

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE
GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) DENGAN BAHAN BAKAR
URANIUM METALIK (U-10%wtZr) BERBASIS OPENMC**

SKRIPSI

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



Oleh :
Nurhidayah
NIM. 08021281924040

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2023

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Nurhidayah

NIM : 08021281924040

Judul Tugas Akhir : ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE *GAS-COOLED FAST REACTOR* (GFR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM METALIK (U-10%wtZr) BERBASIS 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, 31 Juli 2023

Yang menyatakan

A 10,000 Rupiah Indonesian banknote is shown, partially obscured by a signature and a METRAI TEMPER stamp. The stamp includes the text 'METRAI TEMPER' and the number 'BE2DBAKX552872944'.

Nurhidayah

NIM. 08021281924040

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE
GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) DENGAN BAHAN BAKAR
URANIUM METALIK (U-10%wtZr) BERBASIS OPENMC**

SKRIPSI

Oleh:

NURHIDAYAH

08021281924040

Indralaya, 31 Juli 2023

Menyetujui,

Pembimbing I



Dr. Fiber Menadc, 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 PERSEMBAHAN

*“Apa yang melewatkanmu tidak akan pernah menjadi takdirku
dan apa yang telah ditakdirkan untukmu tidak akan pernah
melewatkanmu”*

- Umar bin Khattab

*“Sesungguhnya kami milik-Nya dan
hanya kepada-Nyalah kami Kembali”*

- QS. Al-Baqarah 156

*“Karena sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan.
Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”*

- QS. Al-Insyirah

*“My the best support systems are Bunda, Ayah, & Dedek.
I love you”*

- myself

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Neutronik Teras CANDLE Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) dengan Bahan Bakar Uranium Metalik (U-10%wtZr) Berbasis OpenMC**” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya. Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan tulus penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Allah SWT. yang telah memberikan petunjuk dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.
2. Kedua orang tua, Ibunda Willy Sukesih dan Ayahanda Amrullah serta adik Nur Afifah dan keluarga yang telah memberikan doa dan dukungan selama menjalankan studi.
3. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya dan sebagai Pembimbing Akademik yang telah memberikan motivasi, dukungan dan semangat selama proses perkuliahan sampai proses penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si selaku Dosen Pembimbing I yang senantiasa membimbing dan memberikan arahan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih atas kesabaran, waktu, dan dukungan yang diberikan selama proses pembuatan skripsi ini.
5. Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan saran selama pembuatan skripsi ini. Terimakasih atas kesabaran, waktu, dan dukungan yang telah diberikan selama proses pembuatan skripsi ini.
6. Bapak Drs. Hadir Kaban, S.Si., M.T., Bapak Drs. Pradanto P,DEA., dan Bapak Dr. Frinsyah Virgo, M.T. selaku Dosen Penguji yang telah

memberikan saran dan masukan yang dapat membuat penulis menjadi lebih baik lagi.

7. Seluruh dosen Jurusan Fisika Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu pengetahuan selama masa perkuliahan.
8. Kak Anas Fatur Rahman, Kak Aldi Kurniawan, Kak Indah, Kak Kristina, Dayat dan Kak Gina Mutiya yang telah bersedia untuk berbagi ilmu dan membantu penulis untuk menyelesaikan penelitian ini.
9. Dwi, Daril dan Delia yang telah berjuang bersama untuk menyelesaikan penelitian ini.
10. Dina, Dikanio, Rizki, dan Kelvin yang menjadi teman *sharing & caring*.
11. Venny, Tahta, Farhan, Mey, Iqbal, Ajeng serta jajaran *Basketball Besemah cup* sebagai *take rest*.
12. Bapak, Ibu & Mamak Es, Mama & Papa Niki yang telah menemani, mendukung, dan memberikan pelajaran.
13. Teman-teman Sahabad layo, Sidu, Fisika 2019, Fisika 2020, Fisika 2021, dan Fisika 2022 yang telah kebersamai dan memberikan semangat kepada penulis.
14. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendoakan penulis yang namanya tidak dapat disebutkan satu-persatu.
15. Terima kasih untuk diri sendiri “Nurhidayah” yang telah bertahan sampai saat ini dan semoga dikuatkan pundaknya.

