

**PEMETAAN DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON DI TERAS
REAKTOR KARTINI ARAH RADIAL DAN AKSIAL
MENGGUNAKAN DETEKTOR SPND
(*SELF POWERED NEUTRON DETECTOR*)**

TESIS



**Resa Satria Adi Kuswandrata
22/501067/PTK/14684**

**Program Magister Program Studi Teknik Fisika
Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika
Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
2024**



PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Resa Satria Adi Kuswandrata
NIM : 22/501067/PTK/14684
Tahun Terdaftar : 2022
Program Studi : Magister Teknik Fisika
Fakultas : Teknik

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Tesis ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Perguruan Tinggi dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Tesis ini di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 17 Juli 2024

Yang menyatakan,



Resa Satria Adi Kuswandrata
22/501067/PTK/14684



LEMBAR PENGESAHAN

TESIS

PEMETAAN DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON DI TERAS REAKTOR KARTINI ARAH RADIAL DAN AKSIAL MENGGUNAKAN DETEKTOR SPND (*SELF POWERED NEUTRON DETECTOR*)

Resa Satria Adi Kuswandrata
22/501067/PTK/14684

Tesis ini telah dipertahankan di depan Tim Pengaji
Pada Tanggal 27 Juni 2024

Pembimbing Utama : Dr. Ir. Alexander Agung, S.T, M.Sc.,IPU.
Pembimbing Pendamping : Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan
Pengaji Utama : Dr.Ing. Ir. Kusnanto
Pengaji Pendamping : Dr.Ing. Ir. Sihana

Tesis ini diterima dan dinyatakan memenuhi syarat kelulusan
pada tanggal 17 Juli 2024

Kepala Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika
Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada



Dr. Ir. Alexander Agung, S.T, M.Sc.,IPU.
NIP. 197209161998031002

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan kasih karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan baik. Penelitian dengan judul “Pemetaan Distribusi Fluks Neutron di Teras Reaktor Kartini Arah Radial dan Aksial Menggunakan Detektor SPND (*Self Powered Neutron Detector*) disusun untuk memperoleh gelar master di Magister Teknik Fisika Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik UGM.

Terima kasih kepada:

- Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberikan dukungan melalui beasiswa *Degree by Research* (DBR) serta berbagai fasilitas yang telah dimanfaatkan oleh peneliti guna untuk menunjang pengambilan data yang digunakan sebagai bahan penulisan ini.
- Pembimbing utama dan pendamping, Dr. Ir. Alexander Agung, S.T, M.Sc.,IPU. dan Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan, yang telah memberikan bimbingan dan wawasan dalam menyelesaikan berbagai permasalahan yang ada saat penelitian berlangsung. Tim operasi dan perawatan bidang reaktor Kartini Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), yang telah mendukung dan mensukseskan proses pengambilan data dalam penelitian ini.
- Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi melalui skema “Penelitian Tesis Magister” tahun anggaran 2023 dengan nomor kontrak 3236/UN1/DITLIT/Dit-Lit/PT.01.03/2023 yang sudah membantu kelancaran penelitian ini.
- Pihak staff pendidikan dari Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, yang telah membantu administrasi sehingga penulis dapat dengan lancar menyelesaikan kegiatan belajar dengan baik, dan
- semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu kelancaran penelitian

Dukungan dari keluarga juga sangat membantu kelancaran penelitian ini, untuk Arlinda Primanita Anggaratna selaku istri dan juga Justicia Melisa Aurora selaku anak yang selalu memberikan dukungan secara moril sehingga penulisan tesis ini dapat berjalan dengan lancar.

Yogyakarta, 17 Juli 2024

Resa Satria Adi Kuswandrata



DAFTAR ISI

JUDUL	1
LEMBAR PENGESAHAN.....	3
KATA PENGANTAR.....	4
DAFTAR TABEL	7
DAFTAR GAMBAR.....	8
DAFTAR SINGKATAN DAN SATUAN	9
ABSTRACT	11
BAB I PENDAHULUAN	12
1.1 Latar Belakang	12
1.2 Rumusan dan Batasan Masalah.....	14
1.3 Keaslian Penelitian.....	15
1.4 Tujuan Penelitian.....	15
1.5 Manfaat Penelitian.....	15
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	16
2.1 Tinjauan Pustaka	16
2.1.1 Distribusi Fluks Neutron	16
2.1.2 Metode Aktivasi Foil Emas.....	17
2.1.3 Detektor SPND.....	18
2.1.4 Status Kebaruan Penelitian.....	19
2.2 Landasan Teori	20
2.2.1 Reaktor Kartini	20
2.2.2 Teras Reaktor Kartini	20
2.2.3 Bahan Bakar Reaktor Kartini	22
2.2.4 Interaksi Neutron dengan Materi.....	22
2.2.4.1 Interaksi Hamburan Neutron	22
2.2.4.2 Interaksi Serapan Neutron	23
2.2.5 Karakteristik SPND.....	23
2.2.6 Pengukuran Metode Tidak Langsung	26
2.2.7 MCNP.....	28
2.2.8 ESP32	29
2.2.9 <i>Electrometer Keithley 610C</i>	29
2.2.4 Ampere Source Keithley K261	29
2.3 Hipotesis	30



BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Alat dan Bahan	31
3.2 Prosedur Penelitian.....	33
3.2.1 Aktivasi Foil Emas (Au^{197}) Terbuka dan Terbungkus Cadmium (Cd)	33
3.2.2 Pencacahan Sampel Foil Emas Hasil Aktivasi	35
3.2.3 Pengukuran Fluks Neutron Dengan SPND	36
3.2.4 Setting TRIGAP MCNP	37
3.2.5 Penentuan Koordinat Pengukuran Dengan Visual Editor (Vised)	37
3.2.6 Pemrograman MCNPX Dengan Tally F5	39
3.2.7 Rancang Bangun Alat Monitoring Fluks Neutron dengan ESP32	40
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Aktivasi Foil Emas	43
4.2 Pengukuran Fluks Neutron Dengan SPND	44
4.2.1 Konversi Arus ke Fluks Neutron.....	47
4.3 Perhitungan Simulasi Dengan Metode Monte Carlo.....	52
4.4 Desain Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32	66
KESIMPULAN	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN	78



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Status Kebaruan Penelitian	19
Tabel 2. 2 Parameter Desain Reaktor Kartini	20
Tabel 2. 3 Data Akurasi Ampere Source Keithley K261	30
Tabel 4. 1 Data Foil Emas	43
Tabel 4. 2 Nilai Pengukuran SPND Daya 100 kW	45
Tabel 4. 3 Konversi Arus SPND ke Fluks Neutron	47
Tabel 4. 4 Koordinat Lokasi Perhitungan Dengan MCNPX	53
Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Fluks Neutron Dengan MCNPX	54
Tabel 4. 6 Perhitungan MCNPX Tiap Ring Bahan Bakar	59
Tabel 4. 7 Hubungan Antara Arus Listrik Dan Tegangan Keluaran Pada	66
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Alat Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP 32	72



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Konfigurasi Bahan Bakar Reaktor Kartini	13
Gambar 2. 1 Distribusi Arah Radial Fluks Neutron Reaktor Kartini	16
Gambar 2. 2 Tampak Depan Teras dan Tangi Reaktor Kartini	21
Gambar 2. 3 Sketsa Bahan Bakar (a) Tipe 104 dan (b) Tipe 204	22
Gambar 2. 4 Struktur Detektor SPND	24
Gambar 2. 5 Interaksi Detektor SPND Dengan Neutron	26
Gambar 2. 6 Tampang Lintang Mikroskopis Emas	27
Gambar 2. 7 Grafik F_{cd} Terhadap Ketebalan Foil Emas dan Cadmium	28
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian	32
Gambar 3. 2 Letak Sample Foil Emas Pada Sample Holder	33
Gambar 3. 3 Lokasi Eksperimen di Teras Reaktor Kartini.....	34
Gambar 3. 4 Penempatan Stik Alumunium di Lokasi H16	34
Gambar 3. 5 Skema Pencacahan Dengan Detektor GM	35
Gambar 3. 6 Penempatan SPND di Dalam Teras Reaktor Kartini	36
Gambar 3. 7 Setting TRIGAP MCNP Teras Reaktor Kartini.....	37
Gambar 3. 8 Tampilan Model Teras Reaktor Kartini Tampak Depan	38
Gambar 3. 9 Tampilan Model Teras Reaktor Kartini Tampak Atas	39
Gambar 3. 10 Hardware Architecture Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32	40
Gambar 3. 11 Picoampere Source K261	41
Gambar 3. 12 Electrometer Keithley 610C	41
Gambar 4. 1 Fluks Neutron Hasil Aktivasi Foil Emas	44
Gambar 4. 2 Arus SPND Terhadap Posisi Penempatan SPND	46
Gambar 4. 3 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 1 - Konversi Arus SPND	49
Gambar 4. 4 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 2 - Konversi Arus SPND	50
Gambar 4. 5 Distribusi Fluks Neutron Grup 1 Arah Radial	51
Gambar 4. 6 Distribusi Fluks Neutron Grup 2 Arah Radial	52
Gambar 4. 7 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 1 – Perhitungan MCNPX.....	56
Gambar 4. 8 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 2 – Perhitungan MCNPX.....	57
Gambar 4. 9 Distribusi Radial Fluks Neutron Grup 1 – Perhitungan MCNPX.....	58
Gambar 4. 10 Distribusi Radial Fluks Neutron Grup 2 – Perhitungan MCNPX.....	58
Gambar 4. 11 Representasi 2D Neutron Termal - Perhitungan MCNPX.....	62
Gambar 4. 12 Representasi 3D Neutron Termal - Perhitungan MCNPX.....	63
Gambar 4. 13 Representasi 2D Neutron Epitermal - Perhitungan MCNPX	64
Gambar 4. 14 Representasi 3D Neutron Epitermal - Perhitungan MCNPX	64
Gambar 4. 15 Representasi 2D Neutron Cepat - Perhitungan MCNPX	65
Gambar 4. 16 Representasi 3D Neutron Cepat - Perhitungan MCNPX	65
Gambar 4. 17 Korelasi Arus Keluaran Ampere Source K261 Dengan Tegangan Keluaran Electrometer.....	67
Gambar 4. 18 Flowchart Pemrograman Pada ESP32	68
Gambar 4. 19 Alat Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32 Tanpa Cover	70
Gambar 4. 20 Alat Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32 Dengan Cover	70
Gambar 4. 21 Tampilan Aplikasi Monitoring Fluks Neutron	71
Gambar 4. 22 Grafik Fluks Neutron Secara Konversi dan Pembacaan Langsung	73



DAFTAR SINGKATAN DAN SATUAN

SINGKATAN

BKO	Batas Kondisi Operasi
LAK	Laporan Analisis Keselamatan
TRIGA	<i>Training Research and Isotope Production by General Atomic</i>
SPND	<i>Self-Powered Neutron Detector</i>
Rh	Rhodium
UZrH	Uranium Zirconium Hidrida
U	Uranium
IRL	<i>Internet Reactor Laboratory</i>
MCNP	<i>Monte Carlo N Particle</i>
2D	2 Dimensi
3D	3 Dimensi

SATUAN

n/cm ² s	neutron per sentimeter kuadrat sekon
mm	millimeter
kW	kilowatt
s	sekon/detik
eV	elektron volt
V	volt
nA	nano ampere
mV	mili volt



PEMETAAN DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON DI TERAS REAKTOR KARTINI ARAH RADIAL DAN AKSIAL MENGGUNAKAN DETEKTOR SPND (*SELF POWERED NEUTRON DETECTOR*)

Oleh

Resa Satria Adi Kuswandrata

Diajukan ke Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Pada tanggal 27 Juni 2024 untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh derajat Magister Program Studi Teknik Fisika

INTISARI

Pada studi ini, telah dilakukan eksperimen dan perhitungan simulasi pemetaan nilai fluks neutron di dalam teras reaktor Kartini. Tujuan dari penelitian ini untuk mendapatkan peta distribusi fluks neutron reaktor Kartini arah radial dan aksial sesuai dengan kondisi terkini. *Self-Powered Neutron Detector* (SPND) emitter Rh (rhodium) digunakan sebagai detektor dalam penelitian ini karena ukuran dan geometri dari detektor tersebut mampu masuk ke dalam lubang celah plat teras bahan bakar memiliki diameter ± 7 mm.

SPND diletakkan pada posisi lubang *central thimble* (CT), H7, H10, H12, H14 dan H16 dengan ketinggian 0, 10, 20, 30, dan 40 cm dari daerah aktif bahan bakar. Hasil pengukuran fluks neutron oleh SPND adalah arus listrik yang memiliki orde *nanoampere* (10^{-9} ampere) dan dibaca menggunakan *electrometer Keithley 610C*. Pengukuran fluks neutron di teras secara eksperimental dilakukan dengan metode aktivasi foil emas. Hasil aktivasi digunakan untuk menghitung nilai sensitivitas SPND. Berdasarkan hasil eksperimen didapat nilai sensitivitas detektor sebesar $2,64 \times 10^{-21}$ A/nv, nilai tersebut digunakan untuk konversi arus listrik SPND ke fluks neutron. Dalam penelitian ini juga dikembangkan model dan perhitungan simulasi menggunakan *Monte Carlo N-Particle* (MCNP). Untuk mendapatkan nilai fluks neutron tanpa konversi secara manual dari arus SPND maka telah dilakukan rancang bangun monitoring fluks neutron dengan ESP32 dimana pembacaan nilai fluks neutron dari SPND dapat dibaca secara langsung dan disimpan secara otomatis di data log.

Nilai rata-rata tertinggi fluks neutron pada pengukuran SPND secara aksial untuk grup 1 berada pada level 20 dari panjang aktif bahan bakar dari lokasi CT hingga H16 dengan rentang nilai fluks neutron dari $1,13466 \times 10^{+10}$ hingga $3,78221 \times 10^{+11}$ n/cm²s dan untuk nilai fluks neutron grup 2 dengan lokasi dan level yang sama berada pada rentang $5,67332 \times 10^{+11}$ hingga $1,89111 \times 10^{+12}$ n/cm²s. Hasil perhitungan *Power Peaking Factor* (PPF) radial dengan data simulasi MCNPX di teras reaktor Kartini sebesar 1,5176. Berdasarkan hasil analisa data *monitoring* fluks neutron ESP32 dan pengukuran SPND pada uji-T berpasangan didapat *p-value* untuk fluks neutron grup 1, grup 2, dan total berturut-turut 0,3665; 0,7057; dan 0,3180. *P-value* > 0,05 memiliki arti 95% tingkat kepercayaan pada data

Kata kunci: ESP32, fluks neutron, Monte Carlo, rhodium, SPND

Pembimbing I : Dr. Ir. Alexander Agung, S.T, M.Sc.
Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan



MAPPING OF THE NEUTRON FLUX DISTRIBUTION AT THE KARTINI REACTOR CORE IN RADIAL AND AXIAL DIRECTIONS USING A SELF-POWERED NEUTRON DETECTOR

by

Resa Satria Adi Kuswandara

Submitted to the Department of Nuclear Engineering and Engineering Physics
Faculty of Engineering Universitas Gadjah Mada as partial fulfillment of the requirements
for the Master's Degree in Engineering Physics

ABSTRACT

In this study, experiments and simulation calculations of neutron flux value mapping in the Kartini reactor core have been carried out. The purpose of this study is to obtain a map of the Kartini reactor neutron flux distribution in the radial and axial directions by current conditions. Self-Powered Neutron Detector (SPND) emitter Rh (rhodium) is used as a detector because the size and geometry of the detector are able to enter into the slit hole of the fuel core plate having a diameter of ± 7 mm.

SPND was placed at the position of the central thimble (CT) hole, H7, H10, H12, H14, and H16, with heights of 0, 10, 20, 30, and 40 cm from the active region of the fuel. The result of neutron flux measurement by SPND is an electric current of the nanoampere order (10^{-9} amperes) and is read using a Keithley 610C electrometer. Neutron flux measurements on the terrace were experimentally carried out using the gold foil activation method. The activation results were used to calculate the SPND sensitivity value. Based on the experimental results, the detector sensitivity value of $2.64 \times 10^{-21} \text{ A/nv}$ was obtained, and the value was used to convert SPND electric current to neutron flux. This study also developed a model and simulation calculation using Monte Carlo N-Particle (MCNP). The neutron flux monitoring design was carried out with ESP32 to obtain the neutron flux value without manual conversion of SPND current, where the neutron flux value reading from SPND can be read directly and stored automatically in the data log.

The highest average value of neutron flux in axial SPND measurements for group 1 is at level 20 of the active fuel length from location CT to H16 with a range of neutron flux values from $1.13466 \times 10^{+10}$ to $3.78221 \times 10^{+11} \text{ n/cm}^2\text{s}$ and for group 2 neutron flux values with the same location and level are in the range of $5.67332 \times 10^{+11}$ to $1.89111 \times 10^{+12} \text{ n/cm}^2\text{s}$. The result of the radial Power Peaking Factor (PPF) calculation with MCNPX simulation data on the Kartini reactor terrace is 1.5176. Based on the results of the analysis data neutron flux monitoring ESP32 and SPND measurement on the paired T-test, the p-value group 1, group 2, and total neutrons flux are 0.3665, 0.7057, and 0.3180, respectively. P-value > 0.05 means 95% confidence level in the data.

Keywords: ESP32, neutron flux, Monte Carlo, rhodium, SPND

Supervisor : Dr. Ir. Alexander Agung, S.T, M.Sc.

Co-supervisor : Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan



BAB I

PENDAHULUAN

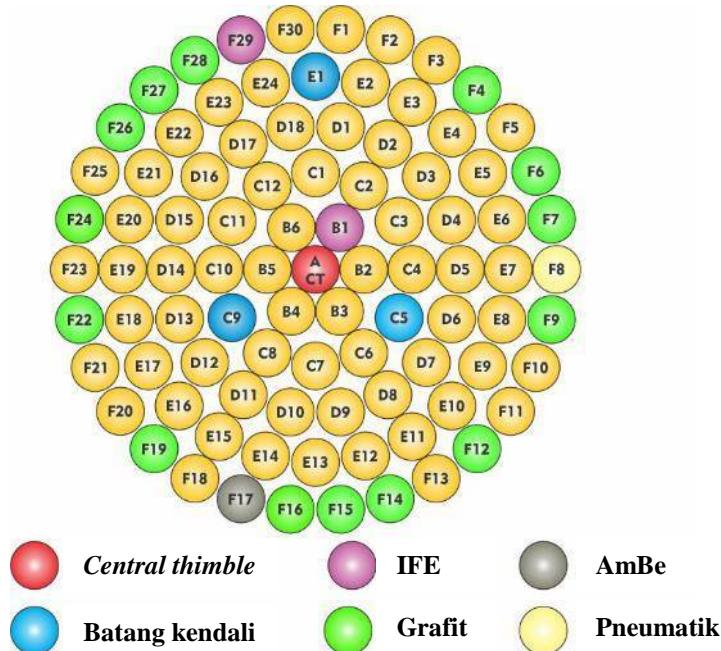
1.1 Latar Belakang

Reaktor Kartini merupakan reaktor nuklir untuk riset tipe kolam terbuka berpendingin dan bermoderator air dengan bahan bakar paduan uranium zirkonium hidrida (UZrH) dengan pengayaan rendah (low enriched uranium) 20% [1]. Reaktor Kartini didesain untuk daya 250 kW, tetapi sesuai dengan kebutuhan yang ada reaktor ini hanya dioperasikan pada tingkat daya 100 kW [2].

Salah satu aspek terpenting dalam keselamatan operasi reaktor adalah aspek neutronik yang meliputi banyak parameter seperti fluks neutron, faktor multiplikasi efektif neutron, *power peaking factor* dan *core excess reactivity*. Fluks neutron merupakan parameter penting karena pengukuran fluks neutron digunakan sebagai acuan dalam pengukuran daya reaktor [3] dan kebutuhan iradiasi. Dalam konteks ini, banyak operator dan peneliti reaktor riset telah melakukan upaya untuk mengukur dan mengembangkan teknik baru dalam pengukuran fluks neutron [4][5][6].

Bahan bakar di teras reaktor Kartini tersusun dengan pola melingkar (*annulus*) dalam beberapa baris dan masing-masing diberi alamat sebagai ring B1 – B6, ring C1 – C12, ring D1- D18, ring E1 – E24 dan ring F1 – F30 [2]. Dalam konfigurasi saat ini teras reaktor Kartini memuat 69 elemen bahan bakar standar TRIGA tipe 104 dengan kandungan uranium 8,5% dari UZrH, $U = 38$ gram ^{235}U per elemen dan 3 batang kendali penyerap neutron berbahan B_4C [7]. Selain itu, ada dua buah bahan bakar berinstrumen termokopel (*instrumented fuel element/IFE*) tipe 204, dengan kandungan uranium 8,5% dari UZrH, $U = 38$ gram ^{235}U per elemen. Sehingga jumlah total elemen bakar di teras pada saat daya 100 kW adalah 71 buah [2]. Pada pelat kisi (grid plate) atas reaktor Kartini selain lubang bahan bakar juga terdapat lubang-lubang kecil yang dapat digunakan menempatkan detektor guna proses pemetaan distribusi fluks neutron. Konfigurasi bahan bakar terbaru tahun 2022 yang ada di reaktor Kartini ditunjukkan pada Gambar 1.1 [8]. Fluks neutron merupakan banyaknya neutron yang bergerak pada volume tertentu tiap satuan luas per detik, jika dibentuk formula menjadi $\phi = n v$, dengan n adalah kerapatan neutron dan v adalah kecepatan [9].





Gambar 1. 1 Konfigurasi Bahan Bakar Reaktor Kartini [8]

Informasi dan data terkait distribusi fluks neutron sangat penting untuk reaktor riset [6]. Mengingat reaktor Kartini hingga tahun 2022 sudah berumur 43 tahun dimana sudah dilakukan banyak eksperimen, pendidikan maupun pelatihan, perubahan konfigurasi teras reaktor Kartini dan perubahan karakteristik bahan bakar, misalnya, fraksi bakar (burn up), sangat mempengaruhi besar dan distribusi fluks neutron.

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk memperoleh nilai hasil pengukuran maupun perhitungan pemetaan distribusi fluks neutron di teras reaktor Kartini pada arah aksial dan radial. Dengan konfigurasi 71 buah bahan bakar saat ini, tentunya akan mempengaruhi distribusi fluks neutron pada setiap ringnya dibandingkan konfigurasi sebelumnya yang menggunakan total 69 bahan bakar. Sampai dengan saat ini, belum pernah dilakukan pengukuran distribusi fluks neutron pada setiap ring reaktor Kartini dengan konfigurasi teras terbaru. Meski secara umum metode yang digunakan pada penelitian ini adalah yang digunakan pada reaktor riset pada umumnya, namun karakteristik unik reaktor Kartini mengharuskan pelaksanaan riset ini disesuaikan dengan mempertimbangkan keunikan tersebut.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengukuran fluks neutron secara langsung dengan menggunakan detektor SPND (*Self Powered Neutron Detector*) atau disebut juga detektor



swadaya, selain itu juga dilakukan pengukuran secara tidak langsung dengan meletakkan bahan yang akan diaktivasi ke dalam teras reaktor. Kedua pengukuran tersebut dilakukan untuk bahan pembanding terhadap data fluks neutron yang akan didapat. Untuk kemudian data tersebut akan digunakan untuk validasi model dan perhitungan simulasi MCNP (*Monte Carlo N Particle*). Arus yang didapat dari pengukuran SPND perlu dilakukan konversi secara manual untuk mendapatkan nilai fluks neutron. Untuk mengembangkan sistem penguruan fluks neutron, pada penelitian ini juga dilakukan kegiatan pendukung riset berupa rancang bangun alat monitoring fluks neutron dengan ESP32 agar pembacaan dari SPND dapat langsung dibaca sebagai nilai dari fluks neutron.

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah untuk memberikan informasi terkait distribusi fluks neutron yang ada di masing-masing ring teras reaktor, baik arah radial maupun aksial. Selain itu, dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat menambah menu praktikum pada sistem pembelajaran *internet reactor laboratory* (IRL). Pembuatan alat monitoring fluks neutron dengan ESP32 memiliki manfaat untuk mempermudah mendapatkan informasi fluks neutron secara langsung tanpa harus melakukan konversi secara manual. Informasi terkait dengan besarnya nilai fluks neutron dapat digunakan sebagai acuan bagi peneliti lainnya untuk menentukan prediksi terjadinya degradasi material di dalam teras reaktor serta dianalisis usia pakai teras reaktor maupun komponen lainnya. Data distribusi fluks neutron juga dapat dimanfaatkan untuk verifikasi hasil pengukuran daya termal yang dibangkitkan oleh teras reaktor selama reaktor beroperasi.

1.2 Rumusan dan Batasan Masalah

Penelitian dilakukan di reaktor Kartini dan pembahasannya hanya pada aspek neutronik. Penelitian dilakukan secara eksperimen dan perhitungan simulasi dengan menggunakan software MCNPX. Eksperimen dilakukan pada saat daya reaktor kritis 100 kW. Pengambilan data dengan SPND dilakukan secara arah aksial dan radial. Pengambilan data secara aksial dengan menggeser posisi SPND sepanjang 10 cm dari titik awal. Untuk arah radial dimulai dari posisi CT, H7, H10, H12, H14 dan H16 dan arah aksial berawal dari level 0, 10, 20 , 30, dan 40 cm dari daerah aktif bahan bakar reaktor Kartini. Pemetaan distribusi fluks keseluruhan teras dilakukan melalui perhitungan simulasi dengan model yang telah divalidasi. Secara simulasi dengan MCNPX dengan menggunakan kode tally F5



di mana koordinat perhitungan dilakukan sesuai dengan pendekatan pada lokasi eksperimen. Kalibrasi detektor yang digunakan dengan cara aktivasi foil emas yang dilakukan pada lokasi H16. Hasil aktivasi akan digunakan untuk menentukan nilai sensitivitas SPND. Nilai sensitivitas berperan besar dalam memberikan perintah program pada ESP32 agar pembacaan arus masukan dari SPND atau sumber arus standar lainnya sesuai dengan yang diharapkan.

