ANALISIS PERFORMA BAHAN BAKAR *THORIUM NITRIDE* (ThN) DENGAN VARIASI *ENRICHMENT* URANIUM-233 PADA *GAS-COOLED FAST REACTOR* (GFR) 500 MWTH MENGGUNAKAN OPENMC

SKRIPSI

Dibuat Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh

Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

Oleh :

FIKRI ZACHARI

08021282126075

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : FIKRI ZACHARI

NIM : 08021282126075

Judul TA : **Analisis Performa Bahan Bakar Thorium Nitride (ThN) Dengan Variasi Enrichment Uranium-233 Pada Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) 500 Mwth Menggunakan Openmc.**

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

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun. Apabila dikemudian hari terdapat kesalahan atau keterangan yang tidak benar dalam pernyataan ini, maka saya siap bertanggung jawab secara akademik dan bersedia menjalani proses hukum yang ditetapkan.

Indralaya, 14 Juli 2025

Fikri Zachari

NIM.08021282126075

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PERFORMA BAHAN BAKAR THORIUM NITRIDE DENGAN VARIASI ENRICHMENT URANIUM-233 PADA GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) 500 MWTH MENGGUNAKAN OPENMC.

SKRIPSI

Diajukan Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar di Program Studi Fisika

Oleh :

Fikri Zachari

08021282126075

Indralaya, 14 Juli 2025

Menyetujui

Pembimbing I

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

NIP. 197606092003122002

Pembimbing II

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

NIP. 197010201994122001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

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

NIP. 197009101994121001

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar sarjana di Fisika, Universitas Sriwiaya.

Proses penyusunan skripsi ini tentu tidak terlepas dari berbagai tantangan. Namun, berkat dukungan, doa, dan semangat dari berbagai pihak, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu, saya mengucapkan terima kasih kepada keluarga, teman-teman, dan semua pihak yang telah memberikan bantuan dan motivasi selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini.

Selama pengerjaan tugas akhir dan penyusunan skripsi, penulis banyak mendapatkan uluran tangan dalam membantu pengerjaan tugas akhir dari semua pihak sampai dengan selesai. Untuk itu penulis disini mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada Allah SWT segala rahmat yang telah dilimpahkan kepada penulis
2. Kedua orang tua serta keluarga besar dari ayah maupun ibu serta saudara-saudara ku yang senantiasa memberikan dukungan dan doa selama ini
3. Ibu Dr. Menik Ariani, M.Si., selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa sabar memberikan arahan dan bantuannya selama pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan skripsi.
4. Ibu Dr. Assaidah, S.Si., M.Si, selaku Dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan yang senantiasa memberikan masukan dan nasehat agar menjadi sosok yang lebih baik.
5. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
6. Bapak, Ibu dosen dan staf administrasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
7. Teman-teman KBI Elektronika, Instrumentasi, Komputasi dan Nuklir Angkatan 2021
8. Seluruh teman-teman Fisika Angkatan 2021

9. Teman-teman seperjuangan Athallah, Hana, Athiyyah, Abdan yang senantiasa memberikan dukungannya.
10. Teman-teman SMA khususnya Adimas, Hananta, Alfurqon, Arya
11. Kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih yang sebanyak banyaknya dan semoga skripsi ini bermanfaat bagi orang banyak.

Indralaya, Juli 2025

Fikri Zachari

ANALISIS PERFORMA BAHAN BAKAR THORIUM NITRIDE (ThN) DENGAN VARIASI ENRICHMENT URANIUM-233 PADA GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) 500 MWTH MENGGUNAKAN OPENMC

OLEH :
FIKRI ZACHARI
NIM. 08021282126075

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja bahan bakar thorium nitride (ThN) dengan variasi enritchment uranium-233 pada teras Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) menggunakan OpenMC. Simulasi burn-up dilakukan selama 10 tahun dengan variasi enritchment mulai dari 0% hingga 12%. Nilai k-infinite menunjukkan peningkatan pada enritchment 0–6% namun masih dalam kondisi subkritis, sementara pada enritchment 8–12% nilainya stabil dalam kondisi superkritis. Enritchment uranium-233 sebesar 12% dipilih sebagai opsi terbaik karena menghasilkan rata-rata k-effektif sebesar 1,0659 dan excess reactivity sebesar 6,02%. Selain itu, variasi ini juga menunjukkan peningkatan konversi rasio setiap tahun, menandakan efisiensi reaktor yang lebih tinggi dalam pemanfaatan bahan bakar.

