

**DESAIN NEUTRONIK TERAS REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN S-CO₂ BERBASIS
BAHAN BAKAR URANIUM METAL BERDAYA 500 MWt DENGAN STRATEGI
*BURN-UP MODIFIED CANDLE***

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar

Sarjana Sains Bidang Studi Fisika



Oleh :

HIQMAH DINI FARIQOH

08021181823094

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

INDRALAYA

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**DESAIN NEUTRONIK TERAS REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN S-CO₂ BERBASIS
BAHAN BAKAR URANIUM METAL BERDAYA 500 MWt DENGAN STRATEGI
BURN-UP MODIFIED CANDLE**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

Disusun Oleh:

HIQMAH DINI FARIQOH
08021181823094

Indralaya, Juli 2022
Menyetujui,

Pembimbing II



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

Pembimbing I



Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.
NIP.197002231995121002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



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

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : HIQMAH DINI FARIQOH

NIM : 08021181823094

Judul TA : DESAIN NEUTRONIK TERAS REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN S-CO₂
BERBASIS BAHAN BAKAR URANIUM METAL BERDAYA 500 MWt
DENGAN STRATEGI BURN-UP *MODIFIED CANDLE*

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, 26 Juli 2022

Yang menyatakan



Hiqmah Dini Fariqoh
NIM. 08021181823094

KATA PERSEMBAHAN

“Jangan pernah menyerah ketika Anda masih mampu berusaha lagi. Tidak ada kata berakhir sampai Anda berhenti mencoba”

-Brian Dyson-

“Barang siapa yang menempuh suatu perjalanan dalam rangka untuk menuntut ilmu maka Allah akan mudahkan baginya jalan menuju surga”

-H.R Muslim-

With love, skripsi ini ku persembahkan kepada :

❖ Kedua Orang Tuaku

(Bapak Nurharis & Ibu Marwiah)

❖ Adikku

(Muhammad Irfan)

❖ Dosen Pembimbing

(Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si dan Menik Ariani, S.Si., M.Si)

❖ Almamaterku

(Fisika FMIPA Universitas Sriwijaya)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan Judul “ **Desain Neutronik Teras Reaktor Cepat Berpendingin S-CO₂ Berbasis Bahan Bakar Uranium Metal Berdaya 500 Mwt Dengan Strategi *Burn-up Modified* CANDLE**”. Penyusunan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Strata 1 Sarjana Fisika, di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyusunan Skripsi ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna karena keterbatasan wawasan serta pengetahuan yang dimiliki oleh penulis. Skripsi ini tidaklah mungkin dapat diselesaikan tanpa adanya bimbingan, saran, motivasi, serta bantuan yang diberikan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, atas karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.
2. Kedua orang tua bapak Nurharis dan ibu Marwiah serta adik Muhammad Irfan yang melatarbelakangi perjuanganku, selalu memberikan do'a dan dukungan sepenuhnya. Terima kasih atas dukungan materil dan non materil. Semoga kalian bahagia.
3. Bapak Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Frinsyah Virgo, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si dan ibu Menik Ariani, S.Si., M.Si. selaku pembimbing yang senantiasa sabar meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, bantuan, serta motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Ibu Dr. Erry Koriyanti, M.T dan bapak Akmal Johan, S.Si., M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun serta ilmunya kepada penulis sehingga skripsi ini bisa lebih baik.

7. Bapak Dr. Azhar Kholiq Affandi, M.S. selaku dosen pembimbing akademik.
8. Bapak dan ibu dosen serta staf administrasi Jurusan Fisika yang telah membantu dan memberikan ilmu yang sangat berharga kepada penulis selama menempuh pendidikan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
9. Sahabat seperjuangan saat kuliah “Mandiri Syariah Squad” (Felin, Via, Tiara, Alzirah, Maghfira) yang selalu ada untuk penulis dalam suka maupun duka. Terima kasih untuk segala kebaikannya.
10. Untuk partner Via Vionita yang selalu ada untuk penulis, selalu memberikan semangat, do’a dan dukungannya, rekan bertukar pikiran. Terima kasih atas semua kebaikannya.
11. Teman seperjuangan tugas akhir Via, Laila, Ade, Canti dan Ghina yang telah memberikan semangat, dukungan, kritik dan saran dalam pengerjaan skripsi ini. Terima kasih atas bantuannya.
12. Teman-Teman Fisika angkatan 2018 (AMF181), Eliners, serta para anggota HIMAFIA. Terima kasih atas bantuan, do’a, dan dukungannya.
13. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Semoga kebaikan dan dukungan yang telah diberikan mendapat balasan pahala dari Allah SWT. Penulis berharap semoga skripsi yang disusun dapat bermanfaat sekaligus menambah ilmu pengetahuan bagi penulis maupun pembaca.

