

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

RBMK-KOEREAKTORIN MALLINTAMINEN

MODELING AN RBMK TEST REACTOR

Työn tarkastaja: Ville Rintala

Työn ohjaaja: Ville Rintala

Lappeenranta 29.10.2013

Kari Eloranta

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Kari Eloranta

Opinnäytteen nimi: RBMK-kooreaktorin mallintaminen

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2013

33 sivua, 5 kuvaa ja 4 taulukkoa

Hakusanat: jäähdyte, kasvukerroin, kooreaktori, Monte Carlo, RBMK, Serpent

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia jäähdytteen poistamisen vaikutusta RBMK-kooreaktorin kasvukertoimeen ja erityisesti sitä, kuinka hyvin Monte Carlo -menetelmää käyttävä Serpent-laskentakoodi pystyy mallintamaan jäähdytteen poistamisen vaikutuksen. Aluksi tarkastellaan taustatietoina käytettyä raporttia käsiteltävän kooreaktorin kriittisyysajoista ja aiemmista simulaatioista, sekä RBMK-reaktorin ominaispiirteitä ja Monte Carlo -simulaation teoriaa. Seuraavaksi esitellään kooreaktorista luotu malli, selitetään mallinnettaessa tehdyt yksinkertaistukset ja kuvataan simulaation alkutilanne. Lopuksi käsitellään simulaation tuloksia ja Serpentillä luodun mallin soveltuvuutta verrattuna aiemmin suoritettuihin simulaatioihin.

SISÄLLYSLUETTELO

Symboli- ja lyhenneluettelo	5
1 Johdanto	6
2 Tutkimusaineisto ja -menetelmät	7
2.1 Tutkimusaineisto	7
2.2 RBMK -reaktori	8
2.2.1 Positiivinen aukkokerroin	9
2.2.2 Reaktorityypin parannukset	10
2.3 Monte Carlo -menetelmä	11
2.3.1 Simulaation kulku	11
2.3.2 Kriittisyyslähdesimulaatio	13
2.4 Serpent.....	14
3 Kooreaktorin mallintaminen	16
3.1 Luotu malli	17
3.1.1 Grafiittihidaste	17
3.1.2 Polttoainesauvat	18
3.1.3 Polttoaine-elementit	19
3.1.4 Kannakkeet.....	22
3.1.5 Jäähdyte.....	23
3.1.6 Ylä- ja alapuoliset rakenteet.....	23
3.1.7 Fysikaaliset korjaukset	24
3.2 Mallinnettaessa tehdyt oletukset ja yksinkertaistukset.....	24
3.2.1 Simulaation reunaehto.....	25
3.2.2 Geometrian yksinkertaistukset	25
3.2.3 Homogenisoinnit	26
3.3 Simulaation alkutilanne	27
4 Tulokset ja johtopäätökset	28
4.1 Simuloinnin tulokset.....	28
4.2 Mallin soveltuvuus	29

	4
5 Yhteenveto	32
Lähdeluettelo	33

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

DBRC	Doppler-Broadening Rejection Correction
DLC/MCUDAT-2.1	Monte Carlo Universalin materiaalikirjaston versio 2.1
ENDF/B-V	Evaluated Nuclear Data File -materiaalikirjaston versio B-V
JEFF	Joint Evaluated Fission and Fusion -materiaalikirjasto
MCNP	Monte Carlo N-Particle -laskentakoodi
MCU	Monte Carlo Universal -laskentakoodi
NEA	Nuclear Energy Agency
RBMK	Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny, eli suuritehoinen kanavareaktori

1 JOHDANTO

Neuvostoliitossa suunnitellun RBMK-reaktorityypin kenties suurin puute on niin kutsuttu positiivinen aukkokerroin, eli reaktorin tehon kasvaminen jäähdytteenä käytetyn veden harvetessa. Tämä ominaispiirre voi ääritilanteessa johtaa jopa ketjureaktion riistäytymiseen hallinnasta, kuten kävi Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuuden yhteydessä vuonna 1986.

Tässä kandidaatintyössä on simuloitu jäähdytteen poistamisen vaikutusta RBMK-koelaitteiston kasvukertoimeen käyttäen Teknologian tutkimuskeskus VTT:n kehittämää Serpent Monte Carlo -laskentakoodia. Simulaatio pohjautuu Neuvostoliitossa 1980-luvulla suoritettuihin RBMK-koereaktorin mittauksiin ja vertailukohtana käytetään mittaustulosten lisäksi venäläisten ja yhdysvaltalaisen tutkijoiden omilla Monte Carlo -laskentakoodillaan suorittamia simulaatioita ja heidän saamiaan tuloksia.

Tavoitteita tällä työllä on kaksi. Ensimmäinen on simulaation avulla tutkia RBMK-reaktorin kasvukertoimen käyttäytymistä, kun reaktorista poistetaan jäähdytteenä käytetty vesi. Toinen tavoite on tutkia, kuinka hyvin Serpent suoriutuu kyseisen tilanteen mallintamisesta, vertaamalla sillä saatuja tuloksia aiempien simulaatioiden ja koetilanteessa suoritettujen mittausten tuloksiin.

2 TUTKIMUSAINEISTO JA -MENETELMÄT

Tässä luvussa esitellään pääasiallisena lähdemateriaalina käytetty tutkimusaineisto, RBMK-reaktorityypin ominaispiirteitä, sekä Monte Carlo -simulaatiota ja simulointiin käytettyä Serpent -laskentakoodia.

2.1 Tutkimusaineisto

Pääasiallisena lähdemateriaalina tähän kandidaatintyöhön käytetään Nuclear Energy Agency:n raporttia "RBMK Graphite Reactor: Uniform Configurations of UO₂ Fuel Assemblies, And Configurations of UO₂ Assemblies With Empty Channels, Water Columns, And Boron or Thorium Absorbers, With or Without Water In Channels". Raportti kuvaa Russian Research Center "Kurchatov Institute":ssa vuosina 1982-1988 suoritettuja RBMK -koelaitteiston ajoja, sekä näiden ajojen pohjalta myöhemmin suoritettuja simulaatioita. (Nuclear Energy Agency, 2004, 1.)

Kurchatov Institutessa oli tuolloin 25 watin tehoinen RBMK -koereaktori, jolla tehtiin kriittisyysajoja 28 erilaisella polttoainelatauksella, joista osassa oli pelkkää polttoainetta, osassa lisäksi vettä ja joissain tapauksissa myös thorium- tai booriabsorbaattoreita (Nuclear Energy Agency, 2004, 1). Tässä kandidaatintyössä keskitytään tutkimaan kahta identtistä polttoainelatausta, joista toisessa on pelkkää polttoainetta ja toisessa lisäksi vettä polttoainekanavissa.

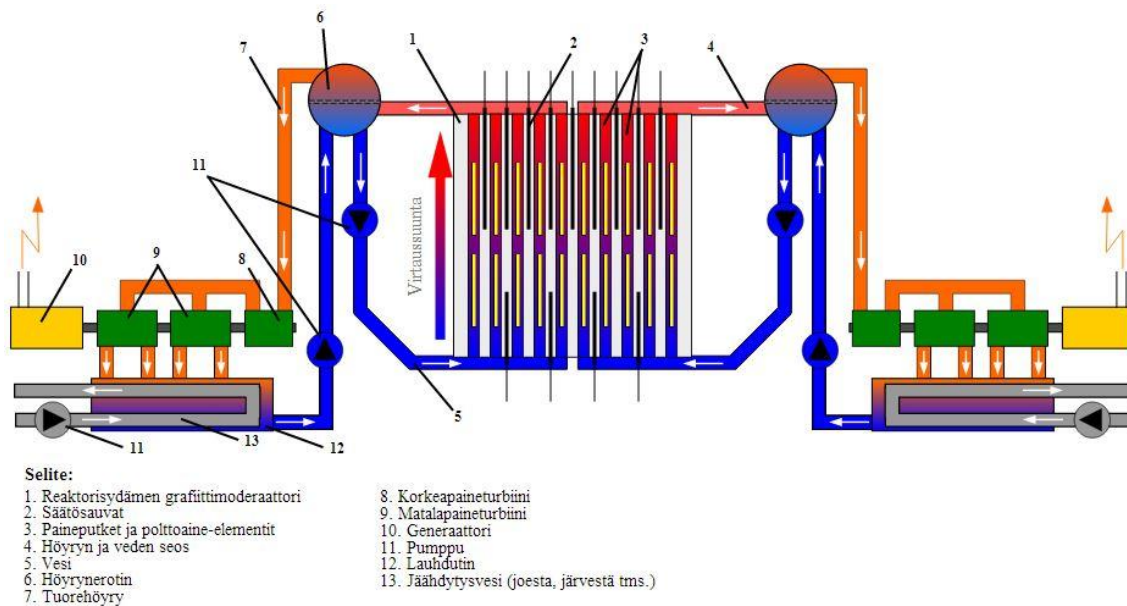
Raportti sisältää yksityiskohtaisen kuvauksen alkuperäisestä koelaitteistosta, sekä todellisten mittausten pohjalta saadut reaktorin kasvutekijät kullekin polttoainelataukselle. Lisäksi raportissa on kuvattu venäläisten tutkijoiden omalla Monte Carlo Universal (MCU) -laskentakoodillaan ja DLC/MCUDAT-2.1 -materiaalikirjastollaan saamat vastaavat simuloitut kasvutekijän arvot ja yhdysvaltalaisien tutkijoiden Monte Carlo N-Particle (MCNP) -laskentakoodillaan ja Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B-V) -materiaalikirjastollaan saamat simuloitut arvot. Tässä työssä suoritetaan vastaava simulaatio suomalaisella Serpent -

laskentakoodilla ja verrataan saatuja kasvutekijän arvoja raportissa kyseisille polttoainelatauksille esitettyihin kasvutekijöihin.

