

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE-GFR DENGAN VARIASI  
BAHAN BAKAR MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

**SKRIPSI**

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar  
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika



**Oleh :**

**GINA MUTIYA**

**NIM. 08021181823079**

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

**2022**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE-GFR DENGAN VARIASI  
BAHAN BAKAR MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar  
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

Oleh :

**GINA MUTIYA**

**08021161823079**

Indralaya, 27 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing II



Dr. Helen Rafflis

**NIP.19790804200511002**

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 di bawah ini, Mahasiswa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya:

Nama : Gina Mutiya

NIM : 08021181823079

Judul TA : Analisis Neutronik Teras CANDLE-GFR dengan Variasi Bahan Bakar Menggunakan Perangkat Lunak OpenMC

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang saya susun dengan judul tersebut adalah asli atau orisinil 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.

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

Indralaya, 27 Juli 2022

Yang menyatakan,



Gina Mutiya

NIM. 08021181823079

## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Analisis Neutronik Teras CANDLE-GFR Dengan Variasi Bahan Bakar Menggunakan Perangkat Lunak OpenMC”** dengan baik dan lancar. Penelitian tugas akhir dilaksanakan di jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya ditujukan sebagai salah satu syarat kelengkapan kurikulum syarat tugas akhir di Jurusan Fisika. Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan manfaat kedepannya dalam pengembangan penelitian yang berkaitan khususnya mengenai reaktor nuklir.

Penulis sangat menyadari dalam penulisan maupun penyusunan skripsi ini tidak terluput kekurangan dan jauh dari kata sempurna dikarenakan keterbatasan pengetahuan yang dimiliki penulis. Saran berupa kritik dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan dalam penyusunan skripsi ini. Dengan penuh rasa bersyukur, pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT atas segala rahmat yang telah dilimpahkan kepada penulis.
2. Kedua orang tua yang senantiasa memberikan doa dan dukungan moral maupun materil.
3. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si. dan bapak Dr. Helen Rafli selaku dosen pembimbing yang selalu menyempatkan waktu untuk membimbing saya menyelesaikan skripsi ini.
4. Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si. dan Dr. Netty Kurniawati, S.Si., M.Si. Selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan berupa kritik dan saran untuk menyempurnakan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Dedi Setiabudidaya selaku dosen pembimbing akademik saya yang selalu memberi saya arahan dan bimbingan selama menempuh perkuliahan di jurusan Fisika Universitas Sriwijaya.
6. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika.
7. Bapak dan ibu dosen serta staf jurusan Fisika.
8. Aldi Kurniawan, Anas Fatur Rahman, dan Canti Dwi Putri selaku teman-teman yang telah membantu saya dalam pengerjaan skripsi.

9. Teman-teman Fisika'18 yang tidak dapat saya sebutkan satu-satu yang telah membantu saya selama menjalani perkuliahan.

Inderalaya, 27 Juli 2022

Penulis

Gina Mutiya

08021181823079

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE-GFR DENGAN VARIASI  
BAHAN BAKAR MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

Oleh :

**Gina Mutiya**

**NIM. 08021181823079**

**ABSTRAK**

Penelitian ini menganalisa teras GFR dengan strategi pembakaran CANDLE dengan variasi bahan bakar yaitu Uranium Karbida (UC) dan Uranium Nitrida (UN). UC dan UN digunakan sebagai *starter fuel* dan menggunakan Uranium alam sebagai *fresh fuel*. Simulasi menggunakan metode Monte Carlo dalam program OpenMC dan menggunakan pustaka ENDF/B-VIII.0. parameter fisika yang dikalkulasikan yaitu *conversion ratio*, faktor multiplikasi efektif, laju reaksi fisi, dan distribusi fluks. Faktor multiplikasi efektif untuk tetap kritis ( $k \geq 1$ ) bagi kedua variasi bahan bakar memiliki susunan pengayaan pada UC sebesar 12%, 8%, dan 6,5% sedangkan untuk UN 13%, 9,25%, dan 7,5%. terjadi penurunan komposisi bahan fisil dan fertil sehingga menurunkan resiko terjadinya kebocoran neutron. Pembakaran dengan strategi CANDLE telah berhasil disimulasikan dengan masa pembakaran *starter fuel* terjadi pada 20 tahun pertama dan dilanjutkan dengan *fresh fuel* pada tahun berikutnya yang dapat dilihat dari laju reaksi fisi dan distribusi fluksnya. Selain itu pada Uranium Karbida dilakukan pengujian untuk variasi daya 600 MWth, 800 MWth, dan 1000 MWth untuk mengetahui perubahan terhadap Keff, CR, dan distribusi fluks.

