

Analisis Reaktivitas *Thorium Molten Salt Reactor* 500 Berdasarkan Skenario Penggunaan *Control Rod* menggunakan OpenMC

Fajri Eza Pelita Zebua¹, Feriska Handayani Irka^{1*}, Helen Rafli², Ramacos Fardela¹, Dian Fitriyani¹

Laboratorium Fisika Nuklir, Jurusan Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Andalas Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 3 Januari 2025
Direvisi: 15 Februari 2025
Diterima: 27 Maret 2025

Kata kunci:

Control Rod
OpenMC
Reaktivitas
TMSR-500

Keywords:

Control Rod
OpenMC
Reactivity
TMSR-500

Penulis Korespondensi:

Feriska Handayani Irka
Email: feriska@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Simulasi perhitungan neutronik dengan model reaktor konseptual TMSR-500 dilakukan untuk pengembangan pengendalian reaktivitas pada reaktor. Pengendalian reaktivitas diatur oleh penggunaan *control rod* untuk *shutdown rod* dan *regulating rod* pada reaktor. Simulasi dilakukan menggunakan kode komputasi OpenMC dan daftar pustaka nuklir ENDF/B-VII.1. Nilai reaktivitas dihitung berdasarkan skenario penggunaan *control rod* untuk setiap kondisi pengoperasian reaktor yang diatur dengan batas margin reaktivitas $\leq 5\%$ dk/k untuk mengontrol reaktivitas pada saat beroperasi dan $\leq 0,5\%$ dk/k pada saat *shutdown*. Simulasi pengendalian reaktivitas pada saat beroperasi dihitung berdasarkan skenario penggunaan variasi *control rod* 0% Gd₂O₃-100% grafit, 25% Gd₂O₃-75% grafit, 50% Gd₂O₃-50% grafit, 75% Gd₂O₃-25% grafit, dan 100% Gd₂O₃-0% grafit. Kemudian, pada kondisi *shutdown* skenario diatur dengan penggunaan *control rod* oleh Gd₂O₃ dan grafit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa reaktor memiliki reaktivitas berlebih $>5\%$ dk/k. Simulasi *Control Safety Device* (CSD) mampu menekan reaktivitas $\leq 5\%$ dk/k, akan tetapi distribusi fluks tersebar secara tidak merata. Hasil perhitungan pada optimalisasi radius *fuel* reaktor dengan skenario penggunaan *control rod* 25% grafit-75% Gd₂O₃ berhasil mengendalikan reaktivitas dengan margin $1,0111 \pm 0,00013$ (0,108% dk/k). Berdasarkan penelitian, tingkat kekritisitas reaktor TMSR 500 ditentukan oleh optimalisasi radius *fuel* dan reaktivitas dapat dikendalikan berdasarkan skenario penggunaan *control rod*.

Neutron calculation simulation with the TMSR-500 conceptual reactor model was carried out for the development of reactivity control in the reactor. The control of reactivity is regulated by the use of a control rod for the shutdown rod and a regulating rod on the reactor. The simulation was carried out using OpenMC computational code and the nuclear data ENDF/B-VII.1. The reactivity value is calculated based on the use scenario of the control rod for each reactor operating condition set with a reactivity margin limit of $\leq 5\%$ dk/k to control reactivity during operation and $\leq 0,5\%$ dk/k during shutdown. The simulation of reactivity control during operation was calculated based on the use scenario of 0% Gd₂O₃-100% graphite, 25% Gd₂O₃-75% graphite, 50% Gd₂O₃-50% graphite, 75% Gd₂O₃-25% graphite, and 100% Gd₂O₃-0% graphite. Then, in the shutdown condition, the scenario is set with the use of control rods by Gd₂O₃ and graphite. The simulation results show that the reactor has an excess reactivity of $>5\%$ dk/k. The Control Safety Device (CSD) simulation is able to suppress reactivity $\leq 5\%$ dk/k, but the flux distribution is unevenly distributed. The results of the calculation on the optimization the reactor by the fuel radius with the scenario of using a control rod of 25% graphite-75% Gd₂O₃ succeeded in controlling the reactivity with a margin of $1,0111 \pm 0,00013$ (0,108% dk/k). Based on the research, the criticality level of the TMSR 500 is determined by the optimization of the fuel radius and the reactivity can be controlled based on the use scenario of the control rod.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Reaktor Generasi IV adalah reaktor daya yang dipublikasikan oleh *GEN IV International Forum* (GIF) berdasarkan pengembangan reaktor generasi sebelumnya. *Molten Salt Reactor* (MSR) merupakan bagian konsep reaktor nuklir yang diklasifikasikan sebagai reaktor generasi IV (Gen-IV) dengan keunggulan peningkatan pemanfaatan bahan bakar dan keamanan reaktor. MSR merupakan reaktor yang bekerja dengan menggunakan bahan bakar berbasis garam cair (*fluorida*) dan grafit sebagai moderator (Forsberg, 2006). Pada saat reaktor bekerja mencapai suhu tinggi, garam cair yang terlarut pada bahan bakar MSR juga dapat berperan sebagai *coolant*. Bahan bakar garam cair pada suhu tinggi akan mengembang dan menurunkan laju reaksi nuklir, sehingga reaktor cenderung memperlambat reaksi nuklir pada kondisi perubahan suhu atau tekanan berlebih. Teknologi MSR memiliki beberapa pengembangan konsep seperti *Molten Salt Breeder Reactor* (MSBR), *Molten Salt Reactor Eksperiment* (MSRE), *Molten Salt Fast Reactor* (MSFR), *Passive Compact Molten Salt Reactor* (PCMSR), dan *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR). Dalam penelitian (Ashraf et al., 2021) pada reaktor MSR tipe SD-TMSR (*Single-Fluid Double-Zone Thorium Molten Salt Reactor*) reaktivitas dapat dikendalikan berdasarkan penggunaan material pada desain *control rod* dengan sistem kendali CSD (*Control Safety Device*) dan SSD (*Shutdown Safety Device*). Selain itu, (Dwijayanto et al., 2024) dengan desain reaktor *Passive Compact Molten Salt Reactor* (PCMSR) melakukan penelitian terkait tingkat reaktivitas berdasarkan pengaruh densitas grafit sebagai moderator. Berdasarkan hasil penelitian, penurunan densitas grafit sebagai moderator dapat meningkatkan koefisien suhu reaktivitas serta menurunkan rasio konversi pada saat reaktor beroperasi.

