

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

**(Skripsi)**

**Oleh**

**RIFTAUL KURNIAWATI  
NPM 1817041074**



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

## ABSTRAK

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

Oleh

**RIFTAUL KURNIAWATI**

Telah dilakukan penelitian tentang solusi persamaan difusi neutron pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan bahan bakar uranium daur ulang pada  $\frac{1}{4}$  bagian teras reaktor dan geometri berbentuk silinder yang didefinisikan IGT=3 pada SRAC. Tujuan dari penelitian ini untuk memperoleh distribusi fluks neutron pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) berbentuk silinder menggunakan bahan bakar uranium daur ulang. Langkah penelitian meliputi menentukan spesifikasi teras reaktor dan geometri sel. Selanjutnya menghitung fraksi volume, densitas atom, penampang lintang makroskopik, dan distribusi fluks neutron dengan penyelesaian persamaan difusi metode Gauss Seidel menggunakan bahasa pemrograman C++. Hasilnya berupa distribusi nilai fluks neutron relatif tanpa sumber, sumber fisi, sumber fisi dan hamburan, serta mengubah daya. Hasil distribusi fluks neutron relatif dengan tanpa sumber paling tinggi terdapat pada grup 1 sebesar  $1,1681 \times 10^{-10}$ , sumber fisi paling tinggi terdapat pada grup 3 sebesar  $4,6009 \times 10^{-8}$ , serta sumber fisi dan hamburan paling tinggi terdapat pada grup 3 sebesar  $1,1681 \times 10^{-10}$ . Selain itu, dengan mengubah daya dari 100 MW menjadi 3.000 MW tidak memiliki perubahan pada bentuk distribusi fluks neutron relatifnya paling tinggi terdapat pada grup 3. Grup paling tinggi mempunyai fluks neutron lebih banyak dan perubahan daya tidak mempengaruhi nilai fluks neutronnya.

**Kata Kunci:** C++, PWR, persamaan difusi, densitas atom, fluks neutron.

## **ABSTRACT**

### **SOLUTION OF NEUTRON DIFFUSION EQUATION IN PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR) CYLINDRICAL SHAPED USING RECYCLED URANIUM FUEL**

**By**

**RIFTAUL KURNIAWATI**

*Research on solution of neutron diffusion equation in Pressurized Water Reactor (PWR) using recycled uranium fuel has been carried out. It has  $\frac{1}{4}$  part of the reactor core and geometrical cylindrical shaped defined as IGT=3 in SRAC. The objectives of this research is to obtain the distribution of neutron flux in a cylindrical Pressurized Water Reactor (PWR) using recycled uranium fuel. The research steps covers determining the specifications of the reactor core and cell geometry. Next calculation are volume fraction, atomic density, macroscopic cross-section, and flux neutron distribution by solving diffusion equation way Gauss Seidel method by the C++ programming language. The results were obtained in this research are distribution of relative neutron flux unsourced, a fission source, a fission source and scattering, and change power. The distribution of relative neutron flux unsourced found the highest in group 1 about  $1,168 \times 10^{10}$ . Relative neutron flux fission source found the highest in group 3 about  $4,6009 \times 10^{-8}$ . Relative neutron flux fission source and scattering found the highest in group 3 about  $1,168 \times 10^{-10}$ . In addition, by changing the power from 100 MW to 3.000 MW do not have changes on shaped distribution of the neutron flux, highest be found group 3. The highest group has more a lot neutron flux and changes in power do not affect the value of the neutron flux.*

**Keywords:** C++, PWR, diffusion equation, atomic density, neutron flux.

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

Oleh

**RIFTAUL KURNIAWATI**

Skripsi

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

Pada

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



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

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

Nama Mahasiswa : **Riftaul Kurniawati**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1817041074**

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. Plt. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197110412005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **14 April 2023**



### PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam skripsi ini tidak terdapat karya orang lain dan tidak terdapat pendapat atau karya yang ditulis oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 15 April 2023

Penulis,



**Riftaul Kurniawati**  
NPM. 1817041074

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Riftaul Kurniawati, dilahirkan di Braja Gemilang, 29 November 2000. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Joko Yuwono dan Ibu Marsinah. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 1 Braja Gemilang pada tahun 2012, SMP Islam YPI 1 Braja Selehah pada tahun 2015, SMA Muhammadiyah Braja Selehah pada tahun 2018. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2018 melalui jalur penerimaan SBMPTN. Penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. PLN Persero P3B Sumatera UPT Tanjung Karang dengan judul “Analisis Pemeliharaan Jaringan Transmisi Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) KV PT. PLN (Persero) P3B Sumatera UPT Tanjung Karang”. Dalam bidang organisasi penulis sebagai anggota Bidang Sains dan Teknologi HIMAFI FMIPA UNILA Periode 2019 dan Sekretaris Bidang Sains dan Teknologi HIMAFI FMIPA UNILA Periode 2020.



## MOTTO

“Jangan biarkan kesulitan membuat dirimu gelisah, karena bagaimanapun juga hanya di malam yang paling gelap bintang-bintang tampak bersinar lebih terang”

*Ali bin Abi Thalib*

“Jangan mundur sebelum mencoba, beban berat itu hanya ada pada pikiran. Coba dulu nanti akan terbiasa”

*Anonim*

“Bangkitlah untuk lebih kuat, berjuang untuk menyelesaikan semua tanggungjawab”

*Riftaul Kurniawati*

## **PERSEMBAHAN**

**Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah Subhanahu wa ta'ala, karya ini dipersembahkan kepada:**

Kedua Orang tuaku

**Bapak Joko Yuwono & Ibu Marsinah**

Terimakasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesanputrinya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai sarjana

**Keluarga Besar & Teman-teman**

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam keadaan suka maupun duka

**Almamater Tercinta**

UNIVERSITAS LAMPUNG

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Solusi Persamaan Difusi Neutron Pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) Berbentuk Silinder Dengan Bahan Bakar Uranium Daur Ulang”** yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang solusi persamaan difusi neutron pada reaktor PWR berbentuk silinder menggunakan bahan bakar uranium daur ulang. Pada skripsi ini dilakukan sebuah penelitian untuk mengetahui bagaimana distribusi fluks neutron pada reaktor.

Pada penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan baik dalam isi maupun cara penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran guna perbaikan di masa mendatang. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca umumnya. Aamiin.

Bandar Lampung, 15 April 2023

Riftaul Kurniawati

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Solusi Persamaan Difusi Neutron Pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) Berbentuk Silinder Dengan Bahan Bakar Uranium Daur Ulang”**. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang turut membantu. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai pembimbing utama yang tulus mengajari dan membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
2. Bapak Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si. sebagai pembimbing kedua yang senantiasa membantu penulis, membimbing, memberi arahan, dan pemahaman.
3. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si. sebagai dosen penguji yang telah memberikan masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasihat dari awal perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Plt. Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Para staf dan karyawan di lingkungan Jurusan Fisika yang telah membantu penulis dalam penyelesaian administrasi dan ruangan.
8. Kedua orangtuaku, Bapak Joko Yuwono dan Ibu Marsinah, serta adikku Gilang Prastio yang telah mendo'akan serta memberikan semangat dan

dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

9. Keluarga Mamih (Anggi Purnomo, Intan Pubiyanti, Novia Rahmadiana Putri, Nur Isnaini Muna Firdausi, Putu Bagus Raditya, Ria Charoline, dan Yugo Chambioso) untuk semua dukungan, semangat, motivasi, hiburan, dan tempat berkeluh kesah selama pengerjaan skripsi ini.
10. Atu Tamiimah Hari, Ahmad Saiful Munir, Ria Charoline, Risdha Ayu Shinta Dewi, dan Tasya Praditha Ningtyas selaku rekan penelitian yang telah membantu dan juga tempat berdiskusi selama pengerjaan skripsi ini.
11. Fadilla Pusvitasari selaku adek kamar kosan yang selalu menyemangati dan membantu penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
12. Seluruh mahasiswa/i jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung angkatan 2018, Keluarga Besar Himafi, dan teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu.

