

**PERHITUNGAN *BURN UP* PADA REAKTOR GCFR DENGAN VARIASI
BAHAN BAKAR URANIUM, PLUTONIUM DAN AKTINIDA MINOR
BERPENDINGIN KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN SRAC
COREBN**

(Skripsi)

Oleh

**Tri Lestari
1917041006**



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

**PERHITUNGAN *BURN UP* PADA REAKTOR GCFR DENGAN VARIASI
BAHAN BAKAR URANIUM, PLUTONIUM DAN AKTINIDA MINOR
BERPENDINGIN KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN SRAC
COREBN**

Oleh

Tri Lestari

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh 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**

ABSTRAK

PERHITUNGAN *BURN UP* PADA REAKTOR GCFR DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR URANIUM, PLUTONIUM, DDN AKTINIDA MINOR BERPENDINGIN KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN SRAC COREBN

Oleh

Tri Lestari

Telah dilakukan penelitian tentang perhitungan *burn up* pada reaktor GCFR dengan variasi bahan bakar uranium, plutonium, dan aktinida minor berpendingin karbondioksida menggunakan SRAC COREBN berbentuk silinder triangular pada 1/6 bagian teras reaktor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi bahan bakar dan variasi periode *burn up* terhadap operasi reaktor, nilai k_{eff} yang dihasilkan, dan *waste management* nuklir. Hasil yang didapatkan pada penelitian adalah nilai k_{eff} sebesar 1,465202 dan nilai CR sebesar 0,892106 pada periode akhir *burn up* yaitu 8335 hari. *Waste management* pada penelitian ini dapat menurunkan densitas atom nuklida Pu^{240} , Pu^{241} , Am^{242} , Am^{243} , dan Cm^{245} sebesar 13,2%. Selain itu juga dapat menaikkan densitas atom pada nuklida Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{242} , Np^{237} , dan Am^{241} sebesar 14,6%. Nilai rapat daya maksimum pada arah y sebesar $3,469798 \times 10^2 \text{ Watt/cm}^3$ dan rapat daya maksimum pada arah x sebesar $1,800054 \times 10^2 \text{ Watt/cm}^3$ serta nilai *loading factor* yang didapat adalah 98,3%.

Kata kunci: Reaktor GCFR, CR , k_{eff} , Densitas Atom.

ABSTRACT

CALCULATION OF BURN UP IN GCFR REACTOR WITH VARIATION OF FUEL URANIUM, PLUTONIUM, AND MINOR ACTINIDES WITH CARBON DIOXIDE COOLED USING SRAC COREBN

By

Tri Lestari

It has been done the research on burn up calculations in Gas Cooled Fast Reactor with variations of uranium, plutonium, and minor actinides with carbon dioxide-cooled using SRAC COREBN in the form of triangular cylinders on 1/6 of the reactor core. This study aims to determine the effect of fuel variations and burn-up period variations on reactor operations, to calculate k_{eff} , and to manage nuclear waste. The results of the research were k_{eff} of 1.465202 and CR of 0.892106 in 8335 days burn-up period. Nuclear waste in this research can reduce by showing the atomic density of nuclides Pu^{240} , Pu^{241} , Am^{242} , Am^{243} , and Cm^{245} by 13,2%. Moreover, it can also increase the atomic density of nuclides Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{242} , Np^{237} , and Am^{241} by 14,6%. The maximum power density in the y direction is $3,469798 \times 10^2$ Watt/cm³ and the maximum power density in the x direction is $1,800054 \times 10^2$ Watt/cm³ and the loading factor value obtained is 98.3%.

Keywords: GCFR reactor, CR, k_{eff} , Atomic Density

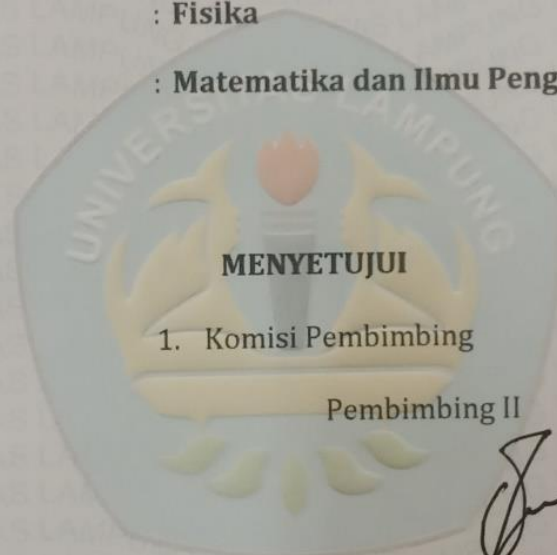
Judul Skripsi : **PERHITUNGAN *BURN UP* PADA REAKTOR GCFR DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR URANIUM, PLUTONIUM DAN AKTINIDA MINOR BERPENDINGIN KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN SRAC COREBN**

Nama Mahasiswa : **Tri Lestari**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1917041006**

Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

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

Pembimbing II

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

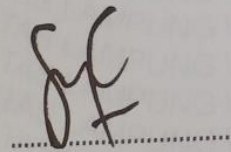
2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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

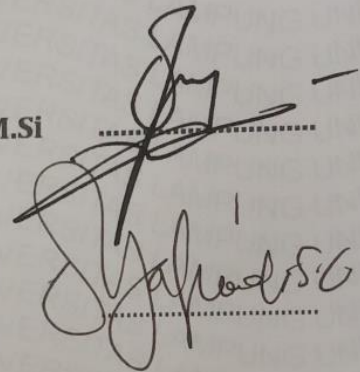
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



Sekretaris : **Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., 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 19711001 2005001 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **27 September 2023**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis disebut dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan skripsi ini dibuat oleh saya sendiri. Apabila pernyataan saya ini tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 13 Oktober 2023



Tri Lestari
NPM. 1917041006

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Tri Lestari merupakan anak ketiga dari pasangan Bapak Suyono dan Ibu Sri Suwarni yang lahir di Bumi Jaya pada tanggal 25 Mei 2000. Penulis menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar (SD) di MI Islamiyah Bumi Jaya tahun 2013 dan melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Candipuro tahun 2016. Tahun 2019 penulis menyelesaikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Sidomulyo, kemudian pada tahun yang sama penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam beberapa organisasi yaitu HIMAFI sebagai Anggota Bidang Kaderisasi dan Kepemimpinan periode 2020-2021, UKM-U BIROHMAH sebagai Staf Departemen Kesekretariatan dan Masjid pada periode 2020, UKM-F ROIS sebagai Pengurus Bidang Hubungan Masyarakat periode 2020 serta sebagai Sekretaris Bidang Kaderisasi dan Kepemimpinan periode 2021, selanjutnya pada tahun 2022 penulis aktif di lembaga legislasi DPM FMIPA sebagai Sekretaris Umum. Selain aktif organisasi, penulis juga pernah mengikuti lomba pada kegiatan *Indonesian International Invention Expo 2022* yang diadakan oleh Politeknik Negeri Semarang pada tahun 2022 dan memperoleh medali perunggu. Penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Fisika Dasar I tahun 2022.

Penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) pada tahun 2022 di Badan Standardisasi Nasional (BSN) yang berlokasi di Kota Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta dengan judul “**Analisis Pengaruh Akreditasi dalam Mutu Termometer Digital Berbasis Inframerah untuk Keselamatan Pengguna**” dan pada tahun yang sama penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Pematang Tahalo, Jabung, Lampung Timur.

MOTTO

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari satu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh urusan yang lain. Dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknya kamu berharap.”

(QS. Al-Insyirah: 6-8)

“Keberhasilan bukan milik orang pintar. Keberhasilan milik mereka yang terus berusaha.”

-B.J. Habibie-

“Hidup Sekali, Hiduplah yang berarti.”

-KH. Imam Zarkasyi-

Libatkanlah Allah dalam setiap gerakmu.

-Tri Lestari-

Jangan pernah berharap kepada manusia jika tak ingin kecewa.

-Tri Lestari-

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allaah Subhanahu Wa Ta'ala, Karya ini Aku Persembahkan untuk:

Kedua Orang Tuaku

Ibu Sri Suwarni dan Bapak Suyono
Terimakasih atas segala doa, dukungan, dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesan putrinya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai Sarjana.

Keluarga Besar dan Teman-Teman

Terimakasih atas segala dukungan, saran, dan semangat yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam keadaan suka maupun duka.

Diri Sendiri

Terimakasih untuk diriku yang mampu bertahan sampai sejauh ini dan tetap semangat dalam keadaan apapun.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan berjudul “**PERHITUNGAN *BURN UP* PADA REAKTOR GCFR DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR URANIUM, PLUTONIUM DAN AKTINIDA MINOR BERPENDINGIN KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN SRAC COREBN**”. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar S1 dan juga melatih mahasiswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa pada khususnya dan masyarakat umum.

Bandar Lampung, 13 Oktober 2023

Penulis,



Tri Lestari

SANWACANA

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

1. Ibu Dr Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing akademik dan pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang mendukung dari awal sampai akhir penulisan.
2. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si. sebagai pembimbing II yang telah mengoreksi format penulisan, memberikan kritik dan saran selama penulisan skripsi.
3. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si. sebagai pembahas yang telah mengoreksi kekurangan, memberi kritik dan saran selama penulisan skripsi.
4. Seluruh dosen dan staf Jurusan Fisika yang telah banyak membantu penulis.
5. Kedua orang tuaku dan keluargaku atas segala do'a dan dukungannya agar penulis tetap semangat dan bahagia.
6. Teman-teman satu tim penelitian Mega dan Jarodi serta Kyay Munir dan Atu Tasya teman seperbimbingan yang telah bersedia berbagi keluh kesah, saling menyemangati dan berdiskusi bersama.
7. Bestieku Anis, Ajeng, dan Serli yang tidak pernah lelah untuk saling menyemangati, saling memotivasi dan mengingatkan, juga tempat berkeluh kesah dari mahasiswa baru sampai sekarang.
8. Keluarga DPM FMIPA 2022 yang telah memberikan pengalaman organisasi untuk penulis
9. Keluarga Besar ROIS FMIPA 2020-2021 yang mengajari penulis arti kesabaran dan memberikan pengalaman di kehidupan kampus.

