

**ANALISIS NEUTRONIK BAHAN BAKAR *MIXED OXIDE ((U-Pu)O₂)*
PADA DESAIN TERAS *GAS COOLED FAST REACTOR (GFR)***
MENGGUNAKAN OPENMC

SKRIPSI

*Dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Fisika*



Oleh:

MUHAMMAD ALDI KURNIAWAN

08021281823087

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWAJAYA

2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : MUHAMMAD ALDI KURNIAWAN

NIM : 08021281823087

Judul TA : ANALISIS NEUTRONIK BAHAN BAKAR MIXED OXIDE ((U-Pu) O₂) PADA DESAIN TERAS GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) MENGGUNAKAN 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



Muhammad Aldi Kurniawan
NIM.08021281823087

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS NEUTRONIK BAHAN BAKAR MIXED OXIDE ((U-Pu)O₂)
PADA DESAIN TERAS GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR)
MENGGUNAKAN OPENMC

SKRIPSI

*Dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Fisika*

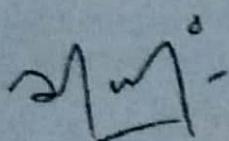
Oleh:

MUHAMMAD ALDI KURNIAWAN

08021281823087

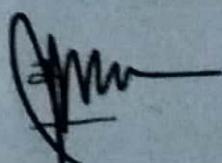
Indralaya, 20 Juli 2022

Pembimbing 2



Dr. Helen Raflis, M.Eng.
NIP.19790804200511002

Pembimbing 1



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 19721125200122001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



**Ku Persembahkan tulisan ini spesial untuk almarhum
ayahandaku tercinta.**

Ku tuntaskan studiku sesuai janjiku padamu pada
percakapan yang tak kusangka menjadi kali terakhir.
Sejujurnya tanpa mu terasa pincang hidupku menempuh
hari-hari di akhir masa studi ini, barjalan dalam arah dan
pijakan dijalan yang penuh tanda tanya.

Terimakasih telah menjadi ayah terbaik untukku.
Terimakasih atas kalimat-kalimat nasihat sedarhana yang
akhir-akhir ini bak kata mutiara bagiku.

Don't just count what we've lost
but
think about what we still have
-Jinbei-

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karuniaNya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Analisis Neutronik Bahan Bakar Mixed Oxide ((U-Pu)O₂) Pada Desain Teras Gas-cooled Fast Reactor (GFR) Menggunakan OpenMC”** ini dengan baik dan lancar. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Rasulullah SAW yang mengantarkan manusia dari zaman kegelapan ke zaman yang terang benderang ini. Skripsi ini diajukan dengan tujuan untuk melengkapi persyaratan kurikulum guna memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya. Selain itu, diharapkan skripsi ini dapat bermanfaat khususnya dalam pengembangan komputasi nuklir dan PLTN pada umumnya di Indonesia.

Selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi, penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak yang selalu memberikan dukungan pada penulis hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga penulis, Ayahanda (alm), Ibunda, dan Adik yang senantiasa memberikan dukungan penuh kepada penulis.
2. Bapak Prof. Hermansyah, PhD., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Helen Raflis, M.Eng., selaku dosen Pembimbing II, yang telah memberikan waktu dan ilmu yang amat berharga dalam membantu dan mengarahkan penulis selama penelitian dan penyusunan skripsi.
5. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si., dan Ibu Dra. Jorena, M.Si., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan skripsi ini.
6. Bapak Drs. Hadir Kaban, M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing Penulis sejak awal perkuliahan.
7. Seluruh dosen dan staf administrasi Jurusan Fisika yang telah memberikan

dukungan da fasilitas selama Penulis berada di bangku perkuliahan.

