

**ANALISIS DESAIN NEUTRON *LEAD COOLED FAST REACTOR* (LFR)
BERPENDINGIN TIMBAL-BISMUT (Pb-Bi) BERBAHAN BAKAR
URANIUM-PLUTONIUM NITRIDA ((U-Pu)N) MENGGUNAKAN
*SOFTWARE SRAC CITATION***

(Skripsi)

**Oleh
HANINDYA JANITRA AJININGTYAS
2117041074**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**ANALISIS DESAIN NEUTRON *LEAD COOLED FAST REACTOR* (LFR)
BERPENDINGIN TIMBAL-BISMUT (Pb-Bi) BERBAHAN BAKAR
URANIUM-PLUTONIUM NITRIDA ((U-Pu)N) MENGGUNAKAN
*SOFTWARE SRAC CITATION***

Oleh

HANINDYA JANITRA AJININGTYAS

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

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



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

ANALISIS DESAIN NEUTRON *LEAD COOLED FAST REACTOR* (LFR) BERPENDINGIN TIMBAL-BISMUT (Pb-Bi) BERBAHAN BAKAR URANIUM-PLUTONIUM NITRIDA ((U-Pu)N) MENGGUNAKAN *SOFTWARE SRAC CITATION*

Oleh

Hanindya Janitra Ajiningtyas

Analisis neutronik dilakukan pada Reaktor Cepat Berpendingin Timbal (LFR) menggunakan pendingin timbal-bismut (Pb-Bi) dan bahan bakar uranium-plutonium nitrida ((U-Pu)N) untuk menganalisis pengaruh variasi pengayaan bahan bakar terhadap kekritisian reaktor berdasarkan nilai k_{eff} . Studi ini bertujuan untuk Mengetahui desain dan permodelan reaktor LFR dengan menentukan presentase variasi pengayaan terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan dan untuk mengetahui pengaruh variasi pengayaan bahan bakar uranium terhadap kekritisian reaktor LFR berpendingin Pb-Bi berdasarkan k_{eff} . Inti reaktor dibagi menjadi bahan bakar dalam, bahan bakar luar, reflektor, dan daerah blankness. Analisis dilakukan menggunakan Kode Analisis Reaktor Standar (SRAC) dengan modul CITATION, menggunakan model geometri inti heksagonal (1/4) 3D. Hasil penelitian menunjukkan pada konfigurasi inti tetap dengan panjang 370 cm dan lebar 200 cm, variasi pengayaan bahan bakar menunjukkan bahwa kombinasi pengayaan 8% pada bahan bakar dalam dan 9% pada bahan bakar luar menghasilkan nilai k_{eff} sebesar 0.99990. yang memenuhi persyaratan untuk kritisian reaktor awal.

Kata kunci : analisis neutronik, bahan bakar ((U-Pu)N), *inner-outer fuel*, LFR, faktor multiplikasi efektif (k_{eff}).

ABSTRACT

ANALISIS DESAIN NEUTRON *LEAD COOLED FAST REACTOR* (LFR) BERPENDINGIN TIMBAL-BISMUT (Pb-Bi) BERBAHAN BAKAR URANIUM-PLUTONIUM NITRIDA ((U-Pu)N) MENGGUNAKAN *SOFTWARE SRAC CITATION*

By

Hanindya Janitra Ajiningtyas

Neutronic analysis was conducted on a Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) using lead-bismuth (Pb-Bi) coolant and uranium-plutonium nitride ((U-Pu)N) fuel to analyze the effect of fuel enrichment variations on the reactor criticality based on the k_{eff} value. This study aims to determine the design and modeling of the LFR reactor by determining the percentage of enrichment variations on the resulting k_{eff} value and to determine the effect of uranium fuel enrichment variations on the criticality of the Pb-Bi cooled LFR reactor based on k_{eff} . The reactor core consists of several zones inner fuel, outer fuel, reflectors, and blackness. The analysis was performed using the Standard Reactor Analysis Code (SRAC) with the CITATION module, using a 3D hexagonal (1/4) core geometry model. The results of the study show that in a fixed core configuration with a length of 370 cm and a width of 200 cm, variations in fuel enrichment indicate that a combination of 8% enrichment in the inner fuel and 9% in the outer fuel produces a k_{eff} value of 0.99990, which meets the requirements for initial reactor criticality

Keywords: effective multiplication factor (k_{eff}), inner –outer fuel, Lead Cooled Fast Reactor, neutronic analysis, ((U-Pu)N) fuel

HALAMAN PERSETUJUAN

Judul Skripsi : Analisis Desain Neutron *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR) Berpendingin Timbal-Bismuth (Pb-Bi) Berbahan Bakar Uranium-Plutonium Nitrida (U-Pu)N Menggunakan *Software SRAC CITATION*

Nama Mahasiswa : **Hanindya Janitra Ajiningtyas**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041074

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI,

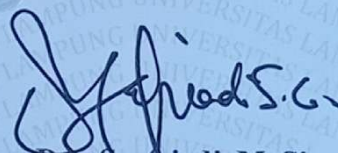
Bandar Lampung, 16 Februari 2026

Pembimbing I



Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M. Si.
NIP.197512192000122003

Pembimbing II



Drs. Syafriadi, M. Si.
NIP.196108211992031002

PLt. Ketua Jurusan Fisika



Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc
NIP.198206182008121001

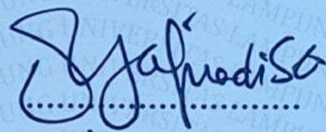
HALAMAN PENGESAHAN

1. Tim penguji

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



Sekretaris : Drs. Syafriadi, M.Si



Penguji : Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T



2. Dekanat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP.197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 03 Februari 2026

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Hanindya Janitra Ajiningtyas

NPM : 2117041074

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya berjudul "**Analisis Desain Neutron Lead Cooled Fast Reactor (LFR) Berpendingin Timbal-Bismut (Pb-Bi) Berbahan Bakar Uranium-Plutonium Nitrida ((U-Pu)N) Menggunakan Software SRAC CITATION**" adalah benar karya saya sendiri. Semua sumber referensi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini telah disebutkan dengan benar sesuai dengan kaidah akademik. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini belum pernah diajukan sebelumnya untuk memperoleh gelar akademik di universitas atau institusi manapun.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sadar dan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 12 Februari 2026

Yang Menyatakan,



Hanindya Janitra Ajiningtyas

NPM. 2117041074

RIWAYAT HIDUP



Hanindya Janitra Ajiningtyas, lahir di Desa Gisting, Kec. Gisting, Kab. Tanggamus pada tanggal 25 Juli 2003. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Jamzani dan Ibu Heni Ekawati. Penulis menyelesaikan pendidikan SDN 2 Gisting Atas pada tahun 2009-2015 dan melanjutkan jenjang pendidikannya di MTS Miftahul Ulum Gisting pada tahun 2015-2018. Penulis melanjutkan pendidikannya di MA Mathlaul Anwar Gisting pada tahun 2018-2021. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui SBMPTN tahun 2021.

Selama perkuliahan penulis aktif dalam berbagai organisasi. Penulis bergabung dengan Himpunan Mahasiswa Fisika pada tahun 2022 sebagai anggota Minat dan Bakat, Pada tahun yang sama penulis bergabung dalam UKM Penelitian Unila sebagai anggota bidang kaderisasi. Penulis juga memiliki berbagai pengalaman antara lain Praktik Kerja Lapangan di Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Bandung pada tanggal 8 Januari - 16 Februari 2024. Penulis melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Periode II tahun 2024 di Desa Braja Yekti, Kabupaten Lampung Timur.

MOTTO

“Minta pertolongan dengan sabar dan shalat, sesungguhnya ALLAH bersama orang-orang yang sabar.”

QS. Al-Baqarah:153

“Jangan takut gagal, karena yang tidak pernah gagal hanyalah orang-orang yang tidak pernah melangkah.”

Buya Hamka

“Semua jatuh bangunmu hal yang biasa, angan dan pertanyaan waktu yang menjawabnya, berikan tenggat waktu berdirilah secukupnya, rayakan perasaanmu sebagai manusia.”

Baskara Putra – Hindia

“Mulai dengan berani, akhiri dengan tanggung jawab.”

Hanindya Janitra A

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Dengan mengucapkan Alhamdulillahirabbil'alamin
Segala puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas segala karunia dan kebaikan-Nya telah diberikan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat penulis selesaikan dengan baik.

Karya ini penulis persembahkan sebagai ungkapan cinta, pengabdian dan kasih sayang kepada kedua orang tuaku:

Heni Ekawati & Jamzani

Terima kasih atas kehidupan dan doa yang telah diberikan kepada penulis.

Secara khusus, karya ini penulis persembahkan kepada Kakek dan Nenek tercinta,

KUSNANTO & SUNARTI

Dengan penuh kasih senantiasa kebersamaan, membimbing, dan menjadi rumah ternyaman dalam setiap proses perjalanan penulis hingga mampu menyelesaikan pendidikan ini.

Keluarga Besar & Teman –Teman Jurusan Fisika FMIPA UNILA

Atas kebersamaan dan dukungan selama perkuliahan

Serta Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Segala puji atas rasa syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan nikmat iman, sehat dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis. Sehingga, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Desain Neutron *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR) Berpendingin Timbal-Bismut (Pb-Bi) Berbahan Bakar Uranium-Plutonium Nitrida ((U-Pu)N) Menggunakan *Software* SRAC CITATION**”. Shalawat serta salam penulis hanturkan kepada suri tauladan Nabiyyina Wahabibina Muhammad SAW, keluarga, sahabat dan para pengikutnya. Semoga kita semua dapat memperoleh syafaat beliau di hari akhir kelak.

Tujuan dari penulis skripsi ini sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak untuk perbaikan dari skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menjadi penambah referensi dan rujukan terhadap Analisis Desain Neutron *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR) Berpendingin Timbal-Bismut (Pb-Bi) Berbahan Bakar Uranium-Plutonium Nitrida ((U-Pu)N) Menggunakan *Software* SRAC CITATION.

