

**PENGARUH PERSENTASE PENGAYAAN BAHAN BAKAR, UKURAN
DAN KONFIGURASI TERAS REAKTOR TERHADAP DESAIN INTI GAS
COOLED FAST REACTOR (GCFR) MODEL TERAS SILINDER (r, z)
DENGAN BAHAN BAKAR DAUR ULANG URANIUM DIOKSIDA (UO₂)**

(SKRIPSI)

Oleh :

Mega Putri Aulia

1917041064



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

**PENGARUH PERSENTASE PENGAYAAN BAHAN BAKAR, UKURAN
DAN KONFIGURASI TERAS REAKTOR TERHADAP DESAIN INTI GAS
COOLED FAST REACTOR (GCFR) MODEL TERAS SILINDER (r, z)
DENGAN BAHAN BAKAR DAUR ULANG URANIUM DIOKSIDA (UO₂)**

Oleh

Mega Putri Aulia

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang pengaruh persentase pengayaan bahan bakar, ukuran dan konfigurasi teras reaktor terhadap desain inti *gas cooled fast reactor* (GCFR) model teras silinder (r, z) dengan bahan bakar daur ulang uranium dioksida (UO₂). Penelitian ini dilakukan dengan cara menentukan persentase bahan bakar yang memenuhi standar kekritisitas, menentukan ukuran dan konfigurasi teras reaktor yang memenuhi standar kekritisitas selanjutnya menentukan distribusi rapat daya pada reaktor GCFR. Persentase pengayaan bahan bakar yang digunakan yaitu dari pengayaan 8,5%-10% dengan rentang 0,1%. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan persentase pengayaan bahan bakar serta ukuran teras reaktor yang memenuhi standar kekritisitas yaitu pada persentase pengayaan 9,9% pada radius teras reaktor sebesar 210 cm dan tinggi teras reaktor sebesar 190 cm yang menghasilkan $k_{\text{eff}} = 1,0000008$. Kemudian pada penelitian ini juga menghasilkan nilai rapat daya rata-rata yang diperoleh pada arah radial sebesar 66,36443 Watt/cm³ dengan memiliki faktor puncak daya sebesar 1,84058 dan rapat daya rata-rata yang diperoleh pada arah aksial sebesar 90,6886 Watt/cm³ dan memiliki faktor puncak daya sebesar 1,3469.

Kata Kunci: GCFR, rapat daya, SRAC, k_{eff} .

THE EFFECT OF PERCENTAGE OF FUEL ENRICHMENT, SIZE AND CONFIGURATION OF REACTOR CORE ON GAS COOLED FAST REACTOR (GCFR) CYLINDER CORE MODEL (r, z) DESIGN WITH RECYCLED URANIUM DIOXIDE (UO₂)

By

Mega Putri Aulia

ABSTRACT

Research on the effect of fuel enrichment percentage, size and configuration of the reactor core on Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) cylinder core model (r, z) design with recycled uranium dioxide (UO₂) fuel has been carried out. This research was conducted by determining the percentage of fuel, reactor core size and configuration which fulfill the critical standard and determining the distribution of power density at GCFR reactor. The percentage of fuel enrichment was 8.5% -10% with a range of 0.1%. The result of the research in enrichment 9,9% at radius of 210 cm and height of 190 cm which results $k_{eff} = 1,0000008$. This study also produced an average power density in radial of 66,36443 Watt/cm³ with peak power factor of 1,84058 and average power density in axial of 90,6886 Watt/cm³ with peak power factor of 1,3469.

Keyword: GCFR, power density, SRAC, k_{eff} .

**PENGARUH PERSENTASE PENGAYAAN BAHAN BAKAR, UKURAN
DAN KONFIGURASI TERAS REAKTOR TERHADAP DESAIN INTI GAS
COOLED FAST REACTOR (GCFR) MODEL TERAS SILINDER (r, z)
DENGAN BAHAN BAKAR DAUR ULANG URANIUM DIOKSIDA (UO₂)**

Oleh

Mega Putri Aulia

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 Skripsi : **Pengaruh Persentase Pengayaan Bahan Bakar, Ukuran Dan Konfigurasi Teras Reaktor Terhadap Desain Inti *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) Model Teras Silinder (r, z) Dengan Bahan Bakar Daur Ulang Uranium Dioksida (UO₂)**

Nama Mahasiswa : **Mega Putri Aulia**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1917041064

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

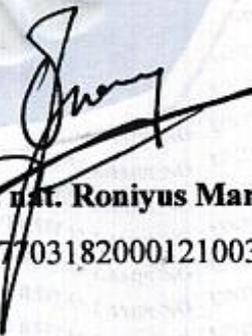
Pembimbing I

Pembimbing II



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

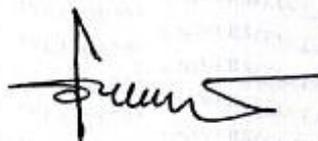
NIP. 197512192000122003



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

NIP. 197703182000121003

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA



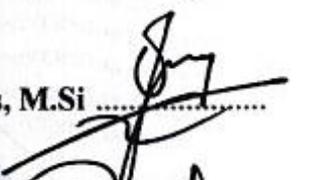
Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.

NIP. 198010102005011002

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 : **26 Juli 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 sayasendiri.

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

Bandar Lampung, 26 Juli 2023

Penulis,



Mega Putri Aulia

NPM. 1917041064

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Mega Putri Aulia, dilahirkan di Kabupaten Lampung Timur, 28 Agustus 2001. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Safri. dan Ibu Yasnida. Penulis memiliki satu orang kakak laki-laki bernama Riza Rizky Perdana dan satu orang adik perempuan bernama Cantika Romadhona.

Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Gunung Pasir Jaya pada tahun 2013, SMPN 2 Sekampung Udik pada tahun 2016, SMAN 1 Sekampung Udik pada tahun 2019. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2019 melalui jalur penerimaan SBMPTN.

Pada tahun 2022 penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Badan Standarisasi Nasional (BSN), Jakarta Pusat, Daerah Ibukota Jakarta dengan judul laporan PKL “Analisis Pengaruh SNI ISO/IEC 17025:2017 Terhadap Jumlah Laboratorium Penguji Terakreditasi Pada Parameter Tekanan Hidrostatik PVC”. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2022 di Desa Wana, Kec. Melinting, Kab. Lampung Timur.

Dalam bidang organisasi penulis sebagai anggota bidang sains dan teknologi HIMAFI FMIPA UNILA periode 2019-2020 dan juga sebagai anggota komunikasi dan informasi HIMAFI FMIPA UNILA periode 2020-2021.

MOTTO

“Tidak ada suatu pemberian yang lebih utama dari orang tua kepada anaknya selain pendidikan yang sangat baik.”

(H.R. Al Hakim : 7679)

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu, Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui.”

(QS. Al Baqarah: 216)

PERSEMBAHAN

**Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah Subhanahu wata'ala,
karya ini kupersembahkan kepada:**

Kedua Orang tuaku

Ayahandaku Safri & Ibundaku Yasnida

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Persentase Pengayaan Bahan Bakar, Ukuran Dan Konfigurasi Teras Reaktor Terhadap Desain Inti *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) Model Teras Silinder (r, z) Dengan Bahan Bakar Daur Ulang Uranium Dioksida (UO₂)”**. Skripsi ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan TA dan juga syarat memenuhi salah satu mata kuliah wajib di Universitas Lampung.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

Bandar Lampung, 26 Juli 2023

Mega Putri Aulia
NPM. 1917041064

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Persentase Pengayaan Bahan Bakar, Ukuran Dan Konfigurasi Teras Reaktor Terhadap Desain Inti *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) Model Teras Silinder (r, z) Dengan Bahan Bakar Daur Ulang Uranium Dioksida (UO₂)”**. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang turut membantu. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terima kasih kepada:

1. 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. Gurum Ahmad Pauzi, S. Si., M. T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
5. Kedua orangtuaku, Bapak Safri dan Ibu Yasnida, serta kakakku, Riza Rizky Perdana dan Adikku Cantika Romadhona yang telah mendo'akan serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Mesy Meilani Putri, Nenchy Anugrah, Fina Damayanti, Noeris Yuniar, Arin Sadita selaku sahabat sekaligus partner diskusi dalam mengerjakan

skripsi sekaligus membantu dan mendoakan dalam menyelesaikan kuliah di Jurusan Fisika Universitas Lampung

7. Sahabat-sahabatku Sari Dewi, Ayu Agustin, Alfi Miftahul, Amelia dan Desti Ayu yang berada diluar kampus yang selalu memberikan dukungan dalam menyelesaikan kuliah di Jurusan Fisika Universitas Lampung
8. Partner satu bimbingan skripsi Tri Lestari dan Muhammad Arif Jarodi yang telah membantu dan memberi dukungan dalam pengerjaan tugas akhir.

Semoga Allah SWT memberikan rahmat dan hidayah-Nya, serta memberkahi hidup kita. Aamiin.

Bandar Lampung, 26 Juli 2023

Mega Putri Aulia

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
<i>ABSRTACT</i>	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Reaktor Nuklir	6
2.2 Komponen Reaktor Nuklir	7

2.3	Reaksi Fisi	11
2.4	Reaksi Fusi	12
2.5	<i>Gas Cooled Fast Reactor</i>	12
2.6	Faktor Multipikasi (k_{eff})	13
2.7	Bahan Bakar Reaktor.....	15
2.7.1	Uranium.....	16
2.7.2	Plutonium.....	17
2.7.3	Daur Ulang Bahan Bakar Nuklir.....	17
2.8	<i>Burn-Up</i> Pada Bahan Nuklir	18
2.9	Persamaan Difusi Neutron.....	19
2.10	<i>Standard Thermal Reactor Analysis Code (SRAC)</i>	20
III.	METODE PENELITIAN	24
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	24
3.2	Alat dan Bahan.....	24
3.3	Prosedur Penelitian	24
3.3.1	Menentukan Bentuk Geometri <i>Cell</i> dan Ukuran Pin Bahan Bakar.....	24
3.3.2	Menentukan Pengayaan (<i>Enrichment</i>) dan Densitas Atom	25
3.3.2.1	Pengayaan (<i>Enrichment</i>)	25
3.3.2.2	Densitas Atom.....	25
3.3.3.	Perhitungan <i>Burn-Up</i> Bahan Bakar	25
3.3.4.	Menentukan Ukuran dan Konfigurasi Teras.....	26
3.3.5.	Perhitungan dengan Modul CITATION	26
3.3.6.	Melakukan Pengecekan <i>Output</i> Pada CITATION.....	26
3.3.7.	Analisis Hasil CITATION	27
3.4.	Diagram Alir	28
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1	Penentuan Bentuk Geometri Sel dan Ukuran Pin Sel Bahan Bakar	30
4.2	Perhitungan Densitas Atom	33
4.2.1	Menentukan Pengayaan	33
4.2.2	Menghitung Densitas Atom	33
4.3	Perhitungan <i>Burn Up</i> Pada Bahan Bakar.....	35
4.4	Desain Teras Reaktor Menggunakan Program CITATION	40
4.4.1	CITATION <i>case 1</i>	44
4.4.2	CITATION <i>case 2</i>	46
4.4.3	CITATION <i>case 3</i>	48
4.4.4	CITATION <i>case 4</i>	49
4.4.5	CITATION <i>case 5</i>	51
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	55

DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	61

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Batang Kendali (Oludare <i>et al.</i> , 2014).....	8
Gambar 2.2 Skema reaksi fisi berantai (Duderstard and Hamilton, 1976).....	11
Gambar 2.3 Skema <i>Gas Cooled Fast Reactor</i> (GCFR) (GIF, 2013)	13
Gambar 2.4 Grafik Banyaknya Neutron Terhadap Waktu Di Dalam Reaktor (Duderstadt dan Hamilton, 1976).....	15
Gambar 2.5 Struktur sistem SRAC (Okumura <i>et al.</i> , 2002).....	23
Gambar 3.1 <i>Output</i> SRAC (Okumura <i>et al.</i> , 2002).	26
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 4.1 Geometri dan pembagian area sel bahan bakar.	30
Gambar 4.2 Radius (r) sel bahan bakar.	32
Gambar 4.3 Nilai k -eff pada tiap periode burn up dengan pengayaan 8,5-10%..	36
Gambar 4.4 Densitas atom U^{235} pada tiap periode <i>burn-up</i>	37
Gambar 4.5 Densitas atom U^{238} pada tiap periode <i>burn-up</i>	38
Gambar 4.6 Densitas atom Pu^{239} pada tiap periode <i>burn-up</i>	39
Gambar 4.7 Geometri Teras Reaktor.....	40
Gambar 4.8 (a) Pembagian region arah radial (5 region), (b) Pembagian region arah aksial (7 region).	41
Gambar 4.9 Syarat batas dengan bagian $\frac{1}{2}$ teras reaktor.....	42
Gambar 4.10 Konfigurasi teras reaktor <i>case 1</i>	45

Gambar 4. 11 Konfigurasi teras reaktor <i>case 2</i>	46
Gambar 4. 12 Konfigurasi teras reaktor <i>case 3</i>	48
Gambar 4. 13 Konfigurasi teras reaktor <i>case 4</i>	49
Gambar 4. 14 Konfigurasi teras reaktor <i>case 5</i>	51
Gambar 4. 15 Rapat daya (ρ) pada arah radial (r) teras reaktor.....	52
Gambar 4. 16 Rapat daya (ρ) pada arah aksial (z) teras reaktor.	53

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4. 1 Spesifikasi Sel Bahan Bakar.....	29
Tabel 4. 2 Radius Sel Bahan Bakar.....	32
Tabel 4. 3 Densitas Atom Bahan Bakar.....	34
Tabel 4. 4 Densitas Atom Selongsong dan Pendingin	35
Tabel 4. 5 Perhitungan <i>Burn Up</i> Selama 70 Tahun.....	36
Tabel 4.6 Keluaran <i>Burn Up</i> Pada File MACRO.....	39
Tabel 4. 7 Nilai k_{eff} dengan variasi radius (r) teras reaktor pada tinggi (z) 190 cm	43
Tabel 4. 8 Nilai k_{eff} dengan variasi tinggi (z) teras reaktor pada radius (r) 210 cm.	44
Tabel 4. 9 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada case 1.....	45
Tabel 4. 10 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada case 2....	47
Tabel 4. 11 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada case 3....	48
Tabel 4. 12 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada case 4....	50
Tabel 4. 13 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada case 5....	51

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi nasional khususnya kebutuhan energi listrik, semakin meningkat dari tahun ke tahun. Mengandalkan sumber energi yang ada saja tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan energi nasional, karena sumber energi kita sudah sangat terkuras dalam beberapa tahun terakhir. Oleh karena itu diperlukan sumber energi alternatif lain yang cukup potensial untuk menggantikannya misalnya energi terbaru dan terbarukan (Lubis, 2007).

Energi nuklir adalah sumber energi baru yang dapat dimanfaatkan dan dikembangkan dengan mempertimbangkan berbagai aspek seperti aspek keselamatan, keekonomian dan keamanan pasokan energi nasional. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah pilihan alternatif energi terakhir yang harus dikembangkan karena kebutuhan energi dan target kebijakan energi nasional tidak dapat tercapai tanpa memanfaatkan PLTN. Dibutuhkan PLTN untuk memasok kebutuhan energi listrik pada tahun 2050 dengan kapasitas 64.000 MW. (Setya dan Lulus, 2016). Pengalihan energi dengan bahan bakar minyak bumi atau produk fosil ke energi terbarukan harus dilaksanakan dan diperkuat, termasuk pengembangan energi nuklir, karena secara bersamaan dapat mengatasi kekurangan bahan bakar dan kebutuhan listrik yang sangat besar. Pemanfaatan energi nuklir sangat diperlukan, karena energi nuklir dapat mengatasi kekurangan tenaga listrik, kekurangan bahan bakar minyak, krisis pangan, krisis kesehatan dan air bersih di masa depan (Hakim, 2020).

PLTN pada prinsipnya menggunakan reaktor nuklir untuk menghasilkan energi listrik. Reaktor nuklir adalah suatu tempat yang dirancang sehingga reaksi pembelahan inti secara berantai dapat terjadi didalamnya (Nurkholilah dan Fitriyani, 2019). Teknologi reaktor nuklir mengalami perkembangan yang cukup pesat, dari reaktor generasi I hingga generasi IV. Reaktor nuklir yang dikembangkan pada tahun 1950 hingga tahun 1960 adalah reaktor nuklir generasi 1. Reaktor nuklir generasi II dibangun sejak tahun 1960 hingga tahun 1980. Beberapa contoh jenis reaktor generasi II adalah PWR (*Pressurized Water Reactor*) dan HTR (*High Temperature Reactor*). Sedangkan reaktor generasi III adalah modifikasi dari reaktor generasi II dengan tujuan untuk meningkatkan aspek keselamatan, kehandalan dan ekonomi. Contoh reaktor nuklir generasi III adalah KNSP (*Korean Standart Nuclear Power Plant*) yang adalah pengembangan dari PWR (Harto, 2016). Jenis reaktor nuklir yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR). GCFR adalah salah satu jenis reaktor nuklir generasi IV. Reaktor generasi IV adalah reaktor yang sedang dikembangkan saat ini, reaktor generasi ini adalah jenis reaktor daya yang lebih inovatif dari generasi sebelumnya (Nurkholilah dan Fitriyani, 2019). Reaktor jenis ini menggunakan spektrum cepat dari neutron serta menggunakan jenis pendingin tertentu berupa gas seperti helium (He), karbon dioksida (CO₂), atau N₂O₄ serta memiliki siklus bahan bakar tertutup di mana bahan bakar bekas dapat didaur ulang (GIF, 2018).

Didalam reaktor terjadi reaksi yang merupakan suatu reaksi fisi berantai dimana reaksi tersebut dihasilkan dari bahan bakar. Bahan bakar reaktor fisi adalah radioisotop yang dapat membelah (fisil) dan dapat diperoleh di alam. Namun beberapa bahan fisil terbuat dari bahan yang dapat membiak (fertil), maka beberapa jenis bahan fertil dibutuhkan sebagai bahan baku pembuat bahan fisil dan dapat digolongkan sebagai bahan bakar reaktor fisi (BATAN, 2015). Perbedaan utama pengoperasian reaktor nuklir dengan pembangkit listrik konvensional adalah pada bahan bakar yang digunakan dan sumber energinya. Sumber energi pembangkit listrik tradisional berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, yang menyebabkan polusi dan pencemaran udara. Sedangkan dalam reaktor nuklir, sumber energi berasal dari reaksi fisi. Bahan bakar reaktor nuklir terbagi menjadi dua jenis bahan,

yaitu bahan fisil seperti U^{235} dan Pu^{239} serta bahan fertil seperti U^{238} dan Th^{232} (Novalianda *et al.*, 2020).

U^{235} adalah bahan bakar utama yang umum digunakan dalam inti reaktor nuklir saat ini. Namun, karena jumlahnya yang terbatas, diperlukan pengayaan (*enrichment*) agar densitas atomya bertambah (IAEA, 2014). Selain menghasilkan listrik, penggunaan uranium sebagai bahan bakar PLTN juga akan menghasilkan limbah nuklir pada akhir operasinya (Su'ud dan Sekimoto, 2013). Di antara berbagai jenis limbah nuklir yang dihasilkan, salah satu yang berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar reaktor lainnya adalah Plutonium (Pu). Pu dihasilkan dari reaksi penangkapan neutron yang terjadi pada U^{238} . Terdapat lima isotop yang dominan dari reaksi fisi yang terjadi di reaktor nuklir yaitu Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , dan Pu^{242} (Novalianda *et al.*, 2016). Dari kelima isotop tersebut yang bisa digunakan kembali sebagai bahan bakar reaktor lainnya yaitu Pu^{239} dan Pu^{241} saja (Novalianda *et al.*, 2018). Sumber bahan bakar bekas dalam penggunaannya memberikan banyak keuntungan seperti berkurangnya beban limbah dan penggunaan kembali plutonium sangat efektif untuk menghemat sumber bahan bakar uranium. Penggunaan kembali plutonium sebagai bahan bakar juga penting dalam mencegah plutonium untuk dimanfaatkan dan diubah menjadi bahan nuklir (Susilo, 2002).

Desain teras reaktor adalah tahap awal dan salah satu bagian krusial dalam merancang reaktor nuklir supaya membentuk sistem PLTN yang aman, efektif dan ekonomis pada saat operasi (Subkhi *et al.*, 2015). Bentuk teras reaktor di buat berlubang (kolom) yang berfungsi sebagai tempat dari beberapa rangkaian komponen utama, yaitu bahan bakar, moderator, reflektor, batang kendali dan perisai. Teras reaktor terbuat dari logam yang tahan panas dan tahan korosi (Adiwardojo *et al.*, 2010).