Indralaya, Juli 2022
Penulis

Hiqmah Dini Fariqoh
NIM. 08021181823094

**DESAIN NEUTRONIK TERAS REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN S-CO₂ BERBASIS
BAHAN BAKAR URANIUM METAL BERDAYA 500 MWt DENGAN STRATEGI BURN-UP
MODIFIED CANDLE**

Oleh :

Hiqmah Dini Fariqoh

NIM. 08021181823094

ABSTRAK


Penelitian ini membahas mengenai desain neutronik teras reaktor cepat tipe GFR dengan daya termal 500 Mwt berbasis bahan bakar uranium metal (U-10%wtZr) dengan bahan pendingin berupa S-CO₂, dan dengan menerapkan strategi *burnup Modified CANDLE* dalam penyusunan bahan bakar saat pembakaran berlangsung. Perhitungan neutronik sel bahan bakar dan teras reaktor dilakukan dengan menggunakan modul PIJ dan CITATION pada paket program SRAC dengan pustaka JENDL 4.0. Penentuan kriteria desain dilakukan dengan mengoptimasi ukuran teras reaktor untuk mendapatkan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) yang konvergen. Ukuran yang konvergen didapat pada jari-jari teras aktif 116 cm dan tinggi teras aktif 200 cm, dengan perbandingan fraksi volume pin pitch yang digunakan sebesar 60% *fuel*, 10% *cladding* 30% *coolant* dan diameter pin pitch 1,4 cm. Hal ini ditandai dengan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) mencapai nilai kritis ($k_{eff} \geq 1$) *excess reactivity* $\leq 10\%$. Desain ini dapat beroperasi selama 100 tahun dengan periode *refueling* tiap 10 tahun. Selanjutnya analisis terhadap penambahan minor aktinida berupa Am-241, setelah dilakukan penambahan Am-241 pada bahan bakar nilai k_{eff} tetap signifikan meningkat dan untuk nilai k_{eff} dengan penambahan Am-241 sebesar 1% nilainya lebih rendah dibandingkan nilai k_{eff} sebelum dilakukannya penambahan Am-241. Sedangkan untuk penambahan Am-241 sebesar 2% sampai 7% menunjukkan nilai k_{eff} lebih tinggi dibandingkan nilai k_{eff} sebelum penambahan Am-241. Penambahan minor aktinida ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah nuklir.

Kata kunci : GFR, Uranium metal, S-CO₂, Modified CANDLE, SRAC, Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), Minor aktinida, Am-241.

Indralaya, 26 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing II



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

NIP.197211252000122001

Pembimbing I

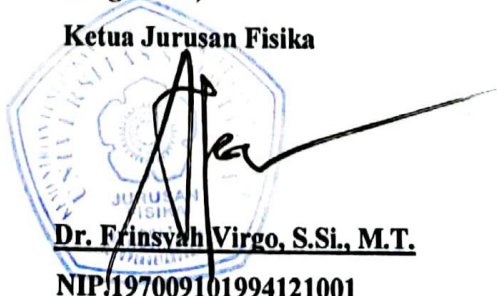


Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.

NIP.197002231995121002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



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

NIP.197009101994121001

NEUTRONIC DESIGN OF FAST REACTOR COOLED S-CO₂ BASED ON METALLIC URANIUM FUEL 500 MWth WITH STRATEGY BURN-UP MODIFIED CANDLE

By :