**Kata kunci** : CANDLE, faktor multiplikasi efektif, GFR, laju reaksi fisi, distribusi fluks, OpenMC

Indralaya, 27 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing II

Pembimbing I

**Dr. Helen Rafli**

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

**NIP.19790804200511002**

**NIP.197002231995121002**

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

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

**NIP.197009101994121001**

**ANALISIS NEUTRONIK TERAS CANDLE-GFR DENGAN VARIASI  
BAHAN BAKAR MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

By :

**Gina Mutiya**

**NIM. 08021181823079**

**ABSTRACT**

This study analyzes the GFR core with a CANDLE burn up strategy with a variety of fuels, Uranium Carbide (UC) and Uranium Nitride (UN). UC and UN are used as starter fuel and natural uranium is used as fresh fuel. The simulation uses the Monte Carlo method in the OpenMC program and uses the ENDF/B-VIII.0 library. The calculated physical parameters are conversion ratio, effective multiplication factor, rate of fission reaction, and flux distribution. The effective multiplication factor to remain critical ( $k \geq 1$ ) for both variations of fuel has an enrichment arrangement at UC of 12%, 8%, and 6.5% while for UN 13%, 9.25%, and 7.5%. There is a decrease in the composition of the fissile and fertile material, thereby reducing the risk of neutron leakage. Burn up using the CANDLE strategy has been successfully simulated with the burn up period of the starter fuel occurring in the first 20 years and continued with fresh fuel in the following year which can be seen from the rate of the fission reaction and the distribution of the flux. In addition, Uranium Carbide was tested for power variations of 600 MWth, 800 MWth, and 1000 MWth to determine changes in  $K_{eff}$ , CR, and flux distribution.

**Keyword :** CANDLE, effective multiplication factor, GFR, rate of fission reaction, distribution of flux, OpenMC

Indralaya, 27 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing II

Pembimbing I



**Dr. Helen Rafliis**

**NIP.19790804200511002**



**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 PENGANTAR .....	iv
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GRAFIK .....	xii
DAFTAR ISTILAH .....	xiii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan .....	3
1.5. Manfaat .....	3
BAB II .....	5
TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir .....	5
2.2. Reaktor Nuklir .....	6
2.3. <i>Nuclear Fuel</i> .....	8
2.4. Faktor Multiplikasi dan Kekritisan .....	11
2.5. <i>Gas-cooled Fast Reactor</i> (GFR) .....	11
2.6. Analisis Neutronik .....	12
2.7. Metode Monte Carlo .....	15
2.8. OpenMC .....	16
BAB III .....	18
METODE PENELITIAN .....	18
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....	18



3.2. Alat dan Bahan .....	18
3.4. Flowchart Penelitian .....	19
3.5. Spesifikasi Desain Sel Bahan Bakar Nuklir .....	20
3.6. Parameter Survei .....	23
BAB IV .....	24
HASIL DAN PEMBAHASAN .....	24
4.1 Desain Geometri Teras .....	24
4.2 Analisis Kalkulasi Teras Reaktor .....	25
4.3. Variasi Daya .....	34
BAB V .....	37
PENUTUP .....	37
5.1. Kesimpulan .....	37
5.2. Saran .....	38
DAFTAR PUSTAKA .....	39
LAMPIRAN .....	42
A. Data Faktor Multiplikasi Efektif .....	43
B. Data Conversion Ratio selama 60 Tahun .....	47

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.2 Skema PLTN (Dwiatmanto, 2016).....	6
Gambar 2. 2 Disintegrasi berurutan 235U dan 238U (Duderstadt dan Hamilton, 1976).....	7
Gambar 2.3. Tata letak yang diusulkan untuk GFR 600 MWth dengan siklus langsung (Stainsby et al., 2009).....	12
Gambar 2.4. Skema pembakaran CANDLE (Widiawati et al., 2017).....	15
Gambar 3.1. Flowchart simulasi program.....	19
Gambar 3.2. Flowchart penelitian.....	20
Tabel 3.2 Reflektor dan Material.....	21
Gambar 3.2. Desain radial tampilan Teras.....	22
Gambar 3.3. Tampilan Aksial Teras.....	22
Gambar 4.1.a Desain radial tampilan Teras.....	24
Gambar 4.1.b Tampilan Aksial Teras.....	24
Gambar 4.2 Distribusi fluks selama 60 Tahun.....	33
Gambar 4.3 Distribusi Fluks pada Variasi Daya.....	36

