

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS *SODIUM-COOLED FAST REACTOR*
(SFR) 1000 MWth MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

SKRIPSI

*Dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Sains bidang studi Fisika*



oleh:

ANAS FATUR RAHMAN

08021181823085

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan dibawah ini, Mahasiswa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya:

Nama : ANAS FATUR RAHMAN

NIM : 08021181823085

Judul TA : ANALISIS NEUTRONIK TERAS *SODIUM-COOLED FAST REACTOR* (SFR) 1000 MWth MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang saya susun dengan judul tersebut adalah asli atau orisinalitas dan mengikuti etika penulisan karya tulis ilmiah sampai pada waktu skripsi ini diselesaikan, sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di Program Studi Fisika Universitas Sriwijaya.

Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun. Apabila di kemudian hari terdapat kesalahan ataupun keterangan palsu dalam surat pernyataan ini, maka saya siap bertanggung jawab secara akademik dan bersedia menjalani proses hukum yang telah ditetapkan.

Indralaya, 20 Juli 2022



Yang menyatakan

Anas Fatur Rahman

NIM. 08021181823085

LEMBAR PENGESAHAN .

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS *SODIUM-COOLED FAST REACTOR* (SFR) 1000
MWth MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

SKRIPSI

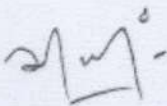
*Dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Sains bidang studi Fisika*

oleh :

Anas Fatur Rahman
08021181823085

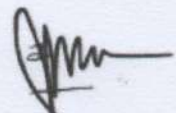
Indralaya, 20 Juli 2022
Menyetujui,

Pembimbing II



Dr. Helen Rafliis, M.Eng
NIP. 197908042005011002

Pembimbing I



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T.
NIP. 197009101994121001

LEMBAR PERSEMBAHAN

*“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan,
maka apabila kamu telah selesai
dari suatu urusan, kerjakanlah dengan sungguh-
sungguh urusan yang lain, dan hanya kepada
Tuhanmulah hendaknya kamu berharap.”
(Q.S. Al-Insyirah, 6-8)*

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

“Orang tuaku, Keluargaku, Pembimbing, Dosen, Almamater, Sahabat, Teman Seperjuangan, dan Seluruh pihak yang terkait dalam proses pembuatan Skripsi serta kepada Diriku sendiri karena sudah berusaha sebaik mungkin untuk menyelesaikan skripsi ini”

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS *SODIUM-COOLED FAST REACTOR*
(SFR) 1000 MWth MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

Oleh :

Anas Fatur Rahman

NIM. 08021181823085

ABSTRAK


Analisis Neutronik dari desain teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) dengan daya 1000 MWth dan bahan bakar *Mix-Oxide* (MOX) berdasarkan "*Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes*" telah dilakukan. Penelitian ini menggunakan variasi bahan bakar (U,TRU)O₂ dan (Th,TRU)O₂. Perhitungan dilakukan menggunakan OpenMC dengan data nuklir ENDF/B-VII.1 untuk validasi dan ENDF/B.VIII untuk perhitungan neutronik. Depleksi dilakukan selama 328,5 hari dengan asumsi nilai efisiensi reaktor 90% dari waktu operasi penuh selama 1 tahun. Parameter kinetik berupa nilai faktor multiplikasi efektif, *sodium void worth*, *doppler constant*, dan *control rod worth* serta parameter survei berupa faktor multiplikasi efektif, distribusi fluks neutron, distribusi laju reaksi fisi, perubahan komposisi material fertil dan fisil, dan *conversion ratio* menunjukkan hasil yang baik. Parameter kinetik untuk validasi masih berada dalam batas standar deviasi pada *benchmark*. Sementara itu, nilai k_{eff} masih berada dalam keadaan kritis sampai akhir waktu *burn up*. Nilai k_{eff} pada bahan bakar (U,TRU)O₂ pada keadaan BOC dan EOC berturut-turut menunjukkan nilai 1,0288 dan 1,005. Sedangkan nilai k_{eff} pada bahan bakar (Th,TRU)O₂ pada BOC dan EOC yaitu 1,0389 dan 1,0225. Penelitian menunjukkan (Th,TRU)O₂ dapat menjadi bahan bakar alternatif untuk reaktor SFR. Hal ini berdasarkan hasil k_{eff} pada bahan bakar (Th,TRU)O₂ yang diperoleh menunjukkan nilai yang lebih stabil dibandingkan dengan k_{eff} pada bahan bakar (U,TRU)O₂.

