



**OPTIMASI BAHAN BAKAR UN-PuN UNTUK REAKTOR CEPAT
BERPENDINGIN GAS MENGGUNAKAN TERAS 3D DENGAN KODE
SRAC-COREBN**

SKRIPSI

oleh

Mila Hidayatul Aula

NIM 181810201060

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2022



**OPTIMASI BAHAN BAKAR UN-PuN UNTUK REAKTOR CEPAT
BERPENDINGIN GAS MENGGUNAKAN TERAS 3D DENGAN KODE
SRAC-COREBN**

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Fisika (S1) dan mencapai gelar S.Si.

oleh

Mila Hidayatul Aula

NIM 181810201060

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2022

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Kedua orang tua dan saudara-saudari saya atas dukungan, doa, dan restu yang tidak pernah terputus kepada saya selama ini;
2. Para guru yang telah memberikan ilmu dan restunya sehingga saya memiliki motivasi untuk terus belajar;
3. Almamater program studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.



MOTO

"Tatkala waktuku habis tanpa karya dan pengetahuan, lantas apa
makna umurku ini?"

(KH. Hasyim Asy'ari)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mila Hidayatul Aula

NIM : 181810201060

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Optimasi Bahan Bakar UN-PUN Untuk Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Teras 3D Dengan Kode SRAC-COREBN” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan dalam institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Juli 2022
Yang menyatakan,

Mila Hidayatul Aula
NIM 181810201060

SKRIPSI

**OPTIMASI BAHAN BAKAR UN-PuN UNTUK REAKTOR CEPAT
BERPENDINGIN GAS MENGGUNAKAN TERAS 3D DENGAN KODE
SRAC-COREBN**

oleh

Mila Hidayatul Aula

NIM 181810201060

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr.Ratna Dewi Syarifah S.Pd., M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota : Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Optimasi Bahan Bakar UN-PuN Untuk Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Teras 3D Dengan Kode SRAC-COREBN” karya Mila Hidayatul Aula telah diuji dan disahkan pada :
hari, tanggal :
tempat :

Ketua, Tim Penguji,
Anggota I,

Dr. Ratna Dewi Syarifah, S.Pd., M.Si. NIP. 198803202019032011
Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D. NIP. 196812191994021001

Anggota II, Anggota III,

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si NIP. 197208201998021001
Drs. Sujito, Ph.D. NIP. 196102041987111001

Mengesahkan
Dekan FMIPA,

Drs. Achmad Sjaifullah, M.Sc., Ph.D
NIP. 1959910091986021001

RINGKASAN

Optimasi Bahan Bakar UN-PuN Untuk Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Teras 3D Dengan Kode SRAC-COREBN; Mila Hidayatul Aula, 181810201060; 2022; 42 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

Kebutuhan listrik di Indonesia 88% masih bergantung kepada pembangkit listrik tenaga fosil, dengan 60% dari batu bara. Penggunaan batubara sebagai bahan bakar pembangkit listrik menghasilkan emisi CO₂ yang besar. Banyaknya CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer akan meningkatkan emisi gas rumah kaca (GRK). Maka, sistem pembangkit listrik tenaga nuklir generasi IV telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan listrik dengan teknologi bebas karbon. Sistem pembangkit listrik tenaga nuklir generasi IV yang diusung adalah dengan menggunakan reaktor cepat berpendingin gas (GFR) bertujuan untuk meningkatkan peran sistem energi nuklir menjadi energi yang aman, berkelanjutan, andal, tahan proliferasi, dan ekonomis. GFR, dalam pengembangannya, memiliki tantangan dalam ketahanan bahan bakar dan proses siklus bahan bakar yang ekonomis dan efisien. Sehingga penelitian ini ditujukan untuk mengetahui dimensi bahan bakar yang paling optimal untuk reaktor cepat berpendingin gas agar mencapai tingkat keamanan tinggi dan *sustainability*. Reaktor yang diteliti adalah jenis GFR berdaya 300MWth dengan bahan bakar uranium-plutonium nitrida (UN-PuN) dan periode operasi sepuluh tahun. Optimasi yang dilakukan dengan menganalisis dari segi neutronik menggunakan kode SRAC-COREBN.

Analisis neutronik dimulai dengan perhitungan *burn-up* per sel bahan bakar (*fuelpin*) menggunakan sistem kode PIJ pada SRAC2006 dan perpustakaan data JENDL4.0. Perhitungan kedua yakni perhitungan *burn-up* pada tingkat teras reaktor menggunakan kode SRAC-COREBN dengan geometri teras 3D. Output dari kode SRAC-COREBN yang akan dianalisis, di antaranya adalah; nilai *k-eff*, *excess reactivity* dan distribusi rapat daya sehingga dapat diperoleh bahan bakar UN-PuN yang paling optimal. Analisis parameter neutronik untuk optimasi bahan bakar UN-PuN dilihat dari kondisi nilai *k-eff* bernilai satu dan grafik nilai *k-eff* sepanjang periode *burn-up* yang paling landai, nilai *excess reactivity* maksimum mendekati nol, serta pemerataan distribusi rapat daya pada reaktor. Optimasi bahan bakar UN-PuN pada penelitian ini dimulai untuk analisis parameter neutronik pada konfigurasi teras homogen, konfigurasi teras heterogen, dan variasi fraksi volume bahan bakar.

Analisis neutronik yang pertama dilakukan adalah pada konfigurasi teras homogen. Konfigurasi teras homogen adalah konfigurasi bahan bakar dengan persentase pengayaan bahan bakar yang sama ($U_1=U_2=U_3$). Nilai *k-eff* semakin tinggi seiring dengan penambahan persentase bahan bakar. Grafik nilai *k-eff* menunjukkan nilai *k-eff* yang semakin turun tiap periode *burn-up*nya karena jumlah dan densitas bahan bakar fertil dan fisil yang semakin berkurang. Persentase pengayaan plutonium 8% memiliki grafik nilai *k-eff* paling landai sepanjang periode *burn-up*nya. Nilai *excess reactivity* maksimum yang dihasilkan pada

persentase 8% telah mencapai 0,28% dengan rapat daya maksimum 107,4 Watt/cc, sedangkan untuk rapat daya rata-rata pada arah radial X-Y adalah 75,29 Watt/cc dan rapat daya arah aksial Z adalah 75,47 Watt/cc.

Konfigurasi heterogen dilakukan dengan memvariasi presentase bahan bakar plutonium pada U1 dan U3. *Case 5* dengan persentase U1=7,5%; U2=8%; U3=8,5% menghasilkan grafik *k-eff* paling landai dengan nilai maksimumnya 0,9911901. Hal ini menunjukkan bahwa daya pada reaktor belum sampai pada kondisi kritis. *Case 5* memiliki rapat daya rata-rata pada arah radial X-Y adalah 69,75 Watt/cc dan rapat daya arah aksial Z adalah 67,02815545 Watt/cc. Rapat daya maksimum sebesar 95,14 Watt/cc. Berdasarkan nilai tersebut, maka dapat dikatakan bahwa konfigurasi teras heterogen menghasilkan rapat daya yang lebih rendah dibanding konfigurasi teras homogen.

Konfigurasi teras heterogen masih belum menunjukkan kondisi optimal karena nilai *k-eff* masih bernilai kurang dari satu. Optimasi dapat dilakukan dengan analisis fraksi volume bahan bakar. Fraksi volume bahan bakar dilakukan pada fraksi 60% hingga 65%. Grafik nilai *k-eff* paling landai dan bernilai satu diperoleh ketika fraksi bahan bakar 64%. Hasil optimasi bahan bakar UN-PuN menggunakan kode SRAC-COREBN didapatkan pada persentase *Case 5*. *Case 5* merupakan teras heterogen dengan variasi persentase U1=7,5%; U2=8%; U3=8,5%. Fraksi volume bahan bakar yang digunakan adalah 64%. Nilai *k-eff* maksimum yang diperoleh adalah 1,0031841 dengan *excess reactivity* sebesar 0,32%. Rapat daya rata-rata arah radial X-Y yang diperoleh 70,78 Watt/cc dan arah aksial Z adalah 67,97 Watt/cc dengan rapat daya maksimum adalah 97,98 Watt/cc.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas segala nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Bahan Bakar UN-PUN Untuk Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Teras 3D Dengan Kode SRAC-COREBN”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih kepada :