2.2 RBMK -reaktori

Neuvostoliitossa suunniteltu RBMK (reactor bolshoy moshchnosty kanalny, eli suuritehoinen kanavareaktori) on toisistaan erillisillä polttoainekanavilla varustettu reaktoriyppi, jossa käytetään jäähdytteenä tavallista ns. kevyttä vettä ja hidasteena grafiittia. Grafiittia on jokaisen polttoainekanavan ympärillä, ja sen tehtävä on hidastaa fission vapautuvat neutronit sellaiselle energiatasolle, joka mahdollistaa fissioketjureaktion jatkumisen. (Hore-Lacy, 2009.)

Jäähdytettä kierrätetään pumpuilla polttoainekanavien lävitse, mikä jäähdyttää polttoainetta ja sitoo lämpöenergiaa jäähdytteeseen. Reaktorisydämen polttoainekanavien jälkeen jäähdyte kulkeutuu höyrynerottimeen. Erotettu höyrystynyt jäähdyte johdetaan turbiinille ja lauhduttimelle. Lauhtumisen jälkeen nestemäinen jäähdyte johdetaan taas takaisin höyrynerottimeen, josta nestemäinen jäähdyte pumpataan jälleen jäähdyttämään polttoainetta. Kiertopiirin ja reaktorin pääosat on esitetty kuvassa 2.1. Yhdellä reaktorilla on kaksi rinnakkaista turbiinilla ja lauhduttimella varustettua kiertopiiriä, joissa kummassakin on kaksi höyrynerotinta (World Nuclear Association, 2010).



Kuva 2.1: RBMK-laitoksen periaatekuva (Wikimedia Commons, CC BY-SA)

Kanavatyypisessä reaktorirakenteessa on kaksi erityistä etua verrattuna suuriin yhtenäisiin painesäiliöihin. Suuren painesäiliön valmistaminen on vaativa ja pitkäkestoinen projekti, joten on helpompi ja nopeampi valmistaa useita yksinkertaisia pieniä painekanavia. Tästä aiheutuu kuitenkin myös reaktorimallille tyypillinen ongelma, suuri määrä erilaisia liitoksia ja venttiilejä, joita on vaikea valmistaa ja tarkastaa luotettavasti. (Sandberg, 2004, 53.)

Toinen kanavarakenteen tuoma merkittävä etu on jatkuvan polttoainelatauksen mahdollisuus. Koko laitosta ei tarvitse polttoainetta vaihdettaessa ajaa alas, vaan yksittäiset paineputket voidaan erottaa muusta prosessista ja vaihtaa erotetun kanavan polttoaine käynnin aikana (Hore-Lacy, 2009).

2.2.1 Positiivinen aukkokerroin

Suurin RBMK -reaktorityypin ongelma on niin sanottu positiivinen aukkokerroin, joka oli suuri osatekijä myös Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuudessa vuonna 1986. Aukkokerroin kuvastaa reaktorin tehon muutoksen suuntaa ja suuruutta jäähdytteen

aukko-osuuden suhteen. Aukko-osuus kuvastaa jäähdytteen höyrypitoisuutta, eli aukko-osuus on sitä suurempi, mitä höyrystyneempää jäähdyte on. Positiivinen aukkokerroin tarkoittaa siis sitä, että reaktorin teho kasvaa jäähdytteen harvetessa. (Hore-Lacy, 2009.)

Useissa muissa reaktorityypeissä jäähdyte toimii myös hidasteena, jolloin sen harveneminen heikentää neutroneiden hidastumista fissioreaktiota ylläpitävälle tasolle ja siten laskee reaktorin tehoa. RBMK-tyypin reaktoreissa hidasteena toimii polttoainekanaavia ympäröivä grafiitti, jonka tiheys ei riipu jäähdytteestä, eli jäähdytteen harventuessa neutronit hidastuvat edelleen yhtä hyvin ja ketjureaktio pysyy käynnissä. Lisäksi jäähdytteenä toimiva vesi harventuessaan absorboi yhä vähemmän neutroneita, mikä kiihdyttää ketjureaktiota. Kiihtynyt ketjureaktio johtaa suurempaan lämmöntuottoon, ja entistä harvempaan jäähdytteeseen. Tämä kiihdyttää ketjureaktiota entisestään ja mahdollisesti johtaa sen riistäytymiseen hallinnasta. (Hore-Lacy, 2009.)

2.2.2 Reaktorityypin parannukset

Tshernobylin onnettomuuden jälkeen RBMK-tyypin reaktoreihin toteutettiin lukuisia parannuksia, joista useiden tehtävä oli pienentää positiivisen aukkokertoimen aiheuttamia ongelmia. Reaktoreihin asennettiin entisten lisäksi 80-90 kiinteää neutroniabsorbaattoria ja reaktoriin laskettujen säätösauvojen minimimäärän turvaraja käynnin aikana nostettiin noin 28:sta sauvasta noin 45:een sauvaan. Näistä muutoksista johtuen polttoaineen rikastusaste nostettiin 2 prosentista 2,4 prosenttiin kompensoimaan lisääntyntä neutronien absorptiota reaktorissa. (World Nuclear Association, 2010.)

Erityisen tärkeä muutos oli säätösauvojen jatkeiden uudelleensuunnittelu. Alunperin säätösauvojen päihin oli kiinnitetty grafiittiset jatkeet, joiden tehtävä oli estää jäähdytysvettä täyttämästä ulosvedettyjen säätösauvojen alapuolista tilavuutta. Sauvojen ollessa kokonaan ulosvedettyinä kunkin alkuperäisen jatkeen alapuolelle kuitenkin jäi vielä tilaa vedelle. Tästä seurasi, että säätösauvojen tiputtaminen pikasulussa vastoin odotuksia aiheuttikin terävän piikin neutronivuohon, kun grafiittiset jatkeet syrjäyttivät alapuolellaan olleen veden ja heikensivät neutronien absorptiota tuolla alueella.

Uudistuksessa jatkeet suunniteltiin siten, että niiden alapuolelle ei enää jäänyt vesitilavuutta. (World Nuclear Association, 2010.)

Lisäksi reaktorityyppiin tehtiin muita uudistuksia, joilla esimerkiksi tehostettiin turva- ja hätäjähdytysjärjestelmien toimintaa ja estettiin turvajärjestelmien ohittaminen käynnin aikana. (World Nuclear Association, 2010.)

2.3 Monte Carlo -menetelmä

Reaktorifysiikan sovelluksissa Monte Carlo -menetelmällä mallinnetaan yksittäisistä neutroneista koostuvien neutronisukupolvien kulkua reaktorissa. Kutakin neutronia kuljetetaan reaktorissa toisista neutroneista riippumattomasti sen elinkaaren alusta loppuun. Tässä työssä käsitellään kriittisyyslähdesimulaatiota, jossa uusi neutronisukupolvi perustuu edellisen sukupolven aiheuttamiin reaktioihin. Elinkaari alkaa kun neutroni emittoituu, ja päättyy kun se absorboituu, aiheuttaa fission tai poistuu tarkastelualueelta. Menetelmää käyttämällä reaktorin kasvutekijä saadaan yksinkertaisesti laskettua seuraavan neutronisukupolven koon suhteena edellisen sukupolven kokoon. (Leppänen, 2007, 113.)