Kata kunci : Analisis neutronik , SFR, OpenMC, Monte Carlo, Fluks , Rreaksi fisi

Indralaya, 20 Juli 2022

Menyetujui,

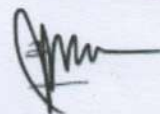
Pembimbing II



Dr. Helen Rafelis, M.Eng

NIP. 197908042005011002

Pembimbing I



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.

NIP. 197211252000122001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

Dr. Frinsyal Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 197003101994121001



**NEUTRONIC ANALYSIS OF SODIUM-COOLED FAST REACTOR (SFR)
1000 MWth USING OPENMC CODE**

**By :
ANAS FATUR RAHMAN**

NIM. 08021181823085


ABSTRACT

Neutronic analysis of Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) core with 1000 MWth power and Mix-Oxide (MOX) fuel based on the "Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes" has been determine. This study uses a variety of fuels (U,TRU)O₂ and (Th,TRU)O₂. Calculations were performed using OpenMC with nuclear data ENDF/B-VII.1 for validation and ENDF/B.VIII for neutronic calculations. Depletion was carried out for 328.5 days assuming the reactor efficiency value was 90% of the full operating time for 1 year. Kinetic parameters consist of effective multiplication factor, sodium void worth, Doppler constant, and control rod worth. Survey parameters consist of effective multiplication factor, neutron flux distribution, fission reaction rate distribution, composition changes of fertile and fissile materials, and conversion ratio showed good results. The kinetic parameters for validation are still within the standard deviation limits of the benchmark. Meanwhile, the k_{eff} value is still in a critical condition until the end of the burn up time. The k_{eff} value of fuel (U,TRU)O₂ at BOC and EOC states shows the values of 1.0288 and 1.005, respectively. While the keff values for fuel (Th,TRU)O₂ at BOC and EOC shows the values 1.0389 and 1.0225, respectively. Research shows (Th,TRU)O₂ can be an alternative fuel for SFR reactors. This is based on the results of the keff on the fuel (Th,TRU)O₂ obtained which shows a more stable value than the k_{eff} on the fuel (U,TRU)O₂.

Key words : Neutronic analysis, SFR, OpenMC, Monte Carlo, Flux, Fission rate

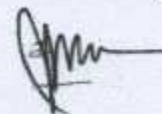
Indralaya, 20 Juli 2022
Menyetujui,

Pembimbing II



Dr. Helen Raflis, M.Eng
NIP. 197908042005011002

Pembimbing I



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



Dr. Frimsyah Virgo, S.Si., M.T.
NIP. 197009101994121001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan proposal tugas akhir yang berjudul “**Analisis Neutronik Teras Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) 1000 MWth menggunakan Perangkat Lunak OpenMC**”. Tugas akhir ini dilaksanakan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya. Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat memberikan manfaat diantaranya bertambahnya pengetahuan pembaca mengenai energi nuklir khususnya untuk tipe reaktor SFR. Selain itu, penulis berharap penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan energi nuklir di Indonesia. Namun, Penulis juga menyadari bahwa tentu masih terdapat kekurangan dalam penulisan, sehingga penulis mengharapkan kritik serta saran yang membangun.

Pada kesempatan ini penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak berkontribusi dalam pelaksanaan tugas akhir ini. Secara khusus penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT, yang atas karuniaNya, penulis masih diberikan nikmat sehat sehingga bisa menyelesaikan skripsi ini.
2. Keluarga penulis, terutama kedua orang tua yang telah memberikan dukungan moril dan materil kepada penulis.
3. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
5. Ibu Dr. Menik Ariani, M.Si selaku pembimbing akademik, pembimbing kerja praktek, sekaligus pembimbing I tugas akhir penulis yang selalu meluangkan waktu untuk memberikan dukungan, saran dan bimbingan dari awal hingga akhir kuliah.
6. Bapak Dr. Helen Rafli, M.Eng selaku pembimbing 2 tugas akhir penulis yang bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, khususnya

LEMBAR PENGESAHAN .