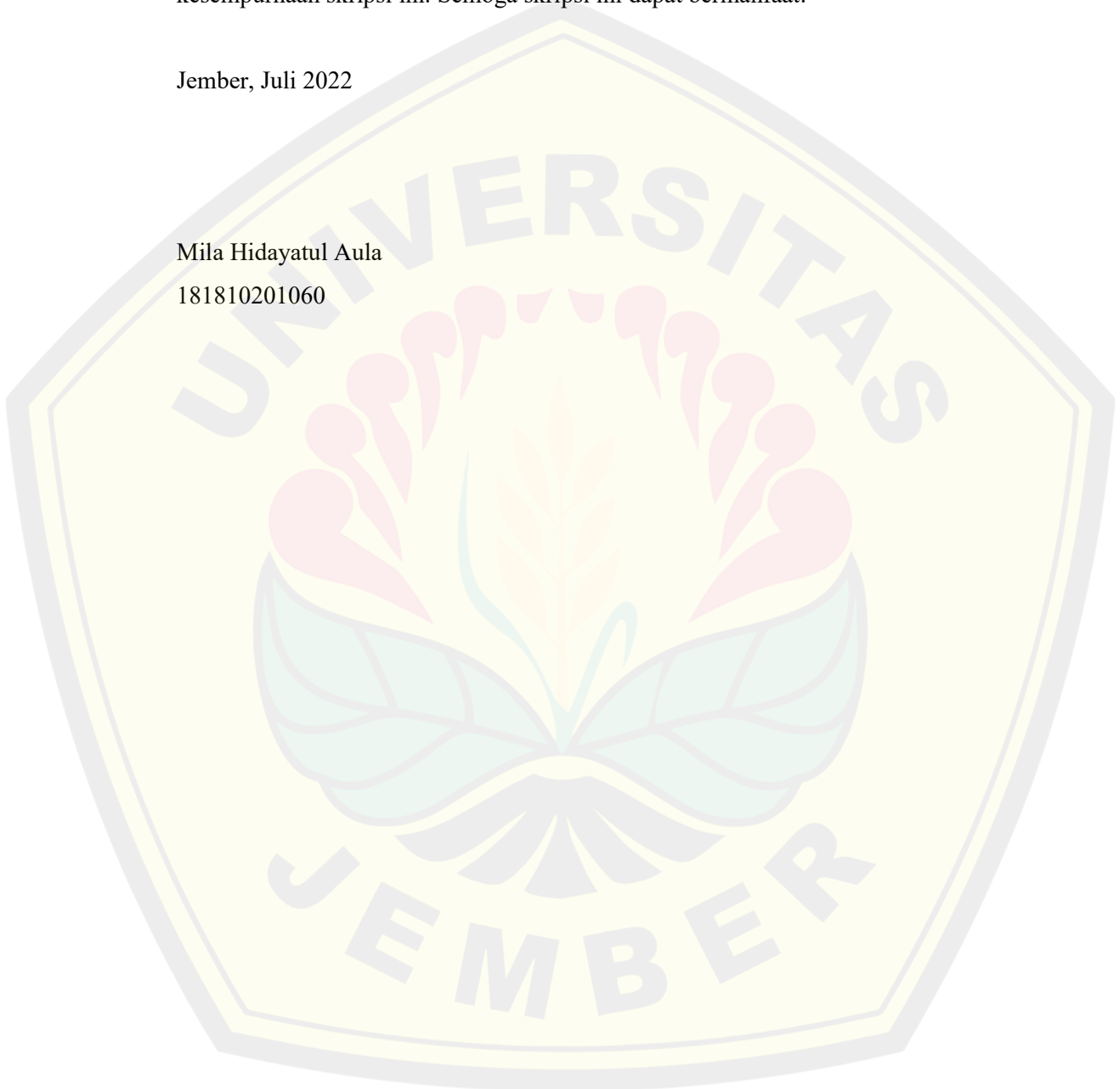
1. Kedua orang tua dan saudara yang telah memberikan doa dan dukungan sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi;
2. Dr. Ratna Dewi Syarifah, S.Pd., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama (DPU) dan Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Anggota (DPA), yang telah memberikan ilmu dan waktunya untuk mengarahkan penulis dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan skripsi;
3. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Utama dan Drs. Sujito, Ph.D. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan arahan dan bimbingannya serta masukan bagi kesempurnaan skripsi ini;
4. Seluruh Dosen Jurusan Fisika FMIPA Universitas Jember yang telah memberikan ilmu dan bimbingan sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) di jurusan Fisika FMIPA Universitas Jember;
5. Seluruh staff dan karyawan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember yang telah membantu dalam hal administrasi maupun lainnya;
6. Yayasan Baitul Maal BRILiaN atas beasiswanya selama perkuliahan ini;
7. Mentor *Bright Scholarship* Jember Raya atas bimbingan dan doanya selama perkuliahan;

8. Teman seperjuangan Nuclear Physics Club (NPC), BHS2022, keffetown, Kos Berfasilitas Lengkap, dan Rumah Al-Barokati yang telah menemani perjuangan selama masa perkuliahan dan memberikan dukungan, doa, serta kasihnya untuk menyelesaikan skripsi ini;
9. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu, dan turut membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, Juli 2022

Mila Hidayatul Aula
181810201060



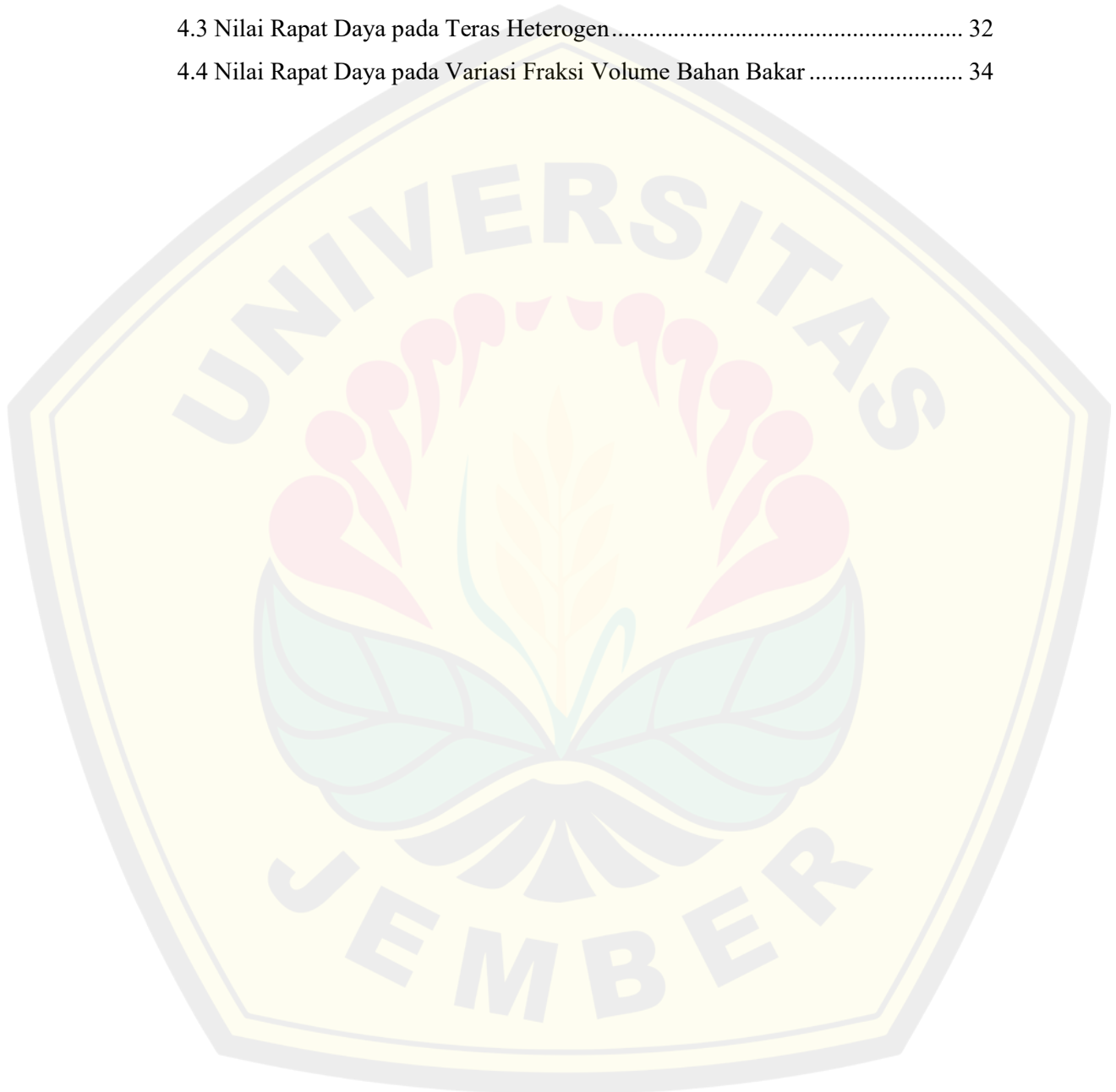
DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN SAMPUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 PLTN	7
2.2 Reaktor Nuklir dan Perkembangannya	7
2.3 GFR	9
2.4 Reaksi Fisi Berantai	10
2.4.1 Reaksi Fisi pada Plutonium	12
2.5 Siklus Hidup Neutron	13
2.6 Teori Difusi	15
2.7 SRAC-COREBN	16
BAB 3 METODE PENELITIAN	20
3.1 Rancangan Penelitian	20

3.2 Jenis dan Sumber Data	21
3.2.1 Spesifikasi Desain Teras Reaktor	22
3.2.2 Spesifikasi <i>Fuepin</i> Bahan Bakar.....	22
3.3 Definisi Operasional Variabel	23
3.3.1 Variabel Bebas.....	24
3.3.2 Variabel Terikat	24
3.3.3 Variabel Kontrol	24
3.4 Metode Perhitungan <i>Burn-up</i>	24
3.4.1 Perhitungan <i>Burn-up</i> tingkat Sel	24
3.4.2 Perhitungan <i>Burn-up</i> tingkat Teras.....	26
3.5 Analisis Data	27
3.5.1 Analisis nilai <i>k-eff</i>	27
3.5.2 Analisis excess reactivity.....	28
3.5.3 Analisis rapat daya.....	28
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Pengaruh Penambahan Persentase Plutonium	29
4.1.1 Konfigurasi teras homogen.....	29
4.1.2 Konfigurasi teras heterogen.....	31
4.2 Pengaruh Variasi Fraksi Volume Bahan Bakar	33
4.3 Optimasi Bahan Bakar UN-PuN pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas	34
BAB 5 PENUTUP	38
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	40
DAFTAR LAMPIRAN	43

DAFTAR TABEL

	halaman
3.1 Parameter Desain Reaktor.....	22
3.2 Spesifikasi Bahan Bakar	23
4.1 Nilai Rapat Daya pada Teras Homogen.....	30
4.2 Persentase Plutonium untuk Teras Heterogen.....	31
4.3 Nilai Rapat Daya pada Teras Heterogen.....	32
4.4 Nilai Rapat Daya pada Variasi Fraksi Volume Bahan Bakar	34



DAFTAR GAMBAR

	halaman
2.1 Skema Perkembangan Reaktor Nuklir	8
2.2 Skema Reaktor Pendingin Gas.....	10
2.3 Reaksi Fisi.....	10
2.4 Reaksi Fisi Berantai	11
2.5 Faktor multiplikasi	12
2.6 Siklus Hidup Neutron.....	14
2.7 Geometri kisi dengan metode <i>collision probability</i>	17
2.8 Geometri heksagonal untuk perhitungan pin bahan bakar (PIJ).....	18
2.9 Struktur Sistem SRAC2006	19
3.1 Skema Rancangan Penelitian	21
3.2 (a) Model Perhitungan <i>Burn-up</i> 3D pada arah radial X-Y (b) Model Perhitungan <i>Burn-up</i> 3D pada arah aksial Z	22
3.3 Desain sel bahan bakar pin heksagonal dan pembagian R-X	23
3.4 Skema Perhitungan SRAC-COREBN	26
3.5 Grafik acuan nilai <i>k-eff</i>	28
4.1 Grafik Hubungan Nilai <i>k-eff</i> Terhadap Waktu <i>Burn-up</i> Pada Konfigurasi Teras Homogen.....	29
4.2 Grafik Hubungan Nilai <i>k-eff</i> terhadap waktu <i>Burn-up</i> pada Konfigurasi Teras Heterogen	32
4.3 Grafik Hubungan Nilai <i>k-eff</i> terhadap waktu <i>Burn-up</i> pada Variasi Fraksi Volume Bahan Bakar	33
4.4 Grafik Hubungan Nilai <i>k-eff</i> terhadap periode <i>burn-up</i>	35
4.5 Grafik Distribusi Rapat Daya untuk Arah X	35
4.6 Grafik Distribusi Rapat Daya untuk Arah Y	36
4.7 Grafik Dsitribusi Rapat Daya untuk arah Z.....	37

DAFTAR LAMPIRAN

	halaman
Lampiran 1 Nilai k_{eff} pada teras homogen	43
Lampiran 2 Nilai k_{eff} Pada Konfigurasi Teras Heterogen.....	44
Lampiran 3 Nilai k_{eff} Pada Variasi Fraksi Volume Bahan Bakar	45
Lampiran 4 Nilai Rapat Daya hasil Optimasi	46



BAB 1 PENDAHULUAN**1.1 Latar Belakang**

Kebutuhan listrik di Indonesia 88% masih bergantung kepada pembangkit listrik tenaga fosil, dengan 60% dari batu bara (Arinaldo dan Adiatama, 2019). Konsumsi batu bara dalam negeri saat ini telah mencapai 115 juta ton dan diperkirakan akan terus bertambah hingga tahun 2050 demi memenuhi kebutuhan pembangkit listrik dan industri (DEN, 2019). Konsumsi listrik per kapita Indonesia meningkat pada tiga tahun terakhir, dari 1,06 GWh per kapita pada tahun 2018 menjadi 1,88 GWh per kapita pada tahun 2020 (Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2022).

Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar pembangkit listrik menghasilkan emisi CO₂ yang besar. Banyaknya CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer akan meningkatkan emisi gas rumah kaca (GRK). Emisi GRK dari sektor energi pada tahun 2019 sebesar 638.452 Gg CO₂e. Kategori yang memberikan kontribusi emisi terbesar adalah industri energi (43,83%), dengan subkategori pembangkit tenaga listrik sebagai penghasil emisi terbesar (Sunarti dkk., 2020). Menurut laporan IEA, pengurangan 6% dalam permintaan energi selama pandemi ini setara dengan pengurangan emisi CO₂ sekitar 2,6 gigaton (IEA, 2021). Pada tahun 2020 total konsumsi listrik Indonesia turun 1,6% dibandingkan dengan tingkat pertumbuhan rata-rata 10 tahun sebelumnya (5,9% per tahun). Seiring dengan penurunan konsumsi listrik, emisi CO₂ dari sektor energi turun 7,4% dari level terakhir di 2018 (BP, 2021). Penurunan emisi ini disumbang oleh batu bara sebesar 8% (yang memiliki intensitas emisi tertinggi), minyak bumi sebesar 4,5%, dan gas alam sebesar 2,3%. Penyebab pemanasan global dapat dilakukan melalui peningkatan efisiensi dalam penggunaan sumber energi kandungan karbon rendah seperti energi angin, nuklir, dan solar (IESR, 2020).

World Energy Trilemma Index adalah parameter yang diberikan oleh World Energy Council untuk mengukur kinerja kebijakan energi. Ketiga parameter tersebut adalah ketahanan energi (*energy security*), distribusi energi (*energy equity*), dan kelestarian lingkungan (*environmental sustainability*) (WEC,

2020). Berangkat dari parameter dan permasalahan yang telah disebutkan, penggunaan energi baru dan terbarukan banyak dikembangkan seperti teknologi nuklir sebagai pemasok listrik. Pembangkit listrik tenaga nuklir dapat menghasilkan listrik rendah karbon dengan biaya yang stabil dan kompetitif. Pengembangan lebih lanjut dari teknologi nuklir diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan.

Pembangkit listrik tenaga nuklir yang beroperasi saat ini telah mengalami banyak pengembangan dari generasi pertama. Pengembangan dilakukan untuk meningkatkan peran sistem energi nuklir menjadi energi yang aman, berkelanjutan, andal, tahan proliferasi, dan ekonomis. Perencanaan generasi sistem energi nuklir inovatif ini dikenal sebagai Generasi IV. Sistem energi nuklir Generasi IV terdiri dari reaktor nuklir dan sistem konversi energinya serta fasilitas yang diperlukan untuk seluruh siklus bahan bakar mulai dari ekstraksi bijih hingga pembuangan limbah akhir. Menurut GIF, terdapat enam desain reaktor generasi IV yang akan dikembangkan, salah satunya adalah sistem reaktor cepat berpendingin gas (GFR). Sistem GFR (*Gas Cooled Fast Reactor*) adalah reaktor cepat berpendingin helium dengan siklus bahan bakar tertutup. GFR memiliki suhu luaran yang tinggi sehingga memungkinkan untuk mengalirkan listrik dengan efisiensi konversi yang tinggi. Dengan kombinasi spektrum neutron cepat dan daur ulang aktinida, GFR dapat meminimalkan produksi isotop limbah radioaktif berumur panjang (GIF, 2002).

Reaktor cepat memaksimalkan kegunaan sumber daya uranium dengan membiakkan plutonium dan dapat berkontribusi untuk meminimalkan kuantitas dan radiotoksitas limbah nuklir dengan transmudasi aktinida dalam siklus bahan bakar tertutup. Selanjutnya, GFR cocok untuk produksi hidrogen dan aplikasi proses panas melalui suhu outlet inti yang tinggi. Selain itu, konversi energi pada efisiensi termal yang tinggi dimungkinkan dengan desain saat ini sedang dipertimbangkan sehingga meningkatkan manfaat ekonomi dari GFR. Berdasarkan hal tersebut, GFR dipilih sebagai salah satu sistem reaktor nuklir Generasi IV yang akan dikembangkan berdasarkan potensi keberlanjutannya yang sangat baik.

Banyak penelitian yang telah dilakukan terhadap prospek reaktor berpendingin gas (GFR). Penelitian terhadap prospek bahan bakar UN-PuN pada reaktor cepat berpendingin gas helium 25-100MWe pernah dilakukan. Penelitian

ini menggunakan uranium alam dan plutonium yang diambil dari bahan bakar sisa *Light Water Reactor* (LWR). Variasi fraksi bahan bakar yang digunakan adalah 40% sampai 65%, kelongsong 10%, dan moderator 25% sampai dengan 50%. Variasi daya yang dilakukan adalah 75-300 MWth (25-100 MWe). Hasil menunjukkan nilai $k\text{-eff}$ paling optimal pada persentase plutonium 11%. Daya 150 MWth, 225 MWth, dan 300 MWth memiliki reaktivitas berlebih ($\% \Delta k/k$) kurang dari 2% (Syarifah dkk., 2016).

Studi desain reaktor cepat berpendingin gas 200MWth dengan bahan bakar nitrida (UN-PuN) umur panjang tanpa pengisian bahan bakar telah dilakukan. Pada penelitian ini perhitungan dilakukan dengan menggunakan kode SRAC dengan perhitungan PIJ untuk perhitungan *fuel pin cell* dan perhitungan CITATION untuk perhitungan *core* serta menggunakan perpustakaan data JENDL-3.2. Variasi fraksi bahan bakar yang digunakan adalah 50% sampai 60%. Diameter *core* aktif 150 cm dan tinggi *core* aktif 100 cm. Lebar aksial radial reflektor adalah 50 cm. Variasi daya yang dilakukan adalah 100 MWth sampai 500 MWth. Desain optimum tercapai pada saat daya 200 MWth, persentase variasi Plutonium untuk bahan bakar F1:F2:F3 = 9%:11%:13%. Perbandingan fraksi bahan bakar: *cladding: coolant* = 55%:10%:35%. Nilai $k\text{-eff}$ optimum adalah 1,0142 dengan nilai *excess reactivity* mencapai 1,403% (Syarifah dkk., 2016).

Rancangan optimum GFR 500 MWth tanpa pengisian bahan bakar dengan periode *burn-up* 10 tahun telah dilakukan. Inti reaktor menggunakan desain geometri silinder 2D yang dibagi menjadi tiga wilayah untuk bahan bakar. Perancangan reaktor ini difokuskan pada optimasi fraksi bahan bakar menggunakan bahan bakar nitrida (UN-PuN) untuk GFR. Variasi fraksi bahan bakar yang digunakan adalah 40% sampai dengan 65%. Rancangan optimum GFR 500MWth tanpa pengisian bahan bakar dengan waktu pembakaran 10 tahun tercapai ketika radius F1-F2-F3 berturut-turut adalah 50cm-30cm-30cm dan tinggi F1-F2-F3 adalah 50cm-40cm-30cm, persentase variasi Plutonium pada F1-F2-F3 = 7%-10%-13%. Fraksi bahan bakar optimal adalah 41% dengan penambahan 2% campuran Plutonium dalam bahan bakar. Nilai *excess reactivity* pada kondisi ini 1,848 $\% \Delta k/k$ dan nilai $k\text{-eff}$ adalah 1,01883 (Syarifah dkk., 2017).

Perhitungan penambahan aktinida minor pada bahan bakar uranium plutonium nitrida untuk reaktor cepat berpendingin gas modular telah dilakukan. Aktinida minor merupakan limbah LWR atau sering disebut dengan SNF (*spent nuclear fuel*) yang memiliki waktu paruh yang relatif lama dan toksisitas yang tinggi. Perhitungan neutronik dirancang dengan menggunakan SRAC Code versi 2006 (*Standard Reactor Analysis Code*) dengan data nuklida dari JENDL-4.0. Ada tiga jenis nuklida yang ditambahkan ke dalam bahan bakar yaitu Neptunium-237, Amerisium-241, dan Amerisium-243. Penambahan aktinida minor dapat menurunkan nilai $k\text{-eff}$ pada awal pembakaran dan penambahan protaktinium sebagai *burnable poison* dapat menurunkan nilai $k\text{-eff}$ pada awal *burn-up* hingga akhir *burn-up* (Syarifah dkk., 2020).

Analisis fraksi volume bahan bakar dengan uranium karbida dalam *Gas Cooled Fast Reactor* telah dilakukan. Penelitian ini menggunakan perhitungan konfigurasi teras homogen dan heterogen. Hasil perbandingan densitas antara homogen dan heterogen menghasilkan *peaking power* pada teras heterogen mengalami *flattening* (perataan). Hasil analisis fraksi volume bahan bakar menghasilkan nilai $k\text{-eff}$ semakin besar sebanding dengan penambahan volume bahan bakar, *fuel fraction* dengan $k\text{-eff}$ kritis didapat pada fraksi 50%. Rancangan optimum berdasarkan analisis yang telah dilakukan adalah fraksi volume bahan bakar sebesar 49% dengan konfigurasi teras heterogen 3 jenis persentase bahan bakar, untuk bahan bakar tipe 1 = 9%, bahan bakar tipe 2 = 12% dan bahan bakar tipe 3 = 15% dengan reaktor berbentuk silinder dan memiliki diameter teras 240 cm dan tinggi teras 100 cm (Syarifah dkk., 2021).