Bandar Lampung, 16 Februari 2026

Hanindya Janitra Ajiningtyas

SANWACANA

Puji dan syukur penulis haturkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Skripsi dengan judul “Analisis Desain Neutron *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR) Berpendingin Timbal-Bismut (Pb-Bi) Berbahan Bakar Uranium-Plutonium Nitrida ((U-Pu)N) Menggunakan *Software* SRAC CITATION” merupakan hasil dari rangkaian penelitian yang penulis lakukan sebagai bagian dari syarat untuk menyelesaikan studi di Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu dan bersedia memberikan ilmu, bimbingan, dan arahnya selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi.
2. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, ilmu dan arahnya yang berharga selama penulis menjadi mahasiswa di Universitas Lampung dan selama penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan saran dan masukan yang membangun sehingga penyusunan skripsi ini lebih baik.
4. Ibu Humairah Ratu Ayu, S.Pd., M.Si. selaku pembimbing akademik
5. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah banyak memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama masa perkuliahan.
6. Kepada Kakek, Nenek, dan Kedua Orang Tuaku Tercinta. sebagai tanda bakti dan hormat dan rasa terimakasih yang tiada terhingga ku persembahkan karya kecil ini kepada kakek dan nenek yang perjuangannya sangat luar biasa, terimakasih

banyak atas perjuangan dan do'a yang sudah diberikan sampai detik ini, sehingga urusan yang cucumu lakukan mendapatkan kemudahan dan kelancaran. Terimakasih atas semua yang dikorbankan, terimakasih atas nasehat, perjuangan, dukungan, motivasi serta salah satu alasan terkuat penulis untuk bisa menyelesaikan skripsi ini dan dapat membuat bangga keluarga.

7. Kepada Adiku, Jovana Sahira Ajiningtyah dan kepada Sepupuku, Alhanuva Fernanda Maharani. Terima kasih telah menjadi pendengar, memberikan dukungan, semangat, tenaga, dan kasih sayang selama penulis menempuh pendidikan di tempat ini.
8. Kepada sahabat penulis dari semester satu Diah Fauziah dan Siti Nina Karnia yang selalu memberikan dukungan dan berbagi kisah sedih, susah maupun senang semasa perkuliahan.
9. Kepada Safira Berliananda Budi selaku teman penelitian di Laboratorium Fisika yang telah menemani penulis selama penelitian.
10. Terakhir, kepada diri sendiri. Terima kasih "Hanindya" karena telah memilih untuk tetap bertahan ketika semuanya terasa berat. Terima kasih telah berjuang untuk tetap ada hingga hari ini, menjadi perempuan yang terus belajar kuat dan ikhlas, bahkan di saat putus asa sering datang tanpa permisi. Terima kasih karena tidak membiarkan ego mengalahkan tujuan, karena selalu memilih untuk bangkit kembali meski lelah berkali-kali menyapa. Terima kasih telah bertanggung jawab menyelesaikan apa yang berani kamu mulai. Skripsi ini bukan sekadar syarat kelulusan, tetapi bukti bahwa kamu mampu menepati janji pada dirimu sendiri. Bahwa kamu sanggup menyandang gelar S.Si bukan karena cepat, tetapi karena tidak menyerah, dan lebih dari itu, mampu melampaui keraguan yang pernah kamu miliki. Apa pun yang menanti di kehidupan setelah ini, jangan lupa untuk selalu menghargai dirimu, merayakan setiap proses, dan berbahagia atas setiap langkah yang telah kamu tempuh. Karena masa depan yang lebih baik lahir dari keberanianmu hari ini.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
MOTTO	vii
PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
SANWACANA	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Sejarah Reaktor Nuklir	7
2.2 Reaktor Nuklir	8
2.2.1 Reaksi Fisi	8
2.2.2 Reaktor fusi	10
2.2.3 Komponen Reaktor Nuklir	12
2.3 Bahan Bakar Reaktor Nuklir	16
2.3.1 Uranium	16
2.3.2 Plutonium	17
2.4 Persamaan Difusi Neutron	18
2.5 <i>Lead Cooled Fast Reactor (LFR)</i>	19

2.6 <i>Standart Reactor Analysis Code (SRAC)</i>	25
III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2 Alat dan Bahan	28
3.3 Prosedur Penelitian	28
3.3.1 Presentase Pengayaan	28
3.3.2 Menentukan Bentuk Geometri <i>Cell</i>	28
3.3.3 Densitas Atom	30
3.3.4 Input Data Pada CITATION	30
3.3.5 Analisis hasil CITATION	31
3.4 Diagram Alir Penelitian	31
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Desain dan permodelan <i>Lead Cooled Fast Reactor</i> 3D (X, Y, Z)	33
4.1.1 Menentukan Bentuk Geometri <i>Cell</i>	33
4.1.2 Menentukan Fraksi Volume	35
4.1.3 Perhitungan Densitas Atom	36
4.1.4 Input Data Pada CITATION	38
4.2 Karakteristik <i>Lead Cooled Fast Reactor (LFR)</i>	42
4.2.1 Analisis Hasil CITATION	42
4.2.2 Distribusi Kerapatan Daya	44
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	42
5.2 Saran	42
DAFTAR PUSTAKA.	
LAMPRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 skema reaksi fisi berantai	10
Gambar 2.2 Populasi neutron dalam keadaan subkritis,kritis, dan superkritis	11
Gambar 2.3 Batang kendali	15
Gambar 2.4 Skema <i>Lead Cooled Fast Reactor</i> (LFR)	21
Gambar 2.5 Rakitan bahan bakar	23
Gambar 2.6 Konfigurasi inti reaktor.....	23
Gambar 2.7 Struktur SRAC (Okumura, 2002)	27
Gambar 3.1 Geometri <i>slab</i> untuk 3D (X-Y-Z) (Okumura <i>et al.</i> , 2002)	29
Gambar 3.2 Output SRAC (Okumura, 2002)	30
Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 4.1 Syarat Batas	39
Gambar 4.2 Konfigurasi Teras Reaktor.....	40
Gambar 4.3 Rapat daya pada panjang (x) dengan pengayaan 8%.....	44
Gambar 4.4 Rapat daya pada lebar (y) dengan pengayaan 8%	45
Gambar 4.5 Rapat daya pada tinggi (z) pada pengayaan 8%	45

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi LFR (stanisz <i>et al.</i> , 2016)	24
Tabel 4.1 Spesifikasi Desain Reaktor LFR	35
Tabel 4.2 Fraksi Volume	36
Tabel 4.3 Densitas Atom Bahan Bakar (<i>Iner fuel</i>)	37
Tabel 4.4 Densitas Atom Bahan Bakar (<i>Outer fuel</i>)	37
Tabel 4.5 Panjang (x) teras reaktor pada lebar (y) 170cm dan tinggi (z) 190 cm	41
Tabel 4.6 Lebar (y) teras reaktor pada panjang (x) 310 cm dan tinggi (z) 190 cm ..	41
Tabel 4.7 Pengayaan bahan bakar	43

I.PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi adalah kebutuhan utama bagi manusia, terutama energi listrik. Mulai dari kebutuhan primer hingga kebutuhan sekunder manusia harus terkait dengan energi listrik. Negara melalui kementerian terkait yang membidangi sektor energi tentunya harus memiliki strategi agar kebutuhan energi selalu terpenuhi dan memprediksi kebutuhan energi ke depan untuk menghindari krisis energi. Kebutuhan energi suatu negara biasanya akan selalu meningkat setiap tahun seiring dengan peningkatan penduduk, pertumbuhan ekonomi, harga energi dan perkembangan teknologi reaktor nuklir baru dan inovatif perlu dikembangkan. Salah satu inisiasi dari perkembangan teknologi ini adalah potensi pemanfaatan reaktor nuklir modular yang paling kecil (Nailatussaadah, 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan sumber energi alternatif yang diperlukan saat semakin menipisnya energi fosil seperti minyak bumi, gas alam, dan batubara. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menyatakan untuk beberapa tahun kedepan ketersediaan energi fosil akan semakin berkurang dan diperkirakan akan segera habis.

Salah satu reaktor generasi keempat yang sedang dikembangkan adalah reaktor berpendingin dengan menggunakan logam cair *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR), reaktor yang dirancang untuk beroperasi pada kondisi neutron cepat, berbeda dengan reaktor termal yang digunakan sebagai moderator untuk memperlambat neutron. *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR) merupakan reaktor generasi IV dengan spektrum neutron cepat menggunakan siklus bahan bakar tertutup untuk konversi uranium dan pengelola yang lebih efektif (Munita *et al.*, 2018).

Reaktor berpendingin timbal (LFR) termasuk ke dalam reaktor yang memiliki tujuan keselamatan inheren, berkelanjutan (*sustainability*), limbahnya tidak bisa dijadikan sebagai senjata. Reaktor jenis ini memiliki spektrum neutron cepat, menggunakan timbal (Pb) cair atau timbal bismuth (Pb-Bi) dan eutektik cair sebagai pendingin. (Widiawati *et al.*, 2000).

Dalam reaktor jenis LFR ini memiliki karakteristik intrinsik yang dibenarkan oleh sistem yang dapat meningkatkan keamanan sistem yang menjadi salah satu kriteria utama dan terpenting dalam pemilihan sistem nuklir. LFR didasarkan pada penggunaan timbal cair sebagai cairan perpindahan panas. Tidak seperti cairan lain timbal tidak memerlukan tekanan pada suhu didih pada tekanan atmosfer yang dapat menghasilkan hidrogen atau gas eksplosif lainnya (Alemberty, 2016).

Spektrum neutron cepat pada LFR menggunakan siklus bahan bakar yang tertutup untuk konversi uranium dan pengelolaan bahan yang lebih efektif. Reaktor ini memiliki karakteristik menggunakan pendingin Pb atau Pb-Bi, bahan bakar uranium pada temperatur 550°C -800°C, menghasilkan energi listrik. Kelebihan reaktor ini memiliki sistem yang baik dalam aspek keberlanjutan pada bahan bakar dan sistem yang baik dalam aspek pencegahan pemanfaatan dan kehandalan yang dilengkapi oleh *relatively inert coolant*.

Penggunaan Uranium sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir akan menghasilkan energi listrik dan produk samping di akhir operasinya. Produk samping memiliki potensi untuk digunakan dalam reaktor lain untuk menciptakan lebih banyak energi, misalnya, plutonium. Plutonium dihasilkan dari reaksi penyerap neutron dalam Uranium-238. Uranium-238 menyerap neutron menjadi Uranium-239 yang diubah menjadi Neptunium-239 secara alami, dan akhirnya, menghasilkan Plutonium-239 (Novalianda *et al.*, 2018).