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kandidat Bahan Bakar (Raflis et al., 2021).....	8
Tabel 3.1. Spesifikasi Teras GFR(Raflis et al., 2021).....	20
Tabel 4.1. a Komposisi Pengayaan Starter Fuel Uranium Karbida .....	25
Tabel 4.1. b Komposisi Pengayaan Starter Fuel Uranium Nitrida .....	25
Tabel 4.2 Data Keff Pembakaran Selama 60 Tahun .....	43
Tabel 4.3 Data Keff pada Variasi Daya 600 MWth, 800 MWth, dan 1000MWth.....	45
Tabel 4.4 Data Conversion Ratio selama pembakaran 60 Tahun .....	47
Tabel 4.5 Data Conversion Ratio variasi Daya 600 MWth, 800 MWth, dan 1000 MWth.....	49

## DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Perubahan Komposisi Material Fertile Dan Fisil .....	26
Grafik 4.2 Conversion Ratio .....	27
Grafik 4.3 Faktor Multiplikasi Efektif .....	27
Grafik 4.4 Distribusi Reaksi Fisi secara Aksial .....	28
Grafik 4.5 Perbandingan $K_{eff}$ untuk Variasi Daya 600 MWth, 800 MWth, dan 1000MWth .....	34
Grafik 4.6 Perbandingan Conversion Ratio untuk Variasi Daya 600 MWth, 800 MWth, dan 1000 MWth .....	34
Grafik 4.7 Distribusi Fluks Aksial BOL .....	35
Grafik 4.8 Distribusi Fluks Aksial EOL .....	35

## DAFTAR ISTILAH

- Fisi : Reaksi terpecahnya inti atom menjadi dua atom yang sejenis.
- Fisil : Unsur atom yang langsung terbelah ketika dikenakan neutron.
- Fertil : Unsur atom yang tidak dapat langsung terbelah jika dikenakan neutron.
- Fusi : Reaksi bergabungnya dua inti atom yang ringan membentuk inti atom yang lebih berat
- Keff : Rasio antar jumlah neutron hasil reaksi fisi terhadap jumlah neutron yang diserap ditambah neutron yang bocor.
- Pengayaan : Peningkatan persentase suatu isotop unsur.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan satu dari banyak negara yang mempunyai sumber daya alam yang melimpah misalnya batubara, minyak bumi dan gas alam (Monita et al., 2015). Persediaan energi esensial di Indonesia masih dimonopoli oleh sumber energi fosil seperti batubara, minyak, dan gas, sedangkan suplai energi baru dan terbarukan (EBT) masih sangat rendah. Mengingat cadangan bahan bakar fosil Indonesia yang terbatas, maka pemanfaatan sumber EBT perlu segera dioptimalkan (Ruslan, 2021). Seiring perkembangan zaman, evolusi tenaga nuklir sebagai energi baru terbarukan dimana memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai energi alternatif jenis baru untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Energi nuklir adalah salah satu dari pengembangan baru untuk penggunaan energi baru terbarukan yang dianggap memiliki efek merugikan yang lebih rendah terhadap lingkungan daripada energi langsung yang umum digunakan. Energi nuklir diklasifikasikan sebagai energi baru terbarukan berpotensi berkembang menjadi energi yang dapat menggantikan peran energi fosil melalui proses terstruktur berbasis pengolahan energi bersih dapat digunakan sebagai energi karbon sumber sebagai bahan dasar digunakan untuk menghasilkan energi listrik (Septiningsih et al., 2020).

Reaktor nuklir merupakan tempat di mana berlangsungnya reaksi nuklir. Dalam reaktor nuklir, terdapat dua jenis bentuk bahan bakar untuk reaktor, yaitu *pebble* dan pin. Reaksi yang terjadi di reaktor nuklir, baik untuk reaktor riset maupun untuk reaktor daya konvensional, selalu didasarkan pada fisi nuklir dengan membombardir neutron. Inti fisi yang ada di alam adalah uranium dan thorium. Reaksi nuklir ini akan menghasilkan sejumlah besar panas. Dalam reaktor daya, panas yang dihasilkan dapat digunakan untuk menghasilkan uap panas dan kemudian digunakan untuk menggerakkan *generator booster* yang mampu menghasilkan listrik (Adiwardojo et al., 2010).