Kata kunci: *OpenMC; Thorium Nitrit; GFR; Multiplikasi K-effektif; Burn up*

Indralaya, 14 Juli 2025
Menyetujui,

Pembimbing I	Pembimbing II
Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.	**Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.**
NIP. 197211252000122001	**NIP. 197002231995121002**

Mengetahui, Ketua
Jurusan Fisika

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

***PERFORMANCE ANALYSIS OF THORIUM NITRIDE (THN) FUEL WITH URANIUM-233 ENRICHMENT VARIATIONS IN A 500 MWTH GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) USING* OPENMC**

BY :
FIKRI ZACHARI
NIM. 08021282126075

ABSTRACT

This study aims to analyze the performance of thorium nitride (ThN) fuel with varying uranium-233 enrichments in the core of a Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) using OpenMC simulations. Burn-up calculations were performed over a period of 10 years with enrichment levels ranging from 0% to 12%. The results show that the k-infinite value tends to increase at enrichments between 0–6%, although it remains subcritical, while enrichments of 8–12% maintain stable values in a supercritical state. An enrichment level of 12% uranium-233 is identified as the optimal option, achieving an average effective multiplication factor (k-effective) of 1.0659 and an excess reactivity of 6.02%. Furthermore, this enrichment variation exhibits a consistent increase in the conversion ratio each year, indicating higher reactor efficiency in maximizing fuel utilization.

Keywords: *OpenMC; Thorium Nitride; GFR; Effective Multiplication Factor (keff); Burnup.*

Indralaya, 14 Juli 2025
Menyetujui,

Pembimbing I	Pembimbing II
Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.	**Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.**
NIP. 197211252000122001	**NIP. 197002231995121002**

Mengetahui, Ketua
Jurusan Fisika

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

DAFTAR ISI

LEMBAR ORISINALITAS II
LEMBAR PENGESAHAN II
KATA PENGANTAR IV
ABSTRAK VI
ABSTRACT VII
DAFTAR ISI VIII
DAFTAR GAMBAR X
DAFTAR TABEL XI
DAFTAR ISTILAH XII
DAFTAR SIMBOL XIII
DAFTAR ISTILAH XIV
DAFTAR LAMPIRAN XV
BAB I 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 4
1.5 Manfaat 4
BAB II 5
2.1 PLTN 5
2.2 Reaktor Nuklir 6
2.3 *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) 8
2.4 Sel Bahan Bakar 9
2.5 Faktor Multiplikasi Neutron 10
2.6 Analisis Neutronik 12
2.6.1 *Nuclear Cross-Section* (Tampang Lintang Nuklir) 12
2.6.2 *Burn Up* 13
2.6.3 Transport Neutron 14
2.7 Metode Monte Carlo 15
2.8 OpenMC 15

BAB III 17
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 17
3.2 Alat dan Bahan 17
3.3 Tahapan Penelitian 17
3.4 Diagram Alir Penelitan.....18
3.5 Spesifikasi Sel Bahan Bakar 20
3.6 Parameter Survei 20
BAB IV 22
4.1 Desain Geometri Teras *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR).....22
4.2 Burn-Up Sel.....24
4.3 Analisis Tingkat Kekritisan dan Reaktivitas Berlebih 25
4.4 Nilai Konservasi Rasio.....27
4.5 Densitas Atom 29
BAB V 31
5.1 Kesimpulan.....31
5.2 Saran.....31
DAFTAR PUSTAKA 32
LAMPIRAN.....36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema PLTN 5
Gambar 2.2 Reaksi Fisi Berantai 7
Gambar 2.3 Gas-Cooled Fast Reactor.....8
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....18
Gambar 3.2 Diagram Alir Pemrograman 19
Gambar 3.3 Geometri Sel Bahan Bakar. 20
Gambar 4. 1 Desain Sel Bahan Bakar.....22
Gambar 4. 2 Geometri Teras (a) sisi XY (b) sisi XZ 23
Gambar 4. 3 Perubahan k-infinite sel dengan burn-up selama 10 tahun 24
Gambar 4. 4 Perbandingan faktor multiplikasi tak hingga (*K-eff*) pada teras.....25
Gambar 4. 5 Grafik Nilai Konversi Rasio.....28
Gambar 4. 6 Grafik Perubahan Densitas Atom Th232 29
Gambar 4. 7 Grafik Perubahan Densitas Atom U233.....30