Hiqmah Dini Fariqoh

NIM. 08021181823094

ABSTRACT

This research discusses the neutronic design of a fast reactor core of the GFR type with a thermal power of 500 Mwt based on metallic uranium (U=10% wtZr) fuel with a coolant in the form of S-CO₂, and by applying the strategy burnup Modified CANDLE in the preparation of fuel during combustion. Neutronic calculations for fuel cells and reactor cores were carried out using the PIJ and CITATION modules in the SRAC program package with the JENDL 4.0 library. Determination of design criteria is done by optimizing the size of the reactor core to get a convergent value of the effective multiplication factor (k_{eff}). A convergent size was obtained at the radial of the active core is 116 cm and the height of the active core is 200 cm, with a ratio of the pin pitch volume fraction used of 60% fuel, 10% cladding 30% coolant and pin pitch diameter of 1.4 cm. This is indicated by the value of the effective multiplication factor (k_{eff}) reaching a critical value ($k_{eff} = 1$) excess reactivity 10%. This design can operate for 100 years with a refueling period every 10 years. Furthermore, the analysis of the addition of minor actinides in the form of Am-241, after the addition of Am-241 to the fuel the k_{eff} value remained significantly increased and for the k_{eff} value with the addition of 1% Am-241 the value was lower than the k_{eff} value before the addition of Am-241. Meanwhile, the addition of Am-241 by 2% to 7% showed a higher k_{eff} value than the k_{eff} value before the addition of Am-241. This minor addition of actinides aims to utilize nuclear waste.

Keywords : GFR, Metallic Uranium, S-CO₂, Modified CANDLE, SRAC, Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), Minor actinide, Am-241.

Indralaya, 26 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing II



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

NIP.197211252000122001

Pembimbing I



Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.

NIP.197002231995121002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



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

NIP.197009101994121001

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
KATA PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR ISTILAH	xiv
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 Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	4
2.2. Reaktor Nuklir	5
2.3. Reaktor Cepat Berpendingin Gas (GFR)	7
2.4. Bahan Bakar (<i>Fuel</i>)	8
2.5. Pendingin (<i>Coolant</i>)	11
2.6. <i>Cladding</i>	12

2.7. Aktinida Minor (<i>Minor Actinide, MA</i>)	12
2.8. Reaksi Fisi	13
2.9. Analisis Neutronik	14
2.9.1. Penampang Lintang Reaksi Nuklir	14
2.9.2. Persamaan Difusi Multigrup	15
2.9.3 Persamaan <i>Burnup</i>	17
2.9.4. CANDLE (<i>Constant Axial shape of Neutron Flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy production</i>)	18
2.9.5. Faktor Multiplikasi	19
2.10. SRAC (<i>Standard Reactor Analysis Code</i>).....	21
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.2. Alat dan Bahan.....	23
3.3. Metode Penelitian	23
3.4. Tahap Penelitian	23
3.5. Diagram Alir Penelitian	24
3.6. Spesifikasi dan Parameter Desain Reaktor.....	26
3.7. Geometri Sel Bahan Bakar	26
3.8. Geometri Teras Reaktor	27
3.9. Strategi <i>Burnup</i>	27
3.10. Survei Parameter	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1. Analisis Neutronik	30
4.2. Hasil Perhitungan Sel Bahan Bakar	30
4.2.1. Level <i>Burnup</i>	31

4.2.2. Faktor Multiplikasi Tak Hingga (K_{inf})	32
4.2.3. Conversion Ratio.....	32
4.2.4. Densitas Atom	33
4.3. Hasil Perhitungan Teras Reaktor	35
4.3.1. Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff}).....	36
4.3.2. Distribusi Daya Arah Aksial	39
BAB V PENUTUP	40
5.1. Kesimpulan.....	40
5.2. Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	42
LAMPIRAN	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Prinsip Kerja PLTN Menggunakan Reaktor Air Didih.....	4
Gambar 2.2. <i>Gas-Cooled Fast Reactor</i> (GFR).....	7
Gambar 2.3. Disintegrasi berantai ^{235}U dan ^{238}U	10
Gambar 2.4. Pendinginan teras reaktor.....	11
Gambar 2.5. Reaksi fisi berantai.....	13
Gambar 2.6. Prinsip kesetimbangan nuklida.....	17
Gambar 2.7. Skema <i>Burn-up modified CANDLE</i>	19
Gambar 2.8. Faktor Multiplikasi.....	20
Gambar 3.1. Tahapan penelitian secara umum.....	24
Gambar 3.2. Tahapan Perhitungan Sel Bahan Bakar dan Teras Reaktor pada SRAC.....	25
Gambar 3.3. Geometri sel bahan bakar.....	26
Gambar 3.4. Geometri dan ukuran teras reaktor.....	27
Gambar 3.5. Skema <i>burn-up Modified CANDLE</i>	28
Gambar 4.1. Perubahan Level <i>Burnup</i> dalam Waktu 100 tahun.....	31
Gambar 4.2. Nilai Faktor Multiplikasi Tak Hingga (k_{inf}) dalam Waktu 100 tahun.....	32
Gambar 4.3. Nilai <i>Conversion Ratio</i> dalam Waktu 100 tahun.....	33
Gambar 4.4. Perubahan Densitas Atom Uranium-235 dan Uranium-238.....	34
Gambar 4.5. Perubahan Densitas Atom Plutonium-239 dan Plutonium-240.....	35
Gambar 4.6. Susunan Bahan Bakar dalam Teras Reaktor.....	36
Gambar 4.7. Nilai Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff}).....	37
Gambar 4.8. Nilai Faktor Multiplikasi Efektif + Am (1% - 7%).....	38
Gambar 4.9. Distribusi Daya Arah Aksial.....	39