Dalam membangun reaktor nuklir pertama-tama diperlukan proses simulasi untuk mendapatkan hasil yang optimal serta hasilnya dapat menjadi patokan untuk

keselamatan dan kelayakan reaktor nuklir. Ada beberapa contoh simulasi yang dapat digunakan dalam perancangan reaktor nuklir yaitu *Standard Reactor Analysis Code* (SRAC), Fortran dan OpenMC. Salah satu contoh simulasi yang banyak digunakan yaitu Monte Carlo yang memakai metode probabilitas dari bilangan acak. Open MC merupakan kode *open source* Monte Carlo terbaru yang dikembangkan oleh *Computational Reactor Physics Group* (CRPG) di *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) dari tahun 2011 (Romano et al., 2015).

Penelitian terkait desain reaktor nuklir biasanya dilihat dari berbagai aspek seperti analisis neutronik, analisis thermal hidrolis, sistem keselamatan juga pengelolaan limbah hasil nuklir. Aspek neutronik memandang perilaku neutron dalam teras reaktor selama reaktor bekerja. Kekritisan reaktor ditentukan dari bagaimana kalkulasi jumlah penyusun partikel bahan bakar nuklir juga persentase materi satu dengan lainnya sehingga reaktor dapat bekerja dengan waktu yang telah ditentukan sebelumnya. Bahan bakar nuklir yang sering digunakan adalah Uranium dan Thorium. Uranium memiliki kelebihan untuk menghasilkan energi yang besar, satu kilogram Uranium bernilai hampir sama dengan 1500 ton batubara. Pun Uranium lebih mudah bereaksi fisi dengan neutron lambat sehingga reaksi fisi berantai terus berlangsung. Uranium di alam terdiri dari tiga isotop yaitu uranium 238, uranium 235 dan uranium 234. Diantara ketiga isotop tersebut, uranium 235 memegang peranan penting sebagai sumber bahan bakar nuklir karena uranium 235 merupakan bahan bakar yang bersifat fisil (Novalinda dan Ramadhan, 2020).

Dalam penelitian sebelumnya mengkaji tentang *Core Depletion Analysis of Long-Life CANDLE Gas-cooled Fast Reactor Using OpenMC Code* oleh Rafli et al (2021). Dalam penelitian kali ini penulis mengkaji tentang Analisis Neutronik Teras CANDLE-GFR dengan Variasi Bahan Bakar Menggunakan Perangkat Lunak OpenMC.

## 1.2. Rumusan Masalah

Analisis Neutronik Teras CANDLE-GFR dengan Variasi Bahan Bakar Menggunakan Perangkat Lunak OpenMC berpendingin Helium diperlukan sebagai tahapan awal perancangan reaktor. Penyesuaian antara *fuel* dan ukuran geometri teras diperlukan agar hasil parameter akhirnya memenuhi desain faktor keamanan dan kekritisasi reaktor. Beberapa parameter kritis reaktor yang digunakan sebagai tinjauan, seperti perubahan komposisi material nuklir, faktor multiplikasi efektif dan *conversion ratio*, distribusi fluks, dan distribusi laju reaksi fisi,. Terdapat dua bahan bakar yang digunakan untuk tiap teras reaktor, yaitu Uranium Nitrida (UN) dan Uranium Karbida (UC).

## 1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat batasan masalah yaitu sebagai berikut:

1. Melakukan kalkulasi parameter neutronik berdasarkan perilaku dari neutron dalam teras *Gas-Cooled Fast Reactor* dengan strategi pembakaran CANDLE.
2. Analisis parameter neutronik desain teras reaktor cepat CANDLE-GFR dilakukan menggunakan bahan bakar berupa Uranium Nitrida (UN) dan Uranium Karbida (UC) dalam waktu operasi selama 60 tahun.

## 1.4. Tujuan

Tujuan dilakukan penelitian tentang Analisis Neutronik Teras *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) Variasi Bahan Bakar Menggunakan Perangkat Lunak OpenMC untuk mendapatkan hasil kalkulasi yang memperoleh parameter survei berupa:

1. Perubahan komposisi material nuklir,
2. Faktor multiplikasi efektif dan *conversion ratio*, serta
3. Distribusi fluks, distribusi laju reaksi fisi.