8. Seluruh user OpenMC discourse yang telah menjawab pertanyaan yang penulis ajukan terkait eksekusi OpenMC, terkhusus Dr. Paul Romano beserta Tim yang telah mengambangkan OpenMC.
9. Tim penunggu server, Anas dan Ghina dan teman seperjuangan lainnya di bidang komputasi nulkir, Laila dan Ade yang membuat perjuangan penuh rintangan dalam kesendirian menjadi penuh kebersamaan dan kedamaian.
10. Rekan-rekan Asisten Lab Fiskom, penghuni Lab Eksperimen Fisika, Griya Tim (Hadi, Rama, Izam, Wansya, Nopa, dan Yogi), Amfibi, Eliners, Himafia, Anggrians, IMSAK Sumsel, serta seluruh pihak terkait yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Semoga kebaikan yang telah diberikan kepada Penulis dalam menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi ini mendapatkan balasan yang baik pula dari Allah SWT. Amin.

Indralaya , 20 Juli 2022
Penulis,

Muhammad Aldi Kurniawan
NIM. 08021281823087

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERSEMBAHAN	iv
LEMBAR MOTTO.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GRAFIK	xiii
DAFTAR ISTILAH	xiv
DAFTAR SIMBOL	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	19
1.1. Latar Belakang	19
1.2. Rumusan Masalah	21
1.3. Tujuan Penelitian	22
1.4. Batasan Masalah.....	22
1.5. Manfaat Penelitian	22
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	24
2.1. Reaktor Nuklir	24
2.2. Gas-Cooled Fast Reactor.....	26
2.3. Mixed Oxide.....	28

2.4. Tampang Lintang Nuklir	30
2.5. Analisis Neutronik.....	31
2.5.1. Faktor Multiplikasi.....	31
2.5.2. Komposisi Material Fisil dan Fertil	32
2.5.3. Laju Reaksi Fisi dan Fluks Neutron.....	32
2.5.4. Rasio Konversi.....	34
2.6. Metode Monte Carlo	35
2.7. OpenMC	37
BAB III METODE PENELITIAN	40
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	40
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	40
3.3. Tahapan Penelitian.....	40
3.4. Diagram Alir Penelitian	41
3.5. Spesifikasi Desain Sel Bahan Bakar Nuklir.....	42
3.6. Parameter Survey	45
3.7. Parameter Kinetik	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1. Profil Bahan Bakar MOX	47
4.2. Hasil Desain Geometri Teras Reaktor	48
4.3. Analisis Perhitungan Hasil Deplesi Teras Reaktor	50
4.4. Analisis Tingkat Kekritisian dan <i>Conversion Ratio</i>	51
4.5. Analisis Perubahan Komposisi Material Fisil dan Fertil	53
4.6. Analisis Distribusi Fluks Neutron dan Distribusi Laju Reaksi Fisi	55
2.7. Perhitungan Parameter Kinetika Reaktor.....	58
2.7.1. Koefisien Reaktivitas Doppler ($\Delta\rho_{Doppler}$)	58
2.7.2. Nilai Reaktivitas Kekosongan Pendingin / <i>Coolant Void Reactivity Worth</i> ($\Delta\rho_{cv}$).....	59