1.3 Keaslian Penelitian

Penelitian ini dilakukan di reaktor Kartini Yogyakarta dengan konfigurasi bahan bakar saat ini sebanyak 69 buah bahan bakar tipe 104 dan 2 bahan bakar tipe 204. Sebelumnya pada tahun 2011 pernah dilakukan penelitian yang sejenis dan fasilitasnya pun juga di reaktor Kartini, namun penelitian sebelumnya tidak melakukan simulasi MCNP dan tidak membuat alat monitoring fluks neutron dengan ESP32 serta jumlah bahan bakar yang dipakai pada saat itu adalah 67 bahan bakar tipe 104 dan 2 bahan bakar tipe 204 dengan nilai *burn-up* yang lebih kecil dari tahun saat penelitian ini dilakukan. Metode yang digunakan pada penelitian ini meliputi pengukuran langsung dengan detektor SPND, untuk validasi data dengan aktivasi foil emas dan simulasi MCNPX. Nilai sensitivitas menjadi acuan dalam melakukan pemrograman pada ESP32. Pengukuran fluks neutron yang dilakukan meliputi arah radial dan aksial pada teras reaktor Kartini Yogyakarta.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah memperoleh peta distribusi fluks neutron arah radial dan aksial pada teras reaktor Kartini yang berguna untuk pertimbangan parameter keselamatan dan pemanfaatan reaktor Kartini.

1.5 Manfaat Penelitian

Reaktor Kartini merupakan reaktor riset yang digunakan untuk fasilitas pembelajaran, pelatihan dan penelitian. Pengukuran fluks neutron di teras reaktor secara langsung akan memberikan kontribusi terkait dengan nilai fluks neutron. Nilai tersebut dapat digunakan sebagai acuan analisis keselamatan dan penelitian yang membutuhkan terkait dengan data neutronik, serta dapat menambah menu praktikum terbaru untuk *internet reactor laboratory* (IRL).

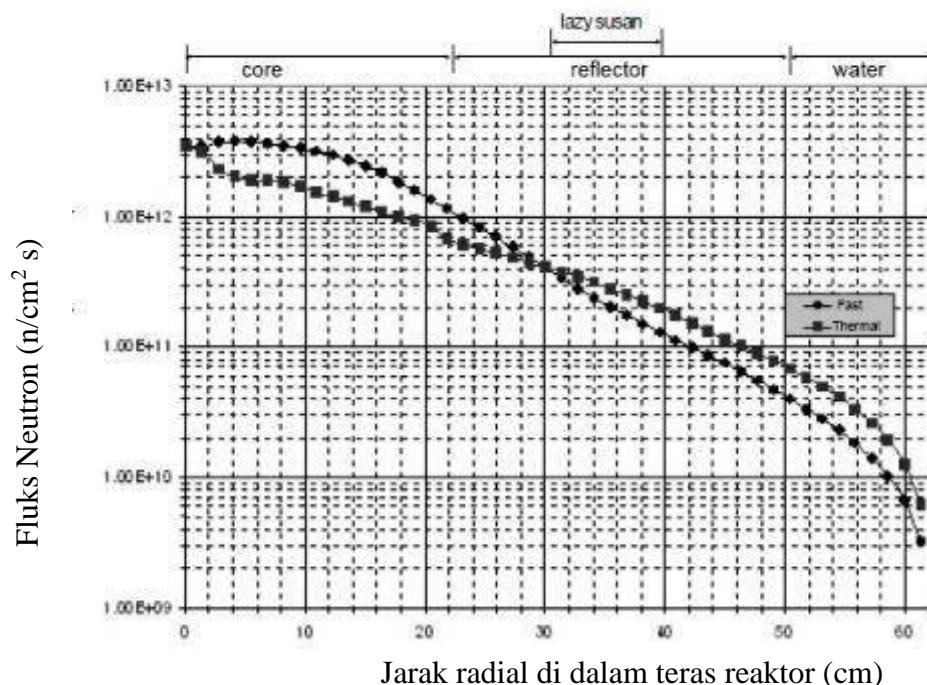
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

2.1.1 Distribusi Fluks Neutron

Reaksi fisi adalah suatu reaksi pembelahan inti atom, yang disebabkan oleh neutron. Dalam reaksi pembelahan, neutron ditangkap oleh inti atom dan menghasilkan suatu inti atom majemuk yang bersifat sangat tidak stabil. Dalam waktu yang sangat singkat, inti atom majemuk ini akan membelah menghasilkan 2 bagian utama dan kira-kira 2 sampai 3 neutron baru serta sejumlah besar energi. Reaksi fisi dapat terjadi ketika neutron yang menumbuk inti atom adalah neutron dengan energi tertentu; neutron dengan energi sekitar 0,025 eV dapat mengakibatkan reaksi fisi inti atom uranium-235. Dalam reaktor, jumlah neutron hasil reaksi fisi harus dibatasi sehingga hanya satu neutron saja yang akan diserap untuk reaksi fisi selanjutnya. Neutron merupakan partikel tidak bermuatan, secara umum neutron dibedakan menjadi 3 berdasarkan tingkat energinya, yaitu neutron termal, epitermal dan *fast*. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan TRIGAP *code* didapat distribusi radial fluks neutron reaktor Kartini yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Distribusi Arah Radial Fluks Neutron Reaktor Kartini [2]



Penelitian tentang distribusi fluks neutron pernah dilakukan di Jozef Stefan Institute dan diidapat hasil yang tidak terlalu berbeda antara nilai simulasi dengan MCNP dan nilai pengukuran dengan aktivasi sampel Al dan Au [10].

Sampel aktivasi dapat bermacam-macam. Penelitian menggunakan sampel kawat Al-0,1% Au, foil Zr, kawat Fe dilakukan di Malaysia Nuclear Agency (MNA) dan pencacahan sampel yang telah diaktivasi dilakukan menggunakan detektor HpGe [11].

F. Molina, dkk melakukan penelitian yang dilakukan di reaktor RECH-1 menggunakan metode aktivasi multi foils sampel dan perhitungan dengan MCNP berbasis metode “*the expectation maximization unfolding algorithm*” [12].

Penelitian yang dilakukan di Tehran Research Reactor (TRR) adalah dengan mengukur nilai fluks neutron di termal column dengan menggunakan metode eksperimental aktivasi foil emas terbungkus cadmium dan terbuka serta simulasi MCNP [13].

Penelitian lain dilakukan di Applied Nuclear Energy Laboratory (L.E.N.A) untuk mengukur dan mensimulasikan distribusi fluks neutron. Sampel yang digunakan menggunakan Al-Co dan simulasi dengan MCNP5 code. Hasil yang didapat antara pengukuran dan simulasi MCNP5 tidak berbeda jauh [5].

2.1.2 Metode Aktivasi Foil Emas

Pengukuran fluks neutron dengan metode tidak langsung atau metode aktivasi dilakukan untuk tujuan kalibrasi detektor swadaya. Aktivasi dilakukan dengan cara meletakkan suatu material ke dalam medan fluks neutron sehingga terjadi reaksi inti antara atom dengan neutron [9]. Besarnya fluks neutron pada metode tidak langsung dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1) [14].

$$\emptyset = \frac{\lambda C \rho}{k \Sigma_{act} m (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (2.1)$$

di mana λ adalah tetapan peluruhan (s^{-1}), C jumlah cacah (cacah), ρ rapat massa foil yang diaktivasi ($g cm^{-3}$), \emptyset fluks neutron ($n cm^{-2} s^{-1}$), Σ_{act} tampang lintang makroskopis aktivasi (cm^{-1}), k konstanta atau efisiensi detektor, t_i lama waktu iradiasi (s), t_d lama waktu tunggu sebelum dicacah (s), t_c lama waktu pencacahan (s), m massa cuplikan (gr). Untuk mencari neutron termal dapat menggunakan persamaan (2.2).

$$\emptyset_{termal} = \emptyset_{cepat} (F_{cd} - 1) \quad (2.2)$$

Untuk mencari nilai dari cadmium ratio (F_{cd}) dapat menggunakan persamaan 2.3.



$$F_{cd} = \frac{\phi_{total}}{\phi_{cepat}} \quad (2.3)$$

Berdasarkan persamaan (2.2) dan (2.3) maka dapat disubtitusikan menjadi persamaan (2.4). Dimana fluks netron termal merupakan selisih antara fluks netron total dan fluks netron cepat [14].

$$\phi_{termal} = \phi_{total} - \phi_{cepat} \quad (2.4)$$

Penelitian ini juga merujuk pada penelitian yang dilakukan di Reaktor Triga Puspati (RTP) Malaysia dimana pada reaktor tersebut memiliki daya sebesar 1 MW. Pengukuran fluks neutron yang dilakukan dengan memasukkan detektor SPND ke dalam celah bahan bakar. Metode validasi yang dilakukan menggunakan aktivasi emas [6].

Pada penelitian yang dilakukan di *El-Minia University* memberikan informasi terkait dengan penentuan nilai sensitivitas dari detektor SPND yang berbahan emiter dari (Rh dan Ir) [15].

Penelitian yang dilakukan di *Atominstitut der Oesterreichen Hochschulen, Vienna, Austria* menjadi rujukan penelitian ini guna untuk menganalisa pengaruh cadmium terhadap hasil aktivasi emas yang digunakan untuk kalibrasi detektor SPND [16].

Penelitian yang dilakukan oleh Tegas Sutondo, dkk tahun 2011 melakukan pengukuran dengan detektor SPND untuk arah radial dan aksial pada ring B, C, D, E dan F. Konfigurasi bahan bakar saat itu sebanyak 67 buah bahan bakar tipe 104 dan 2 buah tipe 204. Pada penelitian ini tidak dilakukan proses kalibrasi terhadap detektor SPND dan simulasi menggunakan MCNP [17].

2.1.3 Detektor SPND

Penelitian terkait dengan SPND berbahan emitter dari rhodium dilakukan untuk mengetahui sensitivitas dari detektor. Penelitian ini berjudul “Thermocoax rhodium SPND sensitivity dispersion and validation of the sensitivity calculation mode”. Hasil yang didapat bahwa nilai sensitivitas untuk neutron termal berada pada range $0,8 \times 10^9$ sampai dengan $2,6 \times 10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [18].

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Azza, M. El-Badry, dkk dimana pada penelitian tersebut didapatkan hasil berupa pelapisan bahan emiter dapat mengurangi laju burn-up pada SPND dan menjaga kestabilannya. Pelapisan yang digunakan menggunakan iridium [15].



2.1.4 Status Kebaruan Penelitian

Tabel 2. 1 Status Kebaruan Penelitian

No	Tahun	Judul	Penulis	Metode
1	2011	Prosiding Seminar Pengembangan Software CPEM Sebagai Sarana Pendidikan Eksperimen Fisika Reaktor Pada Reaktor Kartini	Sutondo Tegas, Syarip	Eksperimental, Aktivasi Foil, Analisis, Konfigurasi bahan bakar 69 buah di reaktor Kartini
2	2014	Rhodium SPND's Error Reduction using Extended Kalman Filter combined with Time-Dependent Neutron Diffusion Equation	Jeong Hun Lee, Tong Kyu Park, Seong Su Jeon	Eksperimental, Kalman Filter Method
3	2014	Validation of absolute axial neutron flux distribution calculations with MCNP with $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ ^{198}Au reaction rate distribution measurements at the JSI TRIGA Mark II reactor	Vladimir Radulović n , Žiga Štancar, dkk	Validasi aksial distribusi fluks neutron dengan MCNP dan aktivasi sampel $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ ^{198}Au
4	2015	Measurement and simulation of the neutron flux distribution in the TRIGA Mark II reactor core	Davide Chiesa, Massimiliano Clemente, dkk	Eksperimental aktivasi sampel Al-Co, MCNP5
5	2018	Evaluation of neutron flux and fission rate distributions inside the JSI TRIGA Mark II reactor using multiple in-core fission chambers	Tanja Goricanec, Gasper Zerovnik, dkk	Eksperimental detektor FC, variasi ketinggian batang kendali
6	2018	Measurement and simulation of thermal neutron flux distribution in the RTP core	Mohamad Hairie B. Rabir, Abi Muttaqin B. Jalal Bayar, dkk	Eksperimental Detektor SPND, validasi MCNP
7	2022 (Penelitian ini)	Pemetaan Distribusi Fluks Neutron di Teras Reaktor Kartini Arah Radial dan Aksial Menggunakan Detektor SPND (<i>self powered neutron detector</i>)	Satria Resa, Agung Alexander, Antariksawan Anhar R	Eksperimental, Aktivasi foil emas MCNPX, konfigurasi bahan bakar 71 buah di reaktor Kartini, monitoring fluks neutron dengan ESP32.



2.2 Landasan Teori

2.2.1 Reaktor Kartini

Reaktor Kartini merupakan reaktor riset tipe kolam jenis TRIGA-Mark II yang mempunyai daya maksimal 250 kW. Reaktor ini dioperasikan pada daya 100 kW. Memiliki bejana silinder dengan diameter 200 cm dan tinggi 6 meter [2]. Data terkait parameter desain reaktor dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Parameter Desain Reaktor Kartini

Umum

Tipe Reaktor	: TRIGA Mark II
Daya reaktor maksimum	: 250 kW (termal)
Tujuan	: Penelitian fisika reaktor, analisis aktivasi, pendidikan dan pelatihan.
Lokasi	: Babarsari, Yogyakarta.
Pemilik dan operator	: Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pembangun	: Pusat Penelitian GAMA.
Desain	: General Atomic Division, General Dynamics Corporation
Status, konstruksi dan operasi :	- mulai dibangun : April 1975 - reaktor kritis : Januari 1979 - operasi daya penuh : Maret 1979.

Data Teras Reaktor

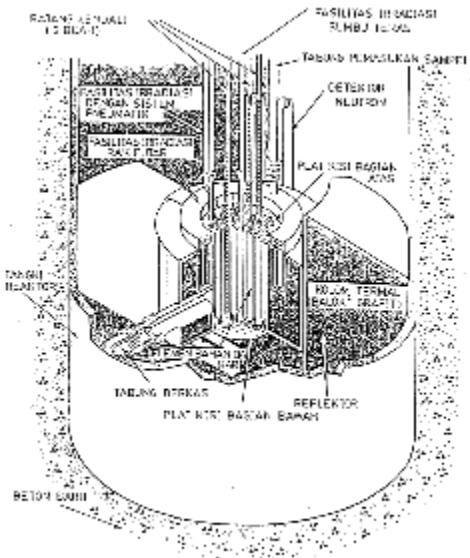
Energi neutron rata-rata	: 0,21 eV,
Waktu hidup efektif neutron cepat	: 6×10^{-5} s
Fraksi neutron kasip (β_{eff})	0,007 (harga yang digunakan dalam kalibrasi batang kendali)
Fluks neutron termal	: rerata teras $1,2936 \times 10^{12}$ n/cm ² s maks. $1,9143 \times 10^{12}$ n/cm ² s
Fluks neutron cepat	: rerata teras neutron $1,0468 \times 10^{12}$ n/cm ² s maks. $1,6000 \times 10^{12}$ n/cm ² s
Fluks neutron termal di <i>centre Timble</i>	: $5,97 \times 10^{12}$ n/cm ² s
Fluks neutron cepat di <i>centre Timble</i>	: $5,59 \times 10^{12}$ n/cm ² s

2.2.2 Teras Reaktor Kartini

Teras reaktor berbentuk silinder dan terdiri dari kisi-kisi tempat dudukan elemen bahan bakar, elemen *dummy* (terbuat dari grafit) dan batang kendali. Teras dilingungi oleh



reflektor yang ditempatkan pada suatu tempat dudukan/bangku reflektor. Susunan teras dan reflektor ini mempunyai diameter 1,09 m dan tinggi 0,58 m. Teras dan reflektor terendam dalam air setinggi 4,9 m, sedangkan bagian terbawah reflektor berada pada ketinggian 0,61 m dari dasar tangki [2]. Gambar teras dan tangki Reaktor Kartini secara sekilas dapat dilihat pada Gambar 2.2.



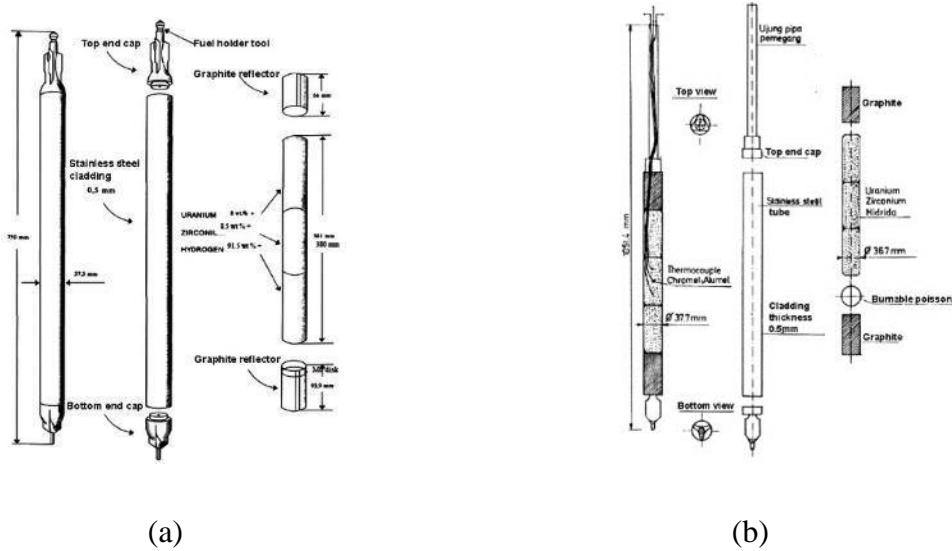
Gambar 2. 2 Tampak Depan Teras dan Tangi Reaktor Kartini [2]

Lempeng kisi-kisi terbuat dari aluminium dengan tebal 19 mm, diameter bagian atas 49,5 cm dan bagian bawah 40,7 cm. Jarak antar lubang pada kisi dibuat dengan ketelitian tinggi sesuai dengan desain teras, digunakan untuk tempat elemen-elemen bakar. Lempeng kisi reaktor bagian atas diletakkan menurut tempatnya dalam 6 buah lubang pada sindik yang terdapat pada reflektor. Kisi bagian bawah terdapat lubang-lubang tempat masuk ujung bawah bahan bakar. Lubang tempat bahan bakar adalah 90 buah yang terdistribusi dalam 5 lingkaran lubang-lubang. Tiap lubang mempunyai diameter 38,23 mm. Dengan demikian jari-jari lempeng kisi-kisi atas sekitar 25,2 cm dan jari-jari tiap ring B, C, D, E dan F masing-masing dari pusat teras adalah sekitar 4,064 cm, 8,001 cm, 11,938 cm, 15,875 cm dan 19,939 cm. Susunan Lubang isian teras tersusun dengan pola melingkar (annulus) dan masing-masing diberi alamat sebagai Ring B1 s/d B6, Ring C1 s/d C12, Ring D1 s/d 18, Ring E1 s/d 24 dan Ring F1 s/d 30. Dalam pengoperasian sekarang ini teras reaktor diisi dengan 71 bahan bakar dan bekerja membangkitkan daya nominal 100 kW.



2.2.3 Bahan Bakar Reaktor Kartini

Bahan bakar reaktor yang digunakan pada saat ini terdiri dari bahan bakar: Tipe-104 : UZrH_{1.7}, pengayaan < 20%, 8,5 % U = 37 - 39 gram U²³⁵ per elemen berjumlah 69 buah. Ada dua buah bahan bakar berinstrumen termokopel (*instrumented fuel element/ IFE*) Tipe-204: dengan kandungan uranium 8,5 % U = 38 gram U²³⁵ per elemen. Jumlah elemen bakar di dalam teras pada saat daya 100 kW adalah 71 buah (69 buah tipe 104 dan 2 buah tipe 204) dengan burn-up bervariasi antara: 3% - 10%. Sketsa bahan bakar dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sketsa Bahan Bakar (a) Tipe 104 dan (b) Tipe 204 [2]

2.2.4 Interaksi Neutron dengan Materi

Neutron adalah partikel yang tidak bermuatan, sehingga neutron tidak bereaksi dengan medan listrik. Neutron berinteraksi dengan nuklida yang terdapat materi. Interaksi dengan nuklida dibagi menjadi dua macam, yakni interaksi hamburan dan interaksi serapan [19].

2.2.4.1 Interaksi Hamburan Neutron

Interaksi hamburan neutron terjadi jika neutron mendekati nuklida namun tidak masuk ke dalam nuklida tersebut. Neutron seolah-olah menumbuk nuklida tersebut. Hamburan antara neutron dan nuklida dibedakan menjadi hamburan elastis dan hamburan inelastis.



Hamburan elastis terjadi jika energi kinetik neutron yang semula rendah hingga mencapai batas tertentu. Nilai energi batas tertentu tergantung dari nuklida yang ditumbuk. Pada interaksi ini jumlah energi kinetik neutron dan nuklida sebelum dan sesudah tumbukan bernilai sama [19].

Hamburan inelastis terjadi jika energi kinetik neutron melebihi energi batas untuk memulai hamburan inelastis pada nuklida yang berinteraksi dengan neutron. Pada hamburan inelastis ini jumlah energi kinetik dari neutron dan nuklida akan berkurang setelah tumbukan. Selisih energi akan menjadikan nuklida dalam kondisi tereksitasi. Nuklida yang tereksitasi akan memancarkan sinar gamma dan kembali ke keadaan dasar (*ground state*).

2.2.4.2 Interaksi Serapan Neutron

Interaksi serapan neutron terjadi jika neutron masuk ke dalam nuklida dan terserap menjadi satu didalam nuklida. Nuklida yang menyerap neutron akan menjadikan nuklida tidak stabil. Interaksi serapan neutron terbagi menjadi interasi serapan radiasi (*radiative capture*) dan interaksi fisi (pembelahan) [19].

Interaksi serapan radiasi terjadi jika nuklida yang menangkap neutron akan menjadi inti majemuk. Pada umumnya inti majemuk ini dalam keadaan tidak stabil atau tereksitasi dan akan berusaha kembali ke keadaan stabil dengan memancarkan radiasi yang berupa sinar alfa atau beta atau gamma.

Interaksi fisi terjadi jika neutron diserap oleh nuklida dengan nomor massa lebih besar dari 89. Nuklida yang menangkap neutron akan menjadi sangat tereksitasi dengan energi yang cukup besar untuk menjadikan nuklida tersebut membelah menjadi dua nuklida yang nomor massanya hampir sama. Proses ini disebut reaksi pembelahan yang diinduksi oleh neutron.

2.2.5 Karakteristik SPND

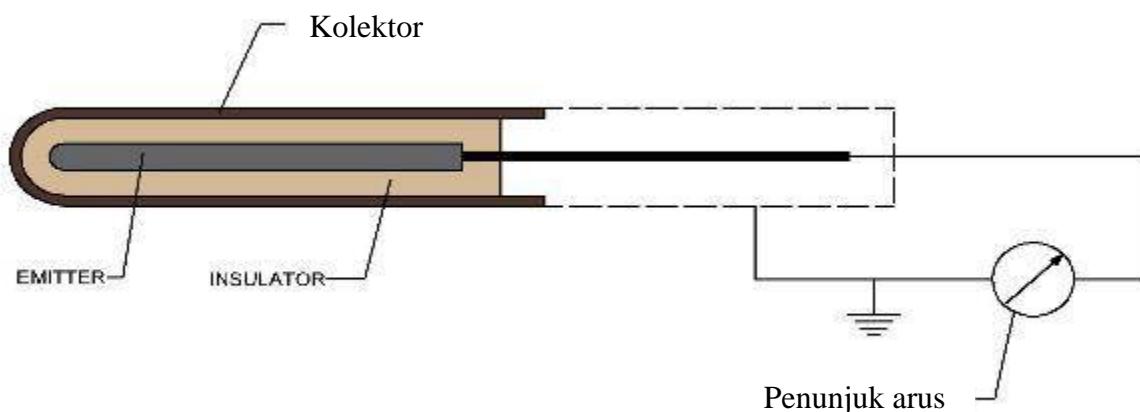
Detektor SPND merupakan detektor neutron yang banyak digunakan dalam melakukan pengukuran di dalam teras reaktor. Karakteristik detektor SPND yang handal terhadap kondisi dengan tekanan dan suhu yang tinggi menjadi pertimbangan dalam menggunakannya. SPND terdiri dari 3 komponen utama dan terhubung dengan kabel koaksial, pada bagian tengah komponen merupakan emitter yang dikelilingi oleh isolator dan



kolektor. Emiter terdiri dari bahan yang memiliki penampang serapan tinggi dan mampu bereaksi dengan neutron melalui tangkapan vanadium, rhodium, kobalt dan lain-lain [20].

Prinsip kerja dari SPND adalah adanya aktivasi neutron dan peluruhan beta (elektron), sehingga kawat semakin bermuatan positif (+). Potensial positif kawat menyebabkan arus mengalir dalam resistor (R). Arus elektron dari peluruhan beta dapat diukur secara langsung dengan Ammeter. Elektroda pada SPND berfungsi sebagai penyerap neutron dan meluruh dengan memancarkan elektron (peluruhan beta). Emiter dikelilingi oleh isolator yang biasanya terbuat dari alumunium oksida. Kolektor sebagai pengumpul elektron-electron yang dihasilkan.

