

**PERHITUNGAN LAJU REAKSI NEUTRON DALAM REAKTOR GCFR
(*GAS COOLED FAST REACTOR*) MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*)
HEKSAGONAL BERBAHAN BAKAR URANIUM**

(Skripsi)

Oleh

**MUHAMMAD ARIF JARODI
1917041017**



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

ABSTRAK

PERHITUNGAN LAJU REAKSI NEUTRON DALAM REAKTOR GCFR (*GAS COOLED FAST REACTOR*) MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL BERBAHAN BAKAR URANIUM

Oleh

Muhammad Arif Jarodi

Telah dilakukan penelitian tentang perhitungan laju reaksi fisi dan penangkapan neutron dengan filter dan tanpa filter serta pengaruh persentase pengayaan bahan bakar terhadap laju reaksi neutron pada reaktor *Gass Cooled Fast Reactor* (GCFR) model perangkat *assembly* heksagonal berbahan bakar Uranium. Penelitian ini dilakukan dengan cara menentukan persentase pengayaan bahan bakar 8,5-9,5%, menentukan ukuran geometri dan spesifikasi yang memenuhi standar reaktor GCFR, dan menentukan laju reaksi neutron. Dari penelitian yang dilakukan didapatkan hasil pada Material 1 dan Material 3 nilai laju reaksi fisi neutron menggunakan detektor filter dan tanpa filter meningkat dengan peningkatan persentase pengayaan. Sedangkan nilai laju reaksi penangkapan neutron dengan menggunakan filter ataupun tanpa filter mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya presentase pengayaan. Pada Material 1 nilai tertinggi laju reaksi fisi dengan filter dan tanpa filter adalah $5,03036 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan $1,18015 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³.s, sedangkan nilai tertinggi laju reaksi penangkapan dengan filter dan tanpa filter adalah $11,8401 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan $2,73629 \times 10^{-3}$ reaksi/cm³.s. Pada Material 3 nilai tertinggi laju reaksi fisi dengan filter dan tanpa filter adalah $5,03131 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan $1,18013 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³.s, sedangkan nilai tertinggi laju reaksi penangkapan dengan filter dan tanpa filter adalah $11,7083 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan $2,73624 \times 10^{-3}$ reaksi/cm³.s. Nilai laju reaksi neutron dengan filter lebih kecil dibandingkan nilai laju reaksi neutron tanpa filter.

Kata kunci: laju reaksi neutron, GCFR, Uranium, SRAC

ABSTRACT

NEUTRON REACTION RATES CALCULATION IN A REACTOR GCFR (GAS COOLED FAST REACTOR) WITH HEXAGONAL (ASSEMBLY) MODEL FUELED BY URANIUM

By

Muhammad Arif Jarodi

It has been done research on the calculation of fission reaction rates and neutron capture, both with and without filters, as well as the influence of fuel enrichment percentage on neutron reaction rates in a Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) using a hexagonal assembly model with Uranium fuel. This research was conducted by determining fuel enrichment percentage between (8.5% until 9.5%), geometrical dimensions and specifications suitable with GCFR standards then calculating the neutron reaction rate. The result of this research are neutron fission reaction rate of Material 1 and Material 3 that this are increased by enrichment percentage for both with filter and without filter. Meanwhile, neutron capture reaction rates were decreased by enrichment percentage increased for both with detector with and without filter. The neutron capture reaction rate using filter or without filter were decreased with the increasing in the percentage of enrichment. In Material 1 the highest fission reaction rate with filter and without filter are 5.03036×10^{-1} reaction/cm³.s and 1.18015×10^{-2} reaction/cm³.s, while the highest capture reaction rate with filter and without filter are 11.8401×10^{-1} reaction/cm³.s and 2.73629×10^{-2} reaction/cm³.s. In Material 3 the highest fission reaction rate with filter and without filter are 5.03131×10^{-1} reaction/cm³.s and 1.18013×10^{-2} reaction/cm³.s, while capture reaction rate with filter and without filter are 11.7083×10^{-1} reaction/cm³.s and 2.73624×10^{-2} reaction/cm³.s The neutron reaction rate with a filter is smaller than neutron reaction rate of the neutron without a filter.

Keywords: neutron reaction rates, GCFR, Uranium, SRAC.

**PERHITUNGAN LAJU REAKSI NEUTRON DALAM REAKTOR GCFR
(*GAS COOLED FAST REACTOR*) MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*)
HEKSAGONAL BERBAHAN BAKAR URANIUM**

Oleh

Muhammad Arif Jarodi

Skripsi

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

Pada

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



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

Judul Laporan : **PERHITUNGAN LAJU REAKSI NEUTRON
DALAM REAKTOR GCFR (GAS COOLED
FAST REACTOR) MODEL PERANGKAT
(ASSEMBLY) HEKSAGONAL BERBAHAN
BAKAR URANIUM**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Arif Jarodi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1917041017**

Jurusan : **Fisika**

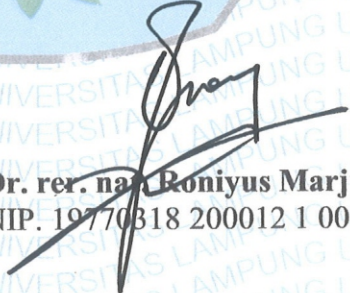
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 19751219 200012 2 003


Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si.
NIP. 19770318 200012 1 003

2. **Ketua Jurusan Fisika**


Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 19801010 200501 1 002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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



Sekretaris

: Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si



Penguji

Bukan Pembimbing: Drs. Syafriadi, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 4 September 2023

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 4 September 2023
Penulis,



Muhammad Arif Jarodi
NPM. 1917041017

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Muhammad Arif Jarodi, dilahirkan di Indraloka II, 6 Februari 2001. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Rasam. dan Ibu Suryati. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Indraloka II pada tahun 2013, SMPN 2 Way Kenanga pada tahun 2016, SMAN 1 Banjar Margo pada tahun 2019.

Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2019 melalui jalur penerimaan SNMPTN. Selama menempuh pendidikan, pernah menjadi asisten praktikum Fisika Dasar pada tahun 2022. Penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. PLN(Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan, Tarahan, Lampung Selatan, dengan judul “Analisis Kualitas Batubara Menggunakan Metode *Proximate* dan *Ultimate* di PT. PLN(Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan”. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2022 di Desa Meranti Jaya, Kec. Gunung Pelindung, Kab. Lampung Timur.

Dalam bidang organisasi penulis sebagai Wakil Ketua UKM Menwa Unila periode 2020, anggota bidang Kaderisasi HIMAFI FMIPA Unila periode 2019-2021 dan juga sebagai staff PSDM BEM FMIPA UNILA periode 2020-2021. Sebagai peserta lolos pendanaan dalam Program Mahasiswa Wirausaha 2022 Universitas Lampung. Kemudian penulis melaksanakan penelitian dengan judul “Perhitungan Laju Reaksi Neutron Dalam Reaktor GCFR (*Gass Cooled Fast Reactor*) Model Perangkat (*Assembly*) Heksagonal Berbahan Bakar URANIUM” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain).”

(QS. Al-Insyirah: 6-7)

“Tumbuh Seribu Tanpa Harus Mati Satu”

-Muhammad Arif Jarodi

“Hidup bukan saling mendahului, bermimpilah sendiri-sendiri”

-Baskara Hindia

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar”

(Q.S Ar-Ruum:60)

PERSEMBAHAN

Tiada lembar yang paling indah dalam laporan skripsi ini kecuali lembar persembahan.

**Alhamdulillahirobbil 'Alamiin
Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala,
karya ini dipersembahkan kepada:**

Kedua Orang tuaku

Bapak Rasam & Ibu Suryati

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

Keluarga Besar & Teman-teman

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

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ **Perhitungan Laju Reaksi Neutron Dalam Reaktor GCFR (*Gas Cooled Fast Reactor*) Model Perangkat (*Assembly*) Heksagonal Berbahan Bakar Uranium**” yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains (S.Si.). Pada skripsi ini dilakukan sebuah penelitian untuk mengetahui hasil perhitungan laju reaksi neutron berdasarkan pengayaan bahan bakar, menggunakan detektor tanpa filter dengan dengan filter.

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

Bandar Lampung, 4 September 2023

Muhammad Arif Jarodi

SANWACANA

Puji syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah memberi nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang turut membantu. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga, materi maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terima kasih kepada:

1. Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai pembimbing utama yang tulus mengajari dan membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
2. Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus., M.Si. sebagai pembimbing kedua yang senantiasa membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
3. Drs. Syafriadi, M.Si. sebagai dosen penguji yang telah memberikan masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Iqbal Firdaus., S.Si, M.Si. sebagai pembimbing akademik yang telah membantu dalam segala proses akademik.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S. Si., M. T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M. Si. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Kedua orangtuaku, Bapak Rasam dan Ibu Suryati, serta kakakku Asih Rahmawati yang telah mendo'akan serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

8. Seluruh keluarga besar Kakek saya Bpk. Alm. Kartajak dan keluarga besar Bpk. Slamet Jani yang sangat saya sayangi sampai kapanpun yang selalu mendoakan dalam menyelesaikan kuliah di Jurusan Fisika Universitas Lampung.
9. Kepada seseorang yang tak kalah penting kehadirannya, Irma Destiana, S.Mat. Terimakasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup saya atas kontribusi, dukungan, semangat, serta telah menjadi tempat berkeluh kesah, selalu ada dalam suka maupun duka selama proses penyusunan skripsi ini.
10. Ahmat Tasbihul, Dheovanka Lambutti, Putra Riski Utama, M Gilang Ramadhan, Rapli Sopian S, Naufal Zaidan dan Anwar Sholihin selaku sahabat sekaligus partner diskusi dan mengerjakan skripsi sekaligus membantu dan mendoakan dalam menyelesaikan kuliah di Jurusan Fisika Universitas Lampung
11. Partner Menwa angkatan 36, keluarga besar BEM FMIPA 2019-2020, dan keluarga besar HIMAFI, Bocah Ngontrak yang selalu ada di setiap keadaan.
12. Partner seperbimbingan skripsi yay Munir, atu Ria, Mega dan Tri yang telah membantu dan memberi support dalam pengerjaan tugas akhir.
13. Partner PKL Tarahan Arian, Icha dan Laela.

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

Bandar Lampung, 4 September 2023

Muhammad Arif Jarodi

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Reaktor Nuklir	7
2.2 Komponen Reaktor Nuklir	10
2.3 Bahan Bakar Reaktor Nuklir	16

2.3.1 Uranium.....	16
2.3.2 Plutonium	17
2.3.3 Thorium.....	17
2.4 Jenis-Jenis Reaktor Nuklir.....	18
2.5 <i>Gas Cooled Fast Reactor</i> (GCFR)	19
2.6 Laju Reaksi Neutron.....	21
2.7 Faktor Multiplikasi	26
2.8 Program <i>System Reactor Atomic Code</i> (SRAC).....	27
III. METODE PENELITIAN.....	31
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	31
3.2 Alat dan Bahan	31
3.3 Prosedur Penelitian	31
3.4 Diagram Alir.....	35
IV. HASIL PENELITIAN	36
4.1 Laju Reaksi Fisi Neutron Dan Laju Reaksi Penangkapan Neutron Dalam Reaktor GCFR Dengan Bahan Bakar Uranium Dengan Model Assembly Heksagonal.....	36
4.1.1 Spesifikasi Reaktor GCFR	37
4.1.2 Penentuan Desain Reaktor GCFR dengan Model Assembly Heksagonal.....	37
4.1.3 Penentuan Densitas Atom dan Pengayaan Bahan Bakar	41
4.1.4 Perhitungan Laju Reaksi Neutron	44
4.2 Perbandingan Laju Reaksi Fisi Neutron Dan Laju Reaksi Penangkapan Neutron Menggunakan Detektor Dengan Filter Dan Detektor Tanpa Filter Berdasarkan Pengaruh Pengayaannya.....	52
4.2.1 Perbandingan Reaksi Neutron berdasarkan Pengukuran Menggunakan Filter Dan Tanpa Menggunakan Filter	52
4.2.2 Perbandingan Laju Reaksi Neutron berdasarkan Pengayaan Bahan Bakar	58
V. KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN.....	70