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN.....	66
A. Data k_{inf} Sel Bahan Bakar MOX	67
B. Data Hasil Deplesi Bahan Bakar di Teras GFR	67
C. Hasil Perhitungan Parameter Kinetika.....	70
D. Lampiran Kode OpenMC	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Timeline untuk GFR.....	26
Gambar 2.3. Reaksi yang terjadi pada bahan bakar UO ₂	28
Gambar 2.5. Pengaruh waktu terhadap faktor multiplikasi.....	31
Gambar 2.6. Reaksi fisi berantai	33
Gambar 2.7. Perbandingan kompleksitas masalah metode Monte Carlo.....	35
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	41
Gambar 3.2. Diagram alir perhitungan desain reaktor dengan OpenMC	42
Gambar 3.3. Contoh model pin bahan bakar dan perangkat bahan bakar.....	45
Gambar 3.4. Contoh model teras 2D.....	45
Gambar 4.1. Desain geometri pin bahan bakar dan perangkat bahan bakar	48
Gambar 4.2. Desain geometri teras	49
Gambar 4.3. Distribusi fluks neutron BOC dan EOC.....	57
Gambar 4.4. Distribusi laju reaksi fisi BOC dan EOC	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Penelitian - penelitian terkait GFR.....	27
Tabel 3.1. Spesifikasi Personal Computer yang digunakan.....	40
Table 3.2. Komposisi Material Penyusun Teras	43
Tabel 3.3. Tabel Variasi Fraksi Volume Sel bahan bakar.....	43
Tabel 3.4. Karakteristik dasar sel bahan bakar	44
Tabel 3.5. Spesifikasi desain teras reaktor.....	44
Tabel 3.6. Vektor Komposisi Plutonium.....	44
Tabel 4.1. Informasi waktu per step untuk 1 tahun deplesi	50
Tabel 4.2. Nilai fluks maksimum-minimum dan rata-rata.....	58
Tabel 4.3. Nilai laju reaksi fisi maksimum dan rata-rata	58
Tabel 4.4. Data k_{inf} Sel Bahan Bakar MOX.....	68
Tabel 4.5. Hasil perhitungan nilai k_{eff} dan CR per tahun	68
Tabel 4.6. Evolusi komposisi U235	68
Tabel 4.7. Evolusi komposisi Pu239.....	69
Tabel 4.8. Evolusi komposisi Pu241.....	69
Tabel 4.9. Evolusi komposisi U238	69
Tabel 4.10. Evolusi komposisi Pu240.....	70
Tabel 4.11. Hasil perhitungan distribusi fluks	70
Tabel 4.12. Hasil perhitungan distribusi laju reaksi fisi.....	71
Tabel 4.13. Hasil perhitungan Koefisien Reaktivitas Doppler	71
Tabel 4.14. Hasil Perhitungan Nilai Reaktivitas Kekosongan Pendingin.....	71

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1. Profil bahan bakar MOX	47
Grafik 4.2. Perubahan nilai k_{eff}	51
Grafik 4.3. Perubahan nilai rasio konversi.....	52
Grafik 4.4. Perubahan komposisi isotop U235 di MOX.....	53
Grafik 4.5. Perubahan komposisi isotop U238 di MOX.....	53
Grafik 4.6. Perubahan komposisi isotop Pu239 di MOX	54
Grafik 4.7. Perubahan komposisi isotop U238 dan Pu239 di <i>blanket</i>	54

DAFTAR ISTILAH

<i>Breeding</i>	: Kondisi dimana nilai rasio konversi berada diatas satu dan menandakan terjadi produksi fisil dalam jumlah yang lebih besar daripada yang dikonsumsi.
<i>Burn-up</i>	: Energi yang dilepaskan selama pembakaran dalam teras reaktor (Megawatt day per ton)
Conversion Ratio	: Rasio Konversi (CR), yaitu rasio fisil yang diproduksi per fisil yang dikonsumsi.
<i>Enrichment</i>	: Pengayaan atau penambahan konsentrasi suatu isotop tertentu dalam bahan bakar nuklir
<i>Functional Expansion</i>	: filter khusus dari OpenMC yang terdiri dari polinominal Legendre dan Zernike.
<i>Tally</i>	
k_{eff}	: Rasio jumlah neutron yang lahir pada suatu generasi terhadap generasi sebelumnya.
<i>Mixed Oxide</i>	: bahan bakar nuklir campuran antara uranium dengan transuranium atau <i>depleted uranium</i> .

DAFTAR SIMBOL

σ	: tampang lintang mikroskopik
Σ	: tampang lintang makroskopik
N	: jumlah nuklida per satuan volume
k	: faktor multiplikasi
k_{inf}	: faktor multiplikasi tak hingga
k_{eff}	: faktor multiplikasi efektif
N_{AV}	: bilangan Avogadro ($N_{AV} = 6.022 \times 10^{23}$ atom atau molekul per gram-mole)
M	: berat atom atau molekul
n	: jumlah atom atau molekul
ϕ	: fluks neutron
ξ	: bilangan pseudorandom
dA	: elemen luas
dE	: elemen energi
dx	: elemen jarak
dr	: elemen volume
dQ	: elemen arah
p	: probabilitas tangkapan resonansi
t	: variable waktu
v	: kecepatan neutron
r	: posisi neutron
Ω	: arah gerak neutron
ε	: faktor fisi cepat
η	: faktor reproduksi neutron
$\Delta\rho_{Doppler}$: koefisien reaktivitas Doppler
$\Delta\rho_{cv}$: nilai reaktivitas kekosongan pendingin
ρ	: reaktivitas