Pada penelitian ini, digunakan SPND dengan jenis emitter Rhodium (Rh^{103}). Karakteristik dari SPND dengan emitter dari Rhodium (Rh^{104}) adalah memiliki tampilan lintang serapan sebesar 146 barn untuk termal neutron dan resonansi pada energi 1,25 eV [21]. *Burn-up rate* 0,39 % per bulan. Waktu paruh untuk 92% sinyal yang dihasilkan sebesar 42 sekon dan untuk waktu paruh sinyal 8% sebesar 4,4 menit [22]. Struktur SPND ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Struktur Detektor SPND [22]



Sebelum digunakan, detektor tersebut harus dikalibrasi terlebih dahulu untuk menentukan besar fluks neutron yang diukur sebagai fungsi arus keluaran detektor yang ditunjukkan pada persamaan (2.5).

$$\Phi = f(I) \quad (2.5)$$

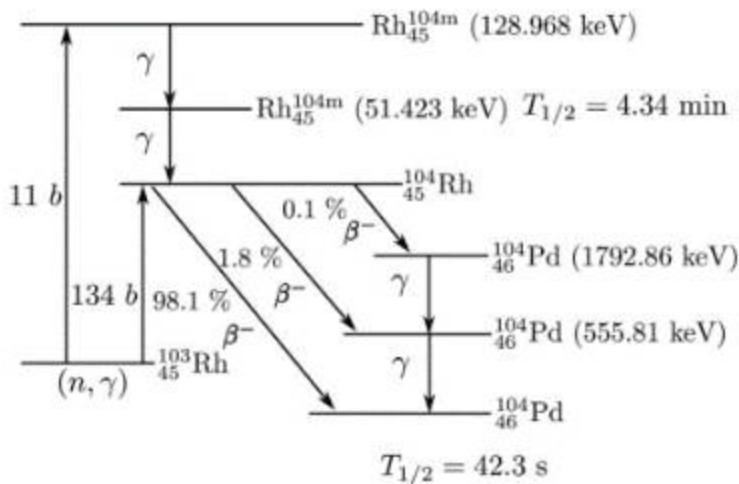
Ukuran detektor yang sangat kecil menjadikan detektor ini bisa ditempatkan ke dalam lubang-lubang dalam teras reaktor yang memiliki diameter kecil. SPND dapat digunakan tanpa diberikan catu daya. Prinsip dasar detektor ini adalah dengan memanfaatkan peluruhan radioaktif pada proses aktivasi neutron material yang menghasilkan keluaran sinyal arus [25]. Emitter pada detektor yang terkena neutron akan menjadi aktif dan memancarkan sinar beta. Partikel-partikel keluaran dari emitter melewati isolator kemudian sampai kolektor yang dapat menimbulkan arus antara emitter dan kolektor. Besarnya arus dipengaruhi besarnya fluks neutron yang mengaktifasi emitter, ukuran detektor dan bahan emitter. Bahan emitter yang menghasilkan arus listrik kemudian dikonversi menjadi besaran fluks neutron dengan persamaan (2.6) dan (2.7):

$$I(t) = k \sigma_{act} Q N \left(1 - \exp\left(-\frac{0,693}{T_{1/2}} t\right)\right) \phi \quad (2.6)$$

$$\Phi = I(t) \left(k \sigma_{act} Q N \left(1 - \exp\left(-\frac{0,693}{T_{1/2}} t\right)\right)\right)^{-1} \quad (2.7)$$

dengan $I(t)$ adalah arus detektor (ampere) pada waktu t (sekon), k merupakan suatu konstanta yang bergantung pada geometri dan material detektor, Q menyatakan muatan yang dikeluarkan oleh emitter tiap detik, N merupakan jumlah atom emitter, $T_{1/2}$ adalah waktu paruh emitter, ϕ adalah fluks neutron yang mengaktivasi bahan emitter $\text{n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$ dan σ_{act} adalah tampang lintang mikroskopis aktivasi emitter (cm^2) [9]. Proses interaksi antara detektor SPND dengan neutron dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5 [23].





Gambar 2. 5 Interaksi Detektor SPND Dengan Neutron [23]

Nilai sensitivitas SPND menjadi parameter yang penting dalam mengkonversi nilai arus yang terbaca akibat reaksi fisi di dalam teras reaktor Kartini. Penentuan nilai sensitivitas SPND ditunjukkan pada persamaan (2.8).

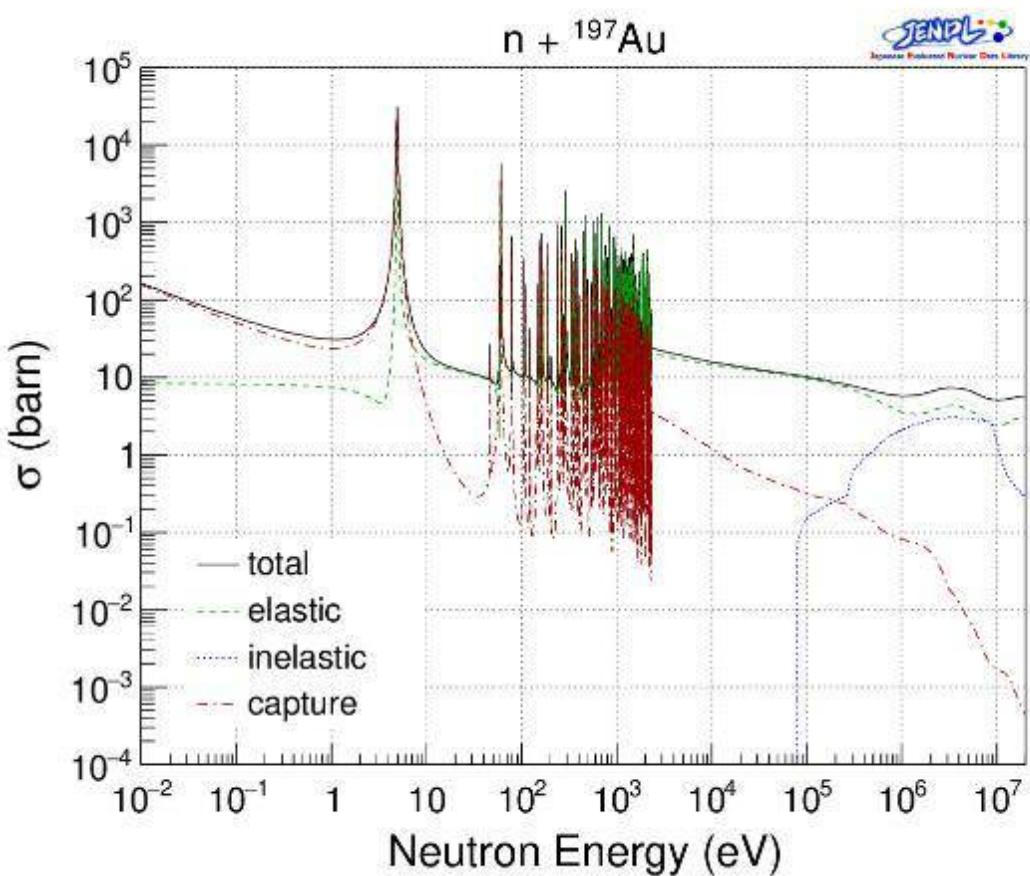
$$S = \frac{I(\text{current})}{\phi(nv) \times L} \quad (2.8)$$

Dimana I adalah arus yang terbaca di *electrometer*, $\phi(nv)$ merupakan fluks neutron termal dari aktivasi foil emas dan L merupakan panjang dari emitter Rh yaitu 8,5 cm [24].

2.2.6 Pengukuran Metode Tidak Langsung

Pengukuran dengan metode ini dilakukan dengan cara memasukkan sampel emas ($^{79}\text{Au}^{197}$) atau bahan Cu, Mn dan sebagainya ke dalam teras reaktor melalui lubang-lubang kecil yang ada di dalam teras. Dibutuhkan alat yang sesuai dengan geometri lubang untuk menempatkan bahan sampel tersebut. Sampel akan diaktivasi selama beberapa waktu untuk kemudian dilakukan pencacahan dengan menggunakan detektor Geiger Mueller ataupun detektor HPGe yang sebelumnya telah diketahui efisiensinya dengan menggunakan sumber standar. Pada penelitian ini untuk aktivasi foil emas tampang lintang mikroskopis ditunjukkan pada Gambar 2.6. Grafik tersebut digunakan untuk mengetahui besaran tampang lintang aktivasi dari emas terhadap energi neutron.

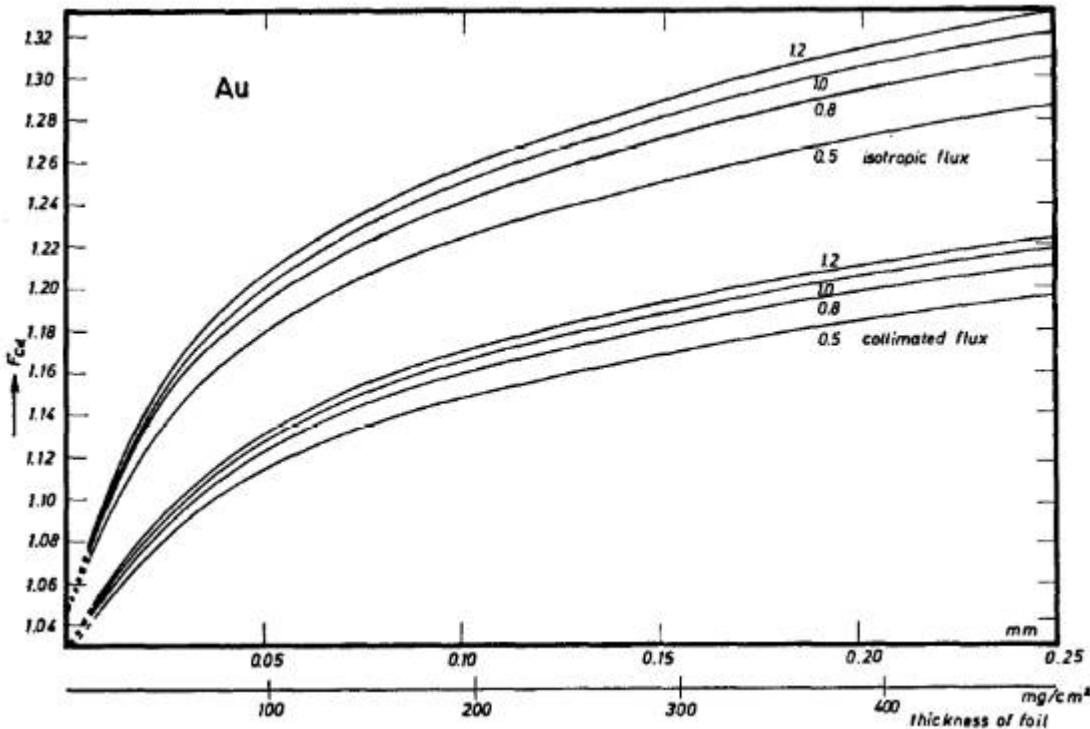




Gambar 2. 6 Tampang Lintang Mikroskopis Emas [25]

Apabila pada metode ini menggunakan cadmium sebagai filter energi tertentu pada neutron maka perlu diperhitungkan faktor koreksi dari *cadmium ratio* (F_{cd}) dan *self shielding* (G_{th}). Nilai F_{cd} pada eksperimen ini didapat berdasarkan grafik F_{cd} adalah 1,2. Selain itu cadmium berfungsi sebagai penghalang energi atau yang biasa disebut sebagai *cut-off energy* yang memiliki nilai 0,53 eV untuk bentuk lempengan dan 0,455 eV untuk bentuk silinder [26]. Penelitian ini menggunakan cadmium berbentuk lempengan. Grafik F_{cd} dapat dilihat pada Gambar 2.7.





Gambar 2. 7 Grafik F_{cd} Terhadap Ketebalan Foil Emas dan Cadmium [16]

Pada penelitian ini ketebalan emas dan cadmium yang digunakan berturut-turut adalah 0,04 mm dan 1,00 mm. Fluks neutron yang ada di dalam teras bersifat acak dan tidak menggunakan kolimator maka trend grafik yang dilihat adalah pada bagian *isotropic flux*. Faktor koreksi G_{th} dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.9).

$$G_{th} = \frac{1 - e^{-\xi}}{\xi} \quad (2.9)$$

di mana $\xi = 2.V/S.\lambda^{-1} = t \cdot \Sigma_a$.

V adalah volume (cm^3), S adalah luas permukaan sampel (cm^2), Σ_a merupakan tumpang lintang serapan makroskopis (cm^{-1}), λ adalah *absorption mean free path* (cm) dan t adalah tebal foil (cm) [27]. G_{th} pada penelitian ini dapat diabaikan karena berdasarkan hasil perhitungan nilai dari G_{th} mendekati 0.

2.2.7 MCNP

MCNP merupakan Monte Carlo N-Particle algoritma yang dapat mensimulasikan pergerakan neutron, proton dan elektron. Monte Carlo didasarkan pada simulasi transportasi radiasi sambil memahami distribusi probabilitas yang mendasari setiap interaksi partikel dalam material. Dalam simulasi Monte Carlo, titik fluks dihitung dengan menggunakan



penaksiran pada kejadian berikutnya [28]. *Code* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan *tally* F5 dimana sesuai dengan buku manual MCNPX, *tally* F5 digunakan untuk pengukuran fluks pada point yang diinginkan [29]. TRIGAP MCNP merupakan software yang digunakan sebagai konfigurasi kondisi terkini dari bahan bakar yang ada di teras reaktor Kartini.

2.2.8 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang diperkenalkan oleh Espressif System, penerus dari mikrokontroler ESP8266. Pada mikrokontroler ini sudah terdapat modul WiFi di dalam chipnya, sehingga sangat mendukung untuk membuat sistem aplikasi Internet of Things (IoT) [30]. ESP32 dihubungkan dengan ADS1115 yang memiliki spesifikasi *Analog Digital Converter* (ADC) 16-bit 4-channel [31].

2.2.9 Electrometer Keithley 610C

Keithley 610C merupakan alat untuk membaca arus listrik dengan metode standar, memiliki salah satu resistor saklar rentang R102 sampai R112 dan model ini mengukur penurunan tegangan pada resistor [32]. Keithley 610C dikalibrasi untuk membaca arus dalam ampere untuk rentang yang sesuai. Dalam penelitian ini, output perekam tegangan adalah ± 3 V untuk input skala penuh. Hambatan internal adalah $3\text{ k}\Omega$. Polaritas output adalah kebalikan dari polaritas input.

2.2.4 Ampere Source Keithley K261

Ampere Source Keithley K261 merupakan alat yang digunakan untuk menghasilkan arus standar hingga mencapai orde *picoampere*. Tabel 2.3 menunjukkan data akurasi yang dihasilkan oleh *ampere source Keithley K261* [33]. Berdasarkan Tabel 2.3 maka dalam melakukan penelitian perlu dilakukan pengaturan alat yang sesuai dengan spesifikasi data pada alat agar error data yang didapatkan saat melakukan pengukuran kecil serta meminimalisir perolehan data yang kurang tepat.



Tabel 2. 3 Data Akurasi Ampere Source Keithley K261

Rentang pengaturan	Rentang, ampere	Akurasi dengan pengaturan 10,00 (Sumber tegangan 10 V)	Kemungkinan terburuk jika pengaturan selain 10,00*
$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-7} - 1,1 \times 10^{-4}$	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,25\%$
10^{-8}	$10^{-8} - 10^{-7}$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$
10^{-9}	$10^{-9} - 10^{-8}$	$\pm 0,6\%$	$\pm 0,8\%$
10^{-10}	$10^{-10} - 10^{-9}$	$\pm 0,6\%$	$\pm 1,1\%$
10^{-11}	$10^{-11} - 10^{-10}$	$\pm 0,6\%$	$\pm 1,3\%$
10^{-12}	$10^{-12} - 10^{-11}$	$\pm 0,7\%$	$\pm 1,6\%$
10^{-12}	$10^{-14} - 10^{-12}$	-	$\pm 2,0\%$

* semua akurasi \pm persentase memberikan $\pm 0,01 \times$ pengaturan rentang *switch*

2.3 Hipotesis

Pada penelitian ini hasil yang diharapkan untuk pengukuran dan perhitungan distribusi fluks neutron arah radial, nilai tertinggi dari fluks neutron akan berada di *central thimble*. Sedangkan untuk fluks neutron arah aksial nilai tertinggi akan didapatkan pada posisi tengah bahan bakar. Pengukuran dengan SPND besarnya nilai yang didapat tergantung dari sensitivitas detektor SPND, untuk mendapatkan sensitivitas dilakukan eksperimen aktivasi foil emas di area pengukuran yang sama dengan SPND. Nilai perhitungan dari MCNPX digunakan sebagai prediksi nilai fluks neutron pada area yang akan diukur.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

Bahan-bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Reaktor Kartini

Sebagai tempat untuk melakukan pengukuran fluks neutron dengan detektor SPND.

2. Detektor SPND

Sebagai alat untuk mengubah nilai fluks neutron menjadi arus listrik sehingga dapat dibaca pada penampil.

3. *Electrometer Keithley 610C*

Sebagai penampil signal arus dari detektor SPND dengan satuan ampere.

4. Pipa Alumunium

Sebagai alat untuk menyangga detektor SPND sehingga dapat diletakkan di dalam teras reaktor Kartini.

5. Sistem Pencacah detektor Geiger Mueller

Sebagai alat untuk mencacah hasil aktivasi sampel yang telah diiradiasi di dalam teras reaktor.

6. Foil Emas

Sebagai media untuk mendapatkan nilai fluks neutron dengan menggunakan metode aktivasi.

7. Cadmium

Sebagai media untuk menyaring energi neutron sehingga neutron yang ada di dalam teras reaktor dapat dibedakan tingkat energinya.

8. ESP32

Sebagai modul untuk memproses perintah-perintah secara elektronik sesuai dengan program yang dibuat.

9. ADS1115

Sebagai alat untuk mengubah signal analog ke signal digital.

10. WiFi Router

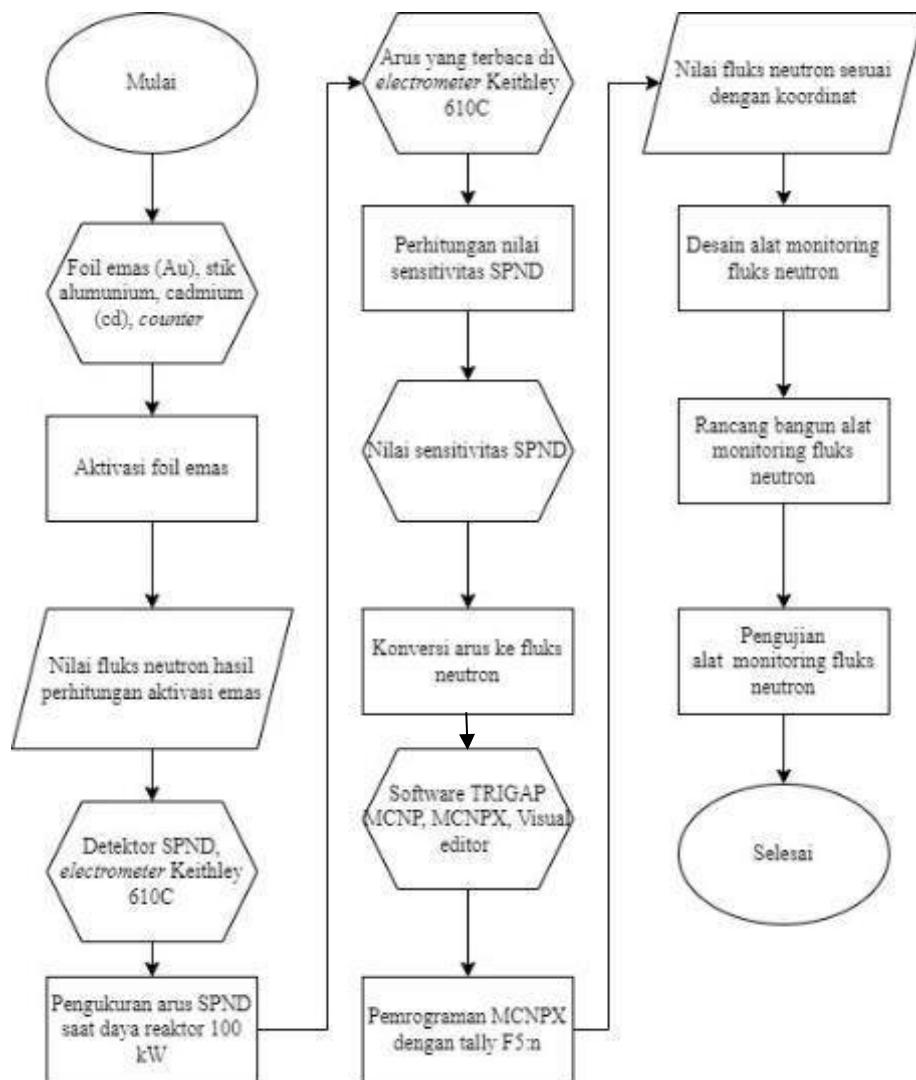
Sebagai alat untuk membantu proses transmisi jaringan internet ke perangkat pengguna.



11. Picoampere Source Model 261

Sebagai alat untuk menghasilkan arus listrik terkalibrasi dengan orde arus hingga 10^{-12} ampere.

Prosedur kerja yang dilakukan dalam penelitian ini untuk mendapatkan nilai fluks neutron ditunjukkan pada *flowchart* pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

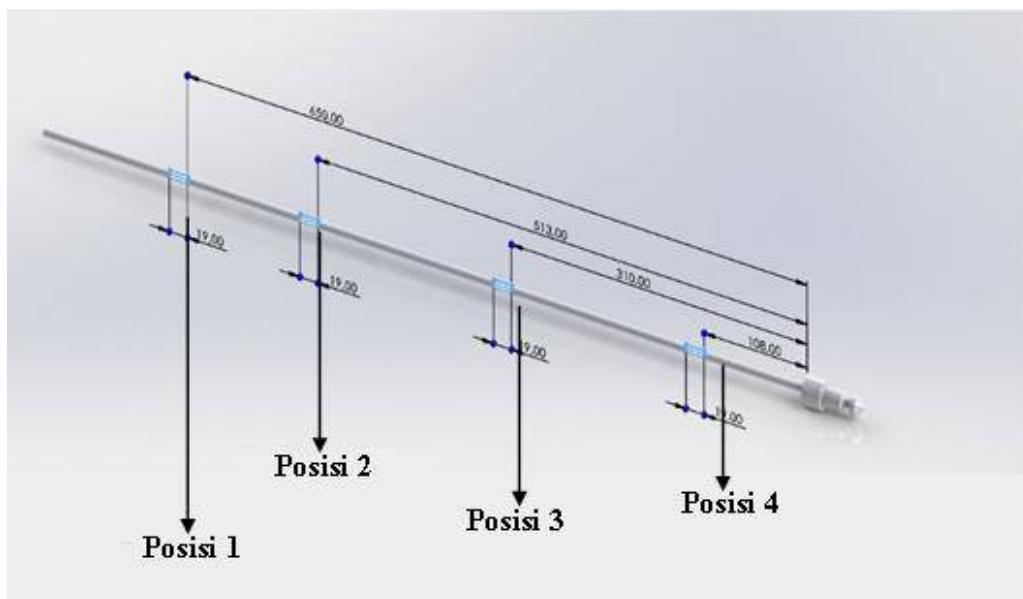
Pada *flowchart* Gambar 3.1 untuk “Desain alat monitoring fluks neutron” dilakukan setelah pengukuran SPND, hal ini dikarenakan peneliti mendapati adanya pengembangan lebih lanjut saat melakukan eksperimen pengukuran fluks neutron dengan SPND yang nantinya alat tersebut dapat mempermudah dalam pembacaan nilai fluks neutron.



3.2 Prosedur Penelitian

3.2.1 Aktivasi Foil Emas (Au^{197}) Terbuka dan Terbungkus Cadmium (Cd)

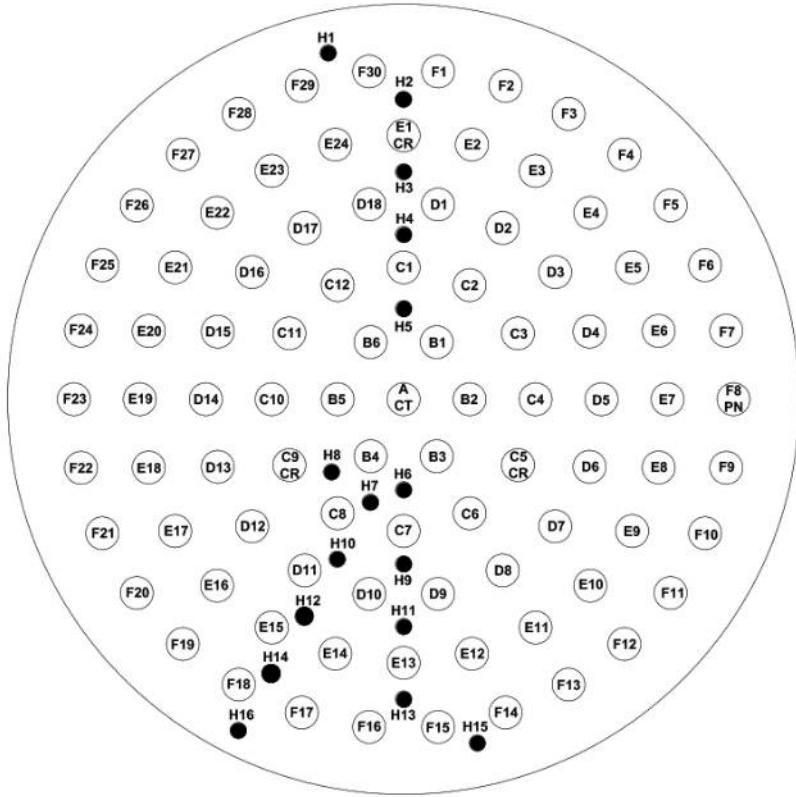
. Foil emas pada penelitian ini diletakkan pada stik alumunium yang memiliki diameter 6mm. Berdasarkan ukuran diameter ini maka dapat dipastikan bahwa stik tersebut dapat masuk ke dalam lokasi penempatan SPND yang ada di dalam teras reaktor Kartini. Sepanjang batang alumunium terdapat 4 sampel *holder* yang digunakan untuk menempatkan foil emas terbuka dan foil emas yang terbungkus Cd. Foil emas terbungkus Cd tidak dapat masuk ke dalam lokasi pengukuran karena ukurannya menjadi lebih dari 7 mm, oleh karena itu penempatan sampel pada posisi 1, 2, dan 3 diletakkan foil emas terbuka sedangkan untuk posisi 4 diletakkan foil emas terbungkus Cd. Massa sampel emas yang diletakkan pada posisi 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut adalah 0,015 gr, 0,014 gr, 0,015 gr, dan 0,011 gr. Penempatan sampel emas pada sampel *holder* ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Letak Sample Foil Emas Pada Sample Holder

Pemetaan lokasi eksperimen pengukuran fluks neutron di dalam teras ditunjukkan pada Gambar 3.3. Stik alumunium berisikan 4 sampel emas yang di masukkan ke dalam lokasi H16 ditunjukkan pada Gambar 3.4.