Studi mengenai *Gas-Cooled Fast Reactor* (GCFR) telah beberapa kali dilakukan. Novalianda (2020) melakukan desain *Gas-Cooled Fast Reactor* berbahan bakar Uranium Nitride dengan pengayaan yang digunakan yaitu sebesar sebesar 9%,

9,5% dan 10%. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa desain GCFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride dengan pengayaan 9,5% U^{235} dan fraksi volume 60% fuel, 10% *cladding* dan 30 % *coolant* , reaktor mencapai kondisi kritis pada $k_{\text{eff}} > 1$ (1,008 –1,051). Pada tahun 2016, Novalianda juga melakukan penelitian mengenai perhitungan sel bahan bakar berbasis Uranium Oksida (UO_2) pada GCFR dengan hasil yaitu sel bahan bakar UO_2 menggunakan pengayaan U^{235} sebesar 10% dengan fraksi volume 54,5 %, *cladding* 15% dan *coolant* sebesar 30,5 % diperoleh k_{eff} sebesar 1,003.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan *burn up* (pembakaran) untuk mengetahui kekritisan teras reaktor. Mengacu dari beberapa penelitian sebelumnya, pada penelitian ini dilakukan desain GCFR $\frac{1}{2}$ bagian inti teras reaktor. Pemodelan teras reaktor yang akan digunakan yaitu model teras silinder (r, z) 2 dimensi menggunakan pendingin berupa Helium dan menggunakan bahan bakar daur ulang. Pengayaan U^{235} yaitu sebesar 8,5 % - 10 % dengan rentang 0,1%. Tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu untuk menghasilkan desain reaktor yang memenuhi kriteria keselamatan melalui analisis neutronik. Analisis dilakukan dengan menggunakan CITATION pada program *Standard thermal Reactor Analysis Code* (SRAC) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) di *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) Jepang (Okumura, 2006).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimanakah pengaruh persentase pengayaan bahan bakar, ukuran dan konfigurasi teras reaktor pada desain reaktor GCFR model teras silinder (r, z) yang memenuhi standar kekritisian?
2. Bagaimanakah distribusi rapat daya (ρ) yang dihasilkan pada reaktor GCFR model teras silinder (r, z) dengan bahan bakar daur ulang uranium dioksida yang memenuhi standar kekritisian?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan, sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh persentase pengayaan bahan bakar serta ukuran dan konfigurasi teras reaktor yang memenuhi standar kekritisan dalam mendesain GCFR.
2. Mengetahui distribusi rapat daya (ρ) pada reaktor GCFR yang memenuhi standar keselamatan.

2.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- 1 Desain reaktor yang akan dibuat adalah reaktor jenis GCFR dengan model teras silinder (r, z).
- 2 Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar daur ulang uranium dioksida.
- 3 Pendingin menggunakan Helium.
- 4 Pengayaan bahan bakar divariasikan antara 8,5%-10%.
- 5 Radius (r) teras reaktor divariasikan antara 200-220 cm.
- 6 Tinggi (z) teras reaktor divariasikan antara 180-280 cm.
- 7 Perhitungan pada teras reaktor (*core*) dilakukan secara 2 dimensi (r, z) pada $\frac{1}{2}$ bagian teras silinder.
- 8 Sistem perhitungan menggunakan SRAC modul PIJ BURN dan *CITATION*.

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 mengenai solusi permasalahan krisis energi.
3. Memberikan informasi mengenai pemanfaatan sumber daya energi nuklir.
4. Memberikan informasi ilmiah mengenai desain reaktor nuklir yang memiliki efisiensi tinggi dan memenuhi standar kekritisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Nuklir

Awal mula dikembangkannya reaktor nuklir sebagai sumber energi dimulai pada tahun 1950-an. Era emas untuk pembangkit reaktor nuklir yaitu pada tahun 1950 sampai 1970 karena penggunaan reaktor nuklir mendapat banyak dukungan berbagai pihak negara. Pada tahun 1986 terjadi kecelakaan pada reaktor nuklir *Chernobyl* yang adalah kecelakaan terburuk dalam sejarah reaktor nuklir. Namun kejadian tersebut menjadi titik balik perkembangan reaktor nuklir karena pada saat itu terdapat pelajaran yang bisa diperoleh, khususnya bagi ilmuwan dalam bidang reaktor nuklir. Kejadian ini adalah awal dari perubahan besar dalam reaktor nuklir yaitu munculnya era nuklir kedua, ditandai dengan persyaratan yang kuat untuk keselamatan pasif, penanganan limbah nuklir secara tuntas, penggunaan bahan bakar uranium alam secara optimal serta persaingan ekonomi (Su'ud, 1999).

Reaktor nuklir adalah tempat di mana reaksi fisi berantai atau reaksi pembelahan inti dalam nuklir yang terkendali dan berkelanjutan untuk menghasilkan energi, radioisotop dan nuklida baru. Terkendali yang dimaksud dalam hal ini berarti jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan sesuai dengan kebutuhan. Didalam reaktor nuklir terdapat neutron yang digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Terdapat dua jenis material yang dapat mengalami pembelahan atau fisi dalam reaktor, yaitu material fisil dan material fertil. Material yang akan mengalami pembelahan ketika ditembak oleh sebuah neutron dengan sejumlah energi disebut

dengan material fisil, sedangkan material fertil adalah material yang menangkap neutron dan melalui peluruhan radioaktif akan berubah menjadi material fisil (Lewis, 2008) U^{233} , U^{235} , Pu^{239} , dan Pu^{241} merupakan contoh dari material fisil. Sedangkan yang Th^{232} , U^{238} dan Pu^{238} termasuk kedalam material fertil (Zhang *et al.*, 2014).

2.2 Komponen Reaktor Nuklir

Sebuah reaktor nuklir harus didukung oleh beberapa fasilitas yang memenuhi standar kualitas yang tinggi dan handal yang disebut sebagai komponen reaktor. Sehingga kemungkinan terjadinya kecelakaan atau kegagalan komponen tersebut sangat kecil. Adapun komponen dari sebuah reaktor nuklir adalah sebagai berikut:

1. Bahan bakar (*fuel*)

Didalam reaktor nuklir, bahan bakar berfungsi untuk menghasilkan energi dari reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor. Bahan bakar nuklir terbagi menjadi dua jenis yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung dapat membelah apabila menangkap neutron, sedangkan bahan fertil merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah setelah menangkap neutron tetapi akan membentuk bahan fisil. U^{235} , U^{233} , Pu^{235} dan Th^{232} adalah bahan yang paling banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir (Benedict *et al.*, 1981).

2. Moderator

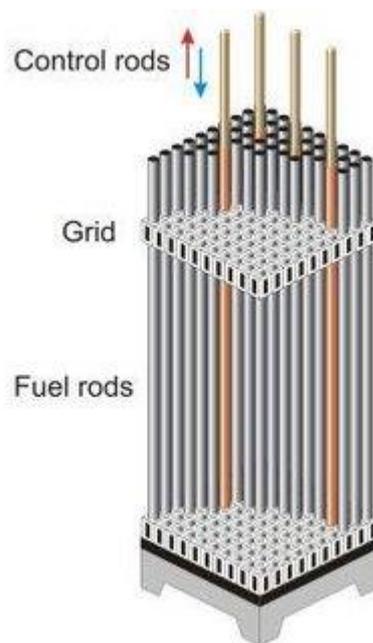
Lapisan kedua komponen luar yang berhubungan langsung dengan bahan bakar disebut dengan moderator. Moderator berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (2 MeV) menjadi energi neutron lambat (0,02–0,04 eV). Sehingga neutron dapat menyebabkan reaksi fisi berikutnya. Fungsi lain dari moderator yaitu sebagai pendingin primer. Bahan moderator memiliki beberapa syarat yaitu atom dengan nomor massa kecil, memiliki tampang lintang serapan neutron yang kecil, memiliki tampang lintang hamburan yang besar, sesuai dengan jenis reaktor yang akan

didesain dan memiliki daya hantar panas yang baik serta tahan terhadap korosi. Moderator yang umum digunakan adalah air (Lewis, 2008).

3. Batang Kendali (*Control Rod*)

Batang kendali merupakan komponen reaktor yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Bahan yang diperlukan untuk batang kendali reaktor harus memiliki daya serap neutron yang tinggi dan memiliki umur panjang atau tidak mudah terbakar. Karakteristik yang dimiliki material batang kendali yang digunakan dalam reaktor nuklir yaitu sifat konduktivitas panasnya cukup, tahan terhadap panas dan radiasi, tidak mudah korosif, material harus cukup kuat untuk mematikan reaktor nuklir, dan memilikiampang lintang serapan neutron yang tinggi (Chanakya *et al.*, 2001).

Gambar dari batang kendali pada suatu reaktor ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Batang Kendali (Oludare *et al.*, 2014).

4. Reflektor (*Reflector*)

Ketika reaksi fisi berlangsung, neutron yang merupakan hasil dari reaksi tersebut akan terpental dan sebagian akan menempel pada batang kendali atau dapat juga

terabsorpsi oleh moderator, pendingin dan bahan lainnya. Neutron yang terabsorpsi kemudian akan menghilang sehingga dapat menurunkan terjadinya reaksi fisi berantai. Hal ini harus diminimalisir yaitu dengan cara mengelilingi atau menyelubungi teras reaktor dengan suatu material yang dapat memantulkan kembali neutron tersebut, material ini sering disebut reflektor. Grafit dan Berilium merupakan bahan yang dapat digunakan sebagai reflektor (Cinantya dan Fitriyani, 2014).

5. Bejana reaktor (*Reactor vessel*)

Bejana reaktor merupakan suatu wadah memiliki dinding yang kuat dan dapat menampung inti dari reaktor daya. Bejana ini berisi moderator, reflektor, pelindung termal dan batang kontrol (Cinantya dan Fitriyani, 2014).

6. Pelindung (*Shielding*)

Shielding merupakan pelindung yang dirancang khusus untuk melindungi pengoperasi agar terhindar dari paparan radiasi bahan bakar reaktor yang bersifat radioaktif. Selama reaksi fisi berlangsung akan terdapat paparan partikel alfa, beta dan sinar gamma serta neutron. Lapisan timbal atau beton tebal dapat menghentikan sinar gamma dan lapisan tebal logam atau plastik dapat digunakan untuk menghentikan partikel alfa dan beta (Cinantya dan Fitriyani, 2014).

