SYDÄNSIMULAATTORIN 1D-LÄMMÖNSIIRTOMALLIN KEHITTÄMINEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Elias Pakarinen

Tarkastaja: TkT Ville Rintala

Ohjaajat: TkT Ville Rintala ja DI Riku Leppänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Elias Pakarinen

Sydänsimulaattorin 1D-lämmönsiirtomallin kehittäminen

Energiatekniikan kandidaatintyö

43 sivua, 17 kuvaa, 2 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: TkT Ville Rintala

Avainsanat: lämmönsiirto, termohydrauliikka, ydinreaktori

Tässä työssä luodaan termohydraulinen ratkaisija Reaktori3DTermo sydänsimulaattorille. Laskentaohjelma käyttää alkuarvoina Reaktori3D sydänsimulaattorista saatuja arvoja, joka pohjautuu Serpent 2-ohjelmalla laskettuihin ryhmävakioihin. Ratkaisijan tarkoituksena on ratkaista tehojakauma reaktorissa neutronijakauman perusteella, ratkaista jäähdytteen ja polttoaineen lämpötiloja reaktorissa, sekä varmistaa turvallisuusrajojen sisällä pysyminen. Lisäksi ratkaisijan määrittämä termohydraulinen tila mahdollistaa neutroniikkamallin vaikutusalojen tarkentamisen eli takaisinkytkennän kuvaamisen.

Ydinreaktoreissa vapautuva lämpö on peräisin fissioreaktioista vapautuvasta ytimien sidonnaisenergiasta. Fissioreaktiosta vapautuva lämpö vapautuu reaktoreissa polttoainepelleteissä, josta lämpö johtuu kaasuaukon ylitse polttoaineen suojakuoreen ja lopulta jäähdytteeseen. Työssä tarkastellaan pääasiassa painevesireaktoreita ja sivutaan kiehutusvesireaktoreita.

Yksi lämpöteknisen suunnittelun päätavoitteesta on pitää leviämisasteet ehjänä normaali- ja poikkeustilanteissa. Turvallisuusvaatimuksia pyritään täyttämään asettamalla ja noudattamalla turvallisuusteknisiä rajoitteita. Asetetut rajoitteet pohjautuvat onnettomuusanalyyseihin ja tutkimuskoetuloksiin. Rajoittavia tekijöitä ja arvoja ovat reaktoreissa esimerkiksi faasimuutokset ja polttoaineen suojakuoren liika kuumeneminen. Lisäksi monet lämpötekniset arvot ovat tärkeitä reaktiivisuuden takaisinkytkentöjen kannalta.

Tuloksien tavoitteena on verifioida laskentaohjelma. Tuloksia tuotettiin kahdelle päätapaukselle, ensimmäisessä tapauksessa ei tapahdu sekoittumista, mutta toisessa tapahtuu. Eri tapauksien tavoitteena oli varmistaa sekoittumismallin toimiminen. Tuloksilla saatiin myös varmistettua pysyminen asetettujen turvallisuusrajojen sisällä ja saatiin tärkeitä takaisinkytkettyjä arvoja. Koodi todettiin verifioiduksi saatujen tulosten perusteella.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Elias Pakarinen

Development of a 1D Heat Transfer Model for Nuclear Reactor

Bachelor's thesis

2024

43 pages, 17 figures, 2 tables and 2 appendices

Examiner: TkT Ville Rintala

Keywords: heat convection, thermal hydraulics, nuclear reactor

This thesis aims to create a thermohydraulic solver Reaktori3Dtermo for the core simulator. The solver uses initial values obtained from Reaktori3D which is based on group constants calculated using Serpent 2 software. The purpose of the solver is to determine the power distribution in the reactor based on the neutron distribution, to solve the temperatures of the coolant and fuel in the reactor, and to ensure that the reactor is within the bounds of safety constraints. Additionally, the thermohydraulic state determined by the solver allows for recalculation of the neutron interaction cross-sections, therefore enabling feedback description.

The heat released in nuclear reactors is from the binding energy of nuclei released during fission reactions. The heat from the fission reaction is released in fuel pellets, from which it conducts across the gas gap to the fuel cladding and finally to the coolant. This thesis primarily focuses on pressurized water reactors and touches upon boiling water reactors.

One of the main goals of thermal design is to maintain the integrity of the containment layers under both normal and emergency conditions. Safety requirements are met by establishing and adhering to safety engineering constraints. The set constraints are based on accident analyses and experimental results. Limiting factors in reactors include, for example, coolant phase changes and excessive heating of the fuel cladding. Additionally, many thermohydraulic values are important for reactivity feedback.

The goal of the results is to verify the calculation program. Results were produced for two main cases: in the first case, no mixing occurs, while in the second case, mixing does occur. The aim of the two cases was to ensure the functionality of the mixing model. Mixing equalized temperature differences and reduced large temperature spikes. The results ensured compliance with the set safety constraints and provided important feedback values. The code was verified based on the obtained results.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	m^2
c	ominaislämpökapasiteetti	kJ/kg°C
D	halkaisija	cm^2
E	energia	J, MeV
h	lämmönsiirtokerroin	$W/(m^2K)$
k	lämmönjohtavuus	W/(mK)
N	atomitiheys	-
Nu	Nusseltin luku	-
O	Lämpöresistanssi	K/W
R	reaktionopeus	-
P	teho	W
Pr	Prandtlin luku	-
q'''	tehotiheys	W/m^3
q''	lämpövuo	W/m^2
q'	lineaariteho	W/m
$\vec{r}$	paikkavektori	-
r	säde	m
T	lämpötila	K, °C
t	aika	s
V	tilavuus	m^3, cm^3
v	nopeus	m/s

y	sekoittumisen määrä	-
i	x-koordinaatti	-
j	y-koordinaatti	-
k	z-koordinaatti	-

Kreikkalaiset

ϕ	neutronivuo	1/cm2/s
$\sum$	makroskooppinen vaikutusala	1/cm
σ	mikroskooppinen vaikutusala	b, cm^2
ϕ	neutronivuo	$1/cm^2/s$
ν	kinemaattinen viskositeetti	m^2/s
μ	dynaaminen viskositeetti	kg/ms
κ	fissiosta vapautuvan energian määrä	MeV
ρ	tiheys	kg/m^3

Alaindeksit

abs	absoluuttinen
film	filmi
gap	kaasuaukko
kerta	kertahäviöt
kitka	kitkahäviöt
m	massa
sat	saturaatio
suht	suhteellinen
sydän	reaktorinsydän

h	hydraulinen
i	indeksi
c	polttoainesauvan suojakuori (cladding)
f	polttoaine
j	jäähdyte
o	ulompi
s	välituki
v	virtaus

Lyhenteet

PWR	Pressure Water Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
DNB	Departure from Nucleate Boiling
LOCA	Loss-Of-Coolant Accident
TTKE	Ydinvoimalaitoksen turvallisuustekniset käyttöehdot

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

Sisällysluettelo

1 Johdanto 9
2 Johdatus ydinreaktoreihin 10
2.1 Ydinreaktiot ja vaikutusalat 10
2.1.1 Ketjureaktio 12
2.1.2 Neutronivuo ja reaktionopeus 13
2.2 Lämmön siirtyminen reaktorissa 14
2.2.1 Reaktorin suunnittelun ja käytön vaatimukset sekä rajoitteet 14
2.2.2 Polttoaineen ja suojakuoren kestävyys 15
2.2.3 Kalvokiehunnan marginaali 15
2.2.4 Kuivakiehunnan marginaali 17
2.3 Reaktorien termohydrauliikka 17
2.3.1 Lämmön vapautuminen reaktorissa 17
2.3.2 Lämmön siirtyminen polttoainesauvoissa 18
2.3.3 Tehojakauma 20
2.3.4 Painehäviöt reaktorissa 21
3 1-D lämmönsiirtomallin laskenta 22
3.1 Laskenta hilan indeksointi 23
3.2 Tehojakauman laskeminen 23
3.3 Entalpian laskeminen 24
3.4 Polttoaineen lämpötila ja lämmönjohtuminen sauvassa 26
3.4.1 Lämmönsiirto rajapintojen yli 27
3.4.2 Lämmönjohtavuus polttoainesauvassa 28
3.4.3 Lämmönjohtuminen polttoainesauvassa 29
3.5 Painehäviöt reaktorissa 31
4 Termohydraulisen tilan ratkaisija Reaktori3DTermo 34

5 Termohydraulisen mallilaskun tulokset ja johtopäätökset 36
6 Yhteenveto 41
Lähteet 42

Liitteet

Liite 1. Veden tiheyden 3-D jakauma tapauksille 1 ja 2

Liite 2. Polttoainesauvan lämpötilajakauma kirjallisuuden lineaariteholla

1 Johdanto

Ydinreaktorin termohydrauliikka on keskeinen osa ydintekniikan tutkimusaluetta. Termohydrauliikka käsittelee ydinreaktorissa tapahtuvia lämpö- ja virtausilmiöitä ja niiden asettamia rajoitteita reaktorille, jotka tulee ottaa huomioon reaktorin suunnittelussa ja käyttäytymisessä, jotta reaktori käyttäytyisi turvallisesti sekä normaalitilassa että onnettomuudessa. Monet lämpötekniset arvot vaikuttavat myös takaisinkytkennöillä reaktorin toimintaan. Edellä kuvattujen seikkojen takia termohydraulinen ratkaisija on oleellinen osa sydänsimulaattoria.

Tässä työssä käydään läpi termisen reaktorin perustoiminta, sekä lämmön vapautuminen polttoaineessa ja siirtyminen jäähdytteeseen, sekä mahdolliset rajoittavat ilmiöt reaktorin turvalliselle toiminnalle. Työn tavoitteena on ratkaista reaktorisydämen termohydraulinen tila yksinkertaisin menetelmin. Alkuarvoina käytetään annettua reaktorifysiikanratkaisua. Aluksi ratkaistaan tehojakauma neutronivuojakaumasta reaktorille, jonka avulla lasketaan jäähdytteen lämpeneminen reaktorin ylitse, polttoaineen keskimääräinen lämpötila ja kuvataan 1-D lämmönsiirtomalli polttoainesauvalle. Työssä käsitellään tasapainotilassa olevaa reaktoria.

Ongelman ratkaisemiseksi luodaan MATLAB-ohjelma, jonka avulla reaktorisydämen termohydraulinen tila ratkaistaan. Lopulliset tulokset ovat polttoaineen keskimääräinen lämpötila laskentakopissa, kuumimman polttoaineen 1-D lämpötilajakauma, sekä jäähdytteen lämpö- ja entalpiajakaumat. Tuloksien tavoitteena on verifioida koodi. Käytetyt alkuarvot pohjautuvat alun perin Monte Carlo pohjaisesta Serpent2-ohjelmasta saatuihin arvoihin, jotka on syötetty kandityössä (Leppänen, 2019) luotuun Reaktori3D-sydänsimulaattoriin, joka ratkaisee neutronivuojakauman sekä kasvutekijän.

2 Johdatus ydinreaktoreihin

Tässä kandityössä keskitytään pääasiassa painevesireaktoreihin (PWR) ja sivutaan kiehutusvesireaktoreita (BWR). Painevesi- ja kiehutusvesireaktoreissa toimii kevyt vesi (H_2O) jäähdytteenä sekä moderaattorina. Painevesireaktorissa lämpö siirretään veden avulla höyrystimille, kun taas kiehutusvesireaktoreissa vesi höyrystyy suoraan reaktorissa ja erilliselle höyrystimelle ei ole tarvetta. Höyry johdetaan korkea- ja matalapaineturbiineille, josta terminen energia saadaan muutettua mekaaniseksi energiaksi ja lopulta sähköenergiaksi. Lopulta höyry johdetaan lauhduttimille ja pumpataan takaisin kiertoon. Painevesireaktorissa on siis erillinen primääripiiri ja sekundaaripiiri, kun taas kiehutusvesireaktorissa on vain yksi piiri.

Ydinreaktorit hyödyntävät lämpötehon tuottamiseen fissioreaktiota eli raskaiden ytimien halkeamisreaktiota, josta vapautuva lämpö on peräisin pääasiassa ytimien sidosenergian vapautumisesta. (Todreas & Kazimi, 1990, 40.) Reaktoreissa tapahtuvia fissioreaktioita ylläpidetään hyödyntämällä hallittua ketjureaktiota ja tasaisella tuotolla reaktorissa yhdestä fissioreaktiosta syntyykin vain keskimäärin yksi uusi fissioreaktio. Ketjureaktioon vaikuttaa neutronien liikkuminen reaktorisydämessä, neutronivuoto, materiaalien vaikutusalat, sekä niiden riippuvuus reaktorisydämen termohydraulisesta tilasta. Esimerkiksi polttoaineen lämpötila ja jäähdytteen tiheys vaikuttavat voimakkaasti vaikutusaloihin.