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Tabel 3.1. Spesifikasi dan parameter dari desain reaktor GFR.....	26
--	----

DAFTAR ISTILAH

<i>Burn-up</i>	: Energi yang dibebaskan selama pembakaran dalam reaktor dalam Megawatt <i>days</i> per ton.
<i>Cladding</i>	: berupa kelongsong yang berfungsi sebagai pelindung bahan bakar dan pemisah bahan bakar dengan pendingin.
<i>Conversion Ratio</i>	: Perbandingan antara jumlah atom fisil bahan bakar yang produksi dengan jumlah atom fisil bahan bakar yang dikonsumsi dalam reaktor.
Densitas Atom	: Populasi atom dalam setiap satuan volume (atom/cm^3).
Distribusi Daya	: Parameter yang digunakan untuk melihat pemerataan distribusi daya dalam satu teras reaktor.
<i>Excess Reactivity</i>	: Kelebihan reaktivitas.
Fertil	: Unsur/atom yang tidak dapat langsung membelah setelah penangkapan neutron namun membentuk bahan fisil.
Fisi	: Reaksi pembelahan inti atom dengan partikel neutron menjadi inti atom lebih ringan disertai pelepasan energi.
Fisil	: Unsur/atom yang dapat membelah ketika menangkap neutron.
Fusi	: Reaksi penggabungan antara inti atom yang ringan menjadi inti atom berat disertai pelepasan energi.
K_{eff}	: Konstanta untuk mengetahui tingkat populasi neutron di dalam teras reaktor dengan memperhitungkan faktor kebocoran ke luar teras reaktor.
K_{inf}	: Konstanta untuk mengetahui tingkat populasi neutron di dalam satu sel bahan bakar tanpa adanya faktor kebocoran ke luar teras reaktor.
Penampang Lintang	: Probabilitas terjadinya suatu reaksi antara neutron dengan inti atom.
Reflektor	: Bahan pemantul neutron.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pasokan akan energi listrik dari tahun ke tahun terus mengalami peningkatan. Peningkatan yang terjadi bersamaan dengan laju pertumbuhan penduduk, laju pertumbuhan ekonomi, serta laju perkembangan di bidang industri. Oleh karena itu, untuk mencukupi kebutuhan energi listrik tidak hanya menyandangkan sumber energi yang ada. Sehingga, perlu mencari sumber energi alternatif lain untuk menggantikannya, seperti energi baru dan terbarukan (Harjanto, 2008). Salah satu energi alternatif sebagai pembangkit listrik ialah energi nuklir. Energi nuklir dapat menghasilkan energi dalam orde besar sampai ribuan megawatt, serta biaya perawatannya yang relatif murah, dan juga jenis energi yang sangat efisien, inti dari proses pembangkitan energi nuklir terletak pada reaksi berantai yang terjadi didalam reaktor nuklir (Tadeus et al., 2010). Perkembangan energi nuklir sebagai energi baru dan terbarukan juga memiliki potensi untuk berkembang sebagai salah satu jenis energi yang dapat menggantikan peranan energi fosil melalui pengolahan terstruktur berbasis pengolahan energi bersih yang dapat digunakan sebagai sumber energi karbon sebagai bahan dasar yang digunakan untuk memproduksi energi listrik. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat maka diperlukan upaya dalam memanfaatkan teknologi energi nuklir secara masif dan kontinu (Septiningsih et al., 2020).

