

**STUDI BAHAN BAKAR NUKLIR URANIUM METAL (U-Zr)
MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Fisika



Oleh:

Athiyyah Ramadhani

NIM. 08021282126040

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI BAHAN BAKAR NUKLIR URANIUM METAL (U-Zr) MENGGUNAKAN
PERANGKAT LUNAK OPENMC**

SKRIPSI

Dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh

Gelar Sarjana Sains bidang studi Fisika

OLEH :

ATHIYYAH RAMADHANI

NIM. 08021282126040

Indralaya, 07 Mei 2025

Menyetujui,

Pembimbing I



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

Pembimbing II



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

**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 : Athiyyah Ramadhani

NIM : 08021282126040

Judul TA : Studi bahan bakar nuklir uranium metal (U-Zr) menggunakan perangkat lunak 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, Mei 2025



Athiyyah Ramadhani
NIM. 08021282126040

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis tercurahkan kepada Allah SWT, karena rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Studi Bahan Bakar Nuklir Uranium Metal (U-Zr) Menggunakan Perangkat Lunak OpenMC”**. Tugas akhir yang akan dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Instrumentasi Komputasi dan Nuklir Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan mendapatkan gelar sarjana sains di bidang studi fisika. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan proposal tugas akhir ini masih banyak kesalahan dan ketidaksempurnaan baik itu disengaja maupun tidak disengaja.

Penulis mempunyai harapan yang besar agar kiranya proposal tugas akhir ini dapat diterima oleh bapak dan ibu. Penulis mengucapkan banyaknya terimakasih atas izin, kesempatan, pembinaan, serta bantuan yang diberikan oleh bapak dan ibu selaku dosen pembimbing kepada penulis. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga penulis, Ayahanda, 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. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si., selaku dosen Pembimbing I dan Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II, yang telah memberikan waktu dan ilmu yang amat berharga dalam membantu dan mengarahkan penulis selama penelitian dan penyusunan skripsi.
5. Ibu Dr. Erry Koriyanti, S.Si., M.Si., Ibu Dr. Assaidah, M.Si., dan Ibu Dra. Jorena, M.Si selaku Dosen Penguji/Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Akhmad Aminuddin Bama, M.Si selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis sedari awal perkuliahan.
7. Seluruh dosen dan staf administrasi Jurusan Fisika yang telah memberikan dukungan dan fasilitas selama Penulis berada di bangku perkuliahan.

8. Kak Laila, Kak Aldi, dan Kak Nurhidayah yang telah meluangkan waktu dan membantu penulis dalam penelitian ini.
9. Teman-teman seperjuangan Abdan, Mustari, Fikri, Hana, dan Athallah yang telah meluangkan waktu dan membantu penulis dalam keadaan suka maupun duka. Terima kasih untuk segala dukungan dan motivasinya.
10. Seluruh pihak yang telah membantu penulis yang tidak bisa dituliskan satu-persatu terima kasih atas segala bantuannya.

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

Indralaya, Mei 2025
Penulis

Athiyyah Ramadhani
NIM. 08021282126040

**STUDI BAHAN BAKAR NUKLIR URANIUM METAL (U-Zr)
MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

Oleh:

**Athiyyah Ramadhani
NIM. 08021282126040**

ABSTRAK

Penelitian bertujuan untuk menganalisis kinerja bahan bakar U-Zr untuk reaktor *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR). Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenMC untuk mensimulasikan perilaku bahan bakar selama masa *burn-up* 60 tahun, serta menganalisis perbedaan kinerjanya terhadap U-Zr yang ditambahkan minor aktinida Np. Variasi persentase pengayaan U-235 dari 1% hingga 10% dieksplorasi untuk menentukan komposisi sel yang optimal untuk dilakukan *burn-up*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sel bahan bakar U-Zr dengan pengayaan 7% U-235 menunjukkan kinerja terbaik, dengan k_{eff} awal sebesar 1,02331 dan k_{eff} akhir 1,04188, serta mampu mempertahankan kondisi kritis selama 60 tahun *burn-up*. Analisis neutronik lainnya meliputi distribusi fluks neutron, dan laju reaksi fisi yang menunjukkan peningkatan secara bertahap seiring waktu, serta pengamatan terhadap perubahan massa nuklida utama. Penambahan minor aktinida Np sebesar 0,25%, 0,5%, 0,75%, dan 1% juga diuji, dengan hasil yang menunjukkan efek yang tidak signifikan terhadap perubahan nilai k_{eff} . Kesimpulan dari penelitian menegaskan potensi bahan bakar U-Zr dengan pengayaan 7% U-235 sebagai kandidat bahan bakar yang aman dan efisien untuk reaktor GFR generasi mendatang, serta mendukung pengembangan energi nuklir berkelanjutan di Indonesia melalui pemanfaatan reaktor cepat.