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Sifat Nuklir dari Isotop U-233, U-235 dan Pu-239 9
Tabel 3. 1 Parameter Bahan Bakar Reaktor GFR 20
Tabel 4. 1 Nilai *Excess Reactivity* (kelebihan reaktivitas) 26

DAFTAR ISTILAH

Teras reaktor	:Tempat diletakkannya bahan bakar dan terjadinya proses pembakaran
Reflektor	: Bagian reaktor yang berfungsi untuk mencegah kebocoran neutron dengan cara memantulkan neutron.
Burn up	: Proses pembakaran atau banyaknya energi yang dihasilkan per satuan massa bahan bakar.
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 da melakukan proses reaksi fisi.
Conversion Ratio	: Perbandingan antara produksi bahan fisil dan konsumsi bahan fisil.

DAFTAR SIMBOL

kinf : faktor multiplikasi tak hingga

η : faktor reproduksi neutron

f : faktor pemanfaatan termal

p : probabilitas lolos dari resonansi

ε : faktor fisi cepat

k-*eff* : faktor multiplikasi effektif

ρ_{ex} : kelebihan reaktivitas

n : kerapatan bahan dapat membelah

σ : tampang lintang mikroskopik fisi

σ : tampang lintang mikroskopik fisi

N_j : konsentrasi dari nuklida ke-j.

n : jumlah total nuklida.

λ_{ij} : koefisien yang menunjukkan laju reaksi yang disebabkan oleh neutron dan peluruhan radioaktif secara spontan.

$\sigma_s(r, v)$: menunjukkan seberapa sering hamburan (*scattering*) terjadi dari kecepatan awal *v*.

$\sigma_f(r, v)$: menunjukkan seberapa sering fisi (*fission*) terjadi dari kecepatan awal *v*.

$\sigma(r, v)$: total penampang, yang merupakan jumlah dari σ_s dan σ_f.

π_s : hasil hamburan

π_f : hasil fisi

q : sumber neutron

v : volume

r : posisi neutron

v : kecepatan neutron

t : waktu

DAFTAR ISTILAH

EBT	: Energi Baru Terbarukan
PLTN	: Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
OpenMC	: *Open source Monte Carlo* (*software*)
GFR	: *Gas-Cooled Fast Reactor*
ENDF	: *Evaluated Nuclear Data Files*
MWth	: *Mega-watt thermal*
ThN	: Thorium Nitride
CO2	: Karbon dioksida
SO2	: Sulfur dioksida
NOx	: Nitrogen dioksida

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Program Sel 37
Lampiran 2. Data K-Infinite.....40
Lampiran 3. Program Teras.....40
Lampiran 4. Tabel data K-eff pada teras GFR 45
Lampiran 5. Program K-eff.....45
Lampiran 6. Data Nilai Konversi Rasio.....47
Lampiran 7. Program Konversi Rasio.....47
Lampiran 8. Program Densitas Atom.....50
Lampiran 9. Data Densitas Atom Th232.....52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk dan perkembangan teknologi berkontribusi pada meningkatnya kebutuhan energi. Dalam beberapa tahun terakhir, permintaan energi global berkembang dengan pesat, sementara sumber daya konvensional semakin berkurang, sehingga menimbulkan tantangan besar dalam pemenuhannya. Di Indonesia, ketersediaan energi Listrik yang ada masih belum mampu memenuhi seluruh permintaan masyarakat. Selain itu, keterbatasan cadangan batubara yang digunakan dalam produksi energi listrik semakin mengkhawatirkan, sehingga pemanfaatan sumber energi alternatif menjadi semakin mendesak (Kharisma et al., 2024). Data menunjukkan bahwa pembangkitan listrik berbasis batu bara di Indonesia mengalami peningkatan dari 53% menjadi 60% antara tahun 2015 hingga 2019, sementara di sebagian besar negara anggota G20 justru mengalami penurunan, termasuk di China dan India (Ilham et al., 2020).