Saat ini, PT ThorCon memelopori salah satu desain reaktor MSR dengan model TMSR-500 yang telah dikembangkan oleh *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) (Chen, 2021). Tipe reaktor ini merupakan *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR) dengan daya total 500 MWe yang berasal dari 2 modul, dimana setiap modul menghasilkan daya 250 MWe. Saat ini, implementasi desain teknologi Thorcon TMSR-500 masih dalam tahapan konseptual dan memerlukan pengembangan lebih lanjut. Melalui Seminar Keselamatan Nuklir, (Waluyo & Khakim, 2021) menyampaikan kajian terkait desain reaktor TMSR-500 oleh PT ThorCon Indonesia. Berdasarkan analisis neutronik, tingkat reaktivitas yang diperoleh pada teras reaktor terdapat kenaikan *void* sampai dengan 65% sehingga menimbulkan reaktivitas positif sebesar 5% dk/k. Reaktivitas pengoperasian reaktor Thorcon dikendalikan oleh sistem batang kendali rangkap tiga dan saluran *fuel drain tank* (FDT). Dari hasil pengujian penggunaan material *control rod* oleh (Mikhaelia et al., 2021), penggunaan material *adolium oxide* (Gd_2O_3) pada *control rod* paling efektif dengan nilai K_{eff} terendah dibandingkan material Boron Karbida (B_4C) dan Hafnium (Hf). Sementara itu, (Khakim et al., 2022) melakukan evaluasi terhadap kemampuan sistem *shutdown* pada *control rod* dalam membatasi keadaan kritis pada reaktor TMSR-500 serta memastikan bahwa sistem tersebut efektif menjaga bahan bakar dalam keadaan subkritis. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kemampuan *control rod* yang digunakan tidak dapat mempertahankan keadaan subkritis pada *shutdown* pertama, sehingga pada saat reaktor dipadamkan bahan bakar harus dialiri menuju FDT.

Tahapan pengujian konseptual pada desain reaktor Thorcon dilakukan untuk mencapai aspek keselamatan dan keamanan kerja pada reaktor. Hal ini untuk mengurangi peluang terjadinya kecelakaan pada pembangkit listrik tenaga nuklir dan menjamin penggunaan jangka panjang reaktor nuklir. Pengujian dilakukan dengan melakukan simulasi perhitungan pengendalian reaktivitas menggunakan komputasi *Open Source* Monte Carlo (OpenMC). Simulasi OpenMC merupakan kode transport partikel Monte Carlo dengan *format file* input XML dan *output* HDF5 (Romano et al., 2015; Romano & Forget, 2013). Parameter pengujian dilakukan dengan perolehan nilai reaktivitas teras reaktor melalui pengaruh kedalaman *control rod* terhadap nilai K_{eff} yang diperoleh serta tinjauan neutronik berdasarkan persamaan *multigrup cross-section*. Penelitian yang dilakukan berupa analisis reaktivitas reaktor pada *Molten Salt Reactor* tipe ThorCon dengan daya operasi 500 MWTh berdasarkan skenario variasi kedalaman *control rod*. Analisis reaktivitas reaktor dengan penggunaan skenario variasi kedalaman *control rod* dilakukan sebagai studi desain dan implementasi teknologi reaktor Thorcon.

II. METODE

Metode Monte Carlo digunakan untuk menyatukan distribusi sumber fisi selama simulasi berdasarkan perhitungan nilai eigen. Perhitungan nilai eigen dilakukan dengan pendekatan acak pada

persamaan transport menjadi persamaan nilai eigen apabila terdapat sumber fisi akibat sumber neutron yang bergantung pada fluks neutron. Analisis *eigen value* bertujuan untuk mengubah penampang multigrup menjadi nilai eigen antara hasil kode deterministik dan probabilistik Monte Carlo (Carelli & Ingersoll, 2015). Metode monte carlo disimulasikan menggunakan beberapa kode komputasi seperti SERPENT-Monte Carlo, Monte Carlo N-Partikel (MCNP), *Open Source* Monte Carlo (OpenMC).

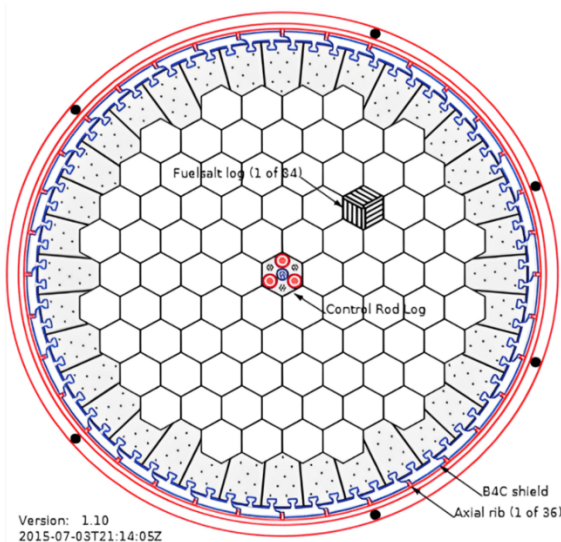
Penelitian ini menggunakan seperangkat *Personal Computer* (PC) Windows 10 untuk mengakses *software* berupa Ubuntu (sistem operasi berbasis Linux). Menggunakan pustaka nuklir ENDF/B-VII.0 dan kode komputasi *Open Source* Monte Carlo (OpenMC) yang dikembangkan oleh *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Jenis reaktor yang digunakan adalah *Molten Salt Reactor* (MSR) tipe ThorCon TMSR 500 dengan spesifikasi reaktor yang dimuat dalam Tabel 1.