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema Reaksi Fisi Berantai	8
Gambar 2.2 Tangki Reaktor	11
Gambar 2.3 Teras Reaktor	12
Gambar 2.4 Batang Bahan Bakar	12
Gambar 2.5 Batang Kendali Reaktor.....	15
Gambar 2.6 Skema Reaktor <i>Gas Cooled Fast Reactor</i>	20
Gambar 2.7 Struktur Sistem SRAC.....	29
Gambar 3.1 Geometri untuk PIJ dengan model <i>assembly</i> heksagonal (IGT =12)	33
Gambar 3.2 Diagram Alir	35
Gambar 4.1 Desain Reaktor GCFR model <i>assembly</i> heksagonal	38
Gambar 4.2 Posisi Pin Bahan Bakar dalam <i>Assembly</i>	39
Gambar 4.3 Radius Sel bahan bakar ukuran kecil atau Material 1.....	40
Gambar 4.4 Radius Sel bahan bakar ukuran kecil atau Material 3.....	40
Gambar 4.5 Pembagian Mesh Pin Ukuran Besar	46
Gambar 4.6 Pembagian Mesh Pin Ukuran Kecil.....	46
Gambar 4.7 Grafik Laju Reaksi Fisi Material 1 pengayaan 8,5%	53

Gambar 4.8 Grafik Laju Reaksi Fisi Material 3 pengayaan 8,5%	53
Gambar 4.9 Grafik Laju Reaksi Penangkapan Material 1 pengayaan 8,5%	54
Gambar 4.10 Grafik Laju Reaksi Penangkapan Material 3 pengayaan 8,5%	54
Gambar 4.11 Grafik Laju Reaksi Fisi Material 1 pengayaan 9,5%	55
Gambar 4.12 Grafik Laju Reaksi Fisi Material 3 pengayaan 9,5%	56
Gambar 4.13 Grafik Laju Reaksi Penangkapan Material 1 pengayaan 9,5%	57
Gambar 4.14 Grafik Laju Reaksi Penangkapan Material 3 pengayaan 9,5%	57
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Laju Reaksi Fisi dengan Filter pada mesh ke-3.....	59
Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Laju Reaksi Penangkapan dengan Filter pada mesh ke-3.3	59
Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Laju pada Reaksi Fisi tanpa Filter mesh ke-3.....	61
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Laju Reaksi Peanangkapan tanpa Filter pada mesh ke-36	61

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai Konduktifitas Gas.....	14
Tabel 4.1 Spesifikasi Reaktor.....	37
Tabel 4.2 Fraksi volume dari material yang digunakan.	41
Tabel 4.3 Densitas atom pada pengayaan bahan bakar.	42
Tabel 4.4 Densitas Atom <i>Cladding</i> dan Pendingin.	42
Tabel 4.5 Karakteristik Material Reaktor.....	43
Tabel 4.6 Nilai laju reaksi fisi dan penangkapan pada Material 1 dan Material 3 tanpa filter.	48
Tabel 4.7 Nilai laju reaksi fisi dan penangkapan pada Material 1 dan Material 3 Dengan filter.	50

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi kini semakin menjadi kebutuhan dasar manusia yang terus semakin tinggi sesuai dengan meningkatnya kehidupan. Energi yang paling umum digunakan adalah Bahan Bakar Minyak. Bahan Bakar Minyak (BBM) memegang posisi yang sangat dominan dalam pemenuhan kebutuhan energi dan tenaga nasional.

Komposisi konsumsi energi nasional ketika ini merupakan BBM: 52,50%; Gas: 19,04%; Batubara: 21,52%; Air: 3,73%; Panas Bumi: 3,01%; & Energi Baru: 0,2%. Kondisi demikian terjadi sebagai dampak berdasarkan kebijakan subsidi kemudian terhadap bahan bakar minyak dalam upaya memacu akselerasi pertumbuhan ekonomi. Suatu fenomena yang tidak dapat dipungkiri bahwa produksi minyak bumi Indonesia mengalami penurunan. Dampak adanya penurunan secara alamiah dan semakin menipisnya cadangan (Kholiq, 2015).

Indonesia merupakan salah satu negara dengan pertumbuhan penduduk yang cukup tinggi, Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), jumlah penduduk Indonesia diproyeksikan sebanyak 275,77 juta jiwa pada 2022 (Badan Pusat Statistik, 2022). Hal ini berdampak pada kebutuhan energi yang terus meningkat serta belum meratanya pemenuhan kebutuhan energi terkhusus energi listrik.

Kebutuhan listrik Indonesia masih belum mencukupi, Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (2021) menyatakan total rencana pembangunan pembangkit tenaga listrik sebesar 40.575 MegaWatt. Pembangkit tenaga listrik yang bersumber dari energi baru dan terbarukan sebesar 20.923 MegaWatt atau setara dengan 51,6% dari total pembangkit tenaga listrik. Pembangkit tenaga

listrik yang bersumber dari energi fosil sebesar 19.652 MegaWatt atau setara dengan 48,4% dari total pembangkit tenaga listrik. Kondisi ini menunjukkan bahwa listrik yang dipasok oleh negara masih belum mencukupi kebutuhan listrik masyarakat. Energi fosil sebagai andalan utama energi Indonesia hingga saat ini ketersediaannya menyusut dari hari ke hari, sementara laju permintaan selalu meningkat. Untuk itu berbagai alternatif diupayakan untuk menghadapi kelangkaan energi di masa depan.

Energi alternatif merupakan harapan bagi sebagian masyarakat untuk memenuhi kebutuhan energi, khususnya listrik. Beberapa jenis energi alternatif yang dapat dikembangkan dengan kapasitas, biaya dan keandalan teknis tertentu, seperti *biofuel*, surya, angin, gelombang laut, arus laut, pasang surut, dan lainnya mempunyai keunggulan dan kelemahan dalam memenuhi persyaratan kualitas layanan pada setiap jenis yang berbeda. Pada kenyataannya tidak semua energi alternatif dapat memenuhi permintaan listrik dengan intensitas tinggi pada sektor tertentu yang menuntut derajat mutu dan pasokan yang terjamin. Meskipun energi alternatif bersifat terbarukan, umumnya kemampuan layanannya begitu terbatas dalam skala kapasitas, waktu, aspek lingkungan, kontinuitas, dan kebutuhan akuisisi lahan yang signifikan, sehingga menyebabkan keluhan pada sisi tertentu. Biaya yang dibutuhkan untuk mendapatkan satuan energi alternatif umumnya lebih tinggi hingga berkali lipat. Energi alternatif juga mendapat hambatan untuk bersaing secara ekonomis dengan sumber energi konvensional air, panas bumi, fosil dan nuklir yang sudah terbukti daya saing ekonomi, kualitas layanan dan skala kapasitas yang dapat ditawarkannya (Liun, 2011). Maka perlu penyediaan berbagai alternatif sumber energi seperti energi terbarukan dan nuklir yang mengurangi ketergantungan pada minyak bumi dan fosil (Liun, E and Sunardi, 2014).

Saat ini telah dikembangkan berbagai sumber energi alternatif, salah satunya adalah energi nuklir. Jumlah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di dunia sudah mencapai 441 buah dan diperkirakan akan ada tambahan 126 PLTN, Sampai saat ini sekitar 66 unit PLTN sedang dibangun di berbagai negara, antara

lain Tiongkok 28 unit, Rusia 11 unit, India 7 unit, Uni Emirat Arab 4 unit, Korea Selatan 4 unit, Pakistan dan Taiwan masing-masing 2 unit pada tahun 2022 (BATAN, 2022). Energi nuklir sudah dipastikan akan menjadi salah satu sumber energi alternatif yang akan digunakan di Indonesia. Peran energi nuklir akan sangat penting bersama sumber energi baru dan terbarukan lainnya dalam menjamin pasokan dan keamanan energi listrik di Indonesia. Diperkirakan, kontribusi energi nuklir akan mencapai sekitar 4000 MW pada tahun 2025. Pengembangan energi nuklir didasarkan pada PP nomor 43 Tahun 2006 serta UU nomor 17 Tahun 2007 tentang Pembangunan Jangka Panjang tahun 2005-2025 (ESDM, 2012). Sehingga pengembangan tersebut menyebabkan pemerintah juga berupaya untuk memaksimalkan peran nuklir sebagai bagian penting dalam pembangunan, yaitu dengan meningkatkan pengembangan reaktor nuklir.

Reaktor nuklir suatu alat untuk mengendalikan reaksi fisi berantai dan sekaligus menjaga keseimbangan reaksi itu. Reaktor nuklir ditetapkan menjadi alat yang memakai materi nuklir menjadi bahan bakarnya. Materi fisi yang dipakai menjadi bahan bakar contohnya Uranium, Plutonium dan lain-lain. Untuk Uranium dipakai Uranium alam atau Uranium diperkaya. Jadi secara generik reaktor nuklir merupakan berlangsungnya reaksi nuklir yang terkendali. Untuk mengendalikan operasi dan menghentikannya bahan penyerap neutron yang diklaim batang kendali (BATAN, 2012).

Bahan bakar nuklir terdiri dari bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah bahan yang sederhana dan memiliki kemungkinan retak yang tinggi. Misalnya, U^{235} , U^{233} , Pu^{239} , dan Pu^{241} . Bahan fertil adalah bahan yang dapat menjadi bahan fisil bila ditangkap oleh neutron seperti U^{238} , U^{234} , Pu^{240} , Pu^{242} , Th^{232} , dan lain lain. Bahan yang melimpah secara alami seperti U^{238} , dapat diubah menjadi bahan fisil Pu^{239} menggunakan neutron berenergi tinggi (Walter and Reynolds, 1981).

Teknologi reaktor nuklir pembangkit listrik atau PLTN telah mengalami perkembangan menuju kepada penyempurnaan. Secara historis, perkembangan

teknologi reaktor nuklir yang telah tercapai hingga rencana mendatang reaktor nuklir Generasi I, Generasi II, Generasi III, Generasi III+, Reaktor Nuklir NTD dan reaktor nuklir Generasi IV atau sering disebut Reaktor Nuklir Lanjut (Wauran, 2010).

GCFR (*Gas Cooled Fast Reactor*) merupakan salah satu kandidat reaktor daya nuklir Generasi IV yang sedang dalam tahap riset dan pengembangan, diperkirakan baru akan dikomersialkan pada tahun 2030 mendatang. GCFR menggunakan sumber Uranium alam yang lebih berkelanjutan dan dapat meminimalisir hasil limbah melalui siklus berulang saat pembakaran berlangsung. Temperatur tinggi yang dihasilkan reaktor ini selain memproduksi listrik, dapat pula memproduksi hydrogen (Widiawaty and Dede, 2023). Analisis neutronik dalam desain reaktor nuklir menggunakan persamaan difusi multigrup dengan mengasumsikan bahwa neutron memiliki grup-grup energi. Hal ini berkaitan untuk mendeskripsikan karakter dan distribusi neutron pada teras reaktor. Persamaan difusi multigrup menerapkan keseimbangan jumlah neutron yang masuk dan yang keluar dari teras reaktor (Glasstone and Edlund, 1953).

Mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Reni Martha *et. al* (2016), Analisis Laju Reaksi Neutron Dalam Sel Bahan Bakar Nuklir Pada Reaktor Cepat. Penelitian ini menggunakan metode *collision probability* (CP) dengan pendekatan *flat flux* yang melibatkan proses homogenisasi sel bahan bakar nuklir. Dari hasil homogenisasi sel dapat diperoleh distribusi fluks neutron sebagai fungsi energi grup. Selanjutnya dihitung laju reaksi fisi, serapan dan total pada setiap region sel. Laju reaksi fisi mengalami penurunan di daerah energi tinggi akibat adanya peristiwa tumbukan elastis yang menyebabkan neutron lebih mudah kehilangan energi. Laju reaksi serapan berfluktuasi pada bahan bakar, sedangkan pada kelongsong dan pendingin nilainya sangat rendah. Laju reaksi total mempunyai nilai yang tinggi pada daerah energi tinggi sedangkan pada daerah energi rendah nilainya sangat kecil.

Maka akan dilakukan penelitian dengan reaktor GCFR, metode yang digunakan perhitungan laju reaksi menggunakan SRAC, bahan bakar yang digunakan dalam penelitian dengan pengayaan bahan bakar 8,5% - 9,5% dengan rentang 0,1, dengan model perangkat (*assembly*) heksagonal.

Oleh karena itu, perlu dihitung aliran neutron. Seperti halnya fluks neutron, laju reaksi neutron juga harus diperhatikan. Laju reaksi neutron yang tidak seragam menyebabkan puncak daya reaktor (Martha *et al.*, 2016). Fluks neutron yang dihasilkan dan nilai penampang dapat digunakan untuk menghitung laju reaksi neutron dari sel bahan bakar (Okumura, 2006).