Gambar 3. 3 Lokasi Eksperimen di Teras Reaktor Kartini



Gambar 3. 4 Penempatan Stik Alumunium di Lokasi H16

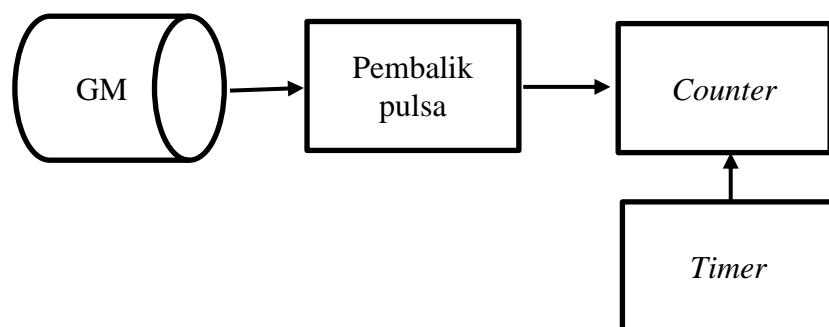
Penomoran lubang-lubang kecil yang ada di teras reaktor Kartini merupakan kesepakatan dari peneliti karena tidak ada data maupun dokumen terkait dengan penomoran lubang-lubang kecil tersebut, sehingga peneliti memberikan label H1 – H16. Pengambilan gambar



pada Gambar 3.4 menggunakan kamera *underwater* untuk mempermudah pengamatan setting lokasi stik alumunium. Saat stik alumunium sudah dimasukkan ke lokasi H16, maka reaktor dioperasikan hingga kritis pada daya 100 kW dan lamanya iradiasi yang dilakukan adalah 1 menit. Setelah 1 menit maka reaktor *shutdown* dan untuk kemudian proses selanjutnya adalah melakukan pencacahan sampel hasil aktivasi sebanyak 3 kali pengulangan untuk masing-masing sampel. Perlu dipertimbangkan besarnya paparan radiasi yang diterima oleh pekerja apabila sampel langsung diangkat ke permukaan, sehingga dalam melakukan aktivasi ini perlu diperhitungkan berat sampel dan jenis sampel serta material dari sampel *holder*. Setelah dilakukan perhitungan dan analisa maka setelah diaktivasi sampel emas harus didiamkan terlebih dahulu di dalam kolam teras reaktor Kartini sekurang-kurangnya 1 (satu) hari.

3.2.2 Pencacahan Sampel Foil Emas Hasil Aktivasi

Terdapat 4 sampel hasil aktivasi yang masing-masing sudah diberi label identifikasi. Tiap sampel harus dilakukan pencatatan waktu tunda, dimana waktu tunda merupakan selang waktu saat reaktor *shutdown* dengan waktu saat sampel dicacah. Pencacahan sampel emas dilakukan dengan menggunakan detektor Geiger Mueller (GM). Efisiensi dari detektor GM yang digunakan pada saat itu adalah 8,80%. Pada penelitian ini sampel emas hasil aktivasi harus simpan ke dalam kontainer timbal agar meluruh terlebih dahulu karena saat dicacah waktu mati (*dead time*) dari detektor tinggi, yang apabila dipaksakan untuk pengukuran maka didapat hasil yang kurang maksimal. Setelah didapat nilai cacah setiap sampel maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.1. Skema rangkaian pencacahan dengan menggunakan detektor GM ditunjukkan pada Gambar 3.5.

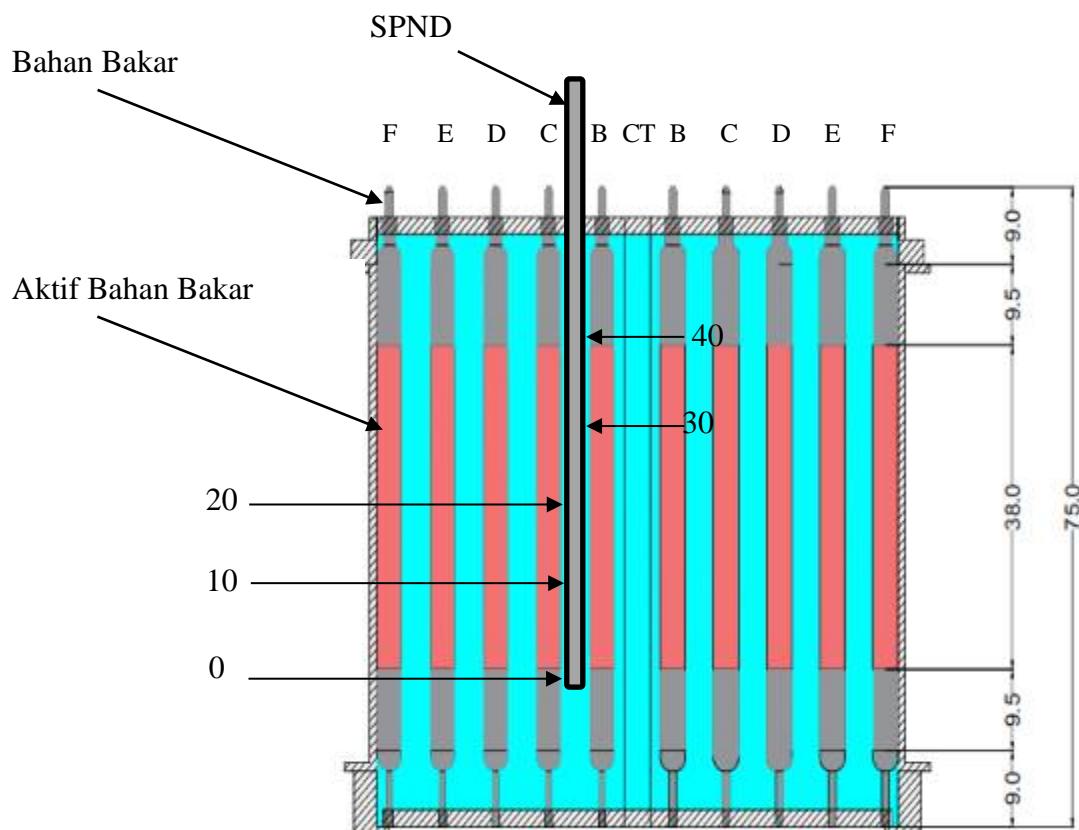


Gambar 3. 5 Skema Pencacahan Dengan Detektor GM



3.2.3 Pengukuran Fluks Neutron Dengan SPND

Pada penelitian ini detektor SPND yang telah disetting terhubung dengan *electrometer Keithley 610C* dimasukkan ke dalam CT, H7, H10, H12, H14, dan H16 untuk pencarian data distribusi fluks neutron secara radial. Ilustrasi penempatan detektor SPND ditunjukkan pada Gambar 3.6.



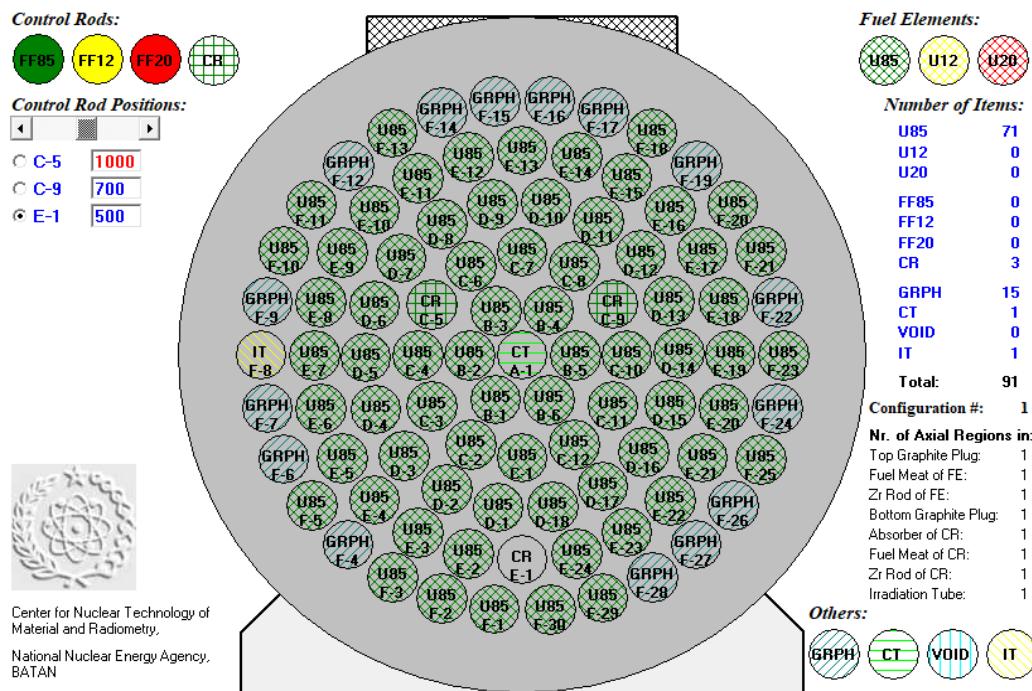
Gambar 3. 6 Penempatan SPND di Dalam Teras Reaktor Kartini

Pada Gambar 3.6 terdapat angka 0 sampai dengan 40 yang menunjukkan pergeseran 10 cm secara aksial yang nantinya akan didapat distribusi fluks neutron secara aksial. Lokasi CT-H16 yang ada di dalam teras reaktor Kartini memiliki ukuran diameter sebesar $\pm 7,40$ mm, hasil ini didapat dari pengukuran secara langsung melalui replika teras reaktor Kartini dengan skala 1:1. Pengukuran SPND untuk masing-masing lokasi baik secara aksial dan radial dilakukan sebanyak 3 kali.



3.2.4 Setting TRIGAP MCNP

TRIGAP MCNP merupakan software yang digunakan untuk melakukan simulasi perhitungan neutronik terhadap reaktor riset. Setting yang dilakukan meliputi penempatan bahan bakar sesuai dengan konfigurasi teras reaktor Kartini saat ini, posisi batang kendali saat daya 100 kW yaitu C-5 pada posisi 1000, C-9 posisi 700, dan posisi E-1 posisi 500. Letak batang kendali beserta fasilitas-fasilitas lain yang ada di dalam teras.



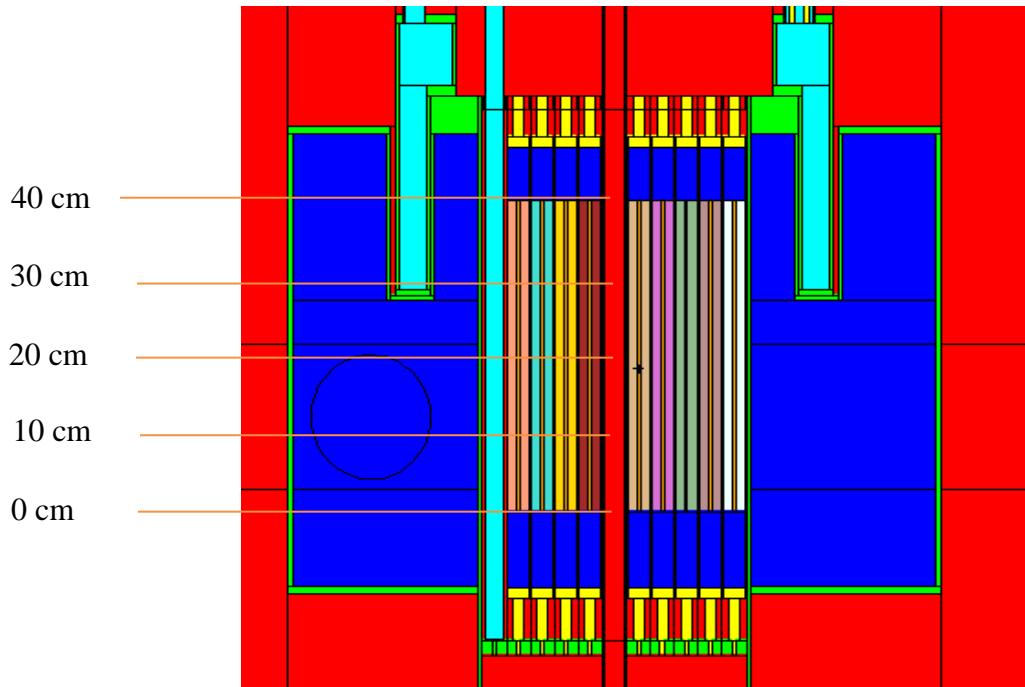
Gambar 3. 7 Setting TRIGAP MCNP Teras Reaktor Kartini

Tampilan pengaturan konfigurasi teras reaktor Kartini melalui software TRIGAP MCNP ditunjukkan pada Gambar 3.7. Software ini memberikan *output* file yang bisa dibaca menggunakan notepad ataupun software sejenis. *Output* file tersebut harus diupdate terkait dengan data *burn-up* terupdate agar didapat perhitungan yang lebih maksimal.

3.2.5 Penentuan Koordinat Pengukuran Dengan Visual Editor (Vised)

Software *visual editor* (*vised*) digunakan untuk mengetahui koordinat (x, y, z) titik lokasi perhitungan neutron. Tampilan model teras reaktor Kartini tampak depan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.8.

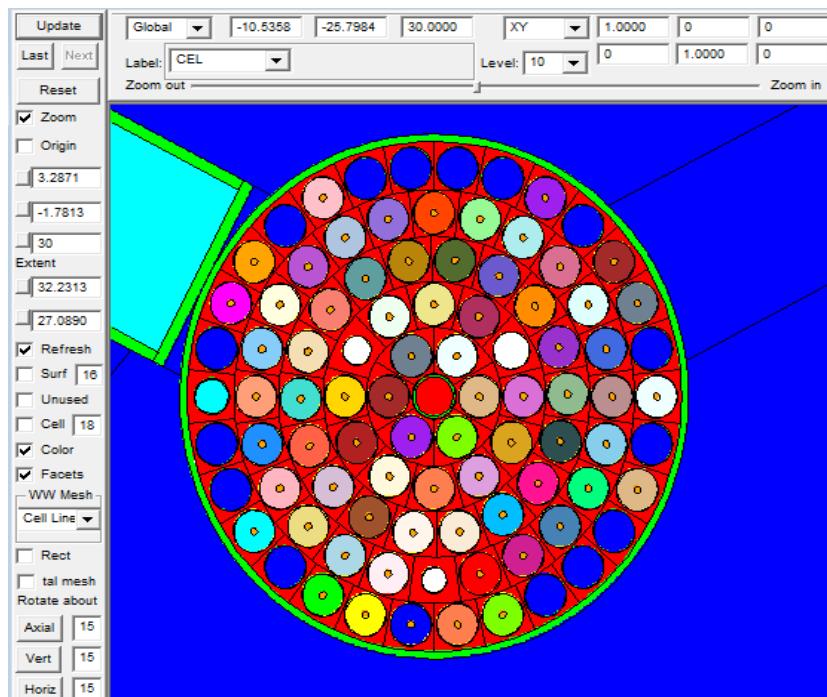




Gambar 3. 8 Tampilan Model Teras Reaktor Kartini Tampak Depan

Terlihat pada Gambar 3.8 terdapat informasi angka 0, 10, 20, 30, dan 40 cm. Angka tersebut menggambarkan lokasi pengukuran SPND secara eksperimental. Angka 0 menunjukkan titik lokasi pengukuran awal yang berarti 0 cm terhadap daerah aktif bahan bakar reaktor Kartini, angka 10 menunjukkan pergeseran 10 cm ke atas dari posisi 0 dan seterusnya hingga posisi angka 40. Tampilan model teras reaktor Kartini pada vised dapat diatur dari berbagai arah sesuai dengan keperluan pengguna, dan berikut tampilan model teras reaktor Kartini tampak atas yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Dengan meletakkan kursor dan memindah tampilan sesuai dengan lokasi penempatan SPND saat pengukuran maka didapatkan koordinat x, y, dan z. Koordinat tersebut dijadikan sebagai acuan koordinat perhitungan pada MCNPX.





Gambar 3. 9 Tampilan Model Teras Reaktor Kartini Tampak Atas

3.2.6 Pemrograman MCNPX Dengan Tally F5

Tally pada MCNPX berfungsi sebagai proses pencatatan dan analisis hasil simulasi transpor partikel. *Tally F5* digunakan untuk perhitungan lokasi penempatan detektor [34]. Perhitungan terdiri dari kumpulan partikel, energi, dan lokasi yang akan diukur dan mencatat jumlah partikel yang mencapai lokasi yang diinginkan. Data tersebut dapat digunakan untuk menghitung kuantitas seperti dosis, fluks, dan laju reaksi. Pada eksperimen ini dilakukan perhitungan dengan data *burn-up* bahan bakar reaktor Kartini pada bulan Maret 2023 dan *cycle* program sebanyak 3000 kali.

Berdasarkan Tran Van Hung [35], nilai hasil perhitungan yang didapat pada MCNPX harus di normalisasi sesuai dengan tingkat daya yang diinginkan. Persamaan untuk menormalisasi dapat dilihat pada persamaan (3.1).

$$\left(\frac{1 \text{ joule/s}}{W}\right) \left(\frac{1 \text{ MeV}}{1,602 \times 10^{13} \text{ Joule}}\right) \left(\frac{1 \text{ fission}}{200 \text{ MeV}}\right) = 3,12 \times 10^{10} \text{ (fission/W.s)} \quad (3.1)$$

Untuk perhitungan dengan daya 100 kW, sesuai dengan eksperimen yang dilakukan maka didapat penyelesaian pada persamaan (3.2).

$$(0,1 \text{ MW}) \left(\frac{1 \text{ neutron/cm}^2}{\text{source}}\right) \left(\frac{2,4 \text{ source}}{\text{fission}}\right) \left(\frac{10^6 \text{ W}}{1 \text{ MW}}\right) \left(\frac{3,12 \times 10^{10} \text{ fission}}{W_s}\right) = 7,49 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ s} \quad (3.2)$$



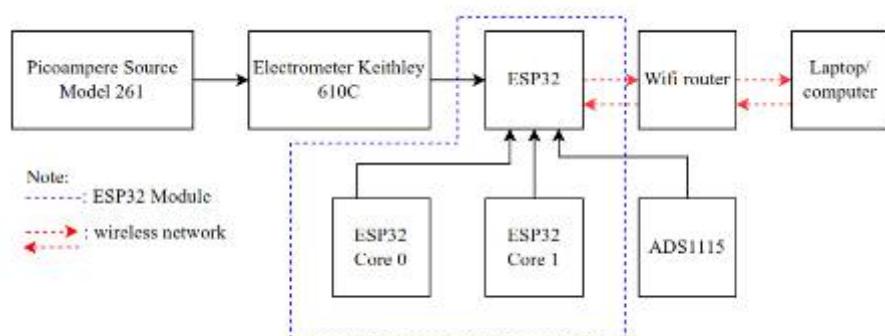
Code program yang digunakan di MCNPX adalah sebagai berikut:

```
f5: n -19.5347 3.8876 37.7500 +1 -18.1062 8.0582 37.7500 +1  
-15.9085 11.7075 37.7500 +1 -13.1613 14.9397 37.7500 +1  
e0 0.00000053 0.001 10
```

f5:n menunjukkan perintah untuk melakukan perhitungan neutron pada lokasi yang sesuai dengan koordinat yang diinginkan sedangkan “e0” untuk mengklasifikasikan rentang energi neutron yang diinginkan. Pada penelitian ini untuk perhitungan di MCNPX diklasifikasikan menjadi 3 energi neutron yaitu termal ($< 0,53$ eV), epitermal ($0,53$ eV – 1 keV) dan cepat (1 keV – 10 MeV).

3.2.7 Rancang Bangun Alat *Monitoring* Fluks Neutron dengan ESP32

Alat monitoring fluks neutron dengan ESP32 dibuat dengan menggabungkan beberapa *tools* seperti ADS1115 dan *wifi router*. Pengujian alat ini dilakukan dengan memberikan nilai tegangan pada pin A0 ADS1115 untuk kemudian dilihat pembacaan nilai ADC yang sudah terprogram pada ESP32 sehingga pembacaan ADC dapat dilihat pada layar komputer. Setelah berhasil melihat respon ADC maka selanjutnya memikirkan cara untuk mengubah besaran *output* yaitu arus listrik dari SPND agar dapat menghasilkan nilai tegangan (volt). Secara *hardware architecture* ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Hardware Architecture Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32

Pada pembuatan alat ini sumber arus yang digunakan sebagai *input* berasal dari *picoampere source model 261*. Model 261 merupakan sumber arus buatan yang terkalibrasi dimana *picoampere* jenis ini menghasilkan *output* yang berkisar antara 10^{-14} sampai $1,1 \times 10^{-4}$ ampere dan memiliki resolusi 3 digit untuk *output* dari 10^{-12} hingga 10^{-4} ampere dan digunakan



sebagai standar sekunder untuk kalibrasi [33]. Bentuk dari *picoampere source model 261* ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Picoampere Source K261

Electrometer Keithley 610C digunakan untuk membaca arus listrik hingga orde *picoampere* (10^{-12} A). Pada penelitian ini arus yang dihasilkan dari SPND memiliki orde 10^{-9} ampere sehingga *electrometer* harus di setting pada orde 10^{-9} ampere untuk kemudian dilakukan pembacaan terhadap *output* dari *picoampere source*. *Electrometer Keithley 610C* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Electrometer Keithley 610C

Modul ESP32 diprogram dengan menggunakan Arduino *Intergrated Development Environment* (IDE), dimana software tersebut merupakan software dengan platform *open-*



source. ESP32 menerima input dari *electrometer 610C* berupa tegangan (V), kemudian tegangan ini akan dikonversi oleh ADS1115 16-bit yang bertindak sebagai ADC. Data akan dikirimkan melalui jaringan nirkable dengan menggunakan *WiFi-router* dan diterima oleh laptop/komputer.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Aktivasi Foil Emas

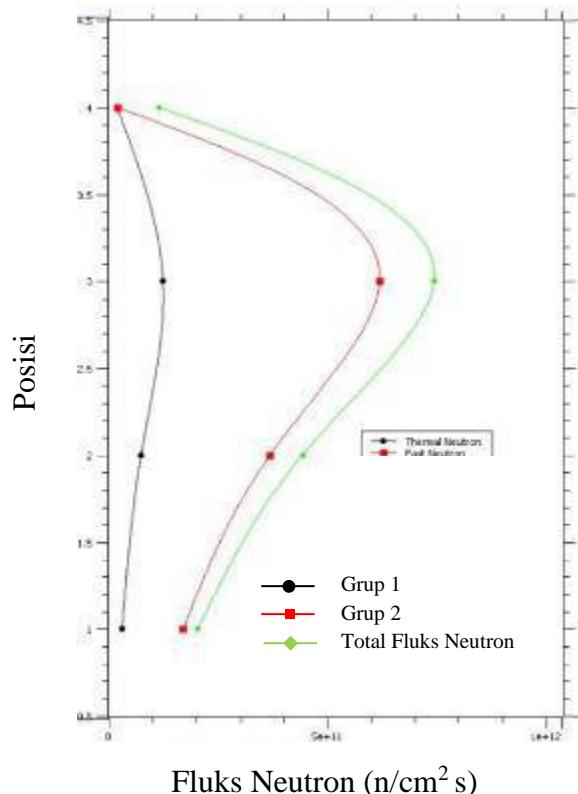
Dalam mengaktivasi foil emas perlu dipertimbangkan dalam preparasi sampel. Preparasi sampel yang tidak dipersiapkan dengan baik akan menyebabkan hasil yang didapat kurang maksimal. Pada penelitian ini sampel emas hasil aktivasi dicacah menggunakan detektor GM dimana hasil yang didapat berupa nilai cacah. Dalam mencacah sampel aktivasi perlu mempertimbangkan waktu mati detektor, karena apabila waktu mati detektor tinggi maka sensitivitas dari detektor untuk mendeteksi radiasi tidak maksimal. Cadmium pada penelitian ini digunakan sebagai penyaring energi sehingga hasil yang didapat untuk nilai fluks neutron dikategorikan menjadi 2 grup yaitu grup 1 dengan rentang energi dari $0 - 0,53$ eV dan grup 2 dengan rentang energi $> 0,53$ eV. Hasil aktivasi foil emas pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Foil Emas

Posisi	Bahan	Massa (gr)	Rata- rata Cacah (cpm)	Grup 1 (n/cm² s)	Grup 2 (n/cm² s)	Total Fluks Neutron (n/cm² s)
1	Au	0,015	18.558,67	$3,04 \times 10^{+10}$	$1,70 \times 10^{+11}$	$2,00 \times 10^{+11}$
2	Au	0,014	37.492,67	$7,38 \times 10^{+10}$	$3,69 \times 10^{+11}$	$4,43 \times 10^{+11}$
3	Au	0,015	67.574,67	$1,24 \times 10^{+11}$	$6,20 \times 10^{+11}$	$7,44 \times 10^{+11}$
4	Au+Cd	0,011	6.342,00	$1,90 \times 10^{+10}$	$9,53 \times 10^{+10}$	$1,14 \times 10^{+11}$

Hasil yang didapat untuk masing-masing energi fluks neutron dalam aktivasi foil emas ini tidak hanya melalui eksperimen saja melainkan juga melalui perhitungan dengan menggunakan *cadmium ratio* (F_{cd}) sama seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.3. Tanpa bantuan persamaan 2.3 ini maka tidak akan didapatkan nilai dari tiap-tiap energi fluks neutron karena terkendala oleh geometri sampel beserta dengan sampel *holder* yang masuk ke dalam lokasi aktivasi. Data Tabel 4.1 untuk kemudian dapat dibuat suatu grafik yang dapat menggambarkan bentuk distribusi fluks neutron secara aksial melalui metode aktivasi foil emas. Bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.1





Gambar 4. 1 Fluks Neutron Hasil Aktivasi Foil Emas

Pada posisi 1 hingga 2 merupakan daerah dimana foil emas ditempatkan melewati bagian bawah daerah aktif bahan bakar, sehingga nampak terjadi penurunan fluks neutron yang cukup tajam pada Gambar 4.1. Pada lokasi penempatan foil emas ini nampak bahwa nilai neutron cepat lebih besar daripada nilai neutron termal.

4.2 Pengukuran Fluks Neutron Dengan SPND

Pengukuran fluks neutron dengan SPND dilakukan pada saat daya reaktor kritis 100 kW. Pengukuran dilakukan secara radial dan aksial sehingga didapatkan hasil seperti yang terlihat pada Tabel 4.2. Variabel yang diukur oleh SPND pada Tabel 4.2 meliputi arus dan tegangan melalui *Electrometer Keithley 610C*. Variabel arus yang terbaca pada *electrometer* akan digunakan sebagai nilai acuan konversi dari arus listrik ke nilai fluks neutron.