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS *SODIUM-COOLED FAST REACTOR* (SFR) 1000
MWth MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

SKRIPSI

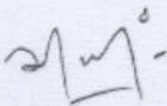
*Dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Sains bidang studi Fisika*

oleh :

Anas Fatur Rahman
08021181823085

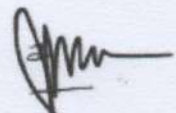
Indralaya, 20 Juli 2022
Menyetujui,

Pembimbing II



Dr. Helen Rafliis, M.Eng
NIP. 197908042005011002

Pembimbing I



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T.
NIP. 197009101994121001

**NEUTRONIC ANALYSIS OF SODIUM-COOLED FAST REACTOR (SFR)
1000 MWth USING OPENMC CODE**

**By :
ANAS FATUR RAHMAN**

NIM. 08021181823085

ABSTRACT

Neutronic analysis of Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) core with 1000 MWth power and Mix-Oxide (MOX) fuel based on the "Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes" has been determine. This study uses a variety of fuels (U,TRU)O₂ and (Th,TRU)O₂. Calculations were performed using OpenMC with nuclear data ENDF/B-VII.1 for validation and ENDF/B.VIII for neutronic calculations. Depletion was carried out for 328.5 days assuming the reactor efficiency value was 90% of the full operating time for 1 year. Kinetic parameters consist of effective multiplication factor, sodium void worth, Doppler constant, and control rod worth. Survey parameters consist of effective multiplication factor, neutron flux distribution, fission reaction rate distribution, composition changes of fertile and fissile materials, and conversion ratio showed good results. The kinetic parameters for validation are still within the standard deviation limits of the benchmark. Meanwhile, the k_{eff} value is still in a critical condition until the end of the burn up time. The k_{eff} value of fuel (U,TRU)O₂ at BOC and EOC states shows the values of 1.0288 and 1.005, respectively. While the keff values for fuel (Th,TRU)O₂ at BOC and EOC shows the values 1.0389 and 1.0225, respectively. Research shows (Th,TRU)O₂ can be an alternative fuel for SFR reactors. This is based on the results of the keff on the fuel (Th,TRU)O₂ obtained which shows a more stable value than the k_{eff} on the fuel (U,TRU)O₂.

Key words : Neutronic analysis, SFR, OpenMC, Monte Carlo, Flux, Fission rate

Indralaya, 20 Juli 2022
Menyetujui,

Pembimbing II

Dr. Helen Rafli, M.Eng
NIP. 197908042005011002

Pembimbing I

Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika

Dr. Frimsyah Virgo, S.Si., M.T.
NIP. 197009101994121001

bimbingan teknis tentang OpenMC serta konsep-konsep terkait fisika nuklir sehingga penulis memperoleh banyak ilmu baru.

7. Bapak Dr. Fiber Monado, M.Si dan Ibu Dra. Jorena, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen yang telah memberikan ilmu kepada penulis.
9. Seluruh staff administrasi jurusan fisika yang telah memberikan bantuan untuk proses administrasi kepada penulis.
10. Penghuni kos abu bakar yang selalu memberikan semangat dan kesegaran pikiran selama di kos sehingga penulis tidak jenuh.
11. Aldikur dan Gina selaku ahli OpenMC yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan koding OpenMC sekaligus teman selama mengerjakan tugas akhir di server.
12. SPY Club sebagai *circle* penulis yang selalu terlibat dalam setiap proses dari SMA hingga saat ini.
13. Tiara yang telah memberikan tenaga dan waktunya sebagai *mood booster* dari penulis sekaligus telah membantu dalam proses administrasi dan lain-lain.
14. BTM Only yang telah menjadi wadah untuk menyalurkan hobi bermain bridge.
15. Seluruh teman-teman AMF18I dan Elinkomnuk 18.
16. Keluarga Asisten FD, Lab Fiskom dan Lab Eksfis.
17. DPM KM FMIPA sebagai tempat belajar berorganisasi.
18. Kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu dan sudah membantu dalam pelaksanaan penyusunan skripsi ini hingga selesai.

Indralaya, 20 Juli 2022

Penulis

Anas Fatur Rahman

NIM. 08021181823085

DAFTAR ISI

PERNYATAAN ORISINALITAS	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSEMBAHAN	iii
ABSTRACT	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR ISTILAH	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	4
2.2. Reaktor Nuklir.....	5
2.3. <i>Sodium-cooled Fast Reactor</i> (SFR)	7
2.4. Bahan Bakar Nuklir.....	9