Menetelmä perustuu todennäköisyyksiin, eli sen avulla pystytään määrittelemään tarvittavalla tilastollisella tarkkuudella neutronien käytös reaktorissa. Neutronien määrää lisäämällä saadaan lisää luotettavuutta simulaation tuloksiin, eli tilastollisille menetelmille tyypillisesti otannan kasvattaminen parantaa tulosten luotettavuutta. (Leppänen, 2007, 123). Suuren neutronimäärän käsittely ja useiden sukupolvien mittaisen historian tarkka simuloiminen vaatii paljon laskentatehoa ja sen takia Monte Carlo -simulaatiot ovat vielä nykyisilläkin tietokoneilla raskaita ja aikaavieviä toteuttaa. (Leppänen, 2007, 17.)

2.3.1 Simulaation kulku

Kuten aiemmin mainittu, simulaatiossa kuljetetaan yksittäisiä neutroneita reaktorissa. Jotta liikkeitä voidaan mallintaa, on tunnettava ympäristö jossa neutroni liikkuu. Monte Carlo -simulaatiossa simuloitava alue jaetaan soluihin ja kunkin solun sisältämät useat

materiaalit homogenisoidaan yhdeksi, koko solun kattavaksi ja aineominaisuuksiltaan tasaiseksi materiaaliksi. Tämä tarkoittaa, että homogeeniselle materiaalille lasketaan alkuperäisten materiaalien perusteella keskimääräiset aineominaisuudet painottamalla kunkin materiaalin osuudella solun tilavuudesta. Tällöin kuljetettaessa neutronia solusta toiseen, sitä ympäröivän materiaalin ominaisuudet eivät kulloinkaan laskentahetkellä riipu paikasta. (Leppänen, 2007, 76.)

Lähtöpisteessä neutronille arvotaan sen kulkema matka ja kuljetetaan se arvotun matkan päähän. Matkan pituus riippuu kyseisen solun sisältämän homogeenisen materiaalin makroskooppisesta kokonaisvaikutusalasta, sillä se käytännössä kuvaa todennäköisyyttä, jolla neutroni aiheuttaa reaktion kyseisessä materiaalissa suhteessa materiaalissa kuljetun matkan pituuteen. Mikäli neutroni ylittää matkallaan solujen välisen rajapinnan, neutroni siirretään rajapinnalle ja matkan loppuosalle arvotaan uusi pituus käyttäen seuraavan solun makroskooppista kokonaisvaikutusalaa. (Leppänen, 2007, 97.)

Kun neutroni on siirretty päätepisteeseen, arvotaan pisteessä tapahtuva reaktio. Mahdollisia reaktioita on kolme: absorptio, fissio ja sironta. Kunkin reaktion todennäköisyys riippuu kyseisen reaktion makroskooppisesta vaikutusalasta kyseisessä solussa. Absorptiossa neutroni absorboituu johonkin ympäröivän materiaalin ytimistä ja uusia neutroneita ei synny, eli neutroni poistuu simulaatiosta. (Leppänen, 2007, 50, 104).

Fissiossa neutroni aiheuttaa ympäröivän materiaalin ytimelle fission, jonka tuloksena syntyy uusia neutroneita, eli historiaan syntyy oma haara kullekin syntyneelle neutronille. Sironnassa neutroni kimpoaa kohdeytimestä ja jatkaa matkaansa. Sironta voi tapahtua elastisesti tai epäelastisesti. Elastisessa sironnassa kokonaisliikemäärä säilyy, eli energiaa ei katoa törmäyksessä ja käytännössä sirontakulma riippuu neutronin emittoitumisenergiasta. Epäelastisessa sironnassa tietty osuus liike-energiasta sitoutuu kohdeyttimeen ja myös uuden neutronin tai muun partikkelin irtoaminen ytimestä on

mahdollista. Mikäli uutta neutronia ei irtoa törmäyksessä, sironnut neutroni jatkaa matkaansa ja simulaatio palautuu matkan arvontaan. (Leppänen, 2007, 105.)

Mikäli neutroni tai muu partikkeli irtoaa törmäyksessä, eli sironnassa käsitellään useampia kuin kahta kappaletta, sirontakulman ja emittoitumisenergian välinen suhde ei enää päde. Tällöin emittoitumisenergiat ja sirontakulmat täytyy arpoa erillisistä todennäköisyysjakaumista. Muiden partikkelien kuin neutronien irtoaminen on simulaation kannalta merkityksetöntä, eikä niitä sironnan jälkeen tarvitse simulaatiossa huomioida. Myös tässä tapauksessa simulaatio palautuu matkan arvontaan, mutta neutronihistoriaan voi syntyä uusi haara, mikäli kohdeytimestä irronnut partikkeli on neutroni. (Leppänen, 2007, 111.)

2.3.2 Kriittisyyslähdesimulaatio

Tässä työssä käytettävän kriittisyyslähdesimulaation aluksi määritellään ensimmäiselle neutronisukupolvelle alkupopulaatio, eli alkuarvaus neutroneiden määrälle. Seuraavan sukupolven neutronijakauma riippuu edellisen kappaleen mukaisesti edeltävän sukupolven neutronien aiheuttamista reaktioista. Kunkin sukupolven jokaisen neutronin kulku simuloidaan ennen seuraavan sukupolven simuloinnin aloittamista. Kasvukerroin saadaan jakamalla seuraavan sukupolven neutronien lukumäärä edellisen polven neutronien lukumäärällä. Simuloinnin muutamien ensimmäisten sukupolvien tuottamat tulokset hylätään, sillä alkuarvaus voi olla kaukanakin todellisesta tasapainotilasta ja tuloksia aletaan kerätä vasta näiden laskentakierrosten jälkeen. (Leppänen, 2007, 113.)

Kasvukertoimen arvo on hyvin harvoin tasan yksi, joten neutronien määrä useimmiten joko kasvaa tai vähenee jatkuvasti. Laskennan kannalta jatkuvasti kasvava tai vähenevä neutronipopulaatio ei ole mieluisa, joten neutronien määrä normeerataan jokaisen laskentakierroksen aluksi vastaamaan alkuperäistä populaatiota. Useimmissa Monte Carlo -simulaatioissa tämä toteutetaan käyttäen k-itseisarvomenetelmää, jossa yksinkertaisesti vähennetään tai lisätään neutroneita siten, että saavutetaan alkuperäinen lukumäärä. Vähentäminen tapahtuu poistamalla satunnaisesti valittuja neutroneita simulaatiosta ja lisääminen kopioimalla satunnaisesti valittuja, simulaatiossa jo olevia

neutroneita. Lähellä kriittisyyttä, eli kasvukertoimen arvoa yksi, menetelmän käyttö antaa luotettavia tuloksia. (Leppänen, 2007, 114.)

2.4 Serpent

Tässä työssä simulointiin käytetään Teknologian tutkimuskeskus VTT:n kehittämää Serpent 2 -ohjelmaa. Lähdekoodin kehitystyö alkoi vuonna 2004 nimellä "Probabilistic Scattering Game", eli PSG. Vuonna 2008 nimi vaihdettiin Serpentiksi ja lähdekoodi kirjoitettiin kokonaan uudelleen. Vuonna 2010 lähdekoodi päätettiin jälleen kirjoittaa uudelleen, jotta päästäisiin eroon ensimmäistä versiota vaivanneista ongelmista. Näin sai alkunsa Serpent 2, joka on tällä hetkellä betatestausvaiheessa ja jatkuvan kehitystyön kohteena. (Serpent, 2013.)

Simulointia varten Serpentille luodaan syötetiedostoon malli käsiteltävästä geometriasta. Serpent osaa käsitellä erimuotoisia pintoja, kuten sylintereitä, tasoja ja palloja. Näitä pintoja hyväksikäyttämällä voidaan niiden sisä- ja ulkopuolille määrittellä soluja, jotka voidaan edelleen määrittää koostumaan jostakin materiaalista. Mallissa käytettävät materiaalit on määriteltävä syötetiedostossa alkuainekoostumuksineen. Serpent osaa noutaa kullekin alkuaineelle tarvittavan materiaalityypin syötetiedostoon määritetystä kirjastosta. (Leppänen, 2013.) Tässä työssä materiaalikirjastona käytetään Nuclear Energy Agency'n ylläpitämää The Joint Evaluated Fission and Fusion File (JEFF) -materiaalikirjaston versiota 3.1.1.

Geometrian määrittelyn onnistumista voidaan seurata piirtämällä Serpentillä kuvia halutuista mallin osista. Tässä työssä esitetään kolme polttoainepin ja -kanavan rakennetta selventävää kuvaa, jotka on tehty Serpentia käyttäen. Jokaisella simulaatiokerralla Serpent arpoo kullekin määritetyille materiaalille värin, joten eri simulaatiokertojen välillä värit kuvissa vaihtuvat, mutta kullakin yksittäisellä kerralla samaa väriä ovat alueet ovat myös samaa materiaalia. (Leppänen, 2013, 42.)

