

**ANALISIS NEUTRONIK TINGKAT KEKRITISAN TERAS REAKTOR
NUSCALE BERBAHAN BAKAR UO_2 DENGAN MENGGUNAKAN
SOFTWARE OPENMC**

SKRIPSI

*Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika*



Oleh:

CANTI DWI PUTRI

NIM.08021381823051

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

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS NEUTRONIK TINGKAT KEKRITISAN TERAS REAKTOR
NUSCALE BERBAHAN BAKAR UO_2 DENGAN MENGGUNAKAN
SOFTWARE OPENMC**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

Oleh:

**CANTI DWI PUTRI
NIM.08021381823051**

Indralaya, 7 Juni 2022

Menyetujui,

Pembimbing II



**Dr. Menik Ariani.,S.Si.,M.Si
NIP.19721125200122001**

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

Nama : Canti Dwi Putri

NIM : 08021381823051

Judul TA : Analisis Neutronik Tingkat Kekritisan Teras Reaktor Nuscale
Berbahan Bakar UO_2 dengan Menggunakan Software 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 ditetapkan.

Indralaya, Juli 2022

Yang Menyatakan



Canti Dwi Putri

NIM.08021381823051

KATA PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan mengucapkan syukur kepada Allah SWT sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini ku persembahkan untuk kedua orangtuaku, kakaku, adikku, dan keluarga besarku telah memberikan kasih sayang, doa, semangat, dan motivasi untuk menyelesaikan skripsi ini

Sesungguhnya Allah selalu bersama dengan orang yang sabar

(Q.S Al-Baqarah: 153)

Jangan bersedih , sesungguhnya Allah selalu bersama kita

(Q.S At-Taubah: 40)

Allah SWT tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.

(Q.S Al-Baqarah: 286)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warhmatullahi Wabarokatuh

Puji dan syukur ke hadirat Allah SWT, karena rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Neutronik Tingkat Kekritisn Teras Reaktor Nuscale Berbahan Bakar UO_2 dengan Menggunakan Software OpenMC**”. Penulisan skripsi ini bertujuan untuk melengkapi persyaratan kurikulum di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyusunan skripsi ini masih terdapat beberapa kekurangan, karena keterbatasan wawasan serta pengetahuan yang dimiliki oleh penulis. Skripsi tidak mungkin dapat terselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan dan dukungan yang telah diberikan oleh berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat dan karunia-Nya yang dilimpahkan kepada penulis.
2. Kedua orang tua (Bapak Supirman dan Ibu Sunarmi), Kakak (Fenty Ike Kresti), dan Adik (Najwa Julia Ramadhani) yang selalu memberikan doa dan dukungan sepenuhnya.
3. Bapak Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T. selaku ketua jurusan dan Dr. Supardi, S.Pd., M.Si. selaku sekretaris Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Dosen Pembimbing I dan Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing II, yang selalu memberikan ilmu, semangat, serta memberikan arahan sehingga penulis bisa menyelesaikan penyusunan skripsi.
6. Ibu Dr. Assa'idah, M.Si dan Ibu Dr. Fitri Suryani, S.Si M.Si selaku dosen penguji yang memberikan kritik serta saran dalam penulisan skripsi.

7. Seluruh Dosen dan Staf administrasi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
8. Dr. Paul Romano beserta Tim dan Dr. Eng Topan Setiadipura, S.Si., M.Si yang telah memberikan bantuan selama proses penelitian.
9. Alumni Fisika Angkatan 16 (Nurul Putri Rohmadhani), dan Alumni Fisika Angkatan 17 (Indah Sari) yang telah membantu penulis dan tempat diskusi dalam penelitian tugas akhir.
10. Kepada Park Chanyeol dan 8 member exo lainnya yang telah memberikan motivasi dan semangat kepada penulis.
11. Kepada Dea, dan Gina sebagai tempat berdiskusi dan mendukung serta memberikan semangat dalam menghadapi berbagai rintang dalam proses penulisan skripsi ini.
12. Kepada Ibu Jum dan Pak de yang telah memberikan dukungan serta bantuan kepada penulis.
13. Teman- teman seperjuangan Fisika 18, Eliners, Asisten Laboratorium Eksperimen Fisika, dan Himafia, serta seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga kebaikan serta dukungan yang diberikan kepada penulis mendapat pahala dari Allah SWT. Penulis menyadari penulisan skripsi ini jauh dari kata sempurna dan masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu kritik serta saran yang membangun dari pembaca dapat ditampilkan melalui alamat surat elektronik penulis cantidwiputri.13@gmail.com. Penulis berharap semoga Allah SWT memberkati penulisan skripsi ini dan bermanfaat bagi pembaca.