Kata Kunci: *OpenMC; Bahan Bakar Uranium Metalik; GFR; Analisis Neutronik; Burn-up*

Indralaya, Mei 2025

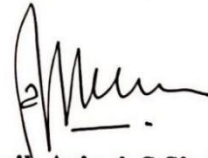
Menyetujui,

Pembimbing I



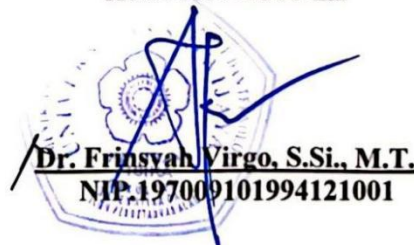
Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.
NIP.197002231995121002

Pembimbing II



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

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika**



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

STUDY OF NUCLEAR FUEL URANIUM METAL (U-Zr) USING OPENMC SOFTWARE

By:

Athiyyah Ramadhani
NIM. 08021282126040

ABSTRACT

This research aims to analyze the performance of uranium-zirconium (U-Zr) fuel as a promising fuel candidate for *Gas-Cooled Fast Reactors* (GFR), considering its potential for enhancing efficiency and reducing nuclear waste. The analysis is conducted using the OpenMC software to simulate the fuel's behavior during a 60-year burn-up period, as well as to analyze performance differences with U-Zr to which minor actinide Np is added. Variations in the U-235 enrichment percentage, ranging from 1% to 10%, were explored to determine the optimal cell composition for burn-up. Fuel cell burn-up calculations were performed using the OpenMC software. The results showed that the U-Zr fuel cell with 7% U-235 enrichment exhibited the best performance, with an initial k_{eff} of 1.02331 and a final k_{eff} of 1.04188, and was able to maintain criticality for 60 years of burn-up. The neutronic analysis included the multiplication factor (k_{eff}), neutron flux distribution, and fission reaction rate, which showed a gradual increase over time. The addition of minor actinide Np at 0.25%, 0.5%, 0.75%, and 1% was also tested, with results showing an insignificant effect on the decrease or increase in the k_{eff} value. The conclusion of this study confirms the potential of U-Zr fuel with 7% U-235 enrichment as a safe and efficient fuel candidate for future generation GFR reactors, and supports the development of sustainable nuclear energy in Indonesia through the utilization of fast reactors.

Keywords: *OpenMC; Uranium Metallic Fuel; GFR; Neutronic Analysis; Burnup*

Indralaya, Mei 2025

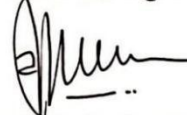
Menyetujui,

Pembimbing I



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

Pembimbing II



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

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



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

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	13
1. Latar Belakang	13
2. Rumusan Masalah	15
3. Batasan Masalah	15
4. Tujuan	16
5. Manfaat	16
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	Error! Bookmark not defined.
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	Error! Bookmark not defined.
2.2 Reaktor Nuklir	Error! Bookmark not defined.
2.3 Komponen Utama Reaktor Nuklir	Error! Bookmark not defined.
2.4 Bahan Bakar Nuklir	Error! Bookmark not defined.
2.5 <i>Gas-Cooled Fast Reaktor</i> (GFR)	Error! Bookmark not defined.
2.6 Minor Aktinida	Error! Bookmark not defined.
2.7 Neptunium	Error! Bookmark not defined.
2.8 Uranium <i>Zirconium</i>	Error! Bookmark not defined.
2.10 <i>Burn Up</i>	Error! Bookmark not defined.
2.11 Persamaan Transport Neutron	Error! Bookmark not defined.
2.12 Metode Monte Carlo	Error! Bookmark not defined.
2.13 OpenMC	Error! Bookmark not defined.
BAB 3 METODOLOGI RISET	Error! Bookmark not defined.