7. Pendingin (*Coolant*)

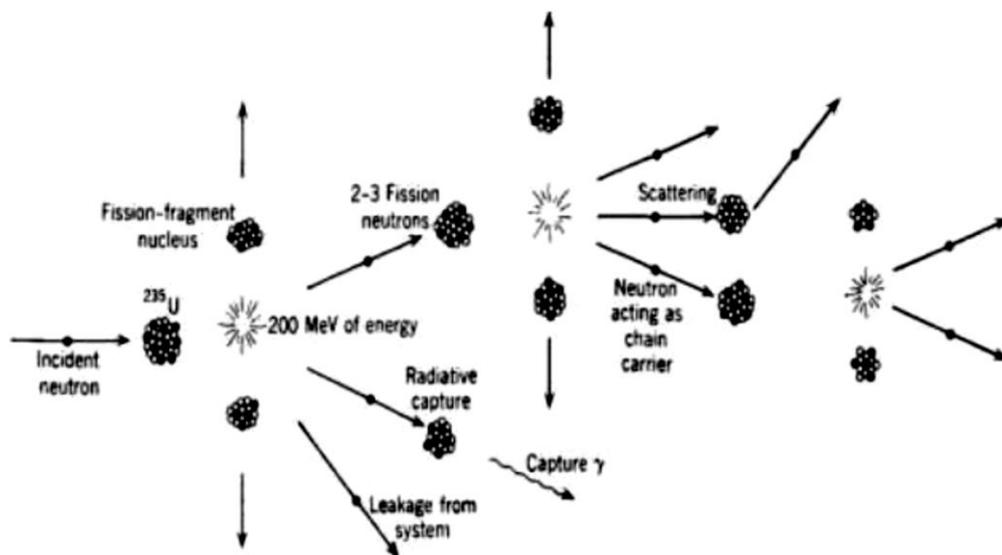
Pendingin atau *coolant* merupakan bahan yang berfungsi untuk menghantarkan panas yang dihasilkan oleh teras reaktor selama berlangsungnya reaksi fisi. Pendingin ini menghantarkan panas ke medium lain atau bila pendingin ini berupa air, dapat berubah menjadi uap dan kemudian menggerakkan turbin generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Pendingin harus memiliki titik leleh yang rendah dan titik didih yang tinggi. Selain itu, bahan yang digunakan sebagai pendingin tidak boleh bersifat korosif terhadap material yang kontak dengannya dan harus memiliki koefisien transfer panas yang tinggi. Bahan yang digunakan

sebagai pendingin yaitu logam cair seperti Sodium atau campuran Sodium dan Potasium serta pendingin lainnya seperti air, baik itu air ringan ataupun air berat, gas (udara, CO₂, Hidrogen dan Helium) (Mairing dan Prihatnadi, 2009).

Helium merupakan salah satu jenis *coolant* yang memiliki kelebihan dari *coolant* yang lainnya yang bersifat *inert* (sukar bereaksi dengan unsur lain). Gas Helium digunakan sebagai pendingin karena karakteristiknya sebagai gas ideal/gas *inert*, tidak mengalami perubahan sifat fisik maupun kimia pada temperatur sangat tinggi, tidak bereaksi dengan gas/zat lain, efektif untuk keperluan perpindahan panas dan mudah dimampatkan. Gas helium sangat tepat dijadikan sebagai fluida pendingin untuk transfer panas pada reaktor dengan temperatur sangat tinggi (untuk HTGR, VHTR dan jenis *gas cooled reactor*), mengingat karakteristik dari gas helium sebagai gas ideal/gas *inert*, tidak mengalami perubahan sifat fisik maupun kimia pada temperatur relatif sangat tinggi, tidak bereaksi dengan gas/zat lainnya, efektif untuk keperluan *heat transfer* dan mudah dimampatkan. Karakteristik gas helium bisa bertahan seperti ini jika kemurniannya (*purity*) bisa dijaga dengan baik, namun demikian unsur-unsur gas pengotor bias muncul dari akibat kebocoran orde mikro pada *system shield* antar sambungan pipa pendingin, sehingga gas pengotor (*impurity gas*) memungkinkan masuk ke dalam sistem pendingin. Pendingin harus memiliki titik leleh yang rendah dan titik didih yang tinggi. Selain itu, bahan yang digunakan sebagai pendingin tidak boleh bersifat korosif terhadap material yang kontak dengannya dan harus memiliki koefisien perpindahan panas yang tinggi (Mairing *et al.*, 2009).

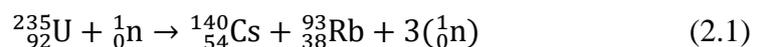
2.3 Reaksi Fisi

Reaksi fisi terjadi di dalam teras reaktor, dimana bagian terkecil dari penyusun teras reaktor dinamakan sel bahan bakar. Fisi nuklir adalah sebuah inti berat yang ditumbuk oleh partikel (misalnya neutron) dapat membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan beberapa partikel lain. Contoh reaksi fisi nuklir ini adalah uranium yang ditumbuk atau menyerap neutron lambat yang akan menghasilkan neutron lain menjadi dua buah inti atom yang lebih ringan. Neutron ini mampu menumbuk (diserap) kembali oleh inti uranium untuk membentuk suatu reaksi fisi berikutnya. (Ahied, 2015). Reaksi fisi dapat menimbulkan reaksi berantai dalam kondisi tertentu, dimana neutron yang dipancarkan oleh satu fisi dapat menghasilkan fisi tambahan, dengan pelepasan energi yang sangat signifikan (Ripani, 2015).



Gambar 2.2. Skema reaksi fisi berantai (Duderstard and Hamilton, 1976).

Contoh reaksi fisi yang sering digunakan adalah reaksi pembelahan unsur U^{235} seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.1.



Pada proses reaksi tersebut, uranium tereksitasi setelah menyerap neutron dan kemudian membelah. Reaksi fisi juga melepaskan energi yang sangat besar untuk yaitu sekitar 200 MeV. Jika reaksi fisi berlangsung tanpa dikendalikan, maka akan

terjadi reaksi berantai yang disertai pembentukan atau pelepasan energi yang sangat besar dan mampu mengakibatkan kerusakan yang luar biasa, seperti ledakan bom atom.

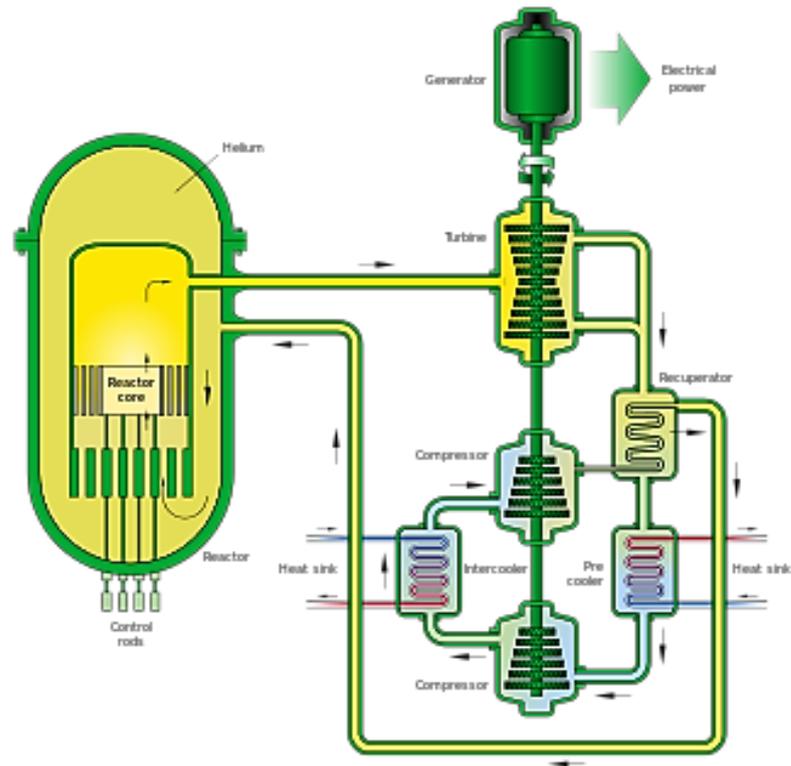
2.4 Reaksi Fusi

Reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat disertai pelepasan energi disebut dengan reaksi fusi. Reaksi fusi akan menghasilkan energi (panas) yang amat sangat tinggi, jauh lebih tinggi daripada panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi. Mengingat energi yang dihasilkan reaksi fusi amat sangat tinggi (panas), maka salah satu energi alternatif untuk masa mendatang adalah energi dari reaksi fusi. Reaksi fusi sejauh ini masih dalam taraf pengembangan lebih lanjut untuk mendapatkan kepastian keselamatan dalam penggunaannya. Reaksi fusi ini tidak semudah dengan reaksi fisi, hal ini dikarenakan reaksi fusi inti atom sama-sama bermuatan positif, maka dibutuhkan gaya untuk dapat membuat reaksi fusi antara lain dengan diberikan tekanan yang tinggi seperti laser dan diberikan temperature yang tinggi. Pemberian tekanan dan temperature yang tinggi akan membuat gas terionisasi sehingga menjadi plasma (gas bermuatan) (Maemunah *et al.*, 2019).

2.5 Gas Cooled Fast Reactor (GCFR)

Salah satu konsep dari enam jenis reaktor nuklir generasi IV adalah *Gas Cooled Fast Reactor*. Lima jenis reaktor lainnya yaitu *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR), *Molten Salt Reactor* (MSR), *Sodium Cooled Reactor* (SFR), *Supercritical Water Cooled Reactor* (SCWR) dan *Very High Temperature Reactor* (VHTR). Keenam konsep ini saat ini masih dalam proses penelitian. Klasifikasinya dibedakan atas spesifikasi baik berupa penggunaan material maupun sistem yang berlangsung di dalam reaktor. Setiap jenis reaktor memiliki keunggulan masing-masing. GCFR memiliki perbedaan dengan reaktor lainnya yaitu reaktor ini memanfaatkan spektrum cepat dari neutron dan menggunakan jenis pendingin berupa Helium (He), Karbondioksida (CO_2), atau N_2O_4 (Zuhair, 2012). Penggunaan gas sebagai

pendingin khususnya helium memiliki keunggulan yaitu helium tidak dapat mendidih serta dapat beroperasi pada temperatur yang tinggi sebagai pendukung produktivitas gas hidrogen sehingga dapat meningkatkan efisiensi. Reaktor jenis ini merupakan reaktor terbaik dari segi ketahanan karena mempunyai siklus bahan bakar tertutup (Alimah dan Sriyono, 2016). Skema reaktor nuklir jenis reaktor cepat berpendingin gas dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) (GIF, 2013).