2.1 Ydinreaktiot ja vaikutusalat

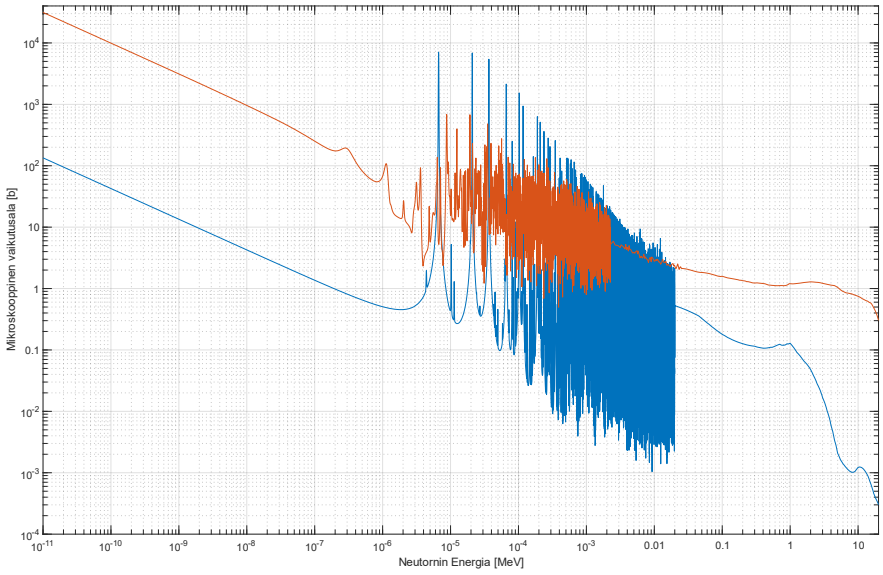
Reaktorissa tapahtuu pääasiassa kolmea erilaista reaktiota. Fissio-, kaappaus- ja sirontareaktioita, joista sironta voidaan jakaa vielä elastiseen ja epäelastiseen sirontaan. Vaikutusalla kuvataan todennäköisyyttä, jolla neutronin ja atomiytimen välinen reaktio tapahtuu. (Stacey, 2018, 5.) Vaikutusaloista käytetään kahta eri arvoa mikroskooppista- ja makroskooppista vaikutusalaa. Mikroskooppinen vaikutusala $\sum$ kuvaa neutronin ja yksittäisen atomiytimen välisen reaktion todennäköisyyttä ja se on riippuvainen neutronin sekä atomiytimen energiasta. Mikroskooppisen vaikutusala voidaan mieltää kohdealueena neutronille, joten sen yksikkönä käytetään yleensä barnia, joka on arvoltaan 10^{-24} cm^2. (Yu, 2022, 581-582.) Makroskooppinen vaikutusala Σ [cm^{-1}] (yhtälö 1) kuvaa puolestaan reaktion todennäköisyyttä, kun huomioidaan kaikki atomiytimet tilavuutta kohden. (Yu, 2022, 585-587.)

$$\Sigma_i(\vec{r}, E, t) = \sum_i N_i(\vec{r}, t)\, \sigma_i(E) \quad (1)$$

missä

Σ	makroskooppinen vaikutusala
$\vec{r}$	sijainti reaktorissa
E	neutronin energia
t	ajanhetki
N	atomitiheys
σ	mikroskooppinen vaikutusala

Kuvassa 1 on esitetty U-238:n kaappausvaikutusala ja U-235:n fissiovaikutusala neutronin energian funktiona. Monen korkean massaluvun nuklidin vaikutusalat jakautuvat kolmeen tyypilliseen osaan. Ensimmäinen osa on matalan energian osa, jota yleensä kutsutaan $1/v$ alueeksi, koska vaikutusala on kääntäen verrannollinen neutronin nopeuteen. Matalan energian alueen jälkeen alkaa resonanssialue, jossa vaikutusala nousee ja laskee nopeasti. Viimeinen alue on korkean energian alue. (Yu, 2022, 584-585.)



Kuva 1. Fission makroskooppinen vaikutusala U-235:lle ja U-238:n kaappausvaikutusala. (NEA, 2020.)

2.1.1 Ketjureaktio

Fissioreaktiossa raskas ydin absorboi neutronin, jolloin siitä tulee epästabiili ja se halkeaa keskiraskaiksi ytimiksi, neutroneiksi sekä reaktiosta vapautuu ytimen sidosenergiaa. Jos fissioreaktiosta vapautuvat neutronit aiheuttavat uuden fissioreaktion, voidaan puhua ketjureaktiosta. (Oka & Suzuki, 2013, 3.) Yhtälössä 2 on esimerkki yhdestä U-235 fissioreaktioista. Keskimäärin fissioreaktiossa vapautuu noin 2–3 neutronia.

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow (^{236}_{92}\mathrm{U})^{*} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Cs} + {}^{93}_{37}\mathrm{Rb} + 3(^{1}_{0}\mathrm{n}) + \text{energiaa} \qquad (2)$$

Fissiossa suurin osa vapautuvista neutroneista vapautuu suoraan fissiossa, eli ne ovat kerkeitä neutroneita. Vapautuvien neutronien energia on tyypillisesti noin 1–2 MeV, jolloin niitä kutsutaan nopeiksi neutroneiksi. (Todreas & Kazimi, 1990, 40.) Osa vapautuvista neutroneista vapautuu vasta kun fissiotuotteet hajoavat ja näitä kutsutaan viivästyneiksi neutroneiksi.

Termisessä reaktorissa vapautuvat nopeat neutronit täytyy hidastaa, jotta fissio saadaan aikaan, sillä U-238 kaappausvaikutusala on liian suuri suhteessa U-235:n fissiovaikutusalaan nopeilla neutroneilla. Neutronit saadaan hidastumaan moderaattorin avulla. Tyypillinen moderaattori PWR-reaktorille on kevyt vesi, muita moderaattori vaihtoehtoja muille reaktoreille ovat kevyet atomit, jotka eivät kappaa liikaa neutroneita, kuten hiili tai raskas vesi eli deuterium. (Todreas & Kazimi, 1990, 40.) PWR-reaktorissa nopeat neutronit kulkeutuvat polttoaineesta veteen ja hidastuvat lähelle sen lämpöliikettä termisiksi neutroneiksi. Termisellä neutronilla U-238:n kaappausvaikutusla on jo huomattavasti pienempi suhteessa U-235:n fissiovaikutusalaan, mutta polttoainetta täytyy silti hieman rikastaa U-235 suhteen.

Kaikki fissiosta vapautuvista neutroneista eivät aiheuta uutta fissiota vaan osa reaktorissa esim. vuotaa reaktorista, absorboituu rakenteisiin, moderaattoriin tai polttoaineiseen. (Yu, 2022, 604.)

Kasvutekijällä *k* kuvataan ketjureaktion neutronisukupolven koon suhdetta aiempaan sukupolveen tai se kuvaa neutronien lukumäärän suhdetta aiempaan neutronisukupolven kokoon tai neutronien vapautumisnopeutta häviämisnopeuteen.

Tasaisella tehontuotolla keskimäärin yhdestä fissiosta vapautuvat neutronit aiheuttavat yhden uuden fission, tällöin reaktori on kriittinen ja $k = 1$. Reaktori on ylikriittinen, kun

neutroneita syntyy enemmän, kuin niitä häviää eli kun $k > 1$. Puolestaan kasvutekijän ollessa alle yhden $k < 1$, reaktori on alikriittinen ja neutronien häviää enemmän kuin niitä vapautuu fissioreaktioiden seurauksena. (Oka & Suzuki, 2013, 4.)

Reaktoreissa takaisinkytkennät vaikuttavat ketjureaktion käyttäytymiseen. Toisin sanoen, reaktorin tilan muuttuminen vaikuttaa ketjureaktioon, mikä saa puolestaan reaktorin tilan taas muuttumaan. Reaktorin fysikaalisten takaisinkytkentöjen yhteisvaikutus tulee olla tehon kasvua hillitsevä normaalikäytön aikana sekä onnettomuuksissa. Tilanteissa, joissa fysikaaliset takaisinkytkennät suurentavat kasvutekijää, reaktorin suojajärjestelmän on pystyttävä hillitsemään tehon nousua siten, että ydinpolttoaineen suunnittelurajat eivät ylity. (STUK, 2019) Yhtenä esimerkkinä takaisinkytkennästä on polttoaineen lämpötilan muuttuminen, joka johtaa Doppler laajentumiseen (Doppler Broadening). Polttoaineen lämmetessä erityisesti uraani-238:n kaappausvaikutusalan resonanssipiikit alkavat laajenemaan, jolloin neutronien kaappautuminen resonanssipiikkeihin voimistuu. Lisäksi uraani-235:n resonanssit levenevät, mutta samalla fissioreaktioiden resonanssipiikit myös levenevät, eikä tapahdu samanlaista vaikutusta kuin uraani-238:lla. Tämä negatiivinen takaisin kytkentä johtaa reaktorin kasvutekijän pienentymiseen sekä sen myötä tehon stabilisoitumiseen kevytvesireaktoreissa. (Bodansky, 1996, 379.)

2.1.2 Neutronivuo ja reaktionopeus

Neutronivuo on matemaattinen suure, joka kuvaa kulkeutuvia neutroneja pinta-ala ja aikayksikköä kohden (yhtälö 3). (Yu, 2022, 589.)

$$\phi(\vec{r}, E, t) = n(\vec{r}, E, t)v(E) \tag{3}$$

missä

ϕ	neutronivuo
n	neutronia tilavuusyksikössä
v	neutronin nopeus

Reaktionopeus R kertoo reaktioiden lukumäärän tilavuus- ja aikayksikköä kohden [1/cm^{3}s] (yhtälö 4).

$$R(\vec{r}, E, t) = \sum(E)\phi(\vec{r}, E, t) \quad (4)$$

2.2 Lämmön siirtyminen reaktorissa

Ydinreaktoreissa vapautuva lämpö vapautuu pääasiassa reaktorin sydämessä polttoainesauvoissa tapahtuvista fissioreaktioista. Vapautuvaa lämpöä täytyy siirtää polttoainesauvoista pois, jotta fyysiset leviämisesteet saadaan pysymään ehjänä sekä lämpöenergia hyödynnettyä. Lämmönsiirto polttoainesauvoista tapahtuu jäähdytteen avulla.

PWR-reaktoreissa vesi pumpataan kylmähaarasta reaktoriin, josta se johdetaan aluksi sydämen alapuolelle. Vesi pääsee nousemaan polttoainesauvojen välissä, mutta ei höyrysty korkean paineen takia. Vesi kiertää reaktorin jälkeen höyrystimeen, josta lämpö siirtyy sekundaaripiiriin. Höyrystimen jälkeen vesi virtaa takaisin pääkiertopumpulle ja kierto alkaa uudestaan. Sekundaaripiirissä höyry johdetaan turbiiniin, jonka jälkeen höyry lauhdutetaan vedeksi lauhduttimessa ja pumpataan takaisin höyrystimeen. Sekundaaripiirin avulla saadaan radioaktiivisuus pysymään primääripiirissä, eikä radioaktiivista vettä pääse turbiiniin. (Bodansky, 1996, 181 – 183.)

BWR-reaktoreissa veden annetaan höyrystyä reaktorissa ja höyry hyödynnetään suoraan reaktorista, eikä ole tarvetta käyttää erillistä höyrystintä ja sekundaaripiiriä. Muuten BWR-reaktorin piiri toimii pääpiirtein samalla tavalla kuten PWR-reaktorin piiri. Kuitenkin täytyy ottaa huomioon aktiivisuuden määrä turbiinilla, sillä vesi tulee suoraan reaktorista ja on radioaktiivista. (Bodansky, 1996, 181 – 183.)