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu solusi yang tepat untuk mengatasi krisis ekonomi di Indonesia karena harga listrik yang relatif murah dan tidak mencemari lingkungan. Pada PLTN ini memanfaatkan reaksi fisi dari bahan fisil yang saat ini keberadaanya berlimpah di bumi (Richardina et al., 2015). Perkembangan PLTN setiap tahun semakin meningkat, hingga Juni 2018 terdapat 451 unit PLTN yang beroperasi di dunia yang terdapat di 30 negara dan 58 reaktor lainnya sedang tahap pembangunan, sebagian besar di Asia. PLTN menyediakan sekitar 11% dari listrik dunia, dengan 12 negara menggunakan tenaga nuklir untuk setidaknya 30% dari pembangkit listrik nasional. Kapasitas nuklir global sekarang adalah yang tertinggi yang pernah ada yaitu sebesar 394 gigawatt listrik (Darmawati et al., 2020).

Untuk membangun reaktor nuklir yang bertipe apapun dibutuhkan proses simulasi terlebih dahulu agar mendapatkan hasil yang optimum serta sebagai acuan untuk persoalan keselamatan reaktor nuklir. Dalam hal ini memerlukan analisis secara menyeluruh seperti analisis

termalhidrolik, analisis neutronik, serta analisis keamanan. Sehingga untuk mengetahui informasi terkait tentang persediaan dan fraksi fisil yang dibutuhkan, data siklus bahan bakar, distribusi fluks neutron serta distribusi daya maka sangat diperlukannya perhitungan (Riska et al., 2016).

Perkembangan reaktor nuklir saat ini sudah sampai pada generasi ke IV dengan beberapa desain yang disetujui berdasarkan sistem pendinginnya. *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) ialah salah satu reaktor nuklir generasi ke-4 yang masih dalam fase pengembangan dan pada tahun 2030 akan baru dikomersialkan. Penelitian yang terkait dengan reaktor GFR telah sering dilakukan seperti penelitian tentang desain neutronik yang memiliki daya termal 500 MWt berpendingin CO₂ yang merupakan inovasi baru dari penelitian sebelumnya yang menggunakan helium sebagai pendingin (Hartiwi, 2018). Selain menggunakan bahan pendingin karbondioksida dan helium, GFR juga dapat menggunakan bahan gas pendingin lain seperti karbondioksida superkritis (S-CO₂). Gas CO₂ merupakan salah satu gas yang paling banyak dimanfaatkan pada kondisi superkritis. Konsep reaktor yang menggunakan pendingin S-CO₂ memiliki beberapa potensi keuntungan yang signifikan dibandingkan sistem pendingin helium dan logam cair (Darmawati et al., 2020). Pada penelitian dengan menerapkan strategi *burn-up modified CANDLE* yang memungkinkan memiliki tingkat keselamatan yang tinggi, serta tidak akan lagi bergantung pada teknologi pengayaan uranium dan daur ulang bahan bakar nuklir, reaktor ini dapat juga membakar limbah nuklir untuk meningkatkan persediaan energinya (Ariani et al., 2015). Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis mendesain reaktor cepat tipe GFR dengan menggunakan bahan bakar uranium alam yang dipadukan dengan zirkonium 10% (U-10%wtZr) dan pendingin berupa Karbondioksida superkritis (S-CO₂) dengan menggunakan strategi *Modified CANDLE*. Penelitian ini membahas tentang hasil perhitungan neutronik dan menganalisis pengaruh penambahan minor aktinida terhadap tingkat kekritisan teras reaktor, dimana daya termal yang digunakan sebesar 500 Mwt.

1.2. Rumusan Masalah

Pada penelitian ini membahas desain reaktor GFR dengan menggunakan pendingin berupa Karbondioksida superkritis (S-CO₂) dan daya termal sebesar 500 MWt. Dari beberapa sumber yang didapat nilai (k_{eff}) saat reaktor beroperasi memiliki tingkat kekritisan yang cukup besar. Sehingga pada penelitian ini perlu dilakukannya upaya penurunan tingkat kekritisan pada reaktor. Reaktor ini didesain dengan memperhitungkan ukuran geometri teras dan analisis

neutronik agar dapat beroperasi dengan jangka waktu yang panjang dan kelebihan reaktivitas (*excess reactivity*) $\leq 10\%$ serta memenuhi kriteria keselamatan.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yakni, membahas mengenai desain neutronik reaktor tipe GFR atau disebut *Gas-cooled Fast Reactor* dengan bahan bakar Uranium Metal dan pendingin Karbondioksida superkritis (S-CO₂) dengan menggunakan daya termal sebesar 500 MWt. Menyelesaikan persamaan *burn-up* dan difusi multigrup serta menganalisis pengaruh penambahan minor aktinida berupa Amerisium terhadap tingkat kekritisian teras reaktor dengan menerapkan strategi *burn-up modified CANDLE* yang menggunakan *Standard Reactor Analysis Code* (SRAC).