10. Keluarga besar BIROHMAH Universitas Lampung 2020 yang telah memberikan pengalaman indah untuk penulis.
11. Keluarga besar HIMAFI 2020-2021 yang telah memberikan pengalaman organisasi kepada penulis.
12. Teman-teman PKL Chairunnisa Ananda B., Deska Megasari, Mega Putri Aulia, dan Sofiyana Rahayu telah menemani penulis semasa PKL.
13. Teman-teman KKN Andrean Johandra, Ainun Khusnul Khotimah, Ida Nur Khamidah, Kartika Dwi Wulandari, M. Zaidan Fahsyah yang telah mengukir kenangan selama KKN.
14. Keluarga Fisika FMIPA angkatan 2019 yang selalu menemani selama kuliah yang melelahkan ini dan tetap bertahan hingga akhir.
15. Seluruh pihak yang telah membantu dan menyemangati penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Semoga segala bentuk bantuan, doa, motivasi, dan dukungan untuk penulis mendapatkan ridho dan balasan dari Allah SWT. Tuhan Yang Maha Esa. Penulis berharap skripsi ini dapat dimanfaatkan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 13 Oktober 2023

Penulis,



Tri Lestari

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRACT	i
ABSTRAK	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Reaktor Nuklir	6
2.2 <i>Gas Cooled Fast Reactor</i> (GCFR)	10
2.3 Limbah Radioaktif Nuklir	13
2.3.1 Plutonium	15

2.3.2 Aktinida Minor	16
2.4 <i>Standard Reactor Analysis Code</i> (SRAC)	17
2.5 <i>Burn Up</i> (Pembakaran)	20
2.6 COREBN	21
2.7 Faktor Multiplikasi (k_{eff})	22
2.8 Rasio Konversi	23
2.9 Karbon Dioksida (CO ₂) sebagai Gas Pendingin	24
III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Prosedur Penelitian	26
3.4 Diagram Alir Penelitian	29
IV. HASIL PENELITIAN	
4.1 Perhitungan Radius Sel Bahan Bakar, Kelongsong, dan Pendingin	32
4.2 Penentuan Pengayaan Bahan Bakar dan Perhitungan Densitas Atom	34
4.2.1 Penentuan Pengayaan Bahan Bakar	34
4.2.2 Perhitungan Densitas Atom	35
4.3 Perhitungan pada PIJ	39
4.4 Melakukan <i>input Data HIST File</i>	40
4.5 Perhitungan COREBN pada <i>Case 1</i>	41
4.5.1 k_{eff} dan Rasio Konversi pada <i>Case 1</i>	41
4.5.2 Densitas Atom pada <i>Case 1</i>	43
4.6 Perhitungan COREBN pada <i>Case 2</i>	46
4.6.1 k_{eff} dan Rasio Konversi pada <i>Case 2</i>	47
4.6.2 Densitas Atom pada <i>Case 2</i>	49
4.7 <i>Loading Factor</i>	59
4.8 Rapat Daya	60
V. KESIMPULAN	
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Contoh Spesifikasi <i>Small Long-Life Gas-Cooled Fast Reactor</i>	13
2. Sifat Fisik Gas (CO ₂)	25
3. Komposisi Plutonium.....	27
4. Komposisi Aktinida Minor	27
5. Desain Reaktor pada Penelitian	31
6. Radius Sel Bahan Bakar.....	33
7. Komposisi Bahan Bakar (Uranium 86%, Plutonium 12,2%, dan Aktinida Minor 1,8%).....	36
8. Komposisi Bahan Bakar (Uranium 88%, Plutonium 10,5%, dan Aktinida Minor 1,5%).....	37
9. Komposisi Bahan Bakar (Uranium 90%, Plutonium 8,8%, dan Aktinida Minor 1,2%).....	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Reaksi Fisi.....	7
2. <i>Fuel Rods, Control Rods, dan Grid</i>	8
3. Desain <i>Gas Cooled Fast Reactor</i>	11
4. <i>Heat Exchanger</i> dari GCFR.....	12
5. Struktur Sistem SRAC.....	19
6. Prinsip Keseimbangan Nuklida.....	21
7. Grafik Tingkat Kekritisian Reaktor.....	22
8. Model Perhitungan <i>Burn up</i> Inti 2-Dimensi.....	28
9. Diagram Alir Penelitian.....	30
10. Radius Sel Bahan Bakar.....	34
11. Teras Reaktor dan Penampang Lintang.....	39
12. Perhitungan <i>Burn Up</i> Model 2D Triangular.....	40
13. Nilai k_{eff} pada <i>Case 1</i>	42
14. Nilai Rasio Konversi pada <i>Case 1</i>	42
15. Densitas Atom U^{235} pada <i>Case 1</i>	43
16. Densitas Atom U^{238} pada <i>Case 1</i>	44
17. Densitas Atom Pu^{239} pada <i>Case 1</i>	45
18. Densitas Atom Np^{237} pada <i>Case 1</i>	45

19. Densitas Atom Am ²⁴¹ pada Case 1	46
20. Nilai k_{eff} pada Case 2	47
21. Nilai Rasio Konversi pada Case 2	48
22. Densitas Atom U ²³⁵ pada Case 2	49
23. Densitas Atom U ²³⁸ pada Case 2	50
24. Densitas Atom Pu ²³⁸ pada Case 2	51
25. Densitas Atom Pu ²³⁹ pada Case 2	51
26. Densitas Atom Pu ²⁴⁰ pada Case 2	52
27. Densitas Atom Pu ²⁴¹ pada Case 2	53
28. Densitas Atom Pu ²⁴² pada Case 2	53
29. Densitas Atom Np ²³⁷ pada Case 2	54
30. Densitas Atom Am ²⁴¹ pada Case 2	54
31. Densitas Atom Am ²⁴² pada Case 2	55
32. Densitas Atom Am ²⁴³ pada Case 2	56
33. Densitas Atom Cm ²⁴⁵ pada Case 2	56
34. Model Rantai Peluruhan pada Nuklida Berat (model : u4cm6~).....	57
35. <i>Loading Factor</i>	60
36. Rapat Daya Relatif pada Arah y	61
37. Rapat Daya Relatif pada Arah x	62

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan kebutuhan yang sangat penting. Indonesia merupakan negara dengan pertumbuhan penduduk yang tinggi sehingga membutuhkan banyak energi listrik. Berdasarkan data PLN, permintaan listrik di Indonesia diperkirakan akan tumbuh dari 219,1 TWh (Terra Watt hour) menjadi 464,2 TWh (Terra Watt hour) antara tahun 2015 dan 2024 dengan rata-rata tahunan sebesar 8,7% (Nursyahid *et al.*, 2016). Saat ini sumber energi utama yang digunakan yaitu batu bara dan minyak bumi, namun ketersediannya terbatas dan bisa habis. Selain itu, penggunaan sumber energi fosil saat ini diketahui meningkatkan konsentrasi atmosfer yang menyebabkan pemanasan global. Agar bumi dapat mendukung populasi manusia sekaligus menjamin kelangsungan pembangunan, maka harus memiliki pasokan energi yang bersih, aman, dan efisien. Berdasarkan fakta tersebut sebagai solusinya, pemerintah membuat kebijakan UU No. 30 Tahun 2007 tentang baruan energi (*energy mix*) yang mengatur penggunaan energi baru dan terbarukan (Novalianda *et al.*, 2018). Salah satu sumber energi alternatif yang menghasilkan listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). PLTN merupakan pembangkit listrik yang aman, bersih, ekologis dan relatif ekonomis (Setiyaningsih *et al.*, 2019).

Energi nuklir merupakan sumber energi alternatif yang layak dikembangkan. Di dalam reaktor dibedakan dua jenis bahan yaitu fisil dan fertil. Bahan fisil yaitu bahan yang mampu mempertahankan reaksi berantai dengan memanfaatkan energi termal neutron (Dika *et al.*, 2019), sedangkan bahan fertil adalah bahan yang dapat berubah menjadi bahan fisil dengan cara menangkap neutron

cepat berenergi sekitar 1 MeV (Andris *et al.*, 2016). Energi yang dihasilkan dalam reaktor nuklir berupa kalor. Oleh karena itu, reaktor membutuhkan bahan pendingin yang dapat menyerap panas dengan baik, memiliki daya serap neutron yang rendah, dan stabil di lingkungan radioaktif. Pendingin ini digunakan untuk menghantarkan panas yang dihasilkan selama reaksi berantai. Penggunaan bahan pendingin harus didasarkan pada kondisi ideal untuk sifat pendinginan (Riska *et al.*, 2016).

Uranium adalah bahan bakar utama pembangkit listrik tenaga nuklir. Uranium alam di kerak bumi terdiri dari tiga isotop, yaitu U^{238} (99,275%), U^{235} (0,720%) dan U^{234} (0,005%). Dari tiga isotop yang memiliki sifat fisi adalah U^{235} . Ketersediaan uranium sangat terbatas dan hanya 0,7%, dengan konsumsi berkelanjutan dan teknologi serta kapasitas saat ini, cadangan uranium diperkirakan hanya akan bertahan selama 90 tahun ke depan. Eksplorasi lebih lanjut dapat meningkatkan pasokan uranium, tetapi harganya cukup tinggi sehingga tidak lagi ekonomis. Selain itu, uranium yang ditambang hanya memasok sekitar tiga perempat dari kebutuhan uranium tahunan, sekitar 50.000 ton dari total 68.000 ton yang dibutuhkan, dan sisanya berasal dari kelebihan stok uranium lama, bahan bakar bekas, dan uranium yang dinonaktifkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Ketika pasokan ini habis, uranium dapat menjadi langka yang dapat menyebabkan krisis energi nuklir (Reafinola *et al.*, 2022).

Prinsip pengoperasian reaktor nuklir sama dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaannya adalah bahan bakar yang digunakan dan sumber energinya. Bahan bakar reaktor nuklir terbagi menjadi dua jenis bahan yaitu bahan fisil seperti U^{235} , Pu^{239} dan bahan fertil seperti U^{238} , Th^{232} (Novalianda *et al.*, 2020). Reaktor Generasi ke IV merupakan reaktor yang dikembangkan oleh para peneliti yang dapat memenuhi kondisi penangkapan neutron cepat pada reaktor (Andris *et al.*, 2016). Jenis reaktor Generasi IV yaitu *Gas Cooled Fast Reactor system* (GCFR), *Lead-Cooled Fast Reactor system* (LFR), *Molten Salt Reactor system* (MSR), *Sodium-Cooled Fast Reactor system* (SFR), *Supercritical-Water-*

Cooled Reactor system (SCWR), *Very-High-Temperature Reactor system* (VHTR) (Anshari, 2017). Reaktor Generasi ke IV memiliki keunggulan di bidangnya yaitu selain menghasilkan listrik juga dapat menghasilkan energi termal dengan siklus bahan bakar tertutup (Novalianda *et al.*, 2020). Keunggulan lain dari Reaktor Generasi IV yaitu aspek *inherent safety* (keselamatan melekat), *sustainability* (umur operasi yang panjang), *non-proliferasi* (limbahnya tidak bisa dijadikan senjata nuklir), dan lebih ekonomis dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya (Syarifah *et al.*, 2021).

Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) merupakan reaktor yang baik dalam hal durabilitas karena memiliki siklus bahan bakar tertutup dan memiliki kontrol aktinida yang sangat baik. Selain itu, GCFR yang beroperasi pada suhu 850°C juga mendukung produksi hidrogen (Riska *et al.*, 2016). Keunggulan dari GCFR adalah dapat bertahan pada suhu tinggi karena menggunakan pendinginan gas satu fasa, berdaya saing ekonomis, yaitu kesederhanaan desain, lebih kompak dan efisien (Syarifah *et al.*, 2021).

Selain menghasilkan energi listrik, pengoperasian reaktor nuklir juga memiliki konsekuensi dari pemanfaatannya yaitu limbah radioaktif berupa produk fisi dan aktinida. Akumulasi limbah radioaktif terus meningkat dari tahun ke tahun, terutama plutonium (plutonium, Pu) dan aktinida minor (MA) (Marsodi and Zuhair, 2008). Untuk mencegah penyebaran limbah nuklir, maka plutonium dan aktinida minor dapat diolah kembali sebagai bahan bakar. Ada banyak keuntungan menggunakan sumber bahan bakar bekas seperti: lebih sedikit polusi limbah, dapat mempertahankan penggunaan sumber bahan bakar uranium, dan memperluas sumber bahan bakar nuklir (Susilo, 2000).

Daur ulang plutonium dan aktinida minor telah dipelajari oleh beberapa peneliti, seperti Waris *et al* pada tahun 2009 dan Munir pada tahun 2022. Waris *et al* (2009) mempelajari tentang daur ulang transurium dalam reaktor *Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan analisis pembakaran 3D menggunakan program COREBN kode SRAC menggunakan plutonium dan pengayaan aktinida yang

lebih kecil 8%, 10% hingga 12% untuk pengayaan uranium adalah 3,1% - 3,5%. Berdasarkan penelitian dengan konsentrasi plutonium dan aktinida dapat menurunkan pengayaan uranium pada bahan bakar hingga 2,7%, 1,52% hingga 1,32%. Sedangkan Munir *et al* (2023) mempelajari tentang daur ulang plutonium dan aktinida minor dalam reaktor *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) dengan analisis *burn up* 2D menggunakan program COREBN kode SRAC menggunakan plutonium dan pengayaan aktinida yang lebih kecil 8%, 10% hingga 12% dengan pendingin gas helium.