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.2 Alat dan Bahan	Error! Bookmark not defined.
3.3 Tahapan Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.4 Flowchart Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.5 Spesifikasi Desain Sel Bahan Reaktor	Error! Bookmark not defined.
3.6 Parameter Survei	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	Error! Bookmark not defined.
4.1. Profil Bahan Bakar U-Zr	Error! Bookmark not defined.
4.2. Desain Geometri dan Analisis Perhitungan <i>Burnup</i> Sel Bahan Bakar	Error! Bookmark not defined.
4.3. Analisis Tingkat Kekritisn dan <i>Excess Reactivity</i>	Error! Bookmark not defined.
4.4. Analisis Distribusi Laju Reaksi Fisi dan Distribusi Fluks	Error! Bookmark not defined.
4.5. Analisis Sel Bahan Bakar U-Zr + Np ...	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	Error! Bookmark not defined.
5.1. Kesimpulan	Error! Bookmark not defined.
5.2. Saran	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA	17
LAMPIRAN	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.2 Skema Reaktor Nuklir (Wardhani dkk., 2023). **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.3 Desain Sistem GFR (Zuhair Dan Suwonto., 2009) **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.4 Reaksi Inti Radioaktif (Duderstadt dan Hamilton, 1976) **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.1 Flowchart Penelitian **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.1 Grafik sel bahan bakar U-Zr dengan pengayaan 1%-10% uranium **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.2 Desain pin sel bahan bakar dalam sumbu XY **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.3 Evolusi Nilai k_{eff} U-Zr selama periode *burnup* 60 tahun **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.4 Reaktivitas Berlebih U-Zr 60 Tahun **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.5 Distribusi Laju Reaksi Fisi (a) BOC dan (b) EOC **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.6 Distribusi Fluks (a) BOC dan (b) EOC **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.7 Perbedaan nilai k_{eff} bahan bakar U-Zr dan U-Zr+Np 0,25% selama 60 tahun **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.8 Perubahan densitas nuklida (a) U235, (b) U238, (c) Pu239, dan (d) Np239 pada sel bahan bakar U-Zr+Np 1% **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR TABEL

Table 3.1. Spesifikasi Personal Computer yang digunakan. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.2 Desain Parameter Sel Bahan Bakar **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.3 Komposisi Bahan Bakar **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.4 Fraksi volume sel bahan bakar **Error! Bookmark not defined.**

BAB 1

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Permintaan terhadap energi listrik terus mengalami peningkatan signifikan seiring dengan pertumbuhan kebutuhan masyarakat setiap tahunnya. Hingga saat ini, energi listrik masih menjadi sumber utama yang belum dapat digantikan oleh alternatif energi lainnya (Dwiatmanto., 2016). Konsumsi listrik memiliki hubungan erat dengan peningkatan eksploitasi sumber energi fosil. Batu bara secara tidak langsung telah menimbulkan efek negatif terhadap kesehatan dan lingkungan yang disebabkan oleh SO₂, NO_x, dan logam berat merupakan salah satu contoh sumber energi fosil (Ahied., 2015).

Kemajuan dalam bidang energi nuklir merupakan langkah untuk menemukan sumber energi bersih yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Energi nuklir memiliki potensi yang besar dalam hal keselamatan dan pengolahan limbah radioaktif. Perkembangan energi nuklir memiliki keunggulan untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik manusia namun energi nuklir yang digunakan tentunya memiliki potensi ancaman kebocoran atau kecelakaan terhadap reaktor. Oleh karena itu, perlu dilakukan simulasi secara komputasi untuk mengurangi kesalahan dalam operasionalnya (Septiningsih dkk., 2020).

Energi nuklir dihasilkan melalui reaksi nuklir, yang melibatkan pemecahan atau penggabungan inti atom. Reaktor nuklir menghasilkan energi dalam jumlah besar, kemudian diproses untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu keunggulan energi nuklir adalah kepadatan energinya yang sangat tinggi. Selain itu, energi nuklir merupakan sumber energi bersih karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam skala yang besar. Pada reaktor nuklir tidak menimbulkan karbon dioksida yang langsung kontribusi pada perubahan iklim (Rozi dkk., 2023).

Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) merupakan reaktor yang menggunakan helium dan uranium sebagai bahan bakar. GFR mempunyai sistem bahan bakar tertutup dapat beroperasi pada suhu mencapai 850°C. Pada suhu yang tinggi ini, bahan bakar dapat digunakan secara efektif, memberikan potensi untuk