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, 15 April 2023

Riftaul Kurniawati

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b><i>ABSTRACT</i> .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>PERNYATAAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>vii</b>
<b>MOTTO .....</b>	<b>viii</b>
<b>PERSEMBAHAN.....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>x</b>
<b>SANWACANA .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>I. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
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
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>



2.1	Reaktor Nuklir .....	6
2.2	Komponen Dasar Reaktor Nuklir .....	8
2.3	<i>Pressurized Water Reactor</i> (PWR).....	9
2.4	Analisis Neutronik .....	10
2.5	Persamaan Difusi .....	11
2.6	Uranium .....	12
2.7	Uranium Oksida (UO <sub>2</sub> ) .....	13
2.8	Bahasa Pemrograman C++ .....	13
2.9	SRAC ( <i>System Reaktor Atomic Code</i> ).....	14
<b>III.</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>15</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	15
3.2	Alat dan Bahan.....	15
3.3	Prosedur Penelitian .....	15
3.3.1	Menentukan Spesifikasi Teras Reaktor .....	15
3.3.2	Menentukan Geometri Sel dan Fraksi Volume .....	16
3.3.3	Menentukan Densitas Atom .....	16
3.3.4	Menghitung Penampang Lintang Makroskopik ( <i>Macroscopic Cross Section</i> ) dengan Modul PIJ .....	17
3.3.5	Menghitung Persamaan Difusi Neutron .....	17
3.4	Diagram Alir .....	18
3.4.1	Diagram Alir Penelitian.....	18
3.4.2	Algoritma Pemrograman Menghitung Persamaan Difusi Neutron dengan Metode Gauss Seidel .....	19
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>20</b>
4.1	Penentuan Spesifikasi Teras Reaktor.....	21
4.2	Penentuan Geometri Sel dan Fraksi Volume .....	21
4.3	Menghitung Densitas Atom .....	23
4.4	Menghitung Penampang Lintang Makroskopik ( <i>Macroscopic Cross Section</i> ) dengan Modul PIJ .....	24
4.5	Penyelesaian Persamaan Difusi Neutron .....	26
4.5.1	Diskritisasi.....	26
4.5.2	Membuat Matriks $A\phi = B$ .....	32
4.5.3	Menghitung $\phi$ (r, z) Menggunakan Metode Gauss Seidel.....	43

4.6 Pengaruh Variasi Pengayaan Terhadap Nilai Fluks Neutron dengan Berbagai Sumber Difusi.....	43
4.6.1 Sumber Difusi tanpa Sumber ( $S=0$ ) tanpa Pembagian Daerah.....	44
4.6.2 Sumber Difusi tanpa Sumber ( $S=0$ ) dengan Pembagian Daerah.....	46
4.6.3 Sumber Difusi Fisi ( $S = \nu\Sigma_f\phi$ ) tanpa Pembagian Daerah.....	48
4.6.4 Sumber Difusi Fisi ( $S = \nu\Sigma_f\phi$ ) dengan Pembagian Daerah.....	50
4.6.5 Sumber Difusi Fisi dan Hamburan ( $S = \nu\Sigma_f\phi + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sgg'}\phi_{g'}$ ) tanpa Pembagian Daerah.....	51
4.6.6 Sumber Difusi Fisi dan Hamburan ( $S = \nu\Sigma_f\phi + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sgg'}\phi_{g'}$ ) dengan Pembagian Daerah.....	53
4.6.7 Sumber Difusi Fisi ( $S = \nu\Sigma_f\phi$ ) tanpa Pembagian Daerah Mengubah Daya.....	54
4.6.8 Sumber Difusi Fisi ( $S = \nu\Sigma_f\phi$ ) dengan Pembagian Daerah Mengubah Daya.....	57
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>59</b>
5.1 Simpulan.....	59
5.2 Saran.....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>60</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>63</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 4.1</b> Spesifikasi teras reaktor PWR.....	21
<b>Tabel 4.2</b> Fraksi volume bahan bakar, selongsong, dan moderator .....	23
<b>Tabel 4.3</b> Hasil perhitungan densitas atom selongsong dan moderator .....	23
<b>Tabel 4.4</b> Hasil perhitungan densitas atom pada bahan bakar.....	23
<b>Tabel 4.5</b> Nilai penampang lintang makroskopik pengayaan 3% .....	24
<b>Tabel 4.6</b> Nilai penampang lintang makroskopik hamburan ( $\Sigma_s$ ) pengayaan 3% .....	25
<b>Tabel 4.7</b> Nilai penampang lintang makroskopik pengayaan 4% .....	25
<b>Tabel 4.8</b> Nilai penampang lintang makroskopik hamburan ( $\Sigma_s$ ) pengayaan 4% .....	25
<b>Tabel 4.9</b> Nilai penampang lintang makroskopik pengayaan 5% .....	25
<b>Tabel 4.10</b> Nilai penampang lintang makroskopik hamburan ( $\Sigma_s$ ) pengayaan 5%.....	25

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Reaksi fisi berantai. ....	7
<b>Gambar 2.2</b> Skema <i>Pressurized Water Reactor</i> (PWR).....	10
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian .....	18
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir algoritma pemrograman .....	19
<b>Gambar 4.1</b> Model geometri sel ( <i>cylindrical cell</i> ) beserta ukuran jari-jari setiap material (IGT=3) .....	22
<b>Gambar 4.2</b> Geometri teras reaktor berbentuk silinder .....	26
<b>Gambar 4.3</b> Diskritisasi geometri teras silinder .....	29
<b>Gambar 4.4</b> (a) Partisi radial dan (b) partisi aksial geometri silinder.....	30
<b>Gambar 4.5</b> Pembagian <i>mesh</i> nilai fluks neutron ( $\phi$ ). .....	33
<b>Gambar 4.6</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) tanpa sumber dan pengayaan 3% .....	44
<b>Gambar 4.7</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) tanpa sumber dan pengayaan 4% .....	45
<b>Gambar 4.8</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) tanpa sumber dan pengayaan 5% .....	46
<b>Gambar 4.9</b> Pembagian daerah arah sumbu r .....	47
<b>Gambar 4.10</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) tanpa sumber dengan pembagian daerah .....	47
<b>Gambar 4.11</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dan pengayaan 3% .....	48
<b>Gambar 4.12</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dan pengayaan 4% .....	49
<b>Gambar 4.13</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dan pengayaan 5% .....	50
<b>Gambar 4.14</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dengan pembagian daerah .....	51

<b>Gambar 4.15</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dan hamburan pengayaan 3% .....	52
<b>Gambar 4.16</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dan hamburan pengayaan 4% .....	52
<b>Gambar 4.17</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dan hamburan pengayaan 5% .....	53
<b>Gambar 4.18</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi dan hamburan dengan pembagian daerah.....	54
<b>Gambar 4.19</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi daya 3.000 MW pengayaan 3% .....	55
<b>Gambar 4.20</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi daya 3.000 MW pengayaan 4% .....	55
<b>Gambar 4.21</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi daya 3.000 MW pengayaan 5% .....	56
<b>Gambar 4.22</b> Grafik nilai fluks neutron relatif pada baris ( $z=1$ ) sumber fisi daya 3.000 MW dengan pembagian daerah .....	57