Mengacu pada penelitian sebelumnya, maka penelitian akan dilakukan dengan mengubah tipe jenis reaktor dari PWR menjadi GCFR dengan geometri sel berbentuk silinder. Selain itu, pengayaan plutonium dan aktinida yang digunakan adalah 10%, 12% dan 14% dengan pendingin yang digunakan adalah karbon dioksida (CO₂), kemudian dilakukan analisis pembakaran menggunakan program *System Reactor Analysis Code* (SRAC) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI). Program ini digunakan untuk mendukung penghitungan sel dan kode tambahan digunakan untuk perhitungan penembakan nuklir menggunakan kode COREBN (Okumura, 2007).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* terhadap operasi reaktor GCFR dengan pendingin karbon dioksida (CO₂)?
2. Bagaimana pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* terhadap *waste management* nuklir?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah GCFR.
2. Pendingin yang digunakan adalah karbon dioksida (CO₂).
3. Geometri sel yang digunakan berbentuk silinder.
4. Plutonium dan aktinida minor yang divariasikan sebesar 10%, 12% dan 14%.
5. Uranium yang divariasikan sebesar 1,5 %, 2%, dan 2,5%.
6. Periode *burn up* yang divariasikan adalah 0 hari sampai 8335 hari.
7. Perhitungan *burn up* pada sel bahan bakar menggunakan kode SRAC PIJ dan untuk perhitungan *burn up* pada teras menggunakan kode SRAC COREBN.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* terhadap terhadap operasi reaktor GCFR dengan pendingin karbon dioksida (CO₂).
2. Mengetahui pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* terhadap *waste management* nuklir.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Mendukung perkembangan penelitian di bidang reaktor nuklir.
2. Memberikan informasi mengenai solusi permasalahan krisis energi di Indonesia.
3. Memberikan solusi pengolahan limbah dari penggunaan reaktor nuklir di Indonesia maupun di negara luar.

II. TINJAUAN PUSTAKA

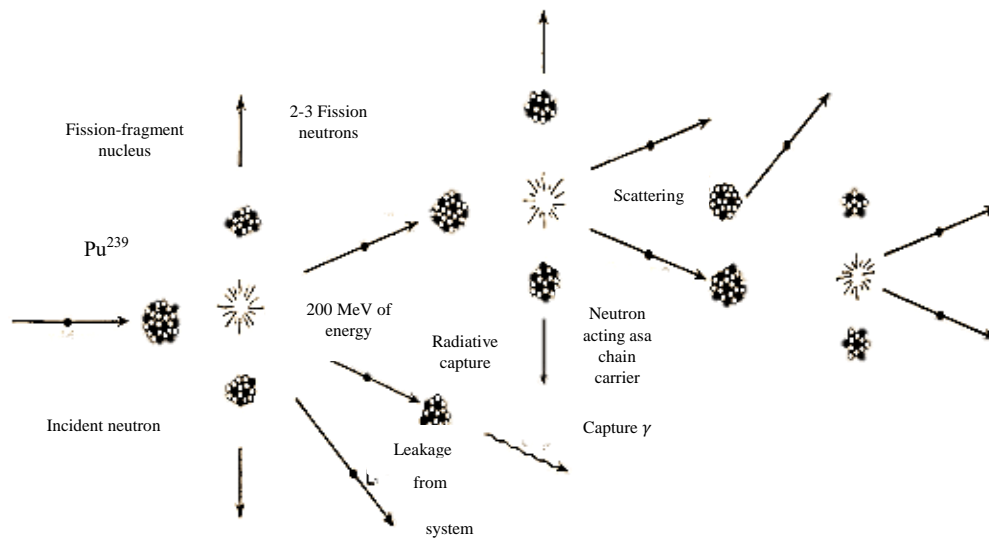
2.1 Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya fisi nuklir atau yang dikenal sebagai reaksi berantai fisi. Reaksi fisi terjadi ketika sejumlah neutron ditembakkan ke dalam inti. Secara umum, energi nuklir dapat dihasilkan melalui dua jenis mekanisme, yaitu fisi nuklir dan fusi inti ganda (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Energi yang dihasilkan oleh reaksi berantai fisi dapat digunakan sebagai pembangkit listrik (Zweifel, 1973). Bahan yang bersifat fisi dalam suatu reaktor dibedakan menjadi dua jenis bahan yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah bahan yang membelah sehingga mudah menangkap neutron oleh neutron dengan sejumlah energi tertentu, sedangkan bahan fertil adalah bahan yang menangkap neutron dan menjadi bahan fisil melalui peluruhan radioaktif (Lewis, 2008). Sumber neutron pada neutron generator yaitu :

1. Isotop yang digunakan dalam neutron generator adalah isotop berat hidrogen, seperti deuterium (D) atau tritium (T). Ketika isotop terkena energi tinggi, isotop tersebut dapat membelah menjadi inti yang lebih kecil dan menghasilkan satu atau lebih neutron.

2. Reaksi hidrogen dan deuterium.

Molekul deuterium (D_2) akan berinteraksi dengan partikel terionisasi, seperti elektron atau proton yang menghasilkan ion deuterium positif (D^+). Ion tersebut kemudian berinteraksi dengan hidrogen netral (H) untuk menghasilkan dua neutron dan satu molekul deuterium baru. Contoh bahan fisil adalah U^{233} , U^{235} , Pu^{239} dan Pu^{241} . Sedangkan yang mengandung bahan fertil adalah Th^{232} , U^{238} , Pu^{238} (Zhang *et al.*, 2014).



Gambar 1. Reaksi Fisi (Duderstard dan Hamilton, 1976).

Komponen dalam reaktor adalah bahan-bahan yang harus dimiliki di dalam reaktor. Komponen reaktor harus memenuhi standar kualitas yang tinggi, sehingga kemungkinan terjadinya kecelakaan dan kegagalan komponen sangat kecil. Berikut ini merupakan komponen-komponen yang terdapat pada reaktor nuklir (Lewis, 2008):

1. Tangki Reaktor

Tangki ini bisa berbentuk silinder atau bola dari paduan logam dengan ketebalan sekitar 25 cm. Tangki berfungsi sebagai wadah untuk menempatkan komponen-komponen reaktor lainnya dan sebagai tempat berlangsungnya reaksi nuklir. Tangki berdinding tebal ini juga berfungsi sebagai penghalang radiasi untuk mencegahnya keluar dari sistem reaktor (Adiwardojo *et al.*, 2010).

2. Teras Reaktor

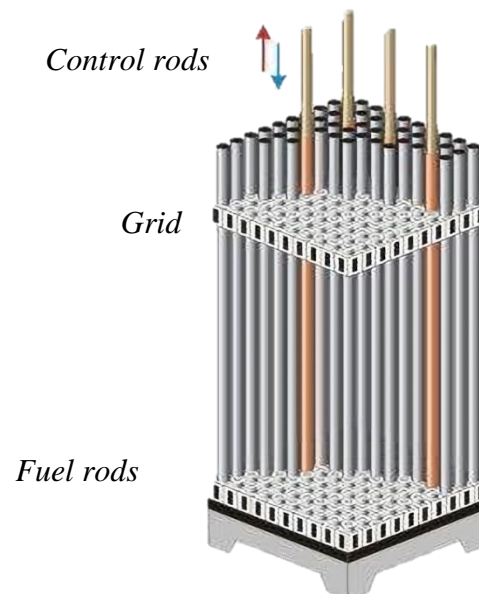
Semua material bahan bakar dan area sekitarnya membentuk teras reaktor seperti bahan bakar, pendingin, batang kendali, dan reflektor. Material bahan bakar terletak di inti reaktor (Yoel *et al.*, 2010). Komponen ini berfungsi sebagai tempat pengisian bahan bakar. Teras reaktor terdiri dari lubang-lubang (pilar) untuk menampung bahan bakar reaktor yang berbentuk batang serta terbuat dari logam tahan panas dan korosi (Adiwardojo *et al.*, 2010).

3. Bahan Bakar

Bahan bakar adalah sumber tenaga nuklir. Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir adalah U^{233} , U^{235} , Pu^{239} dan Th^{232} (Benedict *et al.*, 1981). Ada dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil (Lewis, 2008).

4. Batang Bahan Bakar (*Fuel Rods*)

Fuel Rods berbentuk tabung dengan diameter sekitar 1 cm. Di dalam reaktor terdapat ribuan batang bahan bakar yang disusun berdekatan. *Fuel Rods* terbuat dari bahan bakar nuklir, misalnya U^{233} , U^{235} , Pu^{239} dan Th^{232} (Yulianto, 1996).



Gambar 2. *Fuel Rods*, *Control Rods*, dan *Grid* (Oludare *et al.*, 2014).

5. Pendingin

Pendingin adalah bahan yang berfungsi untuk menghilangkan panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi nuklir yang terjadi dalam teras reaktor. Contoh zat pendingin adalah air atau karbon dioksida. Pendingin disirkulasikan melalui sistem pemompaan sehingga air yang keluar dari teras bagian atas digantikan oleh air dingin yang masuk ke inti dari bagian bawah (Csom *et al.*, 2012).

6. Batang Kendali (*Control Rods*)

Batang kendali merupakan komponen reaktor yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Bahan batang kendali reaktor harus memiliki daya serap neutron yang baik (Zweifel, 1973),

memiliki konduktivitas termal yang cukup, tahan panas dan radiasi, tidak mudah korosi, dan bahan harus cukup kuat untuk menutup reaktor nuklir (Chanaya *et al.*, 2001) . Bahan-bahan tersebut antara lain kadmium (Cd), boron (B), atau hafnium (Hf) (Zweifel, 1973). Gambar dari batang kendali ditunjukkan pada Gambar 2.

7. Perisai

Untuk menjamin keselamatan orang yang bekerja di dekat reaktor, biasanya reaktor dilindungi dengan perisai (Yoel *et al.*, 2010). Perisai adalah bahan pelindung yang berfungsi untuk mengurangi paparan radiasi dan mencegah kebocoran bahan radioaktif. Bahan pelindung yang biasa digunakan dalam reaktor nuklir adalah Pb, Fe, semen, B dan zat hidrogen untuk pelindung biologis dan termal. Fe sebagai karbonil digunakan untuk perlindungan termal teras reaktor. Pb sebagai paduan atau senyawa digunakan untuk menipiskan sinar gamma sebagai perisai biologis. Senyawa boron seperti asam borat, boraks, dan berbagai borat sangat baik untuk ditambahkan ke perisai air untuk meningkatkan laju penangkapan neutron (Soentono, 1998).

8. Reflektor (*Reflector*)

Reflektor adalah komponen reaktor yang berfungsi untuk memantulkan kembali neutron yang terlepas dari reaksi fisi inti atom. Kondisi dimana neutron hilang atau bocor dari teras reaktor menyebabkan kerugian ekonomi karena neutron tersebut tidak dapat digunakan pada proses fisi selanjutnya (Yulianto, 1996). Pada reaktor GCFR, reflektor yang digunakan yaitu nikel murni, magnesium murni, timbal murni, PbO, BeO, SiC, Ba₂Pb, Zr₃Si₂. Bahan SiC adalah reflektor yang baik berdasarkan pertimbangan umpan balik reaktivitas suhu dan penampang mikroskopis elastis. Reflektor Ba₂Pb relatif lebih baik daripada reflektor berbasis timbal lainnya karena dapat menyerap lebih sedikit neutron dan memiliki kemampuan lebih tinggi untuk menyebarkan neutron. Material BeO dapat dianggap sebagai kandidat reflektor terbaik untuk GFR modular berdasarkan kemampuan refleksi dan kontribusi fraksi daya. Bahan Zr₃Si₂ dapat menjadi kandidat reflektor yang menarik karena memberikan distribusi fluks aksial datar pada BOL dan EOL. Material Zr₃Si₂ menggunakan kombinasi silisida yang memiliki penampang

serapan rendah dan memiliki serapan resonansi yang kurang rapat pada energi neutron cepat (Rafliis *et al.*, 2020).