Indralaya, 15 Juli 2023

Nurhidayah

08021281924040

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE
GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) DENGAN BAHAN BAKAR
URANIUM METALIK (U-10%wtZr) BERBASIS OPENMC**

**Oleh:
NURHIDAYAH
NIM. 080212181924040**

ABSTRAK

Penelitian ini melakukan analisis neutron pada teras reaktor *CANDLE Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) dengan bahan bakar uranium metalik (U-10%wtZr) Berbasis OpenMC. Analisis bertujuan untuk memahami distribusi fluks neutron dan laju reaksi fisi di teras reaktor. Hasil penelitian menunjukkan fluks neutron yang lebih tinggi pada zona bahan bakar starter akibat laju reaksi fisi yang lebih tinggi, sementara zona bahan bakar segar menunjukkan fluks neutron yang lebih rendah. Perangkat lunak OpenMC terbukti efektif dalam analisis neutron pada geometri teras reaktor yang kompleks, memberikan wawasan penting untuk merancang reaktor nuklir yang lebih aman dan efisien. Temuan ini berkontribusi dalam mengembangkan reaktor CANDLE-GFR dengan bahan bakar uranium metalik, mendukung solusi energi bersih yang berkelanjutan, sesuai dengan tuntutan energi masa depan, dan memperhatikan isu lingkungan.

Kata kunci: CANDLE, GFR, k_{eff} , distribusi fluks dan laju reaksi fisi

**NEUTRONIC ANALYSIS OF THE CANDLE
GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) CORE WITH METALLIC
URANIUM (U-10%wtZr) FUEL BASED ON OPENMC**

**By:
NURHIDAYAH
NIM. 080212181924040**

ABSTRACT

This study conducts a neutron analysis of the CANDLE Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) core with Uranium Metallic (U-10%wtZr) fuel using the OpenMC software. The analysis aims to understand neutron flux distribution and fission reaction rates in the reactor core. Results reveal higher neutron fluxes in the starter fuel zone due to increased fission reaction rates, while the fresh fuel region shows lower fluxes. The OpenMC software proves effective in neutron analysis for complex reactor geometries, providing crucial insights for safer and more efficient nuclear reactors. Findings contribute to advancing CANDLE-GFR reactors with Uranium Metallic fuel, facilitating sustainable, clean energy solutions while meeting future energy demands and addressing environmental concerns.

Keywords: CANDLE, GFR, k_{eff} , flux distribution, and fission reaction rates.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSEMBAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).....	5
2.2 Reaktor Nuklir.....	6
2.3 Bahan Bakar Nuklir.....	7
2.4 <i>Gas-cooled Fast Reactor (GFR)</i>	9
2.5 <i>Nuclear Fuel</i>	9
2.6 Faktor Multiplikasi dan Kekritisian	9
2.7 Analisis Neutronik.....	10
2.7.1 <i>Nuclear Cross Section</i>	11
2.7.2 Persamaan Transport.....	12
2.7.3 Strategi Pembakaran CANDLE (<i>Constant Axial Shape of Neutron Flux, Nuclide Densities and Power Shape During Life of Energy Production</i>).....	12
2.8 Metode Monte Carlo	14
2.9 OpenMC.....	14
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	17

