

**ANALISIS SEL BAHAN BAKAR GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR)
URANIUM NITRIDE (UN) MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK
OPENMC**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar

Sarjana Sains Bidang Studi Fisika



Oleh:

NURLAILA SEPTI CHOIRUNNISA

08021281823031

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS SEL BAHAN BAKAR GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR)
URANIUM NITRIDE (UN) MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK
OPENMC**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

Disusun Oleh:

NURLAILA SEPTI CHOIRUNNISA

08021281823031

Indralaya, Mei 2022

Menyetuji

Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

Pembimbing II



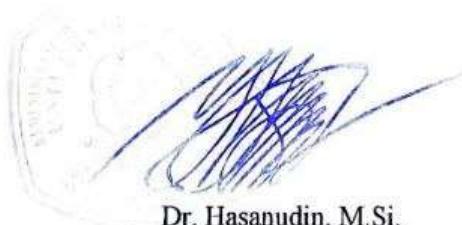
Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.

NIP. 197211252000122001

Mengetahui,

PLT. Ketua Jurusan Fisika

Wakil Dekan I Bidang Akademik



Dr. Hasanudin, M.Si.

NIP.197205151997021003

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Nurlaila Septi Choirunnisa

NIM : 08021281823031

Judul TA : Analisis Sel Bahan Bakar *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR)
Uranium Nitride (UN) Menggunakan Perangkat Lunak 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 dikemudian 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 Mei 2022

Yang menyatakan



Nurlaila Septi Choirunnisa

NIM. 08021281823031

KATA PERSEMPAHAN



Dengan mengucapkan syukur kepada Allah SWT sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini saya persembahkan untuk kedua orangtua dan adik saya yang selalu memberikan kasih sayang, semangat doa serta motivasi

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari satu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmu lah hendaknya kamu berharap”

(QS. Al-Insyirah [94]: 6-8)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan pembuatan skripsi dengan judul “**ANALISIS SEL BAHAN BAKAR GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) URANIUM NITRIDE (UN) MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**”. Adapun penyusunan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Strata 1 Sarjana Fisika.

Penulis sangat bersyukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang memberikan kesehatan sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini. Serta tidaklah terwujud tanpa adanya bimbingan, saran, motivasi, dan bantuan dalam menjalani proses penelitian dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, yang atas karunia-Nya, penulis bisa menyelesaikan penelitian ini.
2. Kepada kedua orang tua dan adik yang senantiasa memberikan do'a, dukungan, materil dan ridho mereka sehingga bisa menghantarkan penulis sampai detik ini.
3. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si dan ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si. selaku pembimbing yang selalu memberikan bantuan, arahan, serta motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Ibu Dr. Assa'idthah dan ibu Dr. Fitri Suryani, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi, saran, serta ilmunya kepada penulis sehingga skripsi ini dapat lebih baik.
5. Bapak Dr. Muhammad Irfan, M. T selaku dosen pembimbing akademik yang selalu memberikan bimbingan serta dukungan selama proses perkuliahan ini.
6. Bapak Frinsyah Virgo, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
7. Bapak dan ibu dosen serta staf Jurusan Fisika yang telah membantu dan memberikan ilmu yang sangat berharga kepada penulis selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Fisika, Universitas Sriwijaya.
8. Dr. Paul Romano, bapak Dr. Eng. Topan Setiadipura, S.Si., M.Si., dan bapak Dr. Helen Raflis, M.Eng, yang telah memberikan bantuan selama proses penelitian.

9. Kak Nurul Putri dan Kak Gofur yang telah meluangkan waktu dan membantu penulis dalam penelitian ini.
10. Teman-teman seperjuangan Aul, Mifta, Maysa, Ade, Parinza, Anewe, dan Rina yang selalu ada untuk penulis dalam suka maupun duka. Terima kasih untuk segala dukungan serta motivasinya.
11. Teman-teman belajar di kampus Ernita, Aqil, Lestiani, Anas, Aldikur yang telah menjadi tempat diskusi dan membantu penulis.
11. Teman-teman seperjuangan Fisika '18, Eliners, Asisten Lab Elektronika, kakak tingkat 2015, 2016, dan 2017, adik tingkat angkatan 2019, dan 2020 serta para anggota HIMAFIA terimakasih atas semua bantuannya.
12. Seluruh pihak yang telah membantu penulis yang tidak bisa dituliskan satu-persatu terima kasih atas segala bantuannya.