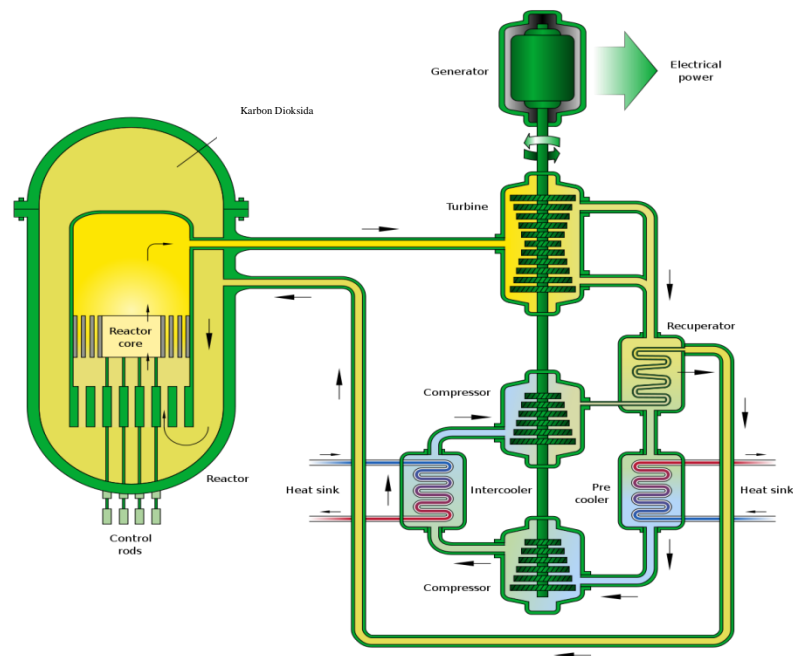
2.2 Gas Cooled Fast Reactor (GCFR)

Program reaktor Generasi IV ini diluncurkan pada tahun 1999 dan berfokus pada keberlanjutan ekonomi, keselamatan reaktor, dan perlindungan terhadap resistensi proliferasi. Pada tahun 2002, Forum Internasional Generasi IV (GIF) didirikan dengan sepuluh negara anggota. Forum tersebut mengidentifikasi enam kandidat reaktor generasi mendatang, yakni (Anshari, 2017):

- a. *Gas-Cooled Fast Reactor system* (GCFR)
- b. *Lead-Cooled Fast Reactor system* (LFR)
- c. *Molten Salt Reactor system* (MSR)
- d. *Sodium-Cooled Fast Reactor system* (SFR)
- e. *Supercritical-Water-Cooled Reactor system* (SCWR)
- f. *Very-High-Temperature Reactor system* (VHTR).

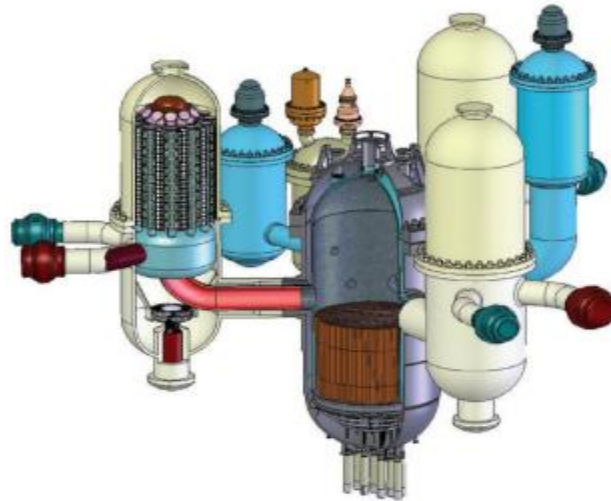
Reaktor cepat berpendingin gas disingkatnya GCFR adalah reaktor dengan suhu operasi tinggi berpendingin gas dan siklus bahan bakar tertutup. GCFR menggabungkan keunggulan reaktor neutron cepat dan suhu operasi yang tinggi. Spektrum neutron cepat memberikan keuntungan yang jelas bagi reaktor ini karena dapat menggunakan uranium alam sebagai bahan bakar dan meminimalkan limbah nuklir dari pembakaran aktinida dan daur ulang bahan bakar. Walaupun suhu operasi yang tinggi dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi pada siklus *thermal*, panas yang dihasilkan juga dapat digunakan dalam industri, misalnya untuk menghasilkan gas hidrogen melalui reaksi molekul air yang terpisah (H_2O) menjadi Oksigen (O_2) dan Hidrogen (H_2). Bahan bakar yang digunakan juga dapat mempengaruhi operasi reaktor GCFR, seperti faktor kekritisasi reaktor, rasio konversi, dan *loading factor*. Ketiga parameter tersebut bertujuan untuk mengetahui berapa lama reaktor akan tetap menyala dan seberapa besar daya yang dihasilkan sehingga memberikan pasokan listrik. Gambar (3) memperlihatkan desain GCFR. Pada Gambar (3) terlihat bentuk teras reaktor, pendingin, sistem

pendingin, turbin dan generator dari GCFR dan Gambar (4) memperlihatkan *heat exchanger* dari reaktor (Anshari, 2017).



Gambar 3. Desain *Gas Cooled Fast Reactor* (Handayani dan Zaki, 2015).

GCFR bekerja dengan sistem pembakaran tertutup (*closed fuel cycle*) seperti terlihat pada Gambar 3. Hal tersebut berguna untuk konversi uranium (U^{238}) yang efisien dan kontrol aktinida. Proses pembakaran berlangsung di dalam teras reaktor, panas yang dihasilkan pada reaksi fisi teras reaktor dipindahkan ke pembangkit uap, uap yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin yang dihubungkan dengan generator listrik dan menghasilkan listrik (Irka dan Su'ud, 2015).



Gambar 4. *Heat Exchanger* dari GCFR (Rooijen, 2009).

Menurut Anshari (2017) dan Syarifah *et al* (2021) berikut ini merupakan beberapa kelebihan dari GCFR antara lain :

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

GCFR berdaya rendah dan berumur panjang (*Small Long-Life Gas-cooled Fast Reactor*) adalah ketika GCFR memiliki daya rendah relatif, tetapi dirancang untuk beroperasi dalam waktu lama tanpa sering melakukan pengisian bahan. Tabel 1 adalah contoh spesifikasi reaktor ini:

Tabel 1. Contoh Spesifikasi *Small Long-Life Gas-cooled Fast Reactor* (Monado *et al.*, 2013).

Parameter	Value/Description
Daya (MWt)	300
Jumlah region	10
Bahan bakar	U-10wt%Zr
Kelongsong	<i>Stainless stell</i>
Pendingin	Helium, Karbon Dioksida, Nitrogen
Fraksi volume bahan bakar	60%
Fraksi volume kelongsong	10%
Fraksi volume pendingin	30%
Diameter inti aktif	220 cm
Tinggi inti aktif	280 cm
Lebar radial reflektor	50 cm
Lebar aksial reflektor	50 cm
<i>Pin pitch</i>	1,4 cm
Panjang sub siklus	10 tahun

2.3 Limbah Radioaktif Nuklir

Limbah radioaktif adalah bahan dan peralatan yang telah terpapar zat radioaktif atau menjadi radioaktif akibat pengoperasian nuklir atau fasilitas yang menggunakan radiasi pengion dan tidak dapat digunakan lagi (Aisyah *et al.*, 2008). Limbah radioaktif merupakan limbah yang mengandung banyak radionuklida yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan sehingga memerlukan pengelolaan yang tepat (Meilasari dan Sutrisno, 2019). Ada dua jenis limbah nuklir yang sangat radioaktif dalam siklus bahan bakar nuklir yang dapat didaur ulang, yaitu hasil proses pengayaan dan bahan bakar bekas (Waris dan Budiono, 2008).

Limbah radioaktif juga diklasifikasikan menurut bentuknya, yaitu :

1. Limbah radioaktif padat

Contoh limbah radioaktif padat adalah resin bekas, filter udara dan cairan, bahan laboratorium bekas, sarung tangan, alat/bahan keselamatan kerja, alat pemeliharaan dan alat proses bekas, serta kertas (Rahardjo, 2013).

Radionuklida yang terdapat dalam limbah padat antara lain : Sr^{90} , Y^{91} , Zr^{95} , Nb^{95} , Ru^{103} , Ru^{106} , $\text{Ag}^{110\text{m}}$, $\text{Te}^{129\text{m}}$, I^{131} , Ce^{144} , Cr^{51} , Mn^{54} , Fe^{59} , Co^{58} , dan Co^{60} (Zamroni, 2004).

2. Limbah radioaktif cair

Limbah radioaktif cair berupa *floor drain*, limbah *laundry*, limbah dekontaminasi (alat pembersih dan pencuci kaca), larutan regenerasi resin, resin yang terkandung dalam cairan dan dekontaminasi personal, air limbah dari bak cuci, dan sebagainya (Sunardi *et al*, 2011). Jenis radionuklida yang terdapat dalam limbah radioaktif cair antara lain H^3 , Na^{24} , Ni^{63} , Zn^{65} , Sr^{89} , Sr^{91} , Y^{90} , Mo^{99} , I^{31} , I^{132} , Cs^{134} , Cs^{136} , Cs^{137} , dan lain-lain. Radionuklida dalam limbah radioaktif cair tersebut berasal dari aktivasi air pendingin, produk fisi yang lolos dan larut dalam air pendingin, dan produk korosi yang teraktivasi (Zamroni, 2004).

3. Limbah radioaktif gas

Limbah radioaktif gas berasal dari teras reaktor buangan dan sistem pendingin (Meilasari dan Sutrisno, 2019). Limbah radioaktif gas dari PLTN biasanya berupa produk fisi (hasil belah) yang timbul karena reaksi fisi pada bahan bakar yang bisa lolos keluar dari kelongsong bahan bakar. Secara umum limbah gas yang timbul antara lain adalah gas mulia (*noble gas*), Iodine, Karbon-14. Gas mulia yang terbentuk adalah dari produk fisi dan biasanya terbawa dalam bentuk gas antara lain Kr^{85} , $\text{Kr}^{85\text{m}}$, Kr^{87} , Kr^{88} , Xe^{133} , $\text{Xe}^{131\text{m}}$, $\text{Xe}^{133\text{m}}$, $\text{Xe}^{135\text{m}}$, Xe^{135} , dan Xe^{138} (Zamroni, 2004).

Menurut Martono dan Aisyah (2003) klasifikasi limbah radioaktif berdasarkan penyimpanan jangka panjang adalah :

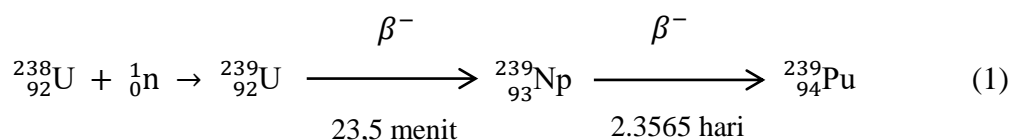
1. Limbah aktivitas rendah dan menengah, yaitu limbah radioaktif yang mengandung radionuklida pemancar beta dan atau gamma serta sedikit atau tidak sama sekali mengandung radionuklida pemancar alfa (aktinida).
2. Limbah aktivitas tinggi, yaitu limbah radioaktif yang banyak mengandung radionuklida hasil belah pemancar beta dan gamma serta sedikit mengandung radionuklida pemancar alfa.