3.3	Tahapan Penelitian	17
3.4	Flowchart Penelitian.....	18
3.5	Spesifikasi Desain Sel Bahan Nuklir	19
3.6	Parameter Survei	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		23
4.1	Desain Geometri Teras CANDLE <i>Gas-Cooled Fast Reactor</i> (GFR)	23
4.2	Analisis Kalkulasi Teras Reaktor	25
4.2.1	Perubahan Komposisi Bahan Bakar Uranium Metalik Teras CANDLE-GFR.....	25
4.2.2	Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff}) Teras CANDLE-GFR	27
4.2.3	Konversi Rasio (CR) Teras CANDLE-GFR.....	28
4.2.4	Distribusi Fluks Neutron pada Teras CANDLE-GFR	29
BAB V PENUTUP.....		33
5.1	Kesimpulan	33
5.2	Saran	33
DAFTAR PUSTAKA.....		35
LAMPIRAN.....		40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perkembangan PLTN	5
Gambar 2.2 Reaktor Nuklir.....	6
Gambar 2.3 Skema Pembakaran CANDLE	13
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Simulasi Program	18
Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> Penelitian	19
Gambar 3.3 Desain Radial Tampilan Teras	21
Gambar 3.4 Tampilan Aksial Teras	21
Gambar 4.1.a Desain radial tampilan teras	24
Gambar 4.1.b Desain aksial tampilan teras	24
Gambar 4.2.a Perubahan komposisi bahan bakar ²³⁵ U terhadap waktu burn up	26
Gambar 4.2.b Perubahan komposisi bahan bakar ²³⁸ U terhadap waktu burn up	26
Gambar 4.3 Perubahan k_{eff} terhadap waktu beroperasi.....	27
Gambar 4.4 Perubahan nilai Konversi Rasio	28
Gambar 4.5.a Distribusi fluks arah aksial	29
Gambar 4.5.b Distribusi fluks arah radial	30
Gambar 4.5.c Parameter distribusi fluks	30
Gambar 4.6 Distribusi laju reaksi.....	31

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Teras GFR	19
Tabel 3.2 Material	20
Tabel 3.3 Komposisi Bahan Bakar.....	20

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia yang secara geografis mirip dengan Jepang dan sangat terpengaruh oleh pergerakan lempeng tektonik, rawan terhadap gempa bumi tektonik dan masuk dalam daftar daerah rawan gempa bumi besar dan gempa yang terjadi pada tahun 1821-2018. Rancangan RSG-GAS berbasis mitigasi, yang mencakup simulasi keseimbangan stasiun yang dilakukan pada RSG-GAS untuk menentukan kapasitas dan kerentanan sistem, mempertimbangkan untuk memperbarui penilaian lokasi dalam hal kejadian eksternal. RSG-GAS terhadap ancaman eksternal seperti Fukushima Daiichi, undang-undang proyek direalisasikan dengan mempertimbangkan bahaya eksternal seperti gempa bumi dan bahaya lainnya. Untuk memperkuat kapasitas pemerintah dan pemangku kepentingan, peraturan pemerintah harus ditinjau ulang untuk menentukan tanggung jawab dan wewenang dalam menanggapi kecelakaan nuklir, memastikan keselamatan publik, dan membangun keamanan nasional (Meiliasari dkk, 2022).

Indonesia sebagai negara yang kaya sumber daya alam, tetapi masih terhambat dengan kebutuhan listrik untuk masyarakat dan apalagi tidak semua orang memiliki akses. Hal tersebut sebagai pusat perhatian pemerintah. PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) merupakan sumber energi listrik yang alternatif menawarkan beberapa keunggulan seperti biaya operasi yang rendah, keamanan dan kelestarian lingkungan. Karena bahan bakar fosil yang digunakan semakin langka. Menurut Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), semua reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir resmi di dunia memasok 17% listrik dunia. Dalam tulisan ini, analisis neutron dari reaktor cepat (GFR) berpendingin gas dan berpendingin gas helium berbasis logam uranium (U-10%wtZr) sebagai umpan bahan bakar dibahas. Ini juga menerapkan strategi CANDU yang dimodifikasi (bentuk fluks neutron aksial konstan, kerapatan nuklida dan bentuk

daya selama siklus hidup produksi listrik) ke komposisi bahan bakar nuklir reaktor ketika 100 tahun pembakaran berlangsung (Monita dkk., 2015).