Dalam penelitian ini program yang digunakan untuk menghitung laju reaksi neutron adalah *Standart Reactor Analyses Code* (SRAC). SRAC adalah sebuah program komputasi yang digunakan menganalisis sistem reaktor berdasarkan *library data* yang sudah ada. SRAC dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) di *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) Jepang.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hasil perhitungan laju reaksi neutron reaktor GCFR dengan bahan bakar Uranium model *assembly* heksagonal pada pengayaan 8,5% sampai dengan 9,5% bahan bakar?
2. Bagaimana perbandingan nilai laju reaksi neutron menggunakan detektor tanpa filter dengan laju reaksi neutron menggunakan detektor dengan filter?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui perhitungan laju reaksi fisi neutron dan laju reaksi penangkapan neutron dalam reaktor GCFR dengan bahan bakar Uranium dengan model *assembly* heksagonal pada pengayaan 8,5% sampai dengan 9,5% bahan bakar.
2. Mengetahui perbandingan laju reaksi fisi neutron dan laju reaksi penangkapan neutron menggunakan detektor dengan filter dan detektor tanpa filter.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor GCFR.
2. Bahan bakar yang digunakan adalah Uranium Dioksida.
3. Desain model geometri sel yang digunakan yaitu model perangkat heksagonal dengan bentuk perangkat annular IGT 12.
4. Pendingin yang digunakan adalah Helium.
5. Menggunakan perangkat analisis SRAC.
6. Perhitungan laju reaksi dengan detektor filter dan tanpa filter.
7. Perhitungan laju reaksi neutron yang dilakukan yang dilakukan pada reaksi fisi neutron dan reaksi penangkapan neutron.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan informasi mengenai perkembangan ilmu pengetahuan dalam bidang reaktor nuklir.
2. Memberikan informasi ilmiah mengenai perhitungan laju reaksi neutron pada reaktor GCFR.
3. Memberikan kontribusi dalam penelitian reaktor nuklir dengan bahan bakar Uranium.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Nuklir

Reaktor dalam pengertian sederhana adalah tempat terjadinya reaksi. Dengan artian reaktor nuklir tempat berlangsungnya reaksi nuklir. Dalam perkembangannya reaktor nuklir telah banyak digunakan baik di negara maju maupun negara berkembang. Sebagian besar reaktor yang beroperasi di dunia digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Energi nuklir merupakan suatu energi yang dapat dihasilkan melalui dua mekanisme, yaitu pembelahan inti atau reaksi fisi dan penggabungan beberapa inti melalui reaksi fusi (BATAN, 2015).

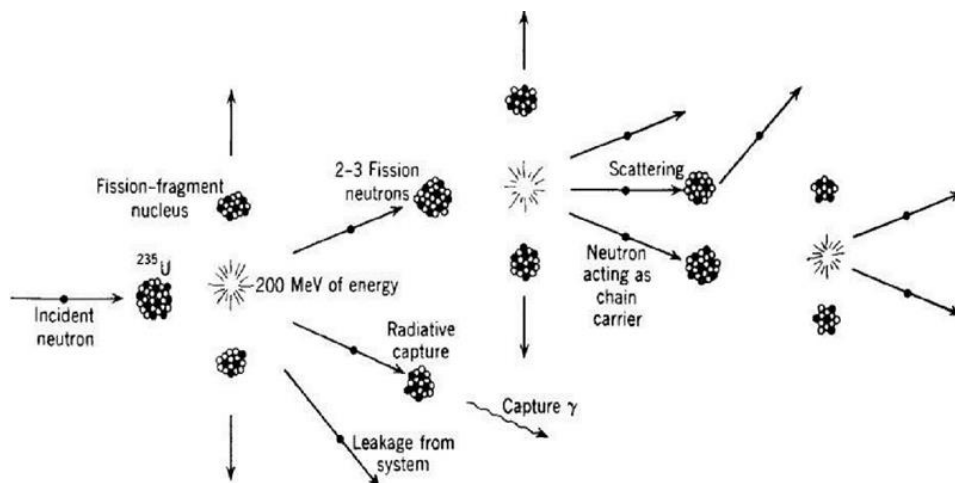
Reaktor beroperasi dan dapat berjalan pada reaksi fisi nuklir. Di dalam reaktor dibedakan dua jenis bahan yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil merupakan bahan yang terbelah ketika inti terbelah bersama neutron dengan jumlah energi tertentu dilepaskan, sedangkan bahan fertil adalah bahan yang menangkap neutron dan menjadi bahan fisil melalui peluruhan radioaktif. Bahan fisil adalah bahan yang terbelah bila terkena neutron dengan energi tertentu, sedangkan bahan fertil adalah bahan yang menangkap neutron dan mengalami peluruhan radioaktif menjadi bahan fisil. U^{235} (Uranium-235) pada dasarnya adalah bahan fisil dan U^{238} (Uranium-238) adalah bahan yang subur (Lewis, 2008).

2.1.1 Reaksi Fisi

Reaksi fisi adalah konsep dasar dari reaktor fisi, yang terjadi ketika neutron ditembakkan ke dalam inti di mana persentase tertentu dari inti mengalami fisi

(fisi). Reaksi fisi di dalam reaktor menyebabkan terjadinya perubahan jumlah neutron. Reaksi fisi ringan adalah pemecahan inti atom yang berat menjadi inti yang lebih ringan melalui tumbukan dengan neutron, menghasilkan energi sebesar 200 MeV, setara dengan $3,204 \times 10^{-11}$ Joule (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).

Reaksi fisi berantai ditunjukkan pada **Gambar 2.1** berikut.



Gambar 2.1 Skema Reaksi Fisi Berantai (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).

Neutron baru yang dihasilkan selama reaksi fisi merupakan neutron cepat. Dalam reaktor termal, neutron baru secara perlahan mengalami proses perlambatan, mengubahnya menjadi neutron termal. Neutron termal ini berdifusi ke dalam media bahan bakar sebelum kemungkinan bereaksi dengan inti lain yang juga menghasilkan neutron. Peristiwa semacam itu berulang-ulang dan dikenal sebagai reaksi berantai nuklir. Untuk mengontrol reaksi berantai tersebut dan pelepasan energi, maka diperlukan mekanisme kontrol, seperti batang kendali yang terbuat dari bahan penyerap neutron. Mekanisme ini mendukung kestabilan reaksi berantai dan menstabilkan daya produksi (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).

Neutron baru yang dihasilkan oleh reaksi fisi memiliki kecepatan yang sangat tinggi, sehingga neutron harus diperlambat agar lebih mudah memasuki inti. Air biasa, yang mineralnya telah dihilangkan, sering digunakan sebagai moderator. Panas yang dihasilkan dalam bahan bakar Uranium sangat tinggi. Ketika gagal

mendinginkan dapat merusak atau melelehkan bahan bakar itu sendiri. Hal tersebut ketika suhu yang dihasilkan justru melebihi kapasitas serta titik leleh dari bahan bakar tersebut (Ariyanto, 2009).

Reaksi fisi merupakan konsep dasar dari sebuah reaktor fisi yang terjadi ketika sebuah neutron menembak sebuah inti dengan persentase tertentu inti akan mengalami pembelahan fisi (Zweifel, 1973).

2.1.2 Reaksi Penangkapan

Selain dihamburkan neutron juga memiliki reaksi bentuk lain yang memungkinkan untuk neutron dapat diserap atau ditangkap oleh suatu inti atom.

a. Pemancaran sinar gamma

Reaksi pemancaran sinar gamma termasuk ke dalam tangkapan radiatif. Tangkapan radiatif adalah semua reaksi yang ditimbulkan oleh tangkapan neutron dan tidak mengalami pembelahan (Pratoyo, 1978). Pada reaksi pemancaran sinar gamma, neutron ditangkap oleh inti dan menyebabkan inti kelebihan energi. Kelebihan energi kemudian dipancarkan dalam bentuk sinar gamma sehingga inti kembali normal atau ground state (Samuel Glasstone, 1963).

b. Reaksi Fisi

Beberapa proses fisi terjadi secara spontan. Biasanya fisi dihasilkan hanya jika sejumlah energi yang cukup diberikan kepada inti melalui tangkapan neutron lambat, atau penembakan dengan neutron, proton, deutron atau sinar gamma. Pada proses reaksi fisi, neutron ditangkap oleh inti atom sehingga menghasilkan inti atom majemuk yang bersifat sangat tidak stabil. Dalam waktu singkat ini atom majemuk ini akan membelah menghasilkan 2 belahan utama dan melahirkan 2 sampai 3 neutron baru disertai beberapa partikel dan timbulnya tenaga (Wiyatmo, 2006).

2.1.3 Leakage Neutron

Leakage Neutron atau biasa disebut dengan neutron yang keluar dari sekitar bahan fisi di inti reaktor. Neutron yang bocor keluar dari wilayah bahan bakar tidak lagi tersedia untuk menyebabkan fisi dan harus diserap oleh pelindung yang ditempatkan di sekitar bejana tekanan reaktor untuk tujuan tersebut.

Secara umum, neutron mungkin bocor keluar sistem selama proses perlambatan atau difusi neutron. Kebocoran neutron dapat dikurangi dengan menggunakan reflektor. Dalam sistem perkalian tak hingga, kebocoran sistem diabaikan secara logika. Namun semua sistem perkalian, semua inti reaktor yang realistis adalah sistem perkalian berhingga, dan kebocoran tidak boleh diabaikan. Secara umum, neutron dapat keluar dari sistem selama:

Selama proses perlambatan, sebagian neutron bocor keluar batas inti reaktor sebelum mengalami termalisasi. Proses ini dan dampaknya terhadap faktor pengali efektif dicirikan oleh faktor cepat non-kebocoran yang didefinisikan sebagai rasio jumlah neutron cepat yang tidak bocor dari teras reaktor selama proses perlambatan terhadap jumlah neutron cepat yang dihasilkan oleh fisi pada semua energi.

Selama difusi neutron, sebagian neutron bocor keluar batas inti reaktor sebelum diserap. Proses ini dan dampaknya terhadap faktor pengali efektif dicirikan oleh faktor non-kebocoran termal yang didefinisikan sebagai rasio jumlah neutron termal yang tidak bocor dari teras reaktor selama proses difusi neutron dengan jumlah neutron yang mencapai energi panas (Nuclear Power, 2021).

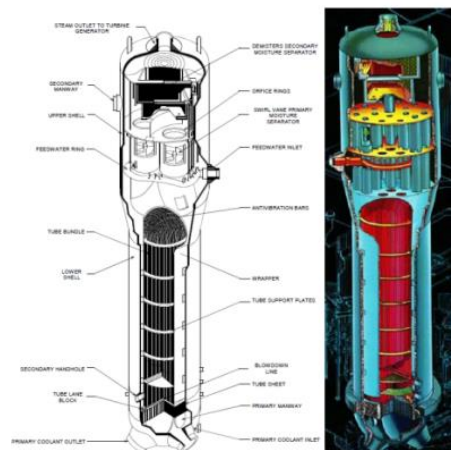
2.2 Komponen Reaktor Nuklir

Suatu reaktor nuklir harus didukung oleh beberapa komponen reaktor untuk mengendalikan laju fisi (reaksi fisi). Komponen reaktor nuklir harus memenuhi standar kualitas yang tinggi dan dapat diandalkan, sehingga kemungkinan terjadinya kecelakaan atau kegagalan komponen tersebut sangat rendah. Komponen-komponen reaktor nuklir adalah sebagai berikut.

1. Tangki Reaktor

Wadah ini dapat berupa silinder paduan atau bola. Peran bejana reaktor merupakan sebagai wadah untuk menempatkan komponen reaktor lainnya dan sebagai tempat berlangsungnya reaksi nuklir. Umumnya bejana reaktor atau tangki reaktor ini mempunyai dinding yang tebal. Selain itu bejana berdinding tebal memiliki fungsi lain yaitu menampung radiasi sehingga tidak dapat lepas dari sistem reaktor dan tentu akan mempermudah dalam penanganan pasca penggunaan dari reaktor itu sendiri (Adiwardojo *et al.*, 2010).

Salah satu bentuk tangki reaktor ditunjukkan pada **Gambar 2.2**

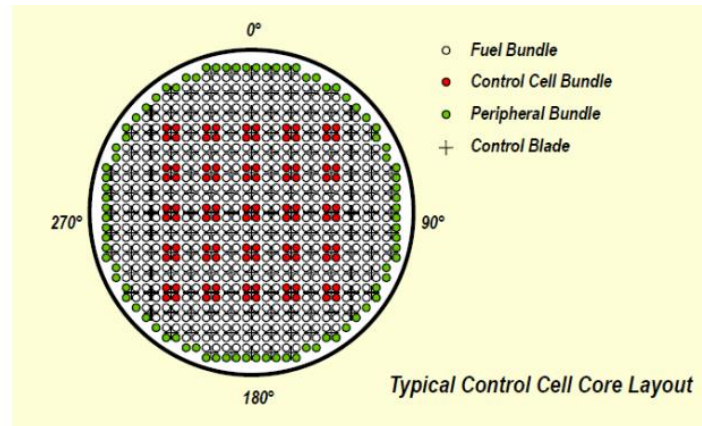


Gambar 2.2 Tangki Reaktor (Pribadi, 2018).

