d_p\sigma\bar{T}^3}{A_r\left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}^{S,W}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}\right)} \tag{4.20}$$

jossa ε_1 ja ε_2 ovat kuulan ja ulomman seinän emissiviteetit vastaavasti sekä A_2 kyseisen seinän efektiivinen pinta-ala. Pitso (2009) on antanut näkyvyyskertoimelle $F_{1-2}^{S,W}$ arvon 0,315, kun ulomman seinän kaarevuutta todetaan merkityksettömäksi. Tuntemattomaksi jäävä pinta-ala A_2 saadaan soveltamalla käänteislakia

$$A_1 F_{1-2}^{S,W} = A_2 F_{2-1}^{S,W} \tag{4.21}$$

jossa $F_{2-1}^{S,W} = 0{,}01976$ on arvio näkyvyyskertoimelle seinästä kuulaan [Pitso, 2009]. Saadaan

$$A_2 = \frac{A_1 F_{1-2}^{S,W}}{F_{2-1}^{S,W}} = 63{,}77\pi r_p^2 = 15{,}9425\pi d_p^2 \tag{4.22}$$

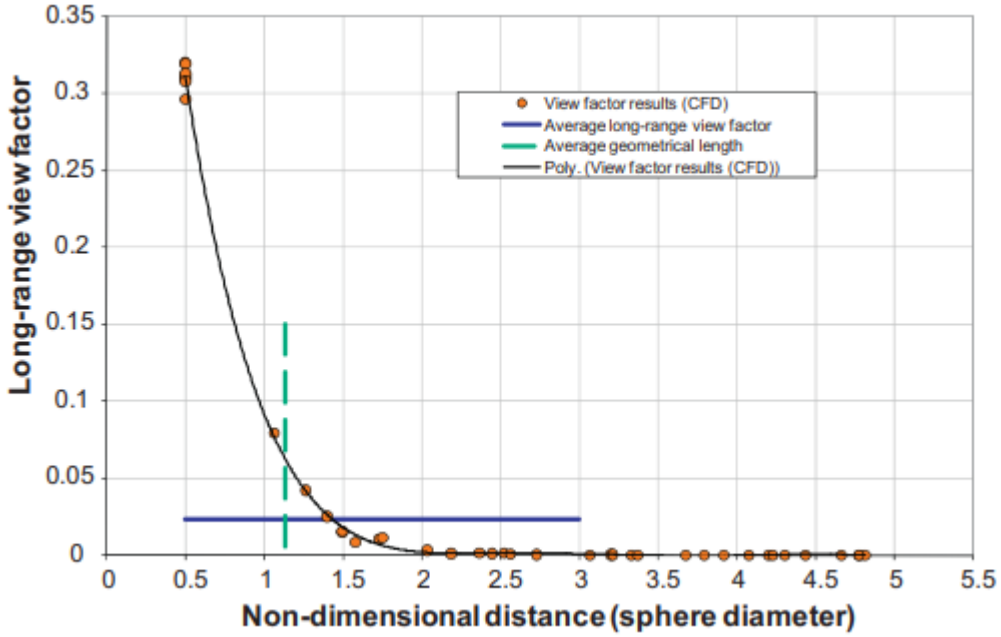
[van Antwerpen et al. 2012 s. 192-193].

Pidemmän etäisyyden säteilyä käsitellään samoilla periaatteilla kuin osiossa 4.1.2. Keskimääräinen näkyvyyskerroin kuulasta seinään $F_{1-2,avg}^{L,W}$ ja keskimääräinen geometrinen pituus $z_{r,avg}^W$ lasketaan kaavoilla.

$$F_{1-2,avg}^{L,W} = \frac{\int_{1,065}^{2} F_{1-2}^{L,W}(z_r^W)dz_r^W}{0{,}935} \tag{4.23}$$

$$z_{r,avg}^W = \frac{\int_{1,065}^{2} F_{1-2}^{L,W}(z_r^W)dz_r^W}{0{,}315} + 1{,}065 \tag{4.24}$$

Kuvasta 9 saadaan $F_{1-2,avg}^{L,W} = 0{,}02356$ ja $z_{r,avg}^W = 1{,}134$.



Kuva 9. Pitkän etäisyyden näkyvyyskerroin kuulan ja seinän välillä seinäalueella. Muokattu lähteestä [van Antwerpen et al. 2012 s. 193]. Alkuperälähde [Pitso, 2009].

Oletuksina ovat yhtälö (4.14) ja, että korjauskerroin f_k pysyy vakiona kuulien välisestä etäisyydestä riippumatta. Säteilyn johtumiskerroin pidemmälle etäisyydelle $k_e^{r,L}$ kirjoitetaan

$$k_e^{r,L,W} = \frac{4(1{,}134 d_p)\sigma A_s \bar{T}^3 \bar{n}_{long}^W}{A_r\left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2,avg}^{S,W}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}\right)} f_k \tag{4.18}$$

jossa $\bar{n}_{long}^W$ (*long-range coordination flux number in the wall region*) on empiirisesti määritetty.