3. Limbah transuranium (TRU), yaitu limbah yang banyak mengandung radionuklida pemancar alfa serta sedikit radionuklida hasil belah pemancar beta dan gamma. Limbah transuranium merupakan limbah radioaktif yang ditimbulkan dari produksi bahan bakar nuklir seperti uranium. Limbah transuranium cair (TRU) merupakan pelarut yang berasal dari proses ulang bahan bakar reaktor nuklir bekas dan mengandung banyak aktinida beracun dengan waktu paruh panjang dan sedikit produk dekomposisi. Limbah TRU padat berupa padatan terkontaminasi aktinida di pabrik bahan bakar reaktor *breeder*. Representatif untuk limbah TRU adalah isotop plutonium dan aktinida minor yang dapat digunakan untuk bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (Zuhair, 2012).

2.3.1 Plutonium

Ketika uranium digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir, dalam pengoperasian tersebut selain menghasilkan listrik juga akan menghasilkan limbah nuklir. Diantara berbagai jenis limbah nuklir tersebut terdapat limbah yang dijadikan sebagai bahan bakar reaktor lain, yaitu plutonium (Pu). Plutonium memiliki prospek untuk menggantikan proses pengayaan pada U^{235} . Plutonium dibentuk oleh reaksi penangkapan neutron yang terjadi pada U^{238} . Terdapat lima isotop dominan reaksi fisi pada reaktor nuklir yaitu Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} dan Pu^{242} . Dari kelima isotop tersebut hanya Pu^{239} dan Pu^{241} yang bersifat fisil dan dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar (Novalianda *et al.*, 2018).

Pu^{239} disintesis melalui reaksi berikut yang menggunakan uranium (U) dan neutron (n) lewat peluruhan beta (β^-) dengan neptunium (Np) sebagai zat antara:



Neutron yang berasal dari fisi U^{235} ditangkap oleh inti U^{238} menjadi U^{239} , peluruhan beta akan menambahkan sebuah proton menjadi Np^{239} (umur paruh 2.36 hari) dan peluruhan beta lebih lanjut akan mengubahnya menjadi Pu^{239} . Pu^{239} adalah bahan fisil, yaitu bahan yang dapat membelah sehingga mudah menangkap neutron. Karena peristiwa ini, Pu^{239} dapat melanjutkan reaksi berantai nuklir setelah mencapai massa kritis. Sifat tersebut memungkinkan plutonium dapat digunakan sebagai bahan bakar di beberapa reaktor nuklir (Mayanti *et al.*, 2017). Plutonium yang terkandung dalam bahan bakar bekas dapat didaur ulang untuk bahan bakar nuklir baru. Daur ulang plutonium dicampur dengan uranium alam untuk membuat bahan bakar campuran oksida atau *mix oxide* (MOX) (Herutomo, 2015).

2.3.2 Aktinida Minor

Selain plutonium, limbah bahan bakar nuklir juga mengandung aktinida minor (*minor actinides*, MA) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Akan tetapi, jumlah sisa bahan bakar MA ini sangat kecil, sekitar 0,1% dari total massa bahan bakar yang digunakan. Campuran bahan bakar uranium dan aktinida minor dalam bentuk senyawa oksida inilah yang selanjutnya disebut bahan bakar *mixed oxide* (MOX) (Waris dan Budiono, 2008).

Aktinida minor adalah unsur-unsur yang terbentuk dalam bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir bekas dari reaksi penangkapan neutron inti uranium. Unsur-unsur ini terdiri dari nuklida: Np^{237} , Am^{241} , Am^{242} , Am^{243} , Cm^{242} dan Cm^{244} . Kandungan massa bahan bakar bekas hanya 0,11%, tetapi bersama dengan plutonium memberikan radiotoksistas 100 Sv/gr dan meluruh selama ratusan ribu tahun. Pemrosesan material MA terkait erat dengan sistem siklus bahan bakar yang diterapkan. Unsur aktinida minor (*minor actinides*, MA) berkontribusi besar terhadap radiotoksistas bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir bekas, terutama karena umurnya yang sangat panjang (Silakhuddin, 2008).

2.4 Standard Reactor Analysis Code (SRAC)

SRAC adalah sistem kode yang dapat diterapkan pada analisis neutron dari berbagai jenis reaktor. SRAC merupakan hasil para peneliti di *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI), yang dikembangkan pada tahun 1978 sebagai kode standar untuk analisis reaktor termal oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA). Program ini banyak digunakan untuk keperluan analisis neutron di Jepang oleh berbagai pihak seperti peneliti universitas, departemen penelitian dan analisis perusahaan peralatan nuklir (Okumura *et al.*, 2002). Sistem SRAC terdiri dari beberapa kode dasar yaitu:

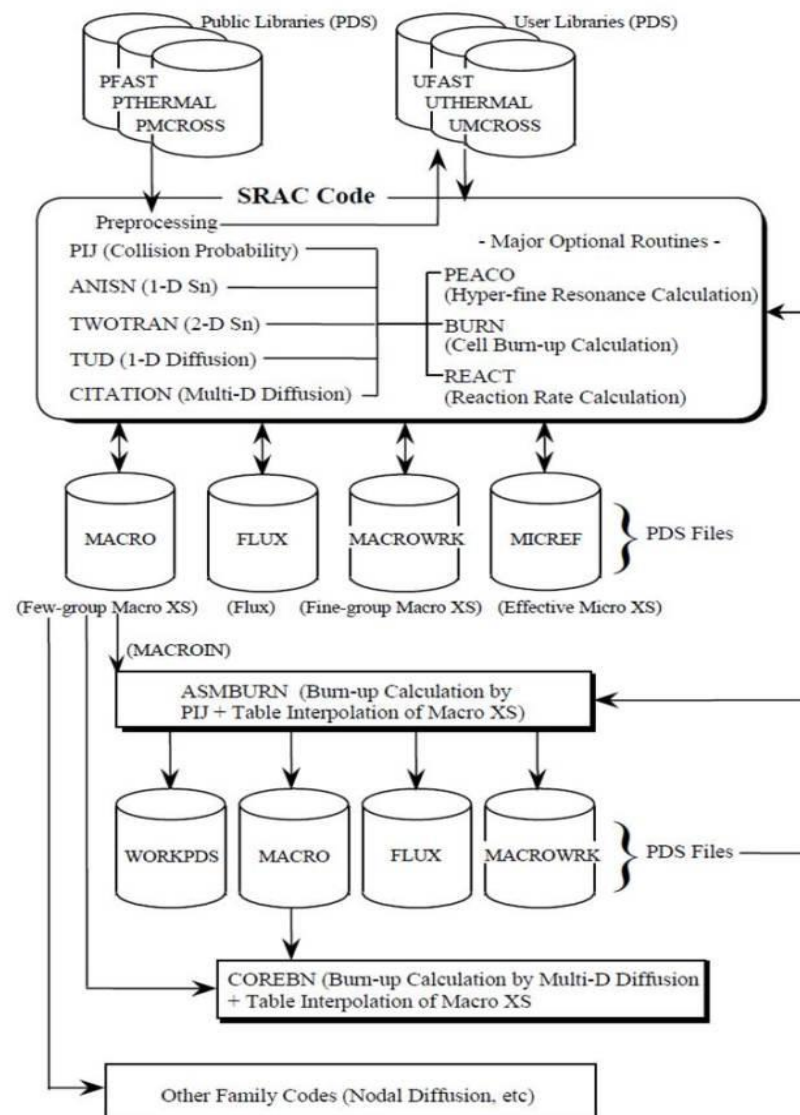
1. PIJ, yaitu kode untuk probabilitas tumbukan yang telah dikembangkan oleh JAERI meliputi 16 kisi geometri.
2. ANISN, yaitu kode transport satu dimensi (S_N) yang terdiri dari tiga jenis geometri slab (X), silinder (Y) dan bola (RS).
3. TWOTRAN, yaitu kode transport dua dimensi (S_N) yang terdiri dari tiga jenis geometri slab (X-Y), silinder (R-Z) dan lingkaran (R- θ).
4. TUD, yaitu kode untuk persamaan difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI, terdiri dari geometri slab (X), silinder (Y) dan bola (R_S).
5. CITATION, yaitu kode untuk persamaan difusi multi-dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segi enam (heksagonal) (Okumura, 2006).

Modul perhitungan probabilitas (PIJ), modul perhitungan difusi (TUD, CITATION), dan dua kode opsi ASMBURN untuk rakitan bahan bakar dan COREBN untuk perhitungan pembakaran teras (Okumura *et al.*, 2006). Poin penting dari sistem kode SRAC adalah pembuatan kelompok penampang mikroskopis dan makroskopis yang valid dan analisis *burn up* yang terdiri dari perhitungan sel statis. SRAC memiliki repositori data yang berisi penampang untuk semua jenis nuklida termasuk dalam repositori data (JENDL, ENDF, dan JEF). Penyimpanan data (JENDL-3.3, JENDL -3.2, END/B-VI, JEF-2.2, dan sebagainya) termasuk dalam perhitungan neutron (fluks neutron) dengan lima kode SRAC dasar dengan pendekatan yang berbeda untuk perhitungan

perpindahan dan difusi neutron (Okumura *et al.*, 2006). Gambar 6 memperlihatkan konfigurasi sistem SRAC.

Pustaka nuklida SRAC terdiri berdasarkan tiga penampang lintang (*cross-section*) yaitu pustaka cepat (*fast*) buat menginstal penampang lintang gerombolan cepat, pustaka termal (*thermal*) buat menginstal penampang lintang gerombolan termal, dan pustaka MCROSS untuk menginstal penampang lintang dalam wilayah resonansi yang biasa dipakai dalam PEACO. Dalam sistem SRAC seluruh keterangan misalnya penampang lintang dan fluks tersimpan pada suatu format yang diklaim menggunakan PDS (*Partitioned Data Set*) misalnya yang ditunjukkan dalam Gambar 5. Terdapat sepuluh jenis PDS pada sistem SRAC yaitu:

1. PFAST : Pustaka *Fast* (hanya dibaca).
2. PMCROS : Pustaka MCROSS untuk PEACO (hanya dibaca).
3. PTHERMAL : Pustaka *Thermal* (hanya dibaca).
4. UFAST : Pengguna pustaka *Fast*.
5. UMCROSS : Pengguna pustaka MCROSS untuk PEACO.
6. UTHERMAL : 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.



Gambar 5. Struktur Sistem SRAC (Okumura, 2007).

Perhitungan pembakaran sel adalah salah satu opsi yang termasuk dalam sistem SRAC. Dalam perhitungan ini terdapat dua langkah yang diekstraksi dari kode SRAC yaitu unit pembakaran dengan interval waktu relatif panjang dan sub-unit di setiap langkah pembakaran. Jarak tembak unit ditentukan oleh *input*, sedangkan tembak sub-unit ditentukan oleh kode (Okumura *et al.*, 2002).