Ketergantungan Indonesia terhadap sumber energi fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas alam masih sangat tinggi, sedangkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT) belum berkembang secara optimal. Mengingat keterbatasan cadangan energi fosil yang semakin menipis, diperlukan upaya optimalisasi dalam pemanfaatan EBT guna memastikan keberlanjutan pasokan energi di masa depan. Indonesia sebenarnya memiliki beragam potensi energi terbarukan yang belum bisa dimanfaatkan secara maksimal. Oleh karena itu, pemerintah melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) telah menetapkan kebijakan untuk secara bertahap mengurangi ketergantungan pada energi fosil serta meningkatkan penggunaan energi terbarukan. Selain pengembangan EBT yang telah banyak dikaji dalam berbagai penelitian, penting pula untuk mengeksplorasi peran energi nuklir dalam bauran energi nasional sebagai alternatif strategis dalam memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat (Ruslan, 2021).

Di era sekarang teknologi nuklir sudah sangat berkembang dan salah satu penerapannya yakni Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Pada tahun 1954, Reaktor Nuklir Obninsk menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama yang menghasilkan listrik untuk jaringan tenaga,. Inti reaktor, yang merupakan komponen utama PLTN, berfungsi menghasilkan energi melalui reaksi fisi inti berat yang kemudian memicu reaksi berantai secara terkendali dan berkelanjutan (Masiello, 2024). Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pun berkembang sebagai solusi alternatif dalam mengatasi krisis energi global dengan memanfaatkan reaksi fisi pada bahan fisil yang masih melimpah(Ilham et al., 2020). Selain itu, PLTN juga berkontribusi dalam upaya pengurangan emisi CO_2 dengan menggantikan energi fosil pada pembangkit Listrik. (Yusra et al., 2024).

Reaktor Nuklir *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) merupakan salah satu desain Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Generasi IV yang dirancang untuk beroperasi pada suhu tinggi dengan menggunakan gas helium sebagai pendingin (Ilham et al., 2020). Modular Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) memiliki potensi besar dalam penerapan siklus bahan bakar tertutup dan daur ulang aktinida, yang dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan bakar nuklir. Reaktor ini mengadopsi teknologi reaktor cepat yang memungkinkan penggunaan uranium alami sebagai bahan bakar selama masa operasionalnya. Selain itu, dengan suhu kerja yang tinggi dan efek reaktivitas yang rendah, reaktor ini mampu meningkatkan efisiensi energi serta memastikan tingkat keselamatan yang lebih tinggi dalam pengoperasiannya (Raflis et. al., 2020).

Thorium-232 telah lama dikaji sebagai material fertil dalam bahan bakar nuklir karena memiliki berbagai keunggulan neutronik yang signifikan. Ketika Thorium-232 menyerap neutron, ia mengalami transmutasi menjadi Uranium-233, yang mampu menghasilkan lebih banyak neutron per reaksi fisi dalam fluks neutron termal dan epitermal. Selain itu, Thorium-232 memiliki rasio tangkapan resonansi epitermal terhadap fisi yang lebih rendah dibandingkan dengan Uranium-238, sehingga meningkatkan efisiensi reaksi fisi. Dalam penggunaannya, Thorium-232 umumnya dikombinasikan dengan uranium dalam bentuk campuran bahan bakar Thorium-uranium, yang memberikan keuntungan tambahan dalam aspek keamanan

proliferasi dengan mendenaturasi Uranium-233 (Trianti et at., 2014). Selain aspek neutronik, efisiensi energi menjadi salah satu alasan utama pemanfaatan Thorium-232 sebagai bahan bakar reaktor. Untuk menghasilkan daya sebesar 1000 MWe, diperlukan sekitar 200–250 ton uranium atau 3,5–4 juta ton batubara, sedangkan Thorium-232 dapat menjadi alternatif yang lebih hemat dalam konsumsi bahan bakar. Dengan karakteristik ini, Thorium-232 menawarkan potensi besar sebagai bahan bakar nuklir yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan dalam memenuhi kebutuhan energi di masa depan (Alparis et al., 2023).

Simulasi neutron menggunakan metode paralel Monte Carlo dapat mempercepat waktu komputasi yang lama, membangun simulasi inti reaktor 3D lengkap menggunakan kode perangkat lunak OpenMC, dan memungkinkan perhitungan neutron yang akurat dengan memodelkan interaksi neutron secara detail menggunakan data nuklir dari perpustakaan ENDF/B-VII.1 (Ilham et al, 2021).