Lisäksi syötetiedostoon tulee määrittää haluttu alkuneutronipopulaatio, josta simulaatio lähtee liikkeelle, sekä simulaatiokierrosten lukumäärä. Serpent tukee laskennan

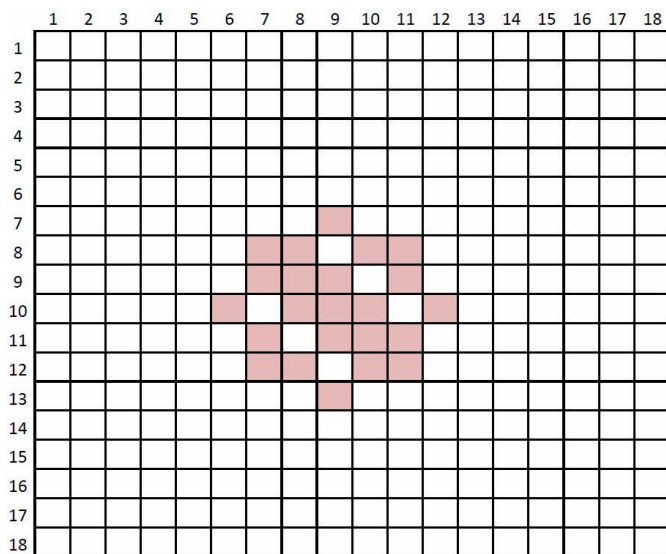
jakamista useaan prosessiin. Tällöin alkuperäinen neutronipopulaatio jaetaan tasan kullekin prosessille, kukin populaatio simuloidaan toisistaan erillään ja simulaation loputtua kaikkien prosessien tulokset yhdistetään. Kuten aiemmin mainittu Monte Carlo -menetelmässä neutroneita kuljetetaan toisistaan riippumatta, joten tämänkaltainen laskennan jakaminen on mahdollista. (Leppänen, 2013.)

Monte Carlo -simulaation lisäksi Serpentillä voidaan muun muassa tuottaa ryhmävakioita ja suorittaa polttoaineen palamalaskuja. Ryhmävakioiden luomisella voidaan tuottaa materiaalikirjaston perusteella homogenisoidut ryhmävakiot halutuille neutronien energiaryhmille. Palamalaskuilla voidaan seurata polttoaineen isotooppikoostumuksen muutoksia fissioketjureaktion edetessä. (Leppänen, 2013.)

3 KOEREAKTORIN MALLINTAMINEN

Käsiteltävänä oleva koereaktori koostuu 324 pystysuorasta kanavasta, jotka ovat ylhäältä katsoen neliön muodossa. Kukin kanava koostuu päällekkäin pinotuista suorakulmaisen särmiön muotoisista grafiittikappaleista, joiden keskellä on reikä varsinaiselle polttoainekanavalle. Kussakin reiässä on alumiinista valmistettu putki, joka erottaa grafiitin polttoainekanavasta. Tähän työhön on tarkoituksella valittu polttoainelataukseltaan identtiset kaksi tapausta, joiden ainoa ero on jäähdytteen puuttuminen toisesta tapauksesta. Näin saadaan vertailukelpoiset tulokset joista voidaan tarkastella positiivisen aukkokertoimen vaikutusta reaktorin kasvutekijään.

Valituissa kahdessa tapauksessa 23 kanavassa on nippu 2 prosenttiin väkevöityä U-235 polttoainetta. Toisessa tapauksessa polttoainetta sisältävät kanavat on täytetty vedellä ja toisessa polttoaineen ympärillä on ilmaa. Kanavat, joissa ei ole polttoainetta, ovat kummassakin tapauksessa tyhjiä, eli niissä on ainoastaan ilmaa. Kuvassa 3.1 on esitetty latauskaavio, jossa punaisella merkityissä polttoainekanavissa on nippu polttoainetta. Grafiittielementtien yläpuolella on alumiininen levy, ja alapuolella teräksinen pohjarakenne. Sivuilta grafiittia ympäröi ohut kerros kadmiumia, joka absorboi kaikki ulos vuotavat neutronit, eli ne eivät voi palata takaisin reaktoriin.



Kuva 3.1: Polttoaineen latauskaavio

3.1 Luotu malli

Mallissa kaikki koereaktorin 324 kanavaa on mallinnettu erikseen kokonaisuuden osina. Kukin kanava on pyritty mallintamaan mahdollisimman tarkasti totuutta vastaavaksi, lukuun ottamatta muutamia mallintamista helpottanutta yksinkertaistusta, joista lisää seuraavissa mallia käsittelevissä kappaleissa.

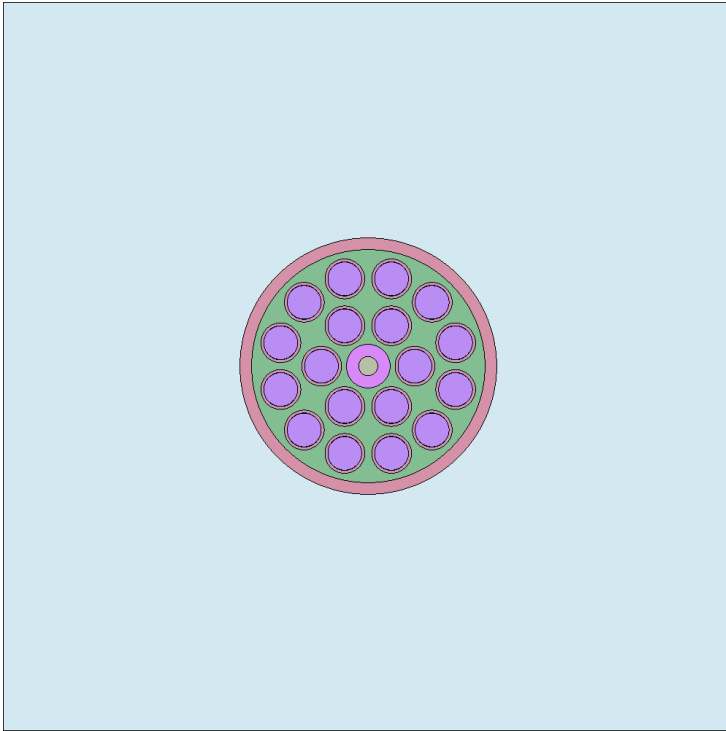
Malli on rajattu grafiittia ylä- ja alapuolelta ympäröivien alumiinilattian ja teräksisten pohjarakenteiden ulkopintoihin. Sivusuunnassa malli on rajattu grafiitin ulkopintaan sillä oletuksella, että grafiitista ulos kadmiokerrokseen päässyt neutroni ei enää voi päästä takaisin reaktoriin, sillä kadmiumin oletetaan absorboivan kaikki siihen päätyvät neutronit.

Ylä- ja alapuolisten reunojen oletetaan olevan niin kaukana varsinaisesta sydänalueesta, että samaa oletusta voidaan käyttää myös näillä rajapinnoilla. Mallissa neutronin kulkeutuessa alumiinilevyn yläpuolelle, tai teräsrakenteiden alapuolelle, se ei enää voi palata reaktoriin. Tämä on toteutettu Serpentillä asettamalla reunaehto, jonka mukaan mallinnetulta alueelta poistuvat neutronit poistuvat myös mallista, eli eivät voi enää palata takaisin kohti reaktorin sydäntä.

3.1.1 Grafiittihidaste

Grafiittihidaste koostuu todellisuudessa päällekkäin pinotuista reiällisistä suorakulmaisista särmiöistä, joiden sisällä on vielä erillinen grafiittinen putki. Mallissa nämä rajapinnat on jätetty huomioimatta, eli kutakin kanavaa ympäröivä grafiitti koostuu yhdestä kappaleesta, joka ulottuu reaktorin pohjalta ylös asti ja vastaavasti aukon sisäreunalta ulkopinnoille asti. Näitä grafiittipylväitä on mallinnettu 18x18 matriisi, eli todellisuutta vastaavat 324 kappaletta.

Kuvassa 3.2 on esitetty poikkileikkaus eräästä mallin polttoainetta sisältävästä kanavasta. Ulkoreunoilla vaaleansininen alue on grafiittia, jonka sisällä näkyy punertavana alumiininen putki ja sisimpänä poikkileikkaus polttoainepusta, josta lisää kappaleessa 3.1.3.



Kuva 3.2: Poikkileikkaus polttoainetta sisältävästä kanavasta.