SRAC berisi *file input* dan *output*, *file input* SRAC dapat dimodifikasi sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Ketika memasukkan data ke dalam SRAC telah selesai dan kemudian diselesaikan, *file* keluaran standar berisi informasi

yang ditulis untuk memverifikasi apakah perhitungan telah selesai atau belum. Jika sisa hasil perhitungan (*printout*) belum sampai, maka akan muncul pesan berikut:

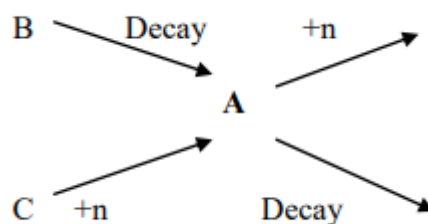
=====END OF SRAC CALCULATION=====

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

2.5 *Burn Up*

Burn up atau pembakaran didefinisikan sebagai energi total yang dilepaskan sebagai hasil pembakaran bahan bakar per satuan massa. Selama proses pembakaran, kerapatan setiap atom berubah sesuai dengan waktu pembakaran (Novalianda, 2019). Analisis bahan bakar merupakan perhitungan standar yang mempertimbangkan manajemen bahan bakar, yaitu jumlah bahan bakar yang dikonsumsi, proses pembakaran, pengolahan, dan jumlah energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar, dinyatakan dalam megawatt-hari (MWd) per ton bahan bakar (Lestari dan Fitriyani, 2014). Setelah reaktor dioperasikan untuk jangka waktu tertentu, maka jumlah bahan bakar akan berkurang. Penurunan bahan bakar mengurangi jumlah reaksi fisi yang terjadi dan juga jumlah neutron yang dihasilkan di setiap siklus. Pembakaran bahan bakar didefinisikan sebagai persentase pengurangan jumlah atom yang meluruh selama proses fisi (Budhi, 1999). Proses pembakaran terjadi melalui dua tahap. Tahap pertama adalah menghitung pembakaran pada tingkat sel. Pada tahap ini, data *cross-section* makroskopis diperoleh dari setiap penembakan sel yang dihomogenisasi. Data penampang makroskopik yang diperoleh sebagai hasil perhitungan pembakaran level sel berupa suhu internal, suhu cairan pendingin, dan tabel penampang bidang pembakaran yang disimpan dalam *file* MACRO saat memodelkan rakitan bahan bakar. Data *cross-sectional* makroskopis ini kemudian diinterpolasi untuk menghitung api inti. Secara matematis, persamaan pembakaran merupakan

persamaan diferensial orde pertama (Irka dan Suud, 2015) seperti prinsip diagram kesetimbangan pada Gambar 6.



Gambar 6. Prinsip Keseimbangan Nuklida (Walter dan Reynolds, 1981).

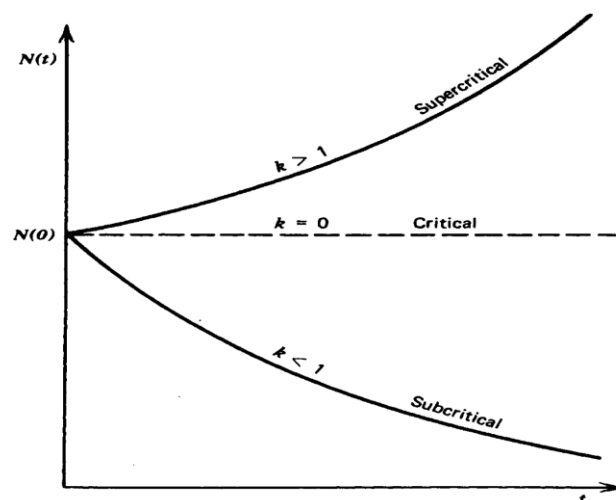
2.6 COREBN

COREBN digunakan untuk melakukan perhitungan pembakaran nuklir berdasarkan interpolasi *cross-sectional* makroskopik dan teori difusi. Masukkan informasi tentang kondisi operasi reaktor, daya termal, berapa lama reaktor akan dioperasikan, posisi rakitan bahan bakar dan batang kendali di teras, geometri teras, semua jenis rakitan bahan bakar dan perangkat non-bahan bakar di teras harus dicatat terlebih dahulu dalam *file history* menggunakan kode HIST dilaporkan. Teori Penyebaran HIST adalah kode utilitas untuk mengelola data biner dari file COREBN I/O yang disebut "*file history*". Data pembakaran terperinci untuk bahan bakar yang diisi dan diisi ulang COREBN disimpan dalam arsip historis. Versi pertama kode COREBN dan HIST dikembangkan pada 1980-an dan diimplementasikan dalam sistem SRAC. COREBN dan HIST kemudian digunakan dalam penelitian dan pengujian reaktor *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) seperti JRR-2, JRR-3, JRR-4 dan JMTR untuk mengendalikan pembakaran nuklir (Okumura, 2007). Selain itu, HIST juga bekerja untuk mengonversi *file* data makroskopik *cross-section* dalam format PDS ke PS untuk dibaca oleh COREBN. COREBN membaca data yang diperlukan untuk perhitungan dan pada saat yang sama mencatat data pembakaran terakhir dan komposisi setiap material inti yang dihitung dalam *file history*. Menggunakan informasi yang diperoleh dari *file* riwayat, COREBN melakukan perhitungan pembakaran hingga reaktivitas mencapai nilai yang diinginkan. Di akhir

perhitungan, COREBN menyimpan dalam *file history* kondisi operasional periode pertama, pembakaran dan komposisi nuklida yang dihasilkan dari peluruhan setiap set bahan bakar (Novila *et al.*, 2009).

2.7 Faktor Multiplikasi (k_{eff})

Faktor multiplikasi didefinisikan sebagai besaran yang mewakili rasio antara jumlah populasi neutron dari satu generasi ke generasi selanjutnya dalam suatu lingkungan tertentu. Batas keamanan meliputi nilai reaktivitas inti, reaktivitas batang kendali, dan koefisien reaktivitas suhu. Panjang siklus kerja menentukan batas fraksi bahan bakar yang bergantung pada nilai pengali dan jumlah daya. Nilai faktor perkalian tersebut dapat digunakan sebagai parameter teras reaktor dalam keadaan subkritis, kritis, atau superkritis seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Tingkat Kekritisan Reaktor (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Faktor multiplikasi terbagi menjadi dua yaitu k_{eff} (k efektif) dan k_{in} (k infinitif). Perbedaan antara keduanya yaitu jika medium mempunyai dimensi ruang yang terbatas maka faktor multiplikasi disebut dengan faktor multiplikasi k_{eff} , sedangkan jika mediumnya tak berhingga maka disebut faktor multiplikasi k_{in} (Surbakti, 2009). Salah satu besaran penting dalam analisis neutronik adalah nilai k_{eff} yaitu:

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{Jumlah neutron pada generasi berikutnya}} \quad (2)$$

Jika koefisien $k_{\text{eff}} = 1$, maka reaktor dalam keadaan kritis, artinya jumlah neutron dalam satu generasi sama dengan jumlah neutron pada 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 (Novalinda *et al.*, 2016) dan reaksi berantai yang lebih lama, bahkan jika menjadi tidak terkendali, dapat memiliki efek seperti bom nuklir (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Koefisien yang diharapkan dalam reaktor merupakan nilai kritis untuk menjamin kelangsungan reaktor dengan produksi listrik yang terkendali dan stabil selama reaktor beroperasi. Nilai koefisien yang diharapkan selalu dalam rentang nilai $(1 \pm 0,05)$ selama reaktor beroperasi (Riska *et al.*, 2016).

2.8 Rasio Konversi

Conversion Ratio (CR) atau dalam bahasa Indonesia adalah rasio konversi menunjukkan rasio banyaknya nuklida fisil dan nuklida fertil. Jika nilai rasio konversi kurang dari 0,6 bersifat sebagai pembakar (*burner*) dan jika lebih bersifat *converter*. Suatu reaktor nuklir yang memiliki nilai rasio konversi lebih dari 1 dapat dikatakan mempunyai kemampuan pembiak (*breeding*). Nilai rasio konversi lebih dari 1 menunjukkan bahwa laju tangkapan neutron oleh bahan fertil untuk menjadi bahan bakar fisil lebih besar daripada laju serapan neutron oleh bahan bakar fisil. Harapannya adalah berkurangnya bahan bakar. Hal ini akan menghasilkan banyaknya bahan fisil yang terbentuk akibat reaksi tangkapan oleh bahan fertil sehingga akan memperpanjang umur reaktor (Mardiono *et al.*, 2018). Salah satu kriteria yang digunakan dalam reaktor pembiak ini adalah rasio konversi atau *conversion ratio* yang secara sederhana didefinisikan sebagai:

$$CR = \frac{\text{Jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{Jumlah neutron pada generasi berikutnya}} \quad (3)$$

Nilai $CR = 1$ menunjukkan bahwa bahan bakar yang diproduksi sama dengan bahan bakar yang dikonsumsi. Jika $CR > 1$, maka diperoleh lebih banyak bahan bakar baru dibandingkan dengan yang dikonsumsi (Ardiansyah *et al.*, 2018). Suatu reaktor nuklir yang mempunyai nilai $CR > 1$ dapat dikatakan memiliki kemampuan pembiak (*breeding*). Nilai $CR > 1$ menunjukkan bahwa laju tangkapan neutron oleh bahan fertil untuk menjadi bahan fisil lebih besar daripada laju serapan neutron oleh 16 bahan fisil. Hal ini akan menghasilkan banyaknya bahan fisil yang terbentuk akibat reaksi tangkapan oleh bahan fertil, sehingga akan memperpanjang umur inti reaktor. Nilai $CR < 1$ menunjukkan bahwa laju tangkapan neutron oleh bahan fertil untuk menjadi bahan fisil lebih rendah daripada laju serapan neutron oleh bahan fisil. Hal ini berarti reaktor nuklir belum mempunyai kemampuan pembiak (Abdi dan Agung, 2018).

2.9 Karbon Dioksida (CO₂) sebagai Gas Pendingin

Pendingin adalah komponen yang digunakan untuk memasok dan mensirkulasikan gas pendingin untuk mendinginkan teras reaktor agar reaksi nuklir berlangsung. Pendingin harus memiliki titik leleh yang rendah dan titik didih yang tinggi, selain itu bahan yang digunakan sebagai pendingin tidak korosif terhadap bahan yang bersentuhan dengannya dan memiliki koefisien perpindahan panas yang tinggi. Bahan yang biasa digunakan sebagai pendingin reaktor adalah gas helium (He). Selain gas helium, karbon dioksida (CO₂) dapat digunakan sebagai gas pendingin dalam reaktor cepat berpendingin gas. Gas CO₂ adalah jenis senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan atom karbon (Whorf dan Keeling, 2005). Sifat fisik gas CO₂ adalah tidak berbau, tidak berwarna, tidak mudah terbakar, sedikit asam, lebih berat dari udara, dan mudah larut dalam air. Selain itu sifat fisik juga dijelaskan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat Fisik Gas CO₂ (Fauzia, 2009).

Parameter	Keterangan
Titik lebur	-56°C
Titik didih	-78°C
Densitas	1,98 g/L

Menurut Fauzia (2009) dan Riska *et al* (2016) beberapa keunggulan dari CO₂ yaitu :

- a. Dapat bekerja di bawah tekanan rendah.
- b. Memiliki kapasitas panas, dapat menyerap gelombang infra merah dengan kuat dan memiliki koefisien termal yang tinggi dibandingkan dengan helium.
- c. Semakin kecil fraksi pendingin yang digunakan maka neutron yang diserap oleh pendingin semakin sedikit, sehingga reaksi fisi lebih banyak terjadi.
- d. Selama 10 tahun dalam operasi nilai k_{eff} karbon dioksida dalam keadaan kritis, sehingga reaktor dapat beroperasi dengan baik dan nilai k_{eff} lebih stabil dibanding He dan N₂.
- e. Karbon dioksida menunjukkan efisiensi yang lebih optimal untuk reaktor GCFR.
- f. Pembakaran karbon dioksida lebih kecil, lebih rapat, dan nilainya hampir mendekati 1 dengan yang lainnya.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 3 bulan, terhitung dari 7 Maret – 9 Juni 2023. Tempat dilaksanakannya penelitian yaitu di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu seperangkat personal komputer dengan *Operating System (OS) Virtual Box* Toshiba 64 bit dan program *System Reactor Analysis Code (SRAC)* dan tambahan kode COREBN.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan program SRAC dan COREBN sebagai kode tambahan serta sumber data nuklida dari JENDL-3.2 yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency (JAEA)*. Prosedur pada penelitian ini dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. Perhitungan radius sel material

Fraksi volume pada reaktor GCFR yaitu 60% untuk bahan bakar, 10% untuk kelongsong dan 30% untuk pendingin. Jumlah total fraksi volume adalah 100%. Setiap material seperti bahan bakar, kelongsong, dan pendingin harus dihitung nilai radius selnya. Karena ini akan mempengaruhi hasil operasi reaktor GCFR.