Penelitian ini menggunakan metode simulasi monte carlo untuk memperlihatkan Tingkat faktor multiplikasi efektif (*K-eff*), menggunakan bahan bakar Thorium Nitride pada *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR).

1.2 Rumusan masalah

Perumusan masalah penelitian ini mencangkup::

1. Bagaimana simulasi dan analisis bahan bakar teras berbasis Thorium Nitride (ThN) dilakukan dengan menghitung faktor multiplikasi tak hingga, faktor multiplikasi effektif, laju reaksi fisi, konversi rasio, dan densitas atom selama periode 10 tahun?

2. Berapa tingkat *excess reactivity* untuk teras yang menggunakan bahan bakar thorium nitride agar optimal pada Reaktor *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR)?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini akan fokus pada desain sel bahan bakar berbasis Thorium Nitride (ThN) pada *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) yang berpendingin Helium, dengan *burn-up* selama 10 tahun. Metodologi yang digunakan adalah simulasi

neutron dengan pendekatan metode Monte Carlo menggunakan perangkat lunak OpenMC.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dasar dari penelitian ini diantaranya:

1. Merancang dan menganalisis bahan bakar teras berbasis Thorium Nitride (ThN) dengan menghitung faktor multiplikasi efektif dan faktor multiplikasi tak hingga, rasio konversi, dan densitas atom selama periode 10 tahun

2. Menghitung tingkat *excess reactivity* yang optimal bagi sel bahan bakar thorium untuk desain *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR).

1.5 Manfaat

Penelitian ini menggunakan desain teras yang mana Thorium Nitride sebagai bahan bakar reaktor *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) yang bahan bakarnya berlimpah dialam dan merupakan sumber bahan bakar utama dalam pembangkit listrik yang efisien dan efektif yang tentunya dapat mengurangi emisi karbon di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Agustiarini, V., & Permata Wijaya, D. (2021). Analisis neutronik Gas Cooled Fast Reactor berpendingin S-CO2 dengan bahan bakar Thorium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*. 21(3), 163–167.

Anggoro, Y. D., Dewi, D., Nurlaila, dan Yuliyanto, A. T. (2013). Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 15(2), 69–79.

Athiqoh, F., Setia Budi, W., Anam, C., Tri, D., dan Tjiptono, W. (2014). Distribusi Fluks Neutron Sebagai Fungsi *Burn-up* Bahan Bakar Pada Reaktor Kartini. *Youngster Physics Journal*. 3(2), 107–112.

Castagna, C., Aufiero, M., Lorenzi, S., Lomonaco, G., dan Cammi, A. (2020). Development Of A Reduced Order Model For Fuel Burnup Analysis. *Energies*. 13(4),1-26.

Cox, A. M. G., Harris, S. C., Horton, E. L., dan Kyprianou, A. E. (2019). Multi-species Neutron Transport Equation. *Journal of Statistical Physics*. 176(2), 425–455.

Duderstadt, J.J. dan Hamilton, L.J., (1976). *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., Kanada.

Fadhilah, B. (2023). *Pembangkit listrik tenaga nuklir: Cara kerja dan jenisnya*. ZonaEBT.

Fakhrudin, M., Rozi, A., Mahmudi, I., Hanum, M., dan Dewi, J. P. (2023). Penerapan Energi Nuklir sebagai Pembangkit Listrik Indonesia pada Tahun 2035. *Jurnal Management and Science Proceedings*. 3(2), 910-915.

Hébert, A., Mula, O., Ciarlet, P., Bidaud, A., dan Sanchez, R. (2024). *Contributions to 3-D Transport Simulations of Nuclear Reactors*. Universite Paris-Saclay.

Ilham, M., Raflis, H., dan Suud, Z. (2020). Full Core Optimization of Small Modular Gas-Cooled Fast Reactors Using OpenMC Program Code. *Journal of Physics: Conference Series*. 1493(1), 1–8.

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), 1–5.

Karomah, I., Dewi Syarifah, R., Trianti, N., Arkundato, A., Rohman, L., Maulina, W., Purwandari, E., dan Umar Sahiful Hidayat. (2023). Validasi Perhitungan Kekritisan pada GFR (Gas Cooled Fast Reactor) menggunakan Kode OpenMC dan SRAC. *Newton-Maxwell Journal of Physics*. 4(1), 24–27.