Neutron memiliki peranan yang sangat penting dalam reaktor. Neutron dihasilkan dan dapat juga hilang dan bocor. Reaktor dikatakan stabil, apabila terjadi keseimbangan antara jumlah neutron hasil fisi dan jumlah neutron yang hilang. Rasio jumlah neutron dari generasi ke generasi sebelumnya dikenal dengan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Jika nilai $k_{eff} = 1$, maka jumlah neutron dalam suatu generasi akan sama dengan jumlah neutron sebelumnya, dan reaktor dapat dikatakan dalam keadaan kritis, apabila $k_{eff} < 1$ maka reaktor sub kritis dan jika $k_{eff} > 1$, maka reaksi yang dihasilkan akan semakin banyak dan tidak akan terkontrol (Widiawati *et al.*, 2000).

(Munita *et al.*, 2018) dari Universitas Andalas melakukan penelitian dengan judul Analisis Kekritisan *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR) Berdasarkan Variasi Bahan Bakar (U-Zr) dan ((U-Pu)N). Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kekritisan reaktor dengan dua jenis bahan bakar: Uranium-Zirkonium (U-Zr) dan Uranium Nitride-Plutonium Nitride ((U-Pu)N). Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak nuklir untuk menghitung nilai k_{eff} , yang menunjukkan apakah reaktor dalam kondisi subkritis, kritis, atau superkritis. Analisis reaktor pada hasil perhitungan melalui komputasi menggunakan SRAC (*standard Thermal Analysis Code System*) menggunakan kode terpadu untuk sebuah analisis perhitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor termal. SRAC terdiri dari 5 kode dasar diantaranya PIJ, ANISN, TUD, TWOTRAN, dan CITATION. Pada penelitian ini hanya menggunakan kode untuk perhitungan reaktor CITATION dengan basis data nuklir JENDL-3.3, JENDL-3.2, END/B-IV, dan JEF-2.2. Analisis kekritisan LFR dilakukan dengan bervariasi jenis bahan bakar yaitu uranium-plutonium nitrida ((U-Pu)N) dan uranium-zirkonium (U-Zr). Variasi bahan bakar digunakan untuk melihat bagaimana perbedaan komposisi memengaruhi performa reaktor dan perubahan bahan bakar berpengaruh terhadap nilai k_{eff} , yang menentukan kestabilan operasi reaktor sehingga, bahan bakar ((U-Pu)N) menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan U-Zr karena memiliki densitas energi yang lebih tinggi dan kemampuan pembakaran yang lebih efisien. Pemilihan bahan bakar sangat memengaruhi karakteristik kekritisan reaktor dan hasilnya ((U-Pu)N) lebih unggul

untuk digunakan dalam desain LFR dibandingkan U-Zr karena memberikan nilai keff yang lebih stabil dan optimal untuk operasi jangka panjang. Pada penelitian ini digunakan metode shuffling. Metode shuffling memungkinkan penggunaan uranium alam, yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar nuklir yang diperkaya.

Reaktor yang digunakan sebagai reaktor berpendingin timbal-bismuth dengan spektrum neutron cepat menggunakan strategi supaya reaktor dapat beroperasi tanpa pengayaan dan menggunakan uranium alam sebagai bahan bakar. Fraksi bahan bakar yang digunakan sebanyak 50%, fraksi *cladding* 10%, dan fraksi pendingin 40%. Pada penelitian menggunakan bahan bakar ((U-Pu)N) dan bahan bakar baru U-Zr merupakan bahan bakar khusus untuk LFR sehingga, setelah dilakukan analisis bahan bakar UN-PuN lebih optimal saat digunakan pada reaktor LFR dibandingkan bahan bakar U-Zr. Bahan bakar UN-PuN memiliki nilai keff yang lebih tinggi.

Pada penelitian lain oleh (Asnita *et al.*, 2019) dari Universitas Andalas melakukan penelitian Analisis Neutronik pada Reaktor Cepat dengan Variasi Fraksi Pengayaan Bahan Bakar UN-PuN, U-PuC dan MOX. Pada penelitian ini melakukan analisis pengaruh perubahan fraksi pengayaan terhadap karakteristik neutronik pada reaktor cepat berpendingin (Pb-Bi). Penelitian ini menggunakan sistem komputasi dengan kode FIITB. CHI yang dikembangkan dalam bahasa pemrograman Delphi 7.0 untuk geometri teras dengan pengayaan menggunakan 10 variasi fraksi sebesar 11% - 20%. Penelitian yang dilakukan untuk mengamati parameter-parameter fraksi neutronik yaitu faktor multiplikasi neutron dan distribusi fluks neutron. Hasil analisis menunjukkan bahwa hasil analisis fraksi neutronik memberikan karakteristik neutronik yang berbeda-beda pada setiap jenis bahan bakar. Untuk mencapai kondisi kritis bahan bakar UN-PuN memerlukan fraksi pengayaan sebesar 12% - 14%.

Mengacu pada penelitian sebelumnya, maka dilakukan pengembangan untuk uranium plutonium nitrida ((U-Pu)N) sebagai bahan bakar dan Pb-Bi sebagai pendingin. Maka selanjutnya, pada penelitian ini akan dilakukan pengayaan dengan menggunakan 5 variasi pengayaan yaitu sebesar 4%-8% dengan menggunakan

model geometri heksagonal untuk mendapatkan nilai $k_{eff} = 1$ dengan energi yang optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana desain dan permodelan reaktor *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR) dengan geometri heksagonal tiga dimensi (3D slab X, Y, Z) untuk keperluan analisis neutronik dengan pengaruh variasi pengayaan terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan?
2. Bagaimana karakteristik kekritisasi reaktor LFR berdasarkan nilai k_{eff} yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui desain dan permodelan reaktor LFR dengan menentukan presentase variasi pengayaan terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan.
2. Mengetahui pengaruh variasi pengayaan pada bahan bakar Uranium terhadap kekritisasi reaktor LFR berpendingin Pb-Bi berdasarkan nilai k_{eff} yang dihasilkan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah

1. Jenis reaktor yang digunakan dalam penelitian ini adalah *lead cooled fast reactor* LFR.
2. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah uranium-plutonium nitrida ((U-Pu)N)
3. Pada bahan bakar ((U-Pu)N) digunakan 6 variasi pengayaan, yaitu sebesar 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, dan 9%..
4. Desain reaktor pada penelitian ini menggunakan model geometri heksagonal 3D (X, Y, Z) dengan pemodelan sebagian teras reaktor untuk analisis neutronik.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan manfaat sebagai berikut.

1. Memberikan informasi mengenai perkembangan analisis neutronik dalam bidang reaktor nuklir.
2. Memberikan informasi mengenai jenis reaktor generasi IV *lead cooled fast reactor* LFR.
3. Memberikan kontribusi ilmiah berupa kajian pengaruh variasi pengayaan bahan bakar UN-PuN terhadap kekritisian reaktor LFR.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sejarah Reaktor Nuklir

Dalam sejarah perkembangan manusia, energi selalu menjadi masalah yang tidak dapat dihindari, untuk menemukan solusi pengembangan energi yang berkelanjutan maka sebagai bagian penting dari sistem energi yang berkelanjutan, sistem energi nuklir memiliki keunggulan yang bersih, tidak memiliki dampak buruk terhadap efek rumah kaca dan kepadatan energi yang tinggi dalam lingkungan. Salah satu masalah paling serius adalah limbah radioaktif yang tinggi. Untuk meminimalkan terjadinya limbah radioaktif dan biaya pengoperasian yang sangat besar maka, sistem tenaga nuklir generasi IV dieksplorasi dengan penuh semangat di bidang energi nuklir saat ini.

Dalam energi nuklir generasi IV yang digunakan ini memiliki perkembangan sistem tenaga nuklir dalam pembangkit listrik tenaga nuklir generasi I. Sistem tenaga nuklir generasi I harus menghasilkan listrik secara berkelanjutan dan bahan bakar yang digunakan harus tersedia dalam jangka panjang serta meminimalkan limbah nuklir yang dihasilkan (Chen Wang, 2019).

Dalam sejarah pada pasca peristiwa pengeboman Hiroshima dan Nagasaki pada tahun 1945, teknologi nuklir menjadi pusat pembicaraan sehari-hari masyarakat dunia. Dengan terjadinya peristiwa tragis itu, anggapan orang-orang terkait nuklir selalu berkaitan dengan hal-hal yang sifatnya destruktif. Nuklir pada dasarnya bukan merupakan suatu hal yang baru bagi peradaban manusia - sinar matahari yang dirasakan oleh manusia juga merupakan reaksi fusi nuklir di matahari. Dengan demikian, nuklir memiliki manfaat, terlebih jika dikembangkan dengan baik dan

benar, khususnya di bidang listrik, pertanian, industri, kesehatan dan hal yang berguna untuk pembangunan peradaban.

Teknologi nuklir pada dasarnya terkait dengan reaksi dari inti atom. Dalam awal abad ke-20, reaksi pembelahan inti atom mulai diteliti, dan hasilnya adalah yang dikenal sebagai reaksi nuklir. Dari daya teknologi nuklir yang besar tersebut, manusia pada waktu itu telah mencapai kemajuan dalam berbagai bidang, seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Pemanfaatan teknologi nuklir sebagai senjata perang telah disadari sejak awal - yang kemudian mempercepat riset nuklir pada masa itu. Pasca Perang Dunia II, dunia memasuki sebuah periode baru, yaitu *atomic age*. Periode ini ditandai dengan saling berlombanya negara-negara dunia dalam mengembangkan teknologi nuklir, baik untuk keperluan damai maupun militer. Pada periode ini pula, muncul dua negara adidaya, sebagai pemenang perang dan pemimpin blok politik-ideologis yang saling bertentangan, yakni Amerika Serikat dan Uni Soviet. Keduanya melancarkan perang yang tak kasat mata, namun juga tidak tertutup sama sekali kehadirannya, yang dikenal sebagai Perang Dingin (Sylvia. 2021).