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi nuklir termasuk salah satu energi bersih masa depan, karena tidak menghasilkan emisi (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Energi nuklir dikenal sebagai sumber energi yang aman dan ramah lingkungan karena berasal dari pengayaan bahan baku Uranium. Sumber daya uranium  $U^{235}$  yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir mempunyai potensi yang besar dalam penyediaan energi yang diperlukan. Selain itu, energi nuklir ditinjau dari segi lingkungan, efeknya tidak menghasilkan gas rumah kaca seperti sulfur oksida ( $SO_x$ ) dan nitrogen oksida ( $NO_x$ ) serta unsur berbahaya misalnya logam berat seperti timbal (Pb), arsen (As), dan merkuri (Hg). Artinya pemanfaatan energi nuklir sangat ramah terhadap lingkungan dan dapat mencegah pemanasan global (Dasmo, 2015). Energi nuklir dapat dibangkitkan salah satunya melalui jalur fisi. Pada fisi, terjadi pembelahan inti berat menjadi inti-inti yang lebih ringan (Santoso, 2015). Jika sebuah inti berat ditumbuk oleh partikel (neutron) dapat membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan beberapa partikel lain. Mekanisme ini disebut pembelahan inti (fisi nuklir) (Kidd, 2009).

Pembangkit listrik fisi nuklir telah memasok 20% energi listrik di dunia atau sekitar 7% total energi dunia, artinya teknologi pembangkit listrik fisi nuklir ini sudah banyak digunakan dan yang dominan salah satunya jenis *Pressurized Water Reactor* (PWR) (Santoso, 2015). Reaktor jenis 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 (Sigit *et al.*, 2012).



PWR pertama dengan daya 5 MWe didirikan di Obninsk dekat Moskow pada tahun 1954. Kemudian PLTN jenis PWR dikembangkan lebih lanjut hingga saat ini dayanya mencapai 1400 MWe. Negara-negara yang mengembangkan PWR antara lain Amerika Serikat, Perancis, Jerman, Rusia, Jepang, dan Korea Selatan (Suhaemi dan Djainal, 2010). Jenis reaktor PWR menggunakan air ringan ( $H_2O$ ) sebagai pendingin dan moderator yang dipertahankan dalam fase cair (Suparlina dan Susilo, 2010). Di samping itu, sistem pendingin pada PWR ini terbagi atas tiga untai aliran pendingin antara lain untai primer, untai sekunder dan untai tersier. Pada untai primer, energi kalor yang berasal dari reaktor dialirkan ke pembangkit uap kemudian oleh untai sekunder uap air tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin. Uap keluaran yang dihasilkan dari turbin dikondensasikan (perubahan uap menjadi cairan) oleh alat kondensor dan berubah menjadi air kondensat. Pada kondensor menggunakan air pendingin yang dialirkan pada untai tersier (Triana, 2009).

Dalam mempelajari sistem reaktor nuklir, analisis neutronik termasuk menjadi salah satu bagian yang sulit, di samping masalah termal hidrolis dan keselamatan reaktor. Masalah neutron ini dapat digambarkan dengan menggunakan variabel energi, ruang dan waktu (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Penampang lintang makroskopik (*macroscopic cross section*) menjadi salah satu hal yang diperlukan untuk mengetahui kuantitas dari masing-masing reaksi. Penampang lintang makroskopik perlu diketahui karena menjadi sangat penting untuk menentukan distribusi fluks neutron dalam teras reaktor (Islami *et al.*, 2019). Di dalam suatu reaktor, ada ribuan elemen bahan bakar yang diletakkan saling berdekatan. Seluruh elemen bahan bakar dan daerah di sekitarnya disebut dengan teras reaktor. Elemen bahan bakar ini berbentuk seperti batang-batang tipis. Umumnya bahan bakar yang dipakai adalah  $U^{235}$  (Tadeus *et al.*, 2010). Namun,  $U^{235}$  menjadi salah satu pemancar radiasi alfa dengan energi cukup rendah. Bahaya radiasi akan muncul apabila isotop uranium masuk ke dalam tubuh karena akan merusak jaringan dan dapat menimbulkan penyakit kanker (Setiawan, 2014).

Untuk merancang reaktor nuklir dengan baik, maka perlu memprediksi bagaimana neutron didistribusikan ke seluruh sistem reaktor. Neutron yang ada dalam teras

reaktor bergerak secara acak sebagai akibat dari tumbukan dengan nuklida yang terus berulang-ulang. Efek dari tumbukan nuklida tersebut neutron akan mengalami semacam difusi dalam teras reaktor. Selanjutnya, distribusi neutron dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan difusi dengan metode yang biasanya disebut sebagai pendekatan difusi. Meskipun sekarang sudah banyak metode yang telah dikembangkan untuk dapat menyelesaikan distribusi neutron, namun perhitungan difusi masih diyakini sebagai metode yang tepat. Metode perhitungan difusi digunakan karena dengan penyelesaian persamaan difusi ini dapat memberikan bentuk distribusi fluks neutron terhadap ruang dan energi khususnya pada reaktor air ringan bertekanan (PWR) (Tahara dan Sekimoto, 2002).

Usman dan Shafii (2017) telah melakukan penelitian mengenai bentuk geometri slab teras reaktor. Pada perhitungan matriks serta distribusi fluks neutron sel bahan bakar  $U^{235}$  dan  $U^{238}$  dengan dua kondisi yaitu homogen dan tidak homogen didapatkan hasil bahwa distribusi fluks neutron pada keadaan homogen lebih baik dan seragam dibandingkan pada keadaan tidak homogen. Mengingat fluks neutron merupakan salah satu parameter yang sangat penting dalam reaktor nuklir, maka penyelesaiannya dapat dibuat menggunakan pendekatan energi neutron. Dimana fluks neutron digunakan sebagai nilai masukan untuk menghitung koefisien difusi neutron (Yunanda dan Shafii, 2019).

Selain itu, Subkhi *et al.*, (2015) juga melakukan analisis distribusi fluks neutronik dengan menggunakan metode numerik untuk persamaan difusi multigrup yang diaplikasikan pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan daya 350 MW pada geometri teras tiga dimensi (x,y,z). Perhitungan neutronik dalam penelitian ini menggunakan program SRAC (*System Reactor Analysis Code*) yang dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*).

Mengacu pada penelitian sebelumnya, maka dilakukan penelitian dengan mengganti bentuk geometri teras tiga dimensi (x,y,z) menjadi silinder dua dimensi (r,z). Selanjutnya, penyelesaian metode numerik persamaan difusi multigrup pada bagian  $\frac{1}{4}$  silinder dua dimensi (r,z) untuk mendapatkan solusi persamaan difusi

neutron kemudian menggunakan metode Gauss Seidel dalam bahasa pemrograman C++ dengan tujuan memperoleh distribusi fluks neutron pada reaktor *Pressurized Water Reactor* (PWR).

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana distribusi fluks neutron pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) berbentuk silinder menggunakan bahan bakar uranium daur ulang?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh distribusi fluks neutron pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) berbentuk silinder menggunakan bahan bakar uranium daur ulang.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Menggunakan persamaan difusi neutron multigrup.
2. Reaktor yang digunakan adalah jenis reaktor *Pressurized Water Reactor* (PWR).
3. Model geometri teras reaktor yang digunakan berbentuk silinder.
4. Perhitungan dilakukan terhadap koordinat silinder dua dimensi (r,z) dengan diambil  $\frac{1}{4}$  bagian.
5. Pengayaan bahan bakar dilakukan pada persentase 3–5% dengan rentang 1%.
6. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah C++.
7. Bahan bakar yang digunakan adalah uranium oksida (UO<sub>2</sub>)
8. Moderator dan pendingin yang digunakan adalah air ringan (H<sub>2</sub>O).