Kharisma, A., Pinandita, S., dan Jayanti, A. E. (2024). Literature Review: Kajian Potensi Energi Surya Alternatif Energi Listrik. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*. 5(2), 145–154.

Masrukan K, M. Husna Al Hasa, dan Anwar Muchsin. (2014). Pembuatan Green Pellet U-Zrhx Untuk Bahan Bakar Pwr. *Jurnal Urania*. 20(1), 22–31.

Masrukan, Mustika, D., Perdana, D. A., dan Jumaeri. (2020). Analisis Komposisi Unsur, Densitas, Makrostruktur, Dan Fasa Paduan U-6zr-Xnb Pasca Uji Korosi. *Jurnal Urania*. 26(3), 156–166.

Novalianda, S., Ramadhan, A., dan Su'ud, Z. (2020). Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*. 22(2), 50–54.

Octadamailah, S., Isnaini, A., dan Sigit, R. (2023). Analisis Kritikalitas Proses Hydriding Serta Penyimpanan Paduan UMo Dan UZr Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset Menggunakan Openmc. *Urania : Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. 29(1), 21-31.

Prasetya, M., dan Shafii, M. A. (2018). Analisis Faktor Pelemahan Neutron dari Berbagai Jenis Bahan untuk Aplikasi Moderator/Reflektor dan Batang Kendali Pada Reaktor Termal. *Jurnal Fisika Unand*. *7*(3), 208–214.

Pusa, M., dan Leppänen, J. (2010). Computing the matrix exponential in burnup calculations. *Jounal Nuclear Science and Engineering*. 164(2), 140–150.

Raflis, H., Ilham, M., Su'ud, Z., Waris, A., dan Irwanto, D. (2020). Neutronic Analysis of Modular Gas-cooled Fast Reactor for 5-25% of Plutonium Fuel using

Parallelization MCNP6 Code. *Journal of Physics: Conference Series*. 1493(1), 1–6.

Ruslan, R. (2021). Status Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan dan Opsi Nuklir dalam Bauran Energi Nasional. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 23(1), 39.

Setiabudi, B. (2010). Dampak Pembangunan Pltn Terhadap Perubahan Tata Ruang Kabupaten Jepara. *Gema Teknologi*. 16(1), 11–15.

Subakti, T. (2009). *Karakteristik Fisika Reaktor Teras Pwr Bahan Bakar Uo2*. Yogyakarta: Batan.

Stacey, W. M., (2013). *Nuclear Reactor Physiscs*. New York: Jhon Wiley & Sons.

Susanti, Suharyana, Riyatun, Khakim, A., dan Isnaeni, A. (2015). Pengaruh Variasi Konsentrasi Uranium Dalam Bahan Bakar Uranil Nitrat Dan Uranil Sulfat Terhadap Nilai *K-eff* Aqueous Homogeneous Reactor (Ahr). *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2015*. 9, 115–116.

Syahputra, R. (2020). *Teknologi Pembangkit Tenaga Listrik*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Syarifah, R. D., Su'ud, Z., Basar, K., dan Irwanto, D. (2020). Actinide Minor Addition on Uranium Plutonium Nitride Fuel for Modular Gas Cooled Fast Reactor. *Journal of Physics: Conference Series*. 1493(1), 1–6.

Trianti, N., Zaki, S., Arif, I., Permana, S., dan Riyana, E. S. (2014). Burnable Poison Nutronic Characteristics of Hexagonal Tight Lattice Cell for Small Long-Life BWR with Thorium Based Fuel. *THE 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON THEORETICAL AND APPLIED PHYSICS* (128–134). ResearchGate.

Wang, K., Li, Z., She, D., Liang, J., Xu, Q., Qiu, Y., Yu, J., Sun, J., Fan, X., dan Yu, G. (2015). RMC - A Monte Carlo code for reactor core analysis. *Annals of Nuclear Energy*. 82, 121–129.

Yusra, R. A., Huwaida, H., Zahra, A., Sholihah, B., dan Izza, N. I. (2024). Persepsi Mahasiswa Tadris Fisika UIN Syarif Hidayatullah Jakarta Terhadap Eksistensi

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan. *Jurnal Energi Dan Ketenagalistrikan*. 2(1), 29–38.