Reaktor nuklir mulai dikembangkan sebagai sumber energi alternatif sejak awal tahun 1950-an dan sejak saat itu teknologi nuklir berkembang pesat. Perkembangan pada reaktor nuklir dimulai pada generasi I hingga generasi IV. Reaktor generasi IV memiliki keunggulan dibidangnya yang dapat menghasilkan daya listrik namun juga dapat menghasilkan energi termal, dengan siklus dari bahan bakar yang tertutup dan sistem keselamatan yang dibuat secara *inherent* dan *passive safety* (Novalianda *et al.*, 2020).

2.2 Reaktor Nuklir

2.2.1 Reaksi Fisi

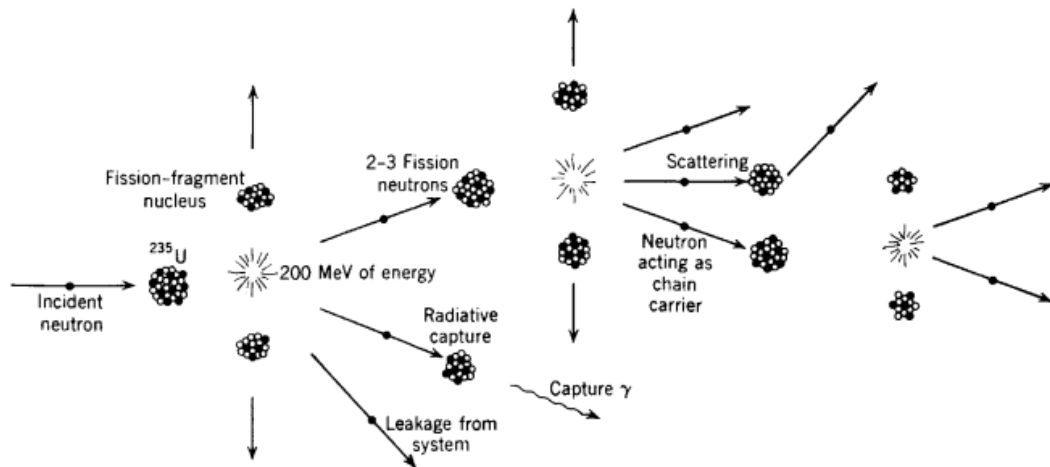
Reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya fisi nuklir, yaitu sebuah proses di mana terjadi pembelahan inti atom berat akibat ditumbukkan oleh neutron, pembelahan ini menghasilkan energi, inti atom yang lebih ringan, neutron tambahan dan photon

dalam bentuk sinar gamma yang memiliki elemen bahan bakar Uranium-235, moderator neutron yang digunakan untuk memperlambat laju neutron, batang kendali untuk mengendalikan reaktor, pendingin yang dihasilkan oleh reaksi fisi untuk meningkatkan suhu reaktor, dan perisai beton yang dapat menghasilkan radiasi dari hasil pembelahan inti atom. Reaktor nuklir merupakan sebuah sistem yang memiliki banyak peubah yang saling mempengaruhi seperti daya, temperatur, dan konsentrasi *precursor* (fragmen fisi). Dengan demikian diperlukan sebuah sistem kendali reaktor daya yang efektif dan efisien dan diperlukan sebuah simulasi yang bisa digunakan sebagai pendekatan dalam perancangan sistem kendali (Tadeus *et al.*, 2010).

Pada pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki produksi bahan bakar nuklir bekas yang mengandung produk fisi radioaktif. Persediaan bahan bakar yang terus bertambah dan pengoperasian jangka panjang pada sistem reaktor nuklir yang memiliki pasokan bahan fisi yang terus menerus (Stanizst *et al.*, 2016).

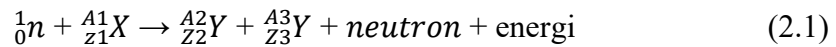
Dalam skema mekanisme untuk mengontrol pelepasan energi dan reaksi berantai neutron digunakan untuk menginduksi reaksi fisi nuklir dalam inti berat. Inti yang membelah menjadi ini yang lebih ringan *fission product* disertai dengan pelepasan energi sekitar 200 MeV. Beberapa mekanisme harus disediakan untuk mengendalikan reaksi berantai (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Hasil dari energi yang dilepaskan melalui reaksi fisi berantai dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik (Zweifel, 1973)

Reaksi fisi dalam reaktor nuklir berlangsung secara terkendali dan kontinu dalam menghasilkan energi nuklir, radioisotop, dan nuklida baru. Keseimbangan jumlah neutron dilakukan untuk menjaga keseimbangan dari reaktor nuklir, sehingga jumlah neutron berbentuk reaksi fisi itu adalah tetap. Pada saat pemecahan inti atom yang lebih ringan, energi pengikat atom semula dibebaskan. Neutron yang dihasilkan oleh reaksi fisi dapat menimbulkan reaksi yang berlebihan sehingga fisi dari generasi ke generasi secara kontinu. Reaksi fisi juga disebut sebagai reaksi fisi berantai dalam unsur U^{235} dapat ditunjukkan proses reaksi fisi berlangsung ditunjukkan pada Gambar 2.1

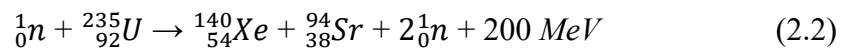


Gambar 2.1 Skema reaksi fisi berantai(Marini *et al.*,2022).

Mekanisme yang mempertahankan reaksi hingga daya keluaran dalam kondisi stabil. Persamaan umum reaksi fisi yaitu:



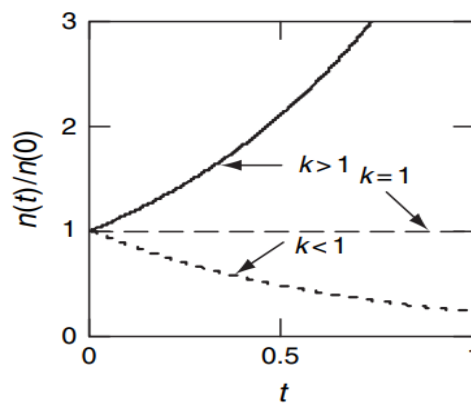
Prinsip kerja reaktor nuklir sama dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaannya hanya terletak dibahan bakar yang digunakan dan sumber energi yang dihasilkan. Bahan bakar reaktor nuklir dibedakan menjadi dua jenis material yaitu bahan fisil contohnya Uranium 235, Plutonium 239 dan bahan fertil seperti Uranium 238, Thorium 232. Sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari pembakaran fosil yang dapat menghasilkan polusi dan mengakibatkan pencemaran udara. Sedangkan pada reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi.



Pada persamaan 1 di atas merupakan persamaan reaksi fisi uranium yang menghasilkan Neutron. Neutron yang dihasilkan dapat menumbuk kembali pada inti uranium untuk membentuk reaksi fisi selanjutnya. Mekanisme yang terjadi dalam waktu yang sangat cepat secara terus menerus hingga membentuk suatu reaksi fisi berantai. Pada reaksi fisi yang dihasilkan oleh reaktor nuklir tidak menghasilkan CO₂ dan efek pada rumah kaca (Novalianda *et al.*, 2018).

Reaksi fisi yang terjadi dalam reaktor mengakibatkan terjadinya perubahan pada jumlah neutron, dimana perubahan itu bisa berupa pengurangan atau penambahan jumlah neutron. Pada jumlah neutron akibat adanya reaksi fisi dapat dirumuskan dalam hasil k_{eff} , faktor ini menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor yang mencapai batas kondisi kritis apabila nilainya $k_{\text{eff}} = 1$.

Pada Gambar 2.2 Populasi neutron dalam sistem subkritis, kritis, dan superkritis yang menunjukkan jika besarnya nilai $k_{\text{eff}} < 1$ disebut reaktor subkritis yang artinya jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu, jika nilai $k_{\text{eff}} = 1$ reaktor dalam keadaan kritis yang artinya jumlah neutron tidak berkurang atau pun bertambah tetapi bersifat konstan (tetap), dan jika nilai $k_{\text{eff}} > 1$ disebut reaktor superkritis yang memiliki jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu (Lewis, 2008).



Gambar 2.2. Populasi neutron dalam sistem subkritis, kritis, dan superkritis (Lewis,2008).

2.2.2 Reaksi Fusi

Reaksi fusi nuklir merupakan proses penggabungan dua inti atom ringan menjadi satu inti atom yang lebih berat dan disertai dengan pelepasan energi yang sangat besar. Energi yang dilepaskan pada proses ini berasal dari perbedaan energi ikat inti sebelum dan sesudah reaksi berlangsung, di mana sebagian massa inti mengalami konversi menjadi energi sesuai dengan persamaan relativitas Einstein. Reaksi fusi nuklir terjadi secara alami di dalam inti bintang, termasuk Matahari, yang

menjadikannya sebagai sumber utama energi di alam semesta. Oleh karena itu, reaksi fusi nuklir menjadi dasar utama dalam penelitian dan pengembangan energi fusi sebagai salah satu alternatif sumber energi masa depan yang berpotensi bersih dan berkelanjutan.

Reaksi fusi nuklir umumnya melibatkan isotop hidrogen, seperti deuterium dan tritium, karena inti-inti tersebut memiliki massa yang relatif kecil sehingga lebih mudah mengalami penggabungan. Pada reaksi fusi deuterium–tritium, dua inti hidrogen bergabung membentuk inti helium dan menghasilkan satu neutron bebas berenergi tinggi, disertai pelepasan energi yang besar. Proses ini memerlukan kondisi ekstrem berupa temperatur yang sangat tinggi agar inti-inti bermuatan positif mampu mengatasi gaya tolak elektrostatis dan mendekat hingga jarak yang memungkinkan terjadinya reaksi nuklir. Oleh sebab itu, reaksi fusi hanya dapat berlangsung apabila bahan bakar berada dalam keadaan plasma dan dikendalikan melalui sistem konfinemen tertentu (IAEA, 2012).