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, di antara berikut.

1. Melakukan perhitungan tingkat sel bahan bakar untuk mendapatkan nilai level *burnup*, k_{eff} , k_{inff} , serta *conversion ratio* (CR).
2. Mengoptimasi ukuran geometri teras reaktor *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) untuk mempertahankan tingkat kekritisian reaktor.
3. Menganalisis pengaruh penambahan minor aktinida terhadap tingkat kekritisian teras reaktor

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ialah hasil dari desain bisa diterapkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di masa depan untuk reaktor dengan tingkat keselamatan yang baik dan tingkat efisiensi yang dikategorikan cukup tinggi, serta dapat memberikan informasi dan dapat dijadikan sebagai bahan referensi pada penelitian selanjutnya khususnya terkait analisis sisa bahan bakar reaktor tipe *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) dan terkait desain reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardojo, Lasman, A. N., Ruslan, Parmanto, E. M., & Effendi, E. (2010). *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta : Pusat Diseminasi Iptek Nuklir BATAN.
- Alatas, Z., Hidayati, S., Akhadi, M., Purba, M., Purwadi, D., Ariyanto, S., Winarno, H., Rismiyanto, Sofyatingrum, E., Hendriyanto, Widyastono, H., Parmanto, eko madi, & Syahril. (2016). *Buku Pintar Nuklir*. Jakarta : Batan Press.
- Andris, D., Fitriyani, D., & Irka, F. H. (2016). *Optimasi Ukuran Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas Dengan Uranium Alam Sebagai Bahan Bakar*. *Jurnal Fisika Unand*, 5(1), 21–27. <https://doi.org/10.25077/jfu.5.1.21-27.2016>
- Ariani, M., Shafii, M. A., Abdullah, A. G., & Su 'ud, Z. (2010). *Studi Awal Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbasis Bahan Bakar Uranium Alam*. *Proceeding Seminar Dan Workshop Nasional Pendidikan Teknik Elektro (SWNE)*.
- Ariani, M., Su 'ud, Z., & Monado, F. (2013). *Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 MWth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar*. 14(1), 11–15. <http://jurnal.unej.ac.id/index.php/JID>
- Ariani, M., Supardi, Monado, F., & Su'ud, Z. (2015). *POTENSI THORIUM SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN GAS UNTUK PLTN*. *Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN Barat*, 39–45.
- Brueziere, J., & Favet, D. (2015). *Industrial Maturity Of Fast Reactor Fuel Cycle Processes And Technologies*. *Fast Reactors and Related Fuel Cycles : Safe Technologies and Sustainable Scenarios*. *Proceedings Series International Atomic Energy Agency*, 2, 79–83.
- Darmawati, R., Ariani, M., & Monado, F. (2020). *Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO₂ dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam*. 9(3), 401–407.
- Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear Reactor Analysis*. New York : John Wiley & Sons.

- Harjanto, N. T. (2008). *Dampak lingkungan pusat listrik tenaga fosil dan prospek pltn sebagai sumber energi listrik nasional*. 1, 39–50.
- Hartiwi. (2018). *Desain Neutronik Reaktor Cepat Tipe GFR (Gas-Cooled Fast Reactor) Dengan Menggunakan Modified CANDLE Berbasis Bahan Bakar Uranium Metal (U-10%wtZr)*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir.
- Irka, F. H., & Su'ud, Z. (2015). *Analisis Burn Up pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam*. *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*, 7(2), 78–86. <https://doi.org/10.25077/jif.7.2.78-86.2015>
- Kumar. (2015). *Development, Fabrication And Characterization Of Fuels For The Indian Fast Reactor Programme. Fast Reactors and Related Fuel Cycles : Safe Technologies and Sustainable Scenarios*. Proceedings Series International Atomic Energy Agency, 2, 18.
- Marsodi, Suwoto, & zuhair. (2008). *Studi Kapabilitas Transmutasi Plutonium dan Aktinida Minor Dengan Reaktor Cepat Berpendingin Natrium , Timbal dan Gas Helium*. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*, 8.
- Mayanti, R., Ariani, M., & Monado, F. (2017). *Studi Parameter Burnup Sel Bahan Bakar Berbasis Thorium Nitride Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium*. VI, SNF2017-TPN-1-SNF2017-TPN-6. <https://doi.org/10.21009/03.snf2017.02.tpn.01>
- Murray, R. L., & Holbert, K. E. (2014). *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes: Seventh Edition*. In *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes: Seventh Edition*. Else Inc. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02697-X>
- Novalianda, S. (2019). *Power Flattening Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U, Pu)N*. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 4(3), 140–143.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Tsuchihashi, K. (2002). *General Description and Input Instruction*. Jepang : JAERI.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Tsuchihashi, K. (2006). *SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan : JAEA.

