

**SOLUSI PERSAMAAN DIFUSI NEUTRON PADA PWR (*PRESSURIZED
WATER REACTOR*) BERBENTUK HEKSAGONAL DENGAN BAHAN
BAKAR URANIUM DAUR ULANG**

(Skripsi)

Oleh

**RISDHA AYU SHINTA DEWI
NPM 1817041004**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

SOLUSI PERSAMAAN DIFUSI NEUTRON PADA PWR (*PRESSURIZED WATER REACTOR*) BERBENTUK HEKSAGONAL DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM DAUR ULANG

Oleh

Risdha Ayu Shinta Dewi

Telah dilakukan penelitian tentang solusi persamaan difusi neutron dengan reaktor PWR menggunakan bahan bakar uranium daur ulang pada 1/6 bagian teras reaktor dengan geometri berbentuk heksagonal IGT-6. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui distribusi fluks neutron pada PWR bahan bakar uranium daur ulang. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi komputasi menggunakan pemrograman Dev-C++. Langkah dari penelitian ini menentukan spesifikasi teras reaktor, fraksi volume, densitas atom, penampang lintang makroskopik, persamaan difusi neutron menggunakan metode Gauss Seidel. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah distribusi nilai fluks neutron tanpa sumber, sumber fisi, sumber fisi dan hamburan, dan perubahan daya. Distribusi nilai fluks neutron relatif tanpa sumber tertinggi terdapat pada grup 1 sebesar $4,5729 \times 10^{-2}$. Nilai fluks neutron relatif sumber fisi tertinggi terdapat pada grup 3 sebesar $7,3327 \times 10^{-4}$. Nilai fluks neutron relatif sumber fisi dan hamburan tertinggi terdapat pada grup 2 sebesar $1,5157 \times 10^{-3}$. Dilakukan penambahan daya 3.200 MW pada sumber fisi, nilai fluks neutron tidak mengalami perubahan. Hal ini disebabkan karena penambahan daya tidak mempengaruhi hasil nilai fluks neutron.

Kata kunci : Dev-C++, PWR, distribusi neutron, fluks neutron, densitas atom.

ABSTRACT

SOLUTION OF THE NEUTRON DIFFUSION EQUATION IN PWR (PRESSURIZED WATER REACTOR) HEXAGONAL SHAPED USING RECYCLED URANIUM FUEL

By

Risdha Ayu Shinta Dewi

The research on solution the neutron diffusion equation of a PWR using recycled uranium fuel at 1/6 section of the reactor core with a hexagonal IGT-6 geometry have been done. The purpose of this research is to determine the distribution of the neutron flux in the PWR of recycled uranium fuel. This research was carried out by computational simulation using Dev-C++ programming. The steps of in this research are determining specifications of the reactor core, volume fraction, atomic density, macroscopic cross-section, neutron distribution using Gauss Seidel method. The results were obtained in this research are distribution of relative neutron flux without a source, fission source, fission source and scattering, and change power. The distribution of relative neutron flux without a source found the highest in group 1 about $4,5729 \times 10^{-2}$. Relative neutron flux fission source found the highest in group 3 about $7,3327 \times 10^{-4}$. Relative neutron flux fission source and scattering found the highest in group 2 about $1,5157 \times 10^{-3}$. Added 3.200 MW of power to fission sources, the neutron flux values did not change. This is because the addition of power does not affect the value of the neutron flux.

Keywords: Dev-C++, PWR, neutron distribution, neutron flux, atomic density.

SOLUSI PERSAMAAN DIFUSI NEUTRON PADA PWR (*PRESSURIZED WATER REACTOR*) BERBENTUK HEKSAGONAL DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM DAUR ULANG

Oleh

RISDHA AYU SHINTA DEWI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Penelitian : **SOLUSI PERSAMAAN DIFUSI NEUTRON
PADA PWR (PRESSURIZED WATER REACTOR)
BERBENTUK HEKSAGONAL DENGAN
BAHAN BAKAR URANIUM DAUR ULANG**

Nama Mahasiswa : **Risdha Ayu Shinta Dewi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1817041004**

Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



Pembimbing I

Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 197512192000122003

Pembimbing II

Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si.
NIP. 199006162019031016

2. Ketua Jurusan Fisika

Gurum Ahmad Pauzi, S. Si., M. T.
NIP. 198010102005011002



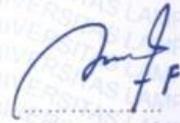
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

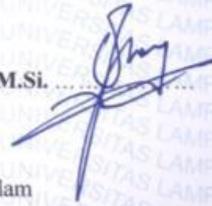
Ketua : **Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.**



Sekretaris : **Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si.**



2. Pdt. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 13 April 2023

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain. Sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebut dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri. Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, April 2023

Penulis,



Ridha Ayu Shinta Dewi
NPM. 1817041004

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Lampung Tengah, pada tanggal 14 September 2000. Penulis merupakan putri pertama dari pasangan Bapak Amat Yani dan Ibu Sugiarti. Penulis menempuh pendidikan dimulai dari Sekolah Dasar (SD) di SD Negeri 1 Sidokerto pada tahun 2006-2012, kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Metro pada tahun 2012-2015, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 2 Metro pada tahun 2015-2018.

Penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis mengikuti organisasi seperti anggota bidang Minat dan Bakat Himafi pada tahun 2019-2021. Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. Pertamina (Persero) *Sales Area* Lampung-Bengkulu dengan judul “*Monitoring Database* Penjualan Pertamax Secara Digital di PT. Pertamina (Persero) *Sales Area* Lampung-Bengkulu”. Selanjutnya penulis melaksanakan penelitian dengan judul “Solusi Persamaan Difusi Neutron Pada PWR (*Pressurized Water Reactor*) Berbentuk Heksagonal Dengan Bahan Bakar Uranium Daur Ulang” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang itu melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Q.S Al-Baqarah: 286)

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S Al-Insyirah: 5)

“Boleh jadi kamu tidak menyenangi sesuatu, padahal itu baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu tidak baik bagimu. Allah mengetahui, sedangkan kamu tidak mengetahui”

(Q.S Al-Baqarah: 216)

“Jangan menilai saya dari kesuksesan, tetapi nilai saya dari seberapa sering saya jatuh dan berhasil bangkit kembali”

(Nelson Mandela)

“ Skripsi yang baik adalah skripsi yang selesai. Lantas kenapa menunggu sempurna untuk memulai? ”

(Rilofek)

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah SWT, karya ini
dipersembahkan kepada:

Kedua Orang tuaku

Ayah Amat Yani & Mama Sugiarti

Terimakasih yang selalu memberikan do'a, kasih sayang, dan menjadi penyemangatku di setiap langkah, hingga bisa mendapatkan gelar Sarjana.

Adikku serta Keluarga Besar

Terimakasih atas segala dukungan dan semangat yang telah diberikan .

Teman-teman Fisika Angkatan 2018

Terimakasih untuk canda tawa dan dukungan dari awal hingga akhir perkuliahan.
Semoga kalian semua dilancarkan jalan kedepannya dan diberkahi dimanapun berada.

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Solusi Persamaan Difusi Neutron Pada PWR (*Pressurized Water Reactor*) Berbentuk Heksagonal Dengan Bahan Bakar Uranium Daur Ulang**”. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar S1 dan melatih mahasiswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari bahwa penyajian skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua. Aamiin.