Tabel 1 Parameter ThorCon-TMSR 500

Kapasitas daya	550 MWTh	
Pendingin	NaF dan BeF ₂	
Moderator	Grafit (C)	
Batang kendali (<i>control rod</i>)	<i>Gadolinium Oxide</i> (Gd ₂ O ₃)	
Teras reaktor (Pot)	Tinggi	5.72 m
	Diameter	4.96 m
<i>Fuel Salt</i> (% mol)	NaF-BeF2-UF4-ThF4 (75,9/12/9,5/2,5)	
Temperatur Bahan Bakar	997 (K)	
Pengkayaan	19,5%	

(Sumber: ThorCon, 2021)

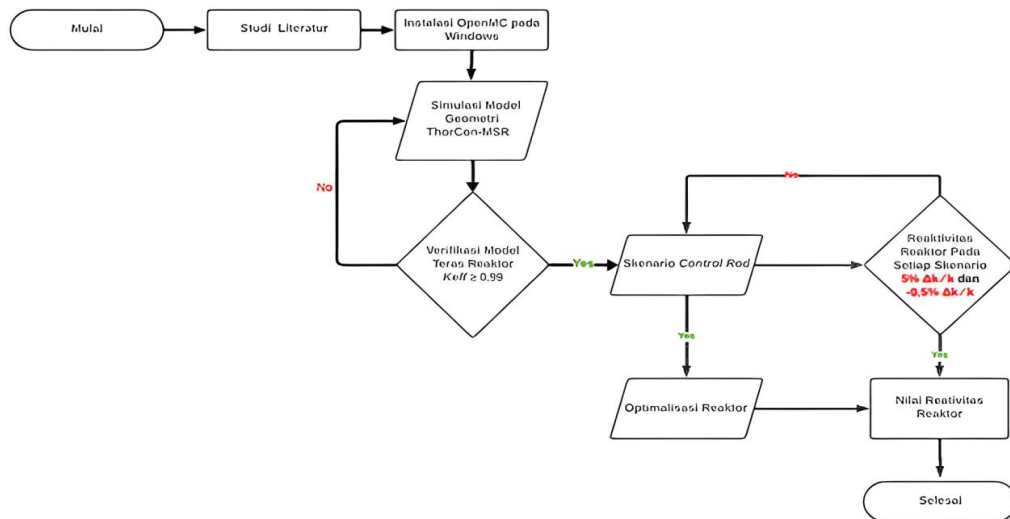
Simulasi geometri ThorCon-MSR seperti pada Gambar 1 di-*input* dalam bentuk *script* Python yang memuat data komposisi material, geometri, tata letak komponen, *setting*, dan *tallies*. Desain dan material pada OpenMC didefinisikan sebagai suatu set nuklida atau elemen pada densitas tertentu, kemudian di-*input* menggunakan *code class openmc.Material* untuk *input material.xml*. selanjutnya geometri teras aktif pada reaktor diatur dengan input melalui *code class openmc.Geometry*. Setelah menginisiasikan geometri dan material pada teras reaktor, simulasi dimulai dengan menginisiasikan jumlah partikel neutron sebanyak 200.000 partikwl dengan partikel hilang sebanyak 2500 partikel dalam 250 siklus. Komputasi OpenMC dijalankan dengan perintah **openmc.run** atau **openmc** pada terminal.



Gambar 1 Komposisi material dan konfigurasi geometri dalam teras ThorCon
(Sumber: Annual Nuclear Safety Seminar, 2021)

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan Analisa tingkat reaktivitas berdasarkan skenario yang telah ditetapkan (*shutdown, conditional, normal operation*). Selama reaktor beroperasi simulasi dilakukan dengan beberapa skenario kedalaman *control rod* sebagai berikut: Kondisi 1 (*shutdown*), kedalaman *control rod* log di atur pada kondisi sepenuhnya tenggelam dalam teras reaktor. Kondisi ini juga sama ketika reaktor berada pada posisi *shutdown*. Kondisi 2 (*conditional*), *control rod* log dilepas

pada tingkat kedalaman 25%, 50%, 75% dalam teras reaktor. Kondisi 3 (*normal operation*), kedalaman *control rod* log di atur pada kondisi sepenuhnya terangkat dari dalam teras reaktor. Reaktor beroperasi tanpa pengaruh *control rod*. Secara umum, tahapan penelitian secara garis besar terlihat pada diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 2.

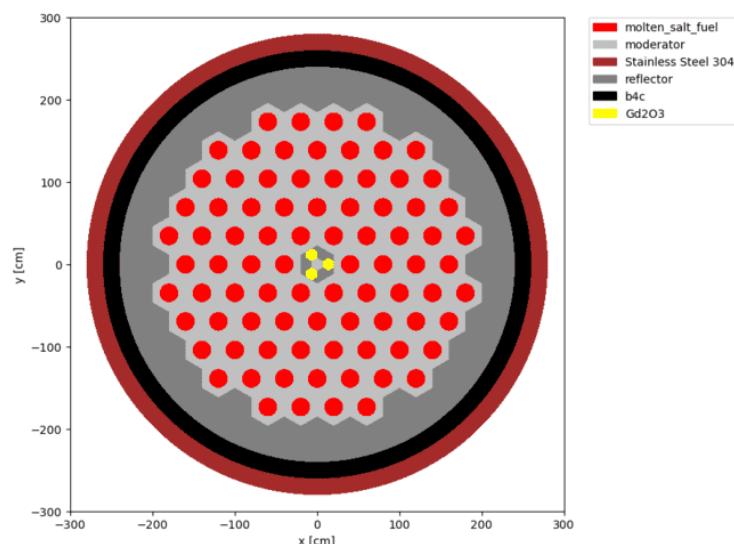


Gambar 2 Diagram alir penelitian

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Simulasi Model Reaktor Menggunakan *Input File XML*