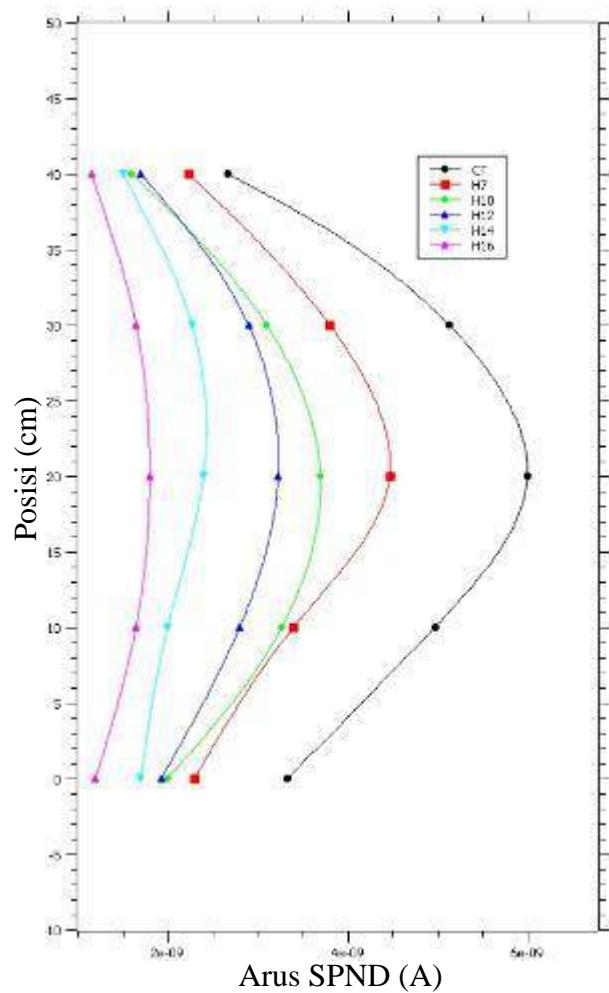
Tabel 4. 2 Nilai Pengukuran SPND Daya 100 kW

No	Lokasi	Level Aksial (cm)	Voltage (Vdc)	Arus ($\times 10^{-9}$ Ampere)	Daya (kW)
1	CT	0	0,96	3,30	100
2	CT	10	1,46	4,97	100
3	CT	20	1,79	6,00	100
4	CT	30	1,52	5,13	100
5	CT	40	0,77	2,67	100
6	H7	0	2,26	2,30	100
7	H7	10	0,98	3,40	100
8	H7	20	1,31	4,47	100
9	H7	30	1,12	3,80	100
10	H7	40	0,61	2,23	100
11	H10	0	1,96	2,00	100
12	H10	10	0,95	3,27	100
13	H10	20	1,09	3,70	100
14	H10	30	0,89	3,10	100
15	H10	40	0,45	1,60	100
16	H12	0	0,54	1,93	100
17	H12	10	0,79	2,80	100
18	H12	20	0,95	3,23	100
19	H12	30	0,82	2,90	100
20	H12	40	0,47	1,70	100
21	H14	0	0,49	1,70	100
22	H14	10	0,57	2,00	100
23	H14	20	0,69	2,40	100
24	H14	30	0,64	2,27	100
25	H14	40	0,40	1,50	100
26	H16	0	1,18	1,20	100
27	H16	10	1,64	1,65	100



No	Lokasi	Level Aksial (cm)	Voltage (Vdc)	Arus ($\times 10^{-09}$ Ampere)	Daya (kW)
28	H16	20	1,77	1,80	100
29	H16	30	1,61	1,65	100
30	H16	40	1,10	1,15	100

Semakin besar nilai arus yang terbaca pada *electrometer* maka semakin besar pula nilai fluks neutron yang dideteksi oleh SPND. Nilai arus yang didapat pada eksperimen ini diplot pada grafik yang terlihat pada Gambar 4.2. Penempatan SPND divariasi mulai dari level 0 – 40 cm dengan pergeseran setiap 10 cm untuk arah aksial dan variasi dari CT hingga H16 untuk arah radial.



Gambar 4. 2 Arus SPND Terhadap Posisi Penempatan SPND



Tampak pada Gambar 4.2 bahwa nilai arus terbesar hingga terkecil secara radial dimulai dari lokasi CT hingga H16. Untuk arah aksial nilai arus terbesar terdapat pada posisi tengah setiap posisi. Sesuai dengan prinsip kerja dari SPND bahwa apabila emiter berinteraksi dengan neutron maka akan menghasilkan peluruhan beta dimana elektron akan terbentuk dan kawat akan semakin bermuatan positif (+), potensial kawat menyebabkan arus mengalir dalam resistor. Arus elektron dari peluruhan beta dapat diukur secara langsung dengan *electrometer*. Dalam eksperimen pengamatan terhadap nilai arus yang dihasilkan SPND harus menunggu hingga pembacaan stabil, mengingat pada SPND 92% signal memiliki waktu $T_{1/2}$ 4,2 sekon dan 8% signal memiliki $T_{1/2}$ 4,4 menit.

4.2.1 Konversi Arus ke Fluks Neutron

Setelah didapat nilai arus hasil pembacaan reaksi inti didalam teras reaktor Kartini pada daya 100 kW, maka perlu dilakukan konversi agar didapat nilai variabel yang diinginkan yaitu variabel fluks neutron. Konversi nilai fluks neutron ditampilkan pada Tabel 4.3. Nilai sensitivitas SPND yang digunakan pada eksperimen ini adalah $2,64 \times 10^{-21}$ A/nv.cm.

Tabel 4. 3 Konversi Arus SPND ke Fluks Neutron

No	Ring	Arus SPND $\times 10^{-09}$ (Ampere)	Reactor Power (kW)	Level (cm)	Grup 1 $(\times 10^{+11}$ n/cm ² s)	Grup 2 $(\times 10^{+12}$ n/cm ² s)	Fluks Total $(\times 10^{+12}$ n/cm ² s)
1	CT	3,30	100	0	2,10	1,05	1,26
2	CT	4,97	100	10	3,13	1,57	1,88
3	CT	6,00	100	20	3,78	1,89	2,27
4	CT	5,13	100	30	3,24	1,62	1,94
5	CT	2,67	100	40	1,68	0,84	1,01
6	H7	2,30	100	0	1,45	0,73	0,87
7	H7	3,40	100	10	2,14	1,07	1,29
8	H7	4,47	100	20	2,82	1,41	1,69
9	H7	3,80	100	30	2,40	1,20	1,44
10	H7	2,23	100	40	1,41	0,70	8,45

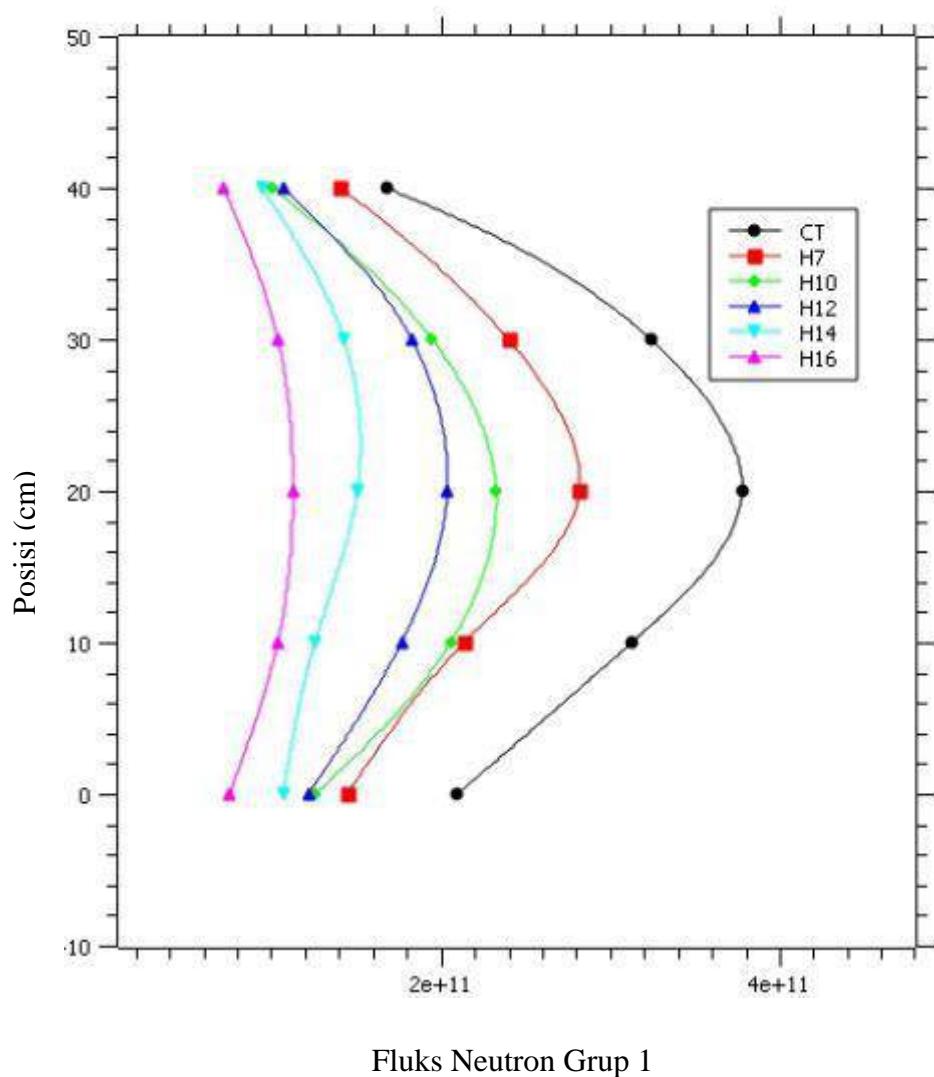


No	Ring	Arus SPND $\times 10^{-9}$ (Ampere)	Reactor Power (kW)	Level (cm)	Grup 1 ($\times 10^{11}$ n/cm ² s)	Grup 2 ($\times 10^{12}$ n/cm ² s)	Fluks Total ($\times 10^{12}$ n/cm ² s)
11	H10	2,00	100	0	1,26	0,63	7,56
12	H10	3,27	100	10	2,06	1,03	1,24
13	H10	3,70	100	20	2,33	1,17	1,40
14	H10	3,10	100	30	1,95	0,97	1,17
15	H10	1,60	100	40	1,01	0,50	0,60
16	H12	1,93	100	0	1,22	0,60	0,73
17	H12	2,80	100	10	1,77	0,88	1,06
18	H12	3,23	100	20	2,04	1,02	1,22
19	H12	2,90	100	30	1,83	0,91	1,10
20	H12	1,70	100	40	1,07	0,53	0,64
21	H14	1,70	100	0	1,07	0,53	0,64
22	H14	2,00	100	10	1,26	0,63	0,75
23	H14	2,40	100	20	1,51	0,75	0,90
24	H14	2,27	100	30	1,43	0,71	0,85
25	H14	1,50	100	40	0,94	0,47	0,56
26	H16	1,20	100	0	0,75	0,37	0,45
27	H16	1,65	100	10	1,04	0,52	0,62
28	H16	1,80	100	20	1,13	0,56	0,68
29	H16	1,65	100	30	1,04	0,52	0,62
30	H16	1,15	100	40	0,72	0,36	0,43
		Rata-rata			1,72	8,60	1,03

Perolehan nilai sensitivitas SPND dilakukan dengan cara melakukan perhitungan terhadap nilai fluks neutron hasil aktivasi foil emas pada posisi yang sama dengan posisi pengukuran SPND. Berdasarkan Tabel 4.3, perlu dilakukan plot grafik untuk mengetahui bentuk distribusi fluks neutron yang terbaca oleh SPND. Bentuk grafik distribusi fluks neutron grup



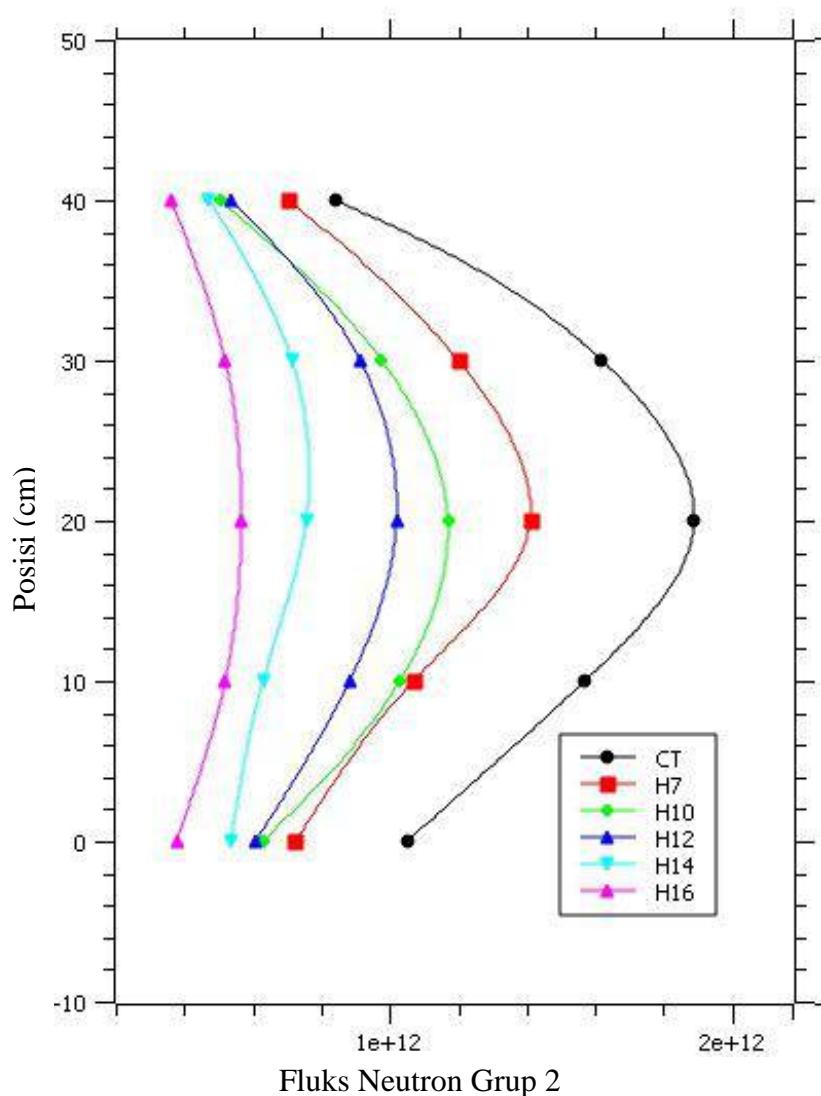
hasil konversi arus SPND ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan distribusi untuk fluks neutron grup 2 ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 3 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 1 - Konversi Arus SPND

Berdasarkan pengukuran dengan menggunakan SPND ternyata nilai fluks neutron grup 1 yang didapat pada lokasi CT lebih besar daripada lokasi yang lain. Hal ini dikarenakan saat kondisi reaktor kritis daya 100 kW adanya refleksi neutron dari ring ring terluar memberikan kontribusi yang cukup signifikan ke daerah CT dimana mula-mulai reaksi inti menghasilkan neutron cepat untuk kemudian mengalami moderasi dari air sehingga terjadi perlambatan energi dan menghasilkan fluks neutron grup 1.



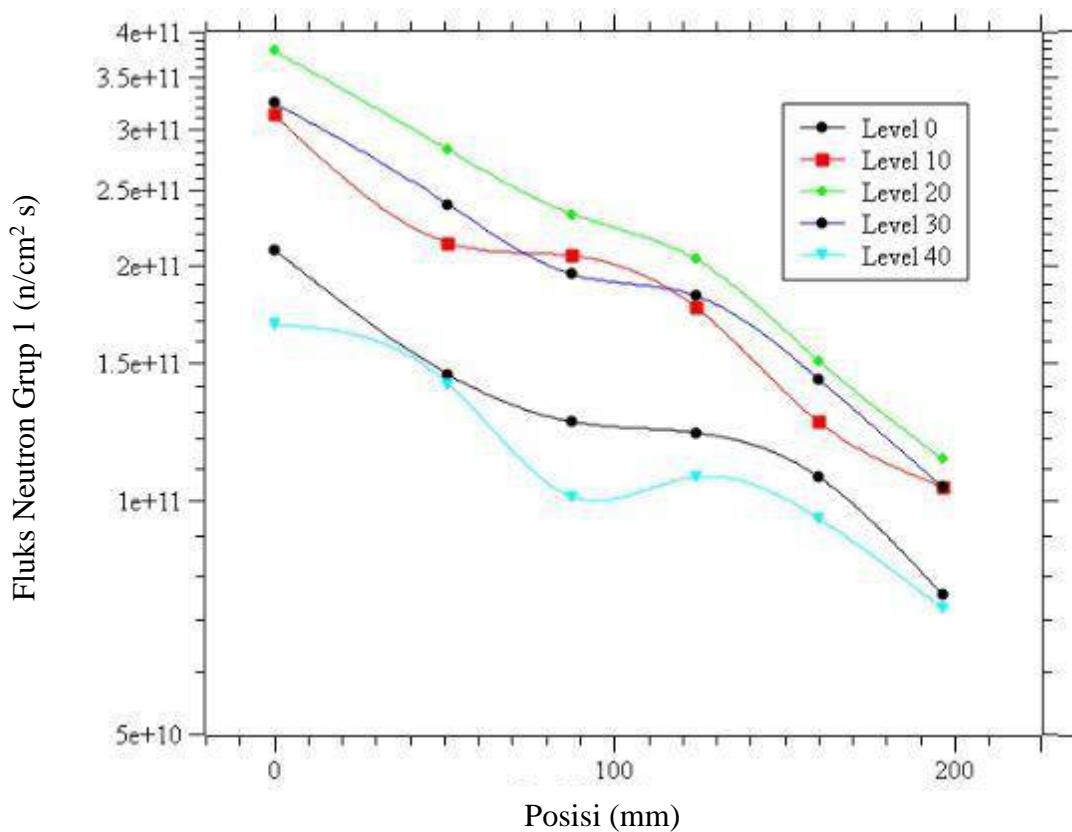


Gambar 4.4 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 2 - Konversi Arus SPND

Pada Gambar 4.4 terlihat nilai fluks neutron grup 2 pada daerah CT juga memperoleh nilai terbesar daripada daerah yang lain. Secara analisa hal ini juga serupa dengan analisa fluks neutron grup 1 dimana terbentuknya fluks neutron grup 1 berasal dari fluks neutron grup 2 yang dimoderasi oleh air.

Pada data Tabel 4.3 juga dibuat grafik distribusi fluks neutron grup 1 dan grup 2 secara radial yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Jarak lokasi dari CT ke H7, H10, H12, H14 dan H16 berturut-turut adalah 0 cm, 51,23 cm, 87,51 cm, 123,79 cm, 160,07 cm, 196,35 cm.

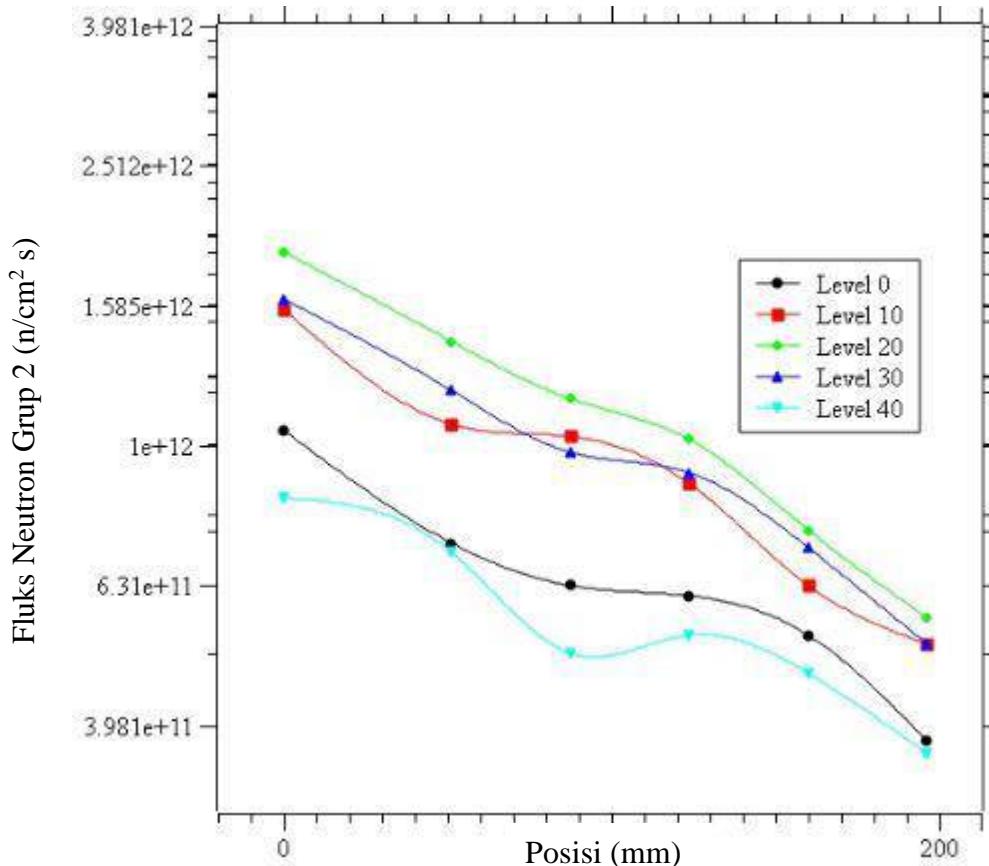




Gambar 4. 5 Distribusi Fluks Neutron Grup 1 Arah Radial

Jika Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 diamati maka dapat terlihat dengan jelas pada level 20 merupakan lokasi dengan nilai fluks neutron tertinggi dibandingkan dengan lokasi yang lain. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada lokasi tersebut merupakan lokasi area tengah aktif dari bahan bakar TRIGA yang digunakan di reaktor Kartini. Secara aksial dan radial menunjukkan bahwa daerah tengah aktif bahan bakar merupakan daerah dengan nilai fluks neutron tertinggi dari tiap-tiap bahan bakar.





Gambar 4. 6 Distribusi Fluks Neutron Grup 2 Arah Radial

Pada level 10, 30, dan 40 terdapat cekungan ke bawah yang cukup tajam hal tersebut dikarenakan adanya *flux depression* dimana densitas dari partikle neutron turun oleh karena serapan dari material. Pada kejadian ini hal yang berpengaruh adalah adanya batang kendali yang diletakkan pada ring C5, C9, dan E1 yang masing-masing merupakan batang kendali *safety*, *shim*, dan *regulating*. Mengingat fungsi dari batang kendali adalah untuk menyerap neutron karena memiliki bahan material dari Boron Carbide (B4C). Sehingga distribusi neutron yang berada disekitar lokasi pengukuran akan terganggu akibat *flux depression*.

4.3 Perhitungan Simulasi Dengan Metode Monte Carlo

Pada penelitian ini telah didapat hasil simulasi perhitungan dengan menggunakan metode Monte Carlo. Kondisi saat dilakukan simulasi perhitungan adalah pengaturan batang kendali yang sesuai dengan kondisi reaktor Kartini saat kritis pada daya 100 kW yaitu C5, C9, dan E1 berturut-turut 1000, 700, dan 500 dengan menggunakan TRIGAP MCNP. Nilai-nilai tersebut menunjukkan untuk posisi batang kendali C5 (batang kendali pengaman)



berada pada posisi 100%, C9 (batang kendali kompensasi) posisi 70% dan E1 (batang kendali pengatur) pada posisi 50%. Untuk konfigurasi bahan bakar disesuaikan dengan konfigurasi bahan bakar saat ini yaitu berjumlah 71 bahan bakar. Pada TRIGAP MCNP terdapat 3 (tiga) pilihan kondisi teras, yaitu TRIGA 1000 kW, TRIGA 2000 kW, dan TRIGA 250 kW. Oleh karena reaktor Kartini merupakan reaktor yang didesain dengan daya maksimal 250 kW, maka untuk tipe teras yang dipilih adalah tipe 250 kW. *Core orientation* pada software ini digunakan untuk menyesuaikan derajat sudut tiap-tiap ring agar perhitungan dapat lebih maksimal. Lokasi simulasi perhitungan fluks neutron sangat penting dalam menentukan lokasi yang sama dengan lokasi yang akan dijadikan lokasi eksperimen dengan menggunakan detektor SPND. Dengan menggunakan software *Visual Editor* (vised) maka didapat koordinat lokasi perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Koordinat Lokasi Perhitungan Dengan MCNPX

No	Lokasi	X	Y	Z
1	CT	-0,1695	0,2763	17,7500
				27,7500
				37,7500
				47,7500
				57,7500
2	H7	1,2978	5,8923	17,7500
				27,7500
				37,7500
				47,7500
				57,7500
3	H10	2,5555	9,4661	17,7500
				27,7500
				37,7500
				47,7500
				57,7500
4	H12	4,4419	13,0399	17,7500
				27,7500



No	Lokasi	X	Y	Z
4	H14	6,6429	16,4095	37,7500
				47,7500
				57,7500
				17,7500
				27,7500
	H16	8,8438	19,8812	37,7500
				47,7500
				57,7500
				17,7500
				27,7500
5	H16	8,8438	19,8812	37,7500
				47,7500
				57,7500
				17,7500
				27,7500

Pada tabel 4.4 sudah menunjukkan koordinat untuk perhitungan secara aksial dan radial untuk lokasi perhitungan dan pengukuran fluks neutron. Setelah dilakukan perhitungan dengan MCNPX versi 2.6.0 dan *library cross section* ENDF-B/VI. Perhitungan simulasi dengan menggunakan *tally* F5 dan didapat data yang ditampilkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Fluks Neutron Dengan MCNPX

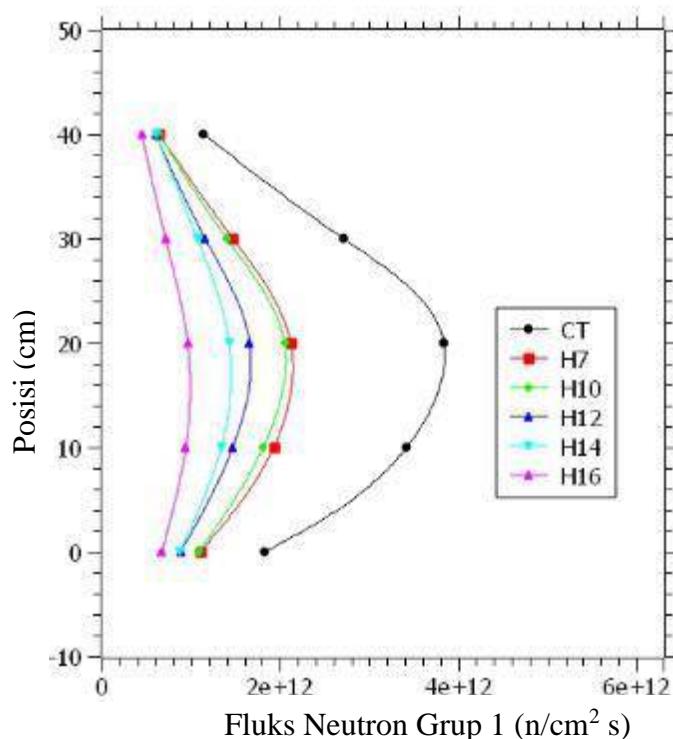
Level (cm)	Lokasi	Fluks Neutron Grup 1 ($\times 10^{12}$ n/cm 2 s)	Error relatif	Fluks Neutron Grup 2 (\times 10^{12} n/cm 2 s)	Error relatif	Fluks total (\times 10^{12} n/cm 2 s)
0	CT	1,83	0,0086	1,86	0,0069	3,70
10		3,42	0,0064	4,20	0,0047	7,62
20		3,84	0,0061	4,71	0,0044	8,55
30		2,71	0,0072	3,36	0,0052	6,07
40		1,14	0,0108	1,08	0,0093	2,23



Level (cm)	Lokasi	Fluks Neutron Grup 1 ($\times 10^{+12}$ n/cm2s)	Error relatif	Fluks Neutron Grup 2 (\times 10^{+12} n/cm2s)	Error relatif	Fluks total (\times 10^{+12} n/cm2s)
0	H7	1,11	0,0099	1,91	0,0068	3,03
10		1,93	0,0079	4,33	0,0045	6,26
20		2,12	0,0076	4,81	0,0043	6,94
30		1,47	0,0092	3,33	0,0051	4,81
40		0,64	0,0123	1,00	0,0090	1,64
0	H10	1,09	0,0105	1,74	0,0071	2,82
10		1,81	0,0084	3,86	0,0048	5,67
20		2,05	0,0079	4,28	0,0045	6,33
30		1,40	0,0096	2,99	0,0055	4,40
40		0,64	0,0131	0,93	0,0098	1,57
0	H12	0,89	0,0112	1,45	0,0078	2,34
10		1,47	0,0092	3,19	0,0052	4,67
20		1,66	0,0088	3,53	0,0051	5,19
30		1,16	0,0104	2,53	0,0060	3,68
40		0,60	0,0132	0,77	0,0109	1,37
0	H14	0,87	0,0113	1,06	0,0093	1,93
10		1,34	0,0096	2,18	0,0064	3,52
20		1,43	0,0092	2,39	0,0061	3,82
30		1,07	0,0107	1,75	0,0071	2,81
40		0,61	0,0134	0,62	0,0121	1,23
0	H16	0,68	0,0113	0,72	0,0106	1,39
10		0,94	0,0098	1,34	0,0076	2,28
20		0,96	0,0097	1,45	0,0074	2,42
30		0,72	0,0111	1,08	0,0089	1,79
40		0,45	0,0135	0,43	0,0134	8,84



Hasil pada Tabel 4.5 sesuai dengan koordinat yang ada pada data Tabel 4.4 dimana koordinat $Z = 17,7500$ sesuai dengan level 0 cm, Koordinat $Z = 27,7500$ sesuai dengan level 10 cm dan seterusnya hingga $Z = 57,7500$ yang setara dengan level 40 cm. Pengelompokan energi neutron didapat berdasarkan hasil perhitungan MCNPX dimana energi dikelompokkan menjadi yaitu rentang energi hingga 0,53 eV dan 20 MeV. Hasil yang didapat perlu dinormalisasi sesuai dengan persamaan 3.2. Setelah dinormalisasi maka didapat hasil yang tertampil seperti pada Tabel 4.5. *Cycle* yang digunakan dalam perhitungan ini menggunakan *cycle* sebanyak 3000 dan *burn-up* data pada bulan Maret 2023. Hasil pada Tabel 4.5 dapat dibuat menjadi grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.