2. Penentuan pengayaan bahan bakar dan perhitungan densitas atom

- 2.1 Penentuan pengayaan bahan bakar

Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan merupakan campuran dari plutonium, aktinida minor, dan uranium dimana konsentrasi plutonium serta aktinida minor dalam 3 pengayaan yaitu 10%, 12% dan 14%. Komposisi dari plutonium dan aktinida minor dalam bahan bakar ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Komposisi Plutonium (Waris *et al.*, 2008).

Plutonium	Presentase (%)
Pu-238	1,81
Pu-239	59,14
Pu-240	22,96
Pu-241	12,13
Pu-242	3,96

Tabel 4. Komposisi Aktinida Minor (Waris dan Budiono, 2008).

Aktinida Minor	Presentase (%)
Np-237	16,67
Am-241	52,05
Am-242m	1,51
Am-243	29,23
Cm-245	0,54

2.2 Perhitungan densitas atom

Bagian kedua yaitu menghitung densitas atom dari setiap komponen reaktor seperti bahan bakar, pendingin, dan kelongsong. Hasil dari perhitungan akan digunakan sebagai *input*-an pada PIJ. Persamaan (4) merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung densitas atom :

$$N = \rho \frac{N_A}{M} \quad (4)$$

dengan N adalah densitas atom (atom/cm³), ρ adalah massa jenis (gram/cm³), N_A adalah bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ atom/mol), dan M adalah massa molekul (gram/mol).

3. Perhitungan pada PIJ

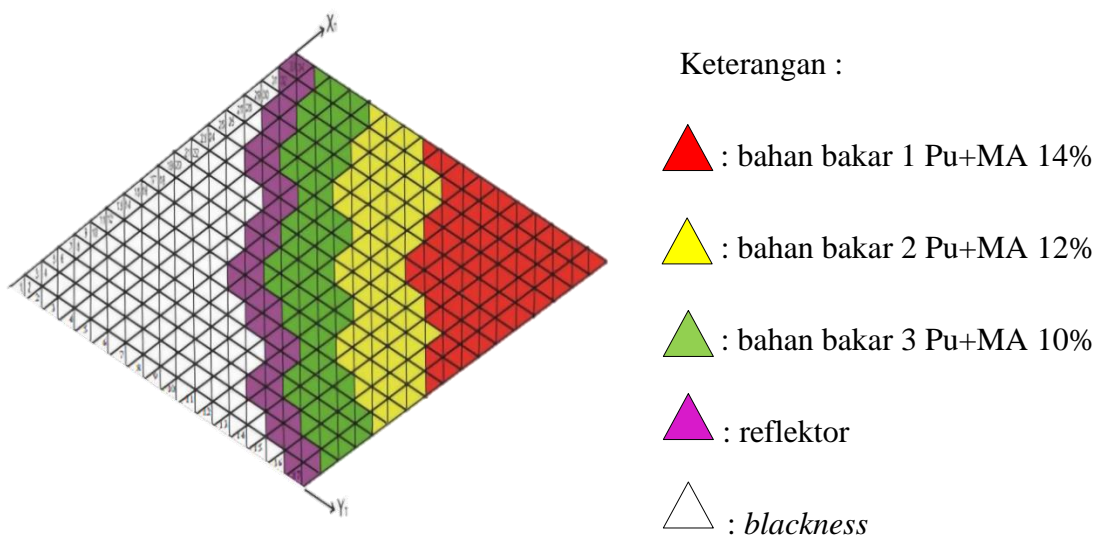
Hasil dari perhitungan densitas atom digunakan sebagai masukan di PIJ. PIJ adalah kode yang ada pada SRAC digunakan untuk perhitungan neutronik tingkat sel menggunakan metode probabilitas tumbukan.

4. *Input Data* pada file *HIST File (History File)*

HIST berfungsi untuk menentukan geometri teras dan registrasi material, menentukan jenis bahan bakar dan non bahan bakar, serta memasukkan bahan bakar.

5. Perhitungan pada COREBN

COREBN adalah kode tambahan pada program SRAC yang digunakan untuk menghitung *burn up* di tingkat teras inti. Di dalam COREBN terdapat *input* data yang diperlukan yaitu kondisi operasi seperti daya termal, periode operasi, pola pemuatan dari bahan bakar, dan pola pemuatan kendali. Contoh model perhitungan *burn up* inti 2-dimensi yang dihitung menggunakan COREBN dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Model Perhitungan *Burn up* Inti 2-Dimensi (Wulandari, 2020).

Langkah-langkah yang akan dilakukan pada COREBN adalah

a) Penentuan waktu periode *burn up*.

Waktu periode pada penelitian ini akan diubah ke dalam bentuk jam pada saat memasukan *input* ke dalam program.

b) Penentuan Daya linear.

Daya linear yang terdapat pada program sebesar 1,793722. Perbesaran daya linear dapat diubah dengan cara memperbesar nilai daya total pada reaktor nuklir.

6. Hasil Perhitungan COREBN

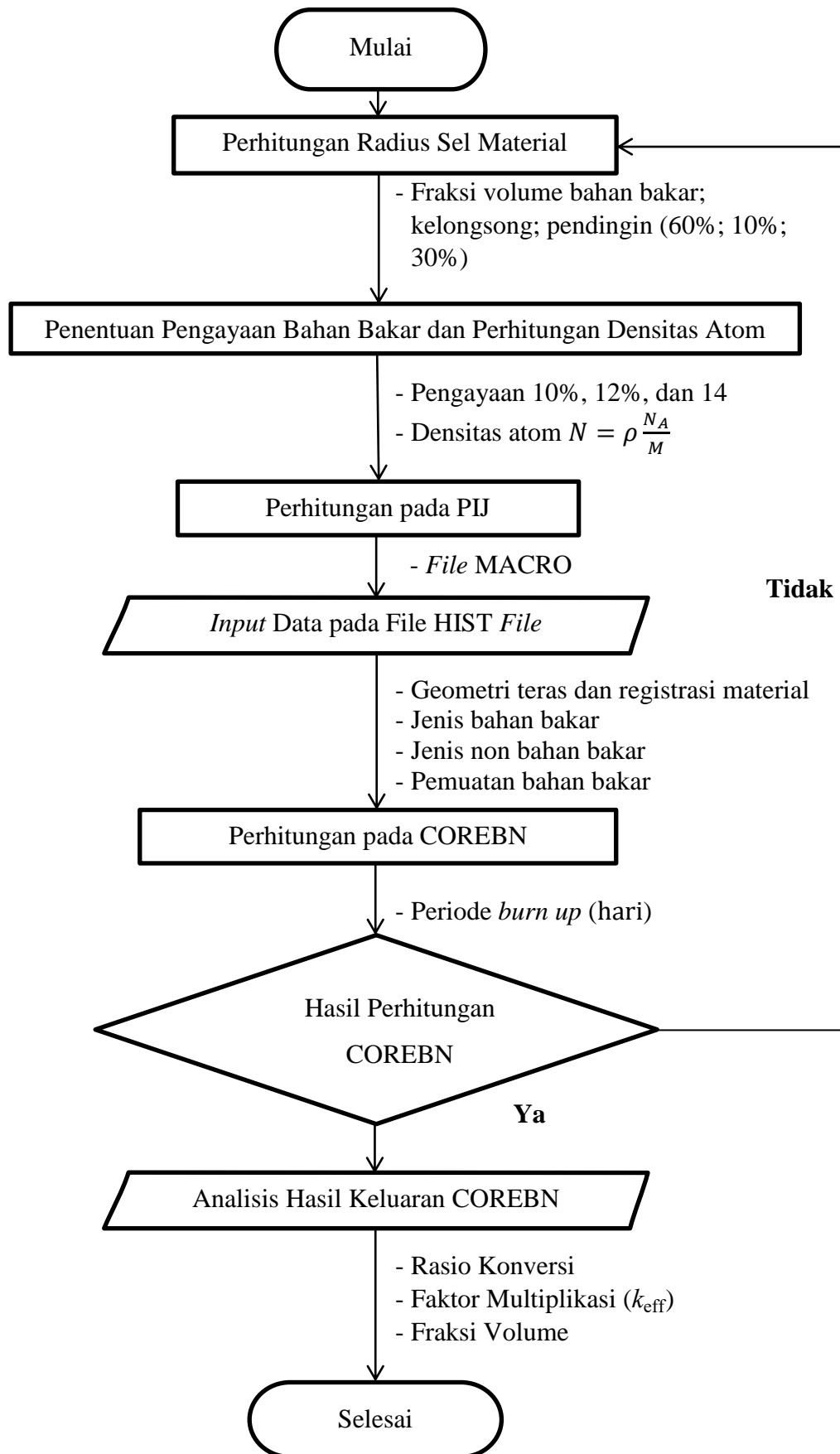
Perhitungan *burn up* pada COREBN yang telah selesai akan muncul pada keluaran *file* SFT99. Apabila masukan sudah benar maka *file output* akan terdapat pesan sebagai berikut :

=====END OF COREBN CALCULATION=====

Hasil keluaran yang belum sampai pada pesan tersebut, maka harus melakukan pengecekan pada masukan dan melakukan perhitungan pembakaran kembali. Setelah perhitungan selesai dengan benar, lalu melakukan pengecekan hasil sudah sesuai dengan keinginan atau tidak. Kemudian melakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh. Hasil perhitungan meliputi nilai rasio konversi, nilai k_{eff} , dan fraksi volume.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* terhadap operasi reaktor GCFR dengan pendingin karbon dioksida memiliki nilai *loading factor* pada akhir periode *burn up* sebesar 98,3% yang menunjukkan bahwa reaktor beroperasi hampir secara kontinu dan mempunyai daya yang tinggi sehingga memberikan pasokan listrik, menghasilkan nilai k_{eff} sebesar 1,465202 pada periode 8335 hari yang berarti reaktor masih akan menyala pada periode tersebut namun reaktor belum dapat dikategorikan sebagai reaktor *breeding* dikarenakan nilai rasio konversi hanya sebesar 0,892106 pada akhir periode.
2. Pengaruh variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* dapat menurunkan nilai k_{eff} seiring dengan bertambahnya periode *burn up*.
3. *Waste management* pada variasi pengayaan bahan bakar dan periode *burn up* dapat menaikkan jumlah densitas atom pada nuklida Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{242} , Np^{237} , dan Am^{241} , namun nuklida Am^{241} pada periode *burn up* 7605 hari mengalami penurunan densitas atomnya. Selain itu, pengayaan plutonium dan aktinida minor dapat menurunkan jumlah densitas atom nuklida Pu^{240} , Pu^{241} , Am^{242} , Am^{243} , dan Cm^{245} .