2. Teras Reaktor

Komponen ini bertindak sebagai lokasi bahan bakar. Inti reaktor atau yang biasa disebut teras reaktor dibuat lubang (pilar) untuk menampung bahan bakar reaktor, yaitu berbentuk batang dan terbuat dari logam tahan panas dan korosi (Adiwardojo *et al.*, 2010). Susunan zat bahan bakar dan sekitarnya membentuk jantung reaktor. Inti reaktor yang berisi sel bahan bakar dimana elemen ini berbentuk batangan tipis. Dalam penggunaannya reaktor yang berdaya besar memiliki ribuan sel bahan bakar yang disusun berdekatan (Yoel *et al.*, 2010).

Teras Reaktor yang pada umumnya digunakan dalam sebuah reaktor ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.

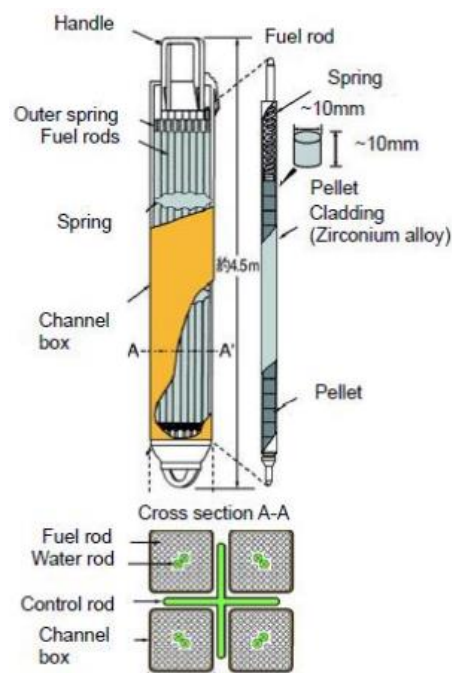


Gambar 2.3 Teras Reaktor (Pribadi,2018).

3. Batang Bahan Bakar (*Fuel Pin*)

Komponen reaktor batang bahan bakar bertujuan untuk menjaga bahan bakar dalam geometri yang terdefinisi dengan baik dan untuk menyediakan penghalang pertama yang memisahkan produk fisi dari lingkungan (Wiesenack, 2012). Dalam batang bakar nuklir terdapat bahan bakar yang akan menyebabkan terjadinya reaksi fisi berantai yang berlangsung yang akan dijadikan sebagai sumber energi nuklir (Lewis, 2008).

Batang bahan bakar ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Batang Bahan Bakar.(Pribadi, 2018).

4. Moderator

Moderator merupakan komponen reaktor lapisan kedua dari komponen luar yang berhubungan langsung dengan bahan bakar. Tugas moderator mereduksi energi neutron cepat (2 MeV) menjadi energi neutron lambat (0,02 - 0,04 eV). Jadi neutron dapat menyebabkan reaksi fisi berikutnya. Selain itu, moderator juga berperan sebagai pendingin utama dikarenakan moderator yang bertugas memperlambat reaksi sebelum komponen pendingin aslinya mendinginkan sistem reaktor. Persyaratan untuk bahan moderator tergantung pada jenis reaktor yang dirancang. Namun dalam aplikasinya beberapa hal yang paling mendasar dalam pembuatan moderator dengan memperhatikan bahan yang memiliki atom dengan nomor massa rendah, penampang penyerapan neutron kecil, penampang hamburan besar, dengan konduktivitas termal yang baik dan ketahanan korosi. Moderator yang umum digunakan dalam reaktor nuklir adalah air (Lewis, 2008).

5. Pendingin (*Coolant*)

Energi yang dihasilkan oleh reaksi fisi meningkatkan suhu reaktor. Suhu ini dipindahkan dari reaktor dengan menggunakan bahan pendingin, misalnya air, karbon dioksida atau Helium. Bahan pendingin disirkulasikan melalui sistem pompa, sehingga air yang keluar dari bagian atas teras reaktor digantikan air dingin yang masuk melalui bagian bawah teras reaktor (Soentono, 1998).

Salah satu pendingin yang digunakan dalam reaktor GCFR adalah gas Helium. Helium merupakan salah satu jenis pendingin yang memiliki kelebihan dibanding pendingin lainnya yaitu sulit bereaksi dengan unsur lain, atau sering disebut inert. Gas helium digunakan sebagai pendingin karena merupakan gas ideal atau gas inert, tidak mengubah sifat fisika atau kimianya pada temperatur yang sangat tinggi, tidak bereaksi dengan gas atau zat lain, efisien untuk perpindahan panas, dan mudah dikompresi lebih dari 5 MPa. Kemurnian gas helium sebagai pendingin harus dijaga dari pengotor berupa partikel maupun gas. Seperti polutan padat hasil pembakaran batubara. Polutan padat adalah debu batubara, yang dapat bercampur dengan produk fisi, sedangkan polutan gas meliputi O_2 , N_2 , H_2O , CH_4 , CO , CO_2 dan H_2 (Alimah *and* Sriyono, 2016).

Gas helium sebagai gas ideal atau gas inert memiliki karakteristik tidak berubah sifat fisika atau kimia pada temperatur yang relatif tinggi, tidak bereaksi dengan gas atau zat lain, efisien dalam perpindahan panas, dan mudah dikompresi di atas 5 MPa atau lebih. Gas ini sangat cocok digunakan sebagai pendingin untuk perpindahan panas pada reaktor bertemperatur sangat tinggi (HTGR, VHTR dan jenis reaktor berpendingin gas lainnya hingga sekitar 950°C). Sifat-sifat gas helium dapat dipertahankan selama kemurniannya dapat terjaga dengan baik. Namun, sel gas tambahan dapat terbentuk akibat kebocoran mikro dalam sistem pelindung antara sambungan pipa pendingin, saat gas tambahan masuk ke sistem pendingin. Bukan tidak mungkin pelumas bantalan dengan sistem penyegelan yang tidak sempurna akan berubah menjadi gas polutan pada suhu yang sangat tinggi, yang dapat merusak sifat gas helium. Setiap bahan yang bersentuhan langsung dengan gas helium pada suhu sekitar 950°C akan segera mengalami kerusakan fisik akibat tekanan suhu, membuatnya lebih rapuh secara fisik, menghasilkan debu yang mencemari gas helium (Supriatna, 2009).

Refrigeran harus memiliki titik leleh yang rendah dan titik didih yang tinggi. Selain itu, material yang digunakan sebagai pendingin tidak boleh korosif terhadap material yang bersentuhan dengannya dan harus memiliki koefisien perpindahan panas yang tinggi (Mairing *and* Prihatnadi, 2009).

Nilai-nilai konduktifitas panas dari beberapa bahan yang bisa digunakan sebagai gas pendingin ditunjukkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2. 1 Nilai Konduktifitas Gas.

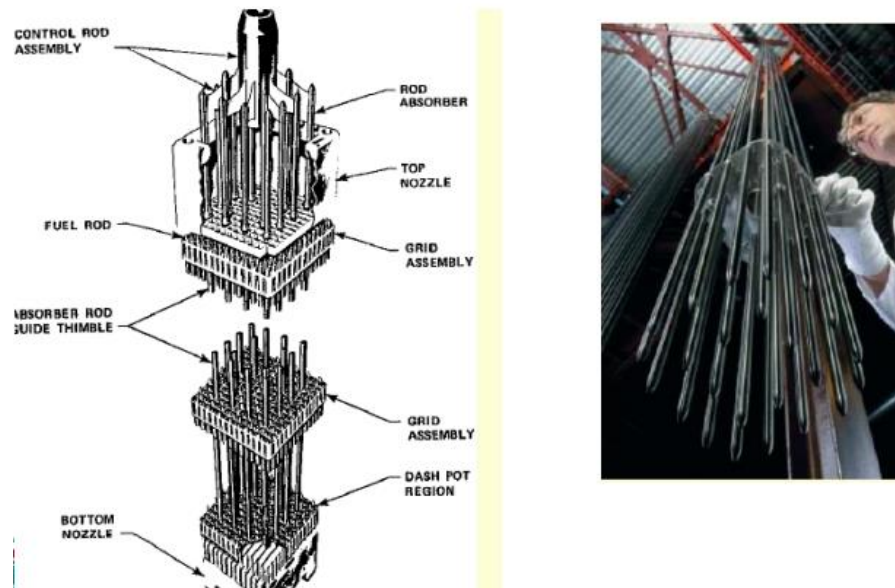
Gas	k (W/m.C)
Hidrogen	0,175
Helium	0,141
Udara	0,024
Karbondioksida	0,0146

Panas yang mengalir melalui benda akan semakin besar jika nilai konduktivitas panas suatu bahannya besar. Oleh karena itu, bahan yang harga k nya besar adalah penghantar yang baik sedangkan bila k -nya kecil bahan itu bukan penghantar panas yang baik (Holman, 1983).

6. Batang Kendali (*Control Rod*)

Setiap reaksi fisi menghasilkan neutron baru yang lebih banyak (2-3 neutron baru), maka perlu diatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Komponen reaktor yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar adalah batang kendali. Bahan yang dipergunakan untuk batang kendali reaktor haruslah memiliki kemampuan tinggi menyerap neutron. Bahan-bahan tersebut antara lain Kadmium (Cd), Boron (B), atau Hafnium (Hf) (Soentono, 1998).

Batang kendali ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Batang Kendali Reaktor (Pribadi, 2018).

7. Perisai (*Shielding*)

Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Radiasi yang dihasilkan oleh reaktor antara lain radiasi partikel Alfa, Beta, Produk Fisi, Sinar Gamma dan Neutron. Untuk menahan radiasi, umumnya reaktor dikelilingi oleh perisai beton. Bahan perisai yang biasanya digunakan adalah Timbal (Pb), Bismuth (Bi), Tungsten (W) sebagai pelindung radiasi sinar X, Besi (Fe) sebagai pelindung radiasi gamma, Kadmium (Cd) dan Boron (B) sebagai pelindung radiasi neutron (Soentono, 1998).

Perisai (*shielding*) berfungsi sebagai penghalang agar radiasi yang dihasilkan oleh fisi bahan tidak menyebar ke lingkungan luar sistem reaktor. Karena reaktor adalah sumber radiasi yang sangat mungkin, diperlukan sistem pelindung yang tahan terhadap semua radiasi, yang biasanya berupa beton berat dan struktur baja (Novick, 2012).

2.3 Bahan Bakar Reaktor Nuklir

Bahan bakar reaktor yang sudah banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir antara lain, yaitu:

2.3.1 Uranium

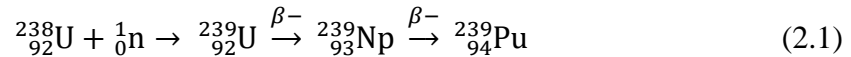
Uranium ditemukan pertama kali oleh Klaproth seorang kimiawan Jerman pada tahun 1789 (Kidd, 2009). Pada skala unsur, dalam urutan kenaikan berat atom, Uranium adalah unsur terberat dari semua unsur alami dan diklasifikasikan sebagai logam. Titik leleh Uranium relatif tinggi, 1132°C. Simbol kimia untuk Uranium adalah U (Novick, 2012).

Sejak tahun 1940-an, hampir semua Uranium yang ditambang telah digunakan untuk membuat senjata nuklir. Namun sejak tahun 1970-an, Uranium dikembangkan sebagai bahan bakar reaktor nuklir. Uranium alam di kerak bumi terdiri dari tiga isotop, U^{238} (99,275%), U^{235} (0,720%) dan U^{233} (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut, hanya U^{235} yang dapat dibelah (Kidd, 2009).

Uranium merupakan sumber energi penting sekarang dan di masa depan karena kelimpahannya yang signifikan. Meskipun demikian, Uranium diklasifikasikan sebagai sumber energi yang tidak terbarukan. Diperkirakan terdapat 22 juta ton Uranium dalam batuan fosfat dan 200 juta ton dalam air laut (Info Nuklir, 2010).