Semoga kebaikan dan dukungan yang diberikan mendapat balasan pahala dari Allah SWT. Penulis menyadari skripsi yang disusun ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu diskusi, kritik dan saran yang membangun dari pembaca dapat disampaikan melalui alamat surat elektronik penulis nscnisa16@gmail.com. Penulis berharap semoga Allah SWT memberkati skripsi ini menjadi karya yang bermanfaat bagi pembaca.

Palembang, 06 April 2022

Penulis

Nurlaila Septi Choirunnisa

08021281823031

**ANALISIS SEL BAHAN BAKAR GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) URANIUM
NITRIDE (UN) MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK OPENMC**

Nurlaila Septi Choirunnisa^{1,*}

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya,

Sumatera Selatan, Indonesia

*nscnisal6@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis sel bahan bakar pada Gas Cooled Fast Reactor (GFR) berbasis Uranium Nitride (UN) terhadap variasi komposisi dan dengan penambahan minor actinide menggunakan OpenMC. Variasi komposisi bahan bakar dilakukan dengan mengubah persentase kandungan U235 sebesar 0% hingga 10%. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar komposisi U235 menyebabkan nilai Keff dan laju reaksi semakin meningkat. Sedangkan untuk distribusi flux dibagian pusat menunjukkan sebaran neutron paling banyak dan semakin sedikit saat menjauhi pusat. Selanjutnya saat kandungan U235 berada di 5% dilakukan penambahan minor actinide yang berupa Am241 dan Cm244. Penambahan minor actinide ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan uranium dan memanfaatkan limbah nuklir.

Kata Kunci : bahan bakar nuklir, faktor multiplikasi efektif (Keff), laju reaksi fisi, distribusi flux, minor aktinida, OpenMC.

Indralaya, 27 Mei 2022

Menyetujui:

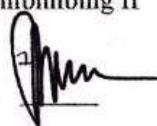
Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

Pembimbing II



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

NIP. 197211252000122001

Mengetahui,

PLT. Ketua Jurusan Fisika

Wakil Dekan I Bidang Akademik



Dr. Hasanudin, M.Si.

NIP. 197205151997021003

**FUEL CELL ANALYSIS OF GAS-COOLED FAST REACTOR (GFR) URANIUM
NITRIDE (UN) USING OPENMC SOFTWARE**

Nurlaila Septi Choirunnisa^{1,*}

¹*Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Science, University of Sriwijaya, South Sumatera, Indonesia*

*nschnisa16@gmail.com

ABSTRACT

This study analyzes fuel cells in Gas Cooled Fast Reactor (GFR) based on Uranium Nitride (UN) against variations in composition and with the addition of minor actinide using OpenMC. Variations in fuel composition are carried out by changing the percentage of U235 content from 0% to 10%. The results showed that the greater the composition of U235, the higher the Keff value and the reaction rate. Meanwhile, the flux distribution in the center shows the distribution of the most neutrons and the fewer as they move away from the center. Furthermore, when the U235 content was at 5%, minor actinide was added in the form of Am241 and Cm244. The addition of this minor actinide aims to reduce the use of uranium and utilize nuclear waste.

Keywords: nuclear fuel, effective multiplication factor (Keff), rate of fission reaction, flux distribution, actinide minor, OpenMC. **Keywords:** Li₄Ti₅O₁₂, Sol Gel, Surface Modification, Sugar

Indralaya, 27 Mei 2022

Menyetujui:

Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

Pembimbing II



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

NIP. 197211252000122001

Mengetahui,

PLT. Ketua Jurusan Fisika

Wakil Dekan I Bidang Akademik



Dr. Hasanudin, M.Si.