Bandar Lampung, April 2023

Penulis,

Risdha Ayu Shinta Dewi

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Yang Maha Esa, karena atas kuasa Nya penulis masih diberikan kesempatan untuk mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian penelitian dan skripsi ini, terutama kepada:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang mendukung dari awal sampai akhir penelitian ini.
2. Bapak Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si. selaku pembimbing II yang telah mengoreksi format penulisan, memberikan kritik dan saran selama penulisan skripsi.
3. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si., selaku pembahas yang telah mengoreksi kekurangan, memberi kritik dan saran selama penulisan skripsi.
4. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasehat dari awal perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku ketua jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng Suropto Dwi Yuwono, M.T. selaku Dekan FMIPA universitas lampung.
7. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung, terima kasih atas segala pelajaran, ilmu, pengalaman, dan motivasi yang telah diberikan selama di kampus.

8. Karyawan dan Staff di lingkungan Jurusan Fisika yang telah membantu penulis dalam administrasi dan ruangan.
9. Ayah Amat Yani, yang selalu mendoakan, membimbing, menguatkan, dan tidak pernah lupa mengingatkanku untuk selalu mengingat Allah S.W.T.
10. Mama Sugiarti yang selalu mendengarkan keluh kesah, menyemangatiku, mendoakan, mendidik, mendukung dan menjadi motivasi terbesar dalam hidupku.
11. Adikku Muhammad Zaki Shakil yang selalu memberikan doa, dukungan, semangat, canda, dan kasih sayangnya. Juga keluarga besar yang selalu memberikan dorongan dan doa.
12. Aqil Muzakky yang telah membantu sejak awal perkuliahan dan memberikan semangatnya selama ini.
13. Dr.Suwardi, Sp.THT-KL, Dr.Indrayanto, Sp.Rad, Dr.Fatah Manovito, Sp.OT, dan Dr.Soeradi Soedjarwo,Sp.S, yang selalu membantu dalam menangani kesembuhanku.
14. Riftaul Kurniawati, Ria Charoline Beru Ginting, Tasya Praditha Ningtyas, dan Ahmad Saiful Munir selaku rekan penelitian yang telah membantu dan juga tempat berdiskusi selama pengerjaan skripsi ini.
15. Teman-teman fisika angkatan 2018, kakak-kakak tingkat serta adik-adik tingkat yang selama ini memberikan semangat.
16. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Terimakasih atas segala ketulusan, bantuan, dukungan, dan doa.

Akhir kata, penulis haturkan do'a, semoga Allah SWT memberikan imbalan yang berlipat atas bantuan semua pihak dan semoga Allah SWT selalu memudahkan langkah kita yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, April 2023

Risdha Ayu Shinta Dewi

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Konsep Dasar Reaktor.....	5
2.2. Reaktor Nuklir.....	6
2.2.1. Bahan Bakar (<i>fuel</i>).....	6
2.2.2. Moderator	7

2.2.3. Batang Kendali (<i>control rod</i>).....	7
2.2.4. Perisai (<i>shielding</i>)	8
2.3. PWR (<i>Pressurized Water Reactor</i>)	8
2.4. Bahan Bakar Reaktor	9
2.5. Persamaan Difusi Neutron	11
2.6. Teorema Divergensi	11
2.7. Dev-C++.....	11
2.8. SRAC (<i>Standard Thermal Reactor Analysis Code</i>)	12
III. METODE PENELITIAN	14
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	14
3.2. Alat dan Bahan.....	14
3.3. Prosedur Percobaan.....	14
3.3.1. Menentukan Spesifikasi Teras Reaktor.....	14
3.3.2. Menentukan Fraksi Volume.....	14
3.3.3. Menghitung Densitas Atom	15
3.3.4. Menghitung Penampang Lintang Makroskopik Dengan Modul PIJ	15
3.3.5. Menghitung Persamaan Difusi Neutron.....	16
3.3.6. Menghitung $\phi(x,y)$ Menggunakan Metode Gauss Seidel.....	16
3.4. Diagram Alir	16
3.4.1. Diagram Alir Penelitian.....	16
3.4.2. Menghitung Persamaan Difusi Neutron Dengan Metode Gauss Seidel.....	17
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	18
4.1. Menentukan Spesifikasi Teras Reaktor.....	18
4.2. Menentukan Fraksi Volume.....	20
4.3. Perhitungan Densitas Atom	21
4.4. Menghitung Penampang Lintang Makroskopik Dengan Modul PIJ.....	21
4.5. Penyelesaian Persamaan Difusi Neutron	23
4.5.1. Diskritisasi	23
4.5.2. Matriks $A\phi = B$	28

4.6. Menghitung $\phi(x,y)$ Menggunakan Metode Gauss Seidel.....	37
4.7. Pengaruh Variasi Pengayaan Terhadap Nilai Fluks Neutron	
Dengan Sumber Difusi.....	37
4.7.1. Tanpa Sumber ($S = 0$)	38
4.7.1.1. Tanpa Pembagian Daerah Pengayaan $S=0$	38
4.7.1.2. Pembagian Daerah Pengayaan Tanpa Sumber	40
4.7.2. Sumber Fisi.....	41
4.7.2.1. Tanpa Pembagian Daerah Pengayaan Sumber Fisi	42
4.7.2.2. Pembagian Daerah Pengayaan Sumber Fisi	44
4.7.3. Sumber Fisi dan Hamburan.....	45
4.7.3.1. Tanpa Pembagian Daerah Pengayaan Sumber Fisi dan Hamburan	45
4.7.3.2. Pembagian Daerah Pengayaan Sumber Fisi dan Hamburan	47
4.7.4. Perubahan Terhadap Daya.....	48
4.7.4.1. Tanpa Pembagian Daerah Pengayaan Sumber Fisi Dengan Penambahan Daya.....	49
4.7.4.2. Pembagian Daerah Pengayaan Sumber Fisi Dengan Penambahan Daya.....	51
V. SIMPULAN DAN SARAN	53
5.1. Simpulan	53
5.2. Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Proses Terjadinya Reaksi Fisi.....	5
Gambar 2.2. Sistematis Reaktor PWR (<i>Pressuried Water Reactor</i>).....	8
Gambar 3.1. Diagram Penelitian	16
Gambar 3.2. Diagram Penelitian Menghitung Persamaan Difusi Neutron Dengan Metode Gauss Seidel	17
Gambar 4.1. Geometri dan Pembagian Daerah Teras Reaktor ($IGT = 6$)	19
Gambar 4.2. Teras Reaktor Heksagonal.....	24
Gambar 4.3. Bagian 1/6 Teras Reaktor Heksagonal	24
Gambar 4.4. <i>Mesh</i> Segitiga (i,j)	27
Gambar 4.5. <i>Mesh</i> Segitiga Nilai Fluks Neutron (ϕ)	28
Gambar 4.6. Pembagian Daerah Pengayaan.....	38
Gambar 4.7. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Tanpa Sumber Dengan Pengayaan 3% Pada Baris ($y=2$).....	39
Gambar 4.8. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Tanpa Sumber Dengan Pengayaan 4% Pada Baris ($y=2$).....	39
Gambar 4.9. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Tanpa Sumber Dengan Pengayaan 5% Pada Baris ($y=2$).....	40
Gambar 4.10. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Tanpa Sumber Dengan Pembagian Pengayaan Pada Baris ($y=2$)	41
Gambar 4.11. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi Dengan Pengayaan 3% Pada Baris ($y=2$).....	42
Gambar 4.12. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi Dengan Pengayaan 4% Pada Baris ($y=2$).....	43