Bahan bakar dari Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dimanfaatkan sebagai solusi untuk menghadapi tantangan penurunan pasokan bahan bakar. Selain itu, tenaga nuklir merupakan salah satu bentuk EBT yang telah lama digunakan dan memiliki potensi besar sebagai opsi menarik. Pada awalnya, Amerika Serikat menggunakan tenaga nuklir untuk menggerakkan kapal selam Nautilus pada tahun 1940. Fakta ini diperkuat oleh penggunaan energi nuklir dalam menggerakkan 452 kapal perang yang dioperasikan oleh lima negara. Di era teknologi saat ini, energi nuklir telah menjadi sumber pembangkit energi yang mampu menghasilkan jumlah energi yang jauh lebih besar dalam jangka panjang. Keuntungan energi nuklir juga meliputi dampak limbah dan biaya operasional yang lebih rendah, serta dianggap aman bagi lingkungan dan kehidupan manusia. (Irfan dkk., 2020).

Reaktor nuklir adalah alat yang dapat mengontrol reaksi berantai kimia yang terjadi di dalamnya (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Kontribusi tenaga nuklir untuk pembangunan berkelanjutan tanpa gas rumah kaca dapat memenuhi kebutuhan energi dunia selama lebih dari 50 tahun, terutama di negara berkembang (Permana, 2020). Menurut Ho dkk (2019), setidaknya terdapat 454 pembangkit listrik tenaga nuklir di 31 negara pada tahun 2017 dan mencakup lebih dari 10% kebutuhan listrik dunia (Azurah dkk., 2021).

Reaktor cepat berpendingin gas (GFR) menggunakan gas helium untuk pendinginan primer, reaktivitas suhu rendah, dan daerah fluks neutron cepat yang kuat. Selain itu, GFR memungkinkan penggunaan *depleted uranium* atau uranium alam sebagai bahan bakar, siklus bahan bakar tertutup dan kemungkinan daur ulang aktinida. CANDU inti awal adalah faktor terpenting saat membuat pembakaran. Setelah proses pembakaran, komposisi nuklida menjadi distribusi yang kompleks dalam arah aksial dan radial menuju inti yang seimbang. Fenomena kritisnya adalah evolusi komposisi bahan bakar ke arah aksial, yang menciptakan bahan fisil baru dan memindahkan gelombang perjalanan ke wilayah subur.

Penelitian ini menggunakan kode OpenMC untuk menghasilkan pemodelan geometris ukuran penuh dan dimensi tinggi dari File Data Perkiraan Nuklir (ENDF/B-VII.0) dan penampang energi konstan. Kode OpenMC adalah kode transpor partikel Monte Carlo *open source* yang dapat dijalankan pada komputer paralel dan dalam *mode stand-alone* untuk analisis penipisan inti. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui distribusi keausan konsumsi bahan bakar CANDLE-GFR menggunakan *open source code Monte Carlo* (Raflis dkk., 2021).

1.2 Rumusan Masalah

Melakukan analisis neutronik pada tahap awal desain reaktor Teras CANDLE-GFR dengan bahan bakar Uranium Metalik (U-10wtZr) yang menggunakan pendingin Helium. Tujuannya adalah untuk mencapai kesesuaian antara dimensi geometri bahan bakar dan inti reaktor, sehingga parameter akhir yang dihasilkan sesuai dengan faktor keamanan dan kritikalitas yang direncanakan dalam desain reaktor tersebut. Dalam analisis ini, beberapa parameter penting dari reaktor digunakan, termasuk perubahan komposisi material, faktor multiplikasi efektif, rasio konversi, distribusi fluks neutron, dan laju reaksi fisi. Semua faktor ini menjadi kunci dalam memastikan kinerja optimal serta keamanan dari reaktor yang direncanakan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini terdiri dari hal-hal berikut:

1. Melakukan perhitungan parameter neutron berdasarkan perilaku neutron di teras *Gas-Cooled Fast Reactor* menggunakan strategi pembakaran CANDLE.
2. Melakukan analisis parameter neutronik pada desain teras reaktor cepat CANDLE-GFR dengan menggunakan bahan bakar uranium metalik (U-10wtZr) selama periode operasi selama 60 tahun.