2.2.3 Komponen Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya reaksi fisi nuklir, yaitu proses di mana inti atom berat terbelah akibat tumbukan dengan material nuklir. Suatu Reaktor nuklir didukung oleh beberapa kompone reaktor yang dapat mengendalikan laju fisi. Komponen yang digunakan memiliki standar yang tinggi sehingga dapat mengakibatkan terjadinya kecelakaan dan kegagalan sangat rendah saat reaktor digunakan (Tadeus *et al.*, 2010). Adapun komponen-komponen yang digunakan pada reaktor nuklir yaitu,

a. Bahan Bakar (*fuel*)

Bahan bakar nuklir merupakan komponen inti yang berfungsi sebagai sumber energi melalui reaksi fisi inti atom berat, seperti uranium atau plutonium. Pada umumnya, bahan bakar disusun dalam bentuk pelet silinder yang ditempatkan di dalam batang bahan bakar (*fuel rods*), kemudian dirangkai menjadi satu kesatuan yang disebut rakitan bahan bakar (*fuel assembly*).

Di dalam inti reaktor, bahan bakar mengalami penangkapan neutron yang menyebabkan reaksi fisi dan menghasilkan energi panas, neutron baru, serta produk fisi. Tata letak dan distribusi bahan bakar di dalam inti dirancang untuk menghasilkan distribusi daya yang aman dan stabil. Menurut IAEA, desain bahan bakar harus mempertimbangkan aspek neutronik, termal-hidraulik, mekanik, serta keselamatan selama operasi normal dan kondisi abnormal (IAEA, 2019).

Dalam konteks manajemen inti, IAEA SSG-73 mengklasifikasikan bahan bakar menjadi *fresh fuel* (bahan bakar baru) dan *irradiated fuel* (bahan bakar teriradiasi). Pengelolaan bahan bakar mencakup penerimaan, pemuatan ke dalam inti, pemindahan saat penggantian bahan bakar (*refueling*), serta penyimpanan bahan bakar pasca iradiasi (IAEA, 2022).

b. Selubung (*Cladding*)

Cladding merupakan lapisan logam yang menyelubungi bahan bakar nuklir dan berfungsi sebagai penghalang utama antara bahan bakar radioaktif dan pendingin reaktor. Cladding berperan penting dalam mencegah pelepasan produk fisi ke dalam pendingin dan menjaga integritas bahan bakar selama operasi. Material cladding harus memiliki ketahanan tinggi terhadap temperatur, radiasi neutron, tekanan internal, serta lingkungan kimia pendingin. IAEA SSG-52 menekankan bahwa kegagalan *cladding* dapat berdampak langsung terhadap keselamatan reaktor, sehingga pemilihan material dan desain *cladding* menjadi aspek krusial dalam desain inti reaktor (IAEA, 2019).

c. Pendingin (*Coolant*)

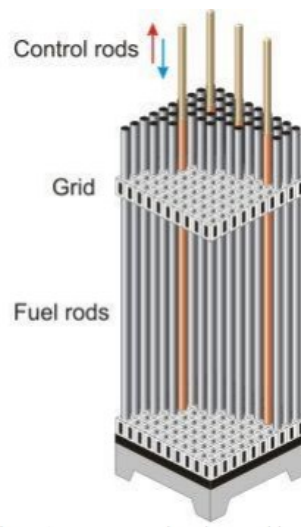
Pendingin merupakan fluida yang mengalir melalui inti reaktor untuk mengangkut panas yang dihasilkan dari reaksi fisi menuju sistem pemindah panas selanjutnya. Keberadaan pendingin sangat penting untuk menjaga temperatur bahan bakar dan struktur inti tetap berada dalam batas keselamatan. Menurut IAEA SSG-52, sistem pendingin harus dirancang agar mampu menghilangkan panas pada kondisi operasi

normal, kondisi transien, serta kondisi kecelakaan yang dipertimbangkan dalam desain. Jenis pendingin yang digunakan bergantung pada tipe reaktor, seperti air, gas, atau logam cair. Pada reaktor cepat, pendingin tidak berfungsi sebagai moderator sehingga spektrum neutron tetap berada pada energi tinggi (IAEA, 2019).

Generator adalah material yang berfungsi untuk memperlambat neutron hasil fisi agar meningkatkan probabilitas terjadinya reaksi fisi lanjutan. Proses moderasi terjadi melalui tumbukan elastik antara neutron dan inti atom moderator. Pada reaktor termal, moderator merupakan komponen inti yang sangat penting dan umumnya menggunakan air ringan, air berat, atau grafit. Namun, IAEA SSG-52 menjelaskan bahwa pada reaktor cepat, fungsi moderasi secara sengaja diminimalkan atau dihilangkan agar reaktor beroperasi pada spektrum neutron cepat. Oleh karena itu, keberadaan moderator sangat bergantung pada konsep desain reaktor yang digunakan (IAEA, 2019).

d. Batang Kendali (*Control Rod*)

Batang kendali merupakan komponen inti yang berfungsi untuk mengendalikan reaktivitas reaktor dengan menyerap neutron. Batang kendali umumnya terbuat dari material dengan penampang serap neutron tinggi, seperti boron, kadmium, atau hafnium. Dengan menggerakkan batang kendali masuk atau keluar dari inti, laju reaksi fisi dapat dikendalikan, baik untuk pengaturan daya maupun untuk penghentian reaktor secara cepat (*reactor shutdown*). IAEA SSG-52 menyatakan bahwa sistem batang kendali harus memiliki tingkat keandalan tinggi dan mampu menghentikan reaktor secara aman dalam kondisi darurat (IAEA, 2019). Gambar dari suatu batang kendali dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Batang Kendali (Oludare *et al.*, 2014)

Batang kendali mendefinisikan kolom bahan bakar aktif yang berada dalam multiblok. Pada batang kendali menyediakan *control rod* yang dapat memoderasi radiasi. Semakin jauh batang kendali yang diperpanjang ke dalam bahan bakar, semakin sedikit radioaktivitas yang dihasilkan oleh kolom bahan bakar yang memproduksi panas dan daya yang lebih rendah (Oludare *et al.*, 2014).

e. Perisai (*Shielding*)

Shielding merupakan pelindung yang dirancang khusus untuk melindungi pengoperasi agar terhindar dari paparan radiasi bahan bakar reaktor yang bersifat radioaktif. Selama reaksi fisi berlangsung akan terdapat paparan partikel alfa, beta dan sinar gamma serta neutron (Cinantya dan Fitriyani, 2014). Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Untuk menahan radiasi agar tidak menyebar ke lingkungan luar sistem reaktor maka diperlukan suatu sistem perisai (Lewis, 2008).

f. Reflektor (*Reflector*)

Reflektor neutron merupakan komponen inti reaktor yang berfungsi untuk mengurangi kebocoran neutron dari daerah aktif inti reaktor dengan cara

memantulkan kembali neutron yang keluar dari teras ke dalam inti. Keberadaan reflektor neutron dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan neutron, memperbaiki distribusi fluks neutron, serta berkontribusi terhadap kestabilan reaktivitas inti reaktor. Menurut *IAEA Safety Standards Series No. SSG-52*, reflektor neutron dipertimbangkan sebagai bagian dari desain inti reaktor yang berperan dalam karakteristik neutronik inti, meskipun konfigurasi dan material reflektor sangat bergantung pada tipe reaktor yang digunakan. Dalam desain reaktor cepat, reflektor digunakan tanpa moderator untuk mempertahankan spektrum neutron cepat, sedangkan pada reaktor termal reflektor sering dikombinasikan dengan material moderator (IAEA, 2019).

2.3 Bahan Bakar Reaktor Nuklir

Bahan bakar reaktor yang sudah banyak digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir antara lain.

1.3.1 Uranium

Ketersediaan Uranium di Indonesia sangatlah penting untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar PLTN. Uranium adalah unsur utama diantara bahan radioaktif alami yang berada di bebatuan terutama terletak pada bebatuan beku dan metamorfosa dari batuan sedimen yang bersifat asam, seperti granit, fosfat, dan *black shales* kaya organik yang terdapat dalam kerak bumi dan air laut. Terdapat tiga isotop uranium di alam, yaitu U^{234} , U^{235} , U^{238} , yang mana sekitar 99,3% hasil dari total uranium alami yaitu U^{238} . Kebutuhan bahan bakar nuklir ditentukan oleh adanya daya reaktor, faktor kapasitas, efisiensi termal, fraksi bakar, dan lamanya reaktor beroperasi. Bijih uranium berasal dari hasil tambang batuan uranium yang menghasilkan *uranium ore* dan limbah bebatuan (Oktavianto *et al.*, 2024).

Uranium memiliki nomor atom 92, proton 92, elektron 92, dan elektron valensi 6 dengan inti bervariasi antara 141 sampai 146 neutron sehingga terdapat 6 isotop uranium. Ketika ditambang, uranium mengandung isotop U^{234} , U^{235} , U^{238} . Uranium

memiliki titik leleh yaitu 1.132 °C. Material yang diinginkan pemakai bahan bakar reaktor adalah U^{235} . Uranium terdiri dari U^{238} sebanyak 99,274%, U^{235} sebanyak 0,72% dan U^{234} sebanyak 0,0058%. Ketersediaan U^{235} mengharuskan untuk melakukan peningkatan konsentrasinya sekitar 2-5% agar efektif dipakai dalam reaktor nuklir, dan U^{235} memiliki waktu paruh $7,038 \times 10^8$ tahun (Takaki dan Deby, 2012).

Senyawa organo uranium senyawa kompleks yang telah diselidiki secara luas terutama yang berkaitan dengan pengelolaan limbah nuklir. Dimana ekstraksi uranium selama siklus bahan bakar dan daur ulangnya merupakan langkah penting untuk mengurangi limbah radioaktif dalam jangka yang panjang. Uranium telah digunakan untuk waktu yang lama sebagai bahan bakar nuklir yang bisa menghasilkan sumber energi listrik dari uranium sebagai bentuk perubahan perkembangan bahan nuklir dari pembuatan hingga pembuangan (Maria *et al.*, 2022).

1.3.2 Plutonium

Radionuklida ^{239}Pu memiliki sifat yang mudah mengendap pada sedimen yaitu sedimen yang berbentuk lempung sehingga radioaktivitas ^{239}Pu kemungkinan besar berada di sedimen dibandingkan di air yang rata-rata teridentifikasi plutonium di sedimen dapat mencapai 50% dari jumlah plutonium yang berada di air. Hal ini diakibatkan oleh aktifitas biologi yang dapat mempengaruhi dan pengadukan yang tinggi yang terjadi pada perairan tersebut (Setiyahandayani *et al.*, 2016).