2.2.1 Reaktorin suunnittelun ja käytön vaatimukset sekä rajoitteet

Ydinreaktoreissa on pääasiassa kolme fyysistä leviämisestettä radioaktiivisten aineiden ja ympäristön välillä. Ensimmäisenä esteenä pidetään polttoainetabletin keraamista rakennetta, sekä polttoainesauvan suojakuorta, sillä ne estävät fissiosta muodostuvien kaasujen ja aineiden leviämisen reaktoriin. Toinen leviämiseste on reaktorinpainesäiliö ja siihen liittyvä paineenkestävä jäähdytyspiiri eli primaaripiiri. Kolmas este on jäähdytyspiiriä ympäröivä suojarakennus. (Isolankila, 2004)

Yksi lämpöteknisen suunnittelun päätavoitteista on pitää leviämisesteet ehjänä sekä reaktorin normaalikäytössä että onnettomuuksissa. Esimerkiksi STUK (Säteilyturvakeskus) on asettanut vaatimuksia ensimmäiselle leviämisesteelle kuten, polttoaineiden vaurion todennäköisyys täytyy olla minimaalinen normaalissa käyttötilanteessa. Onnettomuudessa polttoainevaurioiden määrä on oltava pieni, eikä polttoaineen jäähdytettävyys saa vaarantua. Käyttöhäiriöissä polttoainetableteissa ei saa tapahtua sulamista, suojakuoren jäähdytys on varmistettava ja 95 % luottamustasolla on vähintään 95 % todennäköisyys sille, että kuumin polttoainesauva ei joudu lämmönsiirtokriisiin. (STUK, 2019)

Edellä mainitut vaatimukset pyritään täyttämään noudattamalla turvallisuusteknillisiä rajoitteita, jotka on kirjattu ydinvoimalaitoksen turvallisuusteknisiin käyttöehtoihin (TTKE). Rajoitteet perustuvat muun muassa onnettomuusanalyyseihin ja tutkimuskoetuloksiin esimerkiksi palaman (polttoaineen kulumisen mittari [MWd/t]) osalta. Noudattamalla rajoitteita vältytään polttoaineen vaurioitumiselta normaalikäytössä, sekä minimoidaan onnettomuuden seuraukset. Esimerkki turvallisuusteknisestä arvosta on polttoaineen suurin sallittu lineaariteho q'_{max}, eli suurin sallittu tuotettu teho polttoainesauvan pituusyksikköä kohden, joka vaikuttaa muun muassa polttoaineen lämpötilaan. (STUK, 2019)

2.2.2 Polttoaineen ja suojakuoren kestävyys

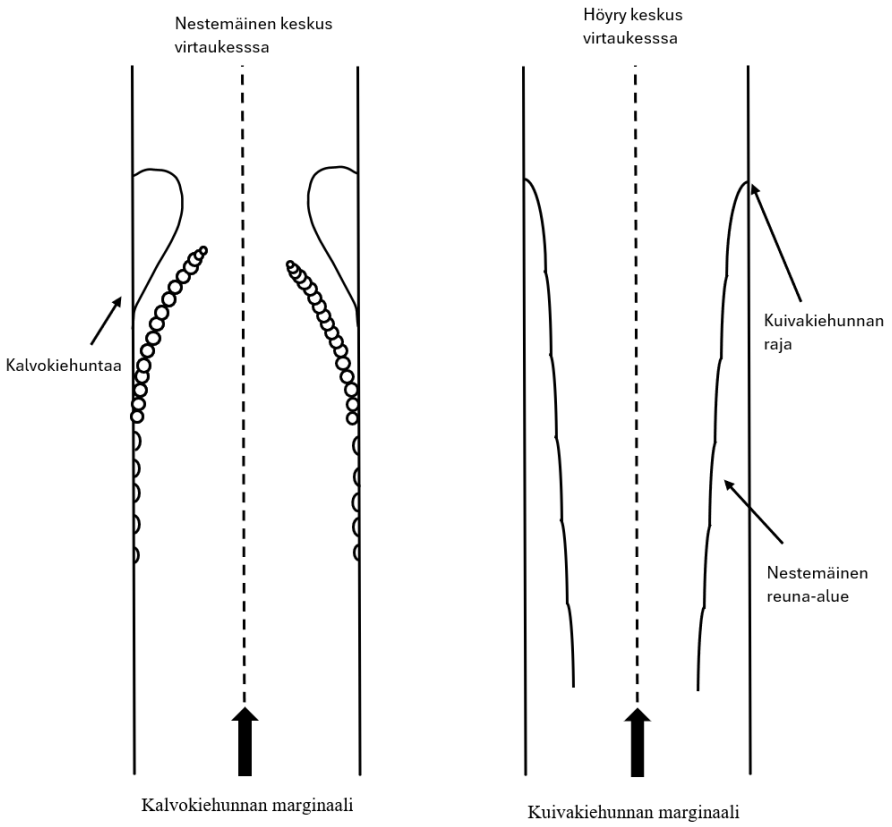
Polttoaineen yhtenä esiintyvänä rajoittavana tekijänä voidaan pitää polttoaineen sulamista eli uraanioksidin sulamista, mikä tapahtuu noin 2840 °C lämpötilassa. Toinen rajoittava tekijä on polttoainesauvan kuoren liika kuumeneminen, jolloin esim. tyypillisellä kuorimateriaalilla zirkoniumilla hapettumisreaktio veden kanssa nopeutuu merkittävästi. Täten onnettomuustilanteessa polttoaineen kuoren tulisi pysyä alle 1200 °C. (Todreas & Kazimi, 1990, 24.) Muita turvallisuusrajoitteita on myös annettu ydinpolttoaineelle, kuten suojakuori ei saa lommahtaa ja polttoainesauvan sisäinen paine ei saa kasvaa liian suureksi.

2.2.3 Kalvokiehunnan marginaali

Rajoittavia tekijöitä on jäähdytteen faasimuutokset, etenkin PWR-reaktoreissa, jos vesi alkaa kiehumaan nippujen välissä ja muuttuu höyryksi, lämmönjohtavuus sauvan ja jäähdytteen välillä kokee nopean alenemisen. Nopea lämmönjohtavuuden laskeminen johtaa

polttoaineen nopeaan paikalliseen lämpenemiseen, jolloin polttoaine saattaa sulaa tai suojakuori kokea vaurioita korkean lämpötilan takia.

Jos sauvan seinämän lämpötila ylittää riittävästi kyllästyslämpötilan, seinämän pinnalle alkaa muodostua höyrykuplia, jotka saattavat vielä tiivistyä takaisin jäähdytteeseen, jos veden keskimääräinen lämpötila on vielä alle kylläisen lämpötilan, eli sauvan pinnalla tapahtuu alijäähtynyttä kiehuntaa. Kuitenkin jos lämpövuo sauvasta jäähdytteeseen nousee liian korkeaksi, voivat syntyvät kuplat muodostaa seinämän pinnalle eristävän höyrykerroksen, jolloin lämmönsiirtyminen kokee nopean romahtamisen. Tätä ilmiötä kutsutaan kalvokiehunnan marginaaliksi (kuva 2) ja tunnettaan myös yleisellä englanninkielisellä termillä DNB (departure from nucleate boiling). Etenkin PWR-reaktoreissa pyritään välttämään kalvokiehuntaa lämmönsiirtokriisin takia. (Kalli, 2012, 126.) DNB-suhteella (DNBR) kuvataan kuinka kaukana ollaan kalvokiehunnan marginaalista. DNBR menemistä liian pieneksi voidaan estää rajoittamalla entalpiannousua tai lähtölämpötilaa kuumimmassa alikanavassa.



Kuva 2. Kalvokiehunnan marginaali ja kuivakiehunnan marginaali. Muokattu lähteestä (Kalli, 2012, 130)

2.2.4 Kuivakiehunnan marginaali

Jos kanavassa veden keskimääräinen lämpötila saavuttaa kyllästymislämpötilan ja kiehuminen leviää kaikkialle virtaavaan nesteeseen, puhutaan tällöin kokonaiskiehunnasta. Suurin osa kuplista siirtyy keskelle ja syntyy yhtenäinen höyryvirtaus (kuva 2). Lopulta jos vesi jatkaa kiehumista, sauvan pinnalla oleva vesikalvokin muuttuu höyryksi, tätä ilmiötä kutsutaan kuivakiehunnan marginaaliksi ja tunnetaan myös yleisesti englanninkielisellä termillä dryout. Kuivakiehunnan marginaalissa sauvan seinämä kokee nopean lämpötilan nousemisen lämmönjohtavuuden heikkenemisen vuoksi. (Yu, 2022, 88.)

2.3 Reaktorien termohydrauliikka

Reaktorin termohydraulinen ratkaisijan laskentaketju alkaa saadusta reaktionopeudesta, jonka perusteella voidaan laskea tehotiheys, josta voidaan laskea sydämen laskentakopeissa syntyvä lämpöteho. Voidaan olettaa kaiken vapautuvan lämmön siirtyvän polttoaineesta jäähdytteeseen, jotta saadaan laskettua jäähdytteen lämpötila eri kohdissa sydäntä entalpioiden avulla. Joidenka perusteella voidaan laskea jäähdytteen ominaisarvoja höyrytaulukoiden avulla.

Tässä luvussa kuvataan tämän työn kannalta tärkeimmät reaktorisydämen termohydrauliset ilmiöt, joita ovat lämmön vapautuminen ja kulkeutuminen polttoaineessa ja jäähdyttäessä, tehojakauma sekä reaktorin painehäviöt.

2.3.1 Lämmön vapautuminen reaktorissa

Oletetaan tässä tapauksessa lämmön vapautuvan pelkästään polttoainesauvoissa tapahtuvista fissioreaktioista. Toisin sanoen voidaan laskea reaktorissa vapautuva lämpöteho fissioreaktionopeuden avulla, kun oletetaan, että muut reaktiot ja tekijät eivät tuota merkittävää määrää lämpöä. Fission reaktionopeuden laskemista varten tarvitaan reaktorin neutronivuojakauma ja fission makroskooppinen vaikutusala. (Todreas & Kazimi, 1990, 43 – 44.)

Reaktionopeuden avulla voidaan laskea reaktorissa vapautuva lämmön määrä, sekä reaktorin tehojakauma, kun tiedetään kuinka paljon energiaa, vapautuu fissioreaktioista. Yhdestä fissioreaktiosta vapautuu noin 200 MeV energiaa.

$$q'''(\vec{r}) = R_i(\vec{r}, E, t)\kappa(\vec{r}) \tag{5}$$

missä, κ on fissiosta vapautuvan energian määrä.

Sydämen laskentakopin teho voidaan laskea yksinkertaisesti kertomalla halutun alueen tehotiheys sen tilavuudella.

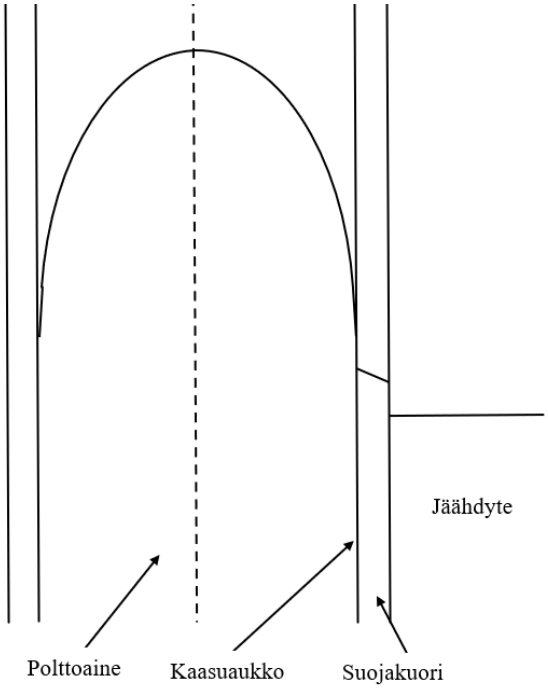
$$P(\vec{r}) = q'''(\vec{r})V \tag{6}$$

missä

q'''	tehotiheys
V	tilavuus

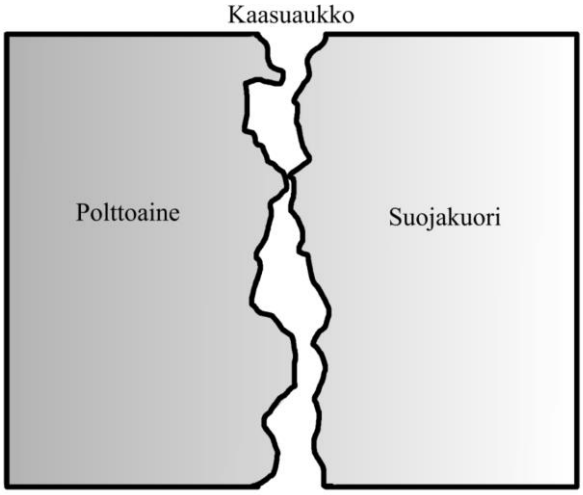
2.3.2 Lämmön siirtyminen polttoainesauvoissa

Fissiossa vapautuva energia vapautuu pääasiassa polttoainesauvoissa, joten korkeimmat lämpötilat keskittyvät itse polttoainesauvoihin. Polttoainesauvassa lämpötilan suurin arvo on sauvan keskellä ja se laskee nopeasti, kun siirrytään sauvassa ulommaksi, esimerkkinä kuva 3. Etenkin polttoaineen ja suojakuoren välillä tapahtuu nopea lämpötilan putoaminen, kun tarkastellaan lämpötilaa sauvan keskikohdasta ulospäin. Suurien lämpögradienttien suurin syy on polttoaineen heikko lämmönjohtavuus, etenkin uraanidioksidi johtaa huonosti lämpöä. Lämmönjohtavuuden tarkastelemisessa täytyy muistaa, että UO_2 lämmönjohtavuus ei ole vakio vaan se on riippuvainen lämpötilasta (Kuva 11). (Kalli, 2012, 96.)