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai solusi persamaan difusi neutron dan distribusi fluks neutron pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) berbentuk silinder menggunakan bahan bakar uranium daur ulang.

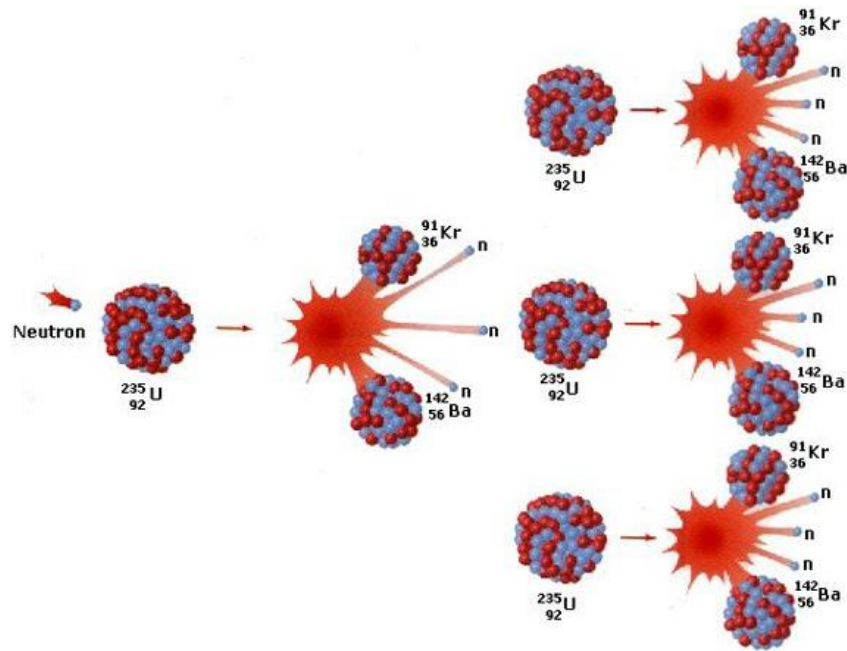
2. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Reaktor Nuklir

Istilah reaktor nuklir digunakan untuk perangkat yang berfungsi mengontrol terjadinya reaksi fisi (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Contoh reaksi fisi adalah inti uranium yang ditumbuk oleh neutron. Saat sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron, inti akan mengalami pembelahan atau reaksi fisi (Zweifel, 1973). Jika neutron yang dilepaskan dapat memicu reaksi yang sama pada atom  $U^{235}$  lainnya dan melepaskan neutron baru lain, reaksi fisi berantai dapat terjadi. Reaksi ini dapat terjadi dan terjadi lagi hingga berjuta-juta kali, maka energi panas dalam jumlah sangat besar dapat dihasilkan dari sedikit Uranium. Secara kasar energi panas dari reaksi inti 1 gram  $U^{235}$  adalah sama dengan energi panas dari pembakaran 1 ton batubara (Setiawan, 2014).

Pada reaktor dapat berlangsung reaksi fisi berantai terkendali dan kontinu untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop dan nuklida baru (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Terkendali yang dimaksud dalam hal ini adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan sesuai dengan kebutuhan energi (Zweifel, 1973). Syarat terjadi reaksi fisi berantai adalah apabila suatu inti unsur yang dapat membelah atau fisi bereaksi dengan neutron termal (neutron yang sudah diperlambat oleh moderator) (Stacey, 2006). Reaksi berantai berasal dari peristiwa tumbukan antara neutron dengan nuklida di dalam reaksi nuklir (Islami *et al.*, 2019) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Reaksi fisi berantai (Sutrisna, 2011).

Reaksi fisi pada Gambar 2.1 artinya uranium menghasilkan neutron. Neutron yang dihasilkan dapat menumbuk kembali inti uranium untuk membentuk fisi selanjutnya (Novalianda *et al.*, 2020). Mekanisme ini terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat hingga membentuk reaksi berantai tak terkendali. Akibatnya terjadi pelepasan energi yang besar secara singkat. Pelepasan energi yang dihasilkan melalui reaksi fisi berantai dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik apabila reaksi fisi berantai ini terkendali (Zweifel, 1973).

Berdasarkan energi yang digunakan untuk mempertahankan reaksi fisi berantai, reaktor nuklir dibagi menjadi dua macam yaitu:

1. Reaktor lambat (*thermal*) yaitu reaktor yang di dalamnya terjadi reaksi fisi dengan didominasi oleh neutron lambat. Hal ini ditandai oleh adanya moderator yang digunakan untuk menurunkan kecepatan neutron.
2. Reaktor cepat (*fast*) yaitu reaktor yang di dalamnya terjadi reaksi fisi dengan didominasi oleh neutron cepat. Hal ini ditandai dengan adanya pengurangan bahan moderator (Duderstadt dan Hamilton, 1976).



## 2.2 Komponen Dasar Reaktor Nuklir

Komponen dasar reaktor nuklir merupakan komponen yang harus ada pada sebuah reaktor nuklir untuk mengendalikan laju pembelahan (reaksi fisi). Komponen tersebut harus memenuhi standar kualitas tinggi dan handal sehingga kemungkinan terjadinya kecelakaan atau kegagalan komponen sangat kecil. Adapun komponen dasar dari sebuah reaktor nuklir adalah sebagai berikut:

### 1. Bahan Bakar (*fuel*)

Bahan bakar merupakan sumber energi nuklir. Ada dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil yang berarti unsur atau atom dapat langsung membelah apabila ditumbuk oleh sebuah partikel neutron dan bahan fertil yang berarti unsur atau atom tidak dapat langsung membelah apabila ditumbuk oleh sebuah partikel neutron tetapi akan membentuk bahan fisil. Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir adalah  $U^{233}$ ,  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  dan  $Th^{232}$  (Benedict *et al.*, 1981).

### 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. Syarat bahan moderator antara lain atom dengan nomor massa kecil, sesuai jenis reaktor yang akan didesain dan memiliki daya hantar panas yang baik serta tidak korosif misalnya adalah H, D, He, Be, U, H<sub>2</sub>O, grafit dan air berat (D<sub>2</sub>O). Dan moderator yang umum digunakan adalah air (Lewis, 2008).

### 3. Batang Kendali (*control rod*)

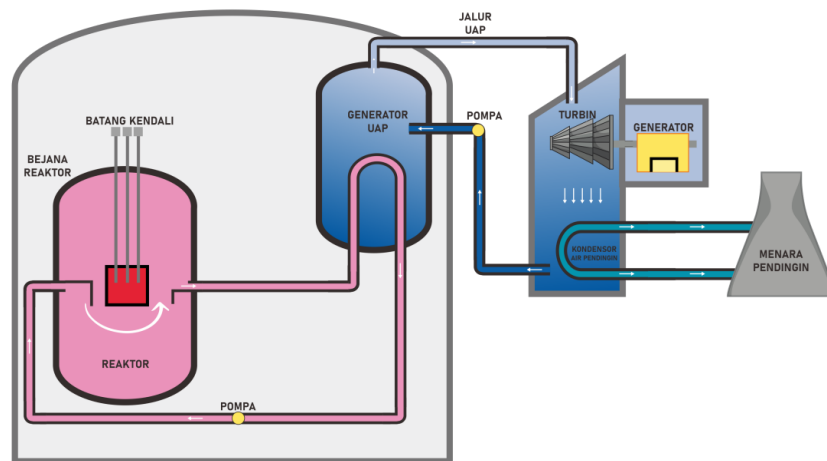
Batang kendali merupakan komponen reaktor yang berfungsi untuk mengontrol keluaran daya dari sebuah reaktor dengan cara mengendalikan jumlah neutron yang dihasilkannya. Bahan yang digunakan untuk batang kendali reaktor haruslah memiliki kemampuan tinggi untuk menyerap neutron (Zweifel, 1973). Batang kendali terbuat dari bahan-bahan penyerap neutron, seperti boron (B) dan cadmium (Cd) (Lewis, 2008).