Gambar 4.13. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi Dengan Pengayaan 5% Pada Baris ($y=2$)	43
Gambar 4.14. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi Dengan Pembagian Pengayaan Pada Baris ($y=2$)	44
Gambar 4.15. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi dan Hamburan Dengan 3% Pada Baris ($y=2$)	45
Gambar 4.16. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi dan Hamburan Dengan Pengayaan 4% Pada Baris ($y=2$)	46
Gambar 4.17. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi dan Hamburan Dengan Pengayaan 5% Pada Baris ($y=2$)	47
Gambar 4.18. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi dan Hamburan Dengan Pembagian Pengayaan Pada Baris ($y=2$)	48
Gambar 4.19. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi Dengan Pengayaan 3% Daya 3.200 MW Pada Baris ($y=2$)	49
Gambar 4.20. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi Dengan Pengayaan 4% Daya 3.200 MW Pada Baris ($y=2$)	50
Gambar 4.21. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Sumber Fisi Dengan Pengayaan 5% Daya 3.200 MW Pada Baris ($y=2$)	50
Gambar 4.22. Grafik Nilai Fluks Neutron Relatif Tanpa Sumber Dengan Pembagian Pengayaan Daya 3.200 Mwpada Baris ($y=2$)	51

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1. Spesifikasi Teras Reaktor.....	20
Tabel 4.2. Fraksi Volume Bahan Bakar, Selongsong, dan Moderator.....	20
Tabel 4.3. Hasil Densitas Atom Pada Moderator dan Selongsong	21
Tabel 4.4. Hasil Densitas Atom Pada Bahan Bakar	21
Tabel 4.5. Nilai Penampang Lintang Moksrokopik Pengayaan 3%	22
Tabel 4.6. Nilai Penampang Lintang Moksrokopik Pengayaan 4%	22
Tabel 4.7. Nilai Penampang Lintang Moksrokopik Pengayaan 5%	22
Tabel 4.8. Nilai Penampang Lintang Makroskopik Hamburan (Σ_s) Pengayaan 3%	23
Tabel 4.9. Nilai Penampang Lintang Makroskopik Hamburan (Σ_s) Pengayaan 4%	23
Tabel 4.10. Nilai Penampang Lintang Makroskopik Hamburan (Σ_s) Pengayaan 5%	24

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi menjadi salah satu aspek penting dari masa ke masa dan menjadi hal penting untuk kehidupan manusia. Sehingga konsumsi energi global pada saat ini didominasi oleh sumber daya alam (SDA) contohnya air, tanah, udara, tumbuhan, dan matahari. Sementara itu cadangan energi fosil jika digunakan secara terus menerus akan habis. Energi fosil merupakan energi yang bersumber dari pembakaran bahan bakar fosil seperti gas, minyak bumi dan batu bara yang semakin tinggi angka konsumsinya. Oleh karena itu perlu upaya untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil dengan beralih menggunakan Energi Baru Terbarukan (EBT) (Liun dan Sunardi, 2014).

EBT merupakan sumber energi yang berasal dari alam yang mampu diperbarui terus-menerus dan tak terbatas, seperti energi air, energi angin, energi biomassa, energi surya hingga energi nuklir. Dari berbagai energi tersebut, salah satunya dilakukan berbagai riset tentang penggunaan energi nuklir sebagai EBT melalui pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Energi nuklir yang merupakan sumber energi yang ramah ditinjau dari segi lingkungan, karena tidak menghasilkan gas rumah kaca dan unsur berbahaya seperti logam berat (Dasmo, 2015).

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan sebuah sistem yang mempunyai beberapa bagian utama yaitu reaktor, turbin, generator, dan kondensor (Brain dan Lamb, 2000). Hal pertama yang harus dilakukan sebelum proses pembangunan pembangkit tenaga listrik nuklir adalah proses perancangan teras (Susyandi dkk., 2016). Perancangan teras tersebut bertujuan untuk melakukan

analisis awal diantaranya analisis termal hidrolik, analisis neutronik, dan analisis termodinamik. Analisis termal hidrolik bertujuan untuk menghitung temperatur bahan bakar dari hasil reaksi fisi, analisis neutronik ini bertujuan menghitung pola distribusi dan nilai fluks neutron di dalam teras reaktor, dan analisis termodinamik bertujuan untuk menghitung efisiensi dan daya listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTN tersebut (Drajat, 2011). Konsep PLTN hampir mirip dengan pembangkit tenaga listrik lainnya, yaitu dengan menggerakkan turbin untuk menghasilkan tenaga listrik. Namun PLTN menggerakkan turbin dengan uap yang dihasilkan oleh reaktor nuklir.

Reaktor terdiri dari beberapa komponen utama yaitu bahan bakar, moderator, batang kendali, dan perisai. Reaktor merupakan tempat terjadinya reaksi nuklir yaitu berupa reaksi fisi yang akan menghasilkan energi panas yang selanjutnya akan diubah menjadi energi listrik (Beiser, 2003). Reaktor nuklir merupakan sebuah proses dimana terjadinya pembelahan inti atom berat akibat adanya tumbukan oleh neutron, pembelahan tersebut menghasilkan energi, inti atom yang lebih ringan, neutron tambahan dan photon dalam bentuk sinar gamma (Cao dkk., 2008). Pada reaktor nuklir ditinjau dari neutron yang melangsungkan reaksi pembelahan dibedakan menjadi dua yaitu reaktor cepat dan reaktor termal. Reaktor cepat yaitu GCFBR (*Gas Cooled Fast Breeder Reactor*), LMFBR (*Liquid Metal Fast Breeder Reactor*), dan SCFBR (*Super Critical Fast Breeder Reactor*), sedangkan reaktor termal meliputi PWR (*Pressurized Water Reactor*), BWR (*Boiling Water Reactor*), PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*), GCR (*Gas Cooled Reactor*), dan HTGR (*High Temperature Gas Cooled Reactor*).

Salah satu jenis reaktor yang banyak digunakan di dunia adalah PWR (*Pressurized Water Reactor*). PWR merupakan jenis reaktor yang menggunakan air ringan (H_2O) sebagai pendingin dan moderator yang dipertahankan dalam fase cair dengan memberikan tekanan (Suparlina dkk., 2010). Reaktor ini mempunyai dua *loop* atau sirkulasi pendingin utama yaitu *loop* primer dan *loop* sekunder. *Loop* primer berfungsi memanaskan air dari reaksi fisi nuklir di dalam reaktor, sedangkan *loop* sekunder berfungsi memutar turbin dengan menggunakan uap air yang mengalir di dalam *loop* (Diby, 2009).

Reaksi fisi merupakan reaksi yang terjadi pada inti berat dan akan meluruh atau pecah menjadi inti-inti ringan secara berantai. Reaksi fisi yang terjadi berasal dari proses pembelahan bahan fisil seperti atom U^{235} (Uranium) yang disebabkan oleh penembakan neutron pada bahan tersebut. Hasil dari reaksi fisi berupa partikel inti yang lebih ringan sering disebut produk fisil, beberapa partikel neutron, gelombang elektromagnetik dalam bentuk sinar gamma dan sejumlah energi (Batan, 2018). Masalah neutron ini digambarkan sebagai persamaan transport neutron dengan variabel energi, ruang dan waktu (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Transport neutron ini sangat penting untuk diselesaikan karena distribusi neutron berkaitan dengan distribusi daya reaktor. Untuk merancang reaktor nuklir dengan baik, perlu untuk memprediksi bagaimana neutron di distribusikan ke seluruh sistem. Pendekatan yang paling sederhana dalam menyelesaikan masalah transport neutron adalah dengan metode difusi.

Metode difusi merupakan solusi untuk menggambarkan distribusi neutron dalam teras melalui perhitungan neutronik (Madah dkk., 2012). Persamaan transport neutron merupakan persamaan perhitungan neutronik yang menggambarkan tumbukan neutron dengan bahan bakar reaktor nuklir. Persamaan tersebut cukup sederhana memungkinkan dilakukannya perhitungan neutronik. Dalam analisis reaktor, perhitungan persamaan difusi neutron lebih sering dilakukan. Dengan keseluruhan waktu perhitungan persamaan difusi neutron yang cukup besar. Oleh sebab itu percepatan perhitungan persamaan difusi tersebut akan sangat mempercepat analisis reaktor secara keseluruhan.