Kuva 3. Lämpögradientti polttoainesauvassa ja sen ympäristössä. Muokattu lähteestä (Kalli, 2012, 96)

Lämmönsiirtymisessä kaasuaukon yli huomioidaan, että suojakuori ja polttoainetabletti eivät ole täydellisessä kosketuksessa, vaan niiden välissä on pieniä rakoja, kuten kuvassa 4 näkyy. Polttoaine sauvan ja suojankuoren väliin laitetaan tyypillisesti täytekaasua, joka ei reagoi muiden aineiden kanssa, esimerkiksi heliumia. Sauvan palaman lisääntyessä, alkaa fission tuloksena syntymään kaasumaisia xenonia ja kryptonia, jotka vaikuttavat lämmönsiirtoon sauvassa. Sauvassa oleva polttoainetabletti saattaa alkaa myös halkeilemaan, joka heikentää vielä enemmän polttoainetabletin ja suojakuoren kontaktia ja polttoainetabletin lämmönsiirtoa ylipäätään. Lopulta lämpö johtuu polttoainesauvan kuoresta sauvan ympäröimään jäähdytteeseen. (Todreas & Kazimi, 1990, 332-334.)



Kuva 4. Polttoainetabletin ja suojakuoren välinen kaasuaukko.

2.3.3 Tehojakauma

Reaktorin kokonaisteho määritellään sen suunnitteluvaiheessa ja sille on annettu yksi TTKE:n raja, jonka alla on pysyttävä. Neutronitaloudellisessa mielessä reaktiivisimmat polttoaineniput kannattaisi sijoittaa reaktorin keskelle neutronivuodon minimoiseksi, mutta tehojakauman rajoitteiden vuoksi se ei ole mahdollista. Tehojakaumaa on tasoitettava sijoittamalla polttoainenippuja reunemmalle sydäntä. Lisäksi reaktorisydämen ympärille oleva neutroniheijastin tasaa jakaumaa ja polttoainenippujen sisäistä tehojakaumaa on mahdollista tasoittaa profiloimalla, eli käyttämällä eri väkevöityjä polttoainesauvoja nipussa.

Tapoja tasata tehojakaumaa on lisätä heijastimia tai muuttamalla polttoainenippujen järjestystä ottamalla huomioon eri nippujen palama (burn-up) ja uraanin väkevyys. Palaman myötä tapahtuvat muutokset tehojakaumassa täytyy ottaa myös huomioon lataussuunnitellussa, sillä rajoittavin käyttöjakson kohta ei ole välttämättä jakson alussa. Tehojakaumaa voidaan myös muokata säätösauvoilla. (Yu, 2022, 92.) Kuitenkaan PWR-reaktoreissa tämä ei ole tyypillistä.

Reaktorin tehojakaumasta lasketun entalpian avulla voidaan laskea jäähdytteen ominaisarvoja, kuten lämpötilaa, tiheyttä, lämmönjohtavuutta, lämpökapasiteettia ja viskositeettia. Jäähdytteen tiheyden merkitys etenkin korostuu reaktorilaskennassa, sillä se vaikuttaa vaikutusalojen suuruuteen. Esimerkiksi kevyen veden tiheyden laskeminen johtaa veden

moderointi kyvyn laskemiseen, joka puolestaan johtaa kasvutekijän pienenemiseen reaktorin ollessa alimoderoitu.

PWR- ja BWR-reaktoreille käytetty jäähdyte on vesi, joten jäähdytteen ominaisarvojen laskemista varten voidaan käyttää höyrytaulukoita. Taulukoista saadaan tarvittavat arvot entalpian ja paineen avulla. Käytetyt höyrytaulukot perustuvat IAPWS:n (The International Association for the Properties of Water and Steam) laatimiin yhtälöihin ja korrelaatioihin vedelle ja höyrylle.

2.3.4 Painehäviöt reaktorissa

Reaktorissa tapahtuu painehäviöitä, kun vesi etenee reaktorin läpi. Painehäviöitä aiheuttavat geometrian muutokset virtauksessa ja kitkapainehäviöt. Paine on merkittävä tekijä reaktoreissa, PWR-reaktoreissa täytyy lisäksi varmistaa, että kiehumista ei tapahdu painehäviöiden vuoksi. Käytännön esimerkki reaktorissa aiheuttavista kertavastuksista ovat esimerkiksi polttoainenipun päätykappaleet ja polttoainesauvojen välituet. Välituille käytetään myös nimitystä välihilat.

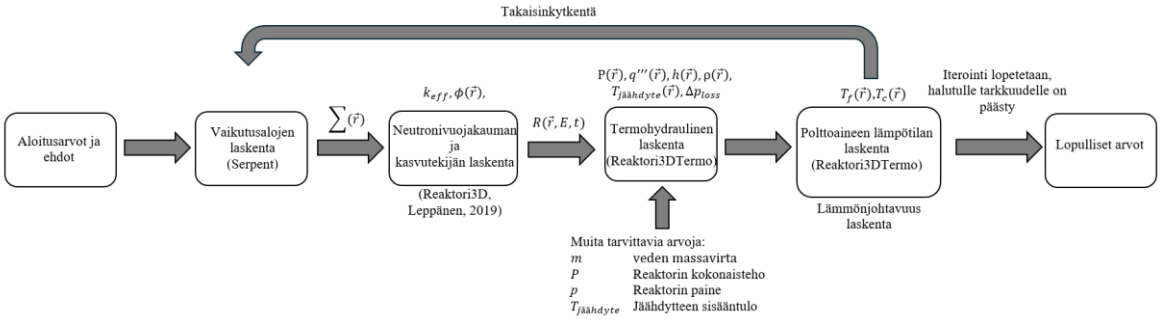
Kertavastuskertoimet määritellään kokeellisesti polttoainevalmistajan toimesta polttoainetta lisensioidessa. Lisäksi voimayhtiöt tekevät myös CFD-analyysejä ja vertaavat niitä koetuloksiin. Painehäviöt halutaan yleensä minimoida, jotta saadaan enemmän jäähdytteen virtausta polttoaineeseen ja estetään polttoaineen kelluminen. Toisaalta mekaanisen kestävyyden sekä polttoainesauvojen taipumisen takia välihiloja tarvitaan monta. Tästä syystä välitukien suunnittelu ja niiden määrä on tietynlainen optimointiongelma ja polttoainevalmistajat varjelevat omia mallejaan. Tarkkoja tietoja esim. polttoainesauvojen välitukien aiheuttamista painehäviöistä ei ole yleisesti saatavilla.

3 1-D lämmönsiirtomallin laskenta

Laskennassa oletetaan, että reaktori on tasapainotilassa, koko teho siirtyy jäähdytteeseen ja laskentakopit ovat homogeenisiä. Laskuissa huomioidaan myös kaikki mahdolliset energiaryhmät. Oletetaan myös, että reaktorin kylmähaaroista tuleva massavirtaus jakautuu tasaisesti sydämeen tai jos sekoittumista ei tapahdu voidaan antaa massavirtajakauma.

Massavirtausjakauma on riippuvainen monesta eri tekijästä. Esim. polttoainetyyppien virtausvastuksien välillä on eroja, jolloin enemmän vettä ohjautuu pienemmän vastuksen nipputyyppeihin. Lisäksi suuremman tehon nippuihin virtaa vähemmän vettä, koska jäähdytteen tiheys on pienempi. Virtaukset eivät ehdi myöskään tasoittumaan eri kylmähaarojen välillä, jolloin eroja on sekä massavirtauksessa että lämpötiloissa.

Laskennassa on monia tekijöitä, jotka ovat riippuvaisia lämpötiloista kuten vaikutusalat ja materiaalin ominaisuudet. Etenkin laskennassa kiinnostaa polttoaineen keskimääräinen lämpötila ja jäähdytteen lämpötila, jotta voidaan laskea uudestaan vaikutusalat muuttuneilla lämpötiloilla. Kuitenkaan tässä työssä ei tehdä takaisinkytkentää vaikutusaloihin.

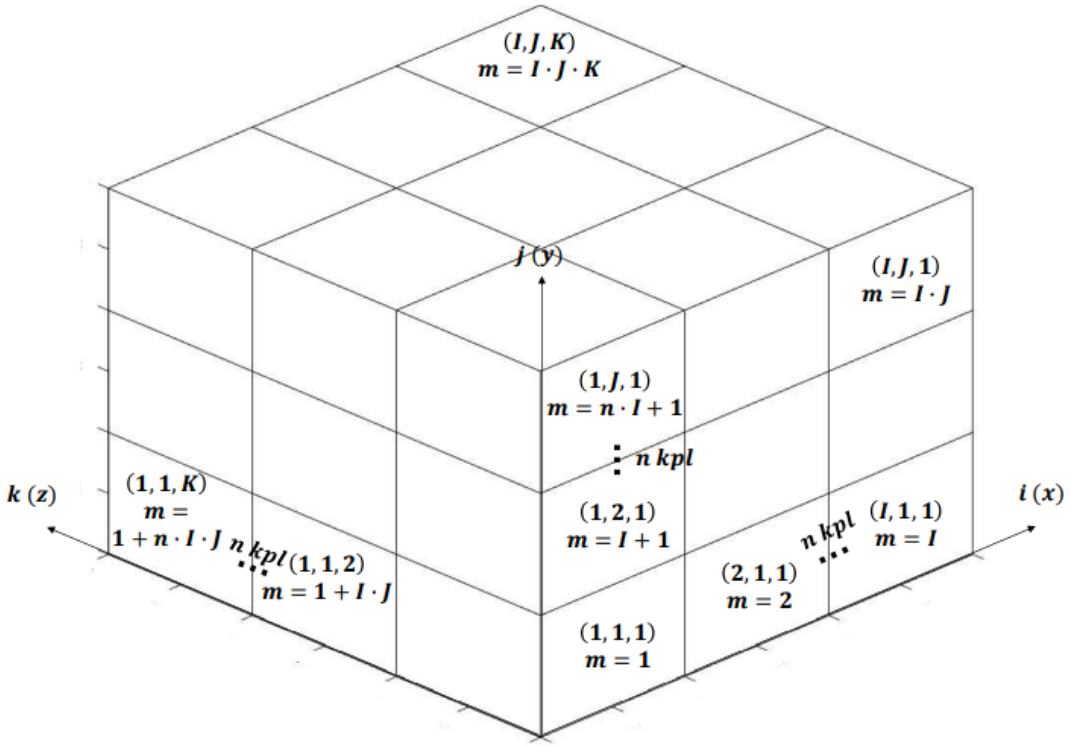


Kuva 5. Reaktorisimulaattorin laskentaprosessi.

Kuvasta 5 huomataan aluksi, että Reaktori3D ja Serpent laskee neutronikaan osapuolen ja tässä työssä käsitelty Reaktori3DTermo laskee oikealla puolella olevat termohydrauliset laskennat. Lopulta saadut tulokset voitaisiin takaisin kytkeä ohjelmaan mikä laskisi uudet vaikutusalat Serpenttiin pohjautuvalla ryhmävakiomallilla. Saadut vaikutusalat voitaisiin syöttää takaisin Reaktori3D:hen ja laskentaa iteroitaisiin kuvan mukaisesti, kunnes päädyttäisiin lopullisiin arvoihin.

3.1 Laskenta hilan indeksointi

Kuvassa 7 on esitetty kuution muotoisen reaktorin hilan indeksointi.



Kuva 6. Hilan koppien indeksointi (Leppänen, 2019)

Kopit on indeksoitu, jotta niiden yhtälöt on saatu ratkaistaviksi yhtälöryhmiksi. Kuvasta 6 nähdään, että indeksointi juoksee aluksi x-suuntaan (i), jonka jälkeen y-suuntaan (j) ja lopuksi z-suuntaan (k). Viereisten koppien indekseihin x-suunnassa voidaan viitatta lisäämällä tai vähentämällä kopin indeksistä yksi. y-suunnassa indeksiin on joko lisättävä tai poistettava kokonainen rivi eli $\pm I$ kappaletta. z-suunnassa oleviin koppeihin on indeksiin lisättävä tai vähennettävä $\pm IJ$ kappaletta. (Leppänen, 2019)

3.2 Tehojakauman laskeminen

Aiemmin oli ratkaistu vain suhteellinen neutronivuojakauma, joten neutronivuojakauma täytyy normalisoida reaktorin kokonaistehoon, jotta voidaan saada todellinen

lämpötehojakauma. Neutronivuojakauma normalisoidaan ratkaisemalla yhtälön 7 kerroin A. (Oka, 2014, 82.).

$$\phi_{abs}(\vec{r}) = A\phi_{suht}(\vec{r}) \tag{7}$$

Kerroin A voidaan ratkaista reaktorin kokonaislämpötehon perusteella yhtälöllä 8.

$$Q = A\kappa \int_{sydän} \sum_{f,g}(\vec{r})\phi_{suht}(\vec{r})\, dV \tag{8}$$

Missä Q on reaktorin lämpöteho. Yhtälössä 8 integroidaan reaktorisydämen kaikkien koppien ja energiaryhmien reaktionopeudet. Yhtälöstä voidaan ratkaista kerroin A ja sijoittaa yhtälöön 7 jolloin saadaan kaikki todelliset eri energiaryhmien neutronivuojakaumat (yhtälö 9).