#### 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 *Pressurized Water Reactor (PWR)***

PWR atau reaktor air pertama kali dikembangkan di Amerika Serikat. Unit penghasil tenaga listrik komersial pertama mulai beroperasi di Shippingport, Pennsylvania pada tahun 1957. PWR sekarang didistribusikan ke seluruh dunia. Reaktor PWR merupakan jenis reaktor termal yang menggunakan air ringan ( $H_2O$ ) sebagai pendingin dan moderatornya. Karakteristik PWR lainnya memerlukan tekanan operasi 15 MPa, daya termal teras reaktor 3000 MW menggunakan dua loop pendingin: loop primer digunakan pada teras reaktor dan loop sekunder pada turbin (Weinberg *et al.*, 1956). PWR atau reaktor air bertekan termasuk ke dalam jenis reaktor nuklir termal yang menggunakan air ringan (*light water*) sebagai moderator maupun pendingin (*coolant*). Moderator berfungsi sebagai material penahan untuk memperlambat laju neutron di dalam teras reaktor, sedangkan pendingin (*coolant*) berfungsi sebagai penyerap panas hasil reaksi fisi yang terjadi saat di dalam teras reaktor. Pada data IAEA terakhir (tahun 2012) menunjukkan bahwa dari 435 buah total reaktor di dunia, 272 buah diantaranya adalah reaktor PWR (Subkhi *et al.*, 2015). Untuk skema reaktor PWR ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Skema *Pressurized Water Reactor* (PWR).

Pada Gambar 2.2 PWR uap panas dihasilkan di dalam generator uap (*steam generator*). Kemudian air pada bejana reaktor (*reactor vessel*) dipanaskan oleh reaksi fisi sampai suhu menjadi tinggi tetapi tetap dijaga agar tidak mendidih dengan cara diberi tekanan tinggi yang terkontrol pada pemberi tekanan. Setelah itu, air panas dari bejana reaktor dimasukkan ke generator uap dan energinya menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin. Karena terjadi konveksi energi, maka suhunya menjadi turun. Air yang sudah dingin ini dimasukkan kembali ke bejana reaktor sekaligus berfungsi sebagai pendingin reaktor nuklir. Pendinginan ini disebut pendingin primer, sedangkan pendingin sekunder yaitu pendinginan uap pada kondenser (Dwiatmanto, 2016). Reaktor nuklir jenis PWR mempunyai keunggulan yaitu sangat stabil karena kecenderungannya yang menghasilkan daya lebih kecil apabila ada peningkatan suhu sehingga reaktor lebih aman beroperasi dipandang dari sisi stabilitas. Tetapi kekurangannya adalah air pendingin harus bertekanan tinggi agar tetap dalam kondisi cair, maka memerlukan pemipaan dan bejana tahan tekanan karena kenaikan tekanan dapat menyebabkan LOCA (*Loss-Of-Coolant Accident*) atau kecelakaan kehilangan air pendingin sehingga diperlukan penambahan peralatan seperti generator uap, pompa pendingin, dan lain-lain (Sigit *et al.*, 2012).

#### 2.4 Analisis Neutronik

Pada perhitungan neutronik teras reaktor, dapat dilakukan beberapa penyederhanaan misalnya aproksimasi difusi. Untuk menurunkan persamaan

difusi multigrup, kita dapat menggunakan konsep keseimbangan neutron (*neutron balance*). Berdasarkan konsep keseimbangan neutron tersebut terdapat dua faktor yang menambah jumlah neutron dalam suatu grup:

1. Neutron muncul dalam grup  $g$  dari sumber neutron, sumber neutron ini terutama dihasilkan dari reaksi fisi nuklir.
2. Neutron dengan sembarang energi mengalami reaksi hamburan nuklir (*scattering*), sehingga energinya berubah dan termasuk dalam interval energi grup  $g$ .

Selain itu, terdapat 3 faktor yang mengurangi jumlah neutron dalam suatu grup, yaitu:

1. Kebocoran neutron, yaitu neutron keluar dari teras reaktor.
2. Absorpsi, yaitu neutron diserap oleh material di dalam teras reaktor.
3. Neutron dalam grup  $g$  mengalami reaksi hamburan nuklir (*scattering*) sehingga energinya berubah dan keluar dari interval energi grup  $g$ .

Bentuk persamaan difusi bisa diselesaikan dengan metode numerik beda hingga (*finite-difference*) untuk suatu elemen ruang berindeks  $i$  (arah radial) dan  $j$  (arah aksial) (Subkhi *et al.*, 2015).

## 2.5 Persamaan Difusi

Persamaan difusi merupakan bentuk pendekatan yang paling sederhana untuk menyelesaikan kasus dalam analisis neutronik reaktor nuklir. Solusi persamaan difusi akan memberikan bentuk distribusi fluks neutron terhadap ruang. Persamaan difusi ini menggambarkan hubungan antara laju reaksi produksi, laju serapan, dari laju bocoran neutron. Produksi neutron dapat berasal dari hasil reaksi fisi, dari hamburan atau dari suatu sumber neutron luar. Serapan neutron terjadi akibat reaksi absorpsi neutron oleh inti-inti atom medium. Sedangkan bocoran neutron terjadi akibat hamburan yang keluar menuju elemen ruang lain atau keluar dari batas luar medium.

Neutron dalam reaktor mengalami tumbukan sehingga menghasilkan hamburan dan neutron selalu berpindah-pindah tempat dari satu titik hamburan ke titik hamburan berikutnya sampai neutron mengalami reaksi serapan. Proses perpindahan neutron ini disebut proses *transport*. Persamaan yang dapat

menggambarkan proses *transport* disebut persamaan *transport*. Suatu bentuk pendekatan terhadap teori *transport* adalah teori difusi. Persamaan *transport* ini merupakan persamaan tentang kesetimbangan neutron. Untuk reaktor kritis, jumlah neutron sebelum dan sesudah reaksi harus sama. Persamaan umum difusi pada saat sistem dalam keadaan setimbang adalah:

$$\text{produksi} - \text{kebocoran} - \text{penyerapan} = 0 \quad (2.1)$$

atau dapat juga dituliskan:

$$S = \Sigma_a \phi + D \nabla^2 \phi = 0 \quad (2.2)$$

dengan  $S$  = suku sumber neutron,  $\Sigma_a$  = penampang lintang absorpsi,  $\phi$  = fluks neutron, dan  $D$  = konstanta difusi (Athiqoh *et al.*, 2014).

Di dalam analisis reaktor, perhitungan persamaan difusi neutron seringkali dilakukan secara berulang-ulang. Sehingga secara keseluruhan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan perhitungan tersebut menjadi cukup lama. Dengan demikian, percepatan perhitungan persamaan difusi ini akan sangat membantu mempercepat analisis reaktor secara keseluruhan. Untuk dapat memperoleh nilai distribusi fluks neutron dari persamaan difusi, maka geometri teras reaktor dapat dibagi menjadi bagian-bagian kecil (*mesh*). Selanjutnya, persamaan difusi tersebut akan diintegrasikan dan didiskritisasi sehingga persamaannya akan menjadi bentuk sebuah matriks (Wau *et al.*, 2014).