Dalam penelitian ini, fokusnya adalah pada perhitungan parameter neutron dalam kerangka reaktor *Gas-Cooled Fast Reactor* dengan menerapkan strategi pembakaran CANDLE. Analisis juga akan melibatkan parameter neutronik dalam desain teras reaktor cepat CANDLE-GFR dengan bahan bakar uranium metalik (U-10wtZr), yang akan dievaluasi selama periode operasi 60 tahun.

1.4 Tujuan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan studi Analisis Neutronik pada Teras *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) dengan menggunakan Bahan Bakar Uranium Metalik (U-10%wtZr) dan pendekatan berbasis OpenMC. Hasil perhitungan parameter yang diharapkan mencakup:

1. Faktor Multiplikasi Efektif (*effective multiplication factor*) dan *Conversion Ratio*: Penentuan faktor multiplikasi efektif adalah tujuan utama dalam analisis ini, yang mengindikasikan seberapa efektif reaktor dapat mempertahankan reaksi berantai nuklir. *Conversion ratio* juga akan dihitung, yang merupakan perbandingan antara produksi bahan bakar baru dengan bahan bakar yang terpakai.
2. Distribusi Fluks Neutron dan Distribusi Laju Reaksi Fisi: Penelitian ini juga bertujuan untuk memperoleh distribusi fluks neutron di dalam teras reaktor, yang menggambarkan sebaran intensitas neutron di berbagai wilayah teras. Selain itu, analisis akan memberikan distribusi laju reaksi fisi, yang mengukur tingkat reaksi nuklir fisi dalam teras reaktor.

Dengan memperoleh hasil perhitungan parameter-parameter tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang karakteristik neutronik dari teras reaktor GFR dengan bahan bakar Uranium Metalik (U-10%wtZr) serta kontribusinya terhadap kinerja reaktor secara keseluruhan.

1.5 Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan Desain Teras *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) yang menggunakan bahan bakar Uranium Metalik (U-10%wtZr), dengan pendekatan berbasis OpenMC, sehingga mampu mencapai desain teras yang optimal dari segi faktor keamanan dan produksi bahan bakar. Diharapkan hasil dari penelitian ini akan menghasilkan desain teras reaktor yang memiliki tingkat keamanan yang tinggi dan dapat memenuhi kriteria desain yang ideal, serta mampu menghasilkan bahan bakar dengan efisiensi dan karakteristik yang paling optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Nagata, N. Takaki and H. Sekimoto, *Ann. Nucl. Energy* 36, 562-566 (2009).
- Abdullah, A. G., Ardiansyah, N. P., & Purnama, W. (2014). *Peningkatan Kinerja Sistem Keselamatan Pasif Improvement Of Passive Safety System Performance For Nuclear Reactor With Addition Of Rvacs Component*. 10(2), 168–177. <https://doi.org/10.15294/jpfi.v10i2.3354>
- Alternative, F., & Republic, C. (2021). *System summaries*. 8–47.
- Anggoro, Y. D., Dewi, D., Yuliyanto, A. T., & Prapatan, M. (2020). *Kajian Perkembangan Pltn Generasi IV*. 15, 69–79.
- Athiqoh dkk., 2014. *Distribusi Fluks Neutron sebagai fungsi Burn-up Bahan Bakar Pada Reaktor Kartini*. Batan Press.
- Azurah, P. B., Fitriyani, D., & Permana, S. (2021). Analisis Ukuran Teras dan Rasio H/D pada Molten Salt Fast Reactor dalam Tinjauan Neutronik. *Jurnal Fisika Unand*, 10(1), 34–40. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.1.34-40.2021>
- Bastori, I., & Birmano, M. D. (2018). *Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe*. 19(2), 95–102.
- Boyd, W., Nelson, A., Romano, P. K., Shaner, S., Forget, B., & Smith, K. (2019). Multigroup Cross-Section Generation with the OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code. *Nuclear Technology*, 205(7), 928–944. <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1571828>
- Chapin, D., Kiffer, S., Nestell, J., (2004), *The Very High Temperature Reactor: A Technical Summary*, MPR Associates, Inc, Alexandria.
- Cullen, D. E., Blomquist, R. N., Dean, C., Heinrichs, D., Kalugin, M. A., Lee, M., Lee, Y.-K., MacFarlane, R., Nagaya, Y., Trkov, A., 2004. *How Accurately can we Calculate Thermal Systems? INDC(USA)-107*, International Nuclear Data Committee.
- Dian, F., dan Handayani, T., 2010. *Perancangan Kode Simulasi Untuk Analisis BurnUp 3 Dimensi Satu Siklus Pada Reaktor Pembangkit Cepat*. *Jurnal Ilmu Fisika*, 1 (2): 2-3.