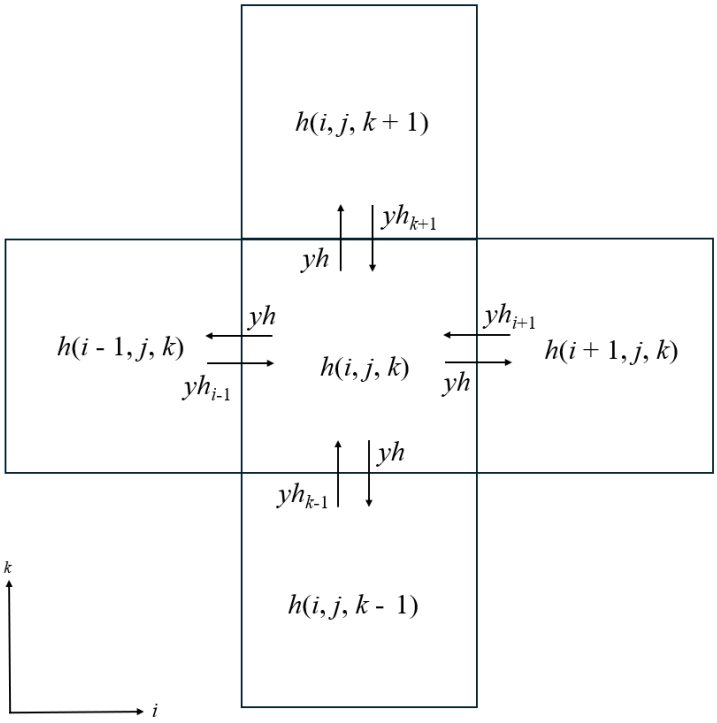
$$\phi_{abs}(\vec{r}) = \left(\frac{Q}{\kappa \int_{sydän} \sum_{f,g}(\vec{r})\phi_{suht}(\vec{r})\, dV} \right) \phi_{suht}(\vec{r}) \tag{9}$$

Lopulta voidaan laskea reaktorin todellinen lämpötehojakauma kokonaistehoon normalisoidun neutronivuojakauman avulla. Lasketaan vielä lämpöteho, käyttäen yhtälöitä 4 ja 5, jotta saadaan sauvoista siirtyvä teho jäähdytteeseen jokaisessa kopissa (yhtälö 10).

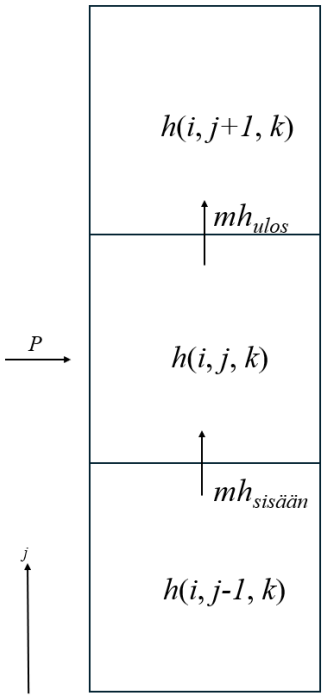
$$q'''(\vec{r}) = \kappa\Sigma_{f,g}(\vec{r})\, \phi_g(\vec{r}) \tag{10}$$

3.3 Entalpian laskeminen

Reaktorissa jäähdytteeseen siirtyy jokaisessa kopissa sauvojen tuottaman tehon verran energiaa lämmön muodossa, lämpötilan muutos voidaan laskea entalpioiden avulla. Sisääntulon entalpia voidaan määritellä veden sisääntulon alkuarvoista. Ratkaisua etsitään tehoajolla, jolloin reaktorisydämeen saapuvan veden keskilämpötilan arvioidaan olevan T_{in} = 265 °C luokkaa. Tarkastellaan koppien energiatasetta yhtälöiden luomista varten ja luodaan niistä yhtälöryhmä, jotta voidaan laskea hilalle entalpiat. Tarkastellaan myös polttoainenippujen välillä tapahtuvaa jäähdytteen sekoittumista. Sekoittumista on kuvattu kuvan 7 esittämällä tavalla.



Kuva 7. Koppien energiatase z- ja x-suunnassa sekoittumisen tapauksessa, kun massavirta on jakautunut tasaisesti reaktoriin. (y kuvaa vaihtuvan entalpian määrää prosentteina)

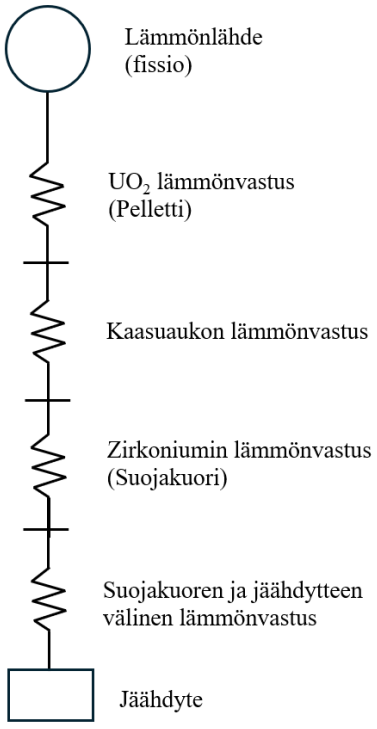


Kuva 8. Koppien energiatase y-suunnassa

Luodaan energiataseesta erillisille tapauksille yhtälöt ja tehdään yhtälöistä yhtälöryhmä käyttäen kappaleessa 3.1 mainittua indeksointia. Eri tapauksia ovat kuution nurkat, reunat, sekä ylä- ja pohjapuoli, sekä erikoistapaus reaktorin sisääntulolle. Oletetaan että vaakasuunnassa koppien välillä vaihtuu jokin osuus entalpiasta, sekä massavirta on identtinen molempiin suuntiin, jotta nettomassavirtaus on nolla. Vettä siis vaihtuu koppien välillä mutta massavirta pysyy samana kopeissa. Pystysuunnassa oletetaan veden virtaavan vain ylöspäin. Entalpian avulla voidaan laskea höyrytaulukoita käyttäen jäähdytteen lämpötila, lämmönjohtaminen, viskositeetti, lämpökapasiteetti ja ominaistilavuus kappaleen 2.3.4 mainitulla menetelmällä.

3.4 Polttoaineen lämpötila ja lämmönjohtuminen sauvassa

Polttoaineen lämpötilajakauma voidaan ajatella lämpöresistanssi kaaviona. Kuvasta 9 nähdään lämmönjohtuminen ja niiden aiheuttamat resistanssit lämmönjohtamiselle, olettaen että lämmönjohtuminen on yksi-dimensionaalista, kaasuaukon leveys on merkitsemätön ja lämmönjohtavuus on vakio suojakuoressa.



Kuva 9. Polttoainesauvan lämpöresistanssi kaavio. Muokattu lähteestä (Bickel, 2012, 30)

3.4.1 Lämmönsiirto rajapintojen yli

Suojakuoresta siirtyvä lämpövuo jäähdytteeseen ja kaasuaukon yli siirtyvä lämpövuo voidaan määritellä Newtonin jäähtymislain avulla (yhtälö 11).

$$q'' = h\Delta T = h_{film}(T_{suojakuori} - T_{jäähdyte}) \tag{11}$$

missä

q''	lämpövuo rajapinnan yli
h	lämmönsiirtokerroin
ΔT	lämpötilaero kahden rajapinnan välillä

Filmin lämmönsiirtokerroin on riippuvainen liian monesta tekijästä, kuten lämmönjohtavuudesta, virtauksesta, geometriasta, lämpötilasta ja paineesta, jotta se laskettaisiin suoraan. Joten käytetään korrelaatioita ja kokeellisia arvoja lämmönsiirtokertoimen ratkaisemiseksi. Oletetaan tapahtuvan lämmönsiirron olevan pakotettua konvektiota, sekä turbulenttisessa virtauksessa (yhtälö 12). (Bickel, 2012)

$$h_{film} = \left(\frac{k}{D_h}\right) Nu \tag{12}$$

missä

k	fluidin lämmönjohtavuus
D_h	hydraulinen halkaisija
Nu	Nusseltin luku

Ydintekniikassa käytetään monesti Dittus-Boelter korrelaatiota Nusseltin luvun ratkaisemista varten. Toinen käytetty korrelaatio on esimerkiksi Colburnin korrelaatio. Dittus-Boelter korrelaatiota voidaan käyttää, kun Re > 10000 tai 0.7 < Pr < 100 ja L/D > 60. Fluidia lämmittäessä käytetään yhtälöä 13, kun taas fluidia jäähdyttäessä, käytetään yhtälöä 14. (Todreas & Kazimi, 1990. 443.)

$$Nu = 0{,}023\ Re^{0,8}\ Pr^{0,4} \tag{13}$$

$$Nu = 0{,}023\ Re^{0,8}\ Pr^{0,3} \tag{14}$$

Colburnin korrelaatiossa yhtälö 15 on samat käyttövaatimukset kuin Dittus-Boelterin käyttämisessä. (Todreas & Kazimi, 1990, 443.)

$$Nu = 0{,}023\, Re^{0{,}8} Pr^{1/3} \tag{15}$$

Nusseltin lukua varten täytyy laskea Reynoldsin luku (yhtälö 16), joka mittaa fluidin virtauksen turbulenssisuutta ja Prandtlin luku yhtälöllä 17. Hydraulinen halkaisija Reynoldsin luvun laskemista varten tulee määrittää tapauskohtaisesti.

$$Re = \frac{\rho w D_h}{\mu} \tag{16}$$

missä

Re	Reynoldsin luku	[-]
w	fluidin virtausnopeus	[m/s]
ρ	tiheys	[kg/m^3]
μ	fluidin dynaaminen viskositeetti	[kg/ms]

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \tag{17}$$

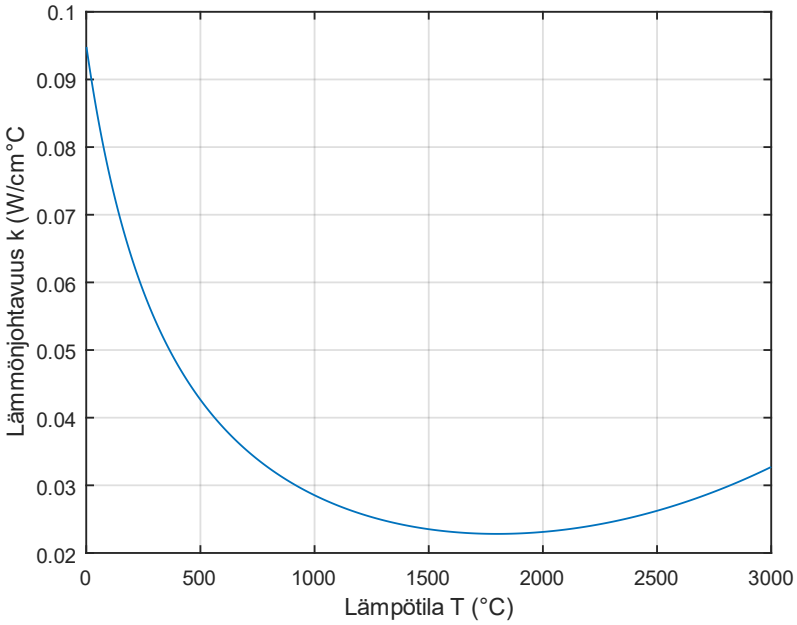
missä

Pr	Prandtlin luku	[-]
c_p	fluidin ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg/K]
k	fluidin lämmönjohtavuus	[W/m/K]

3.4.2 Lämmönjohtavuus polttoainesauvassa

Polttoainetabletin lämpötilagradientin laskemista varten tarvitaan uraanioksidin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona. Käytetään yhtälön 18. sovitetta UO_2 lämmönjohtavuudelle. (Todreas & Kazimi, 1990, 301.) Kuvasta 11 nähdään, kuinka merkittävästi uraanioksidin lämmönjohtavuus laskee, kun se lämpenee.

$$k_f = \frac{38{,}24}{402{,}4 + T_{UO_2}} + 6{,}1256 \cdot 10^{-13}\left(T_{UO_2} + 273\right)^3 \tag{18}$$



Kuva 10. Uraanioksidin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona käyttäen yhtälöä 18.