Plutonium termasuk ke dalam kelompok aktinida dan merupakan unsur buatan dengan nomor atom 94. Semua isotop dari aktinida ini merupakan unsur radioaktif. Sangat sedikit sekali plutonium terbentuk di alam. Umumnya Pu^{239} dan Pu^{240} terbentuk pada reaktor nuklir daya, ketika uranium-239 menangkap neutron. Plutonium biasanya digunakan untuk memproduksi senjata nuklir. Pu^{238} juga digunakan sebagai sumber panas pada baterai nuklir untuk menghasilkan listrik pada peralatan pesawat luar angkasa. Plutonium yang merupakan partikel reaktif, yang keberadaannya di

perairan laut pada umumnya berasal dari uji senjata nuklir dan lepasan dari reaktor nuklir baik yang terkontrol maupun tidak. Di laut terbuka diperkirakan konsentrasi plutonium sekitar 10-5 Bg/kg (oleh IAEA) dimana sebagian besar (99%) akan terdeposisi ke sedimen. Sedangkan sekitar 7% akan menyebar mengikuti mekanisme migrasiperairan (Makmur, 2011).

2.4 Persamaan Difusi Neutron

Dalam suatu reaktor nuklir terdapat distribusi neutron yang harus diperhatikan. Difusi neutron digunakan untuk meninjau gerakan neutron pada aliran dalam teras reaktor, termasuk tabrakan yang terjadi pada neutron, hilangnya neutron karena terserap material lain dalam reaktor, dan kebocoran dari dalam neutron. Setelah mengetahui distribusi dan populasi neutron dalam reaktor, kestabilan reaksi berantai dapat terjaga (Dewi *et al.*, 2023).

Perhitungan difusi menggambarkan adanya hubungan antara laju produksi, laju serapan dan laju kebocoran pada reaktor. Produksi neutron dalam suatu elemen volume, berasal dari hasil reaksi fisi, peristiwa hamburan inelastik, dan sumber neutron dalam elemen. Serapan neutron disebabkan oleh absorpsi reaksi neutron oleh inti-inti atom medium. Penurunan persamaan difusi menggunakan konsep keseimbangan jumlah neutron yang masuk dan neutron yang keluar dari teras.

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju} \\ \text{perubahan} \\ \text{jumlah} \\ \text{neutron} \\ \text{grup} \\ (g) \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{c} \text{perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{leakage} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{perubahan} \\ \text{karena} \\ \text{absorpsi} \\ (g) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{sumber} \\ \text{neutron} \\ \text{dari} \\ \text{fisi} \\ (g) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{neutron} \\ \text{hianj} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan} \\ (g) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{neutron} \\ \text{masuk} \\ \text{karena} \\ \text{hamburan} \\ (g) \end{array} \right] \quad (2.3)$$

Pada persamaan di atas indeks g menunjukkan indeks untuk grup energi. Tanda (-) menunjukkan jumlah neutron berkurang, sedangkan tanda (+) menunjukkan jumlah neutron bertambah. Bentuk matematis dari persamaan 2.3 dapat ditulis sebagai: (Zakyia dan Shafi, 2020).

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla D_g \nabla \phi_g - \Sigma_{ag} \phi_g + S_g - \Sigma_{sg} \phi_g + \sum_{g'} \Sigma_{sgg'} \phi_{g'} \quad (2.4)$$

Dengan D_g tetapan difusi grup g , Σ_g penampang lintang makroskopis grup g dari jenis rekasi i , $v\Sigma_{fg}$ probabilitas terjadinya rekasi fisi tiap detik pada grup g , ϕ_g fluks neutron yang bergantung pada ruang dan energi pada grup g dan k_{eff} . Perubahan pada neutron yang telah hilang karena terjadinya absorpsi dapat dituliskan pada persamaan 2.5

$$\Sigma_{Rg} \phi_g = \Sigma_{ag} \phi_g + \Sigma_{sg} \phi_g \quad (2.5)$$

Perubahan pada suku laju jumlah neutron sama dengan nol dalam keadaan stabil dapat dituliskan pada persamaan 2.6

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

Sehingga persamaan difusi dalam keadaan stabil dapat dituliskan pada persamaan 2.7

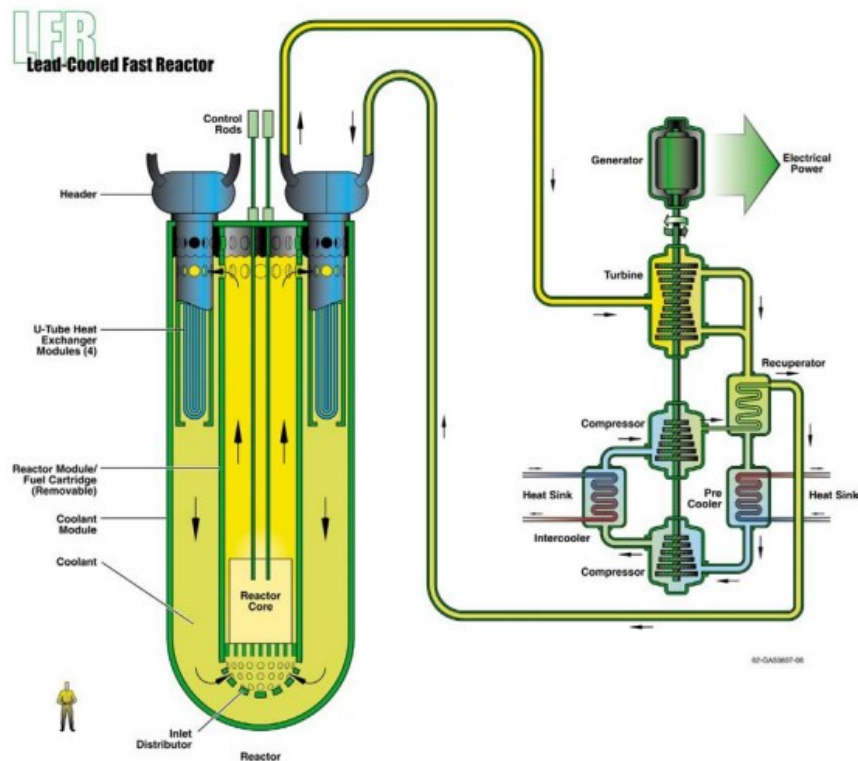
$$-\nabla D_g \nabla \phi_g + \Sigma_{Rg} \phi_g = \frac{\lambda_g}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'} V_{g'} \Sigma_{fg'} \phi_{g'} + \sum_{g'} \Sigma_{sgg'} \phi_{g'} \quad (2.7)$$

2.5 Lead Cooled Fast Reactor (LFR)

Reaktor cepat berpendingin timbal (LFR) merupakan salah satu kandidat unggulan dari teknologi Generasi IV yang dikembangkan untuk meningkatkan keberlanjutan, keselamatan, keandalan, resistensi proliferasi, dan efisiensi biaya. Teknologi ini menggunakan logam berat cair sebagai pendingin, yang menawarkan sifat keamanan pasif dan kinerja termal yang tinggi. Sejak tahun 2000, ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy, and Sustainable Economic Development) telah berperan aktif dalam pengembangan sistem nuklir inovatif ini. Fokus utama ENEA adalah pada desain inti, penilaian keselamatan, dan pengembangan teknologi yang mendukung operasional LFR (Tarantino *et al.*, 2021).

Reaktor Generasi IV (GEN IV) dikembangkan dengan tujuan meningkatkan keberlanjutan, efisiensi biaya, dan keamanan serta mengurangi risiko proliferasi. Di antara berbagai pilihan bahan bakar, thorium (^{232}Th) menonjol karena ketersediaannya yang melimpah, yakni tiga hingga empat kali lebih banyak dibandingkan uranium di kerak bumi. Meskipun thorium tidak dapat memulai reaksi fisi sendiri, dia dapat diubah menjadi isotop fisil ^{233}U melalui penangkapan neutron di reaktor cepat, yang memiliki fluks neutron tinggi untuk meningkatkan proses transmudasi. Penelitian ini menganalisis kinerja bahan bakar berbasis thorium di *European Lead-cooled Fast Reactor* (ELFR) sebagai alternatif bahan bakar uranium. ELFR adalah sistem reaktor cepat berpendingin timbal yang dipilih oleh inisiatif GEN IV. Reaktor ini menggunakan timbal murni sebagai pendingin, yang menawarkan berbagai keunggulan seperti titik didih tinggi, interaksi minimal dengan udara atau air, serta penampang lintang serapan neutron yang rendah. Inti reaktor memiliki 427 rakitan bahan bakar (FA), masing-masing terdiri dari 169 pin bahan bakar dengan panjang aktif 140 cm. Referensi bahan bakar ELFR adalah campuran oksida (MOX) yang mengandung uranium, plutonium, dan aktinida minor. Distribusi neutron penyebab fisi untuk bahan bakar thorium dan uranium serupa, dengan sebagian besar fisi disebabkan oleh neutron cepat (Ibrahim, 2023).

Peningkatan bertahap dalam pemahaman tentang sifat timbal telah menghasilkan evolusi desain LFR dan konsep pengeksplotasian karakteristik unik timbal sebagai pendingin. Pada desain LFR dihasilkan pembetulan dan modifikasi pada reaktor sebelumnya dan memberikan gambaran pada konfigurasi sistem utama reaktor LFR. Sistem primer terdapat pada sebuah bejana yang terkandung dalam bejana reaktor dari baja tahan karat dan berbentuk bejana silinder dengan kepala bawah yang ditumpukan dalam kapal pengaman dan ditambatkan ke lubang reaktor untuk mengumpulkan timbal jika bejana terjadi sebuah kebocoran. Skema LFR dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Skema *Lead Cooled Fast Reactor* LFR (Pioro *et al.*,2023)

Dalam kasus kebocoran pada LFR dapat diatur pengamanan sedemikian rupa pada bejana reaktor agar tidak terjadinya kebocoran sehingga tidak dapat mengakibatkan terbongkarnya saluran masuk pembangkit uap dan pendingin yang dipertahankan, termasuk sistem DHR (alemberti *et al.*,2020).