Indralaya, 7 Juni 2022

Penulis

Canti Dwi Putri
NIM.08021381823051

**ANALISIS NEUTRONIK TINGKAT KEKRITISAN TERAS REAKTOR
NUSCALE BERBAHAN BAKAR UO_2 DENGAN MENGGUNAKAN
SOFTWARE OPENMC**

Oleh:

Canti Dwi Putri

NIM.08021381823051

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis desain reaktor nuscale dengan bentuk pin sel, assembly, dan teras, dengan bahan bakar nuklir berupa uranium dioksida yang divariasikan dengan mengubah persentase sebanyak 0% hingga 7% menggunakan program OpenMC. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan desain reaktor serta perhitungan faktor multiplikasi efektif, laju reaksi, dan distribusi fluks selama 2 tahun pembakaran. Hasil perhitungan untuk faktor multiplikasi efektif dan laju reaksi menyatakan bahwa semakin besar persentase pengayaan uranium maka akan semakin besar pula nilai pada kedua parameter. Sedangkan distribusi fluks neutron memiliki nilai terbesar terdapat pada wilayah tengah bahan bakar. Dengan dilakukannya analisis reaktor nuscale ini yang nantinya dapat digunakan sebagai acuan dalam penyusunan teras reaktor yang aman dan efisien.

Kata Kunci : Faktor Multiplikasi Efektif, Laju Reaksi, Distribusi Fluks.

Indralaya, 25 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing II



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si
NIP.19721125200122001

Pembimbing I



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

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika**



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

**NEUTRONIC ANALYSIS OF THE CRITICALITY LEVEL OF THE
NUSCALE REACTOR CORE WITH UO₂FUEL USING THE OPENMC
SOFTWARE**

By:

Canti Dwi Putri

NIM.08021381823051

ABSTRACT

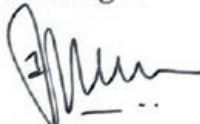
This study analyzes the design of a nuscale reactor with the shape of a pin cell, assembly, and core, with nuclear fuel in the form of uranium dioxide which is varied by changing the percentage from 0% to 7% using the OpenMC program. This research was conducted to obtain the reactor design and the calculation of the effective multiplication factor, reaction rate, and flux distribution for 2 years of combustion. The calculation results for the effective multiplication factor and reaction rate state that the greater the percentage of uranium enrichment, the greater the value for both parameters. While the distribution of neutron flux has the largest value in the middle region of the fuel. By doing this Nuscale reactor analysis which can later be used as a reference in the preparation of a safe and efficient reactor core.

Keywords:Effective Multiplication Factor, Reaction Rate, Flux Distribution.