NIP.197205151997021003

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	I
KATA PERSEMAHAN	III
KATA PENGANTAR.....	III
ABSTRAK	VI
ABSTRACT.....	VII
DAFTAR ISI.....	VIII
DAFTAR GAMBAR.....	X
DAFTAR TABEL	XI
DAFTAR GRAFIK	XII
DAFTAR ISTILAH	XIII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).....	4
2.2. Reaktor Nuklir	5
2.3. Komponen Utama Reaktor Nuklir	6
2.4. <i>Gas-Cooled Fast Reactor</i> (GFR)	7
2.5. Bahan Bakar Nuklir	8
2.6. Aktinida Minor (Minor Actinide, MA).....	10
2.6.1. Transmutasi Aktinida Minor	10
2.6.2. Americium (Am) dan Curium (Cm)	11
2.7. Analisis Neutronik	11
2.7.1. <i>Nuclear Cross-Section</i> (Tampang Lintang Nuklir).....	11
2.7.2. Tampang Lintang Mikroskopik.....	12
2.7.3. Persamaan Difusi Neutron	13
2.8. Burn Up.....	13
2.9. Faktor Multiplikasi Neutron	15

2.10. OpenMC.....	16
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	19
3.2. Alat dan Bahan.....	19
3.3. Tahapan Penelitian.....	19
3.4. Diagram Alir Penelitian	19
3.5. Spesifikasi Sel Bahan Bakar.....	21
3.6. Parameter Survei.....	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1. Desain Sel Bahan Bakar <i>Gas Cooled Fast Reactor</i> (GFR)	23
4.2. Analisis Perhitungan Sel Bahan Bakar	23
4.2.1. Faktor Multiplikasi Efektif (Keff).....	24
4.2.2. Faktor Multiplikasi Efektif (Keff) Dengan Penambahan <i>Minor Actinide</i>	27
4.2.3. Laju Reaksi Fisi	30
4.2.4. Laju Reaksi Fisi Dengan Penambahan <i>Minor Actinide</i>	33
4.2.5. Distribusi Fluks	37
4.2.6. Distribusi Fluks Dengan Penambahan <i>Minor Actinide</i>	38
BAB V PENUTUP.....	42
5.1. Kesimpulan	42
5.2. Saran	42
DAFTAR PUSTAKA	43
LAMPIRAN.....	46
A. Data Komposisi Bahan Bakar	47
B. Data Hasil Performa Sel Bahan Bakar	48
C. Kode Input Bahan Bakar	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	4
Gambar 2. 2. Gas Cooled Fast Reactor (GFR)	7
Gambar 2. 3. Siklus Bahan Bakar Nuklir.....	9
Gambar 2. 4. Skema reaksi pada inti radioaktif	14
Gambar 2. 5. Tampilan software OpenMC	18
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian	20
Gambar 3. 2. Diagram Alir Pemrograman	20
Gambar 3. 3. Geometry Pin Sel Hexagonal	21
Gambar 4. 1. Desain sel bahan bakar.....	23
Gambar 4. 2. Distribusi fluks pada bahan bakar UN dengan variasi pengayaan Uranium hingga 10%	38
Gambar 4. 3. Distribusi fluks pada bahan bakar UN dengan variasi penambahan Am241 secara berurutan sebesar 0.5% hingga 6%	40
Gambar 4. 4. Distribusi fluks pada bahan bakar UN dengan variasi penambahan Cm244 secara berurutan sebesar 0.5% hingga 6%	41

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Isotop Uranium Alam.....	8
Tabel 3. 1. Parameter Bahan Bakar Reaktor GFR	21
Tabel 4. 1. Komposisi bahan bakar UN	47
Tabel 4. 2. Komposisi bahan bakar UN pada pengayaan 5% dengan penambahan <i>minor actinide</i>	47
Tabel 4. 3. Komposisi bahan bakar UN pada pengayaan 7% dengan penambahan <i>minor actinide</i>	48
Tabel 4. 4. Nilai koefisien efektivitas untuk bahan bakar UN	48
Tabel 4. 5. Nilai koefisien efektivitas untuk bahan bakar UN dengan penambahan Am241	50
Tabel 4. 6. Nilai koefisien efektivitas untuk bahan bakar UN dengan penambahan Cm244	52
Tabel 4. 7. Nilai koefisien efektivitas untuk bahan bakar pada pengayaan 7% dengan penambahan Am241	53
Tabel 4. 8. Nilai koefisien efektivitas untuk bahan bakar pada pengayaan 7% dengan penambahan Cm244	55