- Duderstadt, J.J. dan Hamilton, L.J., 1976, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Kanada.
- Duderstadt, J.J., dan Hamilton, L.J., 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: Jhon Wiley and Sons Incorporate.
- Guo, H., Peng, X., Wu, Y., Jin, X., Feng, K., & Gu, H. (2022). Neutronics modelling of control rod compensation operation in small modular fast reactor using OpenMC. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(3), 803–810. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.017>
- H. Raflis, I. Muhammad, Z. Su'ud, A. Waris and D. Irwanto, *Int. J. Energy Res.*, 1-15 (2020). 8.
- H. Raflis, M. Ilham, Z. Su'ud, A. Waris and D. Irwanto, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1493, 012008(2020).
- H. Sekimoto, K. Ryu, Y. Yoshimura, *Nucl. Sci. Technol.* 139, 306-317 (2001).
- Ho, M., Obbard, E., Burr, P. A., Yeoh, G., 2019, *A Review on The Development of Nuclear Power Reactor*, *Energy Procedia*, Vol.160, Elsevier, hal. 459–466.
- Hoogenboom, J. E., Martin, W. R., Petrovic, B., 2011. *The Monte Carlo performance benchmark test - aims, specifications and first results*. In: International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering. Rio de Janeiro, Brazil.
- Irfan, M., Bura, R. O., & Wahyudi, D. (2020). Konsep Teknologi Reaktor Nuklir Sebagai Sistem Propulsi Kapal Perang Logistik Landing Platform Dock. *Teknologi Daya Gerak*, 3(1), 1–24. <http://jurnalprodi.idu.ac.id/index.php/TDK/article/view/533>
- Irka, F. H., & Su'ud, Z. (2015). *Analisis Burn Up pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam*. *Jurnal Ilmu Fisika | Universitas Andalas*, 7(2), 78–86. <https://doi.org/10.25077/jif.7.2.78-86.2015>.
- Lamars, J.R. and Baratta, A.J., (2001), *Introduction to Nuclear Engineering*, 3rd Ed. Prentice Hall, New Jersey.
- M. K. Saadi, A. Abbaspour and A. Pazirandeh, *Ann. Nucl. Energy* 50, 44-49 (2012).
- Meiliasari, D. P., Panjaitan, B. S., Widana, I. D. K. K., Apriadi, R. K., & Cahyadi, D. (2022). Lesson Learned Dari Kecelakaan Reaktor Nuklir Fukushima