2.3.2 Plutonium

Selain Uranium yang bekerja sebagai bahan bakar, ketika Uranium digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir, setelah berakhirnya operasi, selain menghasilkan listrik, juga dihasilkan limbah nuklir. Diantara berbagai jenis limbah nuklir tersebut terdapat limbah yang dapat digunakan sebagai bahan bakar reaktor lain yaitu Plutonium (Pu). Pu dibentuk oleh reaksi penangkapan neutron yang terjadi pada U^{238} . Terdapat lima isotop dominan untuk reaksi fisi pada reaktor nuklir, yaitu Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} dan Pu^{241} . Dari kelima isotop tersebut, hanya Pu^{239} dan Pu^{241} yang bersifat fisil yang dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar reaktor lain (Novalianda *et al.*, 2018).

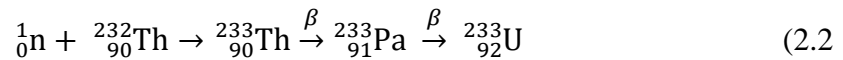


Plutonium-239 adalah bahan fisil, yaitu bahan yang dapat meluruh ketika neutron ditembakkan, melepaskan lebih banyak energi, sinar gamma, dan neutron. Peristiwa ini memungkinkan Plutonium-239 untuk melanjutkan reaksi berantai nuklir ketika mencapai massa kritis. Sifat tersebut memungkinkan Plutonium dapat digunakan sebagai bahan bakar di beberapa reaktor nuklir (Mayanti *et al.*, 2017). Secara teori, Plutonium dapat digunakan bersama Uranium sebagai bahan bakar dalam bentuk MOX (Waris *and* Budiono, 2008).

2.3.3 Thorium

Selain Uranium-238, bahan fertil yang terdapat secara alami juga adalah Thorium-232. Jika mengalami reaksi penangkapan neutron, maka Thorium-232 dapat menghasilkan bahan fisil Uranium-233.

Reaksi fisi Thorium dapat ditunjukkan dengan persamaan 2.2.



Reaksi fisi Thorium terjadi ketika sebuah neutron ditangkap oleh torium sehingga menjadi isotop baru yaitu Th^{233} (Thorium-233). Selain itu, peluruhan elektron (peluruhan beta) karena konversi cepat menjadi Pa^{233} (Protactinium-233) selama periode waktu tertentu. Pa^{233} kemudian mengalami proses transmudasi lambat dengan peluruhan beta, akhirnya menjadi U^{233} yang dapat dibelah.

2.4 Jenis Jenis Reaktor Nuklir

Berdasarkan cara kerjanya, reaktor dibedakan menjadi dua, yaitu reaktor riset dan reaktor daya. Reaktor riset digunakan untuk penelitian ilmiah, pengujian material, pendidikan dan pelatihan, dan produksi radioisotop. Sedangkan reaktor daya adalah reaktor nuklir yang digunakan untuk menganalisis listrik atau menghasilkan listrik. Dalam reaktor daya, digunakan sebagai uap panas bersuhu tinggi yang dihasilkan oleh reaksi fisi reaktor nuklir untuk menggerakkan turbin (Adiwardojo *et al.*, 2010).

1. Reaktor riset adalah reaktor nuklir yang digunakan dalam penelitian berbagai aplikasi nuklir, dalam hal ini reaksi nuklir digunakan sebagai sumber neutron, dan daya reaktor biasanya rendah, 100 kW-30 MW.
2. Reaktor daya adalah reaktor pada pembangkit listrik tenaga nuklir, dengan daya reaktor biasanya lebih dari 1000 MW. Reaktor digunakan sebagai pembangkit energi panas yang hasilnya kemudian diumpankan ke dalam sistem pendingin primer dan digunakan untuk menghasilkan uap untuk mendidihkan sistem pendingin sekunder. Pada tekanan tinggi, turbin generator digunakan untuk menghasilkan listrik menggunakan uap (Susetyo. 1988).

Reaktor nuklir dapat dibagi menjadi reaktor termal dan reaktor cepat berdasarkan spektrum neutron. Reaktor termal menggunakan panas dalam proses reaksi. Dalam reaktor termal, reaksi fisi selanjutnya membutuhkan moderator untuk memperlambat neutron yang dihasilkan dalam proses fisi. Reaktor cepat adalah reaktor yang menggunakan neutron cepat dalam reaksi fisinya. Reaktor ini tidak memerlukan moderator untuk menggunakan neutron cepat secara langsung pada proses fisi selanjutnya. Pada reaktor cepat, energi neutron adalah (1 - 2) MeV, yang dapat mengubah bahan subur menjadi bahan fisil (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).

Sedangkan reaktor cepat adalah reaktor yang menggunakan neutron cepat dalam proses reaksinya. Reaktor cepat tidak menggunakan bahan lambat neutron. tetapi membutuhkan bahan bakar yang sangat diperkaya. Contoh bahan bakar adalah Uranium alam (U^{238} dan U^{235}), Reaktor cepat dapat mengubah radioisotop berumur panjang dari limbahnya menjadi bahan yang membusuk dengan cepat. Oleh karena itu, reaktor cepat lebih berkelanjutan sebagai sumber energi daripada reaktor termal. Karena sebagian besar dari reaktor cepat digunakan untuk menghasilkan Plutonium, reaktor ini dikaitkan dengan pertimbangan proliferasi. Lebih dari dua puluh reaktor cepat telah dibangun di Amerika Serikat, Inggris Raya, Uni Soviet, Prancis, Jerman, Jepang dan India, dan pada tahun 2001 di China. Ditinjau dari tenaga neutron yang melangsungkan reaksi pembelahan, reaktor dibedakan menjadi reaktor cepat: GCFR, LMFBR, SCFBR, reaktor *thermal*: PWR, BWR, PHWR, GCR.

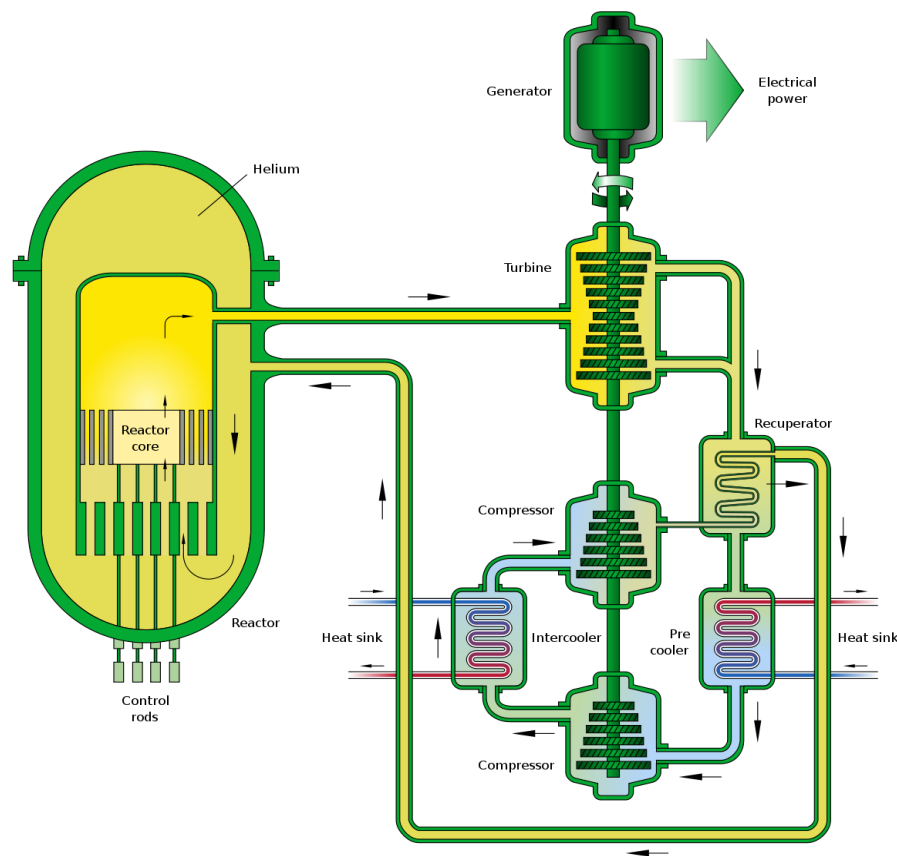
Berdasarkan parameter yang lain dapat disebut Reaktor berefektor grafit: GCR, AGCR, reaktor berpendingin air ringan: PWR, BWR dan reaktor suhu tinggi: HTGR (BATAN, 2010).

2.5 Gas Cooled Fast Reactor (GCFR)

Salah satu jenis reaktor Generasi IV adalah *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR). GCFR dipertimbangkan sebagai konsep yang memiliki prospek cerah dan memiliki prioritas tinggi dalam pembangunan sistem energi nuklir dengan

dilengkapi fitur utama terkait keberlanjutan, ketahanan daur ulang, ekonomis dan faktor keselamatan (Dumaz, 2007).

Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) adalah reaktor cepat berpendingin gas helium dengan siklus bahan bakar tertutup suhu tinggi. Keuntungan dari sistem ini menggunakan spektrum cepat untuk keberlanjutan, cadangan Uranium jangka panjang dan minimalisasi limbah melalui pemrosesan ulang bahan bakar dan fisi aktinida berumur panjang. GCFR dengan sistem siklus panas tinggi untuk penggunaan panas yang dihasilkan industri, seperti untuk produksi hidrogen (GIF, 2002).



Gambar 2.6 Skema Reaktor *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) (The Generation IV International Forum, 2002).

Gambar 2.6 menunjukkan penukar panas yang memindahkan panas pembakaran dari pendingin helium primer ke siklus gas sekunder yang mengandung campuran helium dan nitrogen untuk menggerakkan turbin. Turbin menggunakan sistem *direct cycle* yang menghasilkan listrik lebih efisien. Panas buangan dari turbin

digunakan di generator uap untuk menghasilkan uap, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap (GIF, 2002). Penelitian di GCFR berfokus pada bahan bakar dan teknologi daur ulang bahan bakar. Sistem Generasi IV milik GCFR tertinggi untuk keselamatan dan keandalan dan diproyeksikan siap untuk komersialisasi pada tahun 2025 (Anggoro *et al.*, 2013).

Menurut (Anshari, 2017) beberapa kelebihan dari GCFR antara lain:

- a. Efisiensi lebih tinggi
- b. Berjenis reaktor dengan neutron spektrum cepat sehingga dapat digunakan untuk pemanfaatan bahan bakar alami.
- c. Membantu produksi Hidrogen yang dapat dimanfaatkan pada rancangan bahan bakar kendaraan / industri beberapa tahun ke depan.
- d. Minimalisir limbah yang dihasilkan karena tingkat pembakarannya yang tinggi.

Sedangkan menurut (Syarifah *et al.*, 2021) keunggulan dari Helium adalah sebagai berikut.

- a. Mampu bertahan pada suhu tinggi karena menggunakan gas yang hanya memiliki satu fasa
- b. Berdaya saing ekonomi
- c. Kesederhanaan desain
- d. Lebih kompak dan lebih efisien
- e. Memiliki demonstrasi keselamatan yang kuat
- f. Mampu bertahan selama 20 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar dengan nilai *excess reactivity* di bawah 2%

2.6 Laju Reaksi Neutron

Neutron dari reaksi fisi bergerak dengan kecepatan tinggi di dalam inti dan berinteraksi dengan berbagai bahan dan difusi kemudian melambat, neutron memiliki tingkat energi yang berbeda dan bergerak ke segala arah (El-Wakil, 1971). Untuk mempertahankan reaksi berantai, ia harus menghasilkan setidaknya satu neutron dari setiap reaksi fisi. Perilaku neutron tergantung pada energi kinetik

neutron dan ketika neutron melewati materi dan berinteraksi dengan inti materi (Setiadipura, 2010).

Tumbukan antara neutron dan inti dapat menyebabkan berbagai reaksi. Penampang mikroskopis ditentukan untuk menentukan jumlah masing-masing jenis reaksi (Shafii, 2015). Penampang mikroskopis memiliki nilai yang sangat kecil dan biasanya diukur dalam satuan 1 barn = 10^{-24} cm².

$$\Sigma_{(x,g)} = \sigma_{(x,g)}N \quad (2.3)$$

Dengan $\Sigma_{(x,g)}$ disebut penampang makroskopik dengan satuan cm⁻¹, $\sigma_{(x,g)}$ penampang mikroskopik dan N merupakan densitas atom dengan satuan (atom/cm³). Jumlah penampang semua reaksi disebut penampang total (Sekimoto, 2007)). Penampang nuklir tergantung pada energi kinetik neutron dan probabilitas relatif bahwa tumbukan neutron-nuklir berlangsung sebagai reaksi pemisahan, reaksi penangkapan, atau reaksi fisi (Setiadipura, 2010).