## 2.6 Uranium

Bahan bakar uranium yang tersedia di alam mempunyai 3 isotop yaitu  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  dan  $U^{234}$ . Isotop berarti atom-atom yang memiliki nomor atom sama tetapi nomor massa berbeda.  $U^{235}$  adalah isotop yang fisil (mampu mempertahankan reaksi fisi berantai) dan dapat meluruh sekaligus mengeluarkan sejumlah energi, yang digunakan dalam industri nuklir. Industri nuklir dalam bentuk bahan bakar reaktor dan persenjataan membutuhkan uranium dengan kadar isotop  $U^{235}$  yang lebih banyak yaitu (antara 2% - 94% massa), sehingga diperlukan proses pengayaan (*enrichment*) terhadap uranium alam. Dalam proses pengayaan ini,  $U^{235}$  disaring dan dipisahkan secara terus menerus. Inti atom dari  $U^{235}$  terdiri dari 92 proton dan 143 neutron ( $92 + 143 = 235$ ). Saat sebuah inti atom  $U^{235}$  menangkap neutron, ia

akan membelah menjadi dua inti atom baru dan melepaskan sejumlah energi dalam bentuk panas, disertai pelepasan 2 atau 3 neutron baru (Tadeus *et al.*, 2010).

## 2.7 Uranium Oksida (UO<sub>2</sub>)

Pembuatan bahan bakar reaktor dari sejak penambangan memerlukan beberapa tahapan proses. Uranium ditemukan oleh ahli kimia asal Jerman bernama Heinrich Klaproth Martin pada tahun 1789, dari mineral yang disebut bijih-bijih uranium. Bijih uranium hasil penambangan diolah menjadi tepung triuranium oktoksida (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) kemudian dimurnikan dan dikonversikan menjadi gas uranium hexaflorida (UF<sub>6</sub>) dengan kandungan U<sup>235</sup> 0,7% dari total uranium. Kebanyakan reaktor nuklir menggunakan bahan bakar dengan kandungan U<sup>235</sup> lebih dari 0,7%. Oleh karena itu, kandungan U<sup>235</sup> dalam UF<sub>6</sub> harus ditingkatkan atau diperkaya (*enrichment*). Gas UF<sub>6</sub> yang telah diperkaya kemudian dikonversikan menjadi UO<sub>2</sub> (Novalianda *et al.*, 2016).

Bahan bakar PWR yang digunakan adalah uranium dalam bentuk UO<sub>2</sub> keramik yang diperkaya 3 - 4%. Bahan bakar bentuk keramik mempunyai keunggulan yaitu ketahanan pada saat operasi reaktor karena titik lelehnya yang tinggi, stabil pada lingkungan radiasi, baik mengenai struktur dimensi, maupun volume karena tidak terjadi perubahan transformasi fasa pada suhu rendah dan mempunyai daya tahan korosi karena oksidasi (Sigit *et al.*, 2012).

## 2.8 Bahasa Pemrograman C++

Bahasa pemrograman atau sering diistilahkan dengan bahasa komputer merupakan teknik komando atau instruksi standar untuk memerintah komputer. Terdapat banyak jenis bahasa pemrograman, salah satunya adalah bahasa pemrograman C++ di mana bahasa pemrograman C++ ini merupakan peranakan (*hybrid*) dari bahasa C. Bahasa pemrograman yang mudah dipahami, biasanya menggunakan kata-kata bahasa Inggris didalamnya misalnya IF untuk menyatakan jika dan AND untuk menyatakan dan. Yang termasuk dalam kelompok bahasa ini adalah bahasa C dan C++ (Dewi, 2010).

C++ adalah bahasa pemrograman PC yang dibuat oleh Bjarne Stroustrup. Ini merupakan produk dari bahasa C yang dikembangkan di Bell Labs (Dennis Ritchie) pada tahun 1970-an. Pemrograman dilakukan pada sistem *Unix* dalam desain ANSI (*American National Standards Institute*). Bjarne Stroustrup dari Bell Labs pertama kali mengembangkan C++ pada awal tahun 1980-an. Keistimewaan bahasa C++ dikarenakan bahasa ini diantaranya mendukung pemrograman berorientasi objek atau yang lebih sering dikenal dengan istilah OOP (*Object Oriented Programming*), telah membuat bahasa C++ ini banyak disukai di lingkungan *programmer* sampai dengan mahasiswa (Arifin dan Didik, 2020).

## **2.9 SRAC (*System Reactor Atomic Code*)**

SRAC adalah suatu sistem kode yang berlaku untuk analisis neutron dari berbagai jenis reaktor. SRAC merupakan buah kerja keras para ilmuwan JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*) mulai berkembang pada tahun 1978 sebagai standar kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*). Salah satu kode dasar pada sistem SRAC yaitu PIJ. PIJ sebagai kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi 16 kisi geometri (Okumura *et al.*, 2002).

SRAC terdiri dari dua file yaitu file masukan (*input*) dan file keluaran (*output*). File masukan SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila masukan data pada SRAC telah selesai, kemudian di run sehingga file keluaran akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai tepat atau tidak. Setelah perhitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2002).

### **III. METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan September 2022 sampai dengan Februari 2023. Tempat dilaksanakan penelitian ini adalah di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

#### **3.2 Alat dan Bahan**

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Laptop berbasis *windows* dengan menggunakan bahasa pemrograman C++.

#### **3.3 Prosedur Penelitian**

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini memiliki beberapa tahapan, antara lain sebagai berikut:

##### **3.3.1 Menentukan Spesifikasi Teras Reaktor**

Reaktor daya PWR adalah reaktor daya jenis air tekan (*pressurized water reactor*) yang didesain oleh Westinghouse. Inti/teras reaktor nuklir adalah bagian dari reaktor nuklir yang bersisi komponen bahan bakar nuklir dimana terjadi reaksi nuklir yang menghasilkan panas. Reaktor PWR mempunyai bahan bakar jenis pelet silinder dengan bahan bakar  $UO_2$  dan selongsongnya Zirkonium. Di dalam selongsong bahan bakar baik di bagian atas maupun bagian bawah terdapat ruang yang dimanfaatkan untuk menampung gas-gas hasil produk fisi. Air ringan digunakan sebagai pendingin dan moderator yang dicampur dengan boron cair yang berfungsi sebagai penyerap neutron. Konsentrasi boron cair bervariasi jumlahnya sesuai dengan perubahan reaktivitas yang berubah karena perubahan fraksi bakar di dalam teras (Tukiran, 2005).



### 3.3.2 Menentukan Geometri Sel dan Fraksi Volume

Geometri sel dengan 3 jenis material yang digunakan dalam sel bahan bakar diantaranya yaitu bahan bakar (*fuel*), selongsong (*cladding*), dan moderator. Model geometri sel berupa sel silinder yang didefinisikan dengan IGT = 3 pada SRAC. Fraksi volume bahan bakar merupakan perbandingan antara volume bahan bakar dan volume keseluruhan pin bahan bakar yang meliputi bahan bakar, selongsong, dan moderator (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Selanjutnya, melakukan perhitungan fraksi volume untuk bahan bakar, selongsong, dan moderator menggunakan persamaan berikut ini.

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

$$A_{cc} = A_c - A_f \quad (3.2)$$

$$A_{mm} = A_m - A_c \quad (3.3)$$

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

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

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

dengan  $A$  = luas area ( $\text{cm}^2$ ),  $A_f$  = luas awal area bahan bakar (*fuel*),  $A_c$  = luas awal area selongsong (*cladding*),  $A_m$  = luas awal area moderator,  $A_{cc}$  = luas area selongsong (*cladding*),  $A_{mm}$  = luas area moderator,  $\%A_f$  = fraksi volume bahan bakar (*fuel*),  $\%A_c$  = fraksi volume selongsong (*cladding*), dan  $\%A_m$  merupakan fraksi volume moderator.