3.4.3 Lämmönjohtuminen polttoainesauvassa

Lämmönjohtuminen polttoaine pelletissä voidaan laskea sylinterin lämmönjohtavuuden yhtälöllä ja ottaen huomioon lämmönlähteen (yhtälö 19). Vapautuvan lämmön oletetaan jakautuvan tasaisesti polttoaine pelletin tilavuuteen. (Incropera, et al., 2011, 136.)

$$\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}T_f}{\mathrm{d}r}\right)+\frac{P}{k_f}=0 \tag{19}$$

Lämpötilan muutos kaasuaukon ylitse pelletin reunasta suojakuoren reunaan. (yhtälö 20)

$$T_f(R_o)-T_c(R_o)=qO_{aukko} \tag{20}$$

missä

R_c	suojakuoren ulompi säde	[cm]
R_o	polttoaine pelletin säde	[cm]
T_f	polttoainesauvan lämpötila	[cm]
T_c	polttoainesauvan suojakuoren lämpötila	[cm]
O	lämmönjohtumisen resistanssi	

Kaasuaukon aiheuttama resistanssi yhtälö 21.

$$O_{aukko} = \frac{1}{2\pi R_0 h_{aukko}} \tag{21}$$

Integroimalla yhtälö 19 ja sijoittamalla yhtälöt 20 ja 21 saadaan muotoon, joka näkyy kaavassa 22.

$$T_f(r) = T_c(R_o) + \frac{q}{2\pi}\left(\frac{\left(1-\frac{r^2}{R_o^2}\right)}{2k_f} + \frac{1}{R_o h_{aukko}}\right) \tag{22}$$

missä, r on tarkasteltava säteen kohta

Suojakuoren lämmönjohtamiselle käytetään samaa yhtälöä 19, kuin pelletin lämpötilan laskemiselle, mutta ilman lämmönlähdettä. Integroidaan saatu yhtälö ja sijoitetaan yhtälöt 23, 24, jotta saadaan yhtälö 25.

Lämpötilanmuutos suojakuoren yli

$$T_c(R_o) - T_c(R_c) = qO_c \tag{23}$$

Resistanssi suojakuoren yli

$$O_c = \frac{\ln\left(\frac{R_c}{R_o}\right)}{4\pi k_c} \tag{24}$$

Johtuminen suojakuoren ylitse

$$T_c(R_o) = T_c(R_c) + \frac{qR_o^2}{4\pi k_c}\ln[\frac{R_c}{R_o}] \tag{25}$$

Sijoittamalla yhtälö 25 takaisin yhtälöön 22 saadaan muoto yhtälö 26.

$$T_f(r) = T_c(R_c) + \frac{q}{2\pi}\left(\frac{\left(1-\frac{r^2}{R_o^2}\right)}{2k_f} + \frac{1}{R_o h_{aukko}} + \frac{\ln\left(\frac{R_c}{R_0}\right)}{2k_c}\right) \tag{26}$$

Suojakuoren ja jäähdytteen välinen lämpötilan muutos saadaan sijoittamalla yhtälö 27, yhtälöön 26, jolloin saadaan yleinen ratkaisumuoto pelletin lämpötilalle yhtälö 29.

$$T_c(R_c) - T_{jäähdyte}(R_c) = \frac{q}{2\pi R_c h_{film}} \tag{27}$$

Polttoainepelletin lämpötilan funktio

$$T_f(r) = T_{jäähdyte}(R_c) + \frac{q}{2\pi}\left(\frac{\left(1-\frac{r^2}{R_o^2}\right)}{2k_f} + \frac{1}{R_o h_{aukko}} + \frac{\ln\left(\frac{R_c}{R_o}\right)}{2k_c} + \frac{1}{R_c h_{film}}\right) \quad (28)$$

Suojakuoren lämpötilan funktio

$$T_c(r) = T_{jäähdyte}(R_c) + \frac{q}{2\pi}\left(\frac{\ln\left(\frac{R_c}{r}\right)}{2k_c} + \frac{1}{R_c h_{film}}\right) \quad (29)$$

Yksityiskohtainen yhtälöiden johtaminen on kuvattu lähteessä. (Bickel, 2012)

3.5 Painehäviöt reaktorissa

Reaktorissa tapahtuvat painehäviöt voidaan laskea summaamalla eri tekijöiden aiheuttamat painehäviöt yhteen. Irreversiibeleitä painehäviöitä aiheuttavia tekijöitä ovat virtauksen aiheuttamat kitkapainehäviöt ja kertahäviöt.

$$p_{in} - p_{out} = \Delta p_{kitka} + \Delta p_{kerta} \quad (30)$$

Yhtälö 30, saadaan muokatusta Bernoullin yhtälöstä.

$$\Delta p_{kitka} = f\frac{L}{D}\left(\frac{\rho w^2}{2}\right) \quad (31)$$

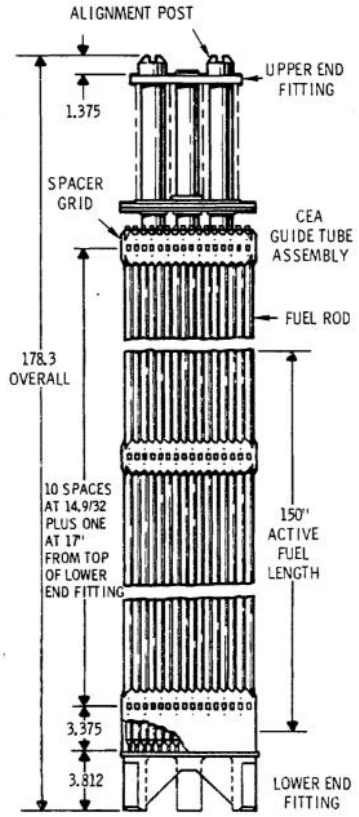
missä

f	virtauksen vastuskerroin
L	virtausreitin pituus

Kitkapainehäviöt saadaan laskettua yhtälöllä 31 ja siihen tarvittava vastuskerroin voidaan laskea käyttämällä Blausiuksen esittämää yhtälöä vastuskertoimen laskemiselle turbulenttisille putkipakettivirtaus tapauksille (yhtälö 32). On monia muita yhtälöitä vastuskertoimen laskemiseksi, mutta Blasiuksen yhtälö on valittu tähän sen yksinkertaisuuden vuoksi. (Todreas & Kazimi, 1990, 379)

$$f = 0{,}316Re^{-0{,}25} \quad (32)$$

Kertahäviöiden aiheuttamat häviöt voidaan arvioida yhtälöllä 33. Tarvittava kertavastuskerroin K riippuu virtauskanavassa tapahtuvista muutoksista, kuten esimerkiksi virtauksen kuristumisesta tai laajentumisesta. Reaktorin nipuissa kertapainehäviöitä aiheuttaa esim. alapäätykappale, välihilat ja yläpäätykappale. Kuvassa 11 näkyy polttoainenipun rakenne, josta nähdään häviöitä aiheuttavia rakenteita.



Kuva 11. Reaktorin polttoainenipun rakenne. (Weihermiller, 1979, 4)

$$\Delta p_{kerta} = K\left(\frac{\rho v^2}{2}\right) \tag{33}$$

Välitukien aiheuttamaa painehäviötä voidaan myös kuvata DeStordeurin korrelaatiolla (yhtälö 34)

$$\Delta p_s = C_s\left(\frac{\rho w_s^2}{2}\right)\left(\frac{A_s}{A_v}\right) \tag{34}$$

missä

A_v rajoittamaton virtausalue välituen alueella

A_s rajoitettu virtausalue välituen alueella

C_s vastuskerroin

Kopissa tapahtuva painehäviö saadaan laskettua lopulta yhtälöllä 30 ja huomioimalla kyseisen kopin kohdalla tapahtuvat kertahäviöt yhtälöllä 33, kitkahäviöt yhtälössä 31 ja mahdolliset välitukien aiheuttamat painehäviöt yhtälöllä 34. Virtauksen voidaan olettaa olevan aina turbulenttista, jotta yhtälöä 32 voidaan käyttää vastuskertoimen laskemista varten.

4 Termohydraulisen tilan ratkaisija Reaktori3DTermo

MATLABilla toteutettu Reaktori3DTermo toimii jatkona kandityössä (Leppänen, 2019) luodulle Reaktori3D -sydänsimulaattorille, joka laskee kasvutekijän ja neutronivuojakauman. (Leppänen, 2019) Reaktori3DTermo ratkaisee kuution muotoisen reaktorinsydämen tehojakauman, jäähdytteen lämpötila- ja tiheysjakauman sekä polttoaineen keskimääräisen lämpötilan aiemmin kappaleissa käydyillä menetelmillä.

Reaktori3DTermo aluksi syöttää arvot Reaktori3D:hen, josta saatu neutronivuojakauma aluksi skaalataan tarkasteltavan reaktorin tehoon. Todellisen neutronivuojakauman avulla ohjelma laskee todellisen tehojakauman kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla, jota voidaan käyttää pohjana termohydraulisiin laskuihin.

Tehojakauman avulla ohjelma laskee entalpian muutokset jokaisessa kopissa ja vaihtaa viereisten koppien kanssa osan entalpiasta sydämen poikkivirtauksien kuvaamiseksi, pitäen kuitenkin saman annetun massavirran jokaisen kopin läpi. Käytännössä simulaattori käy jokaisen hilan kopin läpi ja tarkastaa onko kopeilla naapurikoppeja ja luo kerroinmatriisit ratkaisemista varten. Kerroinmatriiseista entalpia ratkaistiin käyttämällä MATLABin ”linsolve” funktiota.

Ohjelma laskee tämän jälkeen jäähdytteen ominaisarvoja käyttämällä höyrytaulukoita entalpian ja paineen avulla, kuten lämpötilajakauman, tiheyden, viskositeetin, lämmönjohtamiskertoimen ja lämpökapasiteetin. Ohjelma käyttää IAPWS_IF97-malliin perustuvaa MATLABille kirjoitettua höyrytaulukko-ohjelmaa veden aineominaisuuksien hakemiseksi. Ohjelma laskee myös painehäviöt reaktorin ylitse, mutta ei kytke takaisin painehäviön vaikutusta ominaisarvoihin. Uusilla reaktorin paineen arvioilla ei ole vaikutusta laskettuihin arvoihin, mutta niitä olisi mahdollista käyttää uudelleen laskennassa. Laskennassa voitaisiin käyttää paineelle konservatiivisesti sallittua minimipainetta, jossa veden saturaatiolämpötila on alhaisimmillaan. Tässä työssä on vaihtoehtoisesti käytetty nimellispainetta ja mahdollinen paineenvaihtelu voitaisiin esim. huomioida tuloksien epävarmuuksissa.

Jäähdytteen ominaisarvojen avulla ohjelma pystyy ratkaisemaan polttoaineen sauvassa tapahtuvat lämmönsiirtymiset kappaleessa 3.4 esitetyllä tavalla, jonka jälkeen ohjelma laskee polttoaineen keskimääräisen lämpötilan tilavuuteen suhteutettuna. Pelletin

lämpötilajakauma ratkaistiin numeerisesti diskretisoimalla polttoainepelletti 50 yhtä suureen osaan. Polttoainesauvan muut osat eivät vaatineet diskretisointia, sillä lämmönjohtumisen oletetaan pysyvän vakiona. Pelletin lämpötila eri pisteissä ratkaistiin käyttämällä yhtälöä 28. Lämmönsiirtymisen laskeminen polttoaine pelletissä on tehty kahdessa vaiheessa. Aluksi laskentaohjelma arvaa polttoaineen lämpötilan ja käyttää yhtä uraanioksidin lämmönjohtavuutta koko pelletin lämpöjakauman laskemiseen. Korkean lämpötilan vaihtelun vuoksi ohjelma laskee uudestaan uraanioksidin lämmönjohtavuuden saaduilla lämpötiloilla ja iteroi laskentaa, kunnes saadaan lopullinen lämpötilajakauma pelletissä.

Lopuksi Reaktori3DTermo luo kolmiulotteiset sekä kaksiulotteiset kuvaajat reaktorin entalpia jakaumasta, jäähdytteen lämpötilajakaumasta ja polttoaineen keskimääräisestä lämpötilasta. Ohjelma luo myös kuumimman sauvan 1-ulotteisen lämpötilajakauman kuvaajan.