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4. 1. Faktor Multiplikasi Efektif (Keff) pada bahan bakar UN selama 20 tahun waktu burnup.....	24
Grafik 4. 2. Jumlah atom U235 dan U238 terhadap periode burn up	25
Grafik 4. 3. Jumlah atom Pu239 terhadap periode burn up	25
Grafik 4. 4. Jumlah atom Am241 dan Cm244	26
Grafik 4. 5. Jumlah atom Xe135	26
Grafik 4. 6. Faktor Multiplikasi Efektif (Keff) dengan penambahan Am241 selama 20 tahun waktu burnup.....	27
Grafik 4. 7. Jumlah atom Am241 terhadap periode burn up.....	28
Grafik 4. 8. Faktor Multiplikasi Efektif (Keff) dengan penambahan Cm244 selama 20 tahun waktu burnup.....	28
Grafik 4. 9. Jumlah atom Cm244	29
Grafik 4. 10. Faktor Multiplikasi Efektif (Keff) pada pengayaan 7% dengan penambahan Am241 selama 20 tahun waktu burnup	29
Grafik 4. 11. Faktor Multiplikasi Efektif (Keff) pada pengayaan 7% dengan penambahan Cm244 selama 20 tahun waktu burnup.....	30
Grafik 4. 12. Laju reaksi fisi pada bahan bakar UN dengan variasi pengayaan ...	32
Grafik 4. 13. Laju reaksi fisi pada bahan bakar UN dengan variasi penambahan Am241 secara berurut sebanyak 0,5% hingga 6%	34
Grafik 4. 14. Laju reaksi fisi pada bahan bakar UN dengan variasi penambahan Cm244 secara berurut sebanyak 0,5% hingga 6%	36

DAFTAR ISTILAH

- Burn Up : banyaknya energi yang dihasilkan oleh bahan bakar selama reaktor beroperasi
- Distribusi Flux : Kuantitas neutron dalam sebaran luasan satu sentimeter persegi dalam detik.
- Fertil : bahan/unsur yang tidak dapat membela namun dapat berubah menjadi bahan fisil dengan penyerapan neutron
- Fisi : reaksi pembelahan inti atom menjadi inti atom lainnya yang lebih ringan disertai dengan timbulnya energi
- Fisil : bahan/unsur yang dapat memberikan reaksi fisi apabila berinteraksi dengan neutron termal
- Fusi : reaksi penggabungan antara inti atom ringan menjadi inti atom yang lebih berat disertai dengan pelepasan energi
- Keff : Konstanta yang menunjukkan perbandingan jumlah neutron dari satu generasi ke generasi berikutnya.
- Laju reaksi fisi : Banyaknya reaksi fisi yang terjadi dalam waktu per detik.
- Pengayaan : proses peningkatan persentase komposisi bahan bakar

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penemuan sumber energi nuklir telah membawa banyak kemajuan seiring dengan peningkatan kebutuhan energi manusia. Salah satu pemanfaatan energi nuklir ini dapat digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Dengan adanya peningkatan kebutuhan energi di masa yang akan datang tentunya PLTN ini dapat menjadi salah satu alternatif. Dari tahun 1950-an hingga sekarang, PLTN telah berevolusi dari Generasi I hingga Generasi IV. *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) merupakan jenis perkembangan dari PLTN generasi IV yang memanfaatkan neutron cepat dan menggunakan Helium (He) sebagai pendinginnya (Anggoro et al., 2013).

Di dalam reaktor nuklir terjadi proses pembakaran bahan bakar yang berlangsung di teras reaktor. Pada teras reaktor terdiri dari ratusan *assembly* tempat dimana terjadinya reaksi fisi. *Assembly* merupakan kumpulan sel bahan bakar sehingga posisi letak bahan bakar menjadi peranan penting dalam perhitungan desain reaktor yang sesuai dengan yang diinginkan (Novalianda dan Ramadhan, 2020). Saat ini salah satu bahan bakar utama yang digunakan dalam teras reaktor nuklir adalah Uranium-235 (U-235). Namun dikarenakan jumlah Uranium-235 yang terbatas, agar densitas atomnya bertambah diperlukan proses pengayaan (*enrichment*) (IAEA, 2014).

Dalam mendesain suatu reaktor nuklir tentunya membutuhkan perhitungan analisis yang akurat, seperti menggunakan analisis neutronik, analisis termal, serta analisis mengenai keselamatan reaktor nuklir. Analisis neutronik ini dapat berupa pemantauan dari rasio atau jumlah bahan bakar yang sedang digunakan. Salah satu bentuk perhitungan dari analisis neutronik ini adalah dengan menggunakan perhitungan burn-up (Novalianda et al., 2020). Pada penelitian ini analisis neutronik dihitung dengan software OpenMC. OpenMC dapat mensimulasikan karakteristik neutron dalam reaktor menggunakan metode monte carlo dan menggunakan energi penampang kontinu.