3.1.2 Polttoainesauvat

Itse polttoaine koostuu päällekkäin pinotuista UO_2 -pelleteistä, jotka ovat zirkoniumputken sisässä. Polttoaine sisältää jokaisessa sauvassa 2 prosenttia U-235:ttä. Kuten grafiitin kanssa, myös polttoaineen rajapinnat on jätetty huomiotta, eli mallissa kunkin polttoainesauvan sisällä on yhtenäinen polttoainetanko. Tästä aiheutuu pieni virhe, sillä pellettien ylä- ja alapinnat ovat oikeasti koverat, eli niiden välissä on hieman ilmaa. Ilmaa on myös oletettu olevan polttoainepellettien ja putken väliin jäävässä ohuessa raossa. Todellista ainetta ei varsinaisesti lähdemateriaalissa mainittu, mutta yhdysvaltalaiset tutkijat olivat omassa MCNP -mallissaan käyttäneet väliaineena ilmaa, joten se valittiin käytettäväksi myös tähän malliin (Nuclear Energy Agency, 2004, 66).

Zirkoniumputken yläpäässä on samaa materiaalia oleva tulppa ja alapäässä häntäosa. Putken sisällä polttoaineen alapuolella on jousi, joka painaa polttoainepelletit tiiviisti toisiaan ja yläosan tulppaa vasten. Mallissa jousi on homogenisoitu sitä ympäröivän

ilman kanssa, eli tälle osuudelle putken sisäosista on käytetty lähdemateriaalista saatuja keskimääräisiä aineominaisuuksia (Nuclear Energy Agency, 2004, 82). Jousen ja häntäosan välissä putken sisällä on vielä zirkoniuminen holkki.

Ulkokuorena toimiva putki, tulppa, häntäosa ja holkki on kaikki mallinnettu yhdeksi kappaleeksi ilman rajapintoja. Tässä ei tehdä suurta virhettä, sillä todellisuudessakin päät on hitsattu kiinni putkeen. Mallia on lisäksi yksinkertaistettu jättämällä huomioitta tulpan yläosassa oleva kavennus, häntäosassa oleva ura, sekä holkin keskellä oleva ohut reikä. Tilavuuksien muutokset ovat melko pieniä ja tuskin aiheuttavat suurta virhettä lopputuloksiin.

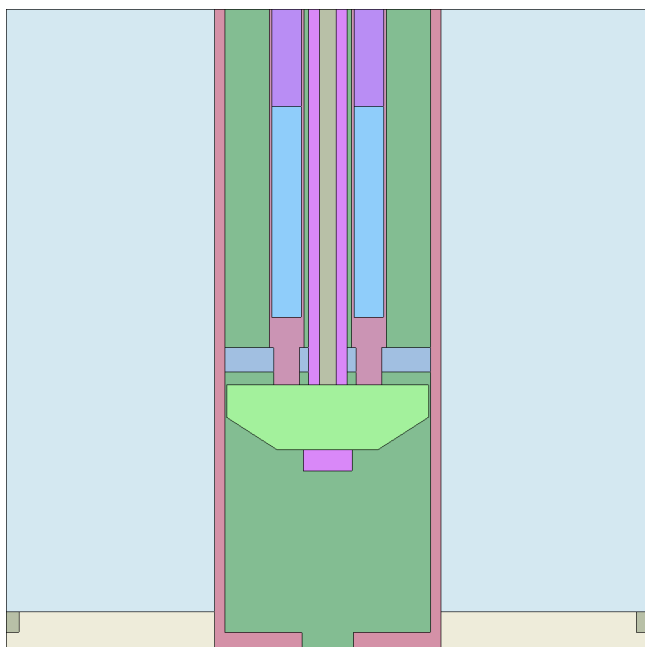
3.1.3 Polttoaine-elementit

Polttoaine-elementit ovat keskenään identtisiä ja ne koostuvat kukin 18 polttoainesauvasta. Elementit ovat poikkileikkaukseltaan pyöreitä ja sauvat on sijoitettu kahdelle kehälle, joista sisemmällä on 6 sauvaa ja ulommalla 12 sauvaa tasaisin välein. Elementin keskellä kulkee pystysuorassa kaksi sisäkkäistä zirkoniumputkea, jotka muodostavat elementin tukirangan. Polttoainesauvat ovat yhteydessä tähän tukirankaan kymmenellä tasaisin välein sijoitetulla tukirenkaalla, sekä alimpana olevalla hieman erimuotoisella tukirenkaalla. Poikkileikkaus polttoaine-elementistä, eli polttoainesauvoista ja tukirangasta, on nähtävissä aiemmin esitetyn kuvan 3.2 keskiosassa.

Polttoainenipun kummassakin päässä on zirkoniumista valmistettu yhdistyskappale, joita vasten polttoainesauvojen päät, eli yläpään tulppa ja alapään häntäosa, ovat. Elementin alapäässä yhdistyskappaleen alapuolella on vielä mutteri ja häntäpultin pää. Mallissa häntäpultin on oletettu olevan kokonaisuudessaan mutterin sisällä ja ne on mallinnettu yhdeksi kappaleeksi ilman rajapintaa. Vettä sisältävässä mallissa alapään yhdistyskappale on monimutkaisen geometrian takia homogenisoitu sen koloissa olevan veden kanssa, kuten sekä yhdysvaltalaiset, että venäläiset tutkijat olivat tehneet omassa mallissaan (Nuclear Energy Agency, 2004, 82). Näin saadaan geometria yksinkertaistettua koostumaan sylinteristä ja katkaistusta kartiosta. Vastaavasti kuivassa

mallissa alapään yhdistyskappale on homogenisoitu ilman kanssa (Nuclear Energy Agency, 2004, 82).

Polttoainenipun sisältävän kanavan alapään rakenne on esitetty halkileikkauksena kuvassa 3.3. Alapään yhdyskappale näkyy kuvassa vaaleanvihreänä ja alin tukirengas sinisenä. Polttoainesauvan sisällä oleva sininen alue on ilman kanssa homogenisoitu jousiosa. Kuvan alaosassa näkyy myös osa pohjan teräsrakenteista, joista lisää kappaleessa 3.1.6.



Kuva 3.3: Polttoainekanavan alaosan halkileikkaus.

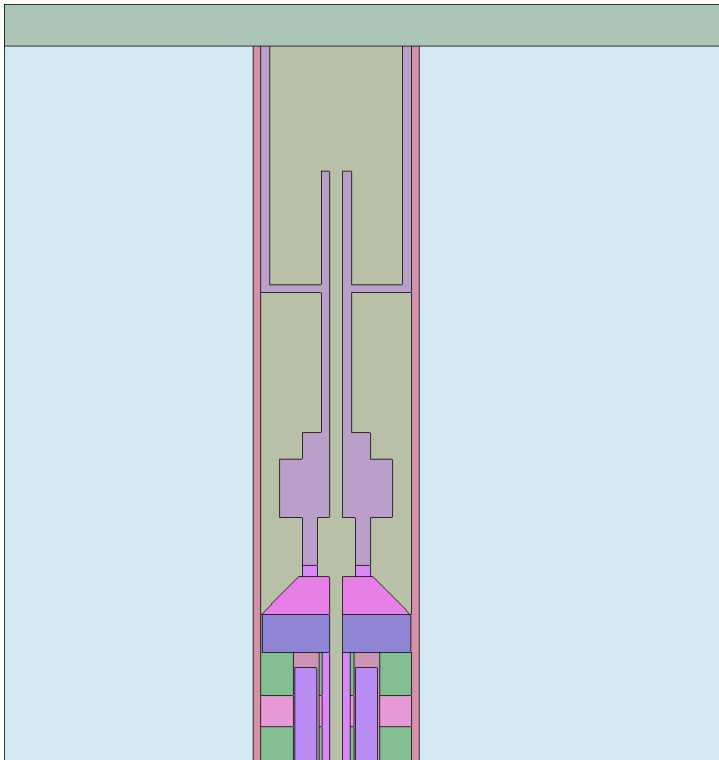
Nipun yläpään rakenne on vielä huomattavasti monimutkaisempi. Siellä yhdistyskappaleen sisällä kulkee siirtymäkappale, joka ulottuu yhdistyskappaleen alapuolelle ja rajoittuu tukirangan zirkoniumputkiin. Mallissa rakennetta on yksinkertaistettu korvaamalla siirtymäkappaleen alaosa jatkamalla zirkoniumputkia yhdistyskappaleen alareunaan asti, sillä materiaali on sama ja dimensioissa ei ole suurta eroa. Yhdistyskappaleen sisällä oleva osuus siirtymäkappaletta on mallinnettu yhdeksi kappaleeksi yhdistyskappaleen kanssa, eli näiden välillä ei ole rajapintaa. Lisäksi

yhdistyskappale ja sen sisällä oleva siirtymäkappale on homogenisoitu koloissa olevan aineen kanssa. Kuivassa mallissa koko tilavuus on homogenisoitu ilman kanssa (Nuclear Energy Agency, 2004, 82).