5 Termohydraulisen mallilaskun tulokset ja johtopäätökset

Tämän luvun tarkoitus on verifioida kandityössä luotu Reaktori3DTermo tarkastelemalla kahta eri testitapausta. Verifioinnilla pyritään testaamaan ja varmistamaan koodin toimivuus. Tavoitteeseen päästään laskemalla entalpiajakauma, alkuperäinen lämpötilajakauma, polttoainesauvojen keski- ja maksimilämpötilat sekä lineaaritehot eri sekoittumisilla.

Verifiointia varten reaktorille on valittu täytettävät turvallisuustekniset arvot (taulukko 2). DNBR ei huomioitu rajoitteena, sillä jäähdytteen maksimilämpötila on valittu siten, että se on rajoittavampi tekijä reaktorissa.

Verifiointi on tehty tarkastelemalla kahta eri tapausta, tapausten tulokset on tuotettu kahdella neutronien energiaryhmällä, Dittus-Boelterin menetelmää käyttäen ja taulukon 1 lähtöarvoilla. Eri tapauksen tavoitteena on testata sekoittumisen toimivuutta. Ensimmäisen tapauksen reaktorissa on kotelot polttoainenippujen ympärillä, joten laskentakoppien välillä ei tapahdu sekoittumista. Tapaus 2 käsittelee reaktoria sekoittumisen kanssa eli ilman koteloita. 5 % sekoittuminen on valittu, jotta vesi vaihtuu kerran koko nipun matkalla. Molemmissa tapauksissa massavirta jakautuu tasaisesti reaktoriin. Saatuja tuloksia verrataan kirjallisuudesta saataviin arvoihin, sekä koodin tuloksia on varmistettu vertaamalla käsin laskettuihin arvoihin.

Taulukon 1 mukaiset arvot on valittu siten, että turvallisuustekniset rajoitteet (taulukossa 2) täyttyvät. Taulukon 1 arvot on valittu aluksi tyypillisten PWR-reaktoreiden arvoista.

Taulukko 1. Käytetyt alkuarvot

Alkuarvo		Arvo	
Teho	P	92,5	MW
Massavirta	q_m	500	[kg/s]
Paine	p	123	[MPa]
Veden sisääntulolämpötila	T_{in}	260	[°C]
Sekoittumisen määrä	y	0 tai 5	[%]

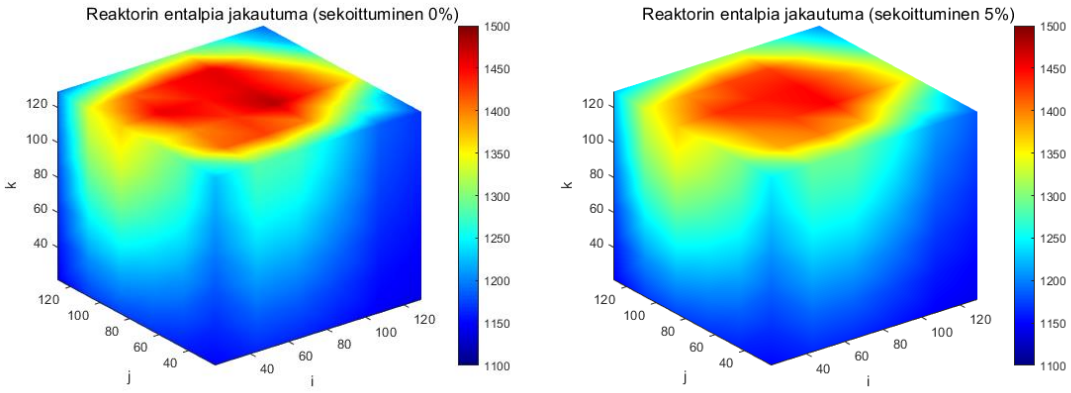
Taulukossa 2 on esitetty täytettävät turvallisuustekniset arvot. Turvallisuusrajoitteiden tavoitteena on varmistaa reaktorin turvallinen toiminta ja välttää lämmönsiirtokriisejä.

Taulukon 2 arvot on valittu siten, että jäähdytteen saturaatiolämpötilaan ei päädytä, eikä sulamista tapahdu.

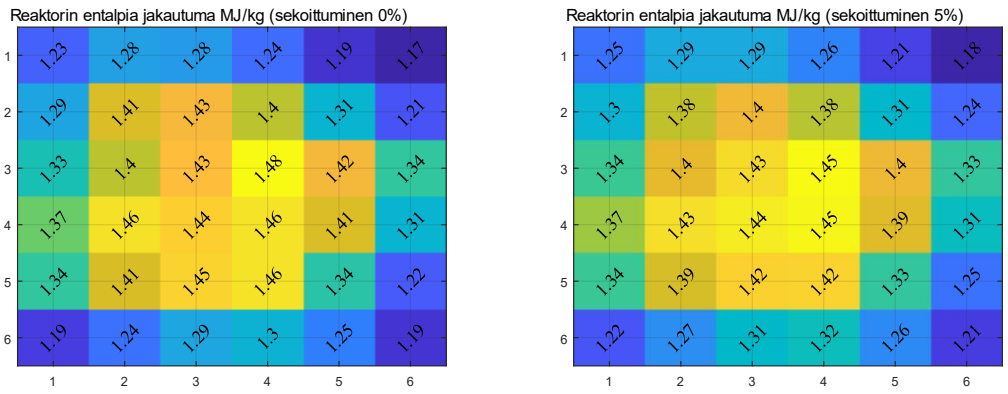
Taulukko 2. Täytettävät turvallisuustekniset arvot.

Rajoittavat tekijät		Arvo	
Polttoaineen lämpötila	T_f	2800	[C]
Suojakuoren lämpötila	T_c	1200	[C]
Jäähdytteen lähtölämpötila	T_j	324	[C]
Jäähdytteen saturaatiolämpötila	$T_{j,sat}$	325	[C]

Kuvassa 12 on reaktorin 3D entalpiajakaumat molemmille tarkastelutapauksille. Kuvassa 13 on puolestaan sydänkarttakuvat jäähdytteen lähtölämpötilasta molemmissa tapauksissa. Tulos kuvista 12 ja 13 huomataan, että reaktorin nurkissa olevat niput jäävät kylmiksi verrattuna keskellä oleviin nippuihin. Koppien välinen sekoittuminen kuitenkin tasoittaa lämpötilaeroja reunojen ja keskikohdan välillä oletetusti, sekä laskee korkeita lämpöpiikkejä keskellä. Sekoittumisen etu etenkin huomataan kuvasta 14. Jäähdytteen lähtölämpötilajakauma tasoittuu merkittävästi ja samalla nähdään sekoittumisen toimivan.



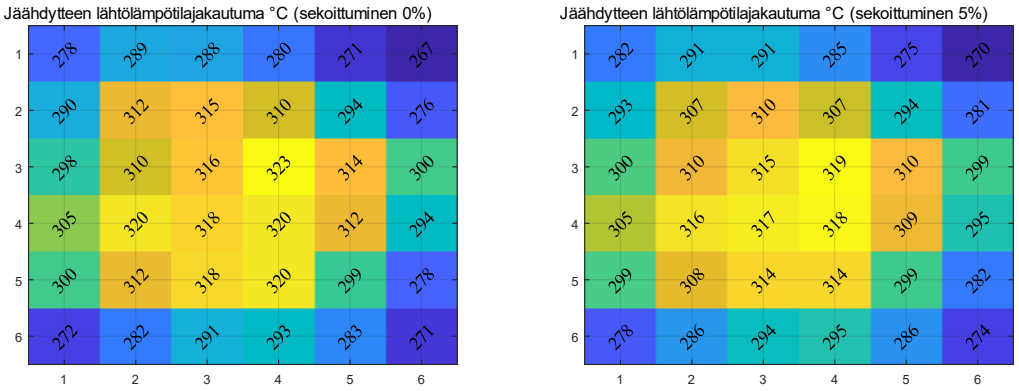
Kuva 12. Entalpiajakauma tapauksille 1 (vasen) ja 2 (oikea).



Kuva 13. Lähtöentalpiajakauma tapauksille 1 (vasen) ja 2 (oikea).

Koodin toimivuutta on varmistettu laskemalla käsin entalpian nousu reaktorin ylitse ja verrattu sitä Reaktori3DTermon laskemaan entalpian nousuun, joka perustuu jakaumaan. Molemmissa tapauksissa saatiin sama tulos. Entalpian nousu tarkastettiin myös sekoittumisen kanssa ja päästiin samaan tulokseen.

Kuvassa 14 on esitetty kuvan 13 jäähdytteen lähtöentalpiajakauma lähtölämpötiloina.

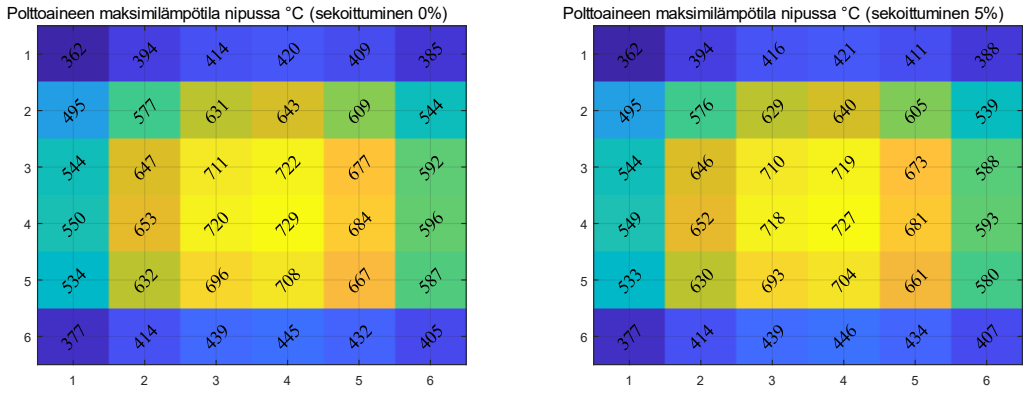


Kuva 14. Jäähdytteen lähtölämpötilajakauma tapauksille 1 (vasen) ja 2 (oikea).

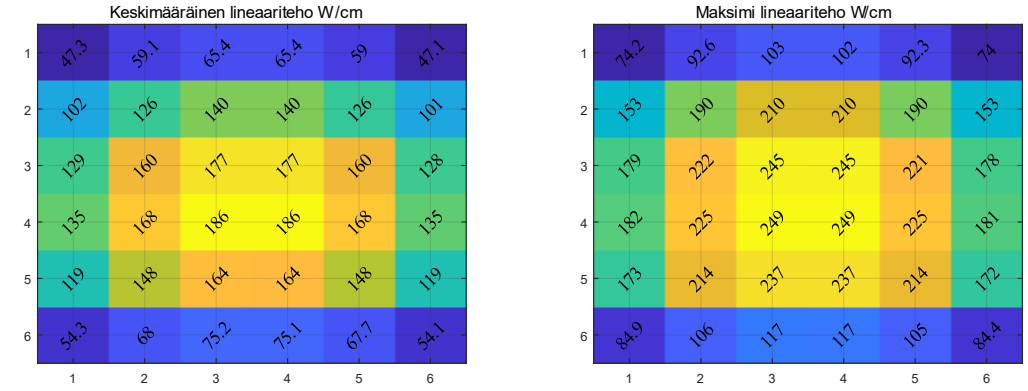
Kuvassa 15 on esitetty polttoaineen maksimilämpötilat eri nipussa molemmille tapauksille. Polttoaineen keskimääräinen lineaariteho ja maksimi lineaariteho on esitetty kuvassa 16, molemmissa tapauksissa on sama tehojakauma, joten sekoittuminen ei vaikuta tähän tapaukseen.

Kuvasta 15 nähdään polttoainenipun kuumin keskimääräinen lämpötila eli käytännössä nipun korkeimman tehon kohdassa oleva lämpötila. Polttoaineen maksimilämpötila nipussa kuva 15 vastaa hyvin kuvassa 16 esitettyä maksimilineaaritehoa, joka kertoo, että koodi

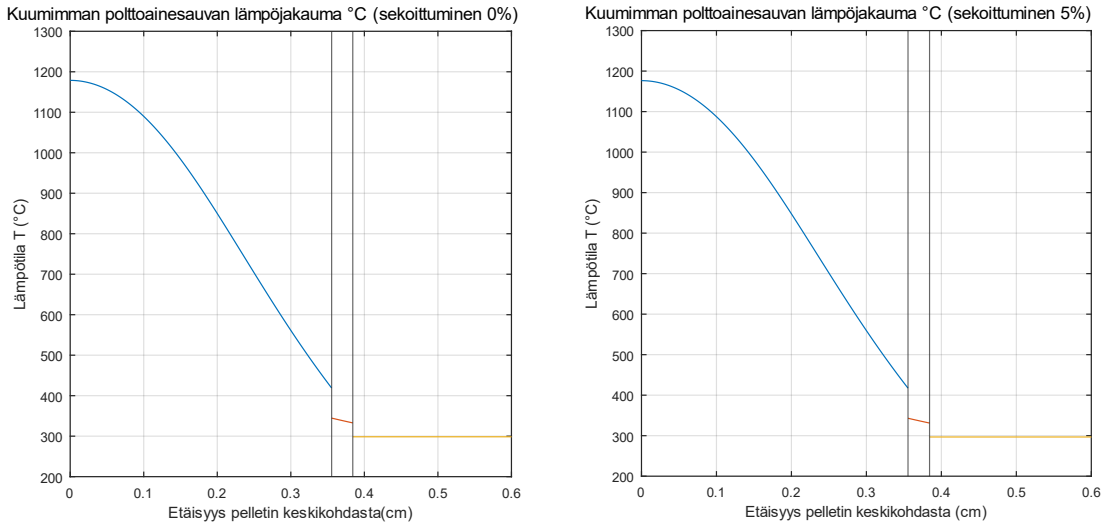
toimii oikein. Lineaaritehon laskenta tarkastettiin myös käsinlaskennalla ja saatiin samat tulokset molemmille kuvan 16 tapauksille.