Neutron yang dihasilkan oleh reaksi fisi memiliki energi yang didistribusikan di seluruh spektrum energi. Neutron dari reaksi fisi biasanya melalui beberapa reaksi hamburan sebelum akhirnya diserap. Neutron yang diluruskan oleh inti stasioner memberikan sebagian momentumnya ke inti stasioner, sehingga neutron kehilangan energi. Pada suhu di atas nol mutlak (0° K) perpindahan panas acak terjadi di inti. Menurut teori kinetik, energi kinetik rata-rata inti adalah.

$$E = \frac{3}{2} kT \quad (2.4)$$

Dengan k adalah Konstanta Boltzmann, T sebagai Suhu Absolut (K). Pada suhu ruang $T = 293,61$ K, energi kinetik rata-ratanya adalah 0,0378 eV. Biasanya, pengukuran neutron termal dilakukan pada $1,0$ kT di mana nilai energi kinetik rata-rata pada suhu kamar adalah 0,0253 eV. Energi kinetik inti sangat kecil dibandingkan dengan energi neutron fisi, yang berada di orde MeV. Dengan demikian, energi kinetik inti dapat diasumsikan nol atau inti diam.

Reaksi neutron yang dihamburkan dengan inti menyebabkan neutron kehilangan energi kinetiknya hingga kemudian neutron mengalami reaksi absorpsi kehilangan energi kinetiknya hingga kemudian neutron mengalami reaksi absorpsi atau melambat hingga energi mereka mencapai tingkat eV. Dalam kondisi ideal, reaksi absorpsi tidak terjadi, neutron mencapai kesetimbangan dengan gerak termal inti di sekitarnya. Dalam kondisi kesetimbangan, energi neutron memenuhi persamaan distribusi Maxwell-Boltzmann.

$$M(E) = \frac{2\pi}{\pi k T^{3/2}} E^{1/2} \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (2.5)$$

Dengan E dinyatakan dalam eV, konstanta Boltzmann $k = 8.617065 \times 10^{-5}$ eV/K, dan $M(E)$ ternormalisasi terhadap satu sebagai berikut (Lewis, 2008).

$$\int_0^{\infty} M(E) dE = 1 \quad (2.6)$$

Reaksi antara neutron dan nuklida dianggap sebanding dengan ukuran nuklida dan jarak yang ditempuh neutron per satuan waktu. Untuk mengetahui jumlah neutron lebih mudahnya dengan menggunakan hasil dari perkalian kerapatan bilangan neutron n dan kecepatan laju neutron $v_{(x,g)}$, Dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$\phi_{(x,g)}(r, E, t) = v_{(x,g)} n(r, E, t) \quad (2.7)$$

Kuantitas ini disebut fluks neutron (Sekimoto, 2007). Fluks neutron memiliki satuan neutron/cm²s dengan energi antara E dan $E+dE$. Hal ini menunjukkan jumlah atau kuantitas neutron yang berinteraksi dengan inti dalam suatu titik di dalam teras dalam satuan waktu. Interaksi dalam satuan waktu disebut juga laju reaksi antara neutron dengan inti atom (El-Wakil, 1971). Laju reaksi neutron R dengan satuan reaksi/cm³s dapat dinyatakan dengan persamaan 2.8.

$$R_{(x,g)}(r, T) = \int_0^{\infty} \phi_{(x,g)}(r, E, t) \Sigma_{(x,g)} dE \quad (2.8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.3 ke persamaan 2.8, maka diperoleh persamaan 2.9 berikut:

$$R_{(x,g)}(r, t) = \int_0^{\infty} N\sigma_{(x,g)}(E)\phi_{(x,g)}(r, E, t) dE \quad (2.9)$$

Dengan N adalah Kerapatan Nuklida dengan satuan (atom/cm³) dan σ Penampang Mikroskopis (cm²). Maka σ dinyatakan sebagai penampang inti target atau disebut penampang mikroskopis (Sekimoto, 2007). Dalam reaktor nuklir, laju reaksi neutron hanya terjadi di wilayah bahan bakar. Ini tidak terjadi *cladding* dan pendingin, karena tidak ada reaksi fisi yang terjadi di kedua wilayah ini (Martha *et al.*, 2016).

Untuk menghitung laju reaksi menggunakan SRAC menggunakan persamaan berikut:

$$R(\vec{r}) = \sum_{g=1}^{IGMAX} \Sigma_{x,g} \phi_g \quad (2.10)$$

Dengan IGMAX adalah jumlah grup energi. Persamaan 2.10 merupakan perhitungan laju reaksi dengan detektor tanpa filter dan persamaan 2.11 merupakan perhitungan laju reaksi dengan detektor menggunakan filter.

$$R(\vec{r}) = \sum_{g=1}^{IGMAX} f_g \Sigma_{x,g} \phi_g \quad (2.11)$$

Dengan f_g , adalah filter transmisi faktor (Okumura *et al.*, 2002).

Neutron cepat dapat dideteksi dengan interaksi neutron dengan bahan yang mengandung atom hidrogen, yang menyebabkan tumbukan elastis antara neutron dan atom hidrogen. Tabrakan antara neutron dan atom hidrogen memaksa proton keluar dari inti atom. Detektor dapat mendeteksi neutron melalui ionisasi proton hasil dari proses tumbukan. Pada saat yang sama, neutron termal dapat dideteksi dengan memanfaatkan interaksi antara neutron dan helium, yang menghasilkan proton dan tritium (Knoll, 1989).

Spektrum energi aliran neutron, atau spektrum neutron, sangat penting dalam perhitungan neutron, karena semua interaksi antara material dan neutron, serta jenis dan ukuran interaksi, bergantung pada energi neutron. Secara teoritis, spektrum energi neutron berkisar dari 0,025 eV atau kurang hingga 17 MeV dan bahkan lebih tinggi. Dalam reaktor nuklir, selalu ada reaksi absorpsi, sehingga spektrum energi berubah melebihi nilai $M(E)$ yang diberikan pada persamaan, karena reaksi absorpsi pertama kali terjadi sebelum mencapai kesetimbangan. Kisaran energi neutron selama reaksi berantai dalam reaktor nuklir umumnya dikatakan $0,001\text{eV} < E < 10\text{MeV}$. Hingga area energi neutron dalam reaktor nuklir sangat tinggi, hingga 10 kali lipat. Dalam reaktor nuklir, rentang energi neutron dibagi menjadi tiga rentang. Neutron diklasifikasikan sebagai neutron cepat jika energinya berada dalam kisaran di mana banyak neutron fisi dipancarkan, yaitu $0,1\text{ MeV} < E < 10\text{ MeV}$ yang memenuhi persamaan Watt yaitu:

$$\phi(E) \sim \exp(-E) \sinh(\sqrt{2E}) \quad (2.12)$$

Neutron termal (*thermal neutron*) adalah neutron dengan energi yang cukup kecil yaitu pada $0,001\text{ eV} < E < 1,0\text{ eV}$ yang memenuhi distribusi Maxwell, yaitu:

$$\phi(E) = \phi_0 \exp\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{E}{E_0}\right) \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) \quad (2.13)$$

Meskipun neutron dalam kisaran energi $1,0\text{ eV} < E < 0,1\text{ MeV}$ disebut neutron epitermal (Stacey, 2001).

Sesuai dengan persamaan 2.14 berikut.

$$\phi(E) \sim \frac{1}{E} \quad (2.14)$$

Spektrum energi neutron terletak antara nilai maksimum dari energi neutron hasil reaksi fisi dan energi neutron pada kesetimbangan termal. Untuk neutron dengan energi jauh di atas daerah termal, reaksi hamburan akan menurunkan energi

neutron tersebut, sementara untuk neutron di daerah kesetimbangan termal reaksi hamburan dapat menambah atau mengurangi energinya. Hal ini karena neutron dengan energi lemah juga berinteraksi atau terpengaruh oleh gerak termal dari atom sekitar. Penurunan energi yang disebabkan oleh hamburan disebut perlambatan neutron (*neutron slowing down*). Pada bahan dimana rerata energi hilang pertumbukan dan rasio penampang lintang hamburan terhadap absorpsi bernilai tinggi, spektrum neutron akan mendekati spektrum pada kesetimbangan termal dan disebut spektrum halus (*soft spectrum*) atau spektrum termal. Sebaliknya, bahan dengan rasio penurunan energi neutron terhadap reaksi absorpsi yang kecil, neutron akan lebih banyak terserap sebelum sempat mengalami perlambatan yang berarti. Maka spektrum neutron de kat dengan spektrum fisi dan disebut sebagai spektrum keras (*hard spectrum*) atau spektrum cepat (*fast spectrum*) (Setiadipura, 2010).

2.7 Faktor Multiplikasi

Faktor multiplikasi (k_{eff}) merupakan suatu besaran yang menunjukkan perbandingan antara jumlah populasi neutron pada suatu generasi dengan jumlah populasi neutron pada generasi sebelumnya dalam suatu medium tertentu. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor yang mencapai keadaan stabil (kritis) jika nilai $k_{\text{eff}} = 1$.

Dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.15.

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{jumlah neutron pada satu generasi sebelumnya}} \quad (2.15)$$

Jika kuantitas $k_{\text{eff}} > 1$ disebut reaktor superkritis, artinya jumlah neutron bertambah seiring waktu, atau jumlah neutron bertambah, jika $k_{\text{eff}} = 1$ reaktor dalam keadaan kritis, artinya jumlah neutron tidak tidak berkurang atau bertambah, tetapi konstan (tetap) dan jika nilainya $k_{\text{eff}} < 1$ disebut reaktor subkritis, yang berarti bahwa jumlah neutron berkurang sebagai fungsi waktu, atau jumlah neutron berkurang (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).

Koefisien menunjukkan keadaan neutron di dalam reaktor dan dapat menjadi tolok ukur untuk mendesain reaktor. Koefisien yang diharapkan dalam reaktor selalu merupakan nilai kritis untuk menjamin kelangsungan reaktor dengan pembangkit listrik yang terkendali dan stabil selama reaktor beroperasi (Riska *and* Irka, 2016).

2.8 *Standart Reactor Analysis Code (SRAC)*

Standart Reactor Analysis Code (SRAC) adalah sistem kode yang berlaku untuk analisis neutron dari berbagai jenis reaktor. Sistem SRAC mulai dikembangkan pada tahun 1978 sebagai standar untuk kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang (*Japan Atomic Energy Agency/JAEA*). Sistem SRAC dirancang untuk memungkinkan perhitungan neutron untuk berbagai jenis reaktor termal. Sistem SRAC mencakup produksi penampang kelompok mikroskopis dan makroskopik yang efektif, dan perhitungan sel statis dan inti termasuk analisis *burn-up*. Tetapi sistem SRAC tidak mencakup masalah untuk transportasi foton, kinetika dan hubungan dengan termal hidrolis. Program ini banyak digunakan untuk keperluan analisis neutronik di Jepang oleh berbagai pihak, mulai dari Akademisi Universitas, Departemen Penelitian, sampai Analisis Perusahaan penyedia perangkat nuklir (Okumura *et al.*, 2002).