2.5. Reaksi Fisi	11
2.6. Neutron.....	12
2.7. Analisis Neutronik	13
2.7.1. Tampang Lintang Reaksi Fisi Neutron	13
2.7.2. Persamaan Transport Neutron.....	14
2.7.3. Faktor Multiplikasi.....	16
2.8. <i>Burn up</i>	17
2.9. Metode Monte Carlo	18
2.10. OpenMC.....	19
2.11. Filter <i>Functional Expansion Tally</i> (FET).....	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	22
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	22
3.3. Tahapan Penelitian	23
3.4. Spesifikasi Desain Teras SFR 1000 MWth.....	26
3.5. Parameter Survei	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1. Desain Geometri Teras <i>Sodium-cooled Fast Reactor</i> (SFR)	40
4.2. Performa Perhitungan Neutronik Teras <i>Sodium-cooled Fast Reactor</i> (SFR) menggunakan OpenMC	43
4.3. Analisis Hasil Perhitungan <i>Burn up</i> Teras SFR dengan Variasi Bahan Bakar menggunakan OpenMC	46
4.3.1. Perhitungan Nilai Faktor Multiplikasi Efektif	46
4.3.2. Perhitungan Nilai <i>Conversion Ratio</i>	48
4.3.3. Perhitungan Komposisi Nuklida Material Fisil dan Fertil Bahan Bakar	49
4.3.4. Perhitungan Nilai Distribusi Fluks Neutron.....	51

4.3.5. Perhitungan Nilai Distribusi Laju Reaksi Fisi	54
BAB V PENUTUP.....	58
5.1. Kesimpulan	58
5.2. Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN.....	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Struktur penyusun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	4
Gambar 2. 2. Perkembangan generasi reaktor nuklir (Locatelli et al., 2013).	7
Gambar 2. 3. Referensi desain reaktor tipe SFR (Pedraza, 2013).....	9
Gambar 2. 4. Ilustrasi reaksi fisi berantai U235 (Stacey, 2007).	12
Gambar 2. 5. Ilustrasi arah gerak partikel neutron (Stacey, 2007).	15
Gambar 2. 6. Elemen volume partikel pada sumbu r yang bergerak dalam arah Ω (Stacey, 2007).	15
Gambar 3. 1. <i>Flow chart</i> penelitian.	24
Gambar 3. 2. <i>Flow chart</i> perhitungan teras SFR dengan OpenMC.	25
Gambar 3. 3. Desain teras SFR 1000 MWth arah radial.....	26
Gambar 4. 1. Geometri teras SFR arah radial dengan kondisi batang kendali diturunkan (a) dan diangkat (b).....	41
Gambar 4. 2. Geometri teras SFR arah aksial dengan kondisi batang kendali diturunkan (a) dan diangkat (b).....	41
Gambar 4. 3. Geometri perangkat bahan bakar (<i>driver</i>) (a) dan batang kendali (<i>control rod</i>) (b) arah aksial	42
Gambar 4. 4. Geometri perangkat <i>shielding</i> (a) dan reflektor (b) arah aksial	42
Gambar 4. 5. Evolusi nilai faktor multiplikasi efektif terhadap waktu <i>burn up</i>	47
Gambar 4. 6. Grafik evolusi nilai <i>conversion ratio</i> terhadap waktu <i>burn up</i>	49
Gambar 4. 7. Evolusi nilai densitas atom fisil terhadap waktu <i>burn up</i>	50
Gambar 4. 8. Evolusi nilai densitas atom fertil terhadap waktu <i>burn up</i>	51
Gambar 4. 9. Distribusi fluks neutron teras SFR pada (a) BOC dan (b) EOC untuk bahan bakar (U,TRU)O ₂	53
Gambar 4. 10. Distribusi fluks neutron teras SFR pada (a) BOC dan (b) EOC untuk bahan bakar (Th,TRU)O ₂	53
Gambar 4. 11. Distribusi laju reaksi fisi pada teras SFR dengan bahan bakar (U,TRU)O ₂	55
Gambar 4. 12. Distribusi laju reaksi fisi pada teras SFR dengan bahan bakar (Th,TRU)O ₂	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Komponen penyusun reaktor nuklir beserta fungsinya (Adiwardojo et al., 2010).	6
Tabel 3. 1. Spesifikasi umum desain teras SFR 1000 MWth (OECD Nuclear Energy, 2016).	27
Tabel 3. 2. Spesifikasi umum desain perangkat bahan bakar (<i>driver</i>) (OECD Nuclear Energy, 2016)	27
Tabel 3. 3. Spesifikasi umum desain perangkat reflektor (OECD Nuclear Energy, 2016)	28
Tabel 3. 4. Spesifikasi umum desain perangkat pelindung (<i>shielding</i>) (OECD Nuclear Energy, 2016)	28
Tabel 3. 5. Spesifikasi umum desain perangkat batang pengendali (<i>control rod</i>) (OECD Nuclear Energy, 2016)	28
Tabel 3. 6. Fraksi volume bahan penyusun teras (OECD Nuclear Energy, 2016)	29
Tabel 3. 7. Densitas atom penyusun bahan bakar (U,TRU)O ₂ zona <i>inner</i>	31
Tabel 3. 8. Densitas atom penyusun bahan bakar (U,TRU)O ₂ zona <i>middle</i>	32
Tabel 3. 9. Densitas atom penyusun bahan bakar (U,TRU)O ₂ zona <i>outer</i>	33
Tabel 3. 10. Densitas atom pendingin dan material penyusun struktur teras.....	34
Tabel 3. 11. Fraksi atom penyusun bahan bakar (Th,TRU)O ₂ zona <i>inner</i>	35
Tabel 3. 12. Fraksi atom penyusun bahan bakar (Th,TRU)O ₂ zona <i>middle</i>	36
Tabel 3. 13. Fraksi atom penyusun bahan bakar (Th,TRU)O ₂ zona <i>outer</i>	37
Tabel 4. 1. Perbandingan data nuklir dan perangkat lunak OpenMC, UIUC, dan CEN-1	45
Tabel 4. 2. Data hasil perhitungan parameter kinetik BOC dan EOC	45
Tabel 4. 3. Data nilai fluks neutron pada teras SFR untuk masing-masing bahan bakar (U,TRU)O ₂ dan (Th,TRU)O ₂	54
Tabel 4. 4. Data nilai laju reaksi fisi rata-rata dan maksimum pada teras SFR untuk masing-masing bahan bakar.....	57