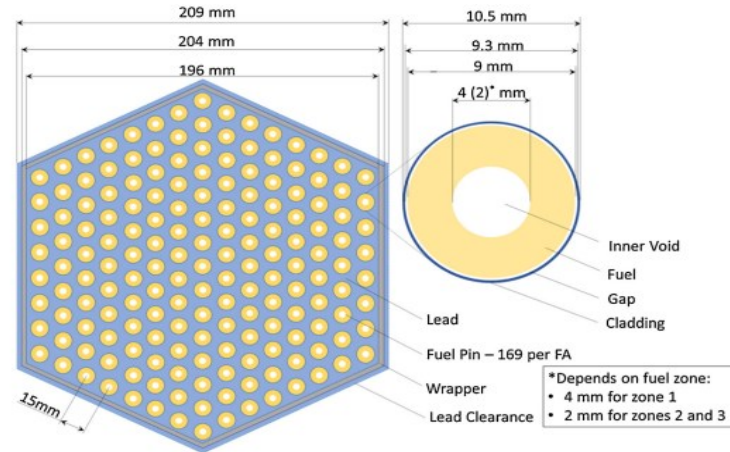
Sistem LFR memiliki aspek non-proliferasi, sustainabilitas, keselamatan dan reabilitas dengan memanfaatkan timbal Pb-Bi sebagai pendingin dengan waktu pengoperasian yang sangat panjang. Parameter desain LFR tidak berinteraksi dengan udara, air, uap, atau karbon dioksida sehingga reaksi eksotermik tidak mungkin terjadi. Karakterisasi LFR melalui *self breeding* yang menyebabkan reaktor ini memiliki waktu operasi yang sangat lama, yaitu 15-30 tahun. Hampir semua reaktor generasi IV seperti GFR dan LFR masing-masing menggunakan uranium plutonium karbida U-PuC dan uranium plutonium nitrida UN-PuN (Zuhairat *et al.*, 2009).

Pendingin utama yang dipertimbangkan oleh LFR referensi generasi IV adalah timbal murni, perlu diketahui bahwa ada beberapa perbedaan paduan timbal dan timbal sebagai pendingin reaktor. Inti reaktor LFR dicirikan oleh spektrum cepat karena memiliki sifat hamburan timbal yang memungkinkan keberlanjutan dari energi yang memiliki neutron relatif rendah. Pendingin timbal relatif lembam dari perspektif kimia yang memiliki beberapa sifat menarik yang memungkinkan tingkat keamanan melekat dan penyederhanaan desain yang tinggi sehingga tidak adanya reaksi kimia yang cepat antara pendingin timbal dengan air atau udara dan tidak adanya titik didih timbal yang tinggi memungkinkan pengoperasian reaktor pada tekanan atmosfer dekat dan menghilangkan resiko pengosongan inti karena mendidihnya cairan pendingin. Timbal yang digunakan melindungi radiasi gamma dan mempertahankan produk fisi pada suhu 600°C, sehingga terjadi pelepasan fisi dari bahan bakar (Smith *et al.*, 2016).

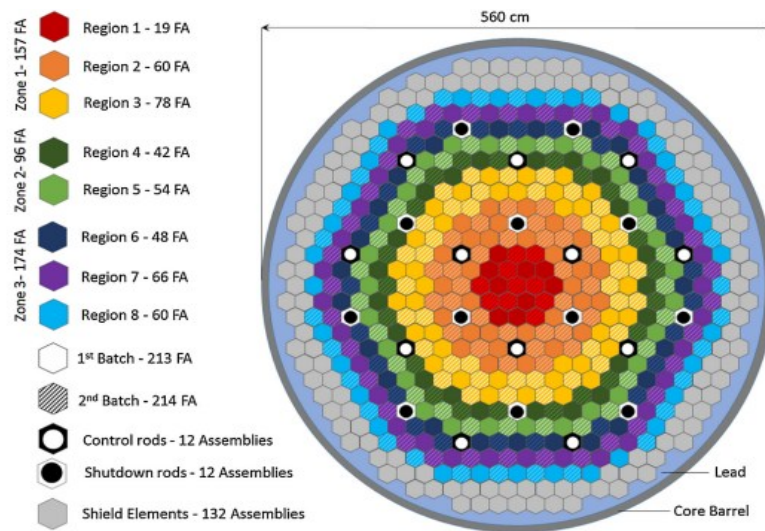
Dari permodelan geometri rekayasa inti LFR ditransfer ke geometri komputasi 3D dari model numerik. Reaktor tipe numerik silinder sebagai timbal dengan diameter 3500 mm dan tinggi 6100 mm, berisi laras inti yang diisi dengan rakitan bahan bakar (FA) disusun dalam pola heksagonal pada Gambar 2.5. Inti aktif terdiri dari tiga zona bahan bakar dan dibagi menjadi 8 wilayah pembakaran radial dan 10 aksial untuk permodelan terperinci dari efek neutronik yang mengikuti efek pembakaran, dapat dilihat pada Gambar 2.6. Masing-masing dari 427 rakitan bahan bakar berisi 169 batang bahan bakar dalam kisi segitiga yang semuanya memiliki vektor bahan bakar kesetimbangan yang sama. Batang dalam limbah cair diikat oleh pembungkus yang terbuat dari baja ketinggannya 1400 mm. Diameter pada rongga bagian dalam pelet bahan bakar tergantung pada zona bahan bakar, 4 mm untuk zona satu, dan 2 mm untuk zona dua serta tiga yang digunakan untuk meratakan distribusi daya di seluruh zona tengah.

Untuk mengurangi kerusakan nuklir akibat perbedaan suhu timbal yang keluar masuk inti aktif reaktor dan memaksakan pengenalan dua bahan timbal dengan kepadatan yang berbeda. Kepadatan saluran timbal masuk di bawah inti aktif, pada 400 °C,

yaitu 10.58 g/cm^3 , sedangkan untuk timbal saluran keluar pada 480°C , yaitu 10.48 g/cm^3 . 12 rakitan kontrol dan *shutdown* terletak secara simetris di inti reaktor, yang pertama digunakan untuk operasi reaktor normal, termasuk kompensasi kehilangan reaktivitas karena pembakaran bahan bakar, sedangkan *shutdown* scrm cepat (stanisz *et al.*, 2016).



Gambar 2.5 Rakitan Bahan Bakar LFR (stanisz *et al.*, 2016).



Gambar 2.6 Konfigurasi Inti Reaktor (stanisz *et al.*, 2016).

Rakitan dimodelkan dengan pembungkus heksagonal mirip dengan rakitan perisai tetap diisi dengan 127 batang penyerap yang diperkaya 90%. Panjang total pelet

penyerap sama dengan panjang tumpukan bahan bakar yaitu 1400 mm. Batang kontrol (CR) terletak di bawah inti aktif dan batang *shutdown* (SR) terletak di atasnya dengan jarak 5 mm.

Tabel 2.1 Spesifikasi LFR (stanisz *et al.*, 2016).

Daya (MWth/Mwe)	1500/600
Pendingin primer	Pb-Bi
Suhu saluran masuk (°C)	400
Suhu saluran keluar (°C)	480
Kecepatan pendingin (m/s)	1.53
Bahan bakar	UN-PuN
Pengayaan Pu (wt%)	~18
Waktu radiasi bahan bakar (hari)	2 x 900
Pendingin sebelum didaur ulang (tahun)	7.5
Diameter laras (mm)	5600
Ketebalan barel (mm)	50
Geometri FA	<i>Hexagonal</i>
Ketinggian aktif (mm)	1400
Jumlah FA	427
Jumlah FA per zona	157/ 96/ 174
Jumlah pin per FA	169
Pitch FA (mm)	209
Izin antar FA (mm)	5
FA pothem (mm)	102
Ketebalan pembungkus FA (mm)	4
Pitch pin bahan bakar (mm)	15
Diameter luar pelet (mm)	9
Diameter dalam pelet (mm)	4(2)
Ketebalan pin bahan bakar (mm)	0.6
Ketebalan celah pin bahan bakar (mm)	0.15
Jumlah CR	12
Jumlah SR	12
Diameter pelet CR (SR) (mm)	14
Jumlah raitan perisai	132
Diameter batang SA (mm)	14
Diameter berlapis CR (SR, SA) (mm)	0.7

2.6 *Standart Reactor Analysis Code (SRAC)*

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

Sistem SRAC dalam dijalankan pada sebagian besar komputer dengan sistem operasi UNIX atau yang serupa seperti Linux. Instalansi sistem dapat dilakukan dengan mudah dengan menggunakan perintah instalansi yang disediakan dan menyiapkan sumber yang sesuai dan data yang diperlukan. SRAC telah dibuat untuk membentuk sistem kode neutronik komprehensif dengan struktur sistem yang mengintegrasikan tiga kode transpor dan dua kode difusi sebagai berikut.

- a. PIJ : Kode metode yang digunakan untuk tumbukan yang telah dikembangkan oleh JAERI yang meliputi 16 kisi geometri
- b. ANISN : Kode transportasi SN satu dimensi yang mencakup geometri pelat (X), silinder (R), dan bola (Rs),
- c. TWOTRANS : Kode transportasi SN dua dimensi yang mencakup geometri pelat (X-Y), silinder (R-Z), dan lingkaran (R-0),
- d. TUD : Kode difusi satu dimensi yang dikembangkan di JAERI, yang mencakup geometri pelat (X), silinder (R), dan bola (Rs),

- e. CITATION : Kode difusi multidimensi yang mencakup 12 jenis geometri termasuk pembagian jaring spasial segitiga dan heksagonal.

Untuk kode-kode yang diimpor ANISN, TWOTAN, dan CITATION, beberapa modifikasi ditambahkan untuk mempercepat komputer vektor, untuk menghubungkan bagian-bagian melintang antar kode, dan untuk fungsi-fungsi tambahan kami, sementara beberapa fungsi asli dihilangkan. Sejauh menyangkut perhitungan fluks.