GFR, dalam pengembangannya, memiliki tantangan dalam ketahanan bahan bakar dan proses siklus bahan bakar yang ekonomis dan efisien. Upaya pengembangan bahan bakar harus dilakukan berkaitan erat dengan upaya desain reaktor sehingga bahan bakar memenuhi persyaratan konsep keselamatan dan *sustainability*. Analisis pengembangan desain GFR dapat dilakukan dengan optimasi teras dari sudut pandang neutronik (GIF, 2020). Analisis neutronik pada perancangan reaktor nuklir sangat diperlukan untuk mengetahui informasi-informasi seperti nilai faktor multiplikasi ($k\text{-eff}$), distribusi fluks neutron, dan distribusi rapat daya. Penelitian Syarifah (2016), Syarifah (2017), telah menunjukkan

bahwa reaktor cepat berpendingin gas dengan bahan bakar UN-PuN telah mencapai optimum dengan periode *burn-up* 10 tahun tanpa *refueling*. Analisis neutronik yang dilakukan menggunakan kode SRAC dengan *library* data JENDL-3.2. Penelitian Syarifah (2020) menganalisis pengaruh penambahan aktinida minor dalam bahan bakar reaktor cepat berpendingin gas. Penelitian terbaru (Syarifah dkk., 2021), merupakan studi awal penggunaan bahan bakar uranium karbida pada reaktor cepat berpendingin gas. Penggunaan bahan bakar uranium karbida menunjukkan hasil kurang optimum jika dibandingkan dengan penggunaan UN-PuN. Maka, dengan ini penulis mengajukan penelitian terkait optimasi desain bahan bakar pada reaktor cepat berpendingin gas berbahan bakar uranium-plutonium nitrida (UN-PuN) yang dianalisis dari segi neutronik menggunakan kode SRAC-COREBN.

Analisis neutronik dimulai dengan perhitungan *burn-up* per sel bahan bakar (*fuelpin*) menggunakan sistem kode PIJ pada SRAC2006 dan perpustakaan data JENDL4.0. SRAC (*Standard Thermal Reactor Analysis Code*) adalah sistem kode untuk analisis neutronik untuk berbagai jenis reaktor yang dikembangkan oleh JAEA (Okumura dkk., 2002). Perhitungan kedua yakni perhitungan *burn-up* pada tingkat teras reaktor menggunakan kode COREBN. Luaran dari COREBN yang akan dianalisis, di antaranya adalah; nilai *k-eff*, *excess reactivity* dan distribusi rapat daya relatif sehingga dapat diperoleh dimensi kritis bahan bakar reaktor. Dimensi bahan bakar optimum akan menghasilkan kondisi paling baik dari kinerja reaktor nuklir yang sesuai dengan konsep keselamatan dan *sustainability*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka rumusan masalah untuk penelitian optimasi bahan bakar UN-PuN untuk reaktor cepat berpendingin gas menggunakan teras 3D dengan kode SRAC-COREBN adalah sebagai berikut :

- a. bagaimana pengaruh penambahan persentase plutonium terhadap nilai parameter neutronik pada GFR berbahan bakar Uranium Plutonium Nitrida (UN-PuN) dengan menggunakan kode SRAC-COREBN?
- b. bagaimana pengaruh variasi fraksi volume bahan bakar terhadap nilai parameter neutronik pada bahan bakar Uranium Plutonium Nitrida (UN-PuN) dengan kode SRAC-COREBN?

- c. bagaimana hasil optimasi pada GFR berbahan bakar Uranium Plutonium Nitrida (UN-PuN) dengan menggunakan kode SRAC-COREBN?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian optimasi bahan bakar UN-PuN untuk reaktor cepat berpendingin gas menggunakan teras 3D dengan kode SRAC-COREBN adalah sebagai berikut:

- a. mengetahui pengaruh penambahan persentase plutonium terhadap parameter neutronik pada GFR berbahan bakar Uranium Plutonium Nitrida (UN-PuN) dengan menggunakan kode SRAC-COREBN
- b. mengetahui pengaruh variasi fraksi volume bahan bakar terhadap nilai parameter neutronik pada bahan bakar Uranium Plutonium Nitrida (UN-PuN) dengan kode SRAC-COREBN
- c. mengetahui hasil optimasi pada GFR berbahan bakar Uranium Plutonium Nitrida (UN-PuN) dengan menggunakan kode SRAC-COREBN

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian optimasi bahan bakar UN-PuN untuk reaktor cepat berpendingin gas menggunakan teras 3D dengan kode SRAC-COREBN yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. memberikan informasi tentang kode SRAC-COREBN untuk menganalisis neutronik dari desain reaktor GFR berbahan bakar uranium plutonium nitrida
- b. memberikan informasi terkait desain GFR yang paling optimal

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**2.1 PLTN**

Pembangkit listrik tenaga nuklir adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan panas hasil reaksi nuklir. Energi nuklir diperoleh dengan menggunakan satu atau lebih reaktor nuklir sebagai sumbernya. Prinsip kerja PLTN, yaitu menggunakan uap panas bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin. Putaran turbin kemudian digunakan untuk menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik (BATAN, 2015). Bahan bakar fisil dalam teras reaktor ditembak oleh neutron menyebabkan inti yang tidak stabil dan berakhir dengan melakukan pembelahan inti dengan melepaskan energi kinetik, radiasi gamma, dan neutron bebas. Neutron bebas akan menginisiasi pembelahan inti lain yang tidak stabil sehingga menciptakan reaksi fisi berantai. Pelepasan energi kinetik secara terus-menerus dari reaksi berantai inilah yang menyediakan daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga nuklir (Joffe, 2014).

2.2 Reaktor Nuklir dan Perkembangannya

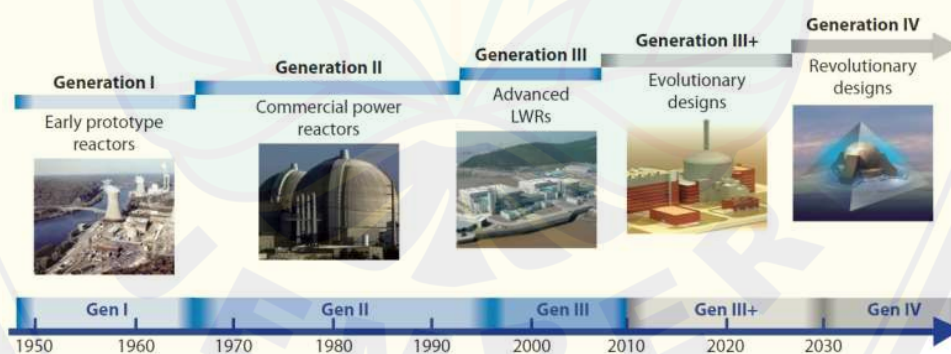
Reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya reaksi nuklir. Reaktor nuklir berdasarkan fungsinya dibagi menjadi dua jenis. Jenis pertama adalah reaktor riset yang tujuannya untuk penelitian, pendidikan, dan produksi radioisotop. Jenis kedua adalah reaktor daya yang digunakan sebagai pembangkit energi listrik. Reaksi nuklir yang terjadi di teras reaktor akan menghasilkan energi panas yang cukup besar. Reaktor riset akan dirancang sedemikian rupa sehingga panas yang dihasilkan serendah mungkin dan dibuang langsung ke alam. Sementara itu, untuk reaktor daya, energi panas akan menghasilkan uap dan akan digunakan untuk memutar turbin generator (Adiwardojo dkk., 2010).

Reaktor nuklir menggunakan sejumlah sistem untuk secara efektif mengontrol dan mendistribusikan energi yang dihasilkan oleh reaksi berantai fisi. Batang kendali adalah batang dengan bahan penyerap neutron yang dapat dimasukkan ke dalam reaktor untuk mengontrol reaksi yang sedang berlangsung. Bahan yang digunakan pada batang kendali biasanya adalah boron atau logam lain seperti perak, kadmium, dan nikel. Moderator adalah zat yang digunakan untuk memperlambat dan mengontrol jalannya proses fisi. Moderator reaktor biasanya

menggunakan air ringan, air berat, atau grafit. Pendingin digunakan untuk menghilangkan panas berlebih dari teras reaktor dan mencegah kebocoran. Reaktor menghasilkan sejumlah produk sampingan, termasuk beberapa bahan radioaktif berumur pendek hingga beberapa dengan waktu paruh yang lebih lama (Peryoga dkk., 2007).

Berdasarkan sejarahnya, awal mula pengembangan reaktor nuklir digunakan untuk senjata pada perang dunia II (*Manhattan Project*). Namun, seiring dengan pengembangan penelitian energi nuklir, beberapa ilmuwan menciptakan *breeder reactors* yang akan menghasilkan lebih banyak energi dari reaksi fisi berantai. Pemerintah Amerika Serikat akhirnya membentuk *Atomic Energy Commission* (AEC) dengan tujuan mengembangkan energi nuklir untuk keperluan energi listrik bagi masyarakat. Reaktor nuklir pertama yang menghasilkan listrik adalah *Experimental Breeder reactor* (EBR-1) yang dirancang dan dioperasikan oleh *Argonne National Laboratory* dan berlokasi di Idaho, AS. Reaktor mulai beroperasi pada Desember 1951 (Feely, 1984).

Sampai saat ini jumlah PLTN yang beroperasi adalah 444 unit dengan jumlah total kapasitas 394.585 MWe, sedangkan PLTN yang sedang dibangun berjumlah 50 unit dengan kapasitas energi 52.560 MWe (PRIS, 2022). Berdasarkan gambar 2.1, perkembangan PLTN terbagi menjadi beberapa generasi. Generasi I merupakan prototipe awal dalam pengembangan reaktor. Generasi II merupakan generasi pertama reaktor komersil. Generasi III merupakan perkembangan dari *Light Water Reactor* dan generasi III+ mengalami perbaikan desain terutama bagian *safety* (GIF, 2014).