Untuk memperoleh nilai distribusi neutron dengan menggunakan persamaan-persamaan distribusi, maka persamaan difusi neutron dapat digunakan untuk menyelesaikan distribusi fluks neutron pada berbagai macam perangkat lunak seperti Dev-C++, SRAC, Matlab, dan lain-lain (Nurazizah dan Nurul, 2019). Salah satu perangkat lunak yang bisa digunakan untuk membangun sebuah program C dan C++ yaitu Dev-C++. Salah satu kelebihan dari perangkat lunak ini adalah orang umum bisa memperbaharui aplikasi ini serta perangkat lunak ini bersifat gratis (*freeware*). Sehingga tidak aneh apabila perangkat lunak ini sangat digemari dibandingkan perangkat-perangkat lunak lain yang berbayar

biasanya lumayan mahal (Arianti, dkk. 2021). Selain itu *software* ini juga memungkinkan untuk menambahkan *library-library* yang bukan bawaan dari *software* ini (Rani, 2013). Dari keunggulan pada bahasa pemrograman Dev-C++ maka digunakan untuk mencari persamaan difusi neutron pada PWR (*Pressurized Water Reactor*) berbentuk heksagonal dengan bahan bakar uranium daur ulang.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana distribusi fluks neutron pada reaktor PWR bahan bakar uranium daur ulang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui distribusi fluks neutron pada reaktor PWR bahan bakar uranium daur ulang.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor PWR.
2. Perhitungan yang digunakan adalah persamaan difusi neutron.
3. Bahan bakar yang digunakan adalah uranium daur ulang (UO_2).
4. Moderator yang digunakan adalah air ringan (H_2O).
5. *Software* yang digunakan adalah Dev C++.

1.5 Manfaat Penelitian

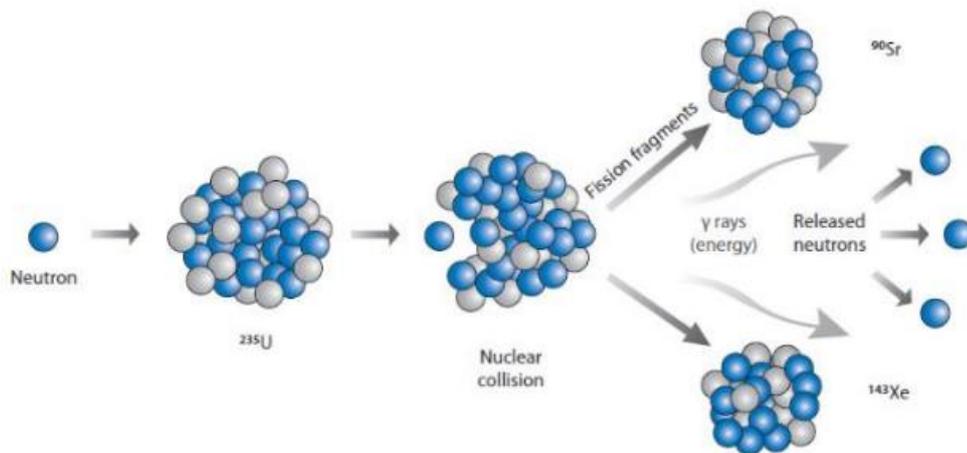
Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
2. Mendukung perkembangan teknologi di bidang reaktor nuklir.
3. Memberikan solusi dalam persamaan difusi neutron.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar Reaktor

Konsep dasar sebuah reaktor nuklir adalah reaksi pembelahan (fisi) dari sebuah material contohnya uranium. Ketika sebuah inti ditembak dengan sebuah neutron, dengan jumlah tertentu maka inti akan mengalami pembelahan. Secara umum, energi nuklir dapat dihasilkan melalui dua macam mekanisme yaitu, pembelahan ini (reaksi fisi) dan penggabungan beberapa inti (reaksi fusi) (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Pelepasan energi yang dihasilkan melalui reaksi fisi berantai yang terkendali dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor mengakibatkan hilangnya neutron dalam jumlah tertentu (Zweifel, 1973). Proses terjadinya reaksi fisi seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Proses terjadinya reaksi fisi (Maemunah dkk., 2019).

Pada reaktor nuklir, partikel neutron yang dihasilkan pada reaksi fisi digunakan kembali untuk memicu terjadinya reaksi fisi yang baru, sehingga reaksi fisi dapat berlangsung secara terus-menerus dan terkendali. Sebuah inti berat yang ditumbuk oleh partikel (neutron) dapat membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan beberapa partikel lain. Mekanisme ini disebut reaksi fisi nuklir (Kidd, 2009). Saat sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron dengan presentase tertentu, inti akan mengalami reaksi fisi (Zweifel, 1973).

2.2 Reaktor Nuklir

Istilah reaktor nuklir digunakan untuk perangkat yang berfungsi mengontrol terjadinya reaksi fisi. Pada reaktor ini berlangsung reaksi fisi berantai terkendali dan kontinu untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop dan nuklida baru (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Yang dimaksud terkendali adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan sesuai dengan kebutuhan energi. Reaktor nuklir merupakan suatu alat untuk mengendalikan reaksi fisi berantai sekaligus menjaga kesinambungan reaksi itu.

Reaktor nuklir memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan pembangkit listrik konvensional lainnya. Letak perbedaan utamanya terdapat pada sumber energi dan jenis bahan bakar yang digunakan. Pada sumber energi pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran bahan bakar fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi dengan menggunakan bahan bakar nuklir (Novalianda dkk., 2018). Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir terkendali di dalam sebuah reaktor nuklir berupa energi panas. Energi panas ini dapat menguapkan air sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pemutar turbin dan membangkitkan listrik. Komponen dasar reaktor nuklir merupakan komponen yang harus ada pada sebuah reaktor nuklir untuk mengendalikan laju pembelahan reaksi fisi. Adapun komponen dasar dari sebuah reaktor nuklir adalah sebagai berikut.

2.2.1 Bahan Bakar (*Fuel*)

Bahan bakar merupakan sumber energi nuklir. Ada dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang dapat

langsung membelah apabila ditumbuk oleh sebuah partikel neutron sedangkan bahan fertil adalah unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah apabila ditumbuk oleh sebuah partikel neutron tetapi akan membentuk bahan fisil. Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir adalah uranium-233, uranium-235, plutonium-239 dan thorium-232 (Benedict dkk., 1981).

2.2.2 Moderator

Moderator merupakan lapisan kedua komponen luar yang berhubungan langsung dengan bahan bakar. Moderator berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (200 MeV) menjadi energi neutron lambat (0,02 – 0,04 eV). Sehingga neutron dapat menyebabkan reaksi fisi berikutnya.

2.2.3 Batang Kendali (*Control Rod*)

Batang kendali merupakan komponen reaktor yang berfungsi untuk mengontrol keluaran daya dari sebuah reaktor dengan cara mengendalikan jumlah neutron yang dihasilkannya. Jika kondisi ini tidak dikendalikan, meningkatnya daya dapat mengakibatkan mencairkan sebagian atau seluruh teras reaktor dan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan sekitar. Kendali ini dilakukan oleh sejumlah batang kendali yang dapat bergerak keluar-masuk teras reaktor. Batang kendali ini dapat bergerak naik dan turun sesuai dengan kebutuhan.