Teras reaktor disusun dengan komposisi bahan bakar trans-uranium yang terlarut dengan garam cair. Model simulasi teras disusun dengan input pada komposisi material dalam bentuk `<file>.xml`. *File material.xml* memuat input panggilan data nuklida dan elemen serta densitas dari LiF-BeF₂-UF₄-ThF₄ (0,67, 0,23, 0,05, 0,0079) dalam % (persen fraksi mol) dengan pengayaan bahan bakar sebesar 19,5% pada U-235. *Fuel* log pada teras reaktor disusun dengan material bahan bakar dan grafit sebagai moderator, sedangkan *control rod* terbuat dari *Gadolinium Oxide* (Gd₂O₃). Geometri reaktor disusun menggunakan *hexagonal lattice* seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Desain geometri teras hexagonal lattice view-xy menggunakan OpenMC

Struktur model teras reaktor disusun dengan lapisan terluar dilapisi oleh bahan *stainless steel* (SS304) kemudian *boron carbide* (B₄C) sebagai lapisan pelindung neutron dan grafit sebagai reflektor teras. Simulasi dilakukan dengan menggunakan model *hexagonal lattice* dengan 84 log *fuel channel* dan 1 log *control rod*. *Control rod* log terdiri dari 4 *control rod* dengan tiga *shutdown rod* dan satu *regulating rod*. Tiga *shutdown rod* tersebut terbuat dari *Gadolinium Oxide* (Gd₂O₃), sedangkan

regulating rod terbuat dari grafit. Selama beroperasi, ketiga *shutdown rod* tersebut sepenuhnya diangkat dari dalam reaktor, sementara *regulating rod* dimasukkan sepenuhnya ke dalam reaktor.

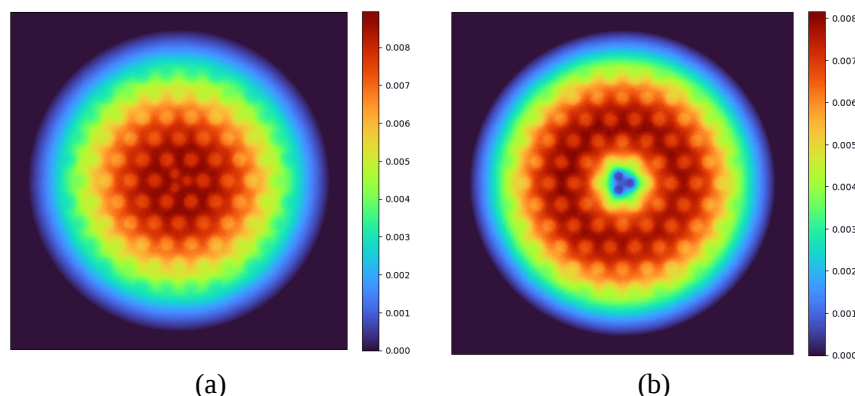
3.2 Skenario Perhitungan Reaktivitas Reaktor Thorcon

Hasil simulasi menampilkan nilai eigen k_{eff} berdasarkan dua kondisi teras yang diatur dalam keadaan ketika reaktor dalam kondisi beroperasi dan *shutdown*. Pada Tabel 2 terlihat nilai eigen masing-masing kondisi dari hasil pelacakan interaksi partikel yang melintasi *lattice* geometri teras secara acak. Hasil perhitungan reaktivitas pada setiap skenario yang dilakukan pada kondisi *normal operation*, reaktor dapat mencapai kondisi superkritis 1,07599 +/- 0,00031 (7,06% dk/k). Nilai margin pada kondisi reaktor beroperasi berada di atas 5% dk/k, menunjukkan reaktor sulit untuk dapat mempertahankan kondisi kritis ketika beroperasi.

Tabel 2 Hasil perhitungan Nilai Eigen K_{eff} Reaktor ThorCon

Skenario	Nilai eigen K_{eff}			Reaktivitas
	Interaksi	K_{eff}	std deviation	
3 Gd ₂ O ₃ , 1 Grafit (Shutdown)	k-effective (Collision)	1,05378	+/- 0,00043	0,051179384
	k-effective (Track-length)	1,05386	+/- 0,00044	
	k-effective (Absorption)	1,05399	+/- 0,00035	
	Combined k-effective	1,05394	+/- 0,00033	
3 Gd ₂ O ₃ , 1 Gd ₂ O ₃ (Shutdown)	k-effective (Collision)	1,05344	+/- 0,00037	0,050828152
	k-effective (Track-length)	1,05334	+/- 0,00039	
	k-effective (Absorption)	1,05366	+/- 0,00033	
	Combined k-effective	1,05355	+/- 0,00029	
3 Gd ₂ O ₃ , 1 Salt (Shutdown)	k-effective (Collision)	1,05368	+/- 0,00041	0,051152375
	k-effective (Track-length)	1,05372	+/- 0,00045	
	k-effective (Absorption)	1,05402	+/- 0,00033	
	Combined k-effective	1,05391	+/- 0,00030	
3 Salt, 1 Grafit (Normal Operation)	k-effective (Collision)	1,07564	+/- 0,00041	0,070623333
	k-effective (Track-length)	1,07543	+/- 0,00043	
	k-effective (Absorption)	1,07620	+/- 0,00034	
	Combined k-effective	1,07599	+/- 0,00031	
3 Salt, 1 Gd ₂ O ₃ (Normal Operation)	k-effective (Collision)	1,06344	+/- 0,00042	0,05970851
	k-effective (Track-length)	1,06354	+/- 0,00045	
	k-effective (Absorption)	1,06353	+/- 0,00031	
	Combined k-effective	1,06350	+/- 0,00028	

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan tingkat reaktivitas saat kondisi *shutdown* dan batang Gd₂O₃ yang disisipkan sebagai *regulating rod*, reaktor memiliki nilai *reactivity swing* 5,082% dk/k. Bagaimanapun, tingkat reaktivitas ini terlalu tinggi untuk kondisi pemadaman (*shutdown*) reaktor. Nilai margin pada setiap skenario yang dilakukan lebih besar 0,5% dk/k untuk kondisi *shutdown* yang menunjukan ketidakmampuan batang kendali (*shutdown rod*) dalam mencapai kondisi subkritis. Distribusi fluks yang terjadi pada reaktor ketika terjadinya reaksi fisi ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Distribusi fluks pada geometri reaktor ketika kondisi (a) beroperasi (b) *shutdown*