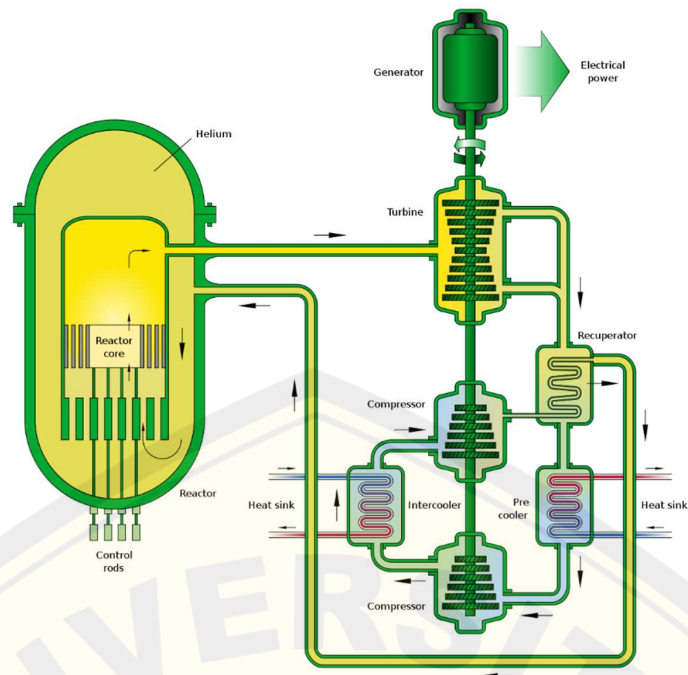
Gambar 2.1 Skema Perkembangan Reaktor Nuklir (Sumber: GIF, 2014)

Sistem pembangkit listrik tenaga nuklir generasi IV telah dikembangkan demi membantu memenuhi kebutuhan energi masa depan dunia. Desain reaktor generasi IV adalah penyempurnaan dari desain generasi III/III+. Desain Generasi IV bertujuan meningkatkan efisiensi bahan bakar, mengurangi produksi limbah, lebih ekonomis, dan memenuhi standar keamanan dan ketahanan proliferasi yang ketat. GIF memilih enam sistem reaktor untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut. Reaktor nuklir generasi ini termasuk; *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR), *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR), *Molten Salt Reactor* (MSR), *Supercritical Water Cooled Reactor* (SCWR), *Sodium Cooled Reactor* (SFR), dan *Very High Temperature Reactor* (VHTR) (GIF, 2002).

2.3 GFR

Gas Cooled fast Reactor (GFR) adalah reaktor cepat berpendingin gas helium, suhu tinggi dengan siklus bahan bakar tertutup. Keunggulan sistem ini menggunakan spektrum cepat untuk keberlanjutan jangka panjang sumber daya uranium dan minimalisir limbah melalui beberapa pemrosesan ulang bahan bakar dan fisi aktinida berumur panjang. GFR dengan sistem efisiensi siklus termal tinggi sehingga dapat dimanfaatkan untuk industri dari panas yang dihasilkan, misalnya untuk produksi hidrogen (GIF, 2002).

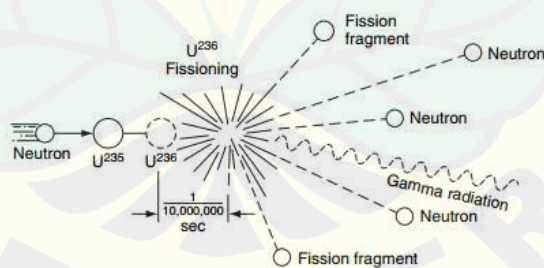
Gambar 2.2 menggambarkan sebuah *heat exchanger* mentransfer panas hasil reaksi fisi dari pendingin helium primer ke siklus gas sekunder yang mengandung campuran helium-nitrogen untuk menggerakkan turbin. Turbin menggunakan *direct cycle system* yang lebih efektif menghasilkan listrik. Panas buangan dari turbin digunakan untuk membangkitkan uap di pembangkit uap yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap (GIF, 2020). Penelitian GFR berfokus pada bahan bakar dan teknologi daur ulang bahan bakar. Dalam sistem generasi IV, GFR menduduki peringkat tertinggi dalam aspek keamanan dan keandalan dan diprediksi siap dikomersialkan pada tahun 2025 (Anggoro dkk., 2013).



Gambar 2.2 Skema Reaktor Pendingin Gas (Sumber: GIF, 2002)

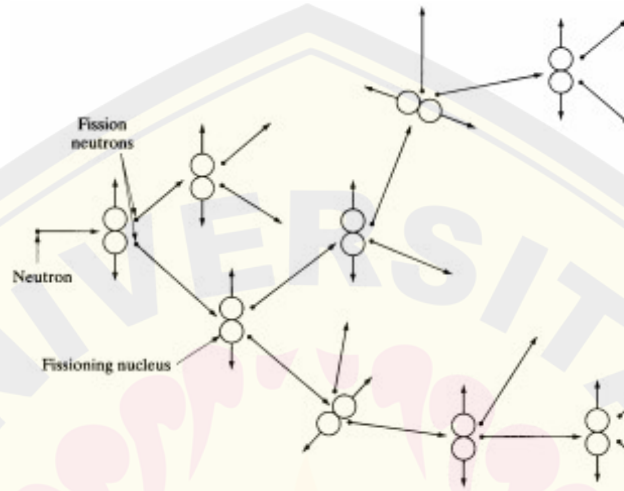
2.4 Reaksi Fisi Berantai

Energi nuklir berasal dari dua reaksi nuklir, fisi dan fusi. Reaksi fisi adalah reaksi inti atom terpecah menjadi inti-inti yang lebih kecil akibat neutron bertumbuk dengan inti tertentu. Dalam reaksi fisi, atom dengan nomor atom besar seperti Thorium-232, Uranium-235, atau Plutonium-239 akan menghasilkan dua (atau lebih) fragmen atau produk fisi dan neutron tambahan (2 hingga 3 neutron). Setiap reaksi fisi melepaskan sekitar 200 MeV energi (Santiani, 2011).



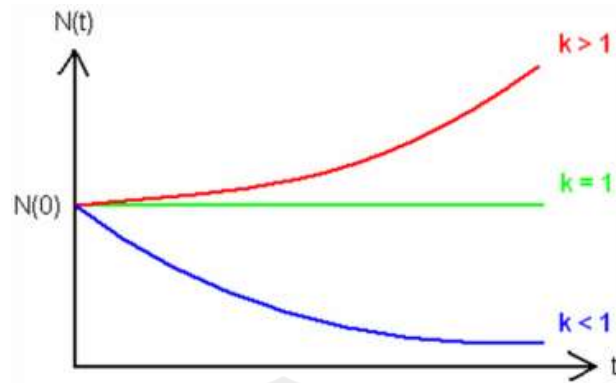
Gambar 2.3 Reaksi Fisi (Sumber : Lewis, 2008)

Neutron yang dipancarkan oleh hasil reaksi fisi akan menginduksi reaksi fisi pada inti material lainnya. Satu neutron dapat memicu 2 atau 3 fisi lebih lanjut dan seterusnya. Inilah yang dinamakan reaksi fisi berantai. Reaksi berantai dapat dijelaskan secara kuantitatif dengan faktor multiplikasi, yang dilambangkan dengan simbol k . Nilai k didefinisikan sebagai rasio jumlah neutron fisil dalam satu generasi dibagi dengan jumlah neutron fisil pada generasi sebelumnya (Lamarsh dan Baratta, 1955).



Gambar 2.4 Reaksi Fisi Berantai (Sumber: Lamarsh dan Baratta, 1955)

Faktor multiplikasi (k) ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Berdasarkan dari gambar 2.5, didapatkan tiga jenis keadaan teras reaktor yang ditentukan oleh faktor multiplikasinya. Nilai $k > 1$ disebut reaktor superkritis yang artinya jumlah neutron bertambah sebagai fungsi waktu. Keadaan nilai $k = 1$ menunjukkan bahwa reaktor berada pada kondisi kritis yang artinya jumlah neutron tidak berkurang atau pun bertambah tetapi konstan (tetap). Nilai $k < 1$ disebut reaktor subkritis yang artinya jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu. Ketika faktor multiplikasi suatu reaktor tidak sama dengan tepat satu, perubahan fluks neutron menyebabkan perubahan tingkat daya (Zweifel, 1973).



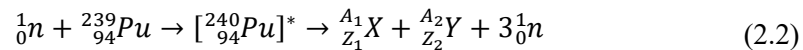
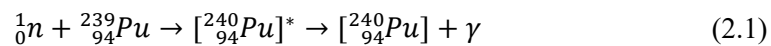
Gambar 2.5 Faktor multiplikasi (Sumber: Zweifel, 1973)

2.4.1 Reaksi Fisi pada Plutonium

Penggunaan uranium sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir akan menghasilkan limbah nuklir pada akhir masa operasinya. Banyaknya limbah nuklir yang terbentuk memiliki waktu paruh yang lama dan radiotoksitas yang tinggi, salah satunya plutonium (Su'ud dan Sekimoto, 2013). Plutonium memiliki prospek untuk menggantikan proses pengayaan pada U-235 (Novalianda dkk., 2018). Penelitian ini menggunakan bahan bakar uranium plutonium nitrida untuk reaktor cepat berpendingin gas. Uranium yang digunakan pada penelitian ini adalah uranium alami yang terdiri dari dua isotop utama: U-235 (0,71%) dan U-238 (99,28%) (Andersen dan Ghassemi, 2004), sedangkan untuk plutonium yang digunakan adalah plutonium limbah pembangkit listrik tenaga nuklir yang telah beroperasi.

Plutonium-239 adalah isotop fisi dengan *cross-section* fisi untuk neutron termal adalah sekitar 750 barn (untuk neutron 0,025 eV). Sebagian besar reaksi absorpsi menghasilkan reaksi fisi, tetapi sebagian reaksi menghasilkan penangkapan radiasi membentuk Pu-240. *Cross-section* untuk penangkapan radiasi untuk neutron termal adalah sekitar 270 barn (untuk neutron 0,025 eV). Oleh karena itu, sekitar 27% dari semua reaksi absorpsi menghasilkan penangkapan radiasi neutron yang datang, ditunjukkan oleh persamaan 2.1. Inti plutonium-239 menangkap neutron dan membentuk Pu-240 serta melepaskan sinar gamma. Sebesar 73% semua reaksi absorpsi menghasilkan fisi, ditunjukkan oleh persamaan 2.2. Inti plutonium-239 menangkap neutron menjadi Pu-240. Plutonium-240 mengalami fisi, inti Pu-240 membelah menjadi dua inti yang lebih kecil dan

menghasilkan beberapa neutron (rata-rata adalah 2,89 neutron per fisi oleh neutron termal) dan pelepasan energi dalam bentuk panas dan sinar gamma.