DAFTAR ISTILAH

Teras reaktor pembakaran	: Tempat diletakkannya bahan bakar dan terjadinya proses pembakaran
<i>Driver</i>	: Istilah pada <i>benchmark</i> untuk menyebutkan pin bahan bakar.
Reflektor	: Bagian reaktor yang berfungsi untuk mencegah kebocoran neutron dengan cara memantulkan neutron.
<i>Control Rod</i>	: batang kendali yang berfungsi untuk proses mematikan reaktor (<i>shutdown</i>).
<i>Shielding</i>	: Pelindung yang berfungsi menyerap neutron yang akan keluar teras reaktor.
<i>Burn up</i>	: Proses pembakaran atau banyaknya energi yang dihasilkan per satuan massa bahan bakar.
Depleksi	: Proses pengikisan atau peluruhan bahan bakar selama pembakaran.
Fisi	: Reaksi pembelahan inti atom akibat tumbukan dengan partikel neutron menjadi inti atom lebih ringan disertai pelepasan energi dan pembentukan neutron baru.
Fusi	: Reaksi penggabungan antara inti atom yang ringan menjadi inti atom berat disertai pelepasan energi.
Fertil	: Bahan bakar yang bersifat tidak dapat membelah namun dapat menangkap neutron dan membentuk bahan fisil lainnya.
Fisil	: Bahan bakar yang bersifat dapat membelah dan melakukan proses reaksi fisi.
<i>Conversion Ratio</i>	: Perbandingan antara produksi bahan fisil dan konsumsi bahan fisil.

DAFTAR SIMBOL

λ_A	: konstanta peluruhan nuklida A
Σ_a	: tampang lintang reaksi absorpsi (<i>absorption</i>)
$\frac{dN_A}{dt}$: perubahan densitas atom nuklida A
Σ_f	: tampang lintang reaksi fisi (<i>fission</i>)
Σ_s	: tampang lintang reaksi hamburan (<i>scattering</i>)
Σ_t	: tampang lintang material
$\sigma_{Ag}^A \phi_g$: tampang lintang absorpsi neutron nuklida pada grup g
$\frac{\partial N}{\partial t}$: jumlah neutron per satuan waktu
$\Delta\rho_{CR}$: <i>control rod worth</i>
$\Delta\rho_{Doppler}$: <i>doppler constant</i>
$\Delta\rho_{Na}$: <i>sodium void worth</i>
\rightarrow	: menunjukkan proses reaksi
k_{eff}	: faktor multiplikasi efektif neutron
k_{inf}	: faktor multiplikasi tak hingga neutron
P_{FNL}	: probabilitas neutron cepat untuk tidak mengalami kebocoran
P_{TNL}	: probabilitas neutron termal tidak mengalami kebocoran
S_{ext}	: neutron dari sumber eksternal
ξ	: bilangan pseudorandom
N	: jumlah nuklida per satuan volume
dA	: elemen luas
dE	: elemen energi
dx	: elemen jarak
dr	: elemen volume
$d\Omega$: elemen arah
f	: faktor pemanfaatan termal
k	: faktor multiplikasi neutron
l	: jarak partikel mengalami tumbukan
n	: jumlah neutron
p	: probabilitas tangkapan resonansi

t : variabel waktu
 v : kecepatan neutron
 r : posisi neutron
 Ω : arah gerak neutron
 ε : faktor fisi cepat
 η : faktor reproduksi neutron
 σ : tampang lintang reaksi nuklir