Distribusi fluks dihitung menggunakan proses perhitungan simulasi Monte Carlo untuk nilai fluks neutron dan reaksi fisi disepanjang lintasan geometri reaktor seperti yang terlihat pada Gambar 4. Pada saat reaktor beroperasi terlihat pada bagain Gambar 4(a) bahwa distribusi fluks tersebar merata *outlet* yang seragam secara radial dan suhu *outlet* yang seragam dari setiap log. Fluks neutron cenderung lebih tinggi di pusat reaktor dan secara bertahap menurun dengan bertambahnya jarak dari tengah reaktor. Nilai fluks neutron tertinggi terkonsentrasi di pusat reaktor, ditunjukkan oleh perbedaan kontur warna merah pekat pada skala warna. Hal ini menunjukkan bahwa laju reaksi fisi paling tinggi terjadi di sekitar pusat reaktor yang menggambarkan kondisi *steady-state*. Bagaimanapun pada saat kondisi *shutdown*, fluks neutron akan diserap oleh *control rod* menandakan kondisi *control rod* log berfungsi dengan baik. Akan tetapi, saat reaktor dipadamkan terlihat pada Gambar 4(b) masih terdapat distribusi fluks yang tersebar secara radial disekeliling *control rod* log. Kondisi ini menggambarkan bahwa ketika reaktor dipadamkan reaktor belum dapat mencapai kondisi subkritis ditandai dengan sebaran fluks yang tinggi pada teras reaktor. Bagaimana pun, situasi ini dapat di atasi dengan menyalurkan bahan bakar menuju *fuel drain tank* (FDT).

Simulasi skenario pada model reaktor Thorcon dengan variasi konfigurasi grafit sebagai *regulating rod* dan kedalaman *godolinium oxide* sebagai *shutdown rod* dapat memberikan pengaruh reaktivitas reaktor selama beroperasi. Berdasarkan hasil perhitungan yang dimuat pada Tabel 3, reaktivitas teras pada saat beroperasi dengan skenario konfigurasi *control rod* tidak lebih kecil dibandingkan reaktivitas pada saat skenario pengoperasian reaktor dilakukan. Nilai dari pada setiap konfigurasi antara Gd_2O_3 dan grafit berada di atas 5% dk/k. Kondisi ini dapat terjadi dikarenakan adanya pengaruh grafit pada konfigurasi *control rod* sehingga tidak menimbulkan nilai reaktivitas balik yang signifikan.

Tabel 3 Hasil nilai eigen K_{eff} masing-masing skenario *control rod*

Skenario	Interaksi	Nilai eigen K_{eff} K_{eff}	std deviation	Reaktivitas
3 salt, 1 (25% grafit, 75% Gd_2O_3)	k-effective (<i>Collision</i>)	1,06218	+/- 0,00038	0,058566573
	k-effective (<i>Track-length</i>)	1,06239	+/- 0,00043	
	k-effective (<i>Absorption</i>)	1,06222	+/- 0,00031	
	<i>Combined</i> k-effective	1,06221	+/- 0,00028	
3 salt, 1 (50% grafit, 50% Gd_2O_3)	k-effective (<i>Collision</i>)	1,06698	+/- 0,00042	0,062968516
	k-effective (<i>Track-length</i>)	1,06688	+/- 0,00045	
	k-effective (<i>Absorption</i>)	1,06730	+/- 0,00031	
	<i>Combined</i> k-effective	1,06720	+/- 0,00028	
3 salt, 1 (75% grafit, 25% Gd_2O_3)	k-effective (<i>Collision</i>)	1,07033	+/- 0,00037	0,066188555
	k-effective (<i>Track-length</i>)	1,07029	+/- 0,00042	
	k-effective (<i>Absorption</i>)	1,07119	+/- 0,00031	
	<i>Combined</i> k-effective	1,07088	+/- 0,00028	

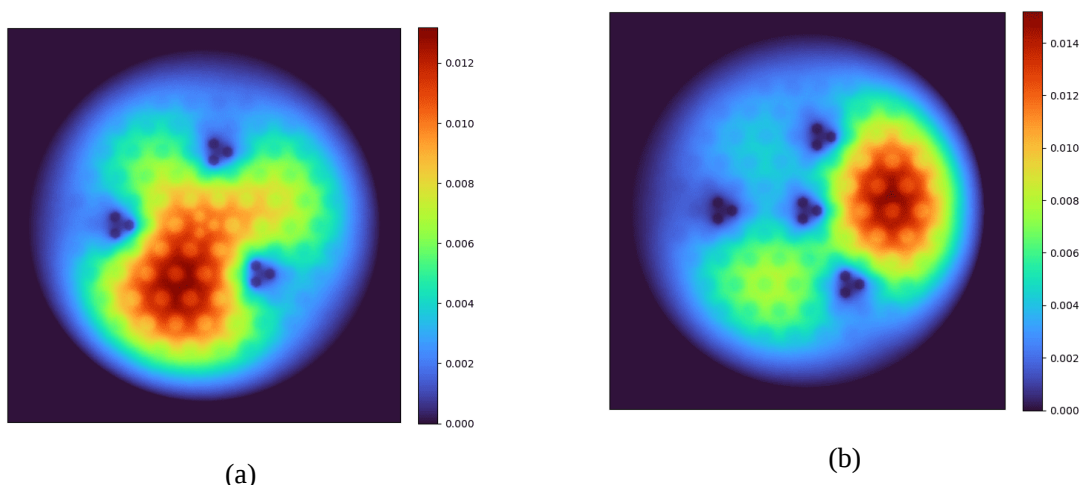
3.3 Skenario CSD (*Control Safety Device*) ThorCon-MSR

Skenario CSD (*Control Safety Device*) pada desain reaktor Thorcon ditujukan untuk dapat mengatur dan mempertahankan kondisi kritis ketika beroperasi. Pada kasus lain seperti kondisi *shutdown*, CSD juga dapat diatur untuk mencapai kondisi subkritis sebelum dipadamkan dan bahan bakar dialiri menuju FDT. Skenario CSD ini tentunya dapat menjaga reaktor dengan aman ketika terjadi masalah pada sistem FDT. Nilai pada reaktor untuk setiap kondisi teras dengan skenario CSD dapat dilihat pada Tabel 4.

Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa reaktivitas reaktor ketika beroperasi dengan skenario CSD berada dibawah $\leq 5\%$ dk/k dengan nilai 2,312% dk/k. Margin untuk skenario CSD pada saat reaktor beroperasi memungkinkan reaktor untuk tetap menjaga kondisi kritis ketika beroperasi atau bahkan terjadi kenaikan void pada bahan bakar. Kemudian, reaktivitas kondisi *shutdown* pada reaktor dengan skenario CSD dapat mencapai kondisi subkritis dengan margin sebesar sebesar -0,219% dk/k. Margin pada kondisi *shutdown* yang timbul memungkinkan reaktor mencapai kondisi subkritis ketika dipadamkan sebelum akhirnya bahan bakar dialirkan menuju FDT. Hasil sebaran distribusi fluks pada geometri teras berdasarkan geometri teras dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 4 Hasil perhitungan reaktivitas pada skenario CSD

Skenario	Nilai eigen K_{eff}			Reaktivitas	ρ (%dk/k)
	Interaksi	K_{eff}	std deviation		
Normal Operational	k-effective (<i>Collision</i>)	1,02356	+/- 0,00040	0,023122686	2,312
	k-effective (<i>Track-length</i>)	1,02370	+/- 0,00043		
	k-effective (<i>Absorption</i>)	1,02372	+/- 0,00031		
	Combined k-effective	1,02367	+/- 0,00030		
Shutdown	k-effective (<i>Collision</i>)	0,99724	+/- 0,00038	-0,002194807	-0,219
	k-effective (<i>Track-length</i>)	0,99709	+/- 0,00039		
	k-effective (<i>Absorption</i>)	0,99814	+/- 0,00030		
	Combined k-effective	0,99781	+/- 0,00028		



Gambar 5 Distribusi fluks geometri reaktor skenario CSD kondisi (a) beroperasi dan (b) *shutdown*

Skenario CSD dilakukan dengan memasukkan *control rod* log pada tiga titik log bahan bakar. Pada Gambar 5 dapat terlihat bahwa skenario CSD dapat menekan distribusi fluks pada geometri reaktor. Akan tetapi, sebaran fluks yang timbul disekitar geometri teras menjadi tidak merata. Akibatnya, reaksi fisi hanya terjadi pada sebagian wilayah dalam geometri reaktor. Geometri reaktor dengan fluks tinggi yang hanya berfokus pada beberapa bagian akan mengalami *burnup* (pembakaran) lebih cepat dibandingkan dengan bahan bakar pada daerah dengan fluks rendah. Hal ini tentunya akan mengurangi efisiensi pada penggunaan bahan bakar, dimana reaksi fisi yang terjadi di ruang lingkup bahan bakar menjadi tidak stabil.

3.4 Reaktivitas pada Optimalisasi Reaktor Thorcon

Tabel 5 Hasil Reaktivitas optimalisasi radius *fuel* teras reaktor

Radius (cm)	Reaktivitas		ρ cm %dk/k	
	Normal Operation	Shutdown	Normal Operation	Shutdown
10	0,07062	0,05115	7,062	5,115
10,25	0,05314	0,03211	5,314	3,211
10,5	0,04377	0,02247	4,377	2,247
10,75	0,03337	0,01310	3,337	1,310
11	0,02235	0,00202	2,235	0,202
11,25	0,01092	-0,00937	1,092	-0,937
11,5	-0,00123	-0,02134	-0,123	-2,134
11,75	-0,01413	-0,03446	-1,413	-3,446
12	-0,02778	-0,04829	-2,778	-4,829

Model Thorcon TMSR 500 memiliki tingkat reaktivitas yang relative tinggi pada setiap kondisi dengan skenario yang telah ditetapkan. Selama beroperasi, reaktor Thorcon akan mengalami peningkatan temperatur dan memanaskan grafit disekitar *fuel* log. Optimalisasi teras reaktor dapat dilakukan dengan meningkatkan radius *fuel channel* untuk menurunkan distribusi temperatur disekitar

fuel log bahan bakar. Koefisien temperatur pada bahan bakar prinsipnya berkaitan efek Doppler dengan perubahan reaktivitas (ρ) yang dihasilkan dalam bahan bakar. Dengan kata lain, perubahan temperatur pada bahan bakar reaktor menyebabkan perubahan nilai K_{eff} yang akan mempengaruhi tingkat nilai reaktivitas. Perbedaan reaktivitas pada setiap simulasi kenaikan radius bahan bakar (*fuel*) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 menunjukkan setiap kenaikan radius *fuel* yang dilakukan akan mempengaruhi reaktivitas reaktor pada masing-masing kondisi. Setiap kenaikan radius *fuel* yang dilakukan, reaktivitas pada reaktor akan mengalami penurunan. Berdasarkan hasil optimalisasi yang dilakukan, radius 11,25 cm merupakan radius *fuel* yang paling efektif. Terlihat pada Tabel 5, menunjukkan bahwa reaktor dengan radius *fuel* 11,25 mampu mencapai kondisi kritis 1,092% dk/k saat beroperasi dan subkritis -0,937 %dk/k saat dipadamkan. Hasil perhitungan tingkat reaktivitas pengoperasian reaktor setelah dioptimalisasi terlihat pada Tabel 6.