DAFTAR SINGKATAN

GFR	: <i>Gas-cooled Fast Reactor</i>
Gen-IV	: Generasi IV
PLTN	: Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
OpenMC	: <i>Open-source Monte Carlo</i>
MOX	: <i>Mixed Oxide</i>
(U,Pu)O ₂	: Uranium-Plutonium-Oksida
ENDF/B	: <i>Evaluated Nuclear Data File-Based</i>
MWth	: <i>MegaWatt thermal</i>
MWe	: <i>MegaWatt 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>
CR	: <i>Control Rod</i>

**ANALISIS NEUTRONIK BAHAN BAKAR MIXED OXIDE ((U-Pu)O₂)
PADA DESAIN TERAS GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR)
MENGGUNAKAN OPENMC**

Oleh:

Muhammad Aldi Kurniawan

NIM. 08021281823087

ABSTRAK

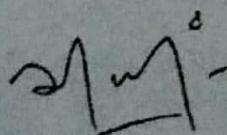
Penelitian ini mendiskusikan tentang penggunaan bahan bakar MOX pada teras *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) menggunakan kode OpenMC. GFR merupakan salah satu dari reaktor GEN-IV yang beroperasi pada temperatur tinggi dan neutron cepat. MOX merupakan bahan bakar nuklir yang terdiri dari uranium ($U \leq 96\%$) dan plutonium ($Pu \geq 4\%$) dimana plutonium dapat diperoleh dari hasil sisa pembakaran dari reaktor termal seperti PWR. Komposisi plutonium dalam MOX yang digunakan pada penelitian ini yaitu 11% ditambah dengan uranium alam sebagai bahan selimut untuk memperpanjang masa operasi. OpenMC merupakan *open-source* Monte Carlo partikel, dimana digunakan Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B VIII.0) sebagai pustaka data nuklir. Parameter fisik yang menjadi hasil penelitian ini diantaranya adalah nilai faktor multiplikasi efektif yang mampu mencapai kondisi kritis hingga tahun kesepuluh dengan titik tertinggi pada tahun kelima yaitu 1,02743 dan terasberhasil mencapai kondisi *breeding* dengan nilai rasio konversi lebih dari satu ($CR > 1$) hingga tahun kesepuluh. Perubahan komposisi material dari fertil menjadi fisil dalam hal ini U238 yang bertransmutasi menjadi Pu239 terus berlanjut hingga tahun kesepuluh berdampak pada umur operasi yang dapat menjadi makin panjang. Parameter survey lainnya yang telah berhasil diperoleh hasilnya yaitu distribusi fluks dan distribusi laju reaksi fisi. Selain itu juga dilakukan perhitungan parameter kinetika reaktor yaitu koefisien reaktivitas Doppler dan nilai reaktivitas kekosongan pendingin yang masing-masing memberikan hasil yang baik.

Kata Kunci: Neutronik, MOX, GFR, OpenMC.

Indralaya, 20 Juli 2022

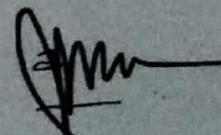
Menyetujui,

Pembimbing 2



Dr. Helen Raflis, M.Eng.
NIP. 19790804200511002

Pembimbing 1



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 MIXED OXIDE (U,Pu)O₂ FUEL IN GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) USING OPENMC

By:

Muhammad Aldi Kurniawan

08021281823087

ABSTRACT

This research discusses the use of MOX fuel in the Gas-cooled Fast Reactor (GFR) core using OpenMC code. GFR is one of GEN-IV reactors that operate at high temperatures and fast neutrons. MOX is a nuclear fuel consisting of uranium ($U \leq 96\%$) and plutonium ($Pu \geq 4\%$) where plutonium can be obtained from combustion products from thermal reactors such as PWR. The plutonium material in MOX used in this study was 11% and natural uranium as a blanket material to extend the operating life. OpenMC is an open-source Monte Carlo particle, which uses the Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B VIII.0) as the nuclear data library. The physical parameters that became the result of this study included the value of the effective multiplication factor, which was able to reach a critical condition until the tenth year with the highest point in the fifth year, namely 1,02743, and the core was successful in achieving breeding conditions with a conversion ratio value of more than one ($CR > 1$) until the tenth year. Changes in the composition of the material from fertile to fissile, in this case, U238, which transmuted to Pu239, continued until the tenth year, which resulted in a long operating life. Other parameter surveys that have been successfully obtained are flux distribution and fission reaction rate distribution. In addition, the calculation of the reactor kinetic parameters, namely the Doppler reactivity coefficient and the coolant void reactivity value, each gave good results.