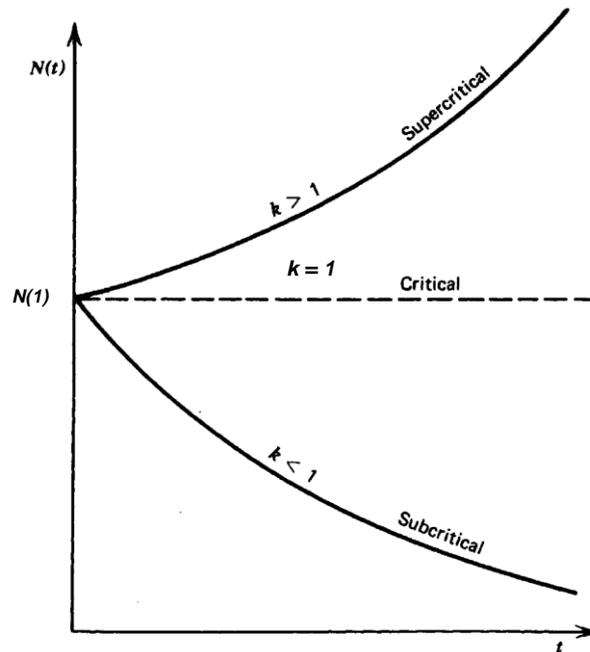
Geometri teras reaktor pada umumnya berbentuk silinder. Hal ini disebabkan karena geometri silinder sampai sekarang ini merupakan bentuk yang paling optimal jika ditinjau dari faktor kebocoran neutron dan aliran pendingin (Andris *et al.*, 2016).

2.6 Faktor Multipikasi (k_{eff})

Reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor mengakibatkan dihasilkan/hilangnya neutron dalam jumlah tertentu. Neutron memiliki peranan penting pada reaksi

berantai yang terjadi di dalam reaktor nuklir. Neutron-neutron akan terbentuk akibat dari reaksi fisi, dan akan bergerak di dalam reaktor hingga pada akhirnya berkurang karena proses *leakage*, *capture*, dan *scattering*. *Leakage* merupakan proses keluarnya neutron dari reaktor. *Capture* merupakan kemungkinan terjadinya reaksi antara neutron dengan inti lain tetapi tidak menghasilkan reaksi fisi. Sedangkan *scattering* merupakan peristiwa terjadinya tumbukan antara neutron dengan inti lain dan mengurangi neutron (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Perubahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan sebagai k -efektif atau sering disebut dengan faktor multiplikasi (Zweifel, 1973).

Faktor multiplikasi dapat didefinisikan sebagai besaran yang menunjukkan perbandingan antara jumlah populasi neutron pada suatu generasi dengan jumlah populasi neutron pada generasi sebelumnya dalam suatu medium tertentu. Faktor multiplikasi disebut dengan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) jika medium tersebut mempunyai dimensi ruang terbatas, sedangkan jika mediumnya tak berhingga maka disebut faktor multiplikasi tak berhingga (k_{inf}). Batasan keselamatan tersebut mencakup harga reaktivitas teras, reaktivitas batang kendali, margin reaktivitas padam, dan koefisien reaktivitas suhu. Panjang siklus operasi menentukan batasan fraksi bakar yang bergantung pada harga multiplikasi dan besarnya daya. Harga faktor multiplikasi tersebut dapat digunakan sebagai parameter suatu teras reaktor berada dalam keadaan subkritis, kritis, atau superkritis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Grafik Banyaknya Neutron Terhadap Waktu Di Dalam Reaktor (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Jika faktor multiplikasi ($k_{\text{eff}} = 1$), reaktor dalam keadaan kritis yang artinya jumlah neutron dalam suatu generasi akan sama dengan jumlah neutron dalam generasi sebelumnya atau konstan (tetap). Faktor multiplikasi ($k_{\text{eff}} < 1$), maka reaktor dalam keadaan subkritis yang artinya jumlah neutron dalam suatu generasi akan lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah neutron dalam generasi sebelumnya dan reaksi berantai akan terus berkurang. Faktor multiplikasi ($k_{\text{eff}} > 1$), maka reaktor dalam keadaan superkritis yang artinya jumlah neutron pada satu generasi lebih banyak dari jumlah neutron pada generasi sebelumnya dan reaksi berantai semakin lama akan semakin banyak bahkan tidak terkontrol yang dapat menyebabkan efek seperti pada bom nuklir (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

2.7 Bahan Bakar Reaktor

Bahan bakar nuklir adalah material yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi nuklir. Bahan bakar nuklir terbagi dua yaitu bahan bakar fisil dan bahan bakar fertil. Bahan fisil adalah bahan yang mudah berfisi dan mempunyai probabilitas berfisi yang besar relatif terhadap reaksi penangkapan neutron,

walaupun ditembak oleh neutron termal. Contoh bahan fisil U^{235} , U^{233} , Pu^{239} dan Pu^{241} . Bahan fertil adalah bahan yang berpotensi untuk diubah menjadi bahan fisil dengan reaksi penangkapan neutron, contohnya U^{238} , U^{234} , Pu^{240} , Pu^{242} , Th^{232} , dan sebagainya (Lestari dan Fitriyani, 2014).

2.7.1 Uranium

Uranium merupakan sebuah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang U dan nomor atom 92. Pada tabel periodik uranium juga dapat digambarkan sebagai logam putih keperakan yang termasuk dalam deret aktinida. Uranium memiliki 92 proton dan 92 elektron dan berelektron valensi 6. Inti uranium mengikat sebanyak 141 sampai dengan 146 neutron, sehingga terdapat 6 isotop uranium. Isotop yang paling umum adalah U^{238} (146 neutron) dan U^{235} (143 neutron). Uranium alami didalam di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U^{238} , U^{235} dan U^{234} (Kidd, 2009). Uranium memiliki titik leleh yaitu 1.132 dan titik didih 4.131 . Uranium terdapat pada batuan granit atau batuan sedimen. Uranium merupakan bahan radioaktif alam yang cukup lama dikenal dan hingga saat ini masih digunakan secara luas sebagai bahan bakar nuklir jenis fisi. Cadangan uranium yang paling banyak ditemukan di Amerika Serikat, Kanada, Rusia dan beberapa Negara di Afrika (IAEA, 2005).

2.7.2 Plutonium

Penggunaan uranium sebagai bahan bakar PLTN selain menghasilkan tenaga listrik juga akan menghasilkan limbah nuklir diakhir operasinya (Su'ud *et al.*, 2013). Dari berbagai jenis limbah nuklir yang dihasilkan tersebut, terdapat limbah yang memiliki potensi untuk dijadikan sebagai bahan bakar pada reaktor lainnya, yaitu Plutonium (Pu) (Novalianda *et al.*, 2018).

Plutonium merupakan salah satu produk fisi yang terbentuk dari proses perubahan isotop U^{238} ketika menyerap neutron cepat (dengan tenaga lebih besar dari 1 MeV). Isotop U^{238} sendiri adalah salah satu produk fisi dari proses penyerapan neutron termal atau lambat disertai dengan pemancaran neutron cepat dan sinar gamma.

Neutron cepat inilah yang diserap U^{238} yang kemudian berubah menjadi Plutonium (Imron, 2002). Dari reaksi fisi yang terjadi di reaktor nuklir terdapat lima isotop yang dominan, yaitu Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , dan Pu^{242} (Novalianda *et al.*, 2016). Dari kelima isotop tersebut Pu^{239} dan Pu^{241} saja yang bersifat fisil, yang bisa digunakan kembali sebagai bahan bakar reaktor lainnya (Novalianda *et al.*, 2018).

2.7.3 Daur Ulang Bahan Bakar Nuklir

Meningkatnya laju pembangunan PLTN, berarti akan meningkatkan juga jumlah permintaan bahan bakar nuklir. Uranium adalah merupakan bahan bakar nuklir konvensional yang digunakan selama ini. Dengan meningkatnya jumlah permintaan uranium dan penggunaan yang terus menerus dalam jangka panjang akan mengakibatkan menipisnya persediaan bahan uranium. Masalah persediaan bahan nuklir, sebenarnya tidak terbatas pada bagaimana penyediaan uranium, tetapi bagaimana mengupayakan penyediaan bahan fisil (bahan dapat belah) (Gunandjar, 2011). Dalam bahan bakar bekas terdapat Plutonium yang mengandung isotop campuran dengan waktu paruh berbeda, Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} dan Pu^{242} . Pu^{239} adalah material fisil selain U^{235} yang dapat digunakan sebagai pemicu reaksi fisi nuklir. Pu^{239} adalah material yang dapat membelah ketika ditembak oleh neutron dan akan melepaskan energi, radiasi gamma, dan neutron yang lebih banyak. Oleh karena peristiwa itu, Pu^{239} dapat mempertahankan reaksi rantai nuklir setelah mencapai massa kritis. Sifat-sifat inilah yang memungkinkan plutonium digunakan sebagai bahan bakar pada beberapa reaktor nuklir (Mayanti *et al.*, 2017).

Selain Plutonium, terdapat aktinida minor didalam bahan bakar bekas. Aktinida minor merupakan unsur-unsur yang terbentuk pada bahan bakar bekas PLTN dari reaksi tangkapan neutron oleh inti-inti uranium. Unsur-unsur tersebut terdiri atas nuklida-nuklida: Np^{237} , Am^{241} , Am^{242} , Am^{243} , Cm^{242} dan Cm^{244} . Konsentrasi massa dalam bahan bakar bekas hanya 0,11% tetapi bersama dengan plutonium memberikan radiotoksisitas sebesar 100 Sv/gr dan meluruh untuk jangka waktu

ratusan ribu tahun. Penanganan unsur-unsur aktinida minor tidak terlepas dari sistem daur bahan bakar yang diterapkan. Unsur-unsur aktinida minor (minor actinides, MA) memberikan kontribusi yang tinggi sifat radiotoksitas dalam bahan bakar bekas PLTN, khususnya karena umurnya yang sangat panjang (Silakhuudin, 2008).

2.8 *Burn-Up* Pada Bahan Nuklir

Pembakaran merupakan satu-satunya proses produktif dalam daur bahan bakar nuklir. Tempat dan lamanya pembakaran di dalam teras diatur melalui program pengelolaan bahan bakar sehingga dapat dicapai tingkat pembakaran yang optimum. Dalam proses pembakaran ini dikenal adanya istilah derajat bakar (*burn-up*) yang dipakai untuk menyatakan jumlah bahan bakar yang terbakar (fisi). Derajat bakar dapat dinyatakan dalam beberapa cara, yang paling populer adalah dengan satuan Megawatt-hari/ton (MWd/ton) jumlah energi yang telah dihasilkan dalam megawatt-hari dari tiap ton uranium. Makin tinggi derajat bakar, makin murah biaya pembangkitan energi nuklir, dan lebih sedikit bahan bakar bekas sehingga menghemat biaya penyimpanan bahan bakar bekas (Ariani *et al.*, 2015).