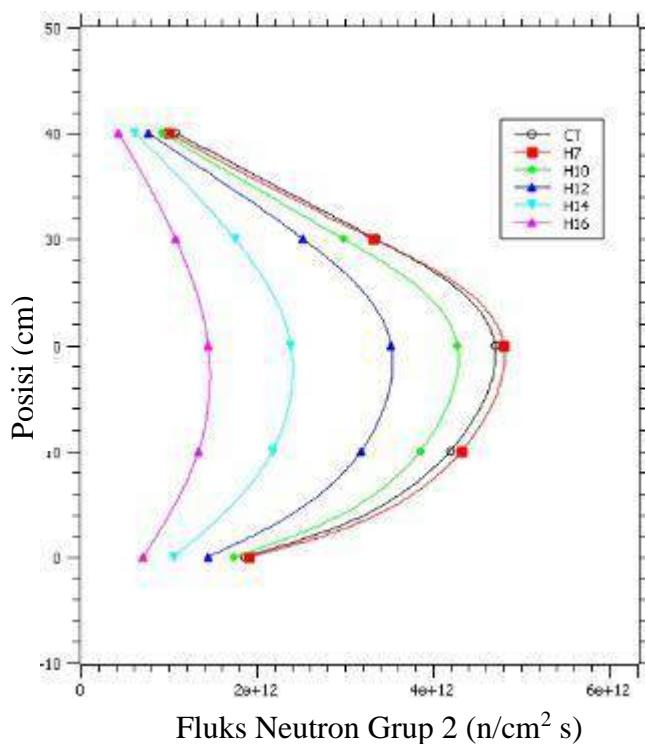


Gambar 4.7 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 1 – Perhitungan MCNPX

Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa puncak tertinggi fluks neutron grup 1 berada di ring CT kemudian diikuti oleh H7 sampai dengan H16. Untuk setiap lokasi perhitungan didapati juga bahwa untuk arah sumbu X dalam hal ini merepresentasikan sebagai variabel level yang memiliki nilai tertinggi pada daerah tengah. Daerah tengah ini merupakan daerah tengah aktif bahan bakar TRIGA Mark II reaktor Kartini. Hal serupa juga terjadi pada neutron cepat yang



dilakukan perhitungan dengan MCNPX dimana nilai fluks neutron tertinggi pada bagian tengah. Grafik aksial neutron cepat dengan MCNPX ditunjukkan pada Gambar 4.8.

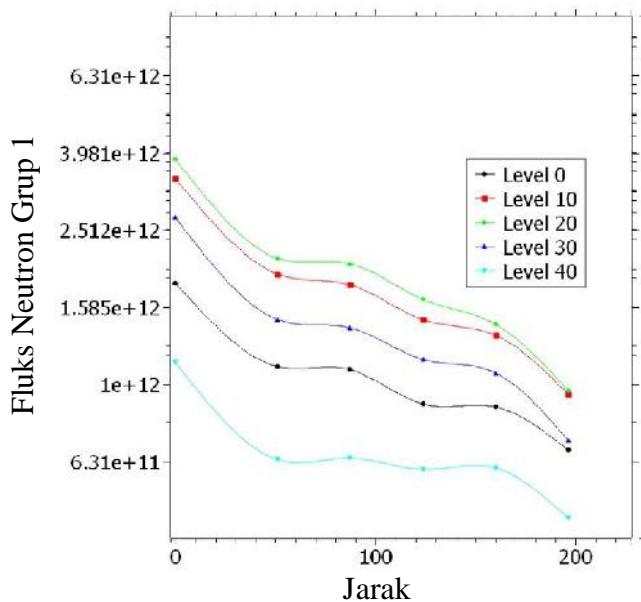


Gambar 4. 8 Distribusi Aksial Fluks Neutron Grup 2 – Perhitungan MCNPX

Nilai fluks neutron terbesar yang ada pada daerah tengah aktif bahan bakar didapat karena pada setiap bahan bakar grafit pada ujung atas dan bawah. Fungsi dari grafit ini sebagai reflektor fluks neutron sehingga reaksi fisi yang ada pada teras dipantulkan dari kedua sisi yaitu atas dan bawah bahan bakar. Grafit menjadi material yang baik untuk memantulkan fluks neutron karena memiliki berat atom yang kecil, penampang hamburan yang tinggi, penampang *absorption* yang rendah. Bentuk distribusi fluks neutron grup 1 dengan MCNPX secara radial ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan fluks neutron grup 2 pada Gambar 4.10.

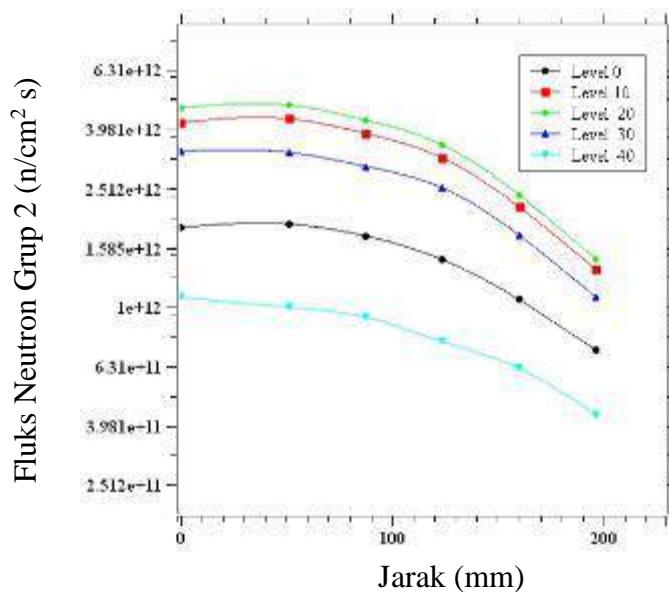
Hasil yang didapat dari perhitungan simulasi ini akan digunakan sebagai acuan dalam penentuan kisaran nilai fluks neutron yang ada di dalam teras reaktor Kartini. Setelah melihat data hasil perhitungan dengan MCNPX maka dilakukan perhitungan fluks neutron untuk seluruh bahan bakar yang ada di teras reaktor Kartini dengan konfigurasi bahan bakar yang masih sama.





Gambar 4. 9 Distribusi Radial Fluks Neutron Grup 1 – Perhitungan MCNPX

Pada Gambar 4.9 terlihat nilai fluks neutron terbesar yang didapat secara hasil perhitungan MCNPX adalah lokasi dengan level 20 yang menunjukkan daerah tengah bahan bakar. Nilai terbesar yang didapat pada data Gambar 4.9 adalah $3,84 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ untuk grup 1, jika dibandingkan dengan data pada Gambar 2.1 nilai terbesar yang didapat adalah $\pm 4,00 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$. Data yang didapat tidak mengalami perbedaan yang signifikan hal ini dikarenakan *burnup* pada bahan bakar reaktor Kartini yang kecil.



Gambar 4. 10 Distribusi Radial Fluks Neutron Grup 2 – Perhitungan MCNPX



Pada Gambar 4.10 nilai data fluks neutron terbesar berada pada nilai $4,81 \times 10^{+12}$ n/cm² s. Berdasarkan data yang didapat nilai untuk fluks neutron Grup 2 lebih tinggi daripada fluks neutron pada Grup 1 hasil perhitungan MCNPX. Hal ini sudah sesuai dengan hasil data simulasi perhitungan pada Gambar 2.1. Untuk koordinat X dan Y menyesuaikan dengan koordinat yang didapat melalui vised, sedangkan untuk koordinat Z menggunakan koordinat yang memiliki nilai fluks neutron terbesar dari perhitungan MCNPX sebelumnya yaitu berada pada koordinat 37,7500. Setelah dilakukan perhitungan maka didapat hasil yang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Perhitungan MCNPX Tiap Ring Bahan Bakar

Nomor Ring	Fluks Neutron (n/cm ² s)						Koordinat	
	Termal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Epitermal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Cepat ($\times 10^{+12}$)	Galat	X	Y
CT	4,04	0,0106	1,38	0,0157	3,13	0,0084	0,0530	0,0381
B1	4,15	0,0122	2,03	0,0167	4,95	0,0075	-2,1725	-3,6195
B2	4,09	0,0122	1,93	0,0173	4,75	0,0075	-4,0406	0,0298
B3	3,98	0,0123	1,83	0,0171	4,64	0,0077	-2,0626	3,3662
B4	3,93	0,0124	1,85	0,0176	4,52	0,0077	2,0032	3,6790
B5	3,97	0,0122	1,99	0,016	4,72	0,0076	4,0911	0,1340
B6	4,03	0,0122	1,98	0,0156	4,83	0,0074	2,2230	-3,411
C1	3,68	0,0128	1,89	0,0172	4,59	0,0077	-0,0847	-7,8944
C2	3,55	0,0131	1,85	0,0159	4,55	0,0076	-3,9307	-6,7475
C3	3,61	0,0130	1,84	0,0163	4,48	0,0077	-7,0076	-3,9323
C4	3,59	0,0129	1,74	0,0166	4,23	0,0079	-8,1064	0,1340
C5	3,01	0,0052	1,16	0,0064	2,84	0,0031	-7,0076	3,9918
C6	1,63	0,0121	1,15	0,0158	3,61	0,0074	-4,1505	7,2241
C7	3,51	0,0131	1,74	0,0169	4,29	0,0079	-0,0847	7,9539
C8	3,47	0,0134	1,71	0,0172	4,16	0,0081	3,8713	7,1198
C9	2,48	0,0047	1,14	0,0052	2,98	0,0025	6,9481	3,9918
C10	3,61	0,0129	1,76	0,017	4,29	0,0078	7,9371	0,1340
C11	3,75	0,0126	1,89	0,0164	4,51	0,0076	6,9481	-3,9323
C12	3,65	0,0147	1,97	0,016	4,59	0,0075	4,0911	-6,8517
D1	3,21	0,0139	1,61	0,0179	3,87	0,0082	-1,8429	-11,6479



Nomor Ring	Fluks Neutron (n/cm ² s)						Koordinat	
	Termal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Epitermal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Cepat ($\times 10^{-12}$)	Galat	X	Y
D2	3,20	0,0139	1,62	0,0175	3,98	0,0082	-5,9087	-10,2925
D3	3,19	0,0139	1,60	0,0178	3,92	0,0083	8,9855	-7,5816
D4	3,11	0,0140	1,59	0,0176	3,86	0,0085	-11,1833	-4,2451
D5	2,92	0,0143	1,51	0,0184	3,64	0,0087	-11,8426	-0,1788
D6	3,09	0,0140	1,45	0,0181	3,55	0,0087	-11,2932	3,8876
D7	3,09	0,0139	1,46	0,0177	3,56	0,0086	-9,3152	7,5369
D8	2,94	0,0145	1,46	0,018	3,58	0,0086	-6,1285	10,352
D9	2,89	0,0145	1,48	0,0192	3,53	0,0087	-2,3923	11,8110
D10	2,89	0,0147	1,48	0,0178	3,60	0,0086	1,7834	11,7075
D11	2,80	0,0145	1,47	0,018	3,61	0,0086	5,7394	10,5605
D12	1,43	0,0134	1,00	0,0167	3,11	0,0078	9,0360	8,1624
D13	3,13	0,0140	1,54	0,018	3,67	0,0086	11,1239	4,4089
D14	3,01	0,0141	1,58	0,0179	3,78	0,0085	11,8931	0,3426
D15	3,18	0,0141	1,60	0,0186	3,79	0,0084	11,3436	-3,7238
D16	3,20	0,0138	1,65	0,0191	3,86	0,0083	9,1459	-7,3731
D17	3,16	0,0138	1,61	0,0175	3,94	0,0083	6,0690	-10,0840
D18	3,19	0,0138	1,54	0,0178	3,84	0,0083	2,3329	-11,7522
E1	1,95	0,0073	0,82	0,0086	2,03	0,0042	0,1351	-15,8185
E2	2,63	0,0153	1,28	0,0197	3,04	0,0095	-4,1505	-15,2972
E3	2,53	0,0152	1,29	0,0208	3,14	0,0093	-7,9966	-13,7332
E4	2,54	0,0152	1,32	0,0213	3,01	0,0094	-11,2932	-11,2309
E5	2,57	0,0155	1,26	0,0205	2,95	0,0095	-13,7107	-7,8944
E6	2,43	0,0155	1,16	0,0202	2,82	0,0099	-15,2491	-4,0366
E7	2,39	0,0162	1,07	0,0206	2,65	0,0101	-15,7986	0,0298
E8	2,25	0,0163	1,09	0,0209	2,66	0,01	-15,3590	4,2004
E9	2,28	0,0166	1,16	0,0222	2,78	0,01	-13,7107	7,9539
E10	2,21	0,0164	1,13	0,0207	2,66	0,01	-11,1833	11,3947
E11	2,31	0,0162	1,17	0,0209	2,76	0,01	-7,8867	13,6885
E12	2,34	0,0161	1,08	0,0217	2,64	0,0099	-4,0406	15,5653
E13	2,48	0,0157	1,09	0,0205	2,70	0,0101	0,0252	15,9823
E14	2,41	0,0155	1,10	0,0226	2,74	0,01	4,2009	15,3567

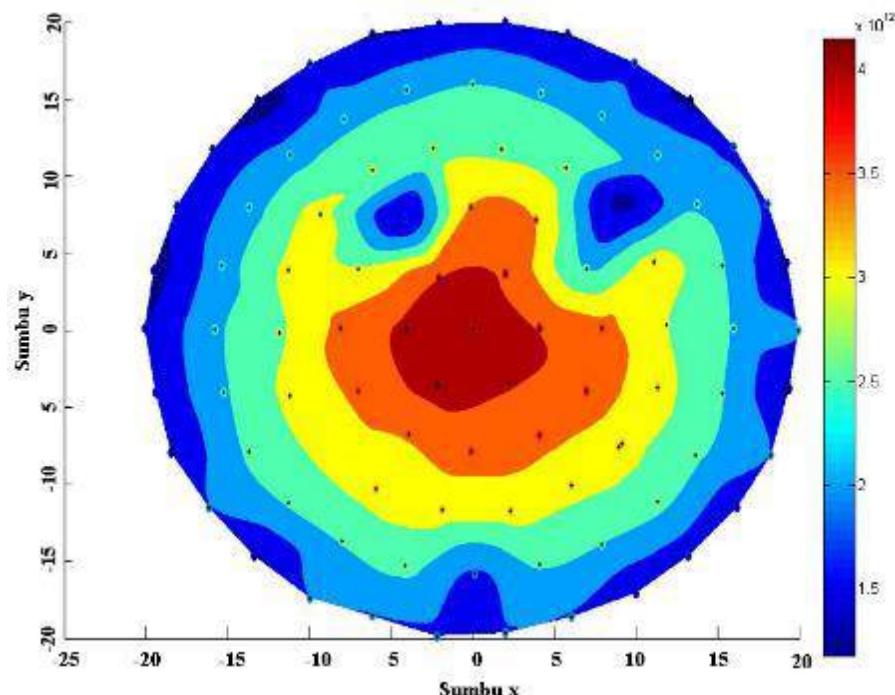


Nomor Ring	Fluks Neutron (n/cm ² s)						Koordinat	
	Termal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Epitermal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Cepat ($\times 10^{-12}$)	Galat	X	Y
E15	2,31	0,0161	1,18	0,0209	2,77	0,0098	7,9371	13,8970
E16	2,37	0,0157	1,19	0,0217	2,83	0,0096	11,3436	11,3947
E17	2,44	0,0160	1,20	0,0205	2,95	0,0097	13,7612	8,1624
E18	2,52	0,0156	1,23	0,0202	2,97	0,0095	15,2996	4,2004
E19	2,46	0,0157	1,20	0,0201	2,94	0,0096	15,9589	0,1340
E20	2,51	0,0154	1,24	0,0201	2,99	0,0094	15,2996	-4,1408
E21	2,59	0,0154	1,27	0,0202	2,95	0,0094	13,6513	-8,1029
E22	2,65	0,0153	1,21	0,0204	2,95	0,0096	11,3436	-11,1266
E23	2,49	0,0154	1,21	0,0201	2,90	0,0096	7,9371	-13,9418
E24	2,55	0,0154	1,21	0,022	2,92	0,0095	4,0911	-15,1930
F1	1,88	0,0179	0,89	0,0241	2,10	0,0113	-2,1725	-19,8849
F2	1,98	0,0174	0,92	0,0242	2,20	0,0108	-6,1285	-18,5422
F3	1,99	0,0176	0,96	0,0249	2,13	0,0114	-9,9745	-17,3825
F4	1,43	0,0154	0,65	0,025	1,54	0,0066	-13,3810	-14,6716
F5	1,96	0,0174	0,85	0,0234	2,07	0,0116	-16,1282	-11,5437
F6	1,47	0,0142	0,57	0,0134	1,28	0,0072	-18,4539	-7,9987
F7	1,55	0,0150	0,55	0,0141	1,20	0,0075	-19,4248	-4,0366
F8	1,46	0,0063	0,50	0,0088	1,08	0,0044	-20,0842	0,1340
F9	1,28	0,0177	0,50	0,0268	1,18	0,0075	-19,5347	3,8876
F10	1,58	0,0196	0,73	0,0257	1,75	0,0127	-18,1062	8,0582
F11	1,63	0,0194	0,72	0,0255	1,77	0,0123	-15,9085	11,7075
F12	1,18	0,0162	0,54	0,0144	1,33	0,0071	-13,1613	14,9397
F13	1,73	0,0185	0,80	0,0251	1,82	0,0121	-9,9745	17,2335
F14	1,41	0,0174	0,52	0,0142	1,20	0,0074	-6,1285	19,2146
F15	1,50	0,0139	0,54	0,0164	1,18	0,0076	-2,0626	19,8401
F16	1,55	0,0149	0,54	0,0136	1,16	0,0076	2,0032	19,9444
F17	1,42	0,0137	0,54	0,0143	1,23	0,0073	5,8493	19,2146
F18	1,82	0,0177	0,82	0,0236	1,88	0,0121	9,9151	17,3378
F19	1,35	0,0184	0,57	0,0131	1,41	0,0068	13,3216	14,9397
F20	1,82	0,0182	0,83	0,0236	1,99	0,0117	15,9589	11,9160
F21	1,91	0,0179	0,91	0,0248	2,06	0,0114	18,0468	8,1624



Nomor Ring	Fluks Neutron (n/cm ² s)						Koordinat	
	Termal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Epitermal ($\times 10^{+12}$)	Galat	Cepat ($\times 10^{-12}$)	Galat	X	Y
F22	1,41	0,0157	0,62	0,0133	1,54	0,0066	19,2555	4,3046
F23	2,02	0,0173	0,90	0,0233	2,05	0,0116	19,9148	-0,0745
F24	1,41	0,0146	0,64	0,0134	1,53	0,0066	19,3654	-3,8280
F25	1,97	0,0173	0,85	0,0253	2,01	0,0114	18,2665	-8,1029
F26	1,56	0,0138	0,61	0,0148	1,40	0,0069	16,1787	-11,5437
F27	1,65	0,0162	0,59	0,013	1,34	0,0071	13,2117	-14,6716
F28	1,52	0,0148	0,60	0,0132	1,41	0,0069	10,0250	-17,0697
F29	1,94	0,0177	0,90	0,0234	2,07	0,0116	6,0690	-18,6337
F30	1,95	0,0176	0,90	0,0231	2,11	0,0112	2,0032	-19,6764

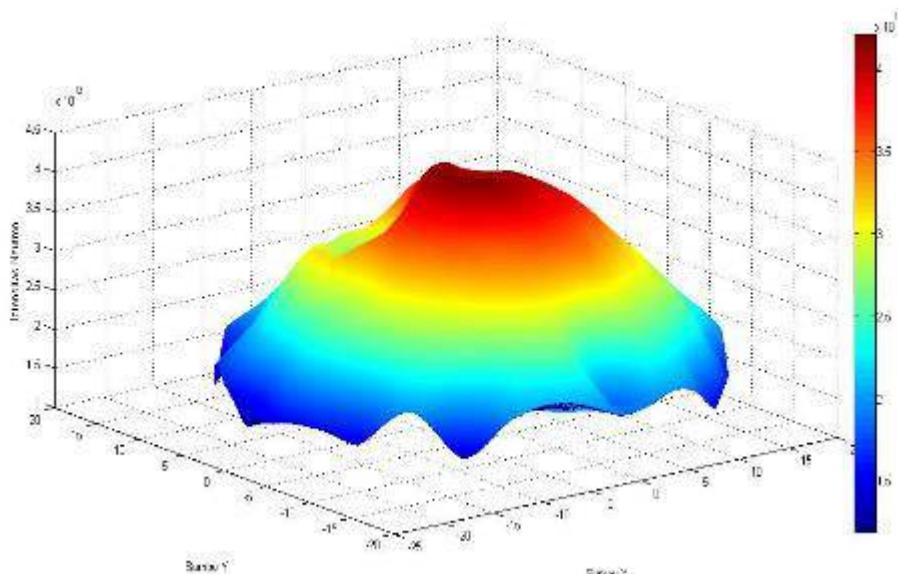
Hasil pada Tabel 4.6 terdapat informasi mengenai neutron termal, epitermal, dan cepat, dimana pembagian range energi neutron sebagai berikut: Termal (0 eV – 0,53 eV), Epitermal (0,53 eV – 1 keV), dan Cepat (1 keV – 10 MeV) untuk kemudian hasil yang tersebut dibuat menjadi grafik 2D dan 3D agar dapat dilihat bentuk distribusi fluks neutron secara hasil perhitungan dengan MCNPX. Hasil grafik 2D dan 3D untuk neutron termal dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan 4.12.



Gambar 4. 11 Representasi 2D Neutron Termal - Perhitungan MCNPX



Pada Gambar 4.11 terlihat pada koordinat di C5, C9 dan E1 (koordinat ada pada Tabel 4.6) merupakan lokasi penempatan batang kendali. Sehingga nilai fluks neutron dilokasi tersebut mengalami penurunan yang cukup signifikan oleh karena fluks neutron terserap oleh batang kendali.