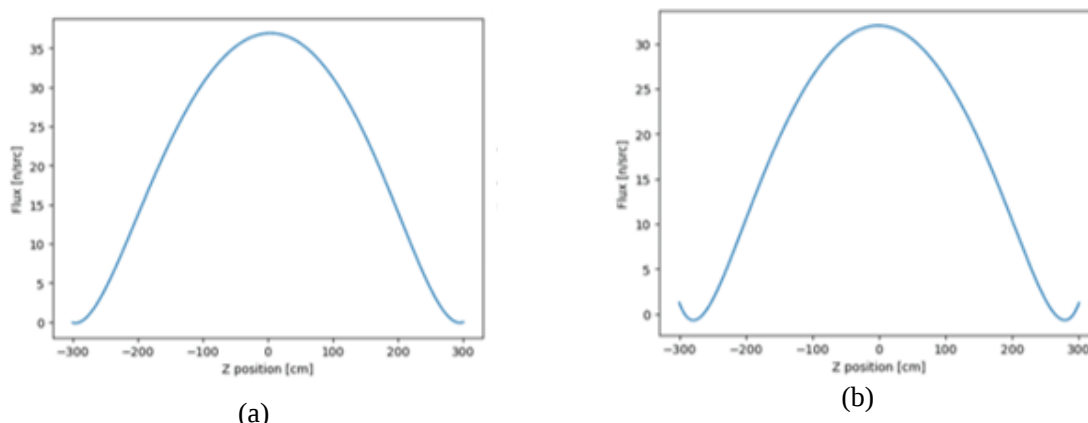
Tabel 6 Hasil perhitungan Nilai Eigen K_{eff} Optimalisasi reaktor

Skenario	Nilai eigen K_{eff}			Reaktivitas	ρ (%dk/k)
	Interaksi	K_{eff}	std deviation $\pm$		
3 Gd ₂ O ₃ , 1 Grafit (Shutdown)	k-effective (Collision)	0,99083	0,00018	-0,009265053	-0,926505319
	k-effective (Track-length)	0,99087	0,00020		
	k-effective (Absorption)	0,99081	0,00015		
	Combined k-effective	0,99082	0,00013		
3 Gd ₂ O ₃ , 1 Gd ₂ O ₃ (Shutdown)	k-effective (Collision)	0,99030	0,00020	-0,009621695	-0,962169475
	k-effective (Track-length)	0,99037	0,00022		
	k-effective (Absorption)	0,99057	0,00017		
	Combined k-effective	0,99047	0,00015		
3 Gd ₂ O ₃ , 1 Fuel (Shutdown)	k-effective (Collision)	0,99082	0,00020	-0,009377113	-0,937711338
	k-effective (Track-length)	0,99084	0,00021		
	k-effective (Absorption)	0,99065	0,00016		
	Combined k-effective	0,99071	0,00014		
3 Fuel, 1 Grafit (Normal Operation)	k-effective (Collision)	1,01115	0,00019	0,010929232	1,092923199
	k-effective (Track-length)	1,01127	0,00020		
	k-effective (Absorption)	1,01100	0,00016		
	Combined k-effective	1,01105	0,00014		
3 Fuel, 1 Gd ₂ O ₃ (Normal Operation)	k-effective (Collision)	0,99959	0,00022	-0,000540292	-0,054029176
	k-effective (Track-length)	0,99949	0,00022		
	k-effective (Absorption)	0,99946	0,00014		
	Combined k-effective	0,99946	0,00013		

Hasil perhitungan reaktivitas pada skenario penggunaan grafit sebagai *regulating rod* yang dilakukan pada kondisi *normal operation*, reaktor dapat mencapai kondisi superkritis dengan nilai *reactivity swing* 1,01105 +/- 0,00014 (1,0929 % dk/k). Sedangkan pada skenario penggunaan Gd₂O₃ sebagai *regulating rod*, nilai *reactivity swing* reaktor sebesar 0,99946 +/- 0,00013 (-0,054 %dk/k). Bagaimanapun, berdasarkan tingkat kekritisian reaktor yang diperoleh pada saat beroperasi menunjukkan bahwa penggunaan material grafit pada *control rod* akan menghasilkan reaktivitas positif, sedangkan *Gadolinium Oxide* akan menghasilkan reaktivitas negatif. Berdasarkan hasil simulasi Tabel 6, kondisi *shutdown* pada reaktor dapat mencapai kondisi subkritis dengan margin > -0,5 %dk/k. Bagaimanapun, nilai margin yang didapat terlalu tinggi untuk kondisi pemadaman reaktor. Sehingga pada kondisi *shutdown*, *control rod* dengan fungsi *shutdown rod* memerlukan waktu yang lama untuk memadamkan reaktor. Sementara itu, fluks pada geometri teras tetap didistribusikan secara merata seperti yang terlihat pada Gambar 6.

Terlihat dari peningkatan radius bahan bakar yang dilakukan mengakibatkan penurunan distribusi fluks disepanjang lintasan geometri reaktor. Hasil plot distribusi fluks yang dilakukan memperlihatkan puncak fluks meningkat pada tengah geometri dengan nilai 35 n/src (neutron/source) tanpa optimalisasi dan 30 n/src (neutron/source) dengan optimalisasi. Perbedaan distribusi fluks yang tidak terlalu besar mengharuskan bahan bakar tetap dialiri menuju FDT ketika dipadamkan meskipun pada saat reaktor dioptimalisasi. Setelah reaktor dioptimalisasi, pengendalian reaktivitas reaktor dapat dilakukan melalui simulasi skenario penggunaan *control rod* pada reaktor Thorcon. Reaktivitas reaktor

dihitung menggunakan nilai eigen *Combined* k-effective yang diperoleh selama simulasi yang dimuat pada Tabel 7.