Parameter *burn-up* menjelaskan perbandingan jumlah isotop fisil yang telah berfisi dengan jumlah isotop fisil sebelum berfisi, sehingga dapat dianalisis jumlah bahan bakar yang terdapat pada teras dan efisiensi penggunaan isotop fisil pada satu siklus reaksi fisi berantai (Aida, 2015). Dalam proses *burn-up* terjadi reaksi fisi berantai pada atom-atom bahan bakar bermassa besar menjadi isotop fisil. Nuklida yang terpenting setiap waktu *burn-up* adalah U^{235} , U^{238} , Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , dan Pu^{242} (Omar dan Ghazi, 2011).

Pada sistem SRAC, proses perhitungan *burn up* teras dilakukan dalam 2 tahapan. Pada tahap pertama dilakukan perhitungan *burn up* tingkat sel. Pada tahap ini akan didapatkan data tampang lintang makroskopik tiap step *burn up* dari sel yang terhomogenisasi. Data tampang lintang makroskopik hasil perhitungan *burn up* tingkat sel berupa tabulasi tampang lintang terhadap suhu teras, suhu pendingin,

dan tingkat *burn up* pada pemodelan perangkat bahan bakar yang disimpan dalam file MACRO. Dataampang lintang makroskopik ini kemudian akan diinterpolasi untuk menghitung *burn up* teras pada tahap kedua (Okumura *et al.*, 2002).

2.9 Persamaan Difusi Neutron

Salah satu hal yang harus diperhatikan dalam mendesain nuklir adalah besar dan distribusi neutron di dalam reaktor. Untuk mengetahui distribusi neutron pada reaktor, digunakan teori transport neutron, yang merupakan aliran gerak neutron dalam teras reaktor, termasuk tabrakan yang dialami neutron, hilangnya neutron karena diserap oleh material-material dalam reaktor dan keluarnya neutron dari dalam reaktor.

Persamaan difusi neutron merupakan suatu bentuk pendekatan yang paling sederhana terhadap teori transport. Solusi dari persamaan difusi ini memberikan bentuk distribusi fluks neutron terhadap ruang dan selanjutnya dapat diperoleh bentuk distribusi daya yang bergantung pada ruang (Glasstone dan Edlund, 1952). Untuk mengetahui distribusi neutron pada reaktor, digunakan teori transport neutron, yang merupakan aliran gerak neutron dalam teras reaktor, yang banyak mengalami hamburan (*scattering*) dari inti atom, penyerapan (*absorb*) dan juga yang keluar dari teras reaktor. Untuk mencari solusi dari persamaan transport neutron cukup sulit dilakukan. Oleh karena itu, dilakukan pendekatan dengan menggunakan aproksimasi difusi neutron dimana dapat dilakukan pendekatan dari persamaan transport neutron menjadi persamaan difusi neutron (Taufiq, 2011).

Persamaan difusi menyatakan bahwa energi neutron diasumsikan memiliki grup grup energi sehingga persamaan ini disebut persamaan difusi multigrup. Dalam persamaan difusi ini diterapkan konsep kesetimbangan jumlah neutron yang masuk dan keluar dari reaktor. Kesetimbangan jumlah neutron dapat ditulis secara matematis dalam persamaan 2.2.

$$\frac{1}{V_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla D_g \nabla \phi_g - \Sigma_{a_g} \phi_g + S_g - \Sigma_{s_g} \phi_g + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{s_{g'g}} \phi_{g'} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan suku sumber neutron sebagai persamaan 2.3.

$$S_g = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'=1}^G v_{g'} \Sigma_{f_{g'g}} \phi_{g'} \dots \dots \dots (2.3)$$

Perubahan neutron yang hilang karena adanya absorpsi maupun hamburan dapat digabungkan menjadi suku removal pada persamaan 2.4.

$$\Sigma_{R_g} \phi_g = \Sigma_{a_g} \phi_g + \Sigma_{s_g} \phi_g \dots \dots \dots (2.4)$$

dalam keadaan *steady state* laju perubahan jumlah neutron dituliskan pada persamaan 2.5.

$$\frac{1}{V_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (2.5)$$

sehingga persamaan difusi multigrup berubah menjadi persamaan 2.6.

$$-\nabla D_g \nabla \phi_g + \Sigma_{R_g} \phi_g = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'=1}^G v_{g'} \Sigma_{f_{g'g}} \phi_{g'} + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{s_{g'g}} \phi_{g'} \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan D adalah tetapan difusi, ϕ adalah fluks neutron tergantung terhadap ruang dan energi, S_g adalah sumber neutron adalah $\Sigma_{a_g} \phi_g =$ suku absorpsi, $\sum_{g'=1}^G \Sigma_{s_{g'g}} \phi_{g'}$ adalah jumlah neutron berkurang karena hamburan, $\Sigma_{s_g} \phi_g$ adalah jumlah neutron masuk karena hamburan dan k_{eff} adalah faktor multiplikasi efektif (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

2.10 Standard Thermal Reactor Analysis Code (SRAC)

SRAC dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*) pada tahun 1978 (Okumura et al., 2002). SRAC adalah sistem penghitungan neutron yang bersifat menyeluruh untuk beberapa jenis reaktor termal. SRAC terdiri dari perpustakaan data neutron (JENDL-3.3, JENDL-3.2, ENDF/B-IV, JEF-2.2 dan sebagainya), dan mengintegrasikan lima kode dasar untuk perhitungan perpindahan neutron dan difusi. Modul perhitungan probabilitas tumbukan (PIJ), modul perhitungan difusi (TUD, CITATION) dan dua kode pilihan: ASMBURN untuk *assembly* bahan bakar dan COREBN untuk perhitungan *burn up* teras (Okumura et

al., 2006). Terdapat dua poin penting dalam sistem kode SRAC yaitu pembuatan grup penampang melintang mikroskopi dan makroskopi yang efektif serta analisis burn up yang terdiri dari sel statis dan perhitungan inti. SRAC memiliki suatu penyimpanan data yang berisi tampang lintang (*cross-section*) semua jenis nuklida yang terdapat dalam penyimpanan data (JENDL, ENDF, JEF). Penyimpanan data ini, akan dilibatkan dalam perhitungan neutronik (fluks neutron) oleh lima kode dasar SRAC dengan pendekatan yang berbeda-beda (Okumura *et al.*, 2006). Lima kode dasar SRAC meliputi :

1. PIJ: Kode probabilitas tumbukan yang telah dikembangkan oleh JAERI meliputi 16 kisi geometri.
2. ANISN: Kode transport satu dimensi (S_N) yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (R_S).
3. TWOTRAN: Kode transport dua dimensi (S_N) yang terdiri dari 3 jenis geometri yaitu slab (X-Y), silinder (R-Z) dan bola (R- θ).
4. TUD: Kode persamaan difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI, terdiri dari geometri slab (X), silinder (Y) dan bola (R_S).
5. CITATION: Kode untuk persamaan difusi multi-dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segi enam (heksagonal) (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 2.5. 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*.

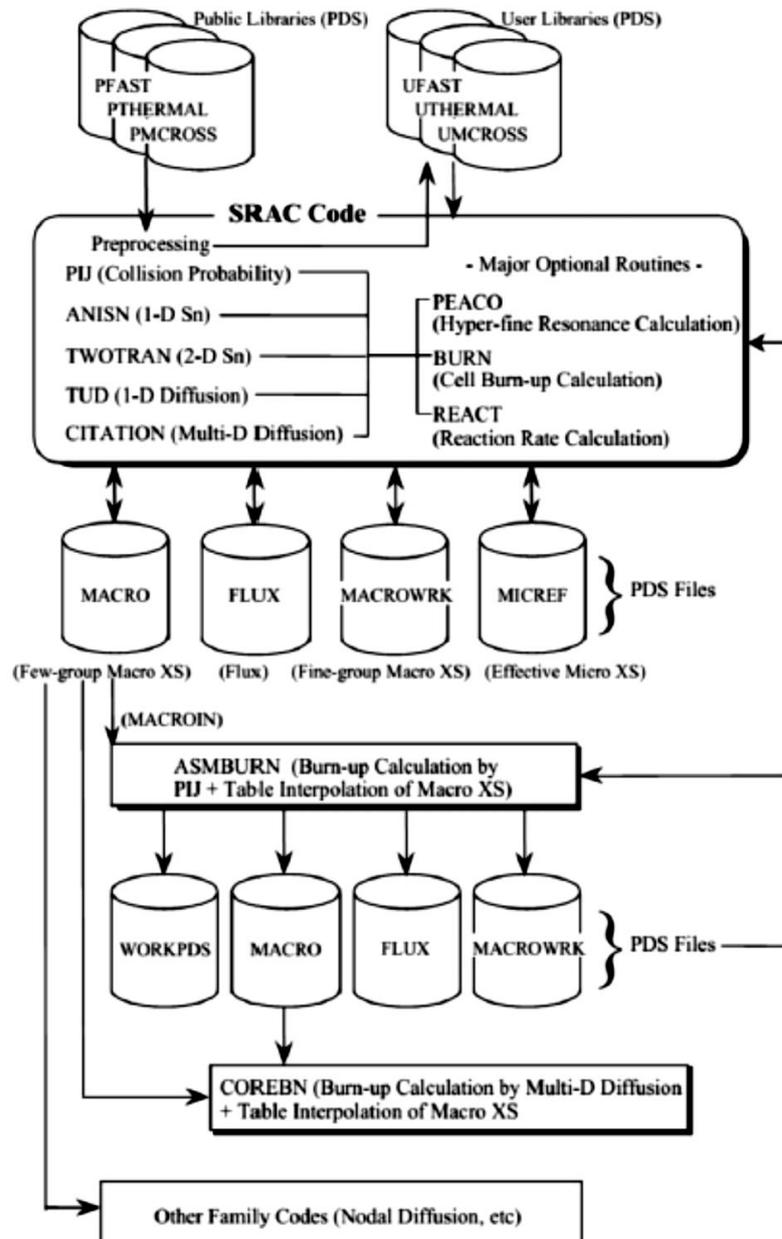
5. UMCROSS : Pengguna pustaka MCROSS untuk PEACO.
6. U THERMAL : Pengguna pustaka *Thermal*.
7. MICREF : Pustaka pengguna yang berisi data penampang lintang mikroskopik.
8. MACROWRK : Pustaka pengguna yang berisi data penampang lintang makroskopik .
9. MACRO : Data penampang lintang makroskopik oleh pengguna.
10. FLUX : Distribusi fluks pada beberapa grup struktur.

Perhitungan pembakaran sel (*cell burn-up calculation*) adalah salah satu pilihan yang terdapat dalam sistem SRAC. Dalam perhitungan ini, terdapat dua macam langkah (*step*) yang diadopsi dari kode SRAC yaitu unit pembakaran dengan panjang interval waktu relatif dan sub-unit disetiap langkah pembakaran. Interval unit pembakaran ditetapkan berdasarkan input, sedangkan sub-unit pembakaran ditentukan dengan kode (Okumura *et al.*, 2002).