### 3.3.3 Menentukan Densitas Atom

Melakukan perhitungan densitas atom untuk bahan bakar uranium oksida  $\text{UO}_2$  dan moderator air  $\text{H}_2\text{O}$  menggunakan Persamaan (3.7).

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

dengan  $N$  = densitas atom (atom/mol),  $\rho$  = massa jenis molekul ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $N_A$  = bilangan Avogadro ( $0,6022 \times 10^{24}$  atom/mol), dan  $M$  = massa molekul ( $\text{g}/\text{mol}$ ) (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

### **3.3.4 Menghitung Penampang Lintang Makroskopik (*Macroscopic Cross Section*) dengan Modul PIJ**

Menghitung penampang lintang makroskopik dengan Modul PIJ menggunakan SRAC terhadap material bahan bakar. Selanjutnya, menentukan pengayaan yang akan digunakan terlebih dahulu yaitu sebesar pengayaan 3%, pengayaan 4%, dan pengayaan 5% untuk mendapatkan nilai densitas atom dari material yang digunakan kemudian memasukkan nilainya pada program SRAC. Hasil yang didapatkan dari proses PIJ ini nantinya akan di *input* dalam perhitungan persamaan difusi pada pemrograman C++.

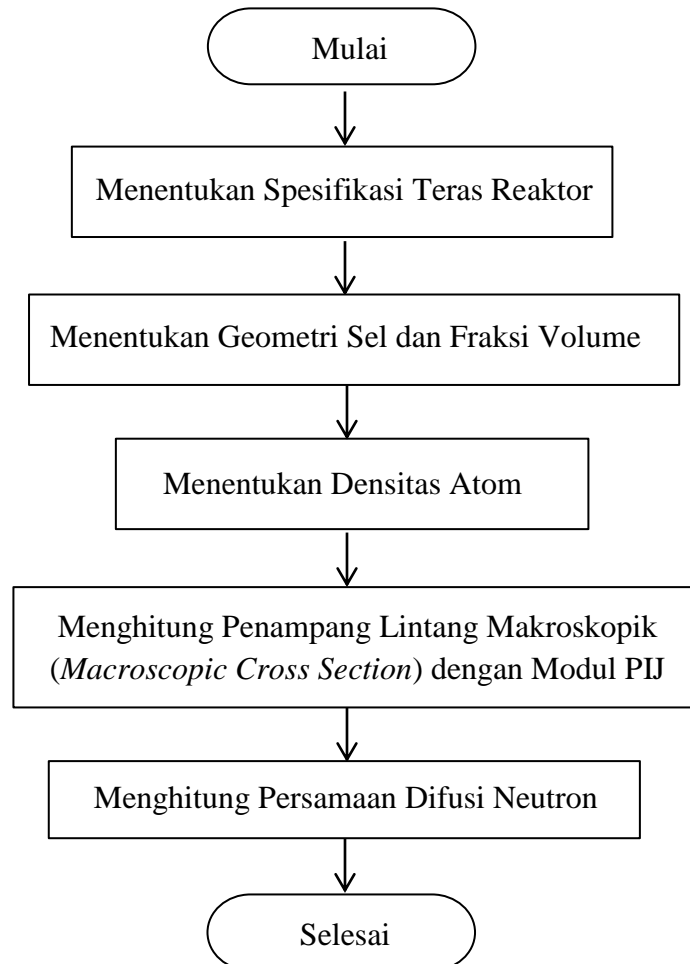
### **3.3.5 Menghitung Persamaan Difusi Neutron**

Melakukan perhitungan persamaan difusi neutron multigrup untuk memperoleh solusi persamaan yang selanjutnya di masukan kedalam pemrograman C++ menggunakan metode Gauss Seidel setelah itu di run untuk mendapatkan keluaran berupa nilai fluks neutron sesuai dengan yang diperintahkan.

### 3.4 Diagram Alir

#### 3.4.1 Diagram Alir Penelitian

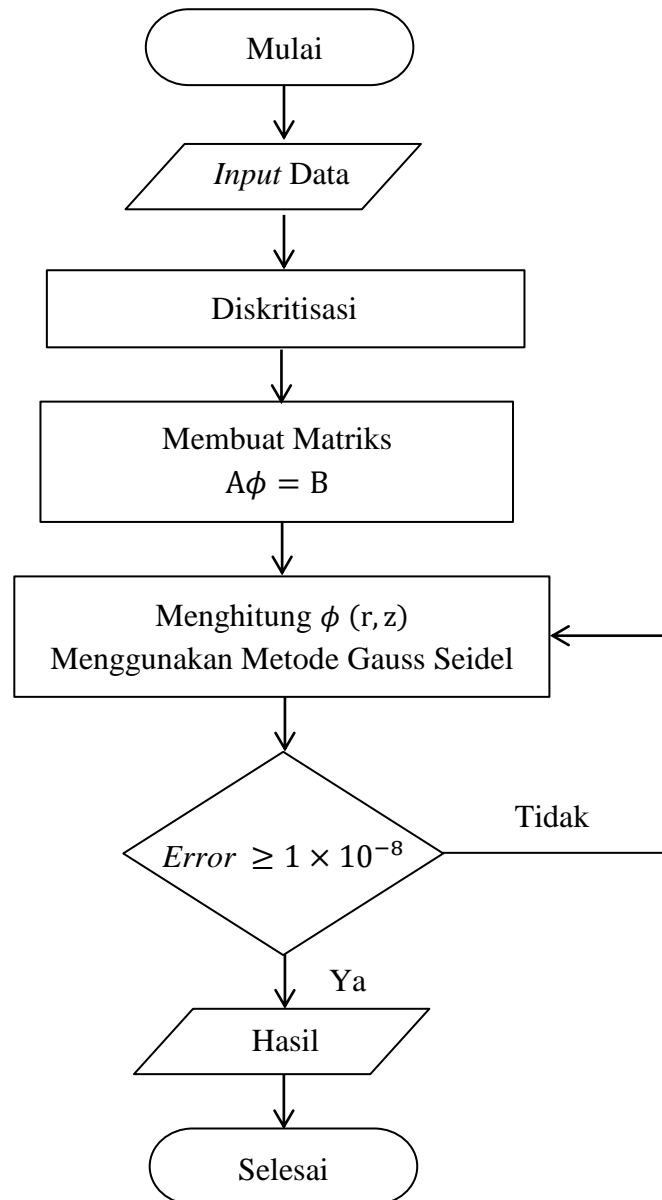
Diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian.

### 3.4.2 Algoritma Pemrograman Menghitung Persamaan Difusi Neutron dengan Metode Gauss Seidel

Untuk menyelesaikan persamaan difusi neutron digunakan tahapan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Diagram alir algoritma pemrograman.