Keywords: Neutronic, MOX, GFR, OpenMC.

Indralaya, 20 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing 2

Dr. Helen Rafis, M.Eng.
NIP. 19790804200511002

Pembimbing 1

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

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika

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

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi memegang peranan yang sangat penting dalam segala aspek kehidupan di muka bumi. Namun, jumlah energi yang dihasilkan tidaklah sebanding dengan populasi yang terus bertambah. Kebutuhan energi terus mengalami peningkatan di setiap tahunnya, sedangkan sumber energi yang tersedia belum cukup untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Batubara dan gas alam yang menjadi sumber energi terbesar dunia pada saat ini sudah saatnya ditinggalkan, selain alasan lingkungan batubara dan gas alam termasuk energi yang tidak dapat diperbaharui. Oleh karena itu diperlukan sumber energi alternatif yang mampu diperbaharui sumber dayanya dan ramah lingkungan.

Pembangkit tenaga nuklir hadir sebagai salah satu jawaban dari berbagai jenis sumber energi alternatif. Pembangkit tenaga nuklir bukanlah hal baru di dunia energi, telah banyak negara terutama negara maju yang menggunakan sumber energi ini. Reaktor nuklir secara total menghasilkan 2553 TWh pada tahun 2020, mengalami penurunan dari tahun 2019 yang mencapai 2657 ThW. Penurunan konsumsi listrik yang diakibatkan oleh datangnya pandemi COVID-19 sehingga pembangkit listrik meresponnya dengan mengurangi produksi. Terlepas dari penurunan angka produksi tersebut, hingga saat ini energi nuklir telah mengalami perkembangan yang pesat dalam upaya membantu pemenuhan kebutuhan energi global. Pada akhir tahun 2020 kapasitas total pembangkit listrik tenaga nuklir mencapai 392 GWe dengan jumlah reaktor yang beroperasi sebanyak 441. Hasil ini merupakan rekor tertinggi yang pernah dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga nuklir dalam satu tahun dari (World Nuclear Association, 2021).

Hingga saat ini Indonesia merupakan negara yang sumber energinya masih bergantung pada minyak bumi dan gas alam. Minyak bumi dan gas alam merupakan sumber energi yang tak dapat diperbaharui bahkan memiliki dampak negatif yang mampu menghasilkan emisi karbon. Menurut data Kementerian ESDM Indonesia, cadangan minyak bumi dan gas alam pada tahun 2017 mengalami penurunan sejak tahun 2011. Oleh karena itu, pemerintah Indonesia mengimbau agar meningkatkan eksplorasi cadangan energi baru dan terbarukan agar dapat membantu dalam

memenuhi kebutuhan energi nasional. Dalam hal penyediaan energi listrik nasional, maka pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) perlu menjadi pertimbangan untuk menjadi salah satu sumber energi alternatif. Berdasarkan Perpres No 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional dibutuhkan setidaknya empat PLTN di indonesia pada 2025 mendatang. Tujuannya, meminimalkan penggunaan gas, minyak bumi, dan batu bara.

Bahan bakar nuklir adalah radioisotop fisil seperti U233, U235, dan Pu239. U233 diperoleh dari Th232 yang bertransmutasi ketika menyerap neutron. Berbeda dengan U233, kandungan U235 yang terdapat di alam hanya 0,712%. Kandungan U235 tersebut sangat sedikit sehingga diperlukan proses pengayaan (*enrichment*). Sedangkan Pu239 dihasilkan dari U238 yang bersifat fertil dengan kandungan di alam sebanyak 99,282% (Agung, 2017). Bahan fisil U233, U235, dan Pu239 serta bahan fertil Th232 dan U238 telah banyak dikembangkan pada beberapa tipe reaktor nuklir.