Seinän efektiivinen A_2 saadaan soveltamalla jälleen käänteislakia

$$A_2 = \frac{A_1 F_{1-2}^{L,W}}{F_{2-1}^{L,W}} = 63{,}68\pi r_p^2 = 15{,}92\pi d_p^2 \tag{4.22}$$

jossa $F_{1-2}^{L,W} = 0{,}02356$ ja $F_{2-1}^{L,W} = 0{,}00148$. [van Antwerpen et al. 2012 s. 193]

4.3.3 Kuulien johtumisen vaikutus lämpösäteilyyn

Singh ja Kaviany (1994) huomasivat, että muuttuva terminen johtavuus vaikuttaa vahvasti kuulien väliseen säteilylämmönsiirtoon. Tätä kompensoidakseen he esittävät parametrin, kiinteän aineen dimensiottoman johtumiskertoimen Λ_s

$$\Lambda_s = \frac{k_s}{4 d_p \sigma T^3} \tag{4.23}$$

jossa k_s on kuulamateriaalin lämmönjohtavuus ja T yksittäisen kuulan lämpötila. Edellä esitetty parametri on tarpeen, koska kuulien pinnoilla voi olla merkittäviä lämpötilagradientteja k_s:n muuttuessa. Tällöin efektiivinen säteilykerroin k_e^r ei muutu suoraan verrannollisesti lämpötilan kuutioon, kuten edellä esitetyt yhtälöt säteilykertoimelle kuvaavat.

Multi-sphere Unit Cell -mallissa käytetään korjauskerrointa f_k, jonka korrelaatiot ovat muodostettu numeerisesti.

$$f_k = a_1 \tan^{-1}\left(a_2 \left(\frac{1}{\Lambda_s}\right)^{a_3}\right) + a_4 \tag{4.25}$$

$$a_1 = 0{,}0841\varepsilon^2 - 0{,}307\varepsilon - 0{,}1737 \tag{4.26}$$

$$a_2 = 0{,}6094\varepsilon + 0{,}1401 \tag{4.27}$$

$$a_3 = 0{,}5738\varepsilon^{-0{,}2755} \tag{4.28}$$

$$a_4 = 0{,}0835\varepsilon^2 - 0{,}0368\varepsilon - 1{,}0017 \tag{4.29}$$

Pätevyysalueet korrelaatiolle ovat $0{,}2 \leq \varepsilon \leq 1$ ja $0{,}01 \leq 1/\Lambda_s \leq 10$. Korjauskertoimen oletetaan olevan sama lyhyen ja pitkän kantaman säteilyssä. [van Antwerpen et al., 2012, s. 194]

4.4 *Black surface* -malli

Tässä mallissa kaikkien kuulien ja seinien pinnat oletetaan joko mustiksi tai harmaiksi, diffuuseiksi. Lisäksi emissiviteetti on vakio kaikilla lämpötiloilla ja aallonpituuksilla. [Wu et al. 2020]

Nettosäteilyteho kahden mustan kappaleen i ja j välillä ilmaistaan yhtälöllä

$$Q_{r.ij} = \frac{J_i - J_j}{R_{ij}} = \frac{E_{b,i} - E_{b,j}}{1/\left(A_i F_{ij}\right)} = A_i F_{ij} \sigma \left(T_i^4 - T_j^4\right) \tag{4.30}$$

jossa F_{ij} on näkyvyyskerroin. Kuulan energiatase ilman konvektiota tai johtumista kirjoitetaan muotoon

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} \left(Q_{r,ij}\right) - Q_{s,i} = 0 \tag{4.31}$$

jossa $Q_{s,i}$ on kuulan tuottama lämpöteho. Yhtälöitä (4.30) ja (4.31) yhdistämällä sekä summalakia (3.7) soveltamalla saadaan

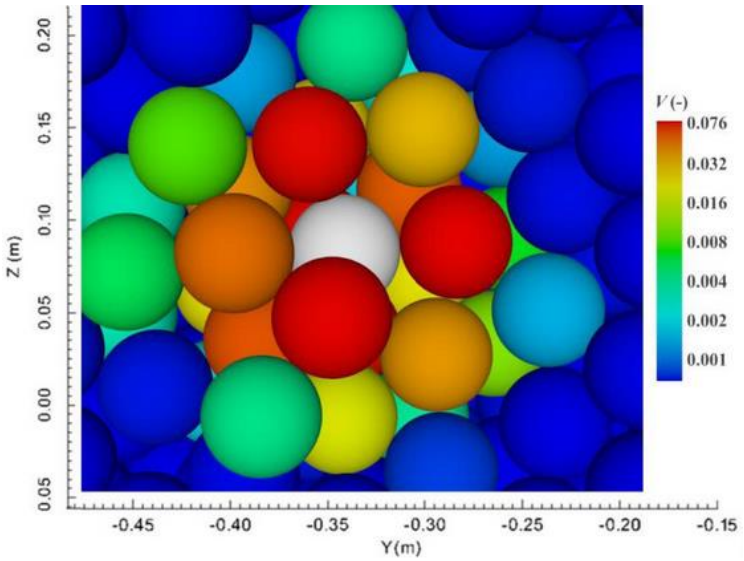
$$T_i^4 = \sum_{j=1}^{n} \left(F_{ij} T_j^4\right) + \frac{Q_{s,i}}{\sigma A_i} \tag{4.32}$$

Tarvittavat näkyvyyskertoimet lasketaan simulaatiolla Voronoin tesselaatiolla. Wu et al. osoittavat riittäväksi oletusta, että tarkasteltavaa kuulaa (kuvassa 10 valkoisena) ympäröivät kuulat kolmessa vyöhykkeessä muodostavat ontelon, jonka sisällä näkyvyyskertoimet lasketaan. Kuulien pakkautumista simuloidaan LIGGGHTS-ohjelmalla. [Wu et al., 2020]