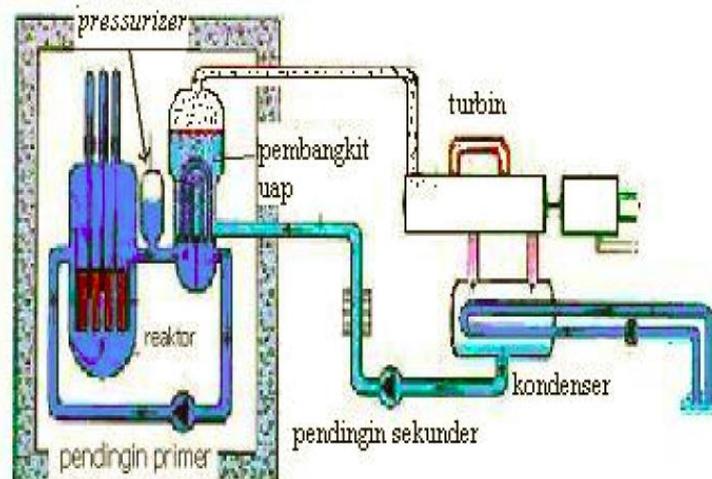
Batang kendali terbuat dari bahan-bahan penyerap neutron, seperti boron (B), dan cadmium (Cd). Jika reaktor menjadi superkritis, batang kendali secara otomatis bergerak masuk lebih dalam ke dalam teras reaktor untuk menyerap kelebihan neutron yang menyebabkan kondisi itu kembali ke kondisi kritis. Sebaliknya, jika reaktor menjadi subkritis, batang kendali sebagian ditarik menjauhi teras reaktor sehingga lebih sedikit neutron yang diserap. Dengan demikian, lebih banyak neutron yang tersedia untuk reaksi fisi dan reaktor kembali ke kondisi kritis. Untuk menghentikan operasi reaktor (misal untuk perawatan), batang kendali turun penuh sehingga seluruh neutron diserap dan reaksi fisi berhenti.

2.2.4 Perisai (*Shielding*)

Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Untuk menahan radiasi agar tidak menyebar ke lingkungan luar sistem reaktor maka diperlukan suatu sistem perisai. Pada umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat dan struktur baja (Lewis, 2008).

2.3 PWR (*PRESSURIZED WATER REACTOR*)

PWR merupakan salah satu jenis reaktor air ringan (H_2O) dan banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Reaktor ini menggunakan teknik fisi nuklir dalam memanaskan air di bawah tekanan tinggi di dalam reaktor yang kemudian dilewatkan alat penukar panas (*steam generator*) sehingga dihasilkan uap untuk menggerakkan turbin dan seterusnya generator listrik (Driscoll dan Heizler, 2005).



Gambar 2.2. Skematik reaktor PWR (Diby, 2007).

PWR mempunyai dua sistem pendingin yaitu sistem premier dan sistem sekunder. Pada sistem pendinginan PWR, pendingin membawa panas yang dihasilkan selama reaksi fisi berantai dalam reaktor dan kemudian panas ditransferkan kepada air yang berada dalam generator uap untuk menghasilkan uap yang

kemudian menggerakkan turbin (El-wakil, 1985). Sehingga pendingin bergerak ke atas menuju pembangkit uap tanpa bantuan pompa pada sistem primernya (Suyandi dkk., 2016). PWR memiliki batasan temperatur kritis air yaitu 374°C. Ini merupakan temperatur maksimal yang diperbolehkan untuk pendingin reaktor. Uranium yang diperkaya digunakan sebagai bahan bakar PWR dalam bentuk batang silinder atau plat. PWR memiliki 200 perangkat bahan bakar yang mana setiap perangkatnya merupakan susunan dari bahan bakarnya. Perangkat bahan bakar terdiri dari 164 batang bahan bakar dan 24 batang kendali (Nag, 2008).

2.4 Bahan Bakar Reaktor

Bahan bakar reaktor yang digunakan sebagai sumber energi nuklir adalah bahan bakar yang bersifat fisil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung membelah apabila menangkap neutron. Adapun bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir yaitu uranium (Kidd, 2009). Uranium merupakan sumber energi dengan kelimpahan yang sangat besar. Meskipun bukan termasuk energi yang terbarukan. Uranium banyak digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir yang kemudian dimanfaatkan untuk produksi senjata nuklir kemudian berkembang untuk pembangkit listrik (Syarip dan Widodo, 2019).

Simbol kimia uranium adalah U (Cothorn dan Rebers, 1991). Uranium memiliki nomor atom 92, proton 92, elektron 92 dan elektron valensi 6. Inti uranium mengikat 141 sampai 146 neutron. Uranium alami yang ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U-238 (99,275%), U-235 (0,720%), dan U-234 (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut yang memiliki sifat fisil adalah Uranium-235 (Kidd, 2009). Uranium yang terkandung dalam batuan phosphate diperkirakan 22 juta ton dan di air laut 4.200 juta ton (Husna, 1998). Uranium alam dapat digunakan pada berbagai jenis reaktor. Untuk jenis reaktor PWR dengan pengkayaan 3-4% menggunakan uranium dioksida (UO₂) (Pramuditya, 2007).

2.5 Persamaan Difusi Neutron

Persamaan difusi merupakan suatu bentuk pendekatan yang paling sederhana terhadap teori transport neutron. Solusi dari persamaan difusi ini memberikan bentuk distribusi fluks neutron terhadap ruang dan selanjutnya dapat diperoleh bentuk distribusi daya yang bergantung pada ruang. Untuk mengetahui distribusi neutron pada reaktor, digunakan teori transport neutron, yang merupakan aliran gerak neutron dalam teras reaktor, yang banyak mengalami hamburan (*scattering*) dari inti atom, penyerapan (*absorb*) dan juga yang keluar dari teras reaktor. Dalam praktiknya, untuk mencari solusi dari persamaan transport neutron cukup sulit dilakukan. Oleh karena itu, dilakukan pendekatan dengan menggunakan aproksimasi difusi neutron dimana dapat dilakukan pendekatan dari persamaan transport neutron menjadi persamaan difusi neutron (Taufiq, 2011).

Persamaan difusi menunjukkan hubungan antara perubahan produksi neutron, perubahan karena serapan neutron dan perubahan karena bocoran produksi neutron dalam suatu elemen volume teras reaktor yang berasal dari hasil reaksi fisi, peristiwa hamburan inelastik (*removal inelastic scattering*), serta sumber neutron di luar elemen. Perubahan karena serapan neutron disebabkan oleh reaksi absorpsi neutron oleh inti-inti atom medium. Sedangkan perubahan karena bocoran neutron disebabkan oleh hamburan yang keluar menuju elemen ruang lain atau keluar dari batas luar medium. Untuk melakukan penurunan persamaan difusi diterapkan konsep keseimbangan jumlah neutron yang masuk dan neutron yang keluar dari teras. Dengan mengetahui distribusi dan populasi neutron dalam reaktor, kestabilan reaksi berantai dapat terjaga (Glastone dan Edlund, 1952). Untuk menurunkan persamaan difusi multigrup, kita dapat menggunakan konsep keseimbangan neutron. Persamaan konsep keseimbangan neutron dituliskan pada persamaan (2.1).

$$\begin{bmatrix} \text{laju} \\ \text{perubahan} \\ \text{jumlah} \\ \text{neutron} \\ (g) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \text{perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{leakage} \\ (g) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{absorpsi} \\ (g) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{sumber} \\ \text{neutron} \\ \text{dari fisi} \\ (g) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{neutron} \\ \text{hilang} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{neutron} \\ \text{masuk} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dari persamaan keseimbangan neutron diatas, tanda positif (+) menyatakan bahwa neutron-neutron bertambah, sedangkan tanda negatif (-) menyatakan neutron-neutron berkurang atau hilang.