DAFTAR SINGKATAN

SFR	: <i>Sodium-cooled Fast Reactor</i>
EBT	: Energi Baru Terbarukan
PLTN	: Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
OpenMC	: <i>Open source Monte Carlo (software)</i>
(Th,TRU)O2	: Thorium-Transuraniu-Oksida
(U,TRU)O2	: Uranium-Transuraniu-Oksida
ENDF	: <i>Evaluated Nuclear Data Files</i>
MWth	: <i>Mega-watt thermal</i>
MWe	: <i>Mega-watt electric</i>
FET	: <i>Functional Expansion Tally</i>
SS	: <i>Stainless Steel</i>
BOC	: <i>Beginning of Cycle</i>
EOC	: <i>End of Cycle</i>
MOX	: <i>Mix Oxide</i>
CR	: <i>Control Rod</i>
STD	: Standar Deviasi

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Cara install OpenMC	63
Lampiran 2. <i>Listing</i> Program OpenMC untuk desain teras SFR bahan bakar (U,TRU)O2	64
Lampiran 3. <i>Listing</i> Program OpenMC untuk desain teras SFR bahan bakar (Th,TRU)O2.....	77
Lampiran 4. Tabel data faktor multiplikasi efektif (k_{eff}).....	89
Lampiran 5. Tabel data <i>conversion ratio</i>	90
Lampiran 6. Tabel data densitas nuklida Pu239 (atom/cm3).....	91
Lampiran 7. Tabel data densitas nuklida Pu240 (atom/cm3).....	91
Lampiran 8. Tabel data densitas nuklida Pu241 (atom/cm3).....	91
Lampiran 9. Tabel data densitas nuklida Fertile U238 pada (U,TRU)O2 dan Th232 pada (Th,TRU)O2 (atom/cm3).....	92
Lampiran 10. Tabel data densitas nuklida Fertile U235 pada (U,TRU)O2 dan U233 pada (Th,TRU)O2 (atom/cm3).....	92

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemajuan pembangunan suatu negara dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah ketersediaan energi yang mencukupi. Oleh karena itu, pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) menjadi salah satu fokus utama di berbagai negara. Di Indonesia, konsumsi energi masih didominasi oleh penggunaan energi fosil, yaitu minyak bumi sebesar 44% dan batubara 30%. Selain energi fosil, sebanyak 18% konsumsi energi di Indonesia masih menggunakan energi gas bumi. Sedangkan untuk konsumsi EBT hanya sekitar 8%. Perlu adanya kebijakan yang konkret dari Pemerintah untuk mengatur persentase konsumsi energi dengan mengalihkan konsumsi energi fosil menjadi energi non-fosil dan Energi Baru Terbarukan (EBT) (Santoso, 2017). Salah satu opsi untuk pengembangan EBT adalah dengan memanfaatkan energi nuklir yang diimplementasikan menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Sebagai sumber energi yang cukup bersih, PLTN telah banyak dibangun di berbagai negara. Namun, Indonesia belum memiliki reaktor nuklir yang digunakan untuk PLTN secara komersial. Indonesia hanya memiliki tiga reaktor nuklir yang saat ini digunakan sebagai riset ilmu pengetahuan (Dewi & Sriyana, 2019).