Indralaya, 25 Juli 2022

Menyetujui,

Pembimbing II



Dr. Menik Ariani.,S.Si.,M.Si
NIP.19721125200122001

Pembimbing I



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

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika**



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

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
KATA PERSEMBAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR ISTILAH	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJUAN PUSTAKA	4
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	4
2.2 Reaktor Nuklir	5
2.2.1 Teras Reaktor	6
2.2.2 Jenis-Jenis Reaktor Nuklir	6
2.3 Bahan Bakar Nuklir	6
2.3.1 Jenis-jenis Bahan Bakar	7
2.4 Reaksi Fisi	8
2.4.1 Tampang Lintang Nuklir (Nuclear cross sections)	9
2.5 Faktor Multiplikasi dan Kekritisan Nuklir	10
2.6 Analisis Neutronik	11
2.6.1 Persamaan Transport Neutron	11
2.6.2 Persamaan Burn-Up	12
2.7 Pressurized Water Reactor (PWR)	13

2.8 Small Modular Reactor (SMR).....	14
2.9 Nuscale.....	15
2.9.1 Sejarah Pengembangan Reaktor Nuscale.....	15
2.9.2 Karakteristik Nuscale.....	15
2.9.3 Prinsip Kerja Nuscale.....	16
2.10 Metode Monte Carlo.....	17
2.10.1 OpenMC.....	18
BAB III METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	21
3.2 Alat dan Bahan.....	21
3.3 Tahapan Penelitian.....	21
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.5 Spesifikasi Bahan Bakar.....	24
3.6 Parameter Survei.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
4.1 Desain Reaktor Nuscale.....	26
4.1.1 Desain Model Pin cell.....	26
4.1.2 Desain Model Assembly.....	26
4.1.3 Desain Model Teras.....	27
4.2 Analisis Perhitungan Bahan Bakar.....	28
4.2.1 Faktor Multiplikasi Efektif (Keff).....	28
4.2.2 Laju Reaksi.....	30
4.2.3 Distribusi Fluks Neutron.....	32
BAB V PENUTUP.....	35
5.1 Kesimpulan.....	35
5.2 Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA.....	36
LAMPIRAN.....	39
A. Data Hasil Performa Bahan Bakar Nuklir.....	40
B. Data Hasil Distribusi Fluks Neutron.....	41
C. Kode Input Desain Reaktor Nuscale.....	42
a Pincell.....	42

b) Assembly	47
c) Teras	50
d) Laju Reaksi	74
e) Distribusi Fluks	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	4
Gambar 2.2 Reaksi Fisi Berantai	9
Gambar 2.3. Faktor Multiplikasi	11
Gambar 2.4 Analisis Burn-up	13
Gambar 2.5 Pressurized Water Reactor (PWR)	14
Gambar 2.6 Tampang Lintang Nuscale	16
Gambar 2.7 Prinsip Kerja Nuscale	17
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 3.2 Diagram Alir Pemrograman	23
Gambar 3.3 Fuel Assembly	24
Gambar 3.4 Teras reaktor dari sisi samping	25
Gambar 3.5 Teras reaktor dari sisi atas	25
Gambar 4.1 Desain Pincell Reaktor Nuscale	26
Gambar 4.2 Desain Assembly Reaktor Nuscale	26
Gambar 4.3 Desain Teras Nuscale Tampak Atas	27
Gambar 4.4 Teras Nuscale Tampak Samping	27
Gambar 4.5 Faktor Multiplikasi Efektif Variasi Pengayaan 0% Hingga 7% 31	
Gambar 4.8 Distribusi Fluks Variasi Pengayaan 0% Hingga 7%	33

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Bahan Bakar Reaktor Nuscale.....	24
Tabel 4.1 Nilai Rata-rata Distribusi Fluks	34
Tabel 4.2 Nilai Koefisien Efektivitas	40
Tabel 4.3 Nilai Distribusi Fluks Variasi Pengayaan 0% Hingga 7%.....	41