Lämpötilajakauma saadaan soveltamalla yhtälöä (4.32) iteratiivisella laskennalla. Kuulan tuottama lämpöteho $Q_{s,i}$ aiheuttaa vaihtelevuutta tuloksissa, mutta jos se on hyvin pieni, säteilyn efektiivinen johtumiskerroin on vakio koko keossa. Jos kuulakeon pohja ja katto ovat adiabaattisia, ja ulkoseinän lämpötila pidetään vakituisena, säteittäinen lämpötila jakauma voidaan ilmaista yhtälöllä

$$T(r) = T_w + \frac{q_{v,avg}}{4k_r}\left(R_w^2 - r_2\right) \tag{4.33}$$

jossa $q_{v,avg}$ on kuulakeon keskimääräinen lämpötehotiheys, T_w ulkoseinän lämpötila säteellä R_w ja k_r säteilyn effektiivinen johtumiskerroin. [Wu et al., 2020]



Kuva 10. Paikallisen näkyvyyskertoimen jakauma kuulakeossa. Muokattu lähteestä [Wu et al., 2016]

4.5 *Particle scale radiation* -malli

Particle scale radiation on matemaattisesti samanlainen kuin *Black surface radiation* -malli, mutta laskennallisesti se pohjautuu CFD- ja DEM-simulaatioon. Jokainen kuula käsitellään erillisenä elementtinä ja sen säteilyteho määräytyy ympärillä olevien kuulien lämpötiloista. Lisäksi termisillä vastuksilla on näkyvä rooli *Particle scale radiation* -mallissa verrattuna edellisissä osioissa esitettyihin malleihin. [Wu et al., 2020]

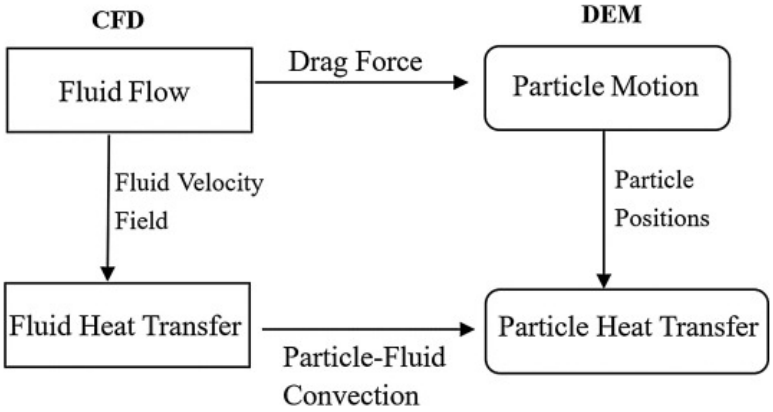
Tässä mallissa on oleellista käsitellä kuulien säteilyn lisäksi niiden mekaniikka, liikettä sekä jäähdytteen vaikutusta kuuliin. Kuulakeon simulaatiolle on esitettynä vuokaavio kuvassa 11. DEM-laskennassa kuulan liikettä ja lämmönsiirtoa ilmaistaan ala olevilla yhtälöillä [Wu et al., 2020]

$$m_i \frac{d\boldsymbol{u}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n} \left(\boldsymbol{F}_{t,ij}\right) + \sum_{j=1}^{n} \left(\boldsymbol{F}_{n,ij}\right) + \boldsymbol{F}_j + m_i \boldsymbol{g} \tag{4.34}$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \boldsymbol{R}_i \times \sum_{j=1}^{n} \left(\boldsymbol{F}_{t,ij}\right) + \boldsymbol{M}_r \tag{4.35}$$

$$m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{k=1}^{m} \left(H_{ik}(T_k - T_i)\right) + h_f A_i \left(T_f - T_i\right) + \sum_{j=1}^{n} Q_{r,ij} + Q_{s,i} \tag{4.36}$$

jossa $\boldsymbol{u}_i$ ja T_i ovat kuulan *i* nopeus ja lämpötila ajankohdalla *t*, $c_{p,i}$ ominaislämpökapasiteetti, I_i hitausmomentti, m_i massa, ω_i kulmanopeus, $\boldsymbol{M}_r$ vierimiskitkasta syntyvä momentti, $\boldsymbol{F}_{t,ij}$ tangentiaalinen kontaktivoima ja $\boldsymbol{F}_{t,ij}$ säteittäinen kontaktivoima. $\boldsymbol{F}_j$ on kuulien virtauksesta syntyvä voima (*particle-fluid interaction force*) ja $\boldsymbol{g}$ putoamiskiihtyvyyden vektori. $Q_{r,ij}$ kuulan lämpövirta ja $Q_{s,i}$ kuulan tuottama lämpöteho. H_{ik} on kontaktia käsittelevä lämmönsiirtokerroin. [Wu et al., 2020]



Kuva 11. CFD-DEM-simulaation vuokaavio yksinkertaistettuna. Muokattu lähteestä [Wu et al., 2020]

Säteilyteho kahden kuulan välillä määritetään säteilyvastusverkkoa soveltaen

$$Q_{r,ij} = \frac{\sigma T_i^4 - \sigma T_j^4}{R_{s,i\to j} + R_{v,i\to j} + R_{s,j\to i}} \tag{4.37}$$

$$R_{s,i\to j} = \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i}\frac{1}{A_i F_{ij}} \tag{4.38}$$

$$R_{v,i\to j} = \frac{1}{A_i F_{ij}} \tag{4.39}$$

$$R_{s,j\to i} = \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j}\frac{1}{A_j F_{ji}} \tag{4.40}$$

Emissiviteetin ollessa vakio yhtälö (4.37) voidaan yksinkertaistaa muotoon

$$Q_{r,ij} = \frac{1}{2/\varepsilon - 1}\sigma A_i F_{ij}\left(T_i^4 - T_j^4\right) \tag{4.41}$$