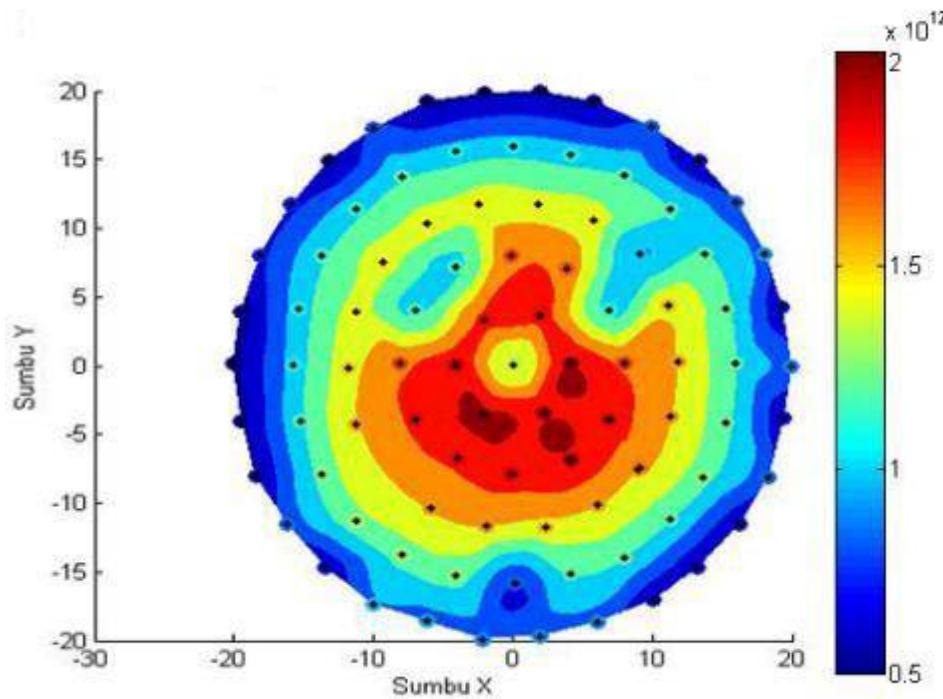


Gambar 4. 12 Representasi 3D Neutron Termal - Perhitungan MCNPX

Tampak pada Gambar 4.12 nilai neutron termal tertinggi berada pada daerah CT, bentuk tersebut mewakili bentuk distribusi neutron termal secara radial. Pada pengukuran MCNPX untuk nilai fluks neutron pada bahan bakar seluruh teras dapat dilakukan perhitungan untuk mencari nilai nilai neutron termal, epitermal dan cepat. Pada perhitungan yang sebelumnya hanya dilakukan perhitungan untuk fluks neutron grup 1 dan grup 2 karena secara eksperimen pengukuran fluks neutron dengan menggunakan foil emas tidak bisa mendeteksi secara signifikan untuk neutron cepat, hal ini dikarenakan tampang lintang makroskopis dari foil emas yang memiliki daerah resonansi ≤ 50 keV. Inilah yang menjadikan alasan pada penelitian ini dibuat 2 grup rentang energi mengingat kebolehjadian deteksi neutron cepat pada sampel emas sangat kecil, sehingga dengan menggunakan cadmium sebagai filter energi neutron mengindikasikan bahwa energi neutron yang lebih besar dari *cut-off* energi cadmium akan diterima oleh sampel emas yang terbungkus.

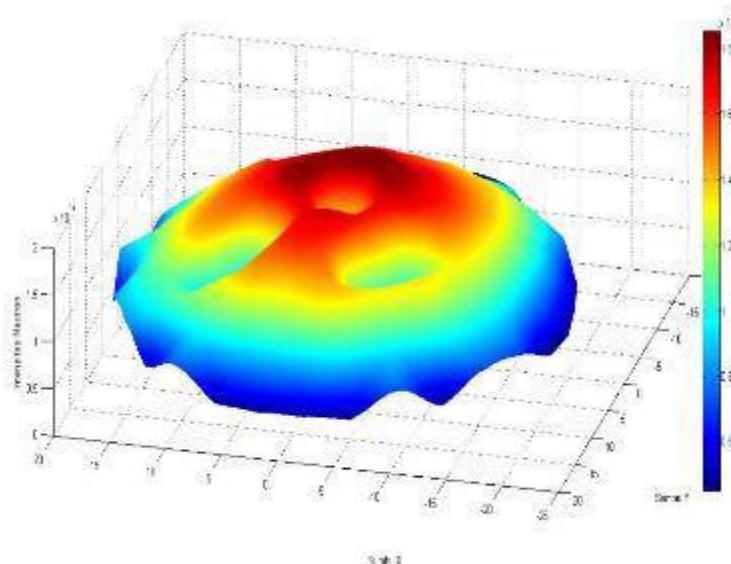
Untuk grafik 2D dan 3D neutron epitermal perhitungan MCNPX ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan 4.14.





Gambar 4. 13 Representasi 2D Neutron Epitermal - Perhitungan MCNPX

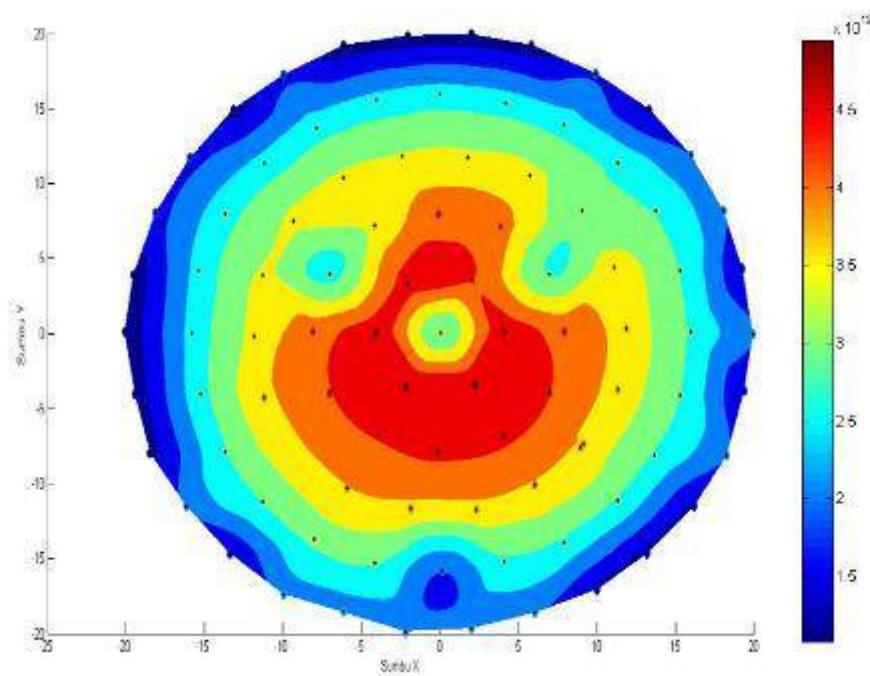
Pada Gambar 4.13 nilai neutron epitermal tertinggi berada di sekitar ring 1, 5 dan 6 dengan nilai fluks neutron sebesar $1,84; 1,81; 1,82 (\times 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s})$. Nilai tersebut lebih tinggi daripada nilai neutron epitermal yang berada di CT yang memiliki nilai $1,25 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s}$.



Gambar 4. 14 Representasi 3D Neutron Epitermal - Perhitungan MCNPX

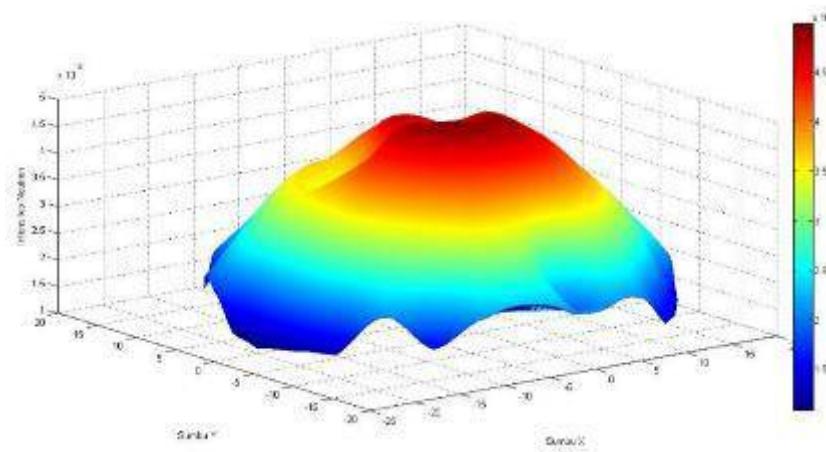


Representasi distribusi neutron cepat berdasarkan Tabel 4.6 dapat dilihat pada Gambar 4.15 untuk 2D dan Gambar 4.16 untuk versi 3D.



Gambar 4. 15 Representasi 2D Neutron Cepat - Perhitungan MCNPX

Berdasarkan Gambar 4.15 terlihat nilai neutron cepat terbesar berada pada seluruh ring B, dari ring B1 hingga B6. Dengan rentang antara $4,52 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s}$ hingga $4,95 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s}$.



Gambar 4. 16 Representasi 3D Neutron Cepat - Perhitungan MCNPX

Pada Gambar 4.16 profil distribusi neutron cepat perhitungan MCNPX memberikan bentuk parabola. Pada pemroses grafik 2D dan 3D digunakan metode interpolasi “cubic” pada



matlab. Hal ini dikarenakan pada perhitungan MCNPX menggunakan tally F5 dimana titik yang diambil merupakan titik tertinggi fluks neutron arah aksial yaitu berada pada koordinat Z = 37,7500 untuk kemudian X dan Y diletakkan pada setiap bahan bakar yang tersusun di teras reaktor Kartini dengan daya saat perhitungan adalah 100 kW. Berdasarkan data pada Tabel 4.6 didapat nilai *power peaking factor* (PPF) yang digunakan sebagai analisa keselamatan, setelah dilakukan perhitungan maka didapat nilai PPF secara radial adalah 1,5176. Nilai ini masih dibawah Batas Kondisi Operasi (BKO) reaktor Kartini yaitu 1,7908. Apabila nilai PPF melebihi dari BKO maka dapat dikhawatirkan menimbulkan kejadian *Departure From Nuclear Boiling* (DNB) [2]

4.4 Desain Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32

Untuk mendapatkan nilai langsung pengukuran fluks neutron harus dilakukan proses konversi dari arus ke fluks neutron, maka pada penelitian ini juga dilakukan desain serta rancang bangun monitoring fluks neutron dengan menggunakan ESP32. Desain dilakukan dengan memanfaatkan *output* dari *electrometer* yang berupa tegangan listrik. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data untuk mengetahui korelasi data antara tegangan *output* dengan *output* arus listrik dari *electrometer*. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan sebagai referensi *input* dari ESP 32 merupakan data yang sebanding. Hubungan antara arus listrik dan tegangan keluaran pada *electrometer Keithley 610C* ditunjukkan pada Tabel 4.7.

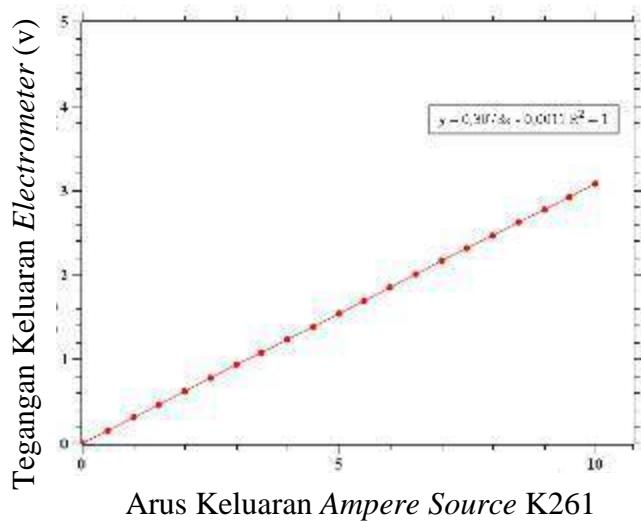
Tabel 4.7 Hubungan Antara Arus Listrik Dan Tegangan Keluaran Pada Electrometer Keithley 610C

No	Arus keluaran dari ampere source K261 (10^{-9} A)	Tegangan Keluaran dari Electrometer Keithley 610C (V)
1	0,00	0,00
2	0,50	0,15
3	1,00	0,31
4	1,50	0,46
5	2,00	0,62
6	2,50	0,77
7	3,00	0,93



No	Arus keluaran dari ampere source K261 (10^{-9} A)	Tegangan Keluaran dari Electrometer Keithley 610C (V)
8	3,50	1,07
9	4,00	1,23
10	4,50	1,38
11	5,00	1,54
12	5,50	1,68
13	6,00	1,84
14	6,50	2,00
15	7,00	2,16
16	7,50	2,31
17	8,00	2,46
18	8,50	2,62
19	9,00	2,77
20	9,50	2,92
21	10,00	3,08

Dengan memberikan arus buatan dari alat *ampere source K261* maka didapatkan korelasi antara nilai arus dengan tegangan seperti yang terlihat pada Tabel 4.7. Data pada Tabel 4.7 kemudian diplotkan ke dalam grafik yang ditampilkan pada Gambar 4.17.



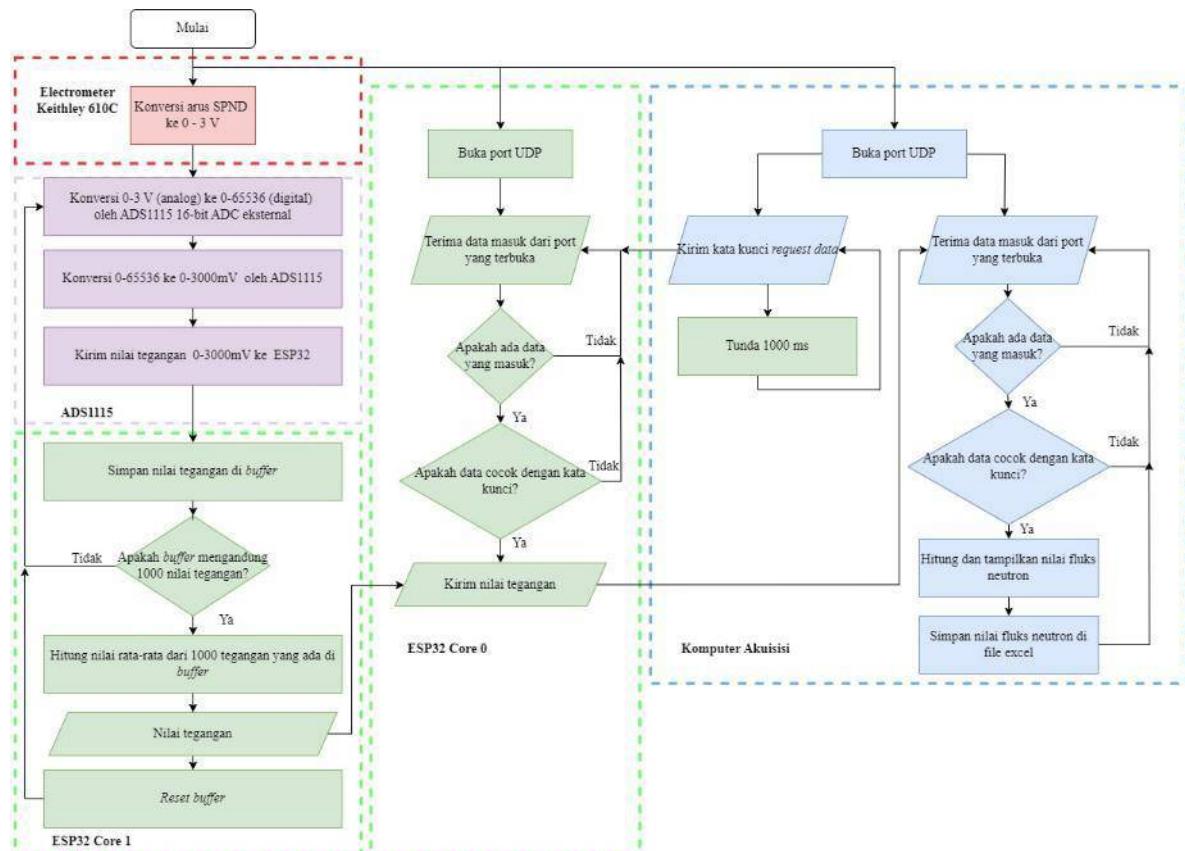
Gambar 4. 17 Korelasi Arus Keluaran Ampere Source K261 Dengan Tegangan Keluaran Electrometer



Berdasarkan korelasi grafik pada Gambar 4.17 maka variabel tegangan keluaran dari *electrometer* dapat digunakan sebagai nilai masukan yang dapat diproses di ESP32, sehingga nilai tegangan dapat langsung masuk ke ADC dan dilakukan pemrograman sesuai dengan kebutuhan penelitian. Arus yang diberikan dari *ampere source* memiliki hubungan yang linier dengan tegangan keluaran *electrometer*, dimana semakin besar arus listrik yang diberikan maka semakin besar pula tegangan keluarannya. Arus listrik yang terbaca pada *electrometer* saat kondisi terhubung dengan SPND menandakan semakin besar arus listrik maka semakin besar pula fluks neutron yang dapat diukur oleh SPND.

4.4.1 Flowchart Pemrograman Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32

Untuk mempermudah dalam mendesain pemrograman yang akan ditanamkan pada ESP32 maka dibutuhkan suatu *flowchart* yang dapat membantu untuk mendapatkan algorithma dalam pemrograman. *Flowchart* pemrograman yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18 Flowchart Pemrograman Pada ESP32



Pada Gambar 4.18 proses yang dilakukan dibagi menjadi 3 bagian yaitu ESP32 core 1, ESP32 core 0, dan komputer akuisisi. Bagian elektrometer Keithley 610C mengubah nilai arus menjadi 0-3 V. Nilai tegangan ini dihubungkan ke ADS1115 pin A0. Pada ADS1115, mengkonversi nilai tegangan output 0-3 V (analog) menjadi 0-65536 (digital), kemudian data 0-65536 dikonversi menjadi 0-3000 mV. Nilai tegangan 0-3000 mV dikirim ke ESP32 core 1 menggunakan pin serial clock (SCL) dan serial data (SDA). Di dalam ESP32 core 1, data tegangan disimpan dalam *buffer*. Jika data sudah terdiri dari 1000 nilai, nilai rata-rata dihitung dalam *buffer*. Proses selanjutnya adalah mendapatkan nilai tegangan yang diharapkan dan mengirimkannya ke ESP32 core 0. Langkah terakhir dalam ESP32 core 1 adalah mengatur ulang *buffer* dan kemudian kembali ke langkah pertama.

Pada saat yang sama, ESP32 core 0 memerintahkan untuk membuka port *User Data Protocol* (UDP) sehingga data dari ESP32 dapat dihubungkan ke router wifi dan komputer akuisisi data. Setelah itu, data yang masuk digunakan sebagai acuan untuk membuka port. Jika ada data yang masuk, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah kata kunci yang dimaksud sudah sesuai. Jika tidak, perintah dikembalikan untuk mendengarkan data yang masuk. Jika sesuai, data tegangan dikirim sebagai referensi untuk mendengarkan data yang masuk pada komputer akuisisi. Komunikasi data antara ESP32 dan ADS1115 menggunakan *Inter-Integrated Circuit* (I2C) dengan memanfaatkan fitur SCL dan SDA pada pin ADS1115, SDA pada pin 21, dan SCL pada pin 22 pada ESP32.

ESP32 diprogram menggunakan perangkat lunak Arduino Integrated Development Environment (IDE) Sketch versi 1.8.9, sebuah platform sumber terbuka. Program IDE Sketch dapat diunduh dari [https://www.arduino.cc/en/ software/OldSoftwareReleases](https://www.arduino.cc/en/software/OldSoftwareReleases). Beberapa kelengkapan Library yang diperlukan dapat diakses dari GitHub atau ditambahkan dari Sketch IDE Library. Arduino adalah platform perangkat keras dan perangkat lunak *open source* yang populer [36]. Aplikasi perangkat lunak untuk akuisisi dan penyimpanan data dibangun dengan bahasa pemrograman C#. Program C# merupakan bagian dari aplikasi Microsoft Visual Studio Community. Program aplikasi ini berfungsi untuk melakukan akuisisi data, melakukan perhitungan konversi tegangan ke nilai fluks neutron, menampilkan hasil, dan melakukan penyimpanan data.

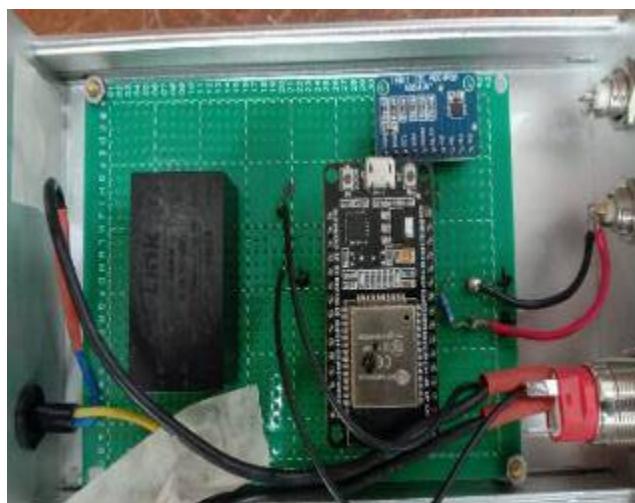
Proses pada komputer akuisisi adalah dengan membuka port UDP, kemudian proses dipecah menjadi 2, yaitu mengirimkan data permintaan kata kunci, lalu delay selama 1000



ms dan mengirimkan data ke ESP32 *core* 0. Proses kedua adalah mendengarkan data input port yang dibuka. Jika ada data masuk yang sesuai dengan kata kunci, maka nilai fluks neutron akan dihitung dan ditampilkan. Setelah itu, data akan disimpan ke dalam file dengan format *.csv. Pada file berformat ini, data yang telah disimpan dapat dibuka dan diolah dengan aplikasi spreadsheet seperti Microsoft Excel.

4.4.2 Rancang Bangun Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32

Pada penelitian telah dilakukan rancang bangun monitoring fluks neutron menggunakan ESP32 dimana hasil yang diinginkan pada pembuatan alat ini adalah untuk dapat membaca secara langsung nilai fluks neutron yang terukur oleh SPND saat kondisi reaktor kritis pada daya tertentu. Untuk bentuk alat yang telah selesai dibuat ditunjukkan pada Gambar 4.19 dan 4.20.



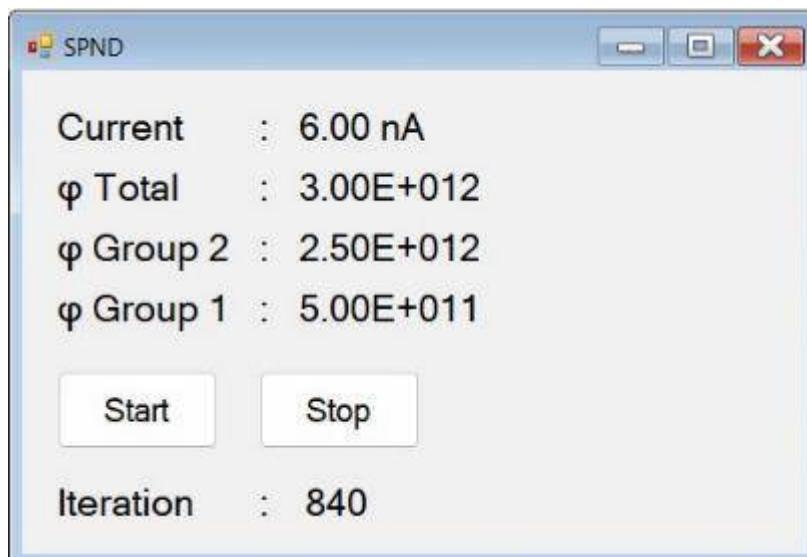
Gambar 4. 19 Alat Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32 Tanpa Cover



Gambar 4. 20 Alat Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP32 Dengan Cover



Pada pengujian alat ini tidak dilakukan langsung dengan menggunakan SPND namun dilakukan pengujian dengan skala laboratorium menggunakan *ampere souce K261* seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Pengaturan nilai arus masukan diatur sesuai dengan nilai pembacaan arus SPND saat kondisi reaktor kritis daya 100 kW. Hal ini bertujuan untuk mempermudah kalibrasi alat dengan memanfaatkan rumus yang akan ditanamkan di ESP32. Pada proses kalibrasi ini nilai sensitivitas dari detektor SPND menjadi nilai acuan yang penting pada formula program. Nilai sensitivitas yang digunakan adalah $2,64 \times 10^{-21}$ A/nv-cm. Proses pengolahan signal dimulai dengan membaca nilai tegangan dari *electrometer Keithley 610C* yang terhubung dengan ADS1115 untuk diolah dan kemudian data akan dikirim oleh jaringan nirkabel untuk dapat dibaca melalui laptop atau komputer yang terhubung dengan jaringan internet. *Form* aplikasi yang dibuat dengan menggunakan Visual Studio. Untuk tampilan aplikasi monitoring fluks neutron dapat ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4. 21 Tampilan Aplikasi Monitoring Fluks Neutron

Pada aplikasi tersebut saat komputer atau laptop sudah terhubung dengan (*Service Set Identifier*) SSID, maka data yang terbaca oleh ADC akan dikirimkan ke dalam aplikasi tersebut. Pada aplikasi terdapat beberapa informasi yaitu *current*, ϕ -*Total*, ϕ -Grup 2, ϕ -Grup 1, *iteration*. *Current* menunjukkan arus yang terbaca artinya jika diimplementasikan dengan detektor SPND maka akan dapat diketahui informasi arus listrik yang dihasilkan. ϕ -*Total* merupakan jumlah fluks neutron yang terukur. ϕ -Grup 2 adalah fluks neutron dengan



energi neutron $> 0,53$ eV, sedangkan \emptyset - Grup 1 merupakan fluks neutron dengan energi neutron $< 0,53$ eV. Tombol *start* digunakan untuk memulai pengukuran sedangkan *stop* untuk menghentikan pengukuran. *Iteration* merupakan banyaknya perulangan perhitungan program yang telah dilakukan. Hasil pengujian alat yang telah dilakukan ditampilkan pada Tabel 4.8.