DAFTAR ISTILAH

Burn Up	:Total energi yang dilepaskan perunit masa bahan bakar sebagai hasil pembakaran bahan bakar.
Fisi	:Reaksi yang terjadi pada inti berat berubah menjadi inti yang lebih ringan.
Fisil	:Bahan bakar yang dapat mempertahankan reaksi fisi berantai dengan menggunakan energi termal.
Neutron	:Sub partikel atom yang tidak memiliki muatan.
Teras	:Tempat terjadinya pembakaran bahan bakar berlangsung.
Laju Reaksi	:Besaran yang menyatakan jumlah reaksi fisi yang terjadi didalam teras perdetik.
OpenMC	:Program yang berbasis metode Monte Carlo.
Distribusi Fluks	:Besaran yang menyatakan jumlah neutron yang tersebar pada suatu luasan persegi perdetik.
Pengayaan	:Proses peningkatan konsentrasi isotop suatu unsur pada bahan bakar.
Keff	:Perbandingan populasi neutron yang dihasilkan dari suatu generasi dibagi dengan generasi sebelumnya.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia sekarang ini sangat pesat termasuk juga kemajuan dalam bidang teknologi reaktor nuklir. Indonesia adalah salah satu negara yang memiliki potensi sumber daya alam yang sangat melimpah. Kebutuhan manusia akan energi listrik semakin hari semakin meningkat, sedangkan sumber daya alam semakin hari semakin berkurang dan menipis. Oleh karena itu dibutuhkan sumber daya baru yang mampu memenuhi kebutuhan manusia akan energi listrik. Salah satu sumber daya baru yang bisa dimanfaatkan adalah energi nuklir. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah salah satu pembangkit listrik yang mampu menghasilkan listrik dengan daya yang besar dan ekonomis (Herawati dan Sudagung., 2020).

Reaktor nuklir mampu menghasilkan energi nuklir yang memiliki keuntungan nyata, yaitu pencemaran lingkungan yang terjadi lebih sedikit dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga konvensional, dan memiliki tingkat keamanan yang baik, serta lebih ekonomis (Suhariyono.,2006). Reaktor nuklir bekerja dengan cara yang sama seperti pembangkit listrik konvensional, tetapi juga memiliki sedikit perbedaan. Perbedaan ini terdapat pada sumber energi dan bahan bakar yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Sumber energi pembangkit listrik konvensional pada umumnya melalui proses pembakaran bahan bakar mineral secara kimia, sedangkan energi pada reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi dan bahan bakar yang digunakan berupa bahan bakar fisiil (Novalianda dkk., 2016).

Reaksi fisi banyak ditemui pada reaktor nuklir, salah satu reaktor nuklirnya adalah *Pressurised water reactor* (PWR) dan *Small modular reactor* (SMR). *Pressurised water reactor* adalah jenis reaktor nuklir yang menggunakan pendingin berupa air dengan dua sistem pendingin (Effendi dkk.,2018). *Small modular reactor* salah satu teknologi reaktor nuklir yang berkembang dan memiliki ukuran yang lebih kecil dan tingkat keamanan yang baik (Darmawan.,2021). SMR mempunyai kemungkinan yang baik jika dibangun di Indonesia, terlebih untuk pulau dan daerah dibagian tengah serta timur Indonesia.

Daerah yang terpencil memiliki fasilitas dan infrastruktur yang masih terbatas dan kapasitas tenaga listrik yang rendah. Sehingga reaktor SMR ini dapat memberikan solusi yang baik, dengan keunggulan yaitu memiliki keluaran daya yang kecil, dan memiliki desain yang baik yang dapat memberikan kenyamanan yang fleksibelitas (Susyadi dkk., 2015).

Salah satu PLTN dengan jenis *pressurized water reactor* adalah reaktor nuscale yang termasuk kedalam generasi 3+. Reaktor nuscale dioperasikan oleh departemen energi Amerika Serikat. Reaktor nuscale adalah reaktor integral yang didesain oleh *Nuscale Power Inc.* Bahan bakar yang digunakan pada reaktor nuscale berupa UO_2 dengan pengkayaan $<4,95\%$ serta dengan sistem pendingin menggunakan sirkulasi alamiah, sehingga tidak memerlukan pompa (Suwoto dkk., 2020).