Tiiviisti pakatussa kuulakeossa kiinteän aineen lämmönjohtavuudella on vaikutusta säteilyyn, joten sitä ei voida jättää huomiotta simulaatiossa. Siksi Wu et al. (2020) suosittelee yhtälöä (4.42) samankokoisilla kuulilla tiivisti kasatulle keolle, ja ekvivalentti emissiviteetti lasketaan

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_i\left(\varphi + \frac{1-\varphi}{\Lambda_0 + 1}\right) \tag{4.42}$$

$$\Lambda_0 = \frac{4\sigma\varepsilon_i d_p T^3}{k_s} \tag{4.43}$$

joissa ε_i on kuulan i emissiviteetti, φ porositeetti ja k_s kuulan lämmönjohtavuus. [Wu et al., 2020

5 Mallien soveltuvuus kuulakekoreaktorin analyyseihin

Validoinnilla pyritään todentamaan, että esitetyt laskentamallit ovat päteviä valituilla lämpötila-alueilla. Tämän työn kirjoittaja ei itse tee validointia, sillä käytetyissä lähteissä on omat sisältönsä laskentamallien validoinnille.

Näissä lähteissä validointi nojautuu kokeellisten kuulakekojen tutkimusdatoihin ja niihin pohjautuviin empiirisiin korrelaatioihin.

5.1 *Multi-sphere Unit Cell* -malli

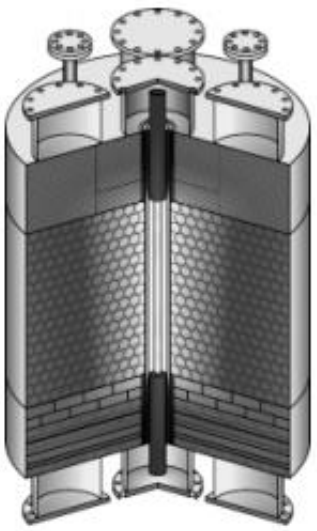
SANA-1 (kuvassa 12) kokeellisen kuulakeon mittausdata valittiin validoimaan *Multi-sphere Unit Cell* -mallia satunnaisesti kasatulle kuulakeolle. Mittausdatan rajoitteena oli, että jäähdytekaasu oli lähellä 1 atm paineessa. Tämän takia konvektiolla oli vaikutusta efektiivisen johtumiskertoimen arvoihin. [van Antwerpen et al. 2012]

Kokeellinen kuulakeko oli eristetty pohjasta ja katosta maksimoidakseen säteensuuntaista lämmönsiirtoa [Niessen ja Ball, 2000]. Mittausdata oli peräisin kahdesta eri kuulakeon ajosta, lämpötehon ollessa 10 kW ja 30 kW. Mittausdatasta on poimittu efektiivinen johtumiskerroin määritettiin kahdelle stationääriselle tilalle seuraavalla kaavalla [van Antwerpen et al. 2012]

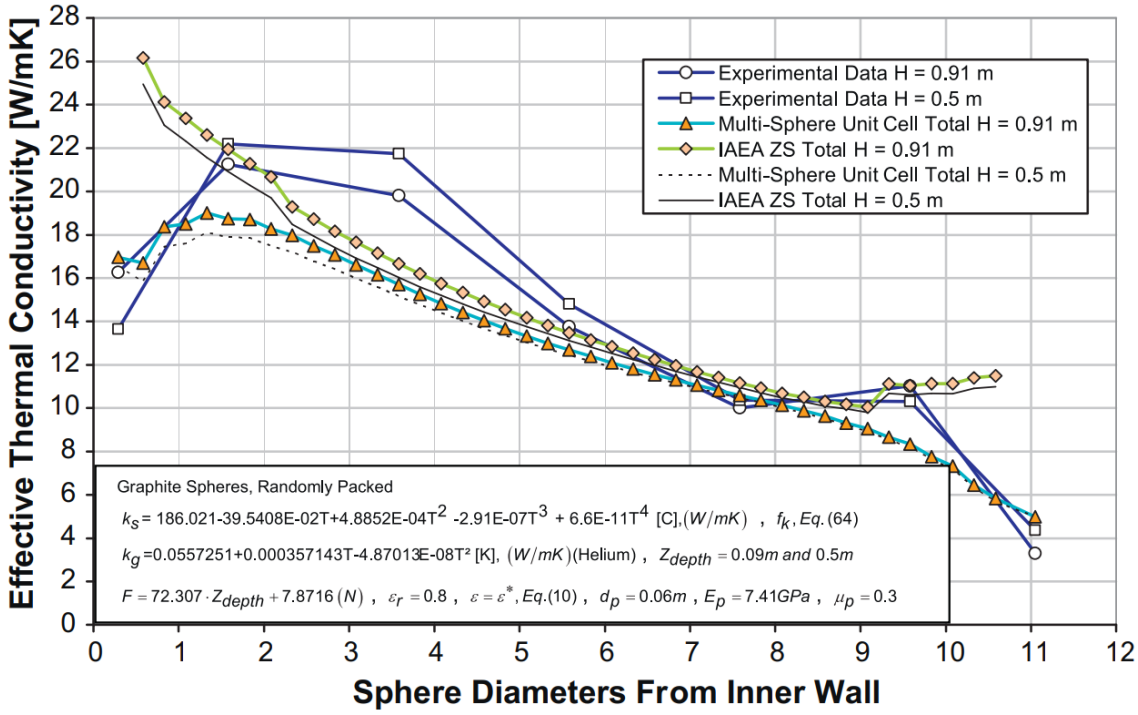
$$k_{eff}\Big|_{r_i}^{r_{i+1}} = \left|\frac{Q\ \ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi L_{bed}(T_{i+1}-T_i)}\right| \tag{5.1}$$

jossa r_{i+1} ja r_i, ovat pisteiden i ja i+1 etäisyydet kuulakeon sisäseinämästä, T_i ja T_{i+1} lämpötilat samoissa pisteissä sekä L_{bed} kuulakeon korkeus 1 m. Saatu johtumiskerroin k_{eff} sijoitetaan pisteiden puoleen väliin. [van Antwerpen et al. 2012]