Pustaka nuklida SRAC terdiri dari tiga pustaka penampang lintang (*cross-section*) yaitu pustaka cepat (*fast*) untuk menginstal penampang lintang grup cepat, pustaka termal (*thermal*) untuk menginstal penampang lintang grup termal, dan pustaka MCROSS untuk menginstal penampang lintang pada daerah resonansi yang biasa digunakan pada PEACO. Dalam sistem SRAC, semua informasi seperti penampang lintang dan fluks tersimpan dalam suatu format yang disebut dengan PDS (*Partitioned Data Set*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Terdapat sepuluh jenis PDS dalam sistem SRAC yaitu :

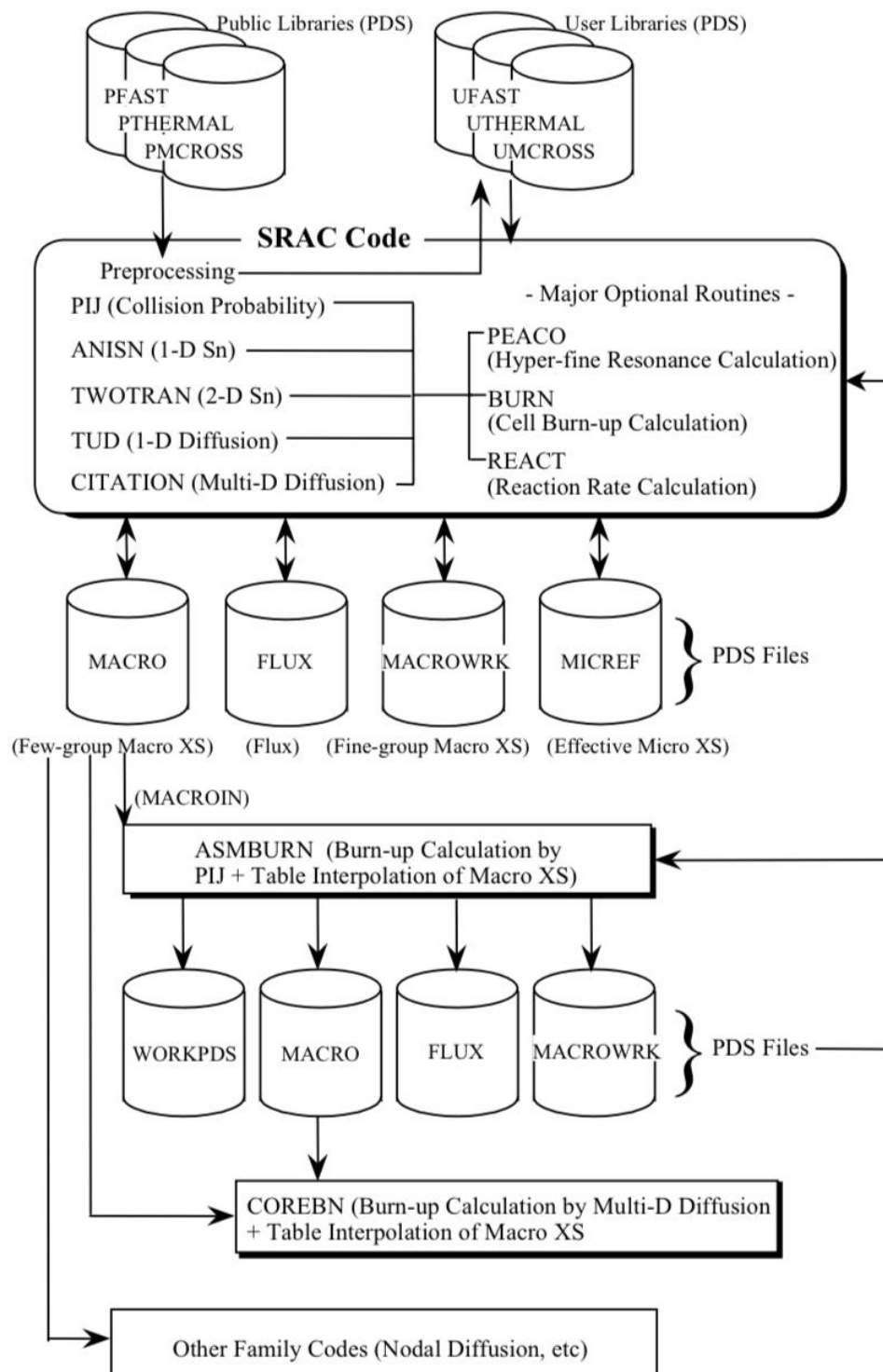
1. PFAST : Pustaka Fast (hanya dibaca).
2. PMCROS : Pustaka MCROSS untuk PEACO (hanya dibaca).

3. P THERMAL : Pustaka Thermal (hanya dibaca).
4. UFAST : Pengguna pustaka Fast.
5. UMCROSS : Pengguna pustaka MCROSS untuk PEACO.
6. U THERMAL : Pengguna pustaka Thermal.
7. MICREF : Pustaka pengguna yang berisi data penampang lintang mikroskopik.
8. MACROWRK : Pustaka pengguna yang berisi data penampang lintang makroskopik.
9. MACRO : Data penampang lintang makroskopik oleh pengguna.
10. FLUX : Distribusi fluks pada beberapa grup struktur.

Sistem SRAC terdiri dari penyimpanan data (*Libraries*) neutron (JENDL-3.3, JENDL-3.2, END/B-IV, JEF-2.2 dan sebagainya), dan lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi.

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

Gambar 2.3 menunjukkan struktur sistem SRAC. Kode dasar sistem SRAC meliputi tiga kode transport dan dua kode difusi untuk perhitungan fluks neutron.



Gambar 2.7 Struktur Sistem SRAC (Okumura *et al*, 2002)

SRAC terdiri dari dua file yaitu file *input* dan file *output*, file *input* SRAC dapat diatur sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila *input* data pada

SRAC telah selesai kemudian di-*run* maka file *output* akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai tepat atau tidak. Jika bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) belum sampai pada pesan seperti,

=====END OF SRAC CALCULATION=====

Maka harus dilakukan pengecekan pada input dan melakukan perhitungan kembali. Setelah perhitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan standar kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2002).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret sampai Mei 2023 di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat personal computer dengan *Operating System* (OS) Linux Ubuntu 16.04 64 bit dan program *Standard Thermal Reactor Analysis Code* (SRAC).

3.3 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan program SRAC dengan kode tambahan REACT serta sumber data nuklida yang berasal dari JENDL-3.2 yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA). Prosedur pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahapan. Prosedur penelitian yang akan dilakukan adalah:

3.3.1 Menentukan Pengayaan (*Enrichment*)

Menentukan pengayaan pada bahan bakar pada rentang 8,5% sampai dengan 9,5% dengan rentang 0,1% yang nantinya akan digunakan dalam perhitungan nilai *atomic density* (densitas atom) dari pada reaktor GCFR. Pengayaan yang akan digunakan dalam perhitungan ini didapatkan dari sumber spesifikasi dari reaktor GCFR. Pada penelitian lain dan penggunaannya dalam dunia nuklir yang akan digunakan sebagai referensi dasar.

3.3.2 Menghitung Densitas Atom

Selanjutnya menghitung densitas atom tiap-tiap komponen reaktor seperti bahan bakar (*fuel*), pendingin (*coolant*) dan juga kelongsong (*cladding*). Hasil dari perhitungan tersebut akan digunakan sebagai inputan di PIJ. PIJ sendiri merupakan salah satu kode yang terdapat di SRAC yang digunakan untuk perhitungan neutronik tingkat sel menggunakan metode probabilitas tumbukan. Melakukan perhitungan densitas atom sebagai fungsi pengayaan dengan persamaan:

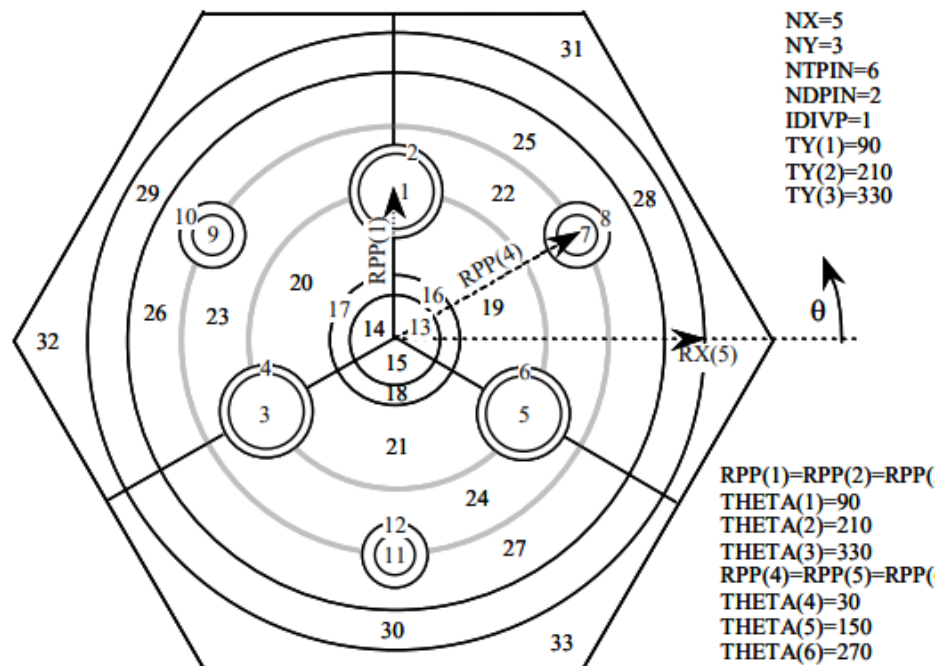
$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad 3.1$$

Dengan N Densitas Atom (atom/cm³), ρ Massa Jenis (gr/cm³), N_A Bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ atom/mol) dan M Massa Molekul (gr/mol).

3.3.3 Menentukan geometri *cell*

Geometri sel atau bentuk dari teras reaktor merupakan salah satu komponen yang ditentukan pada awal perhitungan serta perhitungan akan dilakukan. *Assembly* REACT pada SRAC pada kondisi aslinya merupakan berbentuk persegi panjang dengan pin bahan bakar dan selongsong berbentuk lingkaran. Pada penelitian ini model *assembly* akan diubah ke bentuk heksagonal dengan pin bahan bakar dan selongsong berbentuk lingkaran yang asimetris. Berikut model perangkat yang akan digunakan pada penelitian ini.

Bentuk assembly yang akan digunakan ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Geometri untuk PIJ dengan model *assembly* heksagonal (IGT =12)
(Okumura, 2002).

3.3.4 Menentukan Ukuran Pin

Menentukan ukuran pin bahan bakar, selongsong, dan moderator pada reaktor GCFR yang akan digunakan. Dengan menentukan ukuran pin tersebut dapat diketahui fraksi volumenya dengan perbandingan dari masing masing dari ukurannya. Menentukan ukuran pin dilakukan dengan menghitung volume dari pin bahan bakar yang disesuaikan dengan fraksi volume yang sebagai dasar pembangkitan dari reaktor GCFR itu sendiri.

3.3.5 *Input data pada REACT*

Hasil perhitungan dari densitas atom, ukuran pin dan fraksi volumenya yang telah didapatkan kemudian digunakan sebagai data *input* REACT pada SRAC. Kemudian dilakukan perhitungan laju reaksi neutron.

3.3.6 Perhitungan Laju Reaksi Neutron

Perhitungan laju reaksi neutron dapat dihitung secara manual dengan menggunakan persamaan 2.10 dan 2.11 pada BAB II. Namun, perhitungan dengan cara manual akan memakan waktu yang cukup lama. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan laju reaksi neutron dengan REACT pada SRAC.

3.3.7 End of SRAC Calculation

Setelah perhitungan laju reaksi selesai maka akan ditunjukkan berakhirnya perhitungan yang dilakukan oleh SRAC dengan munculnya pernyataan *End Of SRAC Calculation*. Dengan adanya pernyataan tersebut dapat dibuktikan bahwa perhitungan yang dilakukan dengan SRAC.

3.3.8 Hasil Perhitungan

Perhitungan laju reaksi neutron yang telah selesai akan ditunjukkan dengan file *output* SFT98 dan SFT99. Hasil perhitungan meliputi beberapa komponen berupa laju reaksi neutron, energi dan spektrum neutron. Data yang akan digunakan merupakan hasil laju reaksi neutron berdasarkan perhitungan dengan menggunakan detektor filter dan tanpa filter. Laju reaksi neutron pada reaksi fisi dan penangkapan neutron.