Vettä sisältävässä mallissa veden pinta on mallinnettu yhdyskappaleen leveän ja kapenevan osan rajapinnalle. Todellisuudessa veden pinta on noin 1 senttimetrin alempana, mutta koelaitteistolla suoritettujen mittausten perusteella pienillä, alle 2 senttimetrin suuruisilla veden pinnan korkeuden muutoksilla ei ole merkittävää vaikutusta lopputulokseen (Nuclear Energy Agency, 2004, 21). Vettä sisältävän reaktorin mallissa ylemmän yhdistyskappaleen leveä osa on siis homogenisoitu veden kanssa ja kapeneva osa ilman kanssa (Nuclear Energy Agency, 2004, 82).

Siirtymäkappale jatkuu myös hieman yhdistyskappaleen yläpuolelle ja tällä osuudella sen sisäosien geometria on monimutkainen. Mallissa tätä on yksinkertaistettu tekemällä kappaleen sisäosasta suoraseinäinen ja sylinterimäinen siten, että elementin ja sisäosan ainetilavuudet vastaavat likimain todellisuutta, vaikka dimensiot eivät. Siirtymäkappale jatkuu vielä teräksestä valmistetulla ylemmällä siirtymäkappaleella, jonka geometriaa on mallissa myös yksinkertaistettu vastaavalla periaatteella tekemällä sisäosasta suoraseinäinen ainetilavuuksien pysyessä likimain samoina.

Polttoainetta sisältävän kanavan yläosan halkileikkaus on esitetty kuvassa 3.4. Kuvan alaosassa näkyvät polttoainesauvojen ylin tukirengas, sekä polttoainenipun yläpään yhdistyselementti. Yhdistyselementin ala- ja yläosa ovat eriväriset, koska alaosa on homogenisoitu veden kanssa ja yläosa ilman kanssa, joten ne ovat laskennan kannalta eri materiaalia ja Serpent värittää ne erivärisiksi. Heti yhdistyskappaleen yläpuolella näkyy pieni osa sen sisälle ulottuvasta siirtymäkappaleesta ja ylempänä monimutkainen kannatinrakenne, josta lisää seuraavassa kappaleessa. Ylimpänä kuvassa on alumiinilevy, josta lisää kappaleessa 3.1.6.



Kuva 3.4: Polttoainekanavan yläosan halkileikkaus

3.1.4 Kannakkeet

Kukin nippu on ripustettu ylhäältäpäin kolmiosaisen kannakkeen avulla. Kannake roikkuu alumiinisen kanavan sisäputken yläreunan varassa. Kannake koostuu juomalasin muotoisesta "lasista", joka roikkuu putken reunan päällä olakkeen varassa, kytkimestä, joka liittää kannakerakenteen ylempään siirtymäkappaleeseen, sekä akselista, joka liittää kytkimen ja "lasin" toisiinsa.

"Lasin" muotoa on mallissa yksinkertaistettu suoristamalla yläosan olake, eli alumiiniputki jatkuu ylös asti ja sen sisällä on teräksinen lasin yläosa ilman olaketta. Myös "lasin" pohja on laskettu sivuseinämiä alaosaan tasalle. "Lasin" ja akselin toisiinsa liittävät mutterit on jätetty mallissa huomioimatta.

Kytkimen muoto on melko yksinkertainen ja ainoa sille tehty oletus on kierrereikien täyttäminen samalla materiaalilla, sillä on oletettavaa, että käytössä lukituspultit ovat

paikoillaan. Sisäkkäin sijoittuvat akselin alaosa, kytkin ja ylemmän siirtymäkappaleen yläosa on mallinnettu yhtenä kappaleena, eli niiden väleissä ei ole rajapintoja.

Akselin muoto on useine olakkeineen monimutkainen ja sitä on mallissa yksinkertaistettu suoristamalla olakkeet. Kuten mainittu, akselin alapää on mallinnettu samaksi kappaleeksi kytkimen ja ylemmän siirtymäkappaleen yläosan kanssa. Samalla akselia on yksinkertaistettu mallissa asettamalla alapää kytkimen alareunan tasalle, vaikka se todellisuudessa jatkuu hieman alemmas.

Mallinnettu kannakkeiden rakenne näkyy kuvan 3.4 yläosassa violetina. Ylimpänä on "lasi", joka on akselin ja kytkimen välityksellä yhdistetty alempana olevaan ylempään siirtymäkappaleeseen. Yhdeksi kappaleeksi mallinnettujen akselin alapään, kytkimen ja ylemmän siirtymäkappaleen yläosan välillä ei ole nähtävissä rajapintoja, joten niiden hahmottaminen erillisiksi osiksi on hankalaa.

3.1.5 Jäähdyte

Mallin polttoainetta sisältämättömät kanavat ovat kummassakin tapauksessa täynnä ilmaa. Kuivan tapauksen mallissa myös polttoainetta sisältävät kanavat on täytetty ilmalla. Vettä sisältävän mallin polttoainetta sisältävissä kanavissa vettä on ylemmän yhdistyskappaleen leveän ja kapenevan osan rajapinnalle asti, kuten voidaan kuvasta 3.4 nähdä.

3.1.6 Ylä- ja alapuoliset rakenteet

Grafiitin yläpuolella oleva alumiinilevy on mallinnettu, mutta malli on rajattu tämän lattiarakenteen yläpintaan ja sen yläpuolella olevia rakenteita ei ole mallinnettu. Alumiinilevy on nähtävissä aiemmin esitetyn kuvan 3.4 yläosassa.

Vastaavasti alapuolelta malli on rajattu grafiitin alapuolella olevien teräsrakenteiden alapintaan. Kunkin grafiittielementtipinon alla on hieman grafiittielementin poikkileikkausta pienempi teräksinen levy, jonka alapuolella on koko reaktorin pohjan kokoinen yhtenäinen teräslevy. Teräsrakenteet on nähtävissä aiemmin esitetystä

kuvassa 3.3. Todellisuudessa yhtenäisen teräslevyn alapuolella on vielä muita kannatinrakenteita, mutta ne on jätetty mallista pois, sillä ne ovat etäällä varsinaisesta sydänalueesta ja niiden merkitys simulaation tuloksiin on hyvin vähäinen.

3.1.7 Fysikaaliset korjaukset

Ensimmäinen korjaus koskee termistä sirontaa grafiitissa ja vedessä. Grafiitin hiilellä ja veden vedyllä on voimakkaita molekyyliisidoksia, jotka vaikuttavat niiden sirontakäyttäytymiseen. Yleisesti sironnassa oletetaan, että sironta tapahtuu neutronien ja vapaiden atomien välillä elastisena kimmokkeena. Jos atomien sidosenergia lähestyy neutronien energiatasoa, tämä oletus ei pidä täysin paikkaansa ja törmäyksiä joudutaan käsittelemään epäelastisina erikoistapauksina. (Leppänen, 2007, 41.) Korjaus on mallinnettaessa toteutettu käyttämällä grafiitin hiilelle ja veden vedylle termisen sironnan materiaalidataa. Materiaalidatan lähteenä on käytetty Nuclear Energy Agency:n ylläpitämän JEFF-materiaalikirjaston versiota 3.1.1.

Toinen korjaus koskee Doppler-laajenemiseen liittyvää puutetta materiaalikirjastoissa, joka johtaa resonanssikaappausten lukumäärän merkittävään aliarviointiin ja siten kasvutekijän yliarviointiin. Puute on merkityksellinen raskailla ytimillä, joilla on sirontaresonansseja alhaisilla energiatasoilla. Yleensä riittää käsitellä vain yleisintä raskasta isotooppia, eli tässä tapauksessa korjaus koskee vain uraanin isotooppia 238. Korjaus on toteutettu käyttämällä Serpentin Doppler-Broadening Rejection Correction (DBRC) -ominaisuutta. (Leppänen, 2013, 59)

3.2 Mallinnettaessa tehdyt oletukset ja yksinkertaistukset

Mallia luodessa on tehty useita oletuksia ja yksinkertaistuksia, joita on kuvattu jo edellisessä luvussa kunkin mallin osa-alueen yhteydessä. Tässä luvussa käsitellään niiden vaikutusta simulaation lopputuloksiin.