(Andersen dan Ghassemi, 2004)

2.5 Siklus Hidup Neutron

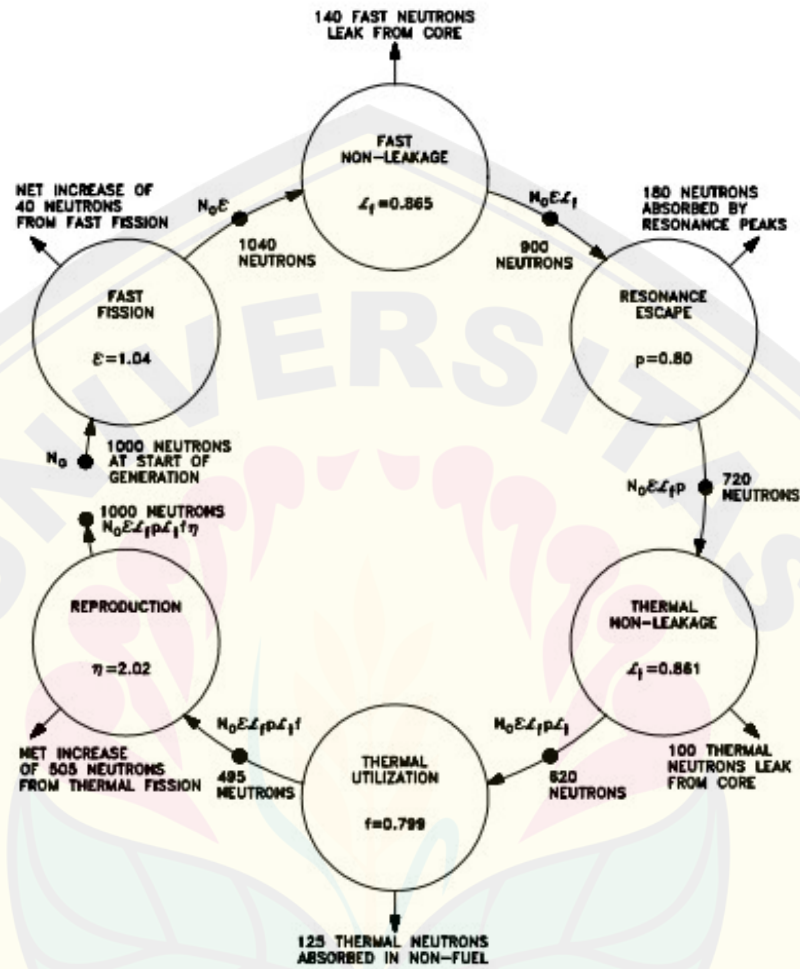
Siklus hidup neutron mengkuantifikasi proses reaksi fisi yang terjadi di reaktor nuklir. Neutron memiliki massa sedikit lebih besar dari proton, yaitu $m_n = 1,67495 \times 10^{-27}$ kg, dan mempunyai sifat kelistrikan netral. Neutron bukanlah partikel yang stabil kecuali ketika ia terikat pada inti atom. Neutron bebas meluruh menjadi proton dengan emisi elektron negatif dan antineutrino melalui proses yang memakan waktu rata-rata sekitar 12 menit (Lamarsh dan Baratta, 1955).

Neutron yang diproduksi oleh reaksi fisi tidak semua dapat memicu reaksi fisi lain karena sebagian neutron akan diserap setelah termalisasi. Proses siklus hidup neutron dikuantifikasi oleh faktor-faktor yang merupakan faktor multiplikasi efektif ($k\text{-eff}$). Faktor multiplikasi efektif ($k\text{-eff}$), didefinisikan sebagai rasio neutron yang dihasilkan oleh fisi dalam satu generasi dengan jumlah neutron yang hilang melalui penyerapan dan kebocoran pada generasi sebelumnya. Faktor multiplikasi efektif dapat dinyatakan secara matematis seperti yang ditunjukkan di bawah ini.

$$k\text{-eff} = \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \cdot L_f \cdot L_t \quad (2.3)$$

Faktor fisi cepat (ε) didefinisikan sebagai rasio neutron cepat yang dihasilkan oleh fisi pada semua energi dengan jumlah neutron cepat yang dihasilkan dalam fisi termal. Faktor lolos resonansi (p) adalah probabilitas bahwa neutron akan diperlambat menjadi energi panas dan akan lolos dari penangkapan resonansi. Kemudian faktor pemanfaatan termal, f , adalah fraksi neutron termal yang diserap dalam bahan bakar nuklir dengan yang diserap seluruh material pada reaktor. Jumlah neutron yang dilahirkan pada generasi baru ditentukan oleh faktor reproduksi neutron (η). Faktor reproduksi didefinisikan sebagai rasio jumlah neutron cepat yang dihasilkan oleh fisi termal dengan jumlah neutron termal yang diserap dalam bahan bakar. L_f merupakan probabilitas ketidkebocoran neutron cepat. L_f juga didefinisikan sebagai perbandingan jumlah neutron cepat yang tidak

bocor dari teras reaktor selama proses perlambatan dengan jumlah neutron cepat yang dihasilkan oleh fisi di semua energi. Selama difusi neutron, beberapa neutron bocor keluar dari batas inti reaktor sebelum diserap. L_t adalah perbandingan jumlah neutron termal yang tidak bocor dari teras reaktor selama proses difusi neutron terhadap jumlah neutron yang mencapai energi termal (DOE, 1993).



Gambar 2.6 Siklus Hidup Neutron (Sumber: DOE, 1993)

Keseimbangan antara produksi neutron dan penyerapannya di inti serta kebocoran keluar dari inti menentukan nilai faktor multiplikasi. Jika kebocoran cukup kecil untuk diabaikan, faktor multiplikasi hanya bergantung pada keseimbangan antara produksi dan penyerapan, dan disebut faktor multiplikasi tak hingga ($k-inf$) karena inti dianggap sangat besar sehingga tidak memiliki kebocoran. Ketika faktor kebocoran dimasukkan, faktor tersebut disebut faktor multiplikasi

efektif (*k-eff*). Gambar 2.6 mengilustrasikan siklus hidup neutron dengan nilai nominal yang diberikan untuk masing-masing dari enam faktor multiplikasi (persamaan 2.3) (DOE, 1993).

Siklus hidup neutron dalam reaktor cepat sangat berbeda dengan reaktor termal. Desain reaktor cepat dibuat dengan tujuan untuk meminimalkan termalisasi neutron. Hampir semua fisi yang terjadi dalam reaktor cepat disebabkan oleh neutron cepat. Karena itu, banyak faktor yang diperhitungkan oleh siklus hidup neutron reaktor termal tidak relevan dengan siklus hidup neutron reaktor cepat. Probabilitas lepas resonansi tidak signifikan karena sangat sedikit neutron yang ada pada energi di mana penyerapan resonansi signifikan. Probabilitas termal non-kebocoran tidak ada karena reaktor dirancang untuk menghindari termalisasi neutron. Istilah terpisah untuk menangani pembelahan cepat tidak diperlukan karena semua pembelahan adalah pembelahan cepat dan ditangani oleh faktor reproduksi (DOE, 1993).

2.6 Teori Difusi

Persamaan difusi neutron adalah persamaan keseimbangan yang menggambarkan transpor neutron dalam ruang, energi, dan waktu. Solusi dari persamaan difusi mengandung fluks neutron yang merepresentasikan laju neutron dalam berinteraksi dengan medium sekitarnya juga neutron yang bocor keluar reaktor (Suparlina dkk., 2010). Sebagai contohnya, densitas daya dalam reaktor sebanding dengan laju reaksi fisi dan penentuan kekritisan sistem bergantung dari kebocoran neutron dan laju fisi neutron sendiri. Asumsi mempertimbangkan populasi neutron pada waktu t dalam volume fase, yang terdiri dari volume satuan di sekitar \mathbf{r} dan interval energi satuan di sekitar E maka pernyataan kesetimbangan:

$$\begin{bmatrix} \text{Laju} \\ \text{Perubahan} \\ \text{Jumlah} \\ \text{Neutron grup}(g) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Sumber} \\ \text{Neutron} \\ \text{Fisi}(g) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{perubahan} \\ \text{Neutron} \\ \text{leakage} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Perubahan} \\ \text{Neutron} \\ \text{Absorpsi} \\ (g) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Perubahan} \\ \text{Neutron} \\ \text{terhambur} \\ (g) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Neutron} \\ \text{masuk karena} \\ \text{hamburan} (g) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

(Lee, 2020)

Secara matematis persamaan 2.4 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = S_g + \vec{\nabla} \cdot D_g \vec{\nabla} \phi_g - \Sigma_{a,g} \phi_g - \Sigma_{s,g} \phi_g - \sum_{g^i}^{g^n} \Sigma_{s,g} \rightarrow g^i \phi_{g^i} \quad (2.5)$$

Dengan S_g dapat ditulis sebagai berikut:

$$S_g = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g^i}^{g^n} v_{g^i} \Sigma f_{g^i} \phi_{g^i} \quad (2.6)$$

Perubahan neutron yang hilang karena absorpsi dan hamburan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Sigma R_g \phi_g = \Sigma_{ag} \phi_g + \Sigma_{sg} \phi_g \quad (2.7)$$

Karena keadaan *steady state* $\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = 0$, maka persamaan 2.5 menjadi

$$-\vec{\nabla} \cdot D_g \vec{\nabla} \phi_g + \Sigma R_g \phi_g = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g^i}^{g^n} v_{g^i} \Sigma f_{g^i} \phi_{g^i} - \sum_{g^i}^{g^n} \Sigma_{sg} \rightarrow g^i \phi_{g^i} \quad (2.8)$$

Keterangan :

D_g : Tetapan difusi grup g,

Σg^i : Penampang lintang makroskopis grup g dari jenis reaksi i,

Σf_{g^i} : Probabilitas terjadinya reaksi fisi tiap detik pada grup g,

ϕ_{g^i} : Fluks neutron yang bergantung pada ruang dan energi pada grup g,

k_{eff} : Faktor multiplikasi efektif.