Penelitian reaktor nuklir sudah banyak dilakukan, dalam penelitian Novalianda et al., 2020 melakukan penelitian pada reaktor GFR (*Gas Cooled Fast Reactor*)

menggunakan pengayaan ^{235}U 1% sampai 10% selama 50 tahun waktu burnup menghasilkan 167 GWd/ton level burnup. Pada penelitian Syarifah et al., 2021 *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) dapat bertahan selama 20 tahun dengan nilai *excess reactivity* kurang dari 2% tanpa melakukan pengisian ulang bahan bakar. Karena hal tersebut maka penelitian ini dilakukan dengan waktu burn up selama 20 tahun. Pada penelitian ini juga dilakukan penambahan Minor Aktinida (MA) pada Uranium Nitride yang bertujuan untuk mengurangi resiko *proliferation* material nuklir dan sebagai pemanfaatan limbah nuklir sehingga dapat menghemat penggunaan uranium

1.2. Perumusan Masalah

Melalui penelitian ini penulis berkesempatan untuk membahas tentang bagaimana analisis sel bahan bakar pada *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) dengan menggunakan OpenMC yang berbasis metode monte carlo untuk mendapatkan hasil desain reaktor yang dapat memenuhi kriteria keselamatan reaktor nuklir dan mampu beroperasi dalam jangka waktu yang panjang.

1.3. Batasan Masalah

Hasil analisis sel bahan bakar yang dilakukan pada penelitian ini hanya berupa faktor multiplikasi efektif (K_{eff}), distribusi fluks, dan laju reaksi fisi yang terjadi pada saat burn-up selama 20 tahun dengan menggunakan OpenMC.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian analisis sel bahan bakar pada *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) ini adalah:

- a. Menganalisis desain sel bahan bakar pada *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) dengan menggunakan variasi bahan bakar Uranium Nitride dan melakukan penambahan minor aktinida berupa Americium (Am) dan Curium (Cm).
- b. Mengetahui hasil desain dari segi faktor multiplikasi efektif (K_{eff}), distribusi fluks, dan distribusi laju reaksi yang terjadi pada saat burn-up selama 20 tahun dengan menggunakan OpenMC..

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini untuk dapat mengetahui hasil analisis sel bahan bakar dengan variasi Uranium Nitride dan dengan penambahan Minor

Aktinida (MA) agar menghasilkan desain reaktor yang aman berdasarkan standar keselamatan reaktor nuklir melalui perhitungan menggunakan OpenMC.

DAFTAR PUSTAKA

- Afshari, F dan Dehghanpour, H. (2018). *A Review Study On Cooling Towers; Types, Performance and Application.* Turkey: Karadeniz Technical University.
- Adiwardojo, Lasman, A.N., Ruslan, Parmanto, E.M, dan Effendi, E. (2010). *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya.* Jakarta: Pusat Diseminasi Iptek Nuklir BATAN.
- Anggoro, Y. D., Dewi, D., Nurlaila, dan Yulianto, A. T., (2013). Kajian Pengembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 2(15), 70-75.
- batan, M., Shafii, M. A., Abdullah, A. G., dan Su,ud, Z. (2010). Studi Awal Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbasis Bahan Bakar Uranium Alam. *Proceding Seminar dan Workshop Nasional Pendidikan Teknik Elektro (SWNE).*
- Athiqoh, F., Budi, W. S., Anam, C. dan Tjiptono, T. W. (2014). Distribusi Fluks Neutron sebagai Fungsi Burn-Up Bahan Bakar pada Reaktor Kartini. *Youngster Physics Journal*, 2(3), 108.
- Batan, 2015. Sejarah Reaktor Nuklir. <https://www2.sttn-batan.ac.id/berita-157-sejarah-reaktor-nuklir.html>. (diakses pada 20 Oktober 2021).
- Duderstadt, J. J., and Hamilton, J. L. (1976). Nuclear Reactor Analysis. Michigan: The University of Michigan.
- Fitriyani, D. (2014). Analisis Neutronik Pada Reaktor Cepat Dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC Dan MOX). *Jurnal Fisika Unand*, 3(1), 1–2.
- Fitriyani, D. dan Handayani, T. (2010). Perancangan Kode Komputasi Untuk Analisis Burnup 3 Dimensi Satu Siklus Pada Reaktor Pembiak Cepat. *Jurnal Ilmu Fisika*, 1(2), 6
- IAEA. (2021). International Status and Prospects for Nuclear Power 2021. GOV/INF/2021/32-GC(65)/INF/6.
- 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.