Kuva 15. Polttoaineen maksimilämpötila nipussa tapauksille 1 (vasen) ja 2 (oikea).



Kuva 16. Polttoainesauvojen keskimääräinen lineaariteho ja maksimi lineaariteho samalla lineaaritehojakaumalla.



Kuva 17. Kuumimman polttoainesauvan lämpötilajakauma tapauksille 1 (vasen) ja 2 (oikea).

Voidaan verrata kuvaa 17 kirjallisuudessa laskettuihin arvoihin (Todreas & Kazimi, 1990, 332.) ja huomataan tuloksien olevan samassa kokoluokassa (liite 2). Saatu 1-D Lämmönsiirtojakauma kuva 17 näyttää odotetun muotoiselta ja siitä nähdään selvästi odotetut lämpötilan hyppäykset kaasuaukon yli polttoainepelletistä suojakuoreen sekä lämpötila ero suojakuoren ja jäähdytteen välillä. Huomataan myös suuri lämpötilaero polttoainepelletissä, minkä vuoksi laskennassa on otettu huomioon uraanioksidin lämmönjohtavuuden muuttuminen lämpötilan suhteen. Sekoittuminen ei aiheuttanut merkittävää eroa kuumimman polttoainesauvan lämpöjakaumassa ja maksimilämpötila tippui vain muutamalla asteella (kuva 17).

Tulokset ovat järkeviä, sekä verrattavia kirjallisuudessa oleviin tuloksiin. Koodi voidaan katsoa verifioiduksi, mutta validointi voitaisiin suorittaa vertaamalla tuloksia mittausdataan. Jos tämä ei ole mahdollista, validointi voidaan tehdä vertaamalla tuloksia johonkin toiseen laskentakoodiin.

Laskentaohjelmaa voitaisiin myös parantaa lisäämällä virtausverkko jäähdytteelle, tällä hetkellä jäähdytteen virtausjakauma oletetaan tasaiseksi. Ohjelma ei myöskään huomioi nippujen sisäistä tehojakaumaa, vaan tehojakauma oletetaan tasaiseksi. Laskentaohjelma ei myöskään laske lopullisia tuloksia, sillä ohjelma tulisi takaisin kytkeä Serpenttiin pohjautuvaan ryhmävakiomalliin. Ryhmävakiomalilla voitaisiin laskea uudet vaikutusalat ja laskentaa voitaisiin iteroida, jotta päästäisiin lopullisiin tarkkoihin arvoihin. Tämä vaihe on tärkeä, sillä monilla arvoilla on takaisinkytkentöjä. Esimerkiksi veden tiheys vaikuttaa termisten neutronien määrään merkittävästi.

6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli luoda yksinkertainen ratkaisija, joka kykenee ratkaisemaan reaktorin termohydraulisen tilan tärkeimmät suureet. Tässä tapauksessa ratkaistaan tehotiheysjakauma neutronivuojakauman pohjalta sekä jäähdytteen entalpia- ja lineaaritehojakauma tehotiheysjakauman pohjalta. Jäähdytteen sekoittumista huomioitiin nippujen välillä. Entalpiajakaumasta saadaan ratkaistua jäähdytteen ominaisarvot. Lineaaritehosta ja jäähdytteen lämpötilasta puolestaan ratkaistaan polttoainesauvan lämpötilajakauma, jossa sauvan rakenne ja uraanioksidin lämpötilariippuvainen lämmönjohtavuus on otettu huomioon.

Työssä saavutettiin tavoite luomalla Reaktori3DTermo-ohjelma, joka ratkaisee kaikki aiemmin mainitut suureet. Ohjelma verifioitiin laskemalla suureet kahdella eri testitapauksella ja vertaamalla tuloksia käsin laskettuihin arvoihin sekä kirjallisuudesta saataviin arvoihin. Ensimmäisessä testitapauksessa polttoainenippujen välillä ei tapahtunut sekoittumista ja toisessa jäähdyte pääsi kerran vaihtumaan nipun matkalla reaktorisydämen läpi. Testitapauksien tarkoitus oli tutkia, toimiiko jäähdytteen sekoittumismalli oikein. Samalla tarkasteltiin, tapahtuuko muissa jakaumissa oikeansuuntaisia muutoksia. Koodi toimi oikein tarkastelujen perusteella.

Oikein toimiva termohydraulinen ratkaisija on olennainen osa lataussuunnittelussa käytettävää reaktorisimulaattoria. Reaktori3DTermo voidaan ottaa osaksi Reaktori3D-ohjelmaa. Seuraava vaihe on luoda ryhmävakiomalli, joka laskee reaktorisydämen ryhmävakiot termohydraulisen tilan pohjalta, jolloin takaisinkytkennät saadaan mallinnettua. Reaktori3DTermoa voitaisiin laajentaa ja sen tarkkuutta parantaa lisäämällä virtausverkkomalli sekä ottamalla huomioon nippujen sisäinen tehojakauma.

Lähteet

Nuclear Energy Agency (NEA), (2024). [verkkoaineisto]. [viitattu 4.2.2024]. Saatavissa: https://www.oecd-nea.org/janisweb

Bickel J. H. (2012). *Fundamentals of Nuclear Engineering Module 9: Core Heat Transfer*. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.2.2024]. Saatavissa: https://www.nrc.gov/docs/ML1213/ML12135A672.html

Bodansky, D. (2005). *Nuclear Energy Principles, Practices, and Prospects*. 2. painos. New York: Springer Science + Business Media, LLC. ISBN 0-387-20778-3

Incropera, F. P. *et al*. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. painos. Hoboken (NJ): Wiley. ISBN 13 978-0470-50197-9

Isolankila A. *et al*. (2004). *Ydinturvallisuuden varmistaminen.* Säteilyturvakeskus. ISBN:951-712-507-0. Saatavilla: https://stuk.fi/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja

Kalli, H. (2012). *Ydinreaktorien Fysiikka osa 1*. [opetusmoniste]. EN C-131, LUT University

Leppänen, R. (2019). *Neutronivuojakauman ja kasvutekijän laskeminen differenssimenetelmällä.* [kandidaatintyö]. Saatavissa: https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019110536705

Miller J. S, *et al*. *Fundamentals of Nuclear Engineering Module 11: Single Phase Heat Transfer and Fluid Flow*. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.2.2024]. Saatavissa: https://www.nrc.gov/docs/ML1213/ML12135A672.html

Mikofski, M. (2023). *IAPWS_IF97*. [verkkoaineisto]. [viitattu 20.4.2024]. Saatavissa: https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35710-iapws_if97

Oka, Y. (2014). *Nuclear Reactor Design.* Tokyo: Springer Japan. ISBN 978-4-431-54897-3

Oka, Y., & Suzuki, K. (2013). *Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control*. Tokyo: Springer Japan. ISBN 978-4-431-54194-3

Stacey, W. M. (2018). *Nuclear Reactor Physics*. Kolmas painos. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. ISBN: 978-3-527-81230-1

STUK, Säteilykeskus. (2019). *Säteilyturvakeskus Ydinturvallisuusohjeet (YVL-Ohjeet)*. [verkkoaineisto]. [viitattu 1.4.2024]. Saatavilla: https://stuk.fi/yvl-ohjeet

Tapani E. *et al*. (2004). *Ydinvoimalaitos tekniikan perusteita.* Säteilyturvakeskus. ISBN:951-712-507-0. Saatavilla: https://stuk.fi/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja

Todreas, N. E., & Kazimi, M. S. (1990). *Nuclear Systems 1 Thermal Hydraulic Fundamentals.* New York: Hemisphere. ISBN : 0-89116-935-0

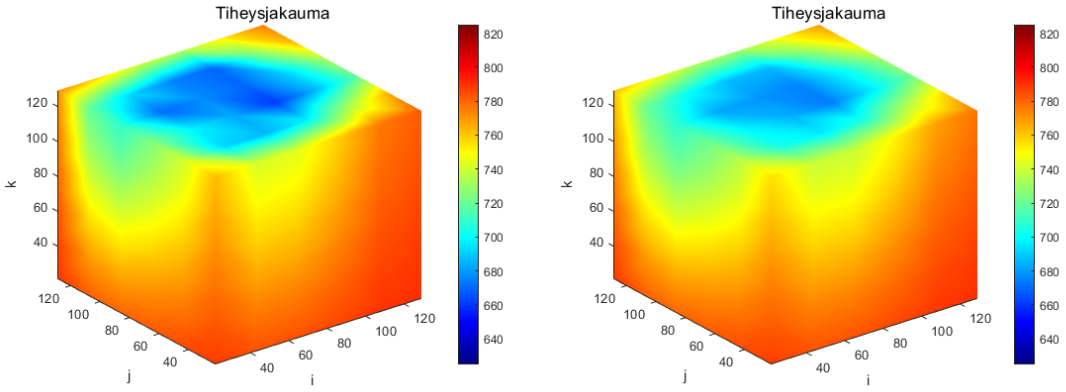
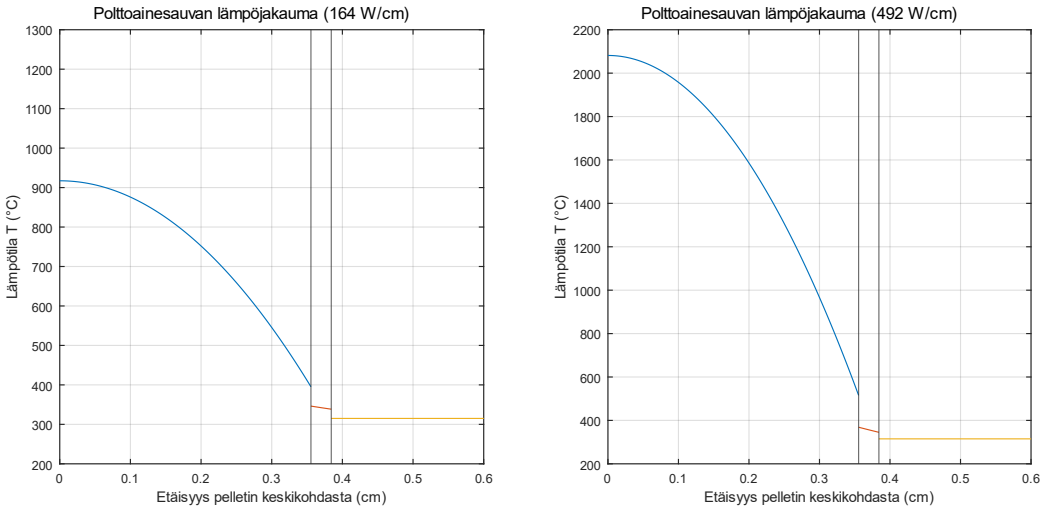
Todreas, N. E., & Kazimi, M. S. (1990). *Nuclear systems 2 Elements of Thermal Hydraulic design.* New York: Hemisphere. ISBN 0-89116-936-9

Tonkunas A., Pabarcius R., & Slavickas A. (2020). *Evaluation of coolant density history effect in RBMK type fuel*, [verkkoaineisto]. [viitattu 29.4.2024]. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573319309775

Weihermiller W. B., Allison G. S. (1979). *LWR nuclear fuel Bundle Data for use in fuel bundle handling.* [verkkoaineisto]. [viitattu 20.4.2024]. Saatavilla: https://www.osti.gov/servlets/purl/5856990

Yu, J. (2022). *Fundamental Principles of Nuclear Engineering.* Singapore: Springer. ISBN: 9811608385

Liite 1. Veden tiheyden 3-D jakauma tapauksille 1 ja 2.



Liite 2. Polttoainesauvan lämpötilajakauma kirjallisuuden lineaariteholla. (Eri jäähdytteen lämpötila, sekä kaasuaukon huomioiminen lähteeseen verrattuna.)