- Osato, H., Nishiyama, J., & Obara, T. (2018). *Initial core design of CANDLE burning fast reactor using plutonium from LWR spent fuel*. *Annals of Nuclear Energy*, 120, 501–508. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.015>
- Parma, E. J., Wright, S. A., Vernon, M. E., Fleming, D. D., Rochau, G. E., Suo-anttila, A. J., Rashdan, A. Al, & Tsvetkov, P. V. (2011). *Supercritical CO₂ Direct Cycle Gas Fast Reactor (SC-GFR) Concept*.
- Richardina, V., Budi, W. S., & Tjiptono, T. W. (2015). *Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar UO₂ Dengan Moderator H₂O Dan Pendingin H₂O*. *Berkala Fisika*, 18(3), 95–100.
- Riska, Fitriyani, D., & Irka, F. H. (2016). *Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂)*. *Jurnal Fisika Unand*, 5(1), 28–34.
- Saputra, D. R., Yulianti, Y., & Riyanto, A. (2019). *Studi Desain High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) Berpendingin Gas Hidrogen Menggunakan Bahan Bakar Thorium*. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 07(01), 99–106.
- Sekimoto, H., Ryu, K., & Yoshimura, Y. (2001). *CANDLE: The New Burnup Strategy*. *Nuclear Science and Engineering*, 139, 306–317. <https://doi.org/10.13182/NSE01-01>
- Septiningsih, I., Kurniawan, I. D., & Pratama, M. B. (2020). *Peluang dan Tantangan: Pemanfaatan Potensi Tenaga Nuklir Berbasis Smart Electricity Guna Memaksimalkan Penggunaan Energi Baru Terbarukan Sebagai Upaya Mewujudkan Kedaulatan Energi di Indonesia*. *Prosiding Seminar Nasional Riset Teknologi Terapan*, 1–9.
- Shelley, A. (2020). *Neutronic analyses of americium burning U-free inert matrix fuels*. *Progress in Nuclear Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103567>
- Suhaemi, T. (2016). *Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Menopang Kebutuhan Eenergi Listrik Nasional*. *Seminar Nasional TEKNOKA_FT UHAMKA*, 1, 162–170.
- Suwoto, & Zuhair. (2012). *Studi dan Observasi Awal Kebutuhan Data Nuklir untuk Reaktor Generasi IV (Gen-IV)*. *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, 1, 18–25.

- Syahputra, T. S., & Suud, Z. (2017). *Startup Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbahan Bakar UN-PuN dengan Daya 800 MWh*. *Positron*, 7(1), 12–16. <https://doi.org/10.26418/positron7.1.3>
- Syarifah, R. D., Su'ud, Z., Basar, K., & Irwanto, D. (2020). *Actinide Minor Addition on Uranium Plutonium Nitride Fuel for Modular Gas Cooled Fast Reactor*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1493(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1493/1/012020>
- Tadeus, D. Y., Setiyono, B., & Setiawan, I. (2010). *Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal*. *Transmisi*, 12(1), 8–13. <https://doi.org/10.12777/transmisi.12.1.8-13>
- Van Rooijen, W. F. G. (2009). *Gas-cooled fast reactor: A historical overview and future outlook*. *Science and Technology of Nuclear Installations*. <https://doi.org/10.1155/2009/965757>
- Waltar, A. E., & Reynolds, A. B. (1981). *Fast Breeder Reactors*. New York : Pergamon Press.
- Waluyo, A. (2014). *Analisis Kekritisan Tabung Hidriding Di IEBE Dengan Menggunakan Program Komputer SCALE6.1*. Seminar Keselamatan Nuklir.
- Yanti, M. (2017). *Studi Desain Reaktor Cepat Berpendingin Helium Dengan Bahan Bakar Uranium Alam*. Bandung : Institut Teknologi Bandung.