SRAC terdapat *file input* dan *file output*. *File input* SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila penginputan berjalan dengan benar atau tepat, maka ketika di *run*, file output standar akan memberikan informasi tertulis

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

sebagai tanda bahwa perhitungan telah selesai. *File output* yang biasa dikeluarkan adalah SFT99, yang berisi mengenai laporan lengkap hasil perhitungan, SFT06 berisi tentang proses atau langkah dalam perhitungan, dan SFT89 mengenai visualisasi bentuk sel yang dibutuhkan. Struktur sistem pada SRAC ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Struktur sistem SRAC (Okumura *et al.*, 2002).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

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

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat personal komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Ubuntu 16.04 dan program *System Reactor Atomic Code* (SRAC).

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan dengan beberapa tahap sebagai berikut:

3.3.1 Menentukan Bentuk Geometri *Cell* dan Ukuran Pin Bahan Bakar

Menentukan bentuk geometri *cell* bahan bakar yang akan digunakan kemudian menentukan ukuran pin bahan bakar pada masing-masing material yang digunakan dalam sel bahan bakar seperti bahan bakar, selongsong dan pendingin pada reaktor GCFR untuk memperoleh nilai daya yang efisien. Dalam menentukan ukuran pin perlu diketahui fraksi volume dari masing-masing sel bahan bakar yang terdiri atas bahan bakar, *cladding* dan pendingin

3.3.2 Menentukan Pengayaan (*Enrichment*) dan Densitas Atom

3.3.2.1 Pengayaan (*Enrichment*)

Pada penelitian ini dilakukan pengayaan untuk meningkatkan konsentrasi isotop pada nuklida sehingga dapat efektif dipakai dalam reaktor nukir. Penentuan pengayaan pada reaktor GCFR dilakukan agar reaktor berada dalam keadaan kritis ($k_{\text{eff}} = 1$). Presentase pengayaan yang digunakan bahan bakar yaitu sebesar 8,5 %-10 % dengan rentang 0,1 %. Penentuan pengayaan bahan bakar dilakukan supaya reaktor yang dihasilkan berada pada keadaan kritis ($= 1,00$). Persentase pengayaan ditunjukkan dengan nilai *atomic density* (densitas atom) yang terus naik setelah dilakukan pembakaran.

3.3.2.2. Densitas Atom

Pada setiap reaktor terdapat komponen yaitu bahan bakar, *cladding* dan moderator yang akan dihitung densitas atomnya untuk digunakan sebagai input CITATION pada program SRAC. Perhitungan densitas atom bahan bakar sebagai fungsi pengayaan dilakukan dengan menggunakan persamaan (3.1)

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

dengan N adalah densitas atom (atom/cm³), ρ adalah massa jenis (g/cm³), N_A adalah bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ atom/mol), M adalah massa molekul (g/mol). Perhitungan densitas atom yang dilakukan pada setiap nuklida harus sesuai dengan persentase pengayaan bahan bakar yang digunakan.

3.3.3 Perhitungan *Burn-Up* Bahan Bakar

Perhitungan *burn-up* adalah perhitungan yang menitik beratkan pada manajemen bahan bakar yaitu pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar yang dinyatakan dalam satuan GWd/t (jumlah energi yang dihasilkan dalam gigawatt-hari dari tiap ton uranium). Untuk perhitungan

burn-up dilakukan dengan mengaktifkan *script burn-up* pada file input program SRAC. Keluaran (*output*) yang dihasilkan berupa bahan bakar yang sudah dibakar untuk beberapa periode yang disimpan ke dalam MACRO (Walter dan Reynolds, 1981).

3.3.4 Menentukan Ukuran dan Konfigurasi Teras

Model geometri teras reaktor yang ideal dapat diperoleh dengan melakukan penentuan ukuran teras reaktor kemudian mengubah-ubah konfigurasi bahan bakar tanpa mengubah ukuran dari teras reaktor (Okumura, 2007). Pada penelitian ini inti pada reaktor GCFR akan diambil $\frac{1}{2}$ bagian yang bertujuan untuk melihat hasil pengayaan yang telah dilakukan.

3.3.5 Perhitungan dengan Modul *CITATION*

Pada hasil penghitungan densitas atom digunakan sebagai input penghitungan *CITATION* pada SRAC. Pada *CITATION* akan dapat diketahui hasil penghitungan secara keseluruhan dari model reaktor yang telah dibuat dengan ukuran dan komposisi tertentu.

3.3.6 Melakukan Pengecekan *Output* Pada *CITATION*

Apabila penginputan data pada *CITATION* telah selesai kemudian di run maka akan diikuti dengan pesan pada bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) seperti Gambar 3.3.

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

Gambar 3. 1 Output SRAC (Okumura *et al.*, 2002).

Apabila belum muncul pesan tersebut pada hasil keluaran, maka harus dilakukan pengecekan pada input dan melakukan perhitungan kembali. Setelah perhitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah

sesuai dengan yang diinginkan kemudian melakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2002).

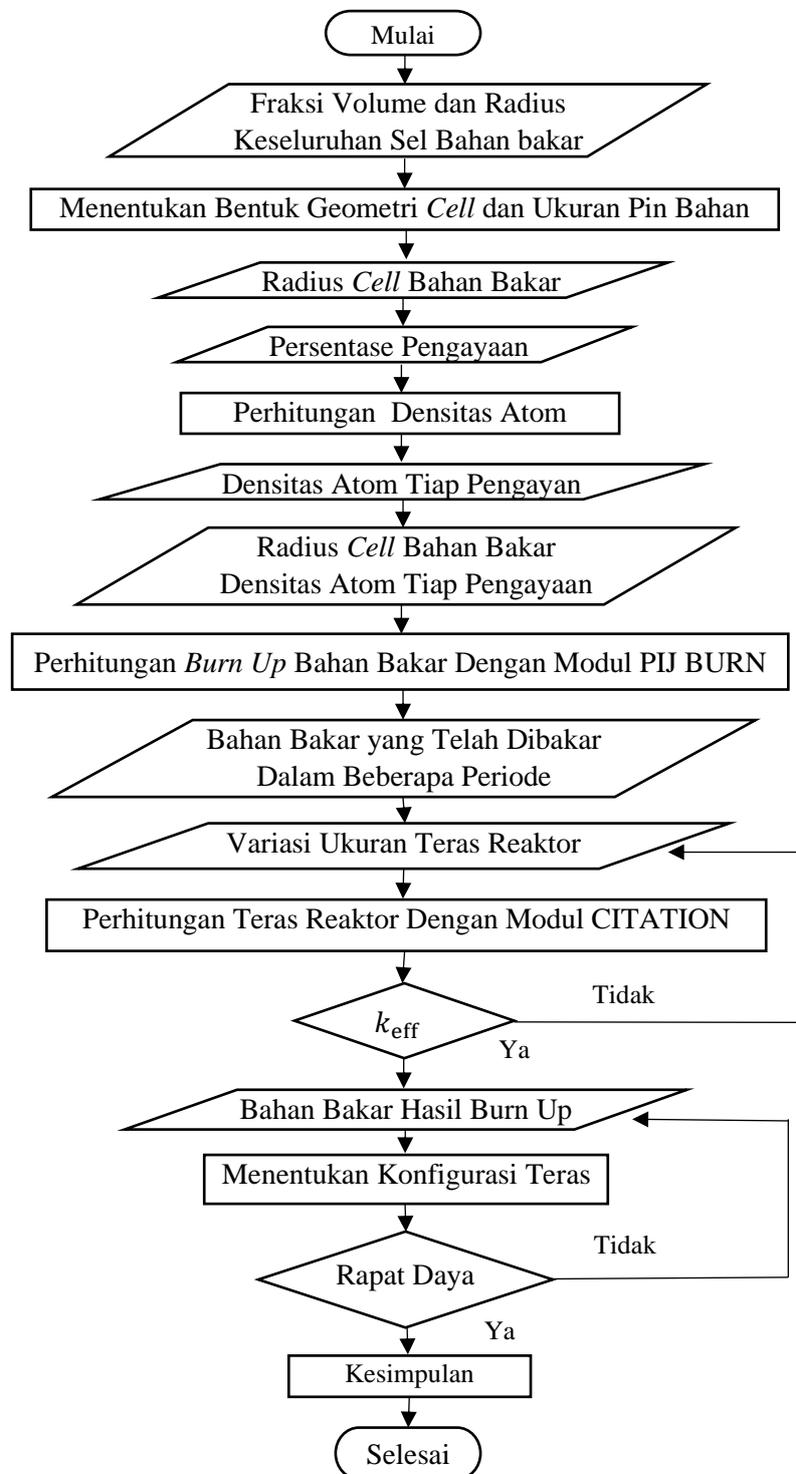
3.3.7 Analisis Hasil CITATION

Nilai dari *output* yang ditampilkan berupa nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Nilai ini menunjukkan kekritisitas suatu reaktor, apabila nilai besarnya sama dengan 1 maka reaktor kritis. Apabila nilai besarnya lebih dari 1 maka reaktor superkritis, hal ini karena jumlah neutron meningkat seiring pertambahan waktu. Apabila nilai kurang dari 1 maka reaktor dikatakan subkritis karena jumlah neutron menurun seiring pertambahan waktu (Björk *et al.*, 2011).

Selain k_{eff} , output yang akan dihasilkan adalah distribusi rapat daya (ρ) di dalam teras reaktor. Besarnya rapat daya (ρ) sebuah reaktor menunjukkan besarnya daya yang dihasilkan persatuan volume. Distribusi rapat daya (ρ) adalah salah satu analisis keselamatan reaktor. Distribusi rapat daya (ρ) tersebut dapat digunakan untuk menentukan ada tidaknya reaktor daya puncak dan suhu bahan bakar minimum dari suatu teras reaktor yang melampaui batas yang diizinkan.