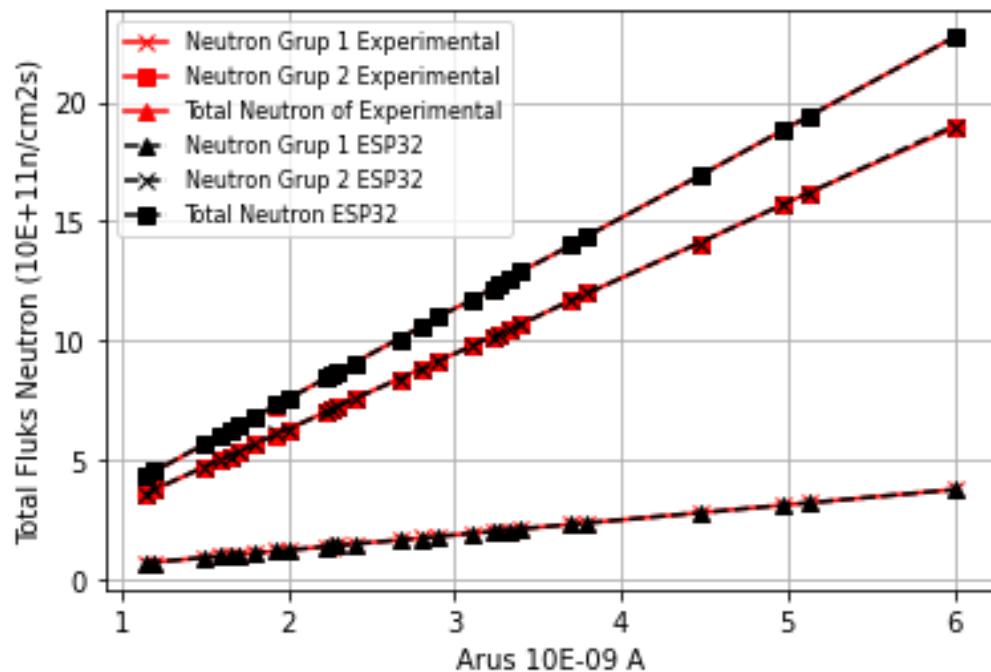
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Alat Monitoring Fluks Neutron Dengan ESP 32

No	Current ($\times 10^{-9}$ A)	\emptyset Hasil Konversi ($\times 10^{+11}$ n/cm ² s)			\emptyset Pembacaan ESP32 ($\times 10^{+11}$ n /cm ² s)		
		\emptyset grup 1	\emptyset grup 2	\emptyset total	\emptyset grup 1	\emptyset grup 2	\emptyset total
1	1,15	0,73	3,63	4,36	0,72	3,62	4,34
2	1,20	0,76	3,79	4,55	7,59	3,79	4,55
3	1,50	0,95	4,73	5,68	0,95	4,75	5,70
4	1,60	1,01	5,05	6,06	1,01	5,05	6,04
5	1,65	1,04	5,21	6,25	1,04	5,21	6,26
6	1,70	1,07	5,37	6,44	1,08	5,38	6,46
7	1,80	1,14	5,68	6,82	1,13	5,67	6,81
8	1,93	1,22	6,09	7,31	1,22	6,11	7,33
9	2,00	1,26	6,31	7,58	1,26	6,31	7,57
10	2,23	1,41	7,04	8,45	1,41	7,03	8,44
11	2,27	1,43	7,17	8,60	1,44	7,18	8,61
12	2,30	1,45	7,26	8,71	1,45	7,26	8,71
13	2,40	1,52	7,58	9,09	1,52	7,58	9,10
14	2,67	1,69	8,43	10,10	1,68	8,42	10,10
15	2,80	1,77	8,84	10,60	1,76	8,82	10,60
16	2,90	1,83	9,15	11,00	1,83	9,14	11,00
17	3,10	1,96	9,79	11,70	1,96	9,78	11,70
18	3,23	2,04	10,20	12,20	2,04	10,20	12,20
19	3,27	2,06	10,30	12,40	2,07	10,30	12,40
20	3,33	2,10	10,50	12,60	2,10	10,50	12,60
21	3,40	2,15	10,70	12,90	2,15	10,70	12,90
22	3,70	2,34	11,70	14,00	2,34	11,70	14,00
23	3,80	2,40	12,00	14,40	2,40	12,00	14,40



No	Current ($\times 10^{-9}$ A)	\emptyset Hasil Konversi ($\times 10^{11}$ n/cm 2 s)			\emptyset Pembacaan ESP32 ($\times 10^{11}$ n /cm 2 s)		
		\emptyset grup 1	\emptyset grup 2	\emptyset total	\emptyset grup 1	\emptyset grup 2	\emptyset total
24	4,47	2,82	14,10	16,90	2,82	14,10	16,90
25	4,97	3,14	15,70	18,80	3,14	15,70	18,80
26	5,13	3,24	16,20	19,40	3,24	16,20	19,40
27	6,00	3,79	18,90	22,70	3,79	19,00	22,70

Secara hasil, nilai yang didapat antara fluks neutron hasil konversi manual dengan hasil pembacaan langsung dari ESP32 tidak didapati perbedaan yang signifikan. Hasil data tersebut kemudian dibuat ke dalam grafik dan didapat hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4. 22 Grafik Fluks Neutron Secara Konversi dan Pembacaan Langsung

Tren garis yang didapat dari korelasi arus dan fluks neutron adalah linier. Alat tersebut terbukti dapat mengubah secara langsung besaran arus listrik dari SPND menjadi nilai fluks neutron serta pencatatan data akan tersimpan ke dalam file excel dengan interval pencatatan per 1 detik. Berdasarkan data pada Tabel 4.8 hasil analisa pada uji-T berpasangan didapat *p-value* untuk neutron grup 1, grup 2, dan total berturut-turut 0,3665; 0,7057; dan 0,3180. *P-value* $> 0,05$ memiliki arti 95% tingkat kepercayaan pada data [37].



BAB V

KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian untuk mendapatkan distribusi fluks neutron yang berada di dalam teras reaktor Kartini. Penelitian dilakukan secara eksperimental dan perhitungan dengan simulasi MCNPX. Perhitungan dengan MCNPX dilakukan untuk memprediksi pemetaan distribusi fluks neutron yang ada di teras reaktor Kartini dengan konfigurasi bahan bakar dan *burn-up* saat ini.

Bentuk profil distribusi fluks neutron yang didapat secara aksial dan radial secara eksperimen dan perhitungan sudah sesuai dengan karakteristik reaktor TRIGA MARK II 250 kW. Distribusi fluks neutron pengukuran dengan SPND secara aksial maupun radial untuk grup 1 berada pada level 20 dari panjang aktif bahan bakar dari lokasi CT hingga H16 dengan rentang nilai fluks neutron dari $1,13466 \times 10^{+10}$ hingga $3,78221 \times 10^{+11}$ n/cm²s dan untuk distribusi fluks fluks neutron grup 2 dengan rentang lokasi dan level yang sama berada pada range $5,67332 \times 10^{+11}$ hingga $1,89111 \times 10^{+12}$ n/cm²s. Hasil perhitungan PPF radial dengan data simulasi MCNPX di teras reaktor Kartini sebesar 1,5176, hasil masih dibawah BKO PPF dari reaktor Kartini. Peta distribusi fluks neutron yang didapatkan dari penelitian ini dapat digunakan untuk analisa keselamatan thermohidrolik yang salah satunya dengan menggunakan program RELAP.

Hasil uji-T berpasangan pada data *monitoring* fluks neutron dan pengukuran SPND didapat p-value untuk neutron grup 1, grup 2, dan total berturut-turut 0,3665; 0,7057; dan 0,3180. P-value > 0,05 memiliki arti 95% tingkat kepercayaan pada data.

Saran:

Perlu dilakukan pengujian alat monitoring fluks neutron secara langsung dengan SPND. Pada penelitian ini tidak dilakukan langsung pengujian dengan SPND karena saat alat monitoring fluks neutron berhasil dibuat ternyata detektor SPND yang digunakan rusak dan tidak ada detektor pengganti sejenis yang siap pakai. Perbaikan di bagian detektor tidak dapat dilakukan karena detektor memancarkan radiasi dengan paparan radiasi yang cukup tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Rohman B, “Kajian Pengaruh Kerapatan Moderator Terhadap Reaktivitas Reaktor Kartini,” PPI-PDIPTN, Jun. 2009, pp. 1–4.
- [2] BATAN, “Laporan Analisis Keselamatan,” Yogyakarta, Nov. 2019.
- [3] S. Syarip and S. Sutanto, “Pengenalan Sistem Pembangkit Daya Konvensional dan PLTN Neutron Collimator Design of the DECY-13 Cyclotron for SAMOP View project Technical Meeting View project,” 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/360641732>
- [4] A. R. Yavar, H. Khalafi, Y. Kasesaz, S. Sarmani, R. Yahaya, A.K. Wood, K.S. Khoo, “Verification of MCNP Simulation of Neutron Flux Parameters at TRIGA MK II Reactor of Malaysia,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 70, no. 10, pp. 2488–2493, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.apradiso.2012.06.015.
- [5] D. Chiesa, Massimiliano Clemenza, Massimiliano Nastasi, Stefano Pozzi, Ezio Previtali, Giuseppe Scionti, Monica Sisti, Michele Prata, Andrea Salvini, Antonio Cammi, “Measurement and simulation of the neutron flux distribution in the TRIGA Mark II reactor core,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 85, pp. 925–936, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.anucene.2015.07.011.
- [6] M. H. B. Rabir, Abi Muttaqin B. Jalal Bayar, Na’im Syauqi B. Hamzah, Muhammad Khairul Ariff B. Mustafa, Julia Bt. Abdul Karim, Muhammad Rawi B. Mohamed Zin, Yahya B. Ismail, Mohd Huzair B. Hussain, Mat Zin B. Mat Husin, Roslan B. Md Dan, Ahmad Razali B. Ismail, Nurfazila Bt. Husain, Zareen Khan B. Abdul Jalil Khan, Shaiful Rizaide B. Mohd Yakin, Mohamad Fauzi B. Saad, Zarina Bt. Masood., “Measurement and Simulation of Thermal Neutron Flux Distribution in The RTP core,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2018, p. 298. doi: 10.1088/1757-899X/298/1/012029.
- [7] B. Rohman, “Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar Reaktor Kartini,” Jakarta, 2009.
- [8] A. R. Antariksawan, P. I. Wahyono, and Taxwim, “Steady state and LOCA analysis of Kartini reactor using RELAP5/SCDAP code: The role of passive system,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Mar. 2018. doi: 10.1088/1742-6596/962/1/012048.
- [9] S. Mubarika, M. Munir, and K. Sofjan Firdausi, “Analisis dan Penentuan Distribusi Fluks Neutron Thermal Arah Aksial dan Radial Teras Reaktor Kartini dengan Detektor Swadaya,” *J. Sains Mat.*, vol. 14, no. ISSN 0854-0675, pp. 155–159, Oct. 2006.
- [10] L. Snoj, A. Trkov, R. Jaćimović, P. Rogan, G. Žerovnik, and M. Ravnik, “Analysis of neutron flux distribution for the validation of computational methods for the optimization of research reactor utilization,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 69, no. 1, pp. 136–141, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.apradiso.2010.08.019.
- [11] A. R. Yavar, S. B. Sarmani, A. K. Wood, S. M. Fadzil, M. H. Radir, and K. S. Khoo, “Determination of fast neutron flux distribution in irradiation sites of the Malaysian Nuclear Agency research reactor,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 69, no. 5, pp. 762–767, May 2011, doi: 10.1016/j.apradiso.2011.01.005.
- [12] F. Molina, P. Aguilera, J. Romero-Barrientos, H. F. Arellano, J. Agramunt, J. Medel,



- J. R. Morales, M. Zambraa., “Energy distribution of the neutron flux measurements at the Chilean Reactor RECH-1 using multi-foil neutron activation and the Expectation Maximization unfolding algorithm,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 129, pp. 28–34, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apradiso.2017.08.001.
- [13] R. Adeli, Y. Kasesaz, S. P. Shirmardi, and A. Ezaty, “Thermal and epithermal neutron flux distributions measurement in thermal column of TRR using an experimental-simulation method,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 133, pp. 100–104, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.apradiso.2017.12.021.
- [14] Widarto, “Analisis dan Penentuan Distribusi Fluks Neutron Saluran Tembus Radial Untuk Pendayagunaan Reaktor Kartini,” *Ganendra*, vol. 1, pp. 1–7, 2002, Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: <https://jurnal.batan.go.id/index.php/ganendra/article/view/211>
- [15] A. M. El-Badry and A. S. Hassan, “Sensitivity Of Developed Self-Powered Neutron Detector,” 2000.
- [16] K. Mueck and F. Bensch, “Cadmium Correction Factors of Several Thermal Neutron Foil Detectors,” Fxreamon Press, 1973.
- [17] T. Sutondo, B. Tenaga, N. Nasional, and S. Syarip, “Prosiding Seminar PENGEMBANGAN SOFTWARE CPEM SEBAGAI SARANA PENDIDIKAN EKSPERIMENTAL FISIKA REAKTOR PADA REAKTOR KARTINI Neutronic design of the SAMOP system View project,” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/235696691>
- [18] L. Vermeeren, W. Leysen, L. Pichon, V. Salou, and G. Helleux, “THERMOCOAX rhodium SPND sensitivity dispersion and validation of the sensitivity calculation model,” *EPJ Web Conf.*, vol. 225, p. 04015, 2020, doi: 10.1051/epjconf/202022504015.
- [19] Syarip, *Pengenalan Kinetika dan Pengendalian Reaktor Nuklir*, 2nd ed. Yogyakarta: Pustaka Pelajar, 2019.
- [20] M. Angelone, A. Klix, M. Pillon, P. Batistoni, U. Fischer, and A. Santagata, “Development of self-powered neutron detectors for neutron flux monitoring in HCLL and HCPB ITER-TBM,” *Fusion Eng. Des.*, vol. 89, no. 9–10, pp. 2194–2198, 2014, doi: 10.1016/j.fusengdes.2014.01.077.
- [21] J.-S. S. and S.-Y. P. Bon-Seung Koo, Kyung-Hoon Lee, “Nuclear Characteristics of SPNDs and Preliminary Calculation of Hybrid Fixed Incore Detector with Monte Carlo Code,” pp. 24–25, 2013.
- [22] K. Cha, K. Noh, and S. Moon, “Lifetime Evaluation of Rhodium Self-Powered Neutron Detector (SPND) at the Peripheral Area of the Core,” pp. 30–31, 2014.
- [23] Y. Sang, Bangjie Deng, Qingmin Zhang, Ruizhi Shao, Bin Sun, Liangzhi Cao, Yunzhao Li, “Development and verification of a simulation toolkit for Self-Powered Neutron Detector,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 150, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.anucene.2020.107784.
- [24] Wanno Lee, Kwanghyun Kim, Choi Yuseon, “A study on the sensitivity of self-powered neutron detector (SPND),” no. June 2016, pp. 772–776, 2003, doi: 10.1109/nssmic.1999.845782.
- [25] JAEA, “No Title.” [Online]. Available: https://wwwnndc.jaea.go.jp/jendl/j5/fig1/n_079-Au-197_f1.jpg
- [26] E. J. Maunders, “Effective cadmium cut-off energies in cycindrical geometry for fissile and 1 V detectors,” *J. Nucl. Energy. Parts A/B. React. Sci. Technol.*, vol. 19,



- no. 12, pp. 959–969, 1965, doi: 10.1016/0368-3230(65)90073-X.
- [27] S. Pom, F. Hardeman, P. Robouch, N. Etxebarria, G. Arana, and S. Pomme, “Neutron Activation Analysis With Ko-Standardisation : General Formalism And Procedure,” 1997.
- [28] H. Zhang, B. Zhong, L. Xu, H. Shen, and J. Li, “Next Event Estimation For Neutron Transport Monte Carlo Simulations In Moving Objects,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 201, no. 2, p. 110407, 2024, doi: 10.1016/j.anucene.2024.110407.
- [29] J. K. Shultzis and R. E. Faw, “An MCNP Primer,” *Structure*, vol. 66506, no. c, pp. 0–45, 2006, [Online]. Available: <http://www.mne.ksu.edu/~jks/MCNPPrmr.pdf>
- [30] A. Imran and M. Rasul, “Pengembangan Tempat Sampah Pintar Menggunakan Esp32,” *J. Media Elektr.*, vol. 17, no. 2, pp. 2721–9100, 2020, [Online]. Available: <https://ojs.unm.ac.id/mediaelektrik/article/view/14193>
- [31] M. Tabata, C.Ratanaporncharoen, N.Ishihara, K. Masu, Mana Sriyudthsak, Y. Kitasako, M. Ikeda, J. Tagami, Y. Miyahara, “Surface analysis of dental caries using a wireless pH sensor and Raman spectroscopy for chairside diagnosis,” *Talanta*, vol. 235, no. June, p. 122718, 2021, doi: 10.1016/j.talanta.2021.122718.
- [32] K. Instruments, *Instruction Manual Model 610C, 610CR Solid-State Electrometers*. U.S.A, 2001.
- [33] K. Instruments, *Instruction Manual Model 261 Picoampere Source*. Ohio, 1974.
- [34] N. A. A. Elsheikh, “Monte Carlo modelling of a neutron-induced gamma-ray sensor for landmine or explosive detection,” *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 403–407, 2018, doi: 10.1016/j.jrras.2018.08.004.
- [35] T. Van Hung, Y. Sakamoto, and H. Yasuda, “MM Calculation Of Neutron Flux Characteristics Of Dalat Reactor Using MCNP4a Code,” Japan, Sep. 1998. Accessed: Nov. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/305104>
- [36] P. Bhadane and A. Lal, “Beginners Approach to the Open Source Programming Case Study Arduino with ESP32,” *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 10, pp. 445–448, 2018, doi: 10.26438/ijcse/v6i10.445448.
- [37] S. Nakamura, M. Takemori, T. Nakaichi, Y. Shuto, T. Kashihara, K. Iijima, T. Chiba, H. Nakayama, Y. Urano, S. Nishina, Y. Kobayashi, H. Kishida, S. Imamichi, K. Takahashi, M. Masutani, H. Okamoto, T. Nishio, J. Itami, H. Igaki, “A method for delivering the required neutron fluence in an accelerator-based boron neutron capture therapy system employing a lithium target,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-62060-9.



LAMPIRAN

Lampiran 1

Proses memasukkan sampel emas ke dalam teras reaktor sesuai dengan lokasi yang telah ditentukan dengan bantuan kamera *underwater*.



Lampiran 2

Penempatan detektor SPND ke teras reaktor Kartini, dimana detektor berada di dalam pipa pengarah beserta selongsongnya di bagian ujung.



Lampiran 3

Pengukuran tegangan keluaran dari *electrometer Keithley 610C*



Lampiran 4

List program pengolahan data hasil MCNPX menggunakan Matlab

```
% Data Neutron epitermal
```

```
x = [0.053, -2.1725, -4.0406, -2.0626, 2.0032, 4.0911, 2.223, -0.0847, -3.9307, -7.0076, -8.1064, -7.0076, -4.1505, -0.0847, 3.8713, 6.9481, 7.9371, 6.9481, 4.0911, -1.8429, -5.9087, 8.9855, -11.1833, -11.8426, -11.2932, -9.3152, -6.1285, -2.3923, 1.7834, 5.7394, 9.036, 11.1239, 11.8931, 11.3436, 9.1459, 6.069, 2.3329, 0.1351, -4.1505, -7.9966, -11.2932, -13.7107, -15.2491, -15.7986, -15.359, -13.7107, -11.1833, -7.8867, -4.0406, 0.0252, 4.2009, 7.9371, 11.3436, 13.7612, 15.2996, 15.9589, 15.2996, 13.6513, 11.3436, 7.9371, 4.0911, -2.1725, -6.1285, -9.9745, -13.381, -16.1282, -18.4539, -19.4248, -20.0842, -19.5347, -18.1062, -15.9085, -13.1613, -9.9745, -6.1285, -2.0626, 2.0032, 5.8493, 9.9151, 13.3216, 15.9589, 18.0468, 19.2555, 19.9148, 19.3654, 18.2665, 16.1787, 13.2117, 10.025, 6.069, 2.0032];
```

```
y = [0.0381, -3.6195, 0.0298, 3.3662, 3.679, 0.134, -3.411, -7.8944, -6.7475, -3.9323, 0.134, 3.9918, 7.2241, 7.9539, 7.1198, 3.9918, 0.134, -3.9323, -6.8517, -11.6479, -10.2925, -7.5816, -4.2451, -0.1788, 3.8876, 7.5369, 10.352, 11.811, 11.7075, 10.5605, 8.1624, 4.4089, 0.3426, -3.7238, -7.3731, -10.084, -11.7522, -15.8185, -15.2972, -13.7332, -11.2309, -7.8944, -4.0366, 0.0298, 4.2004, 7.9539, 11.3947, 13.6885, 15.5653, 15.9823, 15.3567, 13.897, 11.3947, 8.1624, 4.2004, 0.134, -4.1408, -8.1029, -11.1266, -13.9418, -15.193, -19.8849, -18.5422, -17.3825, -14.6716, -11.5437, -7.9987, -4.0366, 0.134, 3.8876, 8.0582, 11.7075, 14.9397, 17.2335, 19.2146, 19.8401, 19.9444, 19.2146, 17.3378, 14.9397, 11.916, 8.1624, 4.3046, -0.0745, -3.828, -8.1029, -11.5437, -14.6716, -17.0697, -18.6337, -19.6764];
```

```
z = [1.38E+12, 2.03E+12, 1.93E+12, 1.83E+12, 1.85E+12, 1.99E+12, 1.98E+12, 1.89E+12, 1.85E+12, 1.84E+12, 1.74E+12, 1.16E+12, 1.15E+12, 1.74E+12, 1.71E+12, 1.14E+12, 1.76E+12, 1.89E+12, 1.97E+12, 1.61E+12, 1.62E+12, 1.60E+12, 1.59E+12, 1.51E+12, 1.45E+12, 1.46E+12, 1.46E+12, 1.48E+12, 1.48E+12, 1.47E+12, 9.98E+11, 1.54E+12, 1.58E+12, 1.60E+12, 1.65E+12, 1.61E+12, 1.54E+12, 8.15E+11, 1.28E+12, 1.29E+12, 1.32E+12, 1.26E+12, 1.16E+12, 1.07E+12, 1.09E+12, 1.16E+12, 1.13E+12, 1.17E+12, 1.08E+12, 1.09E+12, 1.10E+12, 1.18E+12, 1.19E+12, 1.20E+12, 1.23E+12, 1.20E+12, 1.24E+12, 1.27E+12, 1.21E+12, 1.21E+12, 1.21E+12, 8.90E+11, 9.16E+11,
```



```

9.61E+11, 6.47E+11, 8.53E+11, 5.69E+11, 5.47E+11, 5.03E+11, 5.00E+11, 7.30E+11,
7.22E+11, 5.36E+11, 8.02E+11, 5.24E+11, 5.43E+11, 5.37E+11, 5.43E+11, 8.15E+11,
5.72E+11, 8.30E+11, 9.08E+11, 6.20E+11, 8.96E+11, 6.39E+11, 8.54E+11, 6.08E+11,
5.89E+11, 6.02E+11, 9.01E+11, 9.01E+11];

% Plot scatter dengan warna berdasarkan nilai z
scatter(x, y, 50, z, 'filled'); % Ukuran titik adalah 50

hold on; % Tetapkan agar plot selanjutnya diplot di atas plot sebelumnya

% Tentukan grid yang sesuai dengan data x dan y
x_unique = linspace(min(x), max(x), 2000); % Tingkatkan resolusi grid
y_unique = linspace(min(y), max(y), 2000); % Tingkatkan resolusi grid
[X, Y] = meshgrid(x_unique, y_unique);

% Ubah z menjadi matriks sesuai dengan grid X dan Y menggunakan interpolasi cubic
Z = griddata(x, y, z, X, Y, 'cubic'); % Gunakan interpolasi cubic untuk kontur yang lebih
smooth

% Buat contour plot dari data Z dengan grid yang sesuai
contourf(X, Y, Z, 'LineColor', 'none');

% Hubungkan titik-titik koordinat
plot(x, y, 'k.'); % 'k.' mengatur garis hitam putus-putus

hold off; % Selesaikan pengaturan plot

% Atur properti plot
colorbar; % Tampilkan colorbar untuk skala warna
colormap('jet'); % Atur skala warna menjadi jet

```



```
% Tentukan skala warna yang lebih jelas  
caxis([min(z), max(z)]); % Sesuaikan skala warna dengan rentang z  
  
 xlabel('Sumbu X');  
 ylabel('Sumbu Y');  
  
 % Buat grafik 3D  
 figure; % Buat figure baru untuk grafik 3D  
 mesh(X, Y, Z); % Buat mesh plot 3D  
 xlabel('Sumbu X');  
 ylabel('Sumbu Y');  
 zlabel('Intensitas Neutron');  
 title('Grafik 3D Intensitas Neutron');  
 colorbar; % Tampilkan colorbar untuk skala warna  
 colormap('jet'); % Atur skala warna menjadi jet
```



Lampiran 4

Data log penyimpanan hasil alat *monitoring* fluks neutron dengan ESP32

Waktu	Fluks Total	Fluks grup 2	Fluks grup 1
1:20:32 PM	5.91E+09	4.92E+09	9.85E+08
1:20:33 PM	5.53E+09	4.61E+09	9.22E+08
1:20:34 PM	5.96E+09	4.97E+09	9.93E+08
1:20:35 PM	5.95E+09	4.96E+09	9.91E+08
1:20:36 PM	2.94E+10	2.45E+10	4.91E+09
1:20:37 PM	4.35E+11	3.62E+11	7.24E+10
1:20:38 PM	1.02E+12	8.54E+11	1.71E+11
1:20:39 PM	1.04E+12	8.68E+11	1.74E+11
1:20:40 PM	1.04E+12	8.69E+11	1.74E+11
1:20:41 PM	1.04E+12	8.68E+11	1.74E+11
1:20:42 PM	1.27E+12	1.06E+12	2.12E+11
1:20:43 PM	1.39E+12	1.16E+12	2.32E+11
1:20:44 PM	1.72E+12	1.43E+12	2.86E+11
1:20:45 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:46 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:47 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:48 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:49 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:50 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:51 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:52 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:53 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:54 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:55 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:56 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:57 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:58 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:20:59 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:00 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:01 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:02 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:03 PM	1.73E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:04 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:05 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:06 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:07 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:08 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:09 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11



1:21:10 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:11 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:12 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:13 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:14 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:15 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:16 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:17 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:18 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:19 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:20 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:21 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:22 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:23 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:24 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:25 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:26 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:27 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:28 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:29 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:30 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:31 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:32 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:33 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:34 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:35 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:36 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:37 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:38 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:39 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:40 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:41 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:42 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:43 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:44 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:45 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:46 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:47 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:48 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:49 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:50 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:51 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:52 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11



1:21:53 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:54 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:55 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:56 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:57 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:58 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:21:59 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:00 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:01 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:02 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:03 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:04 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:05 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:06 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:07 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:08 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:09 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:10 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:11 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:12 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:13 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:14 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:15 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:16 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:17 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:18 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:19 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:20 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:21 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:22 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:23 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:24 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:25 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:26 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:27 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:28 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:29 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:30 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:31 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:32 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:33 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:34 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11
1:22:35 PM	1.74E+12	1.45E+12	2.89E+11





Lampiran: Histori alur persetujuan

No	Jabatan	Nama	Jenis	Tanggal Disetujui
1	Dosen Pembimbing	Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc., IPU.	Paraf	Kamis, 18 Juli 2024 08:29
2	Ketua Program Studi Magister Teknik Fisika	Dr. Gea Oswah Fatah Parikesit, S.T., M.Sc.	Paraf	Kamis, 18 Juli 2024 08:53
3	Ketua Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika	Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc., IPU.	Tanda Tangan	Kamis, 18 Juli 2024 12:29

Diajukan oleh Riny Wasita, A.Md.