menghasilkan hidrogen. Penelitian mengenai GFR telah sering dilakukan, terutama

dalam analisis neutronik dengan memakai kode SRAC dan OpenMC. Metode Monte Carlo mengembangkan kode neutronik sumber terbuka yang biasanya disebut OpenMC. Metode ini berguna sebagai pemodelan simulator reaktor dan memungkinkan perhitungan reaktor dan memungkinkan perhitungan yang lebih akurat (Karomah dkk., 2023). Penelitian yang dilakukan oleh Novalianda *et al.*, pada tahun 2020 menggunakan *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) dengan pengayaan U235 sebesar 9,5% selama 10 tahun pada waktu *burnup* menghasilkan 3,083 GWd/ton dan reaktor mencapai kondisi kritis pada $k_{eff} > 1$ (1,008 - 1,051) dan $k_{inf} > 1$ (1,071 - 1,112) dengan *excess reactivity* 0,031%. Reaktor GFR dapat beroperasi selama 10 tahun dan mempunyai kondisi efektivitas dan efisiensi bahan bakar yang lebih baik karena tidak ada tambahan bahan bakar.

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji dari kinerja bahan bakar nuklir uranium yang dikombinasikan dengan 10% *Zirconium* (U-Zr) yang menggunakan perangkat lunak Monte Carlo, OpenMC. Penelitian ini menganalisis pada parameter neutronik seperti faktor multiplikasi (k_{eff}), distribusi fluks neutron, dan laju pembakaran (*burnup*) pada berbagai macam komposisi paduan terhadap U-Zr. Variasi komposisi ini diambil karena untuk memahami pengaruh kinerja pada reaktor secara keseluruhan. Pada penelitian ini mempertimbangkan aspek keselamatan dan ekonomi dengan terkaitnya penggunaan bahan bakar U-Zr.

2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana variasi komposisi paduan U-Zr mempengaruhi faktor neutronik pada sel bahan bakar?
2. Bagaimana perbedaan variasi komposisi paduan U-Zr dengan U-Zr yang ditambahkan minor aktinida terhadap sifat neutronik sel bahan bakar?

3. Batasan Masalah

1. Simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenMC dan tidak melakukan eksperimen fisik.
2. Parameter yang dibatasi pada parameter neutronik dasar, seperti k_{eff} , distribusi fluks neutron, dan distribusi laju reaksi fisi.

4. Tujuan

1. Mengevaluasi pengaruh variasi komposisi U-Zr dengan kinerja bahan bakar reaktor nuklir, tepatnya pada faktor multiplikasi k_{eff} , distribusi laju reaksi fisi dan distribusi fluks.
2. Menganalisis serta membandingkan karakteristik neutronik paduan U-Zr dengan berbagai komposisi menggunakan perangkat lunak OpenMC.

5. Manfaat

Paduan U-Zr memiliki sifat fisik dan mekanik yang unik menunjukkan potensi besar sebagai bahan bakar nuklir. Kemampuannya dalam menahan suhu tinggi dan radiasi membuatnya cocok digunakan untuk reaktor tipe GFR yang bekerja dengan neutron kecepatan tinggi. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan U-Zr dengan komposisi yang lebih optimal, sehingga meningkatkan kinerja dan keamanan reaktor nuklir di generasi yang mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahied, M. (2015). Efisiensi Material Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir LWR (*Light Water Reactor*) dan PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). *Jurnal Pena Sains*. 1(2).
- Anggoro, D. Y., Dewi, D., Nurlaila., Yuliyanto, T. A. (2013) Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 2(15).
- Baatar, T., & Glazkov, O. V. (2020). Increasing burn-up of KLT-40S fuel by introduction of neptunium. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1689, No. 1, p. 012061). IOP Publishing.
- Dwiatmanto, J. L. (2016). Penantian Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Di Indonesia. *Orbith*. 2(12), 59.
- Duderstadt, J. J., and Hamilton, J. L. (1976). *Nuclear Reactor Analysis*. Michigan: The University of Michigan.
- Handayani, H., Yulianti, Y., dan Manurung, P. (2020). Perhitungan *Burn Up* Pada Reaktor HCLWR Model Geometri Kotak Tiga Dimensi Dengan Bahan Bakar Thorium Menggunakan Kode COREBN. *Artikel Riset*.
- Karomah, I., Syarifah, D. R., Trianti, N., Arkundato, A., Rohaman, L., Maulina, W., Purwandar, E., dan Hindayat, S. U. (2023). Validasi Perhitungan Kekritisasi Pada GFR (*Gas Cooled Fast Reactor*) Menggunakan Kode OpenMC dan SRAC. *Physics of Journal*. 1(4).
- Kurniawan, M. A., Ariani, M., Monado, F., Johan, A., & Kaban, H. (2025). Efek Penambahan Plutonium pada Sel Bahan Bakar MOX terhadap Performa Reaktor GFR 250MWth. *Jurnal Fisika Unand*, 14(2), 152-159.
- Mitev, M., Filipov, K., & Nedelchev, L. (2024). Evaluation of Minor Actinides Build-up in VVER Power Reactors' Fuel Assemblies. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1380, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- Naini, H., Monado, F., dan Ariani, M. (2017). Studi Parameter Burn Up Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Metalik (U-Zr) Pada Reaktor Cepat

Berpendingin Helium. Prosding Semirata 2017 Bidanv MIPA BKS-PTN Wilayah Barat.