MOX atau *Mixed Oxide* merupakan bahan bakar oksida campuran yang bertujuan untuk memanfaatkan bahan bakar sisa berupa isotop Pu239 yang diperoleh reaktor termal seperti PWR. Pu239 merupakan isotop fisil yang secara instan mampu melakukan reaksi fisi apabila bertemu neutron, akan sangat disayangkan jika tidak dimanfaatkan. Oleh karena itu hadirlah MOX sebagai salah satu metode *reprocessing* dari bahan nuklir bekas reaktor daya nuklir. Selain itu penggunaan MOX juga untuk mengkompensasi penerapan *enrichment* isotop fisil U235 yang secara ekonomis cukup mahal. Komposisi MOX pada penelitian ini dilakukan dengan melakukan varisi persentase Pu pada desain sel bahan bakar.

Salah satu tipe reaktor yang tengah dikembangkan hingga saat ini yaitu *Gas-Cooled Fast Reactor* dalam bahasa Indonesia disebut Reaktor Cepat Berpendingin Gas. Reaktor Gen-IV ini diproyeksikan akan mampu beroperasi pada tahun 2025 (GIF,2014). GFR merupakan reaktor yang menggunakan neutron cepat dalam proses fisinya. Telah banyak penelitian yang dilakukan tentang raktor GFR, baik dari segi neutronik maupun termal hidrolik . Namun, penulis akan menitik beratkan pada analisis peforma dan potensi bahan bakar MOX secara neutronik yang digunakan pada GFR dalam skala teras atau *core*.

Dalam pembangunan reaktor nuklir jenis apapun diperlukan proses simulasi terlebih dahulu guna memperoleh hasil yang optimum serta sebagai acuan persoalan keselamatan nuklir. Agar diperoleh hasil yang optimum maka diperlukan suatu analisis tentang perilaku neutronik pada bahan bakar maupun teras nuklir secara keseluruhan. Salah satu *tools* penunjang dalam melakukan simulasi nuklir yaitu OpenMC. OpenMC merupakan salah satu dari beberapa *tools* simulasi nuklir yang menggunakan metode Monte Carlo dalam perhitungannya. OpenMC bisa diakses secara bebas dan gratis menjadi salah satu alasan penulis menggunakan tools ini. Selain itu, OpenMC juga unggul dalam menampilkan visual baik berupa gambar maupun grafik. Namun, kekurangan OpenMC yaitu jika jumlah partikel diatur dalam jumlah yang besar maka membutuhkan waktu yang cukup lama dalam proses komputasinya . Oleh karena itu, diperlukan komputer yang memiliki spesifikasi tinggi agar waktu komputasi menjadi lebih cepat.

Beberapa parameter analisis neutronik yang akan dilakukan pada penelitian ini untuk menggambarkan peforma dari desain teras GFR diantaranya yaitu faktor multiplikasi dan tingkat kekritisan, rasio konversi, komposisi material fisil dan fertil, distribusi laju raaksi fisi, dan distribusi fluks. Berdasarkan parameter survey serta uraian latar belakang, maka penulis akan melakukan penelitian dan menyusun tugas akhir ini dengan judul **“Analisis Neutronik Bahan Bakar Mixed Oxide ((U-Pu)O₂) Pada Desain Teras Gas- Cooled Fast Reaktor (GFR) Menggunakan OpenMC”**.

1.2. Rumusan Masalah

Dalam merancang desain teras reaktor, bahan bakar merupakan poin utama yang harus diperhitungkan. GFR adalah tipe reaktor cepat yang juga tengah gencar dikembangkan saat ini merupakan tipe yang sangat relevan apabila dilakukan penelitian terkait peforma penggunaan MOX sebagai bahan bakarnya. Penyesuaian antara komposisi material bahan bakar dengan geometri teras diperlukan untuk menentukan parameter kritis dan keamanan reaktor. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai perancangan desain neutronik teras GFR dengan bahan bakar MOX untuk mengetahui peforma dari desain tersebut.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian analisis neutronik pada desain teras reaktor cepat berpendingin gas dengan menggunakan bahan bakar MOX yaitu:

1. Mendesain teras GFR dengan geometri sel bahan bakar yang berbentuk pin heksagonal dengan jenis bahan bakar MOX ($\text{U-Pu})\text{O}_2$).
2. Mengetahui hasil deplesi melalui simulasi deplesi bahan bakar selama 10 tahun dari desain teras GFR menggunakan OpenMC berdasarkan parameter survey yang telah ditentukan, yaitu nilai faktor multiplikasi dan tingkat kekritisan, rasio konversi, perubahan komposisi material fisil dan fertil, distribusi fluks, dan distribusi laju reaksi fisi.
3. Memperoleh nilai parameter kinetika reaktor, yaitu koefisien reaktivitas Doppler dan *coolant void reactivity worth*.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian analisis neutronik pada desain teras reaktor cepat berpendingin gas dengan menggunakan bahan bakar MOX diantaranya adalah desain teras reaktor dibentuk dari sel bahan bakar MOX atau $(\text{U},\text{Pu})\text{O}_2$ dan uranium alam sebagai bahan bakar selimut (*blanket*) berbentuk pin heksagonal dengan melakukan variasi persentase Pu dalam MOX dari 6% dan 13% untuk menentukan komposisi terbaik yang akan digunakan dalam pehitungan deplesi. Material kelongsong, pendingin, dan reflector masing-masing adalah Stainless Steel SS316, Helium (He), Berilium Oksida (BeO). Desain teras reaktor yang akan dibentuk memiliki tinggi dan diameter masing-masing adalah 210 cm dan 300 cm dengan total 127 perangkat bahan bakar MOX yang terbagi dalam 7 *ring*. Simulasi dilakukan dengan melalui proses *burnup* selama 10 tahun. Performa desain teras GFR dapat dilihat dari besar nilai faktor multiplikasi efektif dan tingkat kekritisan, distribusi laju reaksi fisi, distribusi fluks, komposisi material fisil dan fertil, dan rasio konversi.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian analisis neutronik pada desain teras reaktor cepat berpendingin gas dengan menggunakan bahan bakar MOX yaitu :

1. Mengetahui potensi bahan bakar nuklir MOX pada reaktor cepat berpendingin

gas dan performa sel bahan bakar nuklir tipe MOX menggunakan OpenMC.

2. Sebagai referensi penelitian selanjutnya khususnya untuk perancangan teras reaktor heterogen berbahan bakar MOX menggunakan OpenMC dengan fitur *burnup*.
3. Hasil analisis penelitian dapat menjadi salah satu acuan perancangan teras reaktor GFR dengan bahan bakar MOX yang optimum.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardojo, Lasman, N., Ruslan, Parmanto, E. M., dan Effendi, E., 2010. *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta : Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Agung A., 2017. *Diktat Kuliah Analisis Reaktor Nuklir*. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada.
- Ariani, M., Su'ud, Z., Monado, F., Waris, A., Arif, I., Ferhat, A. dan Sekimoto, H., 2013. *Optimization of small long life gas cooled fast reactors with natural Uranium as fuel cycle input*. Applied Mechanics and Materials 260:307.
- GIF. 2014. *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*. France: OECD Nuclear Energy Agency.
- Bielajew, A. F. 2001. *Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport*, The University of Michigan. Michigan: The University of Michigan.
- Duderstadt, J. J. dan Hamilton, L. J., 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley & Sons Incorporate.
- ESDM (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral), 2017. *Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2016*. Jakarta : Direktorat Jendral Ketenagalistrikan.
- IAEA. 2005. *Management of high enriched uranium for peaceful purposes: Status and trends*, IAEA-Tecdoc-1452. Vienna: IAEA Publishing.
- Ilham, M., Raflis, H. dan Su'ud, Z., 2020. *Full Core Optimization of Small Modular Gas- Cooled Fast Reactors Using OpenMC Program Code*. Journal of Physics: Conference Series ,1493(1): 6.
- Ilham, M., Raflis, H. dan Suud, Z., 2021. *Fuel Assembly Design Study for Modular Gas Cooled Fast Reactor using Monte Carlo Parallelization Method*. Journal of Physics: Conference Series,1772(1):2.
- Ilham, M. dan Su'ud, Z., 2017. *Design Study of Modular Nuclear Power Plant with Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors Utilizing MOX Fuel*. Journal of Physics: Conference Series, 799(1): 2.
- Karim, J.A., Nishiyama, J. dan Obara, T., 2017. *Effects of cooling interval time in melt and refining process for CANDLE burning*. Annals of Nuclear Energy, 105 : 147.