Bentuk matematis persamaan keseimbangan neutron (2.1) dapat dituliskan pada persamaan (2.2)

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla D_g \nabla \phi_g - \Sigma_{ag} \phi_g + S_g - \Sigma_{sg} \phi_g - \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sgg'} \phi_{g'} \quad g = 1, 2, \dots, G. \quad (2.2)$$

dengan D_g merupakan ketetapan difusi grup, ϕ_g merupakan fluks neutron yang bergantung pada ruang dan energi pada grup, v_g merupakan produksi pada grup, k_{eff} merupakan faktor multiplikasi efektif, Σf_g merupakan probabilitas terjadinya reaksi fisi per detik pada grup, Σ_{ag} suku absorpsi, S_g suku sumber neutron grup, $\Sigma_{sg} \phi_g$ suku neutron yang masuk karena hamburan, $\sum_{g'=1}^G \Sigma_{sgg'} \phi_{g'}$ suku neutron yang hilang karena hamburan (Duderstadt dan Hamiltonian, 1976).

2.6 Teorema Divergensi

Teorema divergensi dapat digunakan untuk menghitung suatu fluks melalui permukaan yang tertutup yang sepenuhnya melingkupi sebuah volume maka dapat dituliskan persamaan (2.3)

$$\oint_S \vec{A} \cdot \vec{dS} = \int_V \nabla \cdot \vec{A} dV \quad (2.3)$$

dengan \vec{A} merupakan sebuah vektor A, dan ∇ merupakan vektor. Persamaan (2.3) disebut sebagai teorema divergensi atau dikenal sebagai teorema *Gauss-Ostrogradsky*. Teorema Divergensi menyatakan bahwa total fluks luar dari medan vektor A sampai permukaan tertutup S besarnya sama dengan volume integral dari divergensi A. Teorema divergensi gauss pada bidang secara operasional dapat diterapkan untuk mengubah integrasi permukaan menjadi integrasi garis atau sebaliknya (Paggaru, 2012).

2.7 Dev-C++

Dev-C++ merupakan IDE (*Integrated Development Environment*) yang di distribusikan dibawah lisensi GNU (*GNU'S Not Unix*) untuk pemrograman C++. GNU adalah suatu sistem operasi komputer yang sepenuhnya terdiri dari perangkat-perangkat lunak bebas. IDE sendiri adalah sebuah lembar kerja terpadu untuk pengembangan program. Bahasa C++ adalah bahasa pemrograman komputer yang

merupakan pengembangan dari bahasa C yang disempurnakan oleh Bjarne Stroustrup pada tahun 1980 menjadi C dengan kelas (*C With Classes*) dan berganti nama pada tahun 1983 menjadi C++. Awalnya C++ disebut *a better C*, kemudian berganti nama pada tahun 1983 menjadi C++. Symbol ++ merupakan operator C untuk operasi *increment* (penaikan), digunakan untuk menunjukkan bahwa bahasa baru ini merupakan versi yang lebih canggih dari C (Houcque, 2005). Bahasa C++ diciptakan untuk mendukung pemrograman berorientasi objek OOP (*Object Oriented Programming*) yang tidak dimiliki C. Sebenarnya reputasi C tidak diragukan lagi dalam menghasilkan program .EXE berukuran kecil, fleksibilitas pemrograman, eksekusi yang cepat dan antarmuka (*interfacing*) yang sederhana. Namun C++ merupakan Superset dari C, dimana C++ dapat menjalankan sebagian besar (*File Header /library*) dari C, sedangkan C tidak bisa menjalankan atau memanggil kode (*File Header/library*) dari C++, selain itu dengan adanya standarisasi yang ada pada C++, membuat bahasa C++ akan memiliki "bahasa" yang sama pada setiap *compiler* (Ngatong, dkk. 2004). Dalam Dev-C++ dapat digunakan untuk menulis naskah program, mengompilasi program (*compile*), melakukan pengujian terhadap program (*debugging*), dan menjalankan program (*running*).

2.8 SRAC (*Standard Thermal Reactor Analysis Code*)

SRAC merupakan hasil buah kerja keras para ilmuwan JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*) yang mulai berkembang pada tahun 1978 sebagai standar kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*). SRAC merupakan suatu sistem kode penghitungan neutron yang bersifat menyeluruh untuk beberapa jenis reaktor termal. Dikembangkan oleh Tsuchihashi di tahun 1980an, dilanjutkan oleh Okumura di awal tahun 90an, varian SRAC beroperasi dalam sistem operasi UNIX, pertama kali dirilis di tahun 1996 dengan nama SRAC95. Program ini banyak digunakan untuk keperluan analisis neutronik di Jepang oleh berbagai pihak, mulai dari akademisi universitas, departemen penelitian, sampai analisis perusahaan penyedia perangkat nuklir (Okumura dkk., 2002).

Sistem SRAC terdiri dari lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan

perhitungan difusi. Lima kode dasar SRAC meliputi :

1. PIJ sebagai kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi 16 kisi geometri.
2. ANISN sebagai kode transport satu dimensi (SN) yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (R_S).
3. TWOTRAN sebagai kode transport dua dimensi (SN) yang terdiri dari 3 geometri yaitu pelat (X-Y), silinder (R-Z), dan bola (R- θ).
4. TUD sebagai kode difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (R_S).
5. *CITATION* sebagai kode difusi multi dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segienam (Okumura dkk., 2002).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2022 sampai Februari 2023 di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang akan digunakan pada proses penelitian ini yaitu:

1. *Personal Computer* (PC) atau Laptop.
2. *Software* DEV C++.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap sebagai berikut:

3.3.1 Menentukan Spesifikasi Teras Reaktor

Dalam menentukan spesifikasi teras reaktor pada penelitian ini, terdiri dari jenis reaktor, bahan bakar, dan pendingin. Untuk jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor PWR (*Pressurized Water Reactor*). Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah UO_2 dan menggunakan H_2O sebagai pendingin atau moderator. Pada penelitian ini digunakan model geometri sel berbentuk heksagonal dengan $IGT=6$.

3.3.2 Menentukan Fraksi Volume

Fraksi volume bahan bakar merupakan perbandingan antara volume bahan bakar dan volume keseluruhan pin bahan bakar yang meliputi moderator, selongsong dan bahan bakar. Untuk menentukan fraksi volume dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$A = \pi r^2 \quad (3.1)$$

$$A_{mm} = A_m - A_c \quad (3.2)$$

$$A_{cc} = A_c - A_f \quad (3.3)$$

$$\%A_m = \frac{A_{mm}}{A_m} \times 100\% \quad (3.4)$$

$$\%A_c = \frac{A_{cc}}{A_m} \times 100\% \quad (3.5)$$

$$\%A_f = \frac{A_f}{A_m} \times 100\% \quad (3.6)$$

dengan A merupakan luas area, A_f merupakan luas area bahan bakar (*fuel*), A_c merupakan luas selongsong (*cladding*), A_m merupakan luas area moderator, A_{cc} merupakan luas area selongsong (*cladding*), $\%A_f$ merupakan fraksi volume bahan bakar (*fuel*), $\%A_c$ merupakan fraksi volume selongsong (*cladding*), dan $\%A_m$ merupakan fraksi volume moderator.

3.3.3 Menentukan Densitas Atom

Dimana perhitungan densitas atom dapat dihitung menggunakan persamaan (3.7).

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad (3.7)$$

dengan N merupakan densitas atom (atom/ cm³), ρ merupakan massa jenis (g/cm³), N_A merupakan bilangan avogadro ($6,022 \times 10^{23}$ atom/mol), dan M merupakan Massa Molekul (g/mol).