(Duderstadt, 1976)

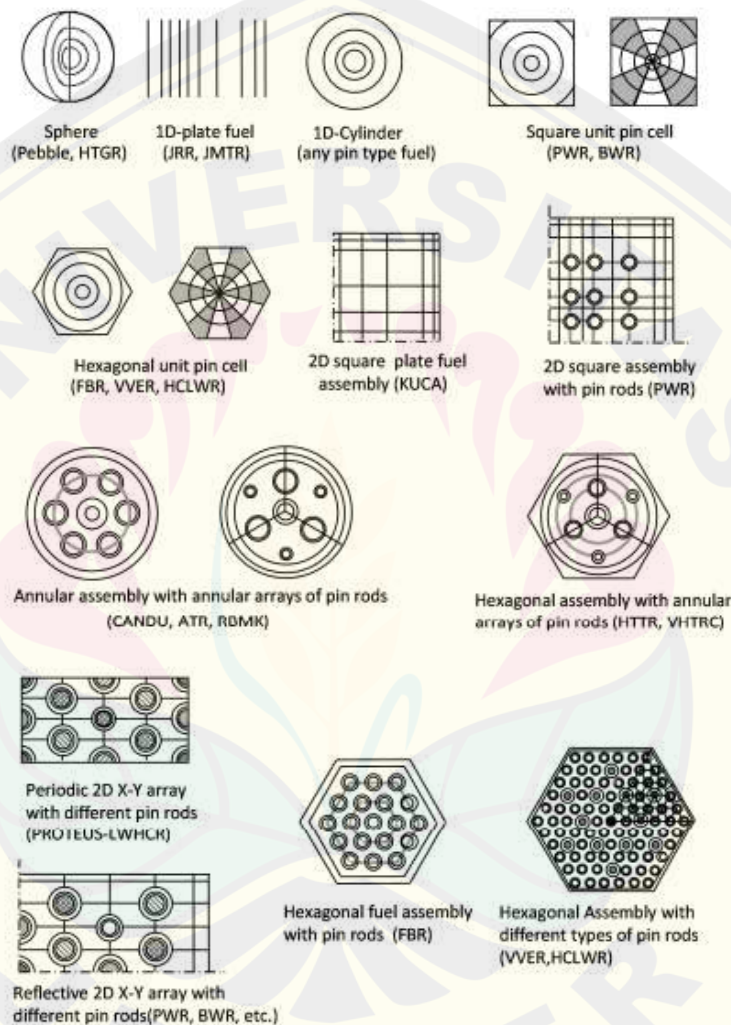
2.7 SRAC-COREBN

Standard Thermal Reactor Analysis Code (SRAC) adalah program yang digunakan sebagai sistem kode neutron untuk analisis penghitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor cepat dan termal. Program yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) pada tahun 1978 ini bertujuan dapat membantu dalam desain dan analisis reaktor. Pustaka nuklida yang digunakan SRAC berdasarkan JENDL, ENDF/B, dan JEF terbaru (tersedia untuk lebih dari 300 nuklida). SRAC dapat dioperasikan pada sistem operasi UNIX atau yang menyerupainya seperti LINUX dan FreeBSD (Okumura dkk., 2002).

Gambar 2.8 menunjukkan struktur sistem dari SRAC. SRAC terdiri atas inetgrasi lima kode dasar untuk transportasi neutron dan perhitungan difusi, yakni:

1. PIJ berdasarkan metode *collision probability* yang telah dikembangkan oleh JAERI dan berlaku untuk 16 jenis model kisi (Gambar 2.7)

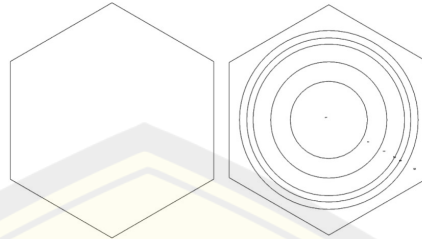
2. kode transpor S_N ANISN (1D) yang terdiri dari tiga jenis geometri *slab* (X), silinder (Y) dan bola (R_s).
3. kode transpor S_N TWOTRAN(2D) yang terdiri dari tiga jenis geometri *slab* (X-Y), silinder (R-Z), dan lingkaran (R- θ).
4. kode perhitungan difusi TUD (1D) yang terdiri dari geometri *slab* (X), silinder (Y) dan bola (R_s).
5. kode perhitungan difusi CITATION (multi-dimensi). yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk, segitiga dan segi enam (heksagonal)



Gambar 2.7 Geometri kisi dengan metode *collision probability* (Sumber: Okumura dkk., 2002)

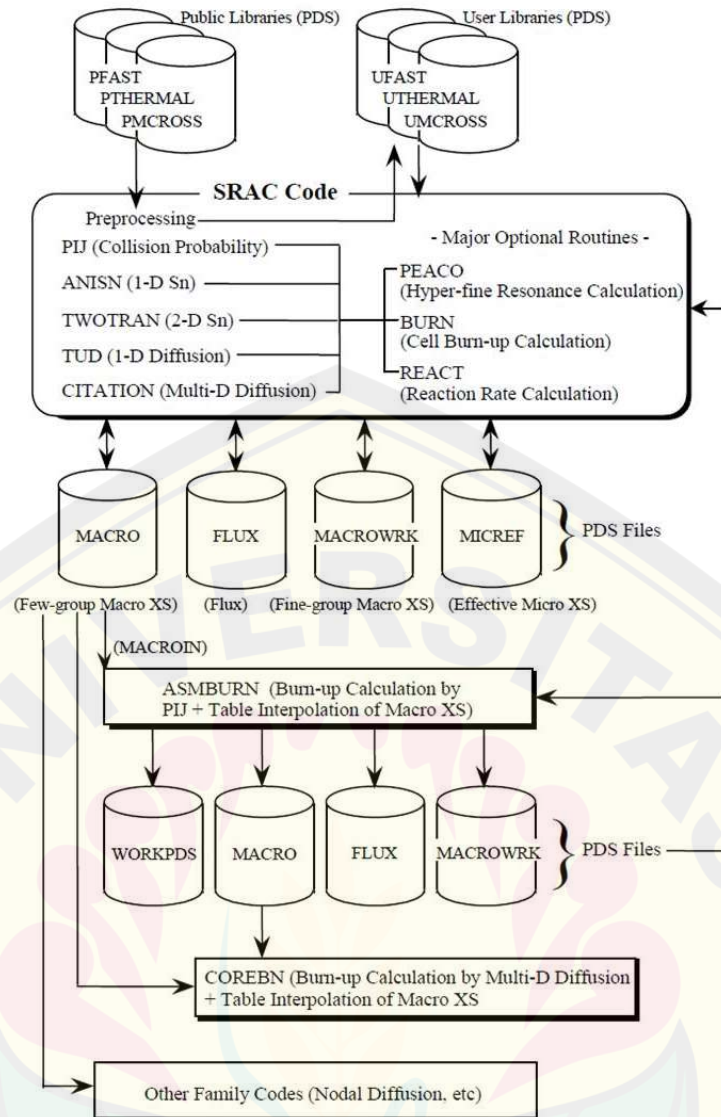
Sistem ini juga mencakup dua kode tambahan ASMBURN untuk perhitungan *burn-up fuel assembly* dan COREBN untuk perhitungan *burn-up* teras multi-dimensi

(Okumura dkk., 2002). Penelitian optimasi bahan bakar UN-PuN untuk reaktor cepat berpendingin gas menggunakan SRAC2006 dengan pustaka nuklida JENDL4.0 untuk perhitungan PIJ. Penelitian ini menggunakan *fuelpin* dengan bentuk geometri heksagonal (Gambar 2.8). Perhitungan *burn-up* tingkat teras menggunakan kode COREBN .



Gambar 2.8 Geometri heksagonal untuk perhitungan pin bahan bakar (PIJ)
(Okumura dkk., 2002)

COREBN adalah kode tambahan dari sistem SRAC untuk perhitungan *burn-up* teras multi-dimensi berdasarkan teori difusi dan interpolasi penampang makroskopik yang ditabulasikan ke parameter lokal seperti derajat *burn-up*, suhu moderator, dan sebagainya. Input COREBN menggunakan file data makroskopik berbentuk file PS. Tabulasi data penampang makroskopik diperoleh dengan perhitungan *burn-up* sel (PIJ) dengan metode *collision probability* menggunakan SRAC. Hasil dari PIJ berupa data penampang makroskopik yang berupa file PDS. File output dari PIJ akan dikonversi menjadi file PS menggunakan kode PDStoPS. Input kode COREBN memerlukan keadaan masukan operasi reaktor antara lain daya termal, berapa lama reaktor beroperasi, konfigurasi geometri teras, bahan bakar dan batang kendali dalam teras, serta muatan bahan bakar dan non bahan bakar yang berada dalam teras. Keadaan masukan tersebut dideklarasikan menggunakan kode HIST. Kode COREBN dapat dieksekusi setelah kode HIST dieksekusi. Keluaran (*output*) yang dihasilkan oleh kode COREBN diantaranya nilai faktor multiplikasi efektif (*k-eff*) dan distribusi daya (Okumura, 2007).



Gambar 2.9 Struktur Sistem SRAC2006 (Sumber: Okumura dkk., 2002)

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian tugas akhir dirancang dengan tujuan untuk menganalisis desain bahan bakar paling optimal yang digunakan pada reaktor cepat berpendingin gas untuk mencapai target konsep keselamatan dan *sustainability*. Perangkat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Jenis Perangkat	: Laptop HP
Prosesor	: AMD A9-9425 RADEON R5
Sistem Tipe	: 64bit
RAM	: 8 GB
Sistem operasi	: Linux versi Ubuntu 16.04

Program yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- SRAC berfungsi sebagai sistem perhitungan neutronik dalam reaktor
- COREBN berfungsi sebagai perhitungan *burn-up* teras multi-dimensi berdasarkan teori difusi dan interpolasi penampang makroskopik
- JENDL 4.0 berfungsi sebagai pustaka nuklida yang digunakan dalam perhitungan SRAC
- Microsoft Excel dan Origin berfungsi sebagai *software* yang digunakan untuk *plotting* data

Penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur terkait topik yang diangkat. Hasil studi literatur menghasilkan identifikasi permasalahan serta parameter-parameter permasalahan. Perhitungan neutronik menggunakan sistem kode SRAC2006 dengan library JENDL 4.0 sebagai pustaka nuklida. Tahap pertama perhitungan *burn-up* dilakukan pada tingkat sel (PIJ). Output dari perhitungan *burn-up* sel adalah tabulasi data penampang lintang makroskopik dalam file PDS. File PDS akan dikonversi ke dalam bentuk file PS menggunakan kode PDStoPS agar dapat dibaca oleh COREBN. Perhitungan kedua adalah perhitungan *burn-up* tingkat teras. Perhitungan tingkat teras dimulai dengan membuat *history file* menggunakan kode HIST. Output kode HIST akan digunakan sebagai data *history* pada perhitungan kode COREBN. Analisis yang dilakukan