Kuvassa 13 kokeelliseen dataan vertaillaan tätä käsiteltävää laskentamallia sekä Niessenin ja Ballin ehdottamaa korrelaatiota, johon viitataan nimellä *IAEA ZS Total* [Niessen ja Ball, 2000, s. 296-304]. Kuvista näkee, että mallintaminen on tehty kahdella korkeudella 0,5 m ja 0,91 m. Kuvissa on myös esitetty muun muassa materiaaliominaisuuksia, kuuliin kohdistuvia kontaktivoimia, emissiviteetti ja porositeetti. [van Antwerpen et al. 2012]



Kuva 12. SANA-1-kuulakeon keskellä on pystysuuntainen lämmityselementti. Kuulakeko on pohjalta ja katolta eristetty. Muokattu lähteestä [Niessen ja Ball, 2000]

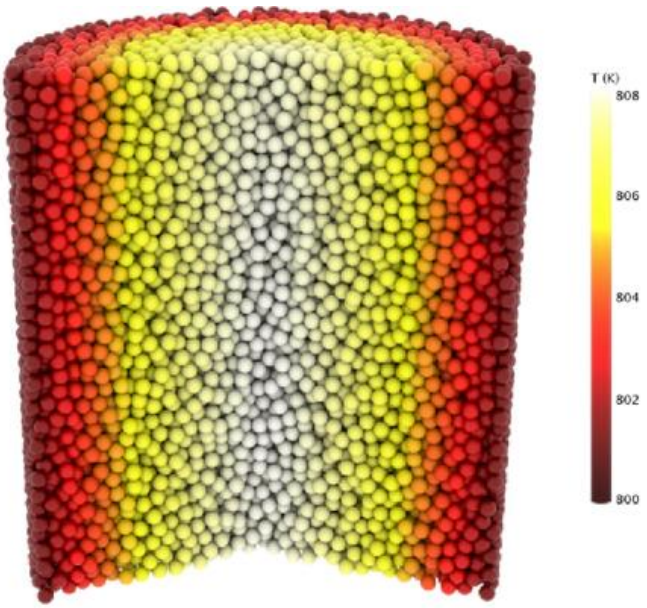


Kuva 13. Vertailu laskentamallien ja kokeellisen datan välillä, kun kuulakeon stationäärinen lämpöteho on 35 kW. Muokattu lähteestä [van Antwerpen et al. 2012 s. 199]

Multi-Sphere Unit Cell -mallista saatavat efektiiviset johtumiskertoimet poikkeavat suuresti kokeellisesta datasta, etenkin etäisyyksillä 3,5d_p ja 9,5d_p sisäseinämästä. Etäisyydellä 0-1d_p laskentamalli antaa katkonaista nousua. Laskentamalli seuraa hyvin kokeellista dataa välillä 7-8d_p. *IAEA ZS Total* puolestaan onnistuu seuraamaan kokeellisen datan käyriä vain välillä 7-8d_p. [van Antwerpen et al. 2012]

5.2 *Black Surface* -malli

Wu et al. valitsivat pienen HTR-10 koereaktorin (kuvassa 14) validoidakseen *Black Surface* -mallia. Kuulakeon simulointi suoritetaan LIGGGHTS-ohjelmalla, ja lämpötilajakauma saadaan iteratiivisena ratkaisuna soveltamalla yhtälöä (4.32) sekä laskemalla näkyvyyskertoimet. [Wu et al., 2020]

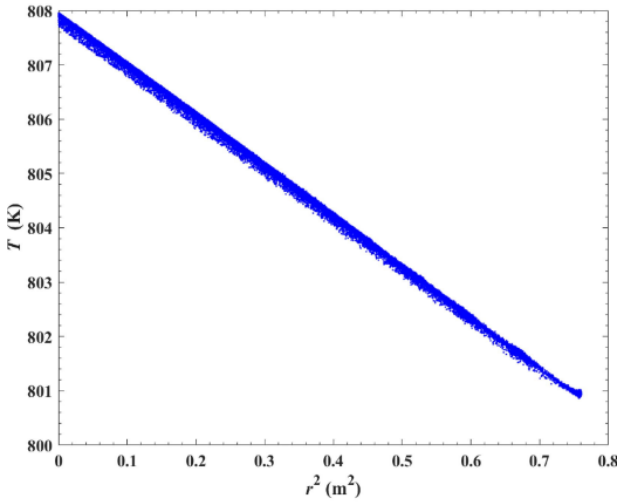


Kuva 14. Lämpötilajakauma HTR-10-reaktorin kuulakeossa. Muokattu lähteestä [Wu et al. 2020]

Säteilyn efektiivinen johtumiskerroin k_r saadaan yhtälön (4.33) lineaarisella sovituksella. Wu et al. huomauttavat, että efektiivinen johtumiskerroin on suoraan verrannollinen lämpötilan kuutioon T^3. Dimensioton lämmönsiirtokerroin saadaan siten kaavaa (4.11) soveltaen. [Wu et al. 2020]