3.3.4 Menghitung Penampang Lintang Moksroskopik dengan Modul PIJ.

Dalam menghitung penampang lintang moksroskopik (*macroscopic cross-section*) dengan modul PIJ bertujuan untuk menentukan nilai penampang lintang makroskopik absorpsi. Penampang lintang makroskopik absorpsi adalah berapa banyak probabilitas untuk terjadi reaksi absorpsi. Hasil yang didapatkan dari nilai penampang lintang makroskopik absorpsi nantinya akan digunakan dalam perhitungan persamaan difusi neutron.

3.3.5 Menghitung Persamaan Difusi Neutron

Untuk menghitung persamaan difusi neutron geometri heksagonal dengan arah sumbu x dan sumbu y, maka geometri heksagonal di bagi menjadi 1/6 bagian dan

dibuat menjadi beberapa heksagonal kecil-kecil.

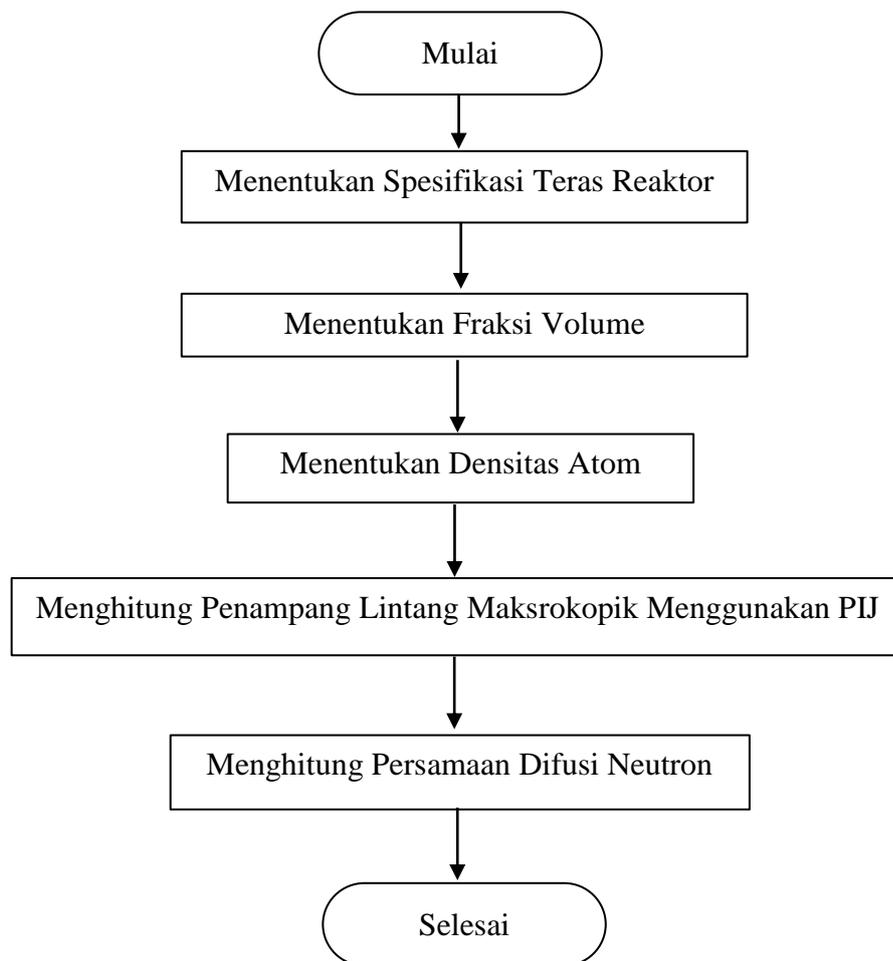
3.3.6 Menghitung $\phi(x,y)$ Menggunakan Metode Gauss Seidel

Setelah diperoleh nilai A, B, C, D, dan E, kemudian menghitung nilai fluks neutron digunakan metode Gauss Seidel. Dimana metode Gauss Seidel merupakan penyelesaian persamaan melalui proses iterasi dengan menggunakan nilai awal pada prosesnya sehingga diperoleh nilai yang sesungguhnya dan syarat persamaan tersebut haruslah dominan secara diagonal.

3.4 Diagram Alir

3.4.1 Diagram Alir Penelitian

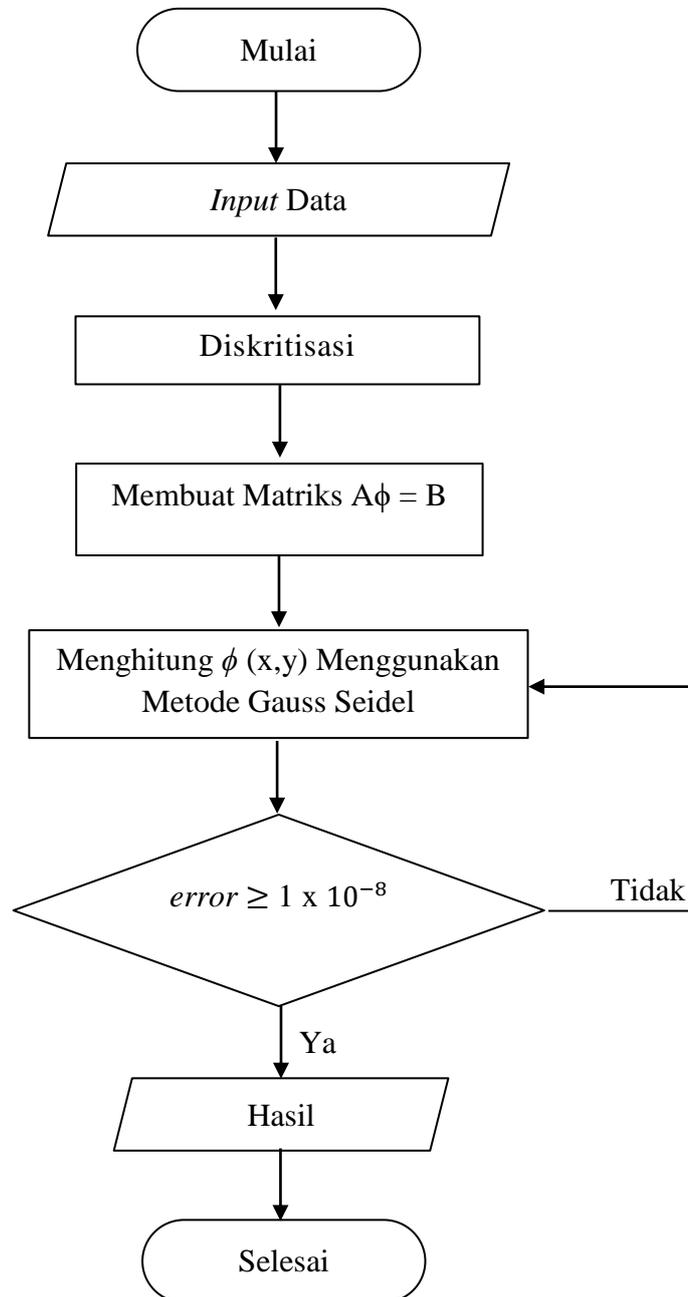
Diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