## 1.5. Manfaat

Penelitian diharapkan dapat menghasilkan Desain Teras Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) dengan bahan bakar berupa Uranium Karbida (UC) dan Uranium



Nitrida (UN) Menggunakan Perangkat Lunak OpenMC yang memenuhi desain teras yang ideal ditinjau dari faktor keselamatannya dan mendapatkan bahan bakar yang paling ideal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, M., Sihana, dan Agung, A., 2018. *Analisis neutronik high temperature reactor (HTR) dengan bahan bakar UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub> tipe prismatic berpendingin <sup>7</sup>LiFBeF<sub>2</sub>*. Seminar Nasional Quantum, 25 : 714.
- H., Rismiyanto, Sofyatiningrum, E., Hedriyanto, Widyastono, H., dan Syahril, 2016. *Buku Pintar Nuklir*. Jakarta : Batan Press.
- Athiqoh et al., 2014. *Distribusi Fluks Neutron sebagai fungsi Burn-up Bahan Bakar Pada Reaktor Kartini*. Youngster Physics Journal, 2(3) : 108.
- Boyd, W. et al., 2019. *Multigroup Cross-Section Generation with the OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code*. Nuclear Technology : 6.
- Duderstadt, J.J. dan Hamilton, L. J., 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York : John Wiley & Sons Incorporate.
- Dwiatmanto, L. J., 2016. *Penantian Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Di Indonesia*. Orbith, 2(12) : 59-60.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2010. *High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials*. Vienna : IAEA Publishing.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2012. *T* Vienna : IAEA Publishing.
- Ilham, M., Rafli, H., dan Suud, Z., 2020. *Full Core Optimization of Small Modular Gas-Cooled Fast Reactors Using OpenMC Program Code*. Journal of Physics, 1493 : 1.
- Mahfudin, I. dan Setiadipura, T., 2020. *Criticality Analysis of HTR-10 using an Open Source Monte Carlo code OpenMC*. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, 2(22) : 130.
- Martin-Del-Campo et al, 2011. *Contributions To The Neutronic Analysis Of a Gas-Cooled Fast Reactor*. Annals of Nuclear Energy, 38 : 1406.
- Moehtadi, F., Sanyoto, A. dan Setiawati A., 2007. *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Manfaat dan Potensi Bahayanya*. Jakarta: Kementerian Negara Riset dan Teknologi.
- Monita, N., Ariani, M., dan Monado, F., 2015. *Studi Awal Desain Konseptual Reaktor Cepat Tipe GFR dengan Uranium Metal Sebagai Input Bahan Bakar*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir, ISSN :2355-7524: 276.

- Novalinda, S. dan Ramadhan, A., 2020. *Pengaruh Perubahan Fraksi Volume Terhadap Kekritisan Desain Gas-Cooled Fast Reactor Berbahan Bakar Uranium Nitride*. Jurnal Fisika Unand, 4(9) : 451.
- OpenMC. *Geometri*. Diakses dari <https://docs.openmc.org/en/stable/methods/geometry.html> tanggal 29 November 2021.
- Rafli, H. et al., 2021. *Core Depletion Analysis of Long-Life CANDLE Gas-cooled Fast Reactor Using OpenMC Code*. AIP Conference Proceedings, 2374.
- Rafli, H. et al. 2021. *Comparative Study on Fuel Assembly of Modular Gas-cooled Fast Reactor using MCNP and OpenMC Code*. Journal of Physics: Conference Series, 1772 : 3
- Romano. P. K. dan Forget, B., 2013. *The OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code*. Annals of Nuclear Energy, 51 : 274-280.
- Ruslan, 2021. *Status Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan dan Opsi Nuklir Dalam Bauran Energi Nasional*. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, 1(23) : 39-42.
- Septiningsih, I. Kurniawan, I. D. dan 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: 2020.
- Sekimoto, H. Ryu, K., dan Yoshimura, Y., 2001. *CANDLE: The New Burnup Strategy*. Nuclear Science and Engineering, (139) : 307-308.
- Riska, Fitriyani, D., & Irka, F. H. 2016. *Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)*. Jurnal Fisika Unand, 5(1), 28-34.
- Kuntoro, I. (2018). *Keselamatan Reaktor Nuklir*. Jakarta: BATAN.
- Saro, B. L. L., Manado, F., dan Ariani, M., 2020. *Studi Awal Distribusi Temperatur Elemen Bahan Bakar Reaktor Cepat Berpendingin Gas*. Jurnal Penelitian Saintek, 2(25) : 136.
- Satchler, G. R., 1980. *Introduction to Nuclear Reactions*. London : The Macmillad Press Ltd.

- Stacey, W. M., 2013. *Nuclear Reactor Physics*. New York : Jhon Wiley & Sons.
- Stansby, R. et al., 2009. *Gas Cooled Fast Reactor Research and Development in the European Union*. Science and Technology of Nuclear Installations, 2009 : 2.
- Widiawati, N. et al., 2017. *Studi Perbandingan Ukuran Reflektor pada Reaktor Cepat Berpendingin Pb208-Bi dengan Skema MCANDLE*. Prosiding SKF, 2017 : 175.