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan jenis reaktor yang berbeda, pengayaan bahan bakar yang berbeda, serta mengganti jenis reflektor dan jenis pendingin yang digunakan agar menghasilkan nilai k_{eff} dan nilai rasio konversi sebesar satu serta *waste management* dapat terkelola dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardojo., Natio, L.A., Ruslan., Madi, P.E., dan Effendi, E. 2010. *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Pusat Diseminasi IPTEK Nuklir, Jakarta. Halaman 20.
- Ahied, Mochammad. 2015. Efisiensi Material Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir LWR (Light Water Reactor) Dan PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor). *Jurnal Pena Sains*. Volume 2. Nomor 1. Halaman 1-6.
- Aisyah, Martono, dan Wati. 2008. Pengolahan limbah uranium menggunakan alumino siliko fosfat. *Jurnal Zeolit Indonesia*. Volume 7. No.2.
- Andris, D., Dian, F., dan Feriska, HI. 2016. Optimasi Ukuran Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas dengan Uranium Alam sebagai Bahan Bakar. *Jurnal Fisika Unand*. Volume 5. Nomor 1. Halaman 21-27.
- Anshari, R. 2017. A Comparative Study of Small Long-Life Gas-cooled Fast Reactor. *Prosiding Semirata*. Halaman 1057-1063.
- Ardanti W R., Yulianti, Y., Riyanto, A dan Syafriadi. 2020. Perhitungan Burn Up pada Reaktor HCLWR Model Geometri Heksagonal Dua Dimensi Menggunakan SRAC COREBN. *Journal of Energy Material and Instrumentation Technology*. Volume 1. Nomor 1. Halaman 16-22.
- Ardiansyah, H., Alexander, A., dan Andang, WH. 2018. Studi Parameter Desain Teras Integral Pressurized Water Reactor Dengan Bahan Bakar Mixed Oxide Fuel Menggunakan Program SRAC. *Jurnal Forum Nuklir (JFN)*. Volume 12. Nomor 2. Halaman 61-72.
- Benedict, M., Pigford, T.H., dan Levi, H.W. 1981. *Nuclear Chemical Engineering*. Mc Graw-Hill. New York.
- Budhi, W. 1999. Penentuan Burn Up Bahan Bakar Reaktor Kartini Berdasarkan Aktivitas Produksi Fisi Cs-137. *Tesis*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Chanakya., Sarma., Rawat, R., & Sharma, A. 2001. *Simulating of Using Control Rods to Control Nuclear Reactor Core*. University of Petroleum and Energy Studies. Halaman 28-34.

- Csom, G., Reiss, T., Feher, S., dan Czifrus, S. 2012. Thorium as an Alternatif Fuel for SCWR. *Analys of Nuclear Energy*. Volume 41. Nomor 1. Halaman 45-56.
- Dika, RS., Yanti, Y., dan Agus, R. 2019. Studi Desain High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) Berpendingin Gas Hidrogen Menggunakan Bahan Bakar Thorium. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. Volume 7. Nomor 1. Halaman 99-106.
- Duderstadt, J. J., Hamilton, L.J. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. Michigan: The University of Michigan.
- 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.
- Handayani, F. I., dan Zaki, S. 2015. Analisis Burn Up Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*. Volume 7. Nomor 2. Halaman 78-86.
- Herutomo, Bambang. 2015. Strategi Daur Ulang Bahan Bakar Nuklir Untuk Mendukung Pengoperasian PLTN yang Berkelanjutan. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Dan Aplikasi Reaktor Nuklir*. Halaman 94-104.
- Irka, FH dan Su'ud, Z. 2015. Analisis Burn Up pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*. Volume 7. Nomor 2. Halaman 78-86.
- Lestari, A. M dan Fitriyani, D. 2014. Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC Dan MOX terhadap Nilai Breeding Ratio Pada Reaktor Pemiak Cepat. *Jurnal Fisika Unand*. Volume 3. Nomor 1. Halaman 14.
- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press. USA.
- Martono H dan Aisyah. 2003. Material Untuk Solidifikasi Limbah Radioaktif dalam Keselamatan Penyimpanan. *Seminar Tahunan Pengawasan Pemanfaatan Tenaga Nuklir*. Halaman 250-262.
- Mayanti, R., Ariani, M dan Manado, F. 2017. Studi Parameter Burnup Sel Bahan Bakar Berbasis Thorium Nitride Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Prosiding Seminar Nasional Fisika SNF20*. Volume 6. Nomor 1. Halaman 1-6.

- Meilasari, F dan Sutrisno, H. 2019. Pengolahan Limbah Radioaktif Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). *Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir*. Halaman 281-289.
- Monado, F., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., Ariani, M., dan Sekimoto, H. 2013. Application of Modified CANDLE Burn-Up to Very Small Long Life Gas-cooled Fast Reactor. *Advance Materials Research*. Volume 772. Halaman 501-506.
- Munir, A.S. 2022. Analisis Burn Up Daur Ulang Plutonium Dan Aktinida Minor Pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) Menggunakan SRAC COREBN. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Novalianda, S., Ariani, M., Monado, F., dan Su'ud, Z. 2016. Studi Awal Perhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida (UO_2) pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*. Volume 2. Nomor 1. Halaman 6-15.
- Novalianda, S., Dwiyanto., Menik, A., dan Zaki, S. 2018. Optimasi Desain Teras Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) Uranium Nitride (Un) Dengan Plutonium. *Seminar Nasional Royal (SENAR) 2018*. Halaman 679-684.
- Novalianda, S. 2019. Power Flattening Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U, Pu) N. *Journal of Electrical Technology*. Volume 4. Nomor 3. Halaman 1-6.
- Novalianda, S., Andri, R., dan Zaki, S. 2020. Perhitungan Burn up Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains* 22. Nomor 2. Halaman 50-54.
- Novila, C.S., Agung, A., dan Sihana. 2009. Implementasi Metode Multiobjective Simulated Annealing dalam Optimasi Susunan Bahan Bakar Teras Reaktor PWR Menggunakan Code COREBN. *Prosiding Seminar Nasional ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir*. Halaman 120-121.
- Nursyahid, FF., Topan. S., dan Alexander, A. 2016. Studi Awal Optimasi Burn up Htr-Pm 150 Mwt Dengan Menggunakan Bahan Bakar U-Th. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016*. Halaman 897-904.
- Okumura, K., Teruhiko, K., Kunio, K., and Keichiro, T. 2002. *General Description and Input Instruction*. JAERI. Japan. Halaman 1-188.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., and Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA. Halaman 4-26.
- Okumura, K. 2007. *COREBN: A Core Burn-Up Calculation Module for SRAC2006*. Reactor Physics Group, Nuclear Science and Engineering

Directorate, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken. Japan.

- Oludare, A.I., Agu, M.N., Umar, A.M., Adedayo S.O., Omolara, O.E., Okafor, L.N. 2014. Control Rods Drop Failure On Reactors Stability And Safety. *Advances in Physics Theories and Applications*. Volume 27. Halaman 57-73.
- Permata, N.S., Fitriyani, D., dan Handayani, F.I. 2016. Analisis Neutronik Super Critical Water Reactor (SCWR) dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC, dan MOX). *Jurnal Fisika Unand*. Volume 5. Nomor 1. Halaman 47-52.
- Rafli, H., Ilham, M., Zaki, S., Abdul, W., Dwi, I. 2020. Reflector materials selection for core design of modular gas-cooled fast reactor using OpenMC code. *International Journal of Energy Research*. Nomor 1-15.
- Rahardjo, P.H. 2013. Karakteristik Temperatur dan Reduksi Limbah Radioaktif Padat Ruang Bakar Prototipe Tungku HK-2010. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*. Volume 14. Nomor 1. Halaman 37-50.
- Reafinola, SH., Yanti, Y., dan Syafriadi. 2022. Perhitungan Laju Reaksi Neutron Dalam Reaktor Supercritical Water Reactor (SCWR) Model Perangkat (Assembly) Heksagonal Berbahan Bakar Uranium. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*. Volume 3. Nomor 1. Halaman 1-7.
- Riska., Dian, F., dan Feriska, HI. 2016. Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand*. Volume 5. Nomor 1. Halaman 28-34.
- Rooijen, van W. F.G. 2009. Gas-Cooled Fast Reactor: A Historical Overview and Future Outlook. *Science and Technology of Nuclear Installations*. Halaman 1-12.
- Setiyaningsih., Yanti, Y., dan Simon, 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*. Volume 7. Nomor 2. Halaman 215-222.
- Silakhuddin. 2008. Analisis Dan Konsep Penanganan Aktinida Minor Dalam Limbah PLTN Menggunakan Teknologi ADS. *Ganendra*, Volume 11, Nomor 2. Halaman 53-59.
- Soentono, S. 1998. Bahan-bahan Untuk Industri Reaktor Nuklir. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III*. Halaman 22-31.

- Sunardi, Susanto, dan Prayitno. 2011. Pengolahan Limbah Radioaktif Padat dan Cair Di Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir Tahun 2010. *Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir VII*. Halaman 237-244.
- Surbakti, T. 2009. Studi Karakteristik Fisika Reaktor Teras PWR Bahan Bakar UO₂. *Prosiding PPI – PDIPTN Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN Yogyakarta*. Halaman 111.
- Susilo, J. 2000. Transmutasi Aktinida Minor Dengan BWR Berbahan Bakar Campuran Oksida. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir-IRI DASA MEGA*, Volume 2. Nomor 1. Halaman 33-45.
- Syarifah, R., Nabila, NM., Zein, H., Iklimatul, K., Ahmad, MM., dan Artoto, A. 2021. Analisis Fraksi Volume Bahan Bakar Uranium Karbida Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan SRAC Code. *Jurnal Jaring SainTek (JJST)*. Volume 3. Nomor 1. Halaman 13-18.
- Walter, A.E., & Reynolds, A.B. 1981. *Fast Breeder Reactor*. USA: Pergamon Press.
- Waris, A., Rahmanto, T., Taufik, I., Kurniadi, R., dan Su'ud, Z. 2009. Study Of Transuranium Recycling in PWR with 3-D Burnup Analysis using SRAC-COREBN Code. *Indonesian Journal of Physycs*. Volume 20. Nomor 4. Halaman 95-98.
- Waris, A dan Budiono. 2008. Studi Tentang Fisibilitas Daur Ulang Aktinida Minor dalam BWR. *Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology*. Volume 9. Nomor 1. Halaman 11-24.
- Wulandari, S. 2020. Perhitungan Burn Up Pada Reaktor HCLWR Model Geometri Silinder 2 Dimensi Menggunakan Kode COREBN. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Yoel, D.T., Budi, S., dan Iwan, S. 2010. Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Research Article Transmisi*. Volume 12. Nomor 1. Halaman 8-13.
- Yulianto, T. 1996. Kajian Kemungkinan Modifikasi Peralatan Fabrikasi untuk Fabrikasi Elemen Bakar Jenis HWR dan LWR. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. Halaman 190-198.
- Zamroni, Husein. 2004. Studi Limbah Radioaktif Yang Ditimbulkan Dari Operasional PLTN PWR 1000 MWe. *Buletin LIMBAH*. Volume 8. Nomor 2. Halaman 1-10.

Zhang, P., Kan W., dan Ganglin Y. 2014. *A simplified Supercritical Fast Reactor with Thorium Fuel*. Science and Technology of Nuclear Installations. Halaman 1-9.

Zuhair. 2012. Studi scenario transmudasi plutonium dan aktinida minor dengan reaktor termal. *Jurnal ilmu fisika Indonesia*. Volume 1. Nomor 1. Halaman 12-17.

Zweifel, P. F. 1973. *Nuclear Reactor Physics*. McGraw-Hill. USA. Halaman 74-106.