Reaktor nuklir sudah mulai dikembangkan saat Perang Dunia II yang digunakan sebagai senjata. Namun, saat ini reaktor nuklir sudah dimanfaatkan untuk keperluan pembangkit listrik. Perkembangan reaktor nuklir sudah sampai pada generasi ke-IV. Perkembangan reaktor generasi IV dibahas oleh *Generation IV International Forum* (GIF) yang dibentuk pada tahun 2001. Organisasi ini memiliki peran untuk mempublikasikan referensi desain dari reaktor generasi IV. Beberapa tipe reaktor generasi IV antara lain *Very High Temperature Reactor* (VHTR), *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR), *Super Critical Water Reactor* (SCWR), *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) dan *Molten Salt Reactor* (MSR) (Locatelli et al., 2013). *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) adalah reaktor berpendingin sodium dan merupakan salah satu tipe reaktor yang paling menjanjikan sebagai reaktor pada generasi masa depan. Hal itu karena SFR dapat memenuhi beberapa parameter yang diperlukan untuk reaktor generasi IV yaitu

dalam hal keselamatan, ekonomi, pengurangan limbah ke lingkungan, utilisasi bahan bakar yang efisien, resistansi terhadap proliferasi nuklir, dan meningkatnya ketahanan struktur fisik reaktor (Septi et al., 2018).

Untuk mengembangkan teknologi reaktor SFR diperlukan analisis neutronik yang mencakup perhitungan beberapa parameter seperti faktor multiplikasi efektif, distribusi fluks neutron, distribusi laju reaksi fisi, perubahan densitas atom, dan *conversion ratio*. Parameter tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan transport neutron. Namun, secara analitik persamaan transport neutron sangat sulit diselesaikan secara langsung. Salah satu pendekatan yang sering digunakan untuk menghitung parameter neutronik tersebut adalah metode Monte Carlo. Monte Carlo merupakan metode stokastik yang menggunakan bilangan acak untuk memperoleh probabilitas pergerakan suatu partikel (Shafii, 2013). Pada penelitian ini dilakukan analisis neutronik dari teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) menggunakan metode Monte Carlo. Untuk kebutuhan perhitungan Monte Carlo, digunakan perangkat lunak OpenMC yang bersifat *open source* dan terintegrasi dengan bahasa pemrograman Python sehingga lebih mudah digunakan. OpenMC dikembangkan oleh *Computational Reactor Physics Group* (CRPG) di *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) sejak tahun 2011 (Romano & Forget, 2013).

1.2. Rumusan Masalah

Desain geometri dan proses validasi parameter kinetik teras reaktor merupakan proses awal untuk memperoleh spesifikasi teras yang sesuai sebelum melakukan perhitungan analisis neutronik. Perhitungan neutronik yang meliputi faktor multiplikasi efektif, distribusi fluks neutron, distribusi laju reaksi fisi, perubahan komposisi material fertil dan fisil, dan *conversion ratio* yang optimal dari teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) adalah proses yang penting dilakukan untuk merancang desain reaktor. Dalam perhitungan neutronik akan dilakukan menggunakan variasi bahan bakar berupa (Th,TRU)O₂ dan (U,TRU)O₂ untuk memperoleh perbandingan performa teras reaktor dengan masing-masing bahan bakar.

1.3. Batasan Masalah

Sel bahan bakar yang digunakan adalah (Th,TRU)O₂ dan (U,TRU)O₂. Perhitungan neutronik dengan metode Monte Carlo dilakukan menggunakan OpenMC 0.13.0 dengan data library ENDF/B-VIII. Simulasi dilakukan untuk menghasilkan desain geometri dari teras SFR dan beberapa parameter survei yaitu nilai faktor multiplikasi efektif, distribusi fluks neutron, distribusi laju reaksi fisi, perubahan komposisi material fertil dan fisil, dan *conversion ratio* dari teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR). Daya keluaran dari teras reaktor adalah 1000 MWth dan waktu *burn up* dilakukan selama 328,5 hari.

1.4. Tujuan Penelitian

1. Membuat desain geometri teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) 1000 MWth dengan bahan bakar (Th,TRU)O₂ dan (U,TRU)O₂.
2. Melakukan validasi nilai parameter kinetik teras reaktor berupa nilai faktor multiplikasi efektif, *sodium void worth*, *doppler constant*, dan *control rod worth* terhadap data pada *Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes*.
3. Memperoleh nilai parameter survei berupa faktor multiplikasi efektif, distribusi fluks neutron, distribusi laju reaksi fisi, perubahan komposisi material fertil dan fisil, dan *conversion ratio* dari teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) dengan daya 1000 MWth dengan bahan bakar (Th,TRU)O₂ dan (U,TRU)O₂.
4. Memperoleh perbandingan data neutronik bahan bakar (Th,TRU)O₂ dan (U,TRU)O₂ yang diterapkan pada teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) dengan daya 1000 MWth.