3.2.1 Simulaation reunaehto

Simulaation reunaehdoksi on määritelty, että simuloitavan alueen ulkopuolelle kulkeutuvat neutronit poistetaan simulaatiosta, eivätkä ne siksi voi palata takaisin alueelle ja simulaatioon. Oletus perustuu siihen oletukseen, että reaktoria sivuilta ympäröivä kadmiumkerros absorboisi kaikki sinne asti kulkeutuvat neutronit. Toisaalta ylä- ja alapuolisten rakenteiden ulkopintojen oletetaan olevan niin kaukana polttoaineesta, että sieltä poistettavat neutronit eivät enää ole simulaation kannalta merkityksellisiä. Todellisuudessa on pieni mahdollisuus näiden neutronien kulkeutumiselle takaisin sydänalueelle, mutta tehdyn oletuksen merkitys simulaation tuloksiin on hyvin pieni.

3.2.2 Geometrian yksinkertaistukset

Mallin geometriaa on jouduttu useissa kohdin yksinkertaistamaan johtuen todellisten kappaleiden monimutkaisesta rakenteesta. Periaatteessa Serpentillä on mahdollista mallintaa monimutkaisiakin geometrioita, mutta mallin yksinkertaistamisten vaikutukset tuloksiin ovat niin pieniä, että kyseisten kappaleiden pikkutarkka mallintaminen ei ole mielekästä. Vaikutuksiltaan pienimpiä yksinkertaistuksia ovat toisiaan vasten olevien kappaleiden mallintamiset yhdeksi kappaleeksi, kuten päällekkäin pinottujen grafiittikappaleiden mallintaminen yhdeksi kiinteäksi grafiittipylvääksi. Tämä on normaali käytäntö Monte Carlo -simuloinnissa ja aiheuttaa hyvin vähän virhettä tuloksiin.

Polttoaineniippujen alapäissä rakennetta on yksinkertaistettu jättämällä huomioimatta sauvojen häntäosissa olevat pienet urat ja olettamalla häntäpultin olevan kokonaan mutterin peitossa, todellisuudessa mutteri on hieman matalampi ja pultin pää on näkyvässä. Näiden oletusten seurauksena zirkoniumin osuus tällä alueella kasvaa hieman ja vastaavasti veden osuus pienenee. Merkitys simulaation kannalta ei kuitenkaan ole kovin suuri, sillä alue sijaitsee jonkin verran polttoaineen alapuolella, eikä siten sijaitse suurimman neutronivuon alueella. Etäisyys polttoainealueen alaosaan ei kuitenkaan ole kovin suuri ja zirkonium absorboi neutroneita merkittävästi vettä

vähemmän, joten oletus voi hieman nostaa kasvukertoimen arvoa, mutta tuskin merkittävästi.

Myös polttoaineriippujen yläpuolisten kannakkeiden monimutkaisten geometrioiden yksinkertaistukset pääasiassa hieman lisäävät zirkoniumin osuutta tuolla alueella. Tässä tapauksessa kuitenkin korvattava aine on ilma, joten absorptioon kannalta ero ei ole läheskään niin merkityksellinen kuin alaosassa. Etäisyys polttoainealueesta on myös hieman suurempi, joten näillä yksinkertaistuksilla on hyvin vähän vaikutusta simulaation lopputuloksiin.

3.2.3 Homogenisoinnit

Ala- ja yläpuolinen yhdistyskappale, polttoainesauvojen ympärillä olevat tukirenkaat ja -sauvojen alaosissa olevat jouset ovat rakenteeltaan niin hankalia mallintaa, että niiden mallintamisessa on turvauduttu homogenisointiin. Yhdistyskappaleissa ja tukirenkaissa on lukuisia vettä tai ilmaa täynnä olevia, muodoltaan monimutkaisia reikiä ja onteloita, joiden tarkka mallintaminen on aikaa vievää tai jopa mahdotonta. Kyseiset kappaleet on siksi homogenisoitu rei'issä ja onteloissa olevien aineiden kanssa, jolloin kappaleen alueelle on laskettu keskimääräiset aineominaisuudet. Aineominaisuuksina on tällöin käytetty NEA:n raportissa esitettyjä, valmiiksi homogenisoituja arvoja.

Polttoainesauvojen alapäässä sisällä oleva jousi on myös vähintäänkin hankala mallintaa tarkasti. Myös se on homogenisoitu sillä alueella sauvan sisällä olevan ilman kanssa ja homogeenisen materiaalin aineominaisuudet on saatu suoraan NEA:n raportista.

Periaatteessa homogenisointi voi vaikuttaa tuloksiin, sillä esimerkiksi alapään yhdistyskappaleen homogenisointi rei'issä olevan veden kanssa nostaa makroskooppista absorptiovaikutusalaa todellisella zirkoniumin alueella ja laskee sitä veden alueella. Tällöin neutroni joka kulkeutuu alueelle joka todellisuudessa on zirkoniumia absorboituu todennäköisemmin, vaikka todellisuudessa zirkoniumissa ei juurikaan tapahdu absorptiota. Suurella neutronipopulaatiolla simuloitaessa vaikutus on kuitenkin merkityksetön, sillä neutroneita väistämättä ajautuu sekä todelliselle zirkoniumin

alueelle, jonka absorptiovaikutusta homogenisointi nostaa, että todelliselle veden alueelle, jonka absorptiovaikutus on homogenisoinnissa vastaavasti pienentynyt.

3.3 Simulaation alkutilanne

Neutronien alkupopulaatioksi simulaatiossa valittiin 1,2 miljoonaa neutronia. Tällöin saadaan mahdollisimman tarkat tulokset laskenta-ajan pysyessä vielä kohtuullisena. Varsinaisia simulaatiokierroksia valittiin suoritettavaksi 500 ja simulaation alussa hylättäväksi 10 laskentakierrosta, jotta vältetään virheellisiltä tuloksilta reaktion hakiessa tasapainotilaansa.

4 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa esitellään Serpentillä suoritetusta Monte Carlo -simulaatiosta saadut tulokset, sekä lähteenä käytetyssä Nuclear Energy Agencyn raportissa esitetyt venäläis- ja yhdysvaltalais-tutkijoiden saamat tulokset. Lisäksi esitetään raportissa annetut todellisten mittausten perusteella saadut kasvutekijät, joita voidaan käyttää absoluuttisena vertailukohtana kaikille simulaatioille. Tuloksissa keskitytään ainoastaan reaktorin kasvutekijään, sillä sen luotettava simulointi on reaktoriturvallisuuden kannalta tärkeää. Tuloksia vertailemalla voidaan arvioida kuinka hyvin Serpent soveltuu kyseisenlaisten reaktoryyppien simulointiin, kun otetaan huomioon simulaatiossa tehdyt yksinkertaistukset ja oletukset.

4.1 Simuloinnin tulokset

Serpent kokoaa simulaation tuloksista varsin kattavan tulostiedoston, mutta tässä työssä keskitytään ainoastaan reaktorin kasvutekijään, sillä sitä pystytään suoraan vertaamaan aiempien simulaatioiden tuloksiin. Serpentillä saadut kasvutekijän arvot kuivalle ja vettä sisältävälle reaktorille ovat nähtävissä taulukossa 4.1. Taulukossa on myös esitetty kullekin saadulle kasvutekijän arvolle keskihajonta, jonka avulla voidaan arvioida todennäköisyyksiin pohjautuvan simulaation antamien tulosten tarkkuutta.

Taulukko 4.1: Serpent-simulaatiosta saadut kasvutekijän arvot ja niiden keskihajonnat

	Kasvutekijä	Keskihajonta
Vettä polttoainekanaavissa	1,01074	0,000031
Kuiva reaktori	1,01349	0,000033

Tehdyn Serpent-mallin ja sen antamien tulosten soveltuvuutta voidaan arvioida vertailemalla tuloksia Nuclear Energy Agencyn raportissa esitettyihin kasvutekijän arvoihin. Venäläisten ja yhdysvaltalais-tutkijoiden simuloimat, sekä alkuperäisen koelaitoksen mittauksista saadut kasvutekijän arvot on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2: Aiemmistä simulaatioista ja koeajon mittauksista saadut kasvutekijän arvot (Nuclear Energy Agency, 2004, 96-98)

	Venäjä (MCU, DLC\MCUDAT-2.1)	USA (MCNP, ENDFB/B-V)	Mittauksista saadut arvot
Vettä polttoainekanavissa	1,0085	1,0078	1,0028
Kuiva reaktori	1,0149	1,0109	1,0039

4.2 Mallin soveltuvuus

Tuloksista nähdään selvästi positiivisen aukkotekijän vaikutus reaktorin kasvutekijään. Kuten kappaleessa 2.2.1 on kerrottu RBMK -tyypin reaktoreille on tyypillistä, että jäädytteenä toimivan veden höyrystyminen tai tässä tapauksessa puuttuminen kokonaan kiihdyttää ketjureaktiota ja siten neutronituottoa. Serpent antaa siten ainakin oikeansuuntaisen kasvutekijän muutoksen näiden kahden tapauksen välille. Saatujen hajonnan arvojen perusteella voidaan todeta, että tulokset ovat riittävän tarkkoja analysoitaviksi.