- Novalianda, S. (2019). Power Flattening Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U, Pu)N. *Journal of Electrical Technology*. 3(4).
- Novalianda, S., Ramadhan, A., dan Su'ud, Z. (2020). Perhitungan Burn Up Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*. 22(2).
- Paul, K., Romano, Nicholas, E., Horelik, Bryan, R., Herman., Adam, G., Nelson., Benoit, F., dan Kord, S. (2015). OpenMC: Kode Monte Carlo Terkini Untuk Penelitian dan Pengembangan. *Ann.Nucl.Energi*. 82.90-97.
- Peluzo, C. T. M. B., dan Kraka, E. (2022). *Uranium: The Nuclear Fuel Cycle and Beyond. International Journal of Molecular Sciences*. 23.
- Putri, D. C., Monado, F., dan Ariani, M. (2022). Analisis neutronik Kekritisasi Teras Reaktor Nuscale Berbahan Bakar UO₂ Dengan Menggunakan Software OpenMC. *JoP*. 1(8).
- Rafli, H., Irwanto, D., dan Su'ud, Z. (2021). Core Depletion Analysis of Long-Life CANDEL Gas-Cooled Fast Reactor Using OpenMC Code.
- Rastri, F. I., Octadamlah, S., dan Sukarman. (2024). Analisis Pengaruh Geometri Fuel Assembly Terhadap Kritikalitas dan Distribusi Fluks Neutron Dalam Teras Reaktor RSG-Gas Menggunakan OpenMC. *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir* 1(30).
- Rozi, A. F. M., Mahmudi, I., Hanum, M., dan Dewi, P. J. (2023). Penerapan Energi Nuklir Sebagai Pembangkit Listrik Indonesia Pada Tahun 2035. *Journal Unpam*. 2(3).
- Saro, L. L. B., Monado, F., dan Ariani, M. (2020). Studi Awal Distribusi Temperatur Elemen Bahan Bakar Reaktor Cepat Berpendingin Gas. *Jurnal Penelitian Saintek*. 2(25).
- Setiabudi, B. (2010). Dampak Pembangunan PLTN Terhadap Perubahan Tata Ruang Kabupaten Jepara. *Gema Teknologi*. 1(16).
- Septiningsih, I., Kurniawan, D. I., dan Pratama, B. M. (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.

Simbolon, S. (2008). *Application Iron And Aluminum Electrodes In Emission Spectrogram For Analyzing Boron And Cadmium In uranium Nuclear Fuel*. J. Tek. Bhn. Nukl. 1(4). 1-47.

Subkhi, M. N., Su'ud, Z., Waris, A. dan Permana, S. (2015). Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR) Berukuran Kecil Berumur Panjang Berbahan Bakar Thorium. *Jurnal ISTEK*, 1(9), 40-41

Sukir dan Soenarto, S. (1993). Bahaya Nuklir PLTN Terhadap Lingkungan Suatu Antisipasi Pencegahan. *Cakrawala Pendidikan*. 2.

Sutarman. (2005). Pembangunan PLTN Sebagai Satu Solusi Krisis Listrik Di Indonesia. *Buletin Alara*. 1 dan 2 (7).

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. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1493, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.

Wardhani, P. A., Kurtubi, Z. H., Afarizki, F. A., Anggraini, W., Aprilia, N., dan Nurlaela, A. (2023). Pengetahuan Masyarakat Tentang Dampak Lingkungan dan Keamanan Reaktor Nuklir: Survei di Wilayah Tangerang Selatan. 11(1).

Wulandari, S., Ylianti, Y., dan Riyanto, A. (2020). Perhitungan *Burn Up* Pada Reaktor HCLWR Model Geometri Kotak 2 Dimensi Dengan Bahan Bakar Thorium Menggunakan Kode COREBN. *Artikel Riset*.

Zuhair dan Suwoto. (2009). Studi dan Investigasi Awal Konsep Desain Reaktor Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 2(11).