Pada penelitian ini melakukan analisis neutronik pada teras reaktor nuscale untuk mengetahui tingkat kekritisan dari bahan bakar nuklir yang digunakan. Dalam melakukan analisis teras reaktor nuklir diperlukan simulasi, salah satu simulasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi monte carlo berbasis perangkat lunak openMC.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini membahas mengenai bagaimana cara menganalisis tingkat kekritisan pada teras reaktor nuscale dengan bahan bakar nuklir berupa uranium dioxide (UO_2) sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk reaktor nuklir berumur panjang.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah melakukan perhitungan neutronik teras reaktor nuscale berbahan bakar uranium dioxide (UO_2) yang akan disimulasikan dalam bentuk pin dan sub assembly sehingga dapat menentukan tingkat kekritisan dari bahan bakar yang digunakan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan analisis teras reaktor nuscale dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendesain teras reaktor nuscale berbahan bakar uranium dioxide (UO_2), kelongsong berupazirconium alloy-4 (Zircolay-4), dan berpendingin air ringan.
2. Menganalisis tingkat kekritisitas teras reaktor nuscale dengan menggunakan software openMC.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain dapat mengetahui pengaruh dari jenis bahan bakar nuklir, kelongsong, dan pendingin yang digunakan terhadap kinerja pada teras reaktor nuscale. Selain itu dari data yang telah didapatkan dapat digunakan untuk melakukan analisis termal hidrolik, analisis safety, dan efisiensi jumlah bahan bakar yang digunakan pada reaktor selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardojo, Lasman,N., Ruslan, Parmanto,E.M., dan Effendi, E., 2010. *Mengena Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Ardiansyah,H., Agung,A., dan Harto,A.W., 2018. *Studi Parameter Desain Teras Integral Pressurized Water Reactor dengan Bahan Bakar Mixed Oxide Fuel Menggunakan Program SRAC*. Jurnal Forum Nuklir, 2 (12): 63-64.
- Athiqoh,F., Budi,W.S., Anam,C., dan Tjipto,T.S., 2014. *Distribusi Fluks Neutron Sebagai Fungsi Burn-Up Bahan Bakar Pada Reaktor Kartini*. Youngster Physics Journal, 3 (2): 108.
- Azurah, P.B., Fitriyai,D., dan Permana,S. *Analisis Ukuran Teras dan Rasio H/D pada Molten Salt Fast Reactor dalam Tinjauan Neutronik*. Jurnal Fisika Unand, 10 (1):35.
- Brueziere, J., dan Favet, D., 2015. *Industrial Maturity of Fast Reactor Fuels Cycle Processes and Technology, Fast Reactor, and Related Fuel Cycles Safe Technologies and Sustainable Scenarios*. Proceedings Series International Atomic Energy Agency, 2 : 79.
- Cooper,M., 2014. *Small Modular Reactor and The Future of Nuclear Power in The United States*. Energy Research and Social Series, 3: 163.
- Darmawan.,2021. *Perbandingan Tipe Tekanan Emergency Core Cooling System Pada Small Modular Reactor*. Jurnal Material dan Energi Indonesia, 1 (11):8.
- Dian,F., dan Handayani,T.,2010. *Perancangan Kode Simulasi Untuk Analisis BurnUp 3 Dimensi Satu Siklus Pada Reaktor Pembiak Cepat*. Jurnal Ilmu Fisika, 1 (2): 2-3.
- Duderstadt,J.J., dan Hamilton,L.J., 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: Jhon Wiley and Sons Incorporate.
- Effendi,D. Yulianti,Y., dan Syafriadi.,2018. *Analisis Termal Hidrolik Reaktor Air Bertekanan (pressurized water reactor) Menggunakan Metode Lu Faktorisasi*. Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika., 2(6): 201.
- Herawati,N., dan Sudagung, A.D., 2020. *Persepsi Masyarakat dan Potensi Acceptance Terkait Wacana Pembangunan PLTN di Kabupaten Bengkayang*. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, 22 (2): 111.

- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2020. *Advanced in Small Modular Reactor Techonology Development*. Austria: IAEA Publishing.
- Kessides, I. N., dan Kuznetsov, V., 2012. *Small Modular Reactor For Enhancing Energy Security in Developing Countries*. *Sustaibility*, 4 (1) : 1809.
- Kumar., 2015. *Development, Fabrication and Characterization of Fuels For The Indian Fast Reactor Programme, Fast Reactor, and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios*. *Proceedings Series International Atomic Energy Agency*, 2 : 18.
- Lisa dkk., 2018. *Perhitungan Laju Reaksi Neutron Model Perangkat Annular Pada Jenis Reaktor SCWR (Supercritical Water Reactor) Bahan Bakar Thorium*. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 6 (2): 223.
- Manurung,K.H., dan Santony,J., 2019. *Simulasi Pengadaan Barang Menggunakan Metode Monte Carlo*. *Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi*, 3(1):8.
- Medina, S. P., dan Francois, J.L., 2021. *Neutronic Analyssis of The Nuscale Core Using Accident Tolerant Fuels With Different Coating Materials*. *Nuclear Engineering and Design*, 377: 2.
- Menik,A. Supardi, Monado,F., dan Su'ud,Z., 2015. *Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN*. *Prosiding Semirata Bidang MIPA*:41.
- Novalianda,S., Ariani,M., Monado,F., dan Su'ud, Z., 2016. *Studi Awal Perhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida (UO₂) Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium*. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 2 (1): 382.
- Novalinda,S., 2019. *Power Fletting Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U,Pu)N*. *Jurnal of electrical techonology*, 3 (4) :140.
- OpenMC.*What's New in 0.12.2*. Diakses dari <https://docs.openmc.org/en/stable/releasenotes/0.12.2.html> pada tanggal 13 Desember 2021.
- Parmanto ,E.M., dan Dimas,I., 2007. *Mengenal PLTN dan Prosfeknya di Indonesia*. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional.

- Ricardina, 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): 96
- Rijanti, A. P., dan Lumbanraja, S.M., 2012. *Studi Prospek PLTN Daya Kecil Nuscale di Indonesia*. Jurnal Pengembangan Energi, 14 (1): 58-60.
- 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 Development*. Annals Of Nuclear Energy, 82: 90.
- Shafii, M.A., 2013. *Beberapa Metode Penyelesaian Persamaan Transport Neutron Dalam Reaktor Nuklir*. Jurnal Ilmu Dasar, 2 (14): 59 dan 62.
- Setiyo, A., dan Munir, M., 2010. *Analisis distribusi suhu aksial teras dan penentuan (k_{eff}) PLTN pebble bed modular reactor (PMBR) 10 MWE menggunakan metode MCPN 5*. Jurnal Berkala Fisika, 12 (3) : 86.
- Subkhi, M. A., Suued, Z., Waris, A., dan Permana, S., 2015. *Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR)*. Jurnal ISTEK, 9 (1) :37-38.
- Suhaemi, T., 2016. *Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Menopang Kebutuhan Energi Listrik Nasional*. Prosiding Seminar Nasional Teknoka, 1(1): 168.
- Suhariyono, G., 2006. *Perkembangan Tenaga Nuklir Di Dunia*. Bulletin Alara, 7 (3): 106.
- Susyadi, Tjahyono, H., Dibyo, S., dan Pane, J.S., 2015. *Investigasi Karakteristik Termohidronika Teras Reaktor Daya Kecil Dengan Pendingin Sirkulasi Alami Menggunakan RELAP5*. Jurnal Teknik Reaktor Nuklir, 18 (1):2.
- Suwoto dkk., 2014. *Analisis Karakteristik Neutronik Teras RGT T200K Berbahan Bakar Pebble (UO₂) Menggunakan Program VSOP'94*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir. 894
- Suwoto dkk., 2020. *Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Doppler Bahan Bakar Reaktor Nuscale*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir. 189-190.
- Waluyo, A., 2014. *Analisis kekritisan tabung hidriding di IEBE dengan menggunakan program komputer SCALE6.1*. Seminar Keselamatan Nuklir, 1 : 139.