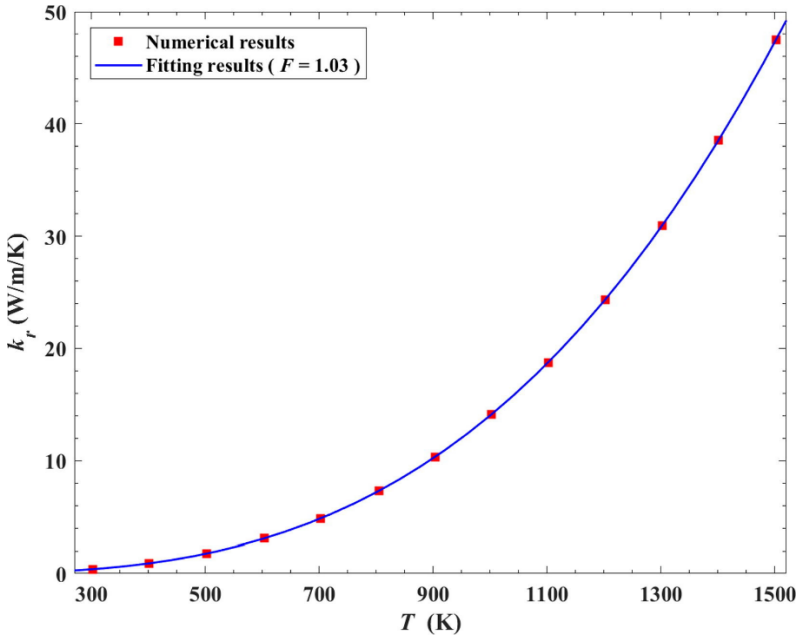
$$F_E = \frac{k_r}{4 d_p \sigma T_m^3} \tag{4.11}$$

Numeeriset tulokset esitettään kuvassa 15, kun kuulan tuottama lämpöteho $Q_{s,i}$ on 0,05 W ja ulkoseinän lämpötila T_w 800 K.



Kuva 15. Kuulakeon lämpötila säteen funktiona. Muokattu lähteestä [Wu et a. 2020]

Kuulakeon erisuuruisista keskimääräisistä lämpötiloista ja niitä vastaavista efektiivistä lämmönsiirtokertoimista saadaan piirrettyä kuvaaja 16, jossa dimensioton lämmönsiirtokerroin saa arvon 1,03. [Wu et al., 2020]



Kuva 16. Efektiivinen lämmönsiirtokertoimen ja kuulakeon keskimääräisen lämpötilan välinen riippuvuus. Muokattu lähteestä [Wu et al., 2020]

Dimensiotonta lämmönsiirtokerrointa tarkastellessa *Black Surface* -malli on todettu olevan sovussa taulukossa 1 olevien korrelaatioiden ja laskentamallien kanssa, jotka käsittelevät mustan kappaleen säteilyä. [Wu et al., 2020]

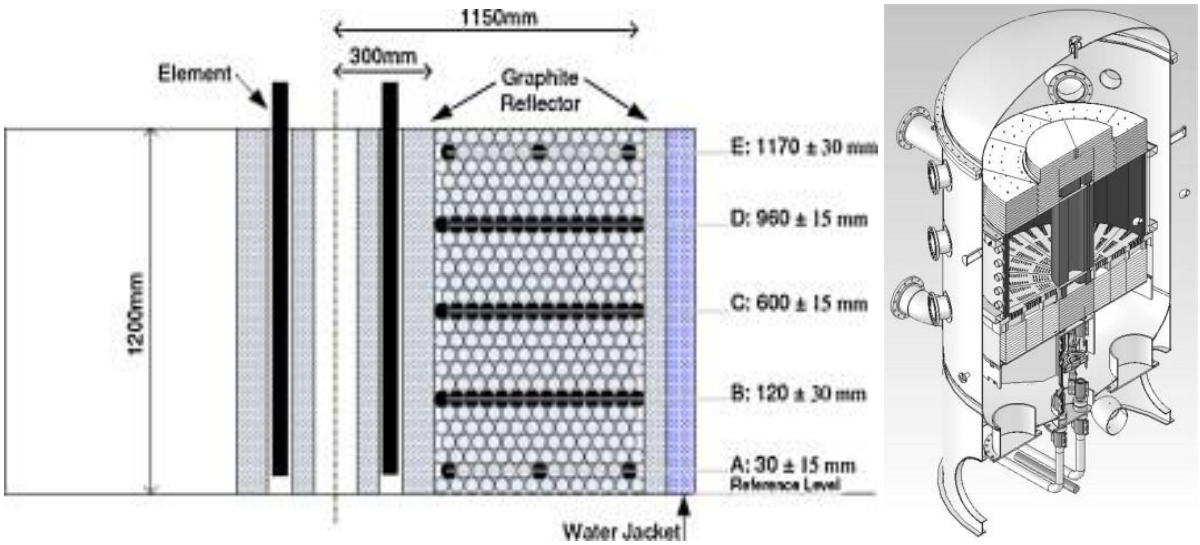
Taulukko 1. Lämmönsiirtokertoimet kuulakeon säteilylle emissiviteetillä 1. [Wu et al., 2020]

Malli/Korrelaatio	**Dimensioton lämmönsiirtokerroin F_E**
Argo-korrelaatio	1,0
Wakao-korrelaatio	1,15
Vortmeyer-korrelaatio	1,12
Nasr-korrelaatio	1,0
Two flux -malli	1,11
Sub cell radiation -malli	1,14
Black surface -malli	1,03

5.3 *Particle scale radiation* -malli

Wu et al. validoivat High Temperature Test Unit -koelaitoksen (HTTU) datalla [Rousseau et al., 2014] *Particle scale radiation* -mallia [Wu et al., 2020].