3.3.9 Analisis

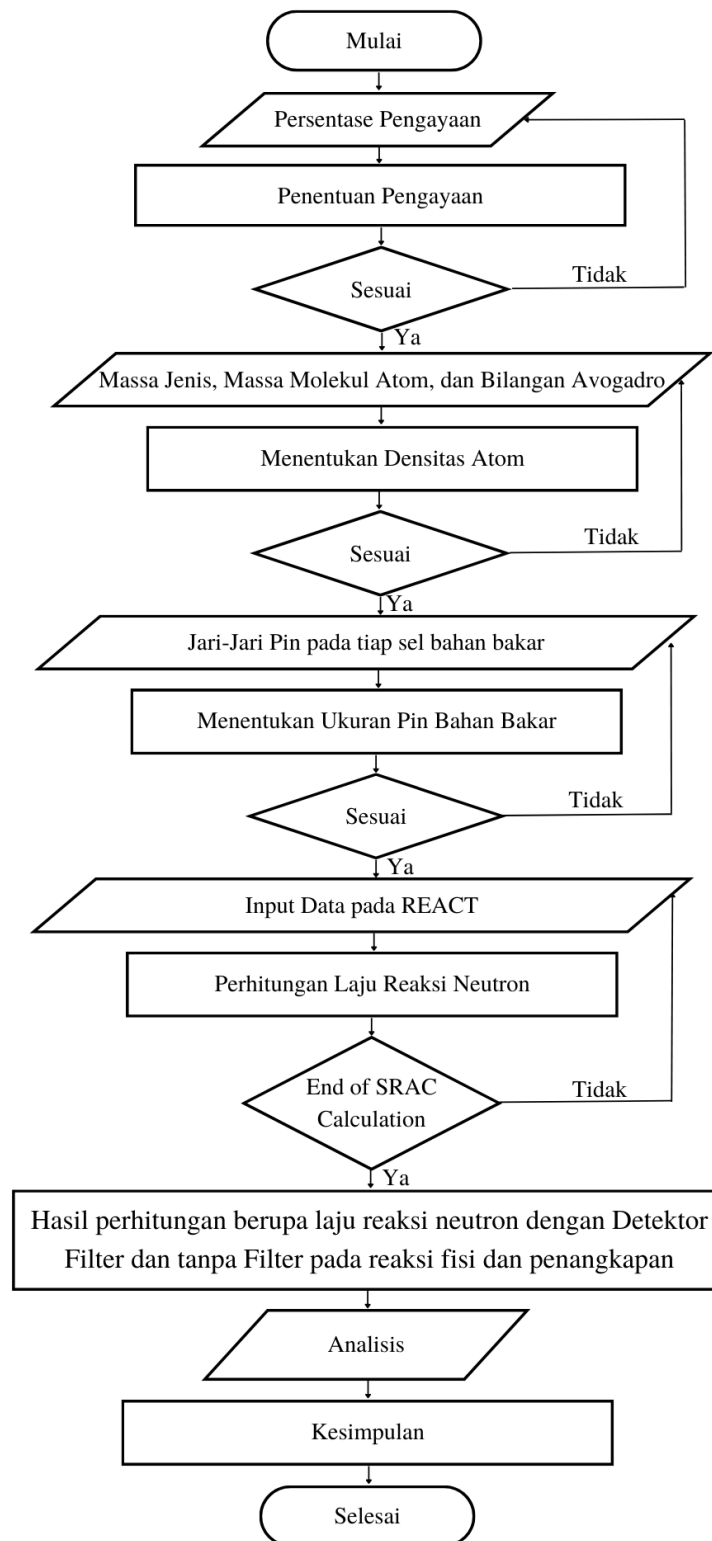
Dengan hasil yang telah ada, maka dapat dilakukan analisis pada hasil datanya. Analisis dilakukan dengan membandingkan dan membahas data yang dihasilkan sesuai dengan penelitian.

3.3.10 Kesimpulan

Dari analisis data yang telah didapatkan dapat diberikan kesimpulan dari hasil dan perhitungannya.

3.4 Diagram Alir

Berikut ini adalah diagram alir dari penelitian.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukannya penelitian, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Nilai laju reaksi pada reaktor yang dideteksi menggunakan detektor dengan filter dan tanpa filter memiliki nilai yang berbeda. Nilai laju reaksi fisi neutron menggunakan detektor dengan filter dan tanpa filter pada Material 1 maupun Material 3 meningkat seiring dengan penaikan persentase pengayaan bahan bakar Uranium-23p5. Sedangkan nilai laju reaksi penangkapan neutron Material 1 maupun Material 3 menggunakan detektor dengan filter ataupun tanpa filter mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase pengayaan.
2. Pada material 1 nilai tertinggi laju reaksi fisi dengan filter $5,03036 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan tanpa filter $1,18015 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³.s. nilai tertinggi laju reaksi penangkapan yaitu dengan filter $11,8401 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan tanpa filter $2,73629 \times 10^{-3}$ reaksi/cm³.s. Pada material 3 nilai tertinggi laju reaksi fisi dengan filter $5,03131 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan tanpa filter $1,18013 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³.s. dan laju reaksi penangkapan dengan filter $11,7083 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³.s dan tanpa filter $2,73624 \times 10^{-3}$ reaksi/cm³.s. Nilai laju neutron dengan filter lebih kecil dibandingkan nilai laju reaksi neutron tanpa filter.

5.2 Saran

Dengan selesainya penelitian ini dapat diberikan saran pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan pengayaan lebih dari 9,5 % untuk menghitung laju reaksi pada reaktor *Gass Cooled Fast Reactor* dengan pengembangan dan standar yang lebih terbaru.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhi, P.M., 2018. *Mengenal Reaktor Nuklir*. Ploteknik Negeri Jakarta, Jakarta.
- Adiwardoyo., Lasman, N., Ruslan. Pratama, M., & Efendi, E. 2010. *Mengenal Reaktor Nuklir & Manfaatnya*. PDIN-BATAN, Jakarta.
- Alimah, S., & Sriyono. 2016. Kajian Sistem Pemurnian Helium Reaktor HTGR Berdaya Kecil. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. **18**(2): 123–133.
- Anggoro, Y. D., D. Dewi, A. T. Yuliyanto, & M. Prapatan. 2013. Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, **15**(1): 69– 79.
- Anshari, R. 2017. A Comparative Study of Small Long-Life Gas-cooled Fast Reactor. *Prosiding Semirata*. **1**(1):1057-1063.
- Ariyanto, S. 2009. *Membelah Massa Menuai Energi: Prinsip Dasar Listrik Tenaga Nuklir*. <http://saung-elm.blogspot.co.id/2010/08/membelah-massa-menuai-energi.html>. Diakses pada 23 November 2022.
- Badan Pusat Statistik. 2022. *Jumlah Penduduk Pertengahan Tahun*, <https://www.bps.go.id/indicator/12/1975/1/jumlah-penduduk-pertengahan-tahun.html>. Diakses pada 26 Januari 2023.
- BATAN. 2010. *Bahan Bakar Reaktor Fisi*. <http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn/924>. Diakses pada 20 November 2022
- BATAN. 2012. *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. <http://www.fatan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltninfonuklir/generasipltn/924>. Diakses pada 2 November 2022.
- BATAN. 2022. *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*, <https://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn>. Diakses pada Tanggal 22 November 2022.

- Dewita, E. 2012. Analisis Potensi Thorium Sebagai Bahan Bahan Nuklir Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, **14**(1): 45-46.
- DOE-GIF, G.I.F. 2002. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Technical Report GIF2002200, GIF.
- Duderstard, J.J., & Hamilton, J. H. 1976. *Nuclear Reaktor Analysis*. Jhon Wiley & Sons, New York.
- Dumaz, P., Allegre, P., Bassi, C., Cadiou, A., Conti, A., Garnier, J.C., Malo, J.Y & Tosello, A. 2007. Gas-cooled fast reactors-Status of CEA preliminary design studies. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 237(15-17), pp. 1618-1627.
- El Wakil, M. 1971. *Nuclear Heat Trasport*. International Textbook Company. New York.
- ESDM. 2012. *Sektor Energi Diproyeksikan Menyumbang Emisi Terbesar*. (Online) tersedia: <http://www.ebtke.esdm.go.id/berita/692-2030-sektorenergi-diproyeksikan-menjadi-penyumbang-emisi-terbesar.html>. Diakses pada 13 Desember 2022.
- Glasstone, S & Edlund, M.C. 1953. *The Eement of Nuclear Reactor Theory*. D Van Nostr& Company Inc., New York.
- Holman, J. P. 1983. *Heat Transfer sixth edition*. Mc Graw Hill. London.
- IAEA (International Atomic Nuclear Energy). 2005. *Thorium Fuel Cycle – Potential Benefits & Challenges*. International Atomic Energy Agency. Austria. **1**(1): 6-10.
- Jeong, C. 2006. Dynamic Analysis of the Thorium Fuel Cycle in C&U Reactors. *KAERI*, pp. 43-60.
- Kementrian Energi & Sumber Daya Mineral. *Energi Baru & Terbarukan*. <http://esdm.go.id/berita/323-energibaru-&-terbarukan/4145-saatnya-mengoptimalkan-pemanfaatanenerginon-fosil.html>. Diakses Pada 2 November 2022.
- Kholiq, I. 2015. Pemanfaatan Energi Alternatif Sebagai Energi Terbarukan Untuk Mendukung Substitusi BBM. *Jurnal IPTEK*, **1**(1): 19(2).
- Kidd, S.W. 2009. *Nuclear Fuel Resource*. Nuclear Engineering H&book, USA.

- Knoll, G.F. 1989. *Radiation Detection & Measurement*. John Wiley & Sons, Singapore.
- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of nuclear Reaktor Physics*. Academic Press, USA.
- Liun, E. 2011. Potensi Energi Alternatif Dalam Sistem Kelistrikan Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV*, **1**(1): 311–322.
- Liun, E. & Sunardi. 2014. Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan & Fosil. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, **16**(3): 119-130.
- Mairing, M. P., & Prihatnadi, H. 2009. Tinjauan Bahan Moderator Untuk Komponen Reaktor Nuklir. *Jurnal Perangkat Nuklir*. **3**(5):. 49–54.
- Martha, R., Mohammad, A.S., & Afdal. 2016. Analisis Laju Reaksi Neutron dalam Sel Bahan Bakar Nuklir pada Reaktor Cepat. *Jurnal Ilmu Fisika(JIF)*, **8**(2): 70-77.
- Mayanti, R., Menik, A., & Fiber, M. 2017. Studi Parameter Burnup Sel Bahan Bakar Berbasis Thorium Nitride Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) Snf2017*. **6**(1): 1-6.
- Nurkholiq, N., Sukmadi, T. & Nugroho, A. (2014). Analisis Perbandingan Metode Logika Fuzzy dengan Jaringan Syaraf Tiruan Backpropagation Pada Peramalan Kebutuhan Energi Listrik Jangka Panjang di Indonesia Sampai Tahun 2022, *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, **3**(2): 245–251.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Tsuchihashi, K. 2002. *General Description & Input Intruction*. Jepang. JAERI, **1**(1): 5, 64, 186.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. JAEA, Japan.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Thuchihashi, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analyses*. JAEA, Japan.
- Riska, D. & Irka, F. 2016. Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reaktor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Undan*. **5**(1): 28 – 34.
- Sari, N.P., Dian, F., & Feriska, HI. 2016. Analisis Neutronik Super Critical Water Reactor (SCWR) dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC & MOX). *Jurnal Fisika Undan*. **5**(1): 47-52.

- Sekimoto, H. 2007. *Nuclear Reactor Theory*. Tokyo Institute of Technology, Tokyo.
- Setiadipura, T. 2010. *Media Nuklir Indonesia: Interaksi Neutron* <https://tsdipura.wordpress.com/2010/08/16/interaksi-neutron/>. Diakses pada 27 November 2022.
- Shafii, M.A. 2015. Perhitungan Penampang Lintang Mikroskopik dalam Sel Bahan Bakar Nuklir. *Spektra: Jurnal Fisika & Aplikasinya*. **16**(1): 23-27.
- Soentono, S. 1998. Bahan Bahan Untuk Industri Reaktor Nuklir, hlm. 1. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi 1*.
- Supriatna, P. 2009. Kajian Awal Pemurnian Gas He Pendingin Primer Reaktor Kogenerasi. *Buku I Prosiding PPI-PDIPTN Pusat Teknologi Akselerator & Proses Bahan-Batan*.
- Susetyo, W. 1988. *Spektrometri Gamma*. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Susilo, J. 2000. Transmutasi Aktinida Minor Dengan BWR Berbahan Bakar Campuran Oksida. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir-IRI DASA MEGA*. **2**(1): 33-45.
- Stacey, W.M. 2001. *Nuclear Reactor Physics*. John Wiley & Sons, New York.
- Syarifah, R., Nabila, NM., Zein, H., Iklimatul, K., Ahmad, MM., & Artoto, A. 2021. Analisis Fraksi Volume Bahan Bakar Uranium Karbida Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan SRAC Code. *Jurnal Jaring SainTek (JJST)*. **3**(1): 13-18.
- The Generation IV International Forum. 2020. *ANNUAL REPORT*. Paris.
- Walter, A. E., & Reynolds, A.B. 1981. *Fast Breeder Reactor*. Pergamon Press, USA.
- Waris, A., Rahmanto, T., Taufik, I., Kurniadi, R., & Su'ud, Z. 2009. Study Of Transuranium Recycling in PWR with 3-D Burnup Analysis using SRAC-COREBN Code. *Indonesian Journal of Physics*. **20**(4): 95-98.
- Wauran, M. 2010. *PLTN Menjamin Ketahanan Penyediaan Listrik Nasional*. Batan, Bandung.

Wiesenack, W. 2012. *Nuclear fuel assembly design & fabrication, Advances in polymer nanocomposites: Types & applications*. Woodhead Publishing Limited.

World Nuclear. 2021. *Nuclear Power Reactors*. <http://www.worldnuclear.org/info/inf32.html>. Diakses pada 22 November 2022

Yoel, D.T., Budi, S., & Iwan, S. 2010. Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Research Article Transmisi*, **12**(1): 8-13.

Zweifel, P. F. 1973. *Reaktor Physics*. McGraw-Hill, New York.