- Krisna, D.N. dan Su'ud, Z., 2017. *Study Neutronic of Small Pb-Bi Cooled Non-Refuelling Nuclear Power Plant Reactor (SPINNOR) with Hexagonal Geometry Calculation*. Journal of Physics: Conference Series, 799(1): 2.
- Kuntoro, I. 2018. *Keselamatan Reaktor Nuklir*. Jakarta: BATAN.
- Lima-Reinaldo, Y., François, J.L. dan Martín-del-Campo, C., 2019. *Analysis of the use of thorium in the GFR2400 gas-cooled fast reactor*. Nuclear Engineering and Design, 343:11-21.
- McConn, R.J., Gesh, C.J., Pagh, R.T., Rucker, R.A. dan Williams III, R., 2011. *Compendium of material composition data for radiation transport modeling (No. PNNL-15870 Rev. 1)*. Richland, WA (United States): Pacific Northwest National Lab (PNNL).
- Monado, F., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., Ariani, M. dan Sekimoto, H., 2013. *Application of Modified CANDLE Burnup to Very Small Long Life Gas-cooled Fast Reactor*. Advanced Materials Research, 772:501.
- Novalienda, S., Ramadhan, A. dan Su'ud, Z., 2020. *Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride*. Jurnal Penelitian Sains, 22(2):51-54.
- Raflis, H., Muhammad, I., Su'ud, Z., Waris, A. dan Irwanto, D., 2020. *Reflector materials selection for core design of modular gas-cooled fast reactor using OpenMC code*. International Journal of Energy Research, 45(8):2-5.
- Raflis, H., Ilham, M., Su'ud, Z., Waris, A. dan Irwanto, D., 2021. *Core Configuration Analysis for Modular Gas-cooled Fast Reactor (GFR) using OpenMC*. Journal of Physics: Conference Series, 2072(1):2.
- Raflis, H., Su'ud, Z., Waris, A., Irwanto, D. dan Takaki, N., 2021. *Core depletion analysis of long-life CANDLE gas-cooled fast reactor using OpenMC code*. AIP Conference Proceedings, 2374(1):3.
- Riska, R., Fitriyani, D. dan Irka, F.H., 2016. *Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂)*. Jurnal Fisika Unand, 5(1):29-30.
- Romano, P.K., Horelik, N.E., Herman, B.R., Nelson, A.G., Forget, B. dan Smith, K., 2015. *OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development*. Annals of Nuclear Energy, 82: 90-91, 93-95.
- Romano, P.K., 2022. The OpenMC Monte Carlo Code – OpenMC Documentation.
- Romano, P.K., 2022. The OpenMC Monte Carlo Code – Realese Notes.

- Rouf dan Su'ud, Z., 2016. *Conceptual Core Analysis Of Long Life PWR Utilizing Thorium- Uranium Fuel Cycle*. Journal of Physics: Conference Series, 739(1):2-3.
- Stacey, W. M., 2007. *Nuclear Reactor Physics*. New York: John Wiley & Sons.
- Widiawati, N., Su'ud, Z., Irwanto, D. dan Andris, D., 2021. *Neutronic Study of Fast Reactor with Modified CANDLE Burnup Scheme Using natural Pb, Pb (nat)-Bi Eutectic, 208Pb, and 208Pb-Bi Eutectic as Coolant*. Journal of Physics: Conference Series, 1949(1): 3.
- World Nuclear Association.2021. *World Nuclear Performance Report 2021*. London: World Nuclear Association.
- World Nuclear Association.*MOX*. Diakses dari <https://world-nuclear.org> tanggal 7 Desember 2021.