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Simpulan

Berdasarkan pembahasan dari bab sebelumnya maka dapat diambil kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Persamaan difusi yang tanpa sumber memiliki bentuk distribusi nilai fluks neutron relatif tertinggi terdapat pada grup 1 dengan nilai terbesar  $1,1681 \times 10^{-10}$ . Sedangkan, grup 2 dan grup 3 bentuknya bertumpuk karena perbedaan nilai yang sangat kecil sehingga tidak terjadi perubahan yang signifikan.
2. Persamaan difusi dengan sumber fisi memiliki bentuk distribusi nilai fluks neutron relatif tertinggi terdapat pada grup 3 dengan nilai terbesar  $4,5685 \times 10^{-8}$ . Sedangkan, grup 2 berada diposisi tengah dan grup 1 menjadi yang paling rendah.
3. Persamaan difusi dengan sumber fisi dan hamburan memiliki bentuk distribusi nilai fluks neutron relatif tertinggi sama dengan sumber fisi yang terdapat pada grup 3 dan hanya terjadi perbedaan nilai fluks tertinggi saat pembagian daerah saja dengan nilai fluks tertinggi sebesar  $4,6009 \times 10^{-8}$ .
4. Persamaan difusi dengan sumber fisi dan mengubah daya sebesar 3.000 MW memiliki bentuk distribusi nilai fluks neutron relatif sama dengan saat daya sebesar 100 MW. Artinya, perubahan daya tidak mempengaruhi nilai fluks neutron yang dihasilkan.

### 5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan jenis reaktor yang berbeda selain PWR dan melanjutkan perhitungan hingga mendapatkan nilai multiplikasi ( $k_{\text{eff}} = 1$ ).

## DAFTAR PUSTAKA

- Aida, Nur. (2015). Perhitungan Burn Up Pada Reaktor Sub Kritis Berdaya Sedang Berpendingin Pb-Bi. *Jurnal Pendidikan Matematika dan IPA*. 9(5). 46–52.
- Arifin, R.W. dan Didik, Setiyadi. (2020). Algoritma Metode Pengurutan *Bubble Sort* dan *Quick Sort* Dalam Bahasa Pemrograman C++. *Information System For Educators And Professionals Journal*. 4(2). 178–187.
- Athiqoh, F., Setia Budi, W., Anam, C., Tri, D., dan Tjiptono, W. (2014). Distribusi Fluks Neutron Sebagai Fungsi *Burn-Up* Bahan Bakar Pada Reaktor Kartini. *Youngster Physics Journal*. 3(2). 107–112.
- Benedict, M., Pigford, T.H., dan Levi, H.W. (1981). *Nuclear Chemical Engineering*. Mc Graw-Hill. New York.
- Dasmo, D. (2015). Efektivitas Media Pembelajaran Interaktif Tentang Pemanfaatan Energi Nuklir Di Indonesia Pada Siswa Kelas XII SMA Negeri 28 Jakarta. *Jurnal Desain*. 2(3). 131-144.
- Dewi, L.J.E. (2010). Media pembelajaran Bahasa Pemrograman C++. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*. 7(1). 63–72.
- Duderstadt, J. J. D. dan Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Dwiatmanto, L. J. (2016). Penantian Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia. *Jurnal Orbith*. 12(2). 59–66.
- Firdaus, Almaida., Azmi, Adhari., dan Sheila, Sapitri. (2020). Solusi Penyelesaian Persamaan Difusi Dalam Reaktor Satu Dimensi Menggunakan Metode Diferensial. *Journal of Physics*. 1(1).9-13.
- IAEA. (2023). *Advanced Reactors Information System (ARIS)*. <https://aris.iaea.org/sites/core.html>. Diakses pada tanggal 12 Februari 2023 pukul 14.00.
- Islami, I. N., Tismawati, H., dan Subkhi, M. N. (2019). Studi Distribusi Neutronik Fluks Pada Reaktor Nuklir Sederhana. *Jurnal Wahana Fisika*. 4(1). 35-46.
- Khamidiyah, Khusnul. dan Usman, Pagalay. (2014). Diskritisasi Pada Sistem Persamaan Diferensial Parsial Pola Pembentukan Sel. *Jurnal Matematika Murni dan Aplikasi*. 3(3). 131-137.

- Kidd, S.W. (2009). *Nuclear Fuel Resources*. CRC Press. New York.
- Lewis, E.E. (2008). *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press. USA.
- Novalianda, S., Ariani, M., Manado, F., dan Su'ud, Z. (2016). Studi Awal Perhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida ( $UO_2$ ) pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Jurnal Lingkungan Dan Pembangunan*. 2(1). 381–390.
- Novalianda, S., Ramadhan, A., dan Su'ud, Z. (2020). Perhitungan *Burn Up* Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*. 22(2). 50-54.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Tsuchihashi, K. 2002. *General Description dan Input Intruction*. JAERI. Jepang.
- Okumura, K. Kugo, T., Kaneko, K., dan Tsuchihashi, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reaktor Physics Analysis*. JAEA. Japan.
- Santoso, B. (2015). Perkembangan Energi Nuklir Fusi. *Jurnal Ilmu Dan Budaya*. 39(48). 7–18.
- Setiawan, R. (2014). Analisis Neutronik Reaktor Termal *Pressurized Water Reactor* (PWR). *Jurnal Sains Dan Teknologi*. 25(2). 1–4.
- Sigit, Wahyono, H., Widodo, G., dan Moch. Setyadi. (2012). Pengaruh Suhu, Waktu dan Proses Re-Oksidasi Pelet Bahan Bakar Bekas PWR Simulasi. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*. 8(1). 1–13.
- Stacey, W.M. (2006). *Nuclear Reactor Physics*. John Wiley dan Sons Inc. New York.
- 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*. 9(1). 32–49.
- Suhaemi, T. D. dan Djainal, D. D. (2010). Perkembangan Desain Pembangkit Uap Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Jenis PWR. *Jurnal Teknologi Dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*. 5(2). 85–93.
- Suparlina, L. dan Susilo, J. (2010). Analisis Parameter Neutronik Dalam Desain Teras PLTN Tipe PWR 1000 MWe Dengan Metode Transport dan Difusi Neutron. *Jurnal Teknologi Dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*. 7(2). 1–6.
- Sutrisna, Kadek Fendy. 2011. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Blog Unes. <https://blog.unnes.ac.id/handisurya/2015/10/14/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir/>. Diakses pada tanggal 25 Juli 2022 pukul 19.00.

- Tadeus, D. Y., Setiyono, B., dan Setiawan, I. (2010). Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Jurnal Transmisi*. 12(1). 1–7.
- Tahara, Y., dan Sekimoto, H. (2002). *Transport Equivalent Diffusion Constants for Reflector Region in PWRs*. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 39(7). 716–728.
- Triana, Y. (2009). Perhitungan Desain Termal Kondensor Pada Sistem Pendingin PWR. *Jurnal Teknologi Nuklir*. 19(7). 323–331.
- Tukiran, S. (2005). Evaluasi Data Neutronik Teras PLTN Tipe PWR. *Jurnal Teknologi Nuklir*. 8(4). 94-100.
- Usman, J. dan Shafii, M. A. (2017). Perhitungan Matriks Pij dan Distribusi Fluks Neutron pada Sel Bahan Bakar Nuklir U-235 dan U-238 Berbentuk Slab Menggunakan MOC. *Jurnal Fisika Unand*. 6(1). 74–80.
- Wau, F. M. B., Taufiq, I., dan Afdal. (2014). Solusi Numerik Persamaan Difusi Neutron Pada Teras Reaktor Nuklir Dengan Metode Iterasi Jacobi Paralel Menggunakan Openmp. *Jurnal Ilmu Fisika*. 6(1). 8–17.
- Weinberg, A. M., Caglioti, G., Sahai, K., Youtz, B. L., dan Businaro, U. L. (1956). *Nuclear Reactor Physics*. II Nuovo Cimento. New York.
- Yunanda, W. W. dan Shafii, M. A. (2019). Analisis Koefisien Difusi Neutron terhadap Jarak Ekstrapolasi dalam Persamaan Difusi Multigrup Satu Dimensi. *Jurnal Fisika Unand*. 8(4). 362–367.
- Zweifel, P.F. (1973). *Nuclear Reactor Physics*. McGraw-Hill. USA.