- Lestari, M. A. dan Fitriyani, D. (2014). Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC Dan Mox Terhadap Nilai Breeding Ratio Pada Reaktor Pembiak Cepat. *Jurnal Fisika Unand*, 1(3), 14-15.
- Mubarika, S., Munir, M., Firdausi, K. S. dan Widarto. (2006). Analisis dan Penentuan Distribusi Fluks Neutron Thermal Arah Aksial dan Radial Teras Reaktor Kartini dengan Detektor Swadaya. *Jurnal Sains dan Matematika*, 4(14), 155.
- Novalianda, S. (2019). Power Flattening Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U, Pu)N. *Journal of Electrical Technology*, 3(4), 140-141.
- Novalianda, S., Dwiyanto., Ariani, M. dan Su'ud, Z. (2018). Optimasi Desain Teras Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) Uranium Nitride (UN) Dengan Plutonium. Seminar Nasional Royal (SENARI), 998, 679-680.
- Novalianda, 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), 452.
- Novalianda, S., Ramadhan, A., dan Su'ud, Z. (2020). Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*, 22(2), 51–52.
- OECD. (2014). *Minor Actinide Burning in Thermal Reactors: A Report by the Working Party on Scientific Issues of Reactor Systems*. Paris: OECD Publishing,
- Pandi, Y. L., Pramono. Y. dan Aji. B. (2019). *Buku Saku Reaktor Nuklir: Pemanfaatan Dan Pengawasan*. Jakarta: Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).
- Richardina, V., Budi, W. S., dan Tjiptono, T. W. (2015). Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar UO₂ dengan Moderator H₂O dan Pendingin H₂O. *Berkala Fisika*, 18(3), 97.
- Riska., Fitriyani, D. dan Irka, F. H. (2016). Analisis Neutronik Pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) Dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand*, 1(5), 31.

- Romano, P. K. dan Forget, B. (2013). The OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code. *Annals of Nuclear Energy*, 51, 274–281.
- Septi, R., Shafii, M. A., Irka, F. H. dan Su'ud, Z. (2018). Analisis Kekritisan Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR) Berdasarkan Variasi Bahan Bakar. *Jurnal Fisika Unand*, 1(7), 71.
- Shafii, M. A. (2013). Beberapa Metode Penyelesaian Persamaan Transport Neutron Dalam Reaktor Nuklir. *Jurnal Ilmu Dasar*, 2(12), 62.
- Soentono, S. (1998). Bahan-Bahan Untuk Industri Reaktor Nuklir. *Prosiding Pertemuan ilmiah Sains Materi III*, 22.
- 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.
- Suhaemi, T. (2016). Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Menopang Kebutuhan Energi Listrik Nasional. *Prosiding Seminar Nasional Teknik*, 168–169.
- Suwoto dan Zuhair. (2012). Studi dan Observasi Awal Kebutuhan Data Nuklir untuk Reaktor Generasi IV (Gen-IV). *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, 1(1), 21.
- Syarifah, R. D., MH, N. N., Hanifah, Z., Karomah, I., Mabruri, A. M., dan Arkundato, A. (2021). Analisis Fraksi Volume Bahan Bakar Uranium Karbida Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan SRAC Code. *Jurnal Jaring SainTek*, 3(1), 14.
- Syarip. (2018). *Kinetika Dan Pengendalian Reaktor Nuklir*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Tran, H. N., Kato, Y., Hoang, V. K. dan Hoang, S. M. T. (2018). Characteristics Of A Gas-Cooled Fast Reactor With Minor Actinide Loading. *Nuclear Science and Technology*, 2(8), 1-2.
- Waris, A. (2017). *Pengelolaan Bahan Bakar Dan Limbah Nuklir: Menuju Zero Release Nuclear Waste*. Bandung: Forum Guru Besar ITB.
- Zuhair. (2012). Studi Skenario Transmutasi Plutonium dan Aktinida Minor dengan Reaktor Termal. *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, 1B(1), 15-16.