3.4. Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Persentase pengayaan bahan bakar dan ukuran teras reaktor berpengaruh terhadap nilai k_{eff} . Semakin besar pengayaan serta ukuran yang digunakan semakin meningkat nilai k_{eff} yang dihasilkan. Teras reaktor GCFR model teras silinder (r,z) berada pada kondisi kritis pada radius 210 cm dan tinggi 190 cm, diperoleh nilai k_{eff} sebesar 1,000008 dengan pengayaan bahan bakar 9,9 %.
2. Berdasarkan CITATION *case* 1 sampai dengan CITATION *case* 5, konfigurasi teras reaktor GCFR model teras silinder (r,z) yang memenuhi kriteria standar keselamatan adalah CITATION *case* 5 menggunakan bahan bakar dengan waktu periode *burn up* 50 tahun, 60 tahun dan 70 tahun dengan faktor puncak daya yang diperoleh sebesar 1,84058 pada arah radial dan rapat daya (ρ) rata-rata sebesar 66,36443 Watt/cm³. Dan faktor puncak daya sebesar 1,3469 pada arah aksial dengan rapat daya (ρ) rata-rata sebesar 90,6886 Watt/cm³.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan desain inti reaktor GCFR dengan model geometri serta fraksi volume bahan bakar yang berbeda yang diharapkan dapat mengurangi persentase pengayaan bahan bakar dibawah 9,9% tetapi dapat menghasilkan nilai k_{eff} sama dengan 1.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardoyo., Lasman, N., Ruslan. Pratama, M., dan Efendi, E. 2010 *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta: PDIN-BATAN.
- Aida, N. 2015. Perhitungan Burn Up pada Reaktor Sub Kritis Berdaya Sedang Berpendingin Pb-Bi. *Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN Barat*. 46–52.
- Ahied, M. 2015. Efisiensi Material Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Lwr (*Light Water Reactor*) dan PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). *Jurnal Pena Sains*. 2(1):1-6.
- Alimah, S., dan Sriyono. 2016. Kajian Sistem Pemurnian Helium Reaktor HTGR Berdaya Kecil. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 18(2):123–133.
- Andris, D., Fitriyani, D., dan Irka, F. H. (2016). Optimasi Ukuran Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas Dengan Uranium Alam Sebagai Bahan Bakar. *Jurnal Fisika Unand*. 5(1): 21–26.
- Ariani, M., Supardi., Monado, F., dan Su'ud, Z. 2015. Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN. *Prosiding Semirata 2015 Bidang MIPA BKS-PTN Barat*. 3(5):39–45.
- BATAN. 2015. *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. (Online) Tersedia: <http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltninfonuklir/generasipltn/924> diakses pada 9 Januari 2023 pukul 21.38.
- Benedict, M., Pigford, T. H., dan Levi, H. W. 1981. *Nuclear Chemical Engineering*. Mc Graw-Hill. New York.
- Björk, K. I., Valentin, F., dan Christophe, D. 2011. Comparison of ThoriumBased Fuels With Different Fissile Components in Existing Boiling Water Reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 53(6):618–625.
- Chanakya, S., Rawat, R., dan Sharma, A. 2001. *Simulating of Using Control Rods to Control Nuclear Reactor Core*. University of Petroleum and Energy Studies. 28-34.

- Cinantya, D., dan Fitriyani, D. 2014. Analisis Neutronik pada reaktor cepat dengan variasi bahan bakar (UN-PuN, UC-PuC dan MOX). *Jurnal Fisika Unand*. 3(1):1–7.
- Duderstadt, J. J., dan Hamilton, J. H. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. Jhon Wiley and Sons Inc. USA.
- Fauzia, A. S., 2009, Studi Perbandingan Penggunaan Gas Helium Dan Karbon Dioksida sebagai Pendingin pada *High Temperature Engineering Test Reactor* (HTTR) Berbahan Bakar *Mixed Oxide* dan Aktinida Minor, Skripsi, ITB, Bandung.
- GIF. 2013. Generation IV System. (Online) Tersedia: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42148/gas-cooled-fast-reactor-gfr. Diakses pada 2 Januari 2023 pukul 21.03
- GIF. 2018. *GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems 2018 Update*. OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum.
- Glasstone, S., dan Edlund, M. C. 1952. *The Element of Nuclear Reactor Theory*. D Van Nostrand Company Inc. New York.
- Gunandjar. 2011. Analisis Uranium Dan Thorium Dalam Limbah Radioaktif Dari Proses Daur Bahan Bakar Nuklir. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengolahan Limbah VI*.25-26.
- Hakim, R. R. Al. 2020. Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energy Terbarukan Untuk Ketahanan Energi Di Indonesia: Literatur Review. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. 1(1):1–11.
- Harto, A. W. 2016. *Naskah Akademik Prospek MSR Untuk Penggunaan Sumber Daya Thorium Di Indonesia*. Universitas Gajah Mada. Yogyakarta
- Holman, J. P. 1983. *Heat Transfer sixth edition*. Mc Graw Hill. London.
- IAEA. 2014. International Status and Prospects for Nuclear Power 2014. *Board of Governors General Conference*. 58(1):2-13.
- Imron, M. 2002. Perhitungan Berat Plutonium Dalam Bahan Bakar Bekas RSG-Gas Menggunakan Pakat Program IAFUEL. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian P2TRR*. 99–100.
- Irka, F. H., dan Su'ud, Z. 2015. Analisis Burn Up pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika*. 7(2): 78–86.

- Lestari, M. A., dan Fitriyani, D. 2014. Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC Dan MOX Terhadap Nilai Breeding Ratio Pada Reaktor Pembiak Cepat. *Jurnal Fisika Unand*. 3(1):14–15.
- Lewis, E. E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press. USA.
- Lubis, A. 2007. Energi Terbarukan dalam Pembangunan Berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 8(2):155–162.
- Maemunah, I., R., N., Ningsih., D., Irwanto. 2019. Studi Komparasi Reaksi Fisi dan Fusi pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Masa Depan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*:3(2) 602-603.
- Mairing, M. P., dan Prihatnadi, H. 2009. Tinjauan Bahan Moderator Untuk Komponen Reaktor Nuklir. *Jurnal Perangkat Nuklir*. 3(5):49–54.
- Mayanti, R., Ariani, M dan Monado, F. 2017. Studi Parameter Burnup Sel Bahan Bakar Berbasis Thorium Nitride Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Prosiding Seminar Nasional Fisika SNF20* .6(1):1-6.
- Novalianda, S., Ariani, M., Monado, F., dan Zaki, S. 2016. Studi Awal Perhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida (UO₂) pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Jurnal Lingkungan Dan Pembangunan (Environment and Development)*. 2(1):381-385.
- Novalianda, S., Dwiyanto, Ariani, M., dan Su'ud, Z. 2018. Optimasi Desain Teras Gas Cooled Fast Reactor (GFR) Uranium Nitride (UN) dengan Plutonium. *Seminar Nasional Royal (SENAR) 2018*. 679–684.
- Novalianda, S., Ramadhan, A., dan Su'ud, Z. 2020. Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*. 22(2):50-51.
- Nurkholilah, N., dan Fitriyani, D. 2019. Analisis Burn Up pada Reaktor Pembiak Cepat Berpendingin Pb-Bi dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar dan Bahan Pendingin. *Jurnal Fisika Unand*. 8(2):184–190.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. JAEA. Japan.
- Okumura, K., Teruhiko, K., Kunio, K., dan Keichiro, T. 2002. *General Description and Input Instruction*. JAERI. Japan.
- Okumura, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analysis*. Japan: JAEA.
- Oludare, A., Agu, M. N., Umar, A. M. 2014. Control Rods Drop Failure On

- Reactors Stability And Safety. *Advances in Physics Theories and Application*. 27(2): 59-60.
- Omar, H., dan Ghazi, N. 2011. Time Dependent Burn-up and Fission Products Inventory Calculations in the Discharged Fuel of the Syrian MSR. *Annals of Nuclear Energy*. 3(8):1698–1704.
- Parmanto, S., Harto, A. W., dan Sardjono, Y. 2011. Studi Desain Down Scale Teras Reaktor dan Bahan bakar PLTN Jenis Pebble Bed Modular Reactor- HTR 100Mwe. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. 13(2): 194-205.
- Rizal, M., Harto, A.W ., dan Sihana. 2011. Analisis Transien pada Fixed Bed Nuclear Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. 13(3). 149-160.
- Rouf. 2014. *Persamaan Depleksi Bahan Bakar Reaktor Nuklir*. <https://nuclearthinker.files.wordpress.com/2014/04/srac.jpg>. Diakses Tanggal 30 Mei 2023 Pukul 19.30.
- Setiyaningsih, Yulianti, Y., dan Sembiring, S. 2019. Desain Inti Reaktor Supercritical Water Reactor (SCWR) Model Teras Silinder (r , z) dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*. 07(02):215–222.
- Setya, B. R. F., dan Lulus, W. W. 2016. Energi Nuklir Sebagai Opsi Pasokan Energi Di Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*. 162-167.
- Silakhuddin. 2008. Estimasi Akumulasi Limbah Transnuranium Dari PLTN Dan Kemungkinan Transmutasinya Dengan ADS. *Prosiding Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah V*. 5(6) :110-118.
- Soewono, C. N., Alexander, A dan Sihana. 2009. Implementasi Metode Multi Objectif Simulated Annealing dalam Optimasi Susunan Bahan Bakar Teras Reaktor Teras Reaktor PWR Menggunakan Code COREBN. *Prosiding Seminar Nasional ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*. 120-121.
- Sriyana, dan Suparman. 1999. Peran MOX Sebagai Bahan Bakar Nuklir Dimasa Depan. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 1(3):165–169.
- Su'ud, Z., dan Sekimoto, H. 2013. The Prospect of Gas Cooled Fast Reactors For Long Life Reactors With Natural Uranium As Fuel Cycle Input. *Analysis of Nuclear Energy*. 58–66.
- Subkhi, M. N., Su'ud, Z., Waris, A., dan Permana, S. 2015. Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR) Berukuran Kecil Berumur Panjang Berbahan Bakar Thorium. *Jurnal ISTEK*. 9(1):32–49.
- Supriatna, P. 2009. Kajian Awal Pemurnian Gas He Pendingin Primer Reaktor

Kogenerasi. *Buku I Prosiding PPI-PDIPTN Pusat Teknologi Akselerator Dan Proses Bahan-Batan*. 125–130.

Taufiq, I. 2011. Komputasi Paralel Persamaan Difusi Neutron pada Reaktor Cepat dengan Menggunakan Intel Threading Building Blocks. *Jurnal Ilmu Fisika*. 3(1):1–49.

Walter, A. E., dan Reynolds, A. B. 1981. *Fast Breeder Reactors*. Pergamon Press. USA.

Zhang, P., Wang, K., dan Yu, G. 2014. A Simplified Supercritical Fast Reactor With Thorium Fuel. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 1–9.

Zuhair. 2012. Studi Model Teras Reaktor Generasi IV dengan Spektrum Neutron Cepat dalam Perhitungan Multiplikasi Neutron. *Ilmu Fisika Indonesia*. 1(2): 52–56.

Zweifel, P. F. 1973. *Nuclear Reactor Physics*. McGraw-Hill. USA.