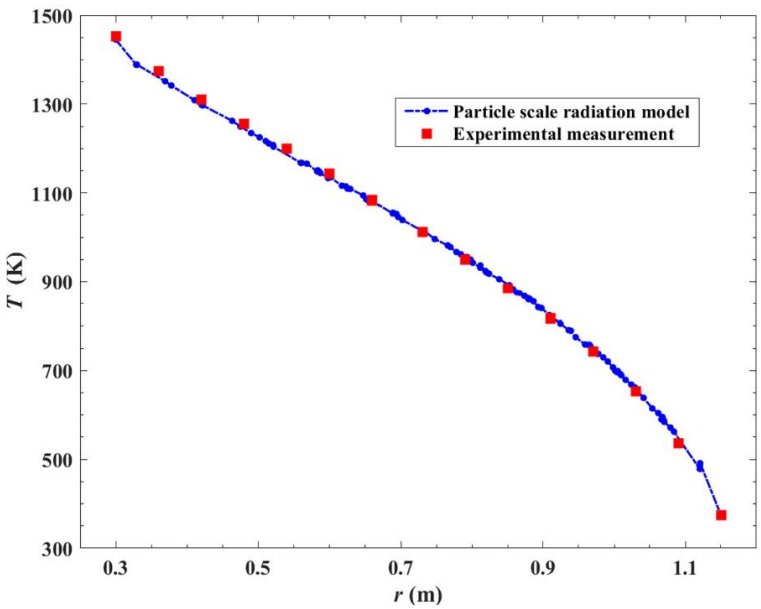
Kyseisessä kuulakeossa ei ole ollenkaan fissiiliä ainetta, vaan tarvittava lämpöteho saadaan keskelle kekoa asennetusta lämpövastuksesta. Kuulakeko on rengasmaisesti kasattu grafiittikuulista, joiden halkaisija on 60 cm. Kuulakekoa ympäröi sisältä ja ulkoa grafiittiset seinät. Lämpövastus on sisemmän seinän ympäröimä ja ulkoseinä jäähdytetään vedellä. Aksiaalisen lämmönsiirron minimoiseksi kuulakeon pohja ja katto on eristetty. Kokeet suoritettiin melkein tyhjiön olosuhteissa, jossa on typpikaasua 10 kPa paineessa. Näin konvektion vaikutus jää merkityksettömäksi. Koeyksikön rakenne esitetään tarkemmin kuvissa 17 ja 18. [Rousseau et al., 2014]



(a) **(b)**

Kuva 17. (a) Läpileikkausprofiili HTTU:sta. [Rousseau et al., 2014]. (b) Yksityiskohtaisempi läpileikkaus HTTU:sta. [Rousseau et al., 2014]

HTTU:lla toistettiin useita kokeita [Rousseasu et al., 2014]. Toisaalta Wu et al. käsittelivät yhden kokeen dataa, jossa nettolämmitysteho oli 66,4 kW. Validoinnissa saatu lämpötilajakauma esitetään kuvassa 19. *Particle scale radiation* -mallin todetaan vastaavan hyvin kokeellista dataa. Kyseinen laskentamalli osoittautuu päteväksi. [Wu et al., 2020]



Kuva 19. Säteensuuntainen lämpötilajakauma HTTU-kuulakeossa. Muokattu lähteestä [Wu et al., 2020]

6 Johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli etsiä laskentamalleja kuulakekoreaktorin säteilylämmönsiirron ratkaisemiseen ja arvioida niiden soveltuvuutta kyseiseen tarkoitukseen. Esitetyistä laskentamalleista *Black surface* ja *Particle scale radiation* ovat osoitettu tarkoiksi validoinnin kautta sillä huomiolla, että laskentamalleissa on tehty yksinkertaistuksia. Varsinaisen kuulakeon säteilylämmönsiirron mallintamisessa on siis vielä paljon kehitettävää, jos niitä aiotaan soveltaa täysmittaiselle kuulakekoreaktorille.

Kandidaatintyössä esitettyjen laskentamallien validointi saa tukea lähinnä kokeellisten kuulakekojen mittausdatasta, joista kahdessa lämpö virtaa keskellä olevasta lämpövastuksesta ulos kuulakeosta. Näiden kuulakekojen lisäksi oli HTR-10-reaktori, joka käytti fissiilistä polttoainetta. Varsinaisissa kuulakekoreaktoreissa polttoainekuulien oma vaihteleva lämpöteho vaikuttaisi vahvasti säteilylämmönsiirtoon. Kuulien lämmönjohtuminen ja jäähdytteen konvektio ovat omiaan hankaloittamaan lämpösäteilyn mallintamista, vaikka lämpösäteily on vallitseva ilmiö korkeissa lämpötiloissa. Siksi on kätevää sisällyttää lämmönsiirtomekanismit yhteen suureeseen, efektiiviseen johtumiskertoimeen. *Multi-sphere Unit Cell* -mallissa kosketuksessa olevat kuulat käsitellään tasolevyinä, mikä vääristää näkyvyyskertoimen arvoa. Laskentamalli on lopulta paljon monimutkaisempi kuin kaksi muuta. *Black surface* -mallissa efektiivinen lämmönjohtavuus oletettiin vakioksi, jolloin vertailu jäi dimensiottoman lämmönsiirtokertoimen varaan. *Particle scale radiation* -mallissa huomioitiin säteilyn lisäksi kuulien johtumista ja jäähdytteen konvektiota osana CFD-DEM-laskentaa.