Taulukoista 4.1 ja 4.2 nähdään heti, että kaikkien simulaatioiden antamat kasvutekijöiden arvot ovat huomattavasti korkeampia, kuin mittauksien perusteella saadut todelliset kasvutekijöiden arvot.

Tulosten keskinäisen vertailun helpottamiseksi taulukkoon 4.3 on laskettu kullekin tapaukselle erotus vähentämällä Serpentillä saadusta, taulukossa 4.1 esitetystä arvosta taulukossa 4.2 esitetty vastaava arvo. Näin nähdään helposti kuinka suuri ero Serpent-mallin antamien tulosten ja aiempien simulointien ja mittauksilla saatujen arvojen välillä on.

Taulukko 4.3: Erotukset Serpentin antamien tulosten ja taulukon 4.2 tulosten välillä

	Ero Venäjän tuloksiin	Ero USA:n tuloksiin	Ero mittauksilla saatuihin tuloksiin
Vettä polttoainekanaavissa	0,00224	0,00294	0,00794
Kuiva reaktori	-0,00141	0,00259	0,00959

Taulukosta 4.3 nähdään, että tehty Serpent-malli antaa suurimmassa osassa vertailuista jonkin verran suurempia tuloksia. Kuivaa reaktoria simuloitaessa päästään kuitenkin lähemmäs todellista arvoa kuin venäläiset tutkijat ovat omalla MCU-mallillaan päässeet.

Myös kuivan ja vettä sisältävän tapauksen kasvutekijöiden erotus on mielenkiintoinen suure tarkasteltavaksi. Niitä vertaamalla voidaan tutkia, mikä simulaatioista pystyy arvioimaan parhaiten jäädytteenä käytetyn veden vaikutusta kyseisessä koereaktorissa. Vertailu on esitetty taulukossa 4.4 siten, että ensimmäisessä sarakkeessa on kullekin simulaatiolle laskettu sen keskinäisten tulosten erotus vähentämällä kuivan reaktorin kasvutekijästä vettä sisältävän tapauksen kasvutekijä. Toisessa sarakkeessa kunkin simulaation erotusta on verrattu vielä mittauksien avulla saatujen tulosten erotukseen vähentämällä simulaatioiden erotuksista mittausten erotus.

Taulukko 4.4: Kuivan ja vettä sisältävän reaktorin tulosten vertailua

	Kuivan ja vettä sisältävän tapauksen erotus	Ero verrattuna mittauksista saatuun erotukseen
Serpent	0,00283	0,00173
Venäjä (MCU)	0,00640	0,00530
USA (MCNP)	0,00310	0,00200
Mittaukset	0,00110	-

Taulukosta 4.4 nähdään, että kaikkien simulaatioiden erot simuloitujen tapausten välillä ovat jokseenkin samassa suuruusluokassa, venäläisten tutkijoiden saamista tuloksista lasketun erotuksen ollessa suurin. Vertailukohtana on kuitenkin käytettävä todellisiin mittauksiin pohjautuvia tuloksia, joihin vertailemalla nähdään taulukon toisesta sarakkeesta, että Serpent on tässä suhteessa päässyt tuloksillaan lähimmäs totuutta.

Kahden edellisen taulukon perusteella voidaan todeta, että Serpentillä luotu malli antaa lähes poikkeuksetta hieman suurempia kasvutekijän arvoja, kuin aiemmat simulaatiot. Toisaalta Serpent-simulaatiossa jäädytteen puuttumisen vaikutus on simuloitu todenmukaisimmin tästä kolmikosta, vaikka erotus onkin vielä yli kaksinkertainen mittauksiin perustuvien tulosten erotukseen verrattuna. Simulaatioiden väliset erot tuloksissa aiheutuvat luultavasti osin sekä tehtyjen mallien välisistä pienistä eroista, että siitä että jokaisessa simulaatiossa on käytetty eri materiaalikirjastoja, joiden materiaalitiedot voivat hieman poiketa toisistaan.

5 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä on tutkittu jäähdytteen poistamisen vaikutusta Neuvostoliitossa käytetyn RBMK-kooreaktorin kasvukertoimeen mallintamalla kyseinen reaktori Teknologian tutkimuskeskus VTT:n kehittämällä Serpent Monte Carlo -laskentakoodilla. Kooreaktorista luotiin mahdollisimman tarkasti todellisuutta vastaava, yksityiskohtainen malli, jonka avulla voitiin simuloida kasvukertoimet kahdelle identtiselle polttoainelataukselle, joista toisessa oli polttoainekanavissa jäähdytteenä vettä ja toisessa ainoastaan ilmaa.

Simulaatiosta saatuja kasvukertoimia voitiin verrata sekä kooreaktorin käytön aikana suoritettujen mittausten tuloksiin, että yhdysvaltalaisen ja venäläisten tutkijoiden myöhemmin suorittamien simulaatioiden tuloksiin. Serpent-simulaation tulokset osoittivat RBMK-reaktorityypille ominaisesti kasvukertoimen kasvavan, kun jäähdyte poistetaan reaktorista ja neutronien absorptio reaktorissa siten heikkenee. Simulaatiosta saadut tulokset olivat siten oikean suuntaisia, mutta kasvukertoimien arvot olivat useimmiten hieman suurempia, kuin aikaisemmista simulaatioista saadut arvot. Erot voivat johtua esimerkiksi tehtyjen mallien välisistä pienistä eroavaisuuksista oletuksissa ja yksinkertaistuksissa, tai käytettyjen materiaalikirjastojen välisistä eroista. Toisaalta kaikkien simulaatioiden tulokset olivat huomattavasti suurempia mittauksien pohjalta saatuihin kasvukertoimen arvoihin verrattuna.

Itse kasvukertoimien arvojen lisäksi tarkasteltiin kasvukerrointen erotusta jäähdytettä sisältävän ja jäähdytteettömän tapauksen välillä. Jälleen kaikki simulaatiot antoivat mittauksiin verrattuna huomattavasti suuremman eron kasvukertoimille tapauksen välillä, mutta Serpentillä saatu erotus oli lähimpänä mittauksilla saatua. Eli vaikka itse kasvukertoimien arvot olivat Serpentillä simuloituina useimmissa vertailuissa kauempana mittausten tuloksista, jäähdytteen poistamisen vaikutus kasvukertoimeen on saatu sillä mallinnettua parhaiten.

LÄHDELUETTELO

Hore-Lacy Ian [The Encyclopedia of Earth [www-sivustolla](http://www.sivustolla)]. Päivitetty 06.12.2009. Light water graphite reactor (RBMK). Verkkojulkaisu [viitattu 23.05.2013]. Saatavissa: [http://www.eoearth.org/article/Light_water_graphite_reactor_\(RBMK\)](http://www.eoearth.org/article/Light_water_graphite_reactor_(RBMK))

Leppänen Jaakko, 2007. Development of a New Monte Carlo Reactor Physics Code. Espoo: VTT. 228 s. ISBN 978-951-38-7019-5.

Leppänen Jaakko, 2013. Serpent - a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code User's Manual. Verkkojulkaisu. [viitattu 31.05.2013]. Saatavissa: http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent_manual.pdf

Nuclear Energy Agency, 2004. RBMK Graphite Reactor: Uniform Configurations of UO₂ Fuel Assemblies, And Configurations of UO₂ Assemblies With Empty Channels, Water Columns, And Boron or Thorium Absorbers, With or Without Water In Channels. Julkaisun tunniste: LEU-COMP-THERM-060

Sandberg Jorma (toim), 2004. Ydinturvallisuus. Säteilyturvakeskus. ISBN 951-712-507-0.

Serpent a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code [www-sivusto](http://www.sivusto). Päivitetty 29.05.2013. Verkkojulkaisu [viitattu 31.05.2013]. Saatavissa: <http://montecarlo.vtt.fi/index.htm>

Wikimedia Commons, Stefan Riepl. Das Schema eines RBMK-Reaktors. Verkkojulkaisu. Päivitetty 25.08.2006. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBMK.svg>

World Nuclear Association (WNA). 2010. RBMK Reactors, Appendix to Nuclear Power Reactors. Verkkojulkaisu. [viitattu 23.05.2013]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf31.html>