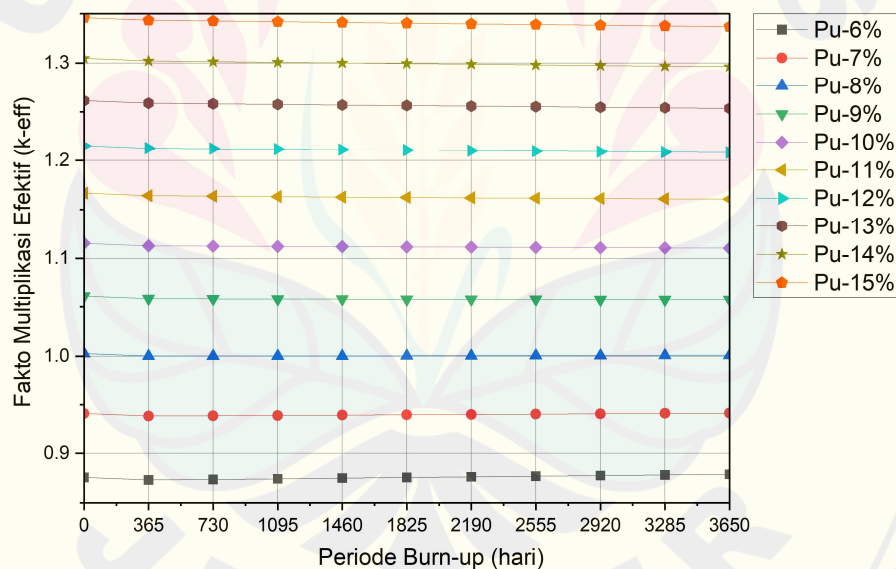
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian optimasi bahan bakar uranium plutonium nitrida (UN-PuN) pada reaktor cepat berpendingin gas telah dilakukan. Uranium yang digunakan pada penelitian ini adalah uranium alam. Uranium alam terdiri dari dua isotop utama, yaitu U-235 (0,71%) dan U-238 (99,28%) (Andersen dan Ghassemi, 2004). Adapun untuk plutonium yang digunakan adalah plutonium dari limbah pembangkit listrik tenaga nuklir yang telah beroperasi.

4.1 Pengaruh Penambahan Persentase Plutonium

4.1.1 Konfigurasi teras homogen

Penelitian ini menggunakan bahan bakar uranium plutonium nitrida dengan persentase plutonium yang divariasikan. Persentase pengayaan plutonium divariasikan mulai dari persentase 6% hingga 15% dengan total 100% pada bahan bakar UN-PuN. Apabila persentase plutonium sebanyak 5% dalam bahan bakar maka persentase uranium nitrida akan berjumlah 95%. Perhitungan teras homogen ini dilakukan pada fraksi volume bahan bakar sebesar 60%.



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Nilai k_{eff} Terhadap Waktu *Burn-up* Pada Konfigurasi Teras Homogen

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian optimasi bahan bakar UN-PuN untuk reaktor cepat berpendingin gas menggunakan teras 3D dengan kode SRAC-COREBN adalah sebagai berikut :

- a. Nilai k_{eff} semakin naik berbanding lurus dengan penambahan persentase plutonium. Sedangkan nilai k_{eff} sepanjang periode *burn-up*nya menurun. Kondisi ini diakibatkan karena semakin besar persentase plutonium yang digunakan, maka semakin banyak pula jumlah bahan bakar fisil dalam bahan bakar. Adapaun semakin lama pembakaran, maka jumlah bahan bakar fisil akan semakin berkurang. Rapat daya semakin naik seiring dengan penambahan persentase plutonium. Konfigurasi teras homogen menghasilkan bahan bakar optimal pada persentase 8% dengan rapat daya rata-rata adalah 75,03 Watt/cc dengan rapat daya maksimumnya adalah 107,4 Watt/cc. Teras homogen memiliki nilai rapat daya maksimum yang masih lebih tinggi dari batasan rapat daya reaktor berumur panjang. Teras heterogen menghasilkan rapat daya relatif yang lebih rendah dibanding homogen. Namun, nilai k_{eff} pada teras heterogen belum ada pada kondisi kritis (sama dengan satu). Persentase bahan bakar yang paling mendekati nilai k_{eff} sama dengan satu adalah *Case 5* dengan variasi persentase U1-U2-U3 adalah 7,5%-8%-8,5%.
- b. Grafik nilai k_{eff} semakin naik sebanding dengan penambahan fraksi volume bahan bakar. Penambahan fraksi volume bahan bakar menandakan bahwa adanya penambahan jumlah bahan bakar fisil dalam bahan bakar. Rapat daya maksimum sebanding juga dengan besar fraksi volume bahan bakar yang digunakan.
- c. Hasil optimasi bahan bakar UN-PuN menggunakan kode COREBN didapatkan pada persentase *Case 5*. *Case 5* merupakan teras heterogen dengan variasi persentase U1-U2-U3 adalah 7,5%-8%-8,5%. Fraksi

volume bahan bakar yang digunakan adalah 64%. Nilai $k\text{-eff}$ maksimum yang diperoleh adalah 1,0031841 dengan *excess reactivity* sebesar 0,32%. Rapat daya maksimum adalah 97,98 Watt/cc. Rapat daya rata-rata relatif tiap arah radial yang diperoleh 70,78 Watt/cc.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan perbandingan dan referensi untuk penelitian lebih lanjut dengan menggunakan variabel yang berbeda: geometri teras, bahan bakar, dan reaktor generasi IV yang lainnya. Analisis neutronik menggunakan kode SRAC-COREBN yang dilakukan juga dapat dikembangkan dengan menambah analisis fluks neutron dan rasio konversi agar memperoleh optimasi yang lebih akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardoyo, A. N. Lasman, Ruslan, E. M. Parmanto, dan E. Effendi. 2010. *Mengenal Reaktor Nuklir Dan Manfaatnya*. Jakarta: BATAN.
- Andersen, P. K. dan A. Ghassemi. 2004. Nuclear waste. *New Scientist*. 197(2642):24–25.
- Anggoro, Y. D., D. Dewi, A. T. Yuliyanto, dan M. Prapatan. 2013. Kajian perkembangan pltn generasi iv. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 15:69–79.
- Arinaldo, D. dan J. C. Adiatama. 2019. Dinamika batu bara indonesia: menuju transisi energi yang adil. *Institute for Essential Services Reform (IESR)*. 1–12.
- BATAN. 2015. Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
- BP. 2021. Statistical review of world energy 2021. *BP Energy Outlook 2021*. 70:8–20.
- DEN. 2019. *Outlook Energy Indonesia 2019*. Jakarta
- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. 2022. *Statistik Ketenagalistrikan 2019*
- DOE. 1993a. *DOE Fundamentals Handbook Nuclear Physics Volume 1 of 2*. Washington DC: U.S. Department of Energy. January.
- DOE. 1993b. *DOE Fundamental Handbook Nuclear Physics Volume 2 of 2*. Washington DC: U.S. Department of Energy.
- Duderstadt, J. J. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Feely, J. 1984. *The History of Nuclear Energy*. Washington DC: U.S Department of Energy. 1.
- GIF. 2002. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*
- GIF. 2014. *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*
- GIF. 2020. *2020 ANNUAL REPORT*. Paris
- IEA. 2021. *World Energy Outlook*. Paris
- IESR. 2020. Buletin Strategic Partnership Green and Inclusive Energy. Jakarta: Institute for Essential Services Reform (IESR). 2020
- Joffe, J. 2014. A history of nuclear choices. *June 1, 2014*. (15):1–5.
- Lamarsh, J. R. dan A. J. Baratta. 1955. *Introduction to Nuclear Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall. 1. *American Journal of Physics*.

- Lee, J. C. 2020. *Nuclear Reactor: Physics and Engineering*. United States: Wiley.
- Lewis, E. E. 2008. *Fundamental of Nuclear Reactor*. New York: Academic Press.
- Novalianda, S., Dwiyanto, M. Ariani, dan Z. Su'ud. 2018. Optimasi desain teras gas cooled fast reactor (gfr) uranium nitride (un) dengan plutonium. *Seminar Nasional Royal (SENAR)*. 998(September):679–684.
- Okumura, K. 2007. COREBN: a core burn-up calculation module for srac2006. *Japan Atomic Energy Agency*. 53(9):1689–1699.
- Okumura, K., T. Kugo, K. Kaneko, dan K. Tsuchihashi. 2002. *SRAC (Ver.2002) ;The Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI).
- Peryoga, Y., E. M. P, dan A. Pranoto. 2007. *Mengenal Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. Edisi 1. Jakarta: Kementerian Riset dan Teknologi.
- PRIS. 2022. Reactor Status Reports
- Rokhmadi, T. S. 2007. Analisis koefisien reaktivitas moderator pwr dengan wims-anl. 186–194.
- Santiani. 2011. *Nuklir Fisika Inti Dan Politik Energi Nuklir*. Malang: Intimedia. July.
- Su'ud, Z. dan H. Sekimoto. 2013. The prospect of gas-cooled fast reactors for long life reactors with natural uranium as fuel cycle input. *Annals of Nuclear Energy*
- Sunarti, F. K. Sunaryo, B. E. Prasetyo, C. B. Kurniadi, I. Setiadi, Q. Rabbani, P. A. Fajarwati, dan S. Hernawati. 2020. Inventarisasi emisi grk bidang energi. *Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi Tahun 2020*. v.
- Suparlina, Lily, dan J. Susilo. 2010. PWR_1000 MWe_Metode Transport Dan Difusi Neutron.Pdf. 2010.
- Syarifah, R. D., N. N. MH, Z. Hanifah, I. Karomah, A. M. Maburi, dan A. Arkundato. 2021. Analisis fraksi volume bahan bakar uranium karbida pada reaktor cepat berpendingin gas menggunakan srac code. *Jurnal Jaring SainTek*. 3(1):13–18.
- Syarifah, R. D., Z. Su'ud, K. Basar, dan D. Irwanto. 2017. Fuel fraction analysis of 500 mwth gas cooled fast reactor with nitride (un-pun) fuel without refueling fuel fraction analysis of 500 mwth gas cooled fast reactor with nitride (un-pun) fuel without refueling. *Journal of Physics: Conference Series*
- Syarifah, R. D., Z. Su'ud, K. Basar, dan D. Irwanto. 2020. Actinide minor addition on uranium plutonium nitride fuel for modular gas cooled fast reactor. *Journal of Physics: Conference Series*. 1493(1)
- Syarifah, R. D., Z. Su'Ud, K. Basar, dan D. Irwanto. 2016a. The prospect of

uranium nitride (un-pun) fuel for 25- 100mwe gas cooled fast reactor long life without refuelling. *Journal of Physics: Conference Series*. 776(1)

Syarifah, R. D., Y. Yulianto, Z. Su'ud, K. Basar, dan D. Irwanto. 2016b. Design study of 200mwth gas cooled fast reactor with nitride (un-pun) fuel long life without refueling. *MATEC Web of Conferences*. 82:0–5.

WEC. 2020. World energy trilemma index 2020, published by the world energy council in partnership with oliver wyman. *World Energy Council*. 1–79.

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