3.4.2 Menghitung Persamaan Difusi Neutron Dengan Metode Gauss Seidel

Dalam menyelesaikan persamaan difusi neutron digunakan diagram alir seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3.2. Diagram alir menghitung persamaan difusi neutron dengan metode Gauss Seidel.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Kesimpulan yang di peroleh dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Persamaan difusi neutron tanpa sumber memperoleh nilai fluks neutron relatif tertinggi terdapat pada grup 1 sebesar $4,5729 \times 10^{-2}$, sedangkan untuk grup 3 lebih rendah dibandingkan dengan grup 2.
2. Persamaan difusi neutron dengan sumber fisi memperoleh nilai fluks neutron relatif tertinggi terdapat pada grup 3 sebesar $7,3327 \times 10^{-4}$, sedangkan untuk grup 1 lebih rendah dibandingkan dengan grup 2.
3. Persamaan difusi neutron dengan sumber fisi dan hamburan memperoleh nilai fluks neutron relatif tertinggi terdapat pada grup 2 sebesar $1,5157 \times 10^{-3}$, sedangkan untuk grup 3 lebih rendah dibandingkan dengan grup 1.
4. Setelah dilakukan penambahan daya 3.200 MW pada sumber fisi, nilai fluks neutron tidak mengalami perubahan. Hal ini disebabkan karena penambahan daya tidak mempengaruhi hasil nilai fluks neutron.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat:

1. Melanjutkan penelitian ini hingga mendapatkan nilai faktor multiplikasi (k_{eff}).
2. Menggunakan jenis reaktor yang berbeda seperti HTGR, SCWR, dan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Arianti, M., Su'ud, Z., dan Monado, F. 2006. Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 Mwth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar. *Jurnal Ilmu Dasar*. Vol. 14 No.1. Hal. 11 – 15.
- BATAN, Homepage. 2018. Pentingnya Reaktor Pembiak Cepat. Ensiklopedia BATAN. Indonesia. <http://www.batan.go.id/reaktor-pembiak-cepat>. Diakses pada 20 Juni 2022. Pukul 20:10.
- Beiser, A. 2003. *Concepts of Modern Physics*. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Benedict, M., Pigford, T.H dan Levi, H.W. 1981. *Nuclear Chemical Engineering*. Mc Graw-Hill. New York.
- Cothorn, C., Richard dan Rebers, P. 1991. *Radon, Radium, and Uranium in Drinkin Water*. Lewis Publishers, Inc. In The United States of America. Hal 159-165.
- Diby, S. 2009. *Perhitungan Desain Termal Kondensor pada Sistem Pendingin PWR*. Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta.
- Diby, S. 2007. Studi Karakteristik *Pressurizer* Pada PWR. *Prosiding PPI-PDIPTN*. Hal 179-185.
- Drajat, R. Z., 2011. *Analisis Termalhidrolik gas cooled fast reactor (GCFR)*. (Skripsi). Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Driscoll, M.J., and P. Heizler. 2005. Reactr Physics Challenges in Gen IV Reactor Design. *Jurnal Nuclear Engineering and Technology*. Vol. 27 No.1 Hal.1-10.
- Duderstadt, J. J., dan Hamilton, L. J.1976. *Nuclear reactor analysis*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- El-Wakil, M.M. 1985. *Powerplant technology / by Powerplant technology*. New York : McGraw-Hill.
- Glastone, S., dan Edlund, M.C. 1952. *The Elements of Nuclear Reactor Theory*. D Van Nostrand Company, Inc. New York. Hal 68.

- Houcque, D. 2005. *Introduction To Program C and C++ For Engineering Students*. USA : Northwestern University.
- Husna, Al H. 1998. Prospek Bahan Bakar Maju U-Mo Berdensitas Tinggi Sebagai Bahan Bakar Reaktor Riset. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir IV PEBN-BATAN*. Jakarta.
- IAEA. 2023. *Advance Reactors Information System (ARIS)*. <https://aris.iaea.org/site/core.html>. Diakses pada 5 Januari 2023. Pukul 19:50.
- Kidd, S. W. 2009. *Nuclear Fuel Resources*. CRC Press. New York.
- Lamarsh, J.R. 1983. *Introduction To Nuclear Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company. USA.
- L. Cao, O. Yoshiaki, I. Yuki, and Z. 2008. Fuel, Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor. *J. Nucl. Sci. Technol.* Vol. 45. No. 2. Hal 138–148.
- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press USA.
- Liun, E. dan Sunardi. 2014. Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan Dan Fosil, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 16 No.3, Hal. 119 –130.
- Madah, F., Wau, B., dan Taufiq, I. 2012. Solusi Numerik Persamaan Difusi Neutron Pada Teras Reaktor Nuklir Dengan Metode Iterasi Jacobi Paralel Menggunakan Openmp. *Jurnal Ilmu Fisika*. Vol. 4. No. 1. Hal 8–17.
- Maemunah, I. R., Nining Y., dan Dwi I. 2019. Studi Komparasi Reaksi Fisi dan Fusi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Masa Depan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika 5.0*. Hal 474.
- Nag, P.K. 2018. *Power Plant Engineering 3rd Edition*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. New Delhi. Hal 633-635.
- Nurazizah, A. dan Nurul S. 2019. Simulasi Distribusi Fluks Pada Reaktor Nuklir 2d Menggunakan Python. *Prosding Seminar Nasional Fisika*. Hal 311-316.
- Novalianda, S., Menik A., Fiber M., dan Zaki S. 2018. Neutronic Design Of Plutonium Uranium Fuel-Based Gas-Cooled Fast Reactor. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonnesia*. Vol 14 No.2 Hal 92-93.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihashi, K. 2007. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA. Hal. 4 – 26.
- Okumura, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reaktor Physics Analysis*. Japan. JAEA. Hal. 10-15.

- Paggaru, I, B. 2012. *Matematika Lanjut Untuk Teknik*. John Hi-Tech Idetema. Makasar.
- Pramuditya, S. 2007. Pengembangan Kode Komputer Terintegrasi untuk Studi Desain Awal Pembangkit Listrik tenaga Nuklir Jenis PWR. *Tesis*. ITB. Bandung.
- Rani, S. 2013. *Modul Pelatihan Pemrograman C dan C++*. Himpasikom UGM. Yogyakarta.
- Suarga. 2014. *Algoritma dan Pemograman*. Andi offset. Yogyakarta.
- Supraliana, L, dan Susilo. J. 2010. Analisis Parameter Neutronik Dalam Desain Teras PLTN Tipe PWR 1000 MWe Dengan Metode Transport Dan Difusi Neutron. *Prosiding Seminar Nasional Ke-16 Teknologi Dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*. Hal 1-6.
- Susyandi, Tjahyono, H., Dibyo, S., dan Pane, J. S. 2016. Investigasi Karakteristik Termohidrolika Teras Reaktor Daya Kecil Dengan Pendinginan Sirkulasi Alami Menggunakan RELAP5. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 18. No. 1. Hal. 1-10.
- Syarip, S. dan Widodo, S. 2019. *Dari Pasir Monasit ke Uranium : Bahan Baku Bahan Bakar Nuklir dan Radioisotop Medik*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Subagyo, Y., Irawan, D. dan Santosa, J. 2007. *Listrik Dari Energi Nuklir*. Prof. Dr. Jakarta: Kementrian Negara Riset Dan Teknologi, Jakarta.
- Taufiq, I. 2011. Komputasi Paralel Persamaan Difusi Neutron pada Reaktor Cepat dengan Menggunakan Intel Threading Building Blocks. *Jurnal Ilmu Fisika*. Vol. 3. No.1. Hal 1–49.
- Walter, A. E., dan Reynolds, A. B. 1981. *Fast Breeder Reaktor*. Pergamon Press.USA.
- Wardhana,W.,A. 2007. *Teknologi Nuklir: Proteksi Radiasi dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Dani. Hal 51, dan hal 126 – 127.
- Widiarsono, T. 2005. *Tutorial Praktis Belajar Program C dan C++*. Jakarta.
- Zweifel, P.F. 1973. *Reactor Physics*. USA. McGraw-Hill. Hal 74.