- Daiichi Untuk Meningkatkan Mitigasi Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy (RSG-GAS). *PENDIPA Journal of Science Education*, 6(2), 493–500. <https://doi.org/10.33369/pendipa.6.2.493-500>
- Monita, N., Ariani, M., & Monado, F. (2015). Studi Awal Desain Konseptual Abdullah, A. G., Ardiansyah, N. P., & Purnama, W. (2014). *Peningkatan Kinerja Sistem Keselamatan Pasif Improvement Of Passive Safety System Performance For Nuclear Reactor With Addition Of Rvacs Component*. 10(2), 168–177. <https://doi.org/10.15294/jpfi.v10i2.3354>
- Monita, N., Ariani, M., & Monado, F. (2015). Studi Awal Desain Konseptual Reaktor Cepat Tipe GFR dengan Uranium Metal Sebagai Input Bahan Bakar. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2015*, 15–16.
- MONTI, S.,”*Overview of the International Initiatives for the Development of Innovative (GENIV) Fast Reactors*”, IAEA Education and Training Seminar on Fast Reactor Science and Technology, Argentina, 2012.
- N. Takaki, H. Watanabe, A. Namekawa and H. Sekimoto, “*Sodium Cooled CANDLE Reactor Equipped with Reactivity Control Mechanism*”, in Proceedings of the 10th International Conference GLOBAL (Makuhari, Japan, 2011).
- N. Takaki, Y. Sagawa, A. Umino and H. Sekimoto, *Start-up Fuel and Power Flattening of Sodium-Cooled CANDLE Core*, in Project of Candle Reactors (USA, 2013).
- Novalinda,S., 2019. *Power Fletting Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U,Pu)N*. *Jurnal of electrical techonology*, 3 (4) :140.
- P. K Romano and B. Forget, *Ann. Nucl. Energy* 51, 274-281 (2013).
- P.K. Romano, B. Forget, *The OpenMC Monte Carlo particle transport code*, *Ann. Nucl. Energy* 51 (2013) 274e281, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.06.040>.
- P.K. Romano, N.E. Horelik, B.R. Herman, A.G. Nelson, B. Forget, K. Smith, *OpenMC: a state-of-the-art Monte Carlo code for*

- research and development*, Ann. Nucl. Energy 82 (2015) 90e97, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.048>.
- Permana, S., 2020, *Basic design parameter optimization on water cooled thorium breeder reactor*, *Annals of Nuclear Energy*, Vol.139, Elsevier, hal. 1-8.
- Putri, C. D., Monado, F., & Ariani, M. (2022). *Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Jl. Raya Palembang-Prabumulih Km.32, Ogan Ilir,30862, Indonesia*. 8(1), 43–50.
- Raflis, H., Su'Ud, Z., Waris, A., Irwanto, D., & Takaki, N. (2021). Core depletion analysis of long-life CANDU gas-cooled fast reactor using OpenMC code. *AIP Conference Proceedings*, 2374(Iscpms 2020), 1–7. <https://doi.org/10.1063/5.0058906>.
- Romano, C., Paul, K., The, B., Monte, O., & Particle, C. (2013). *MIT Open Access Articles The OpenMC Monte Carlo particle transport code The OpenMC Monte Carlo particle transport code*. 51(January), 274–281.
- Romano, P. K., Horelik, N. E., Herman, B. R., Nelson, A. G., Forget, B., & Smith, K. (2015). OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.048>.
- Romano, P. K., Horelik, N.E., Herman, B.R., Nelson, A.G., Forget, B., dan Smith,K., 2015. *A State of The Art Monte Carlo Code For Research and Developpent*. *Annals Of Nuclear Energy*,82: 90.
- Sains, S., & Studi, B. (2022). *Desain Konseptual Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida Superkritis (S-Co₂) Dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam (U-10%Wt Zr) Skripsi*.
- Saro Laila Lutviana, B., Monado, F., & Ariani, M. (2020). *Studi Awal Distribusi Temperatur Elemen Bahan Bakar Reaktor Cepat Berpendingin Gas*. *Penelitian SAINTEK*, 25(2), 135–142. <https://journal.uny.ac.id/index.php/saintek>.
- Satchler, G. R., 1980. *Introduction to Nuclear Reactions*. London: The Macmilland Press Ltd.

- Sekimoto and K. Ryu, "A Long-Life Lead–Bismuth Cooled Reactor with CANDLE Burnup", in Proceedings of ICENES (Petten, Netherlands, 2000), pp. 198-206.
- Stacey, W. M., 2013. *Nuclear Reactor Physics*. New York: Jhon Wiley & Sons.
- Syahputra, T. S., & Suud, Z. (2017). *Startup Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbahan Bakar UN-PuN dengan Daya 800 MWth*. *Positron*, 7(1), 12–15. <https://doi.org/10.26418/positron7.1.3>.
- Tadeus, D. Y., Setiyono, B., & Setiawan, I. (2010). *Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal*. 12(1), 8–13.
- Z. Ismail, Y. Ohoka, P.H. Liem, H. Sekimoto, *Ann. Nucl. Energy* 34, 120-129 (2007).