Gambar 6 Distribusi fluks geometri reaktor (a) tanpa optimalisasi (b) dengan optimalisasi ketika beroperasi

Tabel 7 Hasil nilai eigen K_{eff} masing-masing skenario *control rod* pada optimalisasi reaktor

Nilai eigen K_{eff}					
Skenario	Interaksi	K_{eff}	std deviation $\pm$	Reaktivitas	ρ (%dk/k)
3 fuel, 1 (25% grafit, 75% Gd ₂ O ₃) (Operation Condition)	k-effective (<i>Collision</i>)	1,00100	0,00018	0,001108769	0,110876927
	k-effective (<i>Track-length</i>)	1,00100	0,00020		
	k-effective (<i>Absorption</i>)	1,00118	0,00016		
	Combined k-effective	1,00111	0,00013		
3 fuel, 1 (50% grafit, 50% Gd ₂ O ₃) (Operation Condition)	k-effective (<i>Collision</i>)	1,00534	0,00019	0,005539147	0,553914695
	k-effective (<i>Track-length</i>)	1,00530	0,00020		
	k-effective (<i>Absorption</i>)	1,00568	0,00014		
	Combined k-effective	1,00557	0,00013		
3 fuel, 1 (75% grafit, 25% Gd ₂ O ₃) (Operation Condition)	k-effective (<i>Collision</i>)	1,00910	0,00018	0,009096494	0,909649418
	k-effective (<i>Track-length</i>)	1,00916	0,00019		
	k-effective (<i>Absorption</i>)	1,00923	0,00014		
	Combined k-effective	1,00918	0,00013		

Pada Tabel 7 diperoleh tingkat kekritisasi reaktor untuk setiap skenario berdasarkan konfigurasi antara Gd₂O₃ dan grafit sebagai *regulating rod*. Skenario konfigurasi penggunaan control rod berhasil dilakukan dengan nilai reactivity swing diperoleh < 5% dk/k. Konfigurasi *control rod* yang digunakan memperoleh tingkat kekritisasi yang stabil dengan nilai $K_{eff} \geq 1$. Reaktor dengan tingkat kekritisasi ini berada pada kondisi kritis dengan reaktivitas terendah diatur berdasarkan penggunaan *regulating rod*. Berdasarkan hasil perhitungan, didapat bahwa konfigurasi 25% grafit-75% Gd₂O₃ sebagai *regulating rod* pada kondisi *Operation Condition* memiliki nilai *reactivity swing* 0,1108% dk/k dengan nilai margin < 0,5 %dk/k. Kondisi ini terjadi dikarenakan adanya pengaruh penggunaan antara grafit dan Gd₂O₃ pada konfigurasi *control rod* sehingga menimbulkan nilai reaktivitas balik antara reaktivitas positif dan negatif yang diperoleh.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pada saat reaktor beroperasi, skenario yang dilakukan mampu mencapai kondisi superkritis dengan nilai reaktivitas 5,97% dk/k. Kemudian, kondisi *shutdown* dengan skenario menunjukkan reaktivitas reaktor sebesar 5,082% dk/k. Pada skenario penggunaan *control rod* 25%, 50%, 75% reaktor menghasilkan reaktivitas tidak jauh berbeda saat pada kondisi *shutdown* dan beroperasi yaitu sebesar 5,856% dk/k. Berdasarkan hasil perhitungan, penggunaan skenario *Control Safety Device* (CSD) lebih efektif dalam melakukan pengendalian reaktivitas reaktor. Reaktivitas

reaktor yang dihasilkan dengan skenario CSD memiliki nilai 2,312% dk/k pada saat beroperasi dan -0,219% dk/k pada saat *shutdown*. Reaktivitas reaktor dengan skenario CSD memungkinkan reaktor tetap berada pada kondisi kritis dibawah $\leq 5\%$ dk/k tetapi dengan distribusi fluks disekitar geometri terjadi secara tidak merata. Skenario CSD juga dapat menekan reaktivitas reaktor mencapai keadaan subkritis sebelum bahan bakar dialiri menuju *fuel drain tank* (FDT) ketika berada pada kondisi *shutdown*. Optimalisasi pada reaktor saat beroperasi dengan skenario yang dilakukan mampu mencapai kondisi superkritis dengan nilai *reactivity swing* 1,0929% dk/k. Kemudian, kondisi *shutdown* dengan skenario tingkat kekritisannya dengan nilai *reactivity swing* reaktor sebesar -0,9377% dk/k. Pada skenario penggunaan *control rod* 25%, 50%, 75% reaktor mampu mempertahankan kondisi kritis dengan margin $< 0,5\%$ dk/k sebesar 0,1108% dk/k.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashraf, O., Rykhlevskii, A., Tikhomirov, G. V., & Huff, K. D. (2021). Preliminary design of control rods in the single-fluid double-zone thorium molten salt reactor (SD-TMSR). *Annals of Nuclear Energy*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108035>
- Carelli, M. D., & Ingersoll, D. T., (2015). *Handbook of small modular nuclear reactors*. Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier.
- Chen, K. (2021). *Introduction to ThorCon TMSR 500 Technology and Passive Safety System*. www.thorconpower.id
- Dwijayanto, R. A. P., Khakim, A., Zuhair, & Harto, A. W. (2024). The influence of graphite moderator density on the neutronic performance and fuel economy of a Molten Salt Reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110245>
- Forsberg, C. W. (2006). *Molten Salt Reactor Technology Gaps*.
- Khakim, A., Firmanda, F. R., Pramono, Y., & Suharyana. (2022). Assessment of TMSR-500 Shutdown Capability. *Atom Indonesia*, 48(1). <https://doi.org/10.17146/aij.2022.1145>
- Mikhaelia, L. Y., Suharyana, Riyatun, & Khakim, A. (2021). Comparison of boron carbide, Gadolinium Oxide, and hafnium as qualified molten salt reactor's control rods material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012004>
- Romano, P. K., & Forget, B. (2013). The OpenMC Monte Carlo particle transport code. *Annals of Nuclear Energy*, 51, 274–281. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.06.040>
- Romano, P. K., Horelik, N. E., Herman, B. R., Nelson, A. G., Forget, B., & Smith, K. (2015). OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.048>
- Waluyo, A., & Khakim, D. A. (2021). Review Desain Thorium Molten Salt Reactor 500 (TMSR-500). *Annual Nuclear Safety Seminar*, 140–2021.