1.5. Manfaat

Penelitian diharapkan dapat menjadi referensi mengenai desain teras *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) dengan daya 1000 MWth untuk pengembangan energi baru dengan cadangan melimpah, efisien dan memiliki tingkat keselamatan yang tinggi serta dapat menjadi rujukan untuk tahap analisis termal hidrolis dari teras SFR. Selain itu dapat dijadikan sebagai referensi untuk penggunaan bahan bakar thorium dan uranium pada SFR.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardojo, Lasman, A. N., Ruslan, Parmanto, E. M., & Effendi, E. (2010). *Reaktor.Pdf* (p. 1).
- Agency, OECD Nuclear Energy, S. C. for N. (2016). Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes. *Nuclear Energy Agency, February*, 87.
- Alatas, Z., Hidayati, S., Akhadi, M., & Purba, M. (2001). Buku Pintar Nuklir. *Buku*, 1–216. http://www.batan.go.id/kip/documents/12buku_pintar.pdf
- Bastori, I., & Birmano, M. D. (2018). Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 19(2), 95–102.
- Belyakov, N. (2019). Sustainable power generation: Current status, future challenges, and perspectives. *Sustainable Power Generation: Current Status, Future Challenges, and Perspectives, June 2019*, 1–620. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01215-3>
- Dewita, E. (2012). Analisis potensi thorium sebagai bahan bakar nuklir alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 14(1).
- IAEA. (2005). *Thorium fuel cycle: Potential benefits and challenges. May*.
- Krane, K. (2001). Krane. In *Bauwirtschaft - BW* (3th ed., Vol. 55, Issue 6). https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8196-0_4
- Locatelli, G., Mancini, M., & Todeschini, N. (2013). Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects. *Energy Policy*, 61, 1503-1520.
- Morales Pedraza, J. (2013). *New Technologies for the Construction of Nuclear Power Plants. May*, 1–87.
- Novalianda, S. (2019). Power Flattening Desain Reaktor Gfr Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U, Pu)N. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 4(Vol 4, No 3 (2019): Edisi Oktober), 134–140.

<https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/jet/article/view/2070>

- Pioro, I., & Buruchenko, S. (2017). Nuclear Power as a Basis for Future Electricity Generation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 95(4), 0–16. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042002>
- Raaj Saasthaa Arumuga Kumar, E., Darnowski, P., Kiritbhai Pancholi, M., & Dzido, A. (2019). Thorium application in the medium-sized sodium-cooled fast reactor. *E3S Web of Conferences*, 137, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913701030>
- Raflis, H., Suud, Z., Waris, A., & Irwanto, D. (2021). *Application of Functional Expansions Tally (FET) Filter in a Gas-cooled Fast Reactor Design*. 6–12.
- Raflis, H., Su'ud, Z., Waris, A., & Irwanto, D. (2022). Core design selection for a long-life modular gas-cooled fast reactor using OpenMC code. *International Journal of Energy Research*.
- Richardina, V., Setia, W., & Wulan, T. (2015). Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar Uo₂ Dengan Moderator H₂O Dan Pendingin H₂O. *Berkala Fisika*, 18(3), 95–100.
- 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>
- Santoso, R. (2017). Kebijakan energi di Indonesia: menuju kemandirian. *Jurnal Analis Kebijakan*, 1(1), 28–36.
- Scott, C. C., & Moorthy, S. (2008). Nuclear reactor analysis. In *Proceedings of the IEEE* (Vol. 66, Issue 5, pp. 611–612). <https://doi.org/10.1109/proc.1978.10978>
- Septi, R., Shafii, M. A., Irka, F. H., & Su, Z. (2018). *Analisis Kekritisian Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR) Berdasarkan Variasi Bahan Bakar*. 7(1), 69–72.
- Shafii, M. A., Septi, R., Handayani Irka, F., Arkundato, A., & Su'ud, Z. (2021). Neutronic analysis of sodium-cooled fast reactor design with different fuel

types using modified CANDLE shuffling strategy in a radial direction. *International Journal of Energy Research*, 45(8), 12272–12283. <https://doi.org/10.1002/er.6384>

Stacey, W. M. (2007). Nuclear Reactor Physics: Second Edition. In *Nuclear Reactor Physics: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9783527611041>

Syarip, S., Tenaga, B., & Nasional, N. (2019). *Kinetika dan Pengendalian Reaktor Nuklir* (Issue July).

Wang, Y., Shen, H., & Duan, D. (2017). Nuclear Reactors: Generation to Generation US Department of States. In *IEEE Transactions on Cybernetics* (Vol. 47, Issue 10).