Laskentamalleissa emissiviteetti oletetaan vakioksi, vaikka todellisuudessa se on vahvasti riippuvainen lämpötilasta ja sitä kautta säteilyn aallonpituudesta λ. Lähtevän säteilyn suunnallakin eli avaruuskulmalla on vaikutusta emissiviteetin arvoon. Kaikkia suuntia ja aallonpituuksia huomioiden emissiveetti $\varepsilon(T)$ lämpötilassa T (*hemispherical total emissivity*) lasketaan kolmoisintegraalilla (6.1) [Howell et al., 2015]

$$\varepsilon(T) = \frac{1}{\pi\sigma T^4}\int_{\lambda=0}^{\infty}\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}}\left[\varepsilon_\lambda(T,\phi,\theta)E_{b,\lambda}(T,\lambda)d\lambda\right]\cos\theta\sin\theta\, d\phi d\theta \qquad (6.1)$$

jossa ε_λ ja $E_{b,\lambda}$ ovat emissiviteetti ja mustan kappaleen emissioteho määrätyllä aallonpituudella. Kirjallisuudesta löytyy emissiviteetin laskemiseksi lisää yhtälöitä, erikseen

tietylle kulmalle, lämpötilalle ja aallonpituudelle, mutta niiden käsittely rajattiin tämän kandidaatintyön ulkopuolelle. Jo yhtälön (6.1) käyttö vaatii valtavasti mittausdataa siitä, mikä on pinnan emisiiviteetti milläkin aallonpituudella, missä suunnassa ja missä lämpötilassa.

Muut merkittävät suureet lämpösäteilyssä ovat pinnan absorbtiokerroin ja heijastuskerroin, joita ei ole huomioitu ollenkaan laskentamalleissa.

LÄHTEET

Almusafir, R. S. et al. (2023) Review of the Fluid Dynamics and Heat Transport Phenomena in Packed Pebble Bed Nuclear Reactors. Nuclear science and engineering. [Online] ahead-of-print (ahead-of-print), 1–37.

Bergman, T. L. et al. (2017) Incropera's principles of heat and mass transfer. Global edition. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

De Klerk, A., 2003. Voidage variation in packed beds at small column to particle diameter ratio. AIChE 49, 2022–2029.

Du Toit, C.G., Van Antwerpen, W., Rousseau, P.G., 2009. Analysis of the porous structure of an annular pebble bed reactor. In: ICAPP 2009 Conference, Paper ID 9123.

Howell, J. R. et al. (2015) Thermal radiation heat transfer. Sixth edition. Boca Raton, FL: CRC Press, an imprint of Taylor and Francis.

International Atomic Energy Agency. 2001. Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology. Nuclear Power Technology Development Section. Wien, Itävalta. 259 s. ISSN: 1011-4289

International Atomic Energy Agency. 2013. Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark Analysis Related to the PBMR-400, PBMM, GTMHR, HTR-10 and the ASTRA Critical Facility. Nuclear Power Technology Development Sector. Wien, Itävalta. 676 s. ISBN: 978-92-0-137610-7

International Atomic Energy Agency. 2011. Status report 70 – Pebble Bed Modular Reactor (PBMR). Advanced Reactors Information System (ARIS)

Kadak A.C. 2005. A future for nuclear energy: pebble bed reactors. Int. J. Critical Infrastructures, Vol. 1. Nro. 4. s. 330-345.

Langston, L. S. (2014). A path for nuclear power: a novel but tested technology, the pebble-bed reactor, can make fission energy safe. American scientist. 102 (2), 90–.

Niessen, H.F., Ball, S., 2000. IAEA-TECDOC-1163. Heat Transport and Afterheat Removal for Gas Cooled Reactors Under Accident Conditions.

Rousseau et al., 2014. Separate effects tests to determine the effective thermal conductivity in the PBMR HTTU test facility. Nuclear Engineering and Design, 271 (2014), pp. 444-458

van Antwerpen, W. et al. (2010) A review of correlations to model the packing structure and effective thermal conductivity in packed beds of mono-sized spherical particles. Nuclear engineering and design. [Online] 240 (7), 1803–1818.

van Antwerpen, H. J. & Greyvenstein, G. P. (2008) Evaluation of a detailed radiation heat transfer model in a high temperature reactor systems simulation model. Nuclear engineering and design. [Online] 238 (11), 2985–2994.

van Antwerpen, W. et al. (2012) Multi-sphere Unit Cell model to calculate the effective thermal conductivity in packed pebble beds of mono-sized spheres. Nuclear engineering and design. [Online] 247183–201.

Wakao, N., Kato, K., Furuya, N., 1969. View factor between two hemispheres in contact and radiation heat transfer coefficient in packed beds. International Journal of Heat and Mass transfer 12, 118–120.

World Nuclear News. (2021) Dual criticality for Chinese demonstration HTR-PM. [Viitattu 26.10.2023]. Saatavilla https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Dual-criticality-for-Chinese-demonstration-HTR-PM

Wu, H. et al. (2020) Analysis and evaluations of four models of thermal radiation for densely packed granular systems. Chemical engineering science. [Online] 211 (C), 115309–.

Wu, H. et al. (2016) Effect of scale on the modeling of radiation heat transfer in packed pebble beds. International journal of heat and mass transfer. [Online] 101562–569.

Wu, H. et al. (2017) Numerical simulation of heat transfer in packed pebble beds: CFD-DEM coupled with particle thermal radiation. International journal of heat and mass transfer. [Online] 110393–405.

Zhang et al. (2016) The Shandong Shidao Bay 200 MWe High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble-Bed Module (HTR-PM) D monstration Power Plant: An Engineering and Technological Innovation, Engineering, Volume 2, Issue 1, Pages 112-118, ISSN 2095-8099