Kode bantu COREBN adalah kode perhitungan *burn-up* inti multidimensi yang terdiri dari CITATION yang menggunakan metode perbedaan hingga dan fungsi untuk menginterpolasi penampang makroskopik. Kode ini menggunakan penampang tabulasi yang disediakan oleh opsi perhitungan *burn-up* sel dari kode SRAC. Interpolasi penampang dilakukan pada tiga parameter: paparan dan dua parameter sesaat. Meskipun kode CITATION asli memiliki fungsi perhitungan *burn-up* dengan penampang mikroskopik, kode ini tidak dapat diterapkan pada reaktor termal dengan heterogenitas yang kuat dalam rakitan bahan bakar. Oleh karena itu, metode interpolasi tabel penampang makroskopik diadopsi. COREBN terutama digunakan untuk manajemen *burn-up* dan bahan bakar reaktor riset di JAEA (Okumura, 2002).

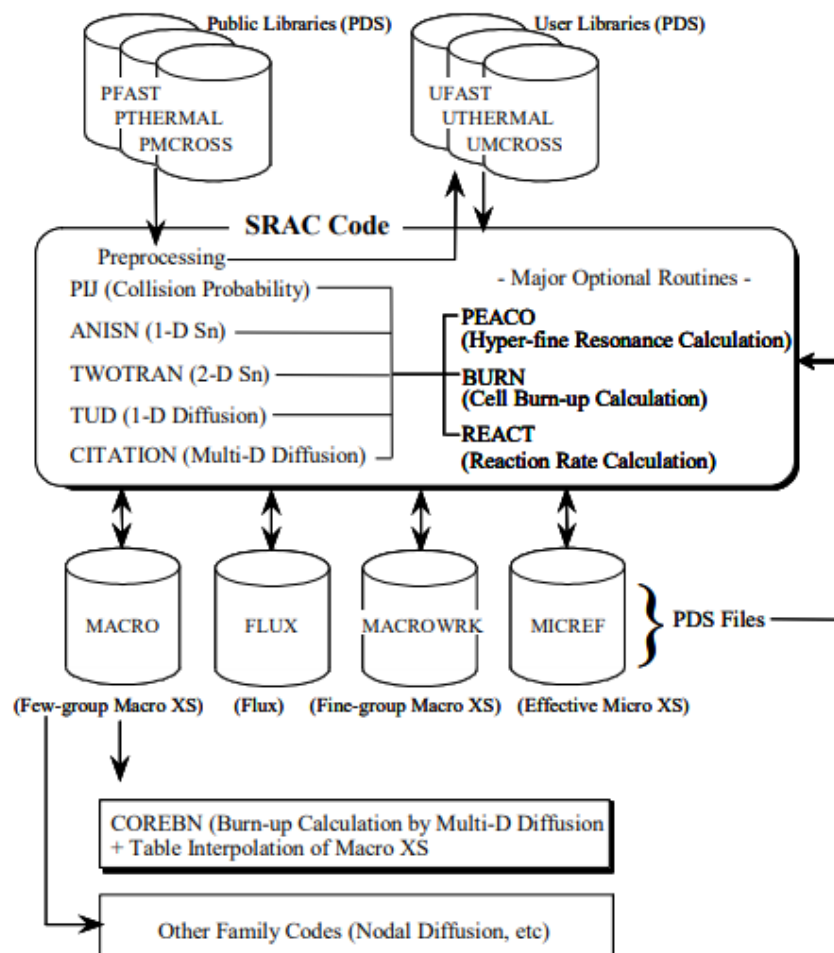
SRAC terdapat file input dan file output. File input SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila penginputan berjalan dengan benar atau tepat, maka ketika di run, file output standar akan memberikan informasi tertulis.

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

sebagai tanda bahwa perhitungan telah selesai. File output yang biasa dikeluarkan adalah SFT99, yang berisi mengenai laporan lengkap hasil perhitungan, SFT06 berisi tentang proses atau langkah dalam perhitungan, dan SFT89 mengenai visualisasi bentuk sel yang dibutuhkan. Struktur sistem pada SRAC ditunjukkan pada Gambar 2.7 Terdapat sepuluh jenis PDS dalam sistem SRAC yaitu

- a. PFAST : Pustaka Fast (hanya dibaca).
- b. PMCROS : Pustaka MCROSS untuk PEACO (hanya dibaca).

- c. PTHERMAL : Pustaka Thermal (hanya dibaca).
- d. UFAST : Pengguna pustaka Fast.
- e. UMCROSS : Pengguna pustaka MCROSS untuk PEACO.
- f. UTHERMAL : Pengguna pustaka Thermal.
- g. MICREF : Pustaka pengguna yang berisi data penampang lintang mikroskopik
- h. MACROWRK : Pustaka pengguna yang berisi data penampang lintang makroskopik
- i. MACRO : Data penampang lintang makroskopik oleh pengguna.
- j. FLUX : Distribusi fluks pada beberapa grup struktur.



Gambar 2.7 Struktur SRAC (Okumura, 2002).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan terhitung dari bulan Oktober sampai Desember 2025. Tempat dilaksanakan penelitian ini adalah di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah laptop dengan *Operating System* (OS) *Acer Linux Ubuntu 20.04* dan Program *System Reactor Atomic Code* SRAC.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap sebagai berikut:

3.3.1 Presentase Pengayaan

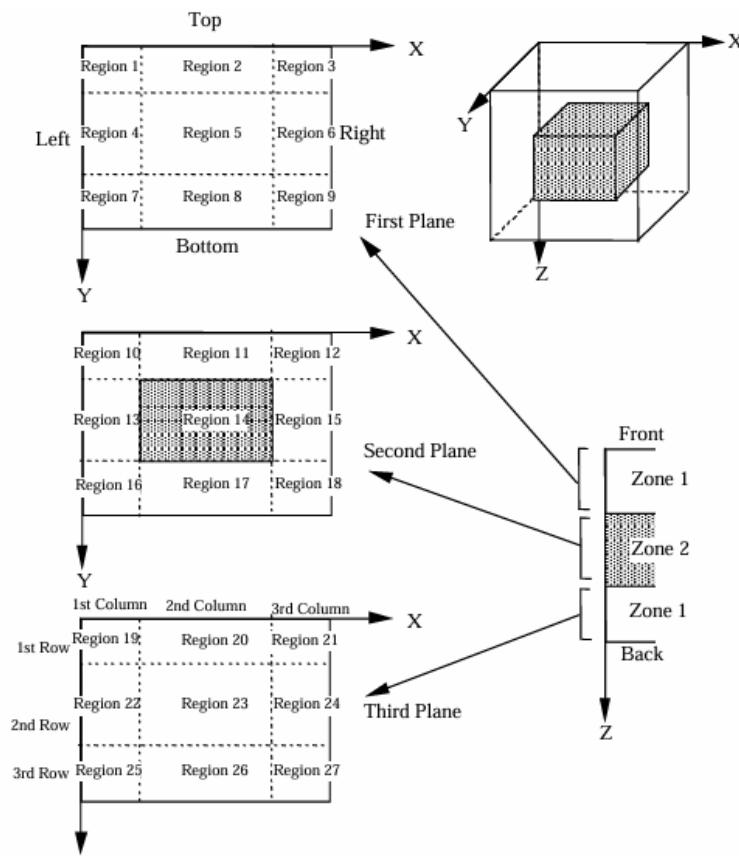
Pada penelitian ini dilakukan penentuan pengayaan pada bahan bakar dengan menggunakan variasi yaitu sebesar 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, 7,5%, 8%, 8,5% dan 9% . Penentuan pengayaan bahan bakar pada reaktor LFR dilakukan agar reaktor yang dihasilkan berada pada keadaan kritis $k_{\text{eff}} = 1$. Presentase pengayaan ditunjukkan pada nilai *atomic density* yang terus naik setelah dilakukan pembakaran.

3.3.2 Menentukan Bentuk Geometri *Cell*

Bentuk geometri *cell* dan teras reaktor merupakan salah satu komponen utama yang ditetapkan pada tahap awal perhitungan neutronik menggunakan program SRAC. Pada penelitian ini, geometri yang digunakan adalah geometri heksagonal tiga dimensi (3D) dengan sistem koordinat X, Y, dan Z, yang merepresentasikan

pembagian teras reaktor secara spasial. menggunakan pembagian region heksagonal secara langsung dalam ruang tiga dimensi.

Dalam pemodelan SRAC, arah X dan Y merepresentasikan pembagian teras pada bidang radial, sedangkan arah Z merepresentasikan arah aksial teras reaktor. Setiap region dalam geometri heksagonal 3D dianggap homogen dan mewakili zona material tertentu sesuai dengan desain reaktor yang ditetapkan. Geometri heksagonal 3D dipilih karena sesuai dengan karakteristik teras reaktor cepat dan memudahkan pemodelan simetri teras dalam perhitungan neutronik menggunakan modul CITATION. Dengan pendekatan ini, hasil perhitungan diharapkan dapat merepresentasikan karakteristik neutronik teras reaktor secara akurat dan efisien sesuai dengan tujuan penelitian.



Gambar 3.1 Geometri *slab* untuk 3D (X-Y-Z) (Okumura *et al.*, 2002).

3.3.3 Densitas Atom

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

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

Dengan N adalah densitas atom (atom/cm³), ρ adalah densitas (gram/cm³), N_A adalah bilangan avogadro ($0,602 \times 10^{24}$ atom/mol), dan M adalah nomor massa (gram/mol) (Ardanti *et al.*,2020).

3.3.4 Input Data Pada CITATION

Hasil perhitungan densitas atom digunakan sebagai *input* pada perhitungan menggunakan CITATION pada SRAC. Pada CITATION dapat diketahui hasil perhitungan secara keseluruhan dari model *output* dari CITATION dan menunjukan model teras reaktor yang dibuat saat berada dalam keadaan kritis, dan menghasilkan energi yang maksimal dan memenuhi standar keamanan. Apabila penginputan data pada CITATION telah selesai maka pada *output* akan terdapat pesan seperti Gambar 3.4

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

Gambar 3.2 Output SRAC (Okumura, 2002)

Apabila belum muncul pesan tersebut perlu dilakukan pengecekan pada input dan melakukan perhitungan kembali. Setelah perhitungan dilakukan dengan benar, maka selanjutnya mengecek apakah hasilnya sesuai dengan yang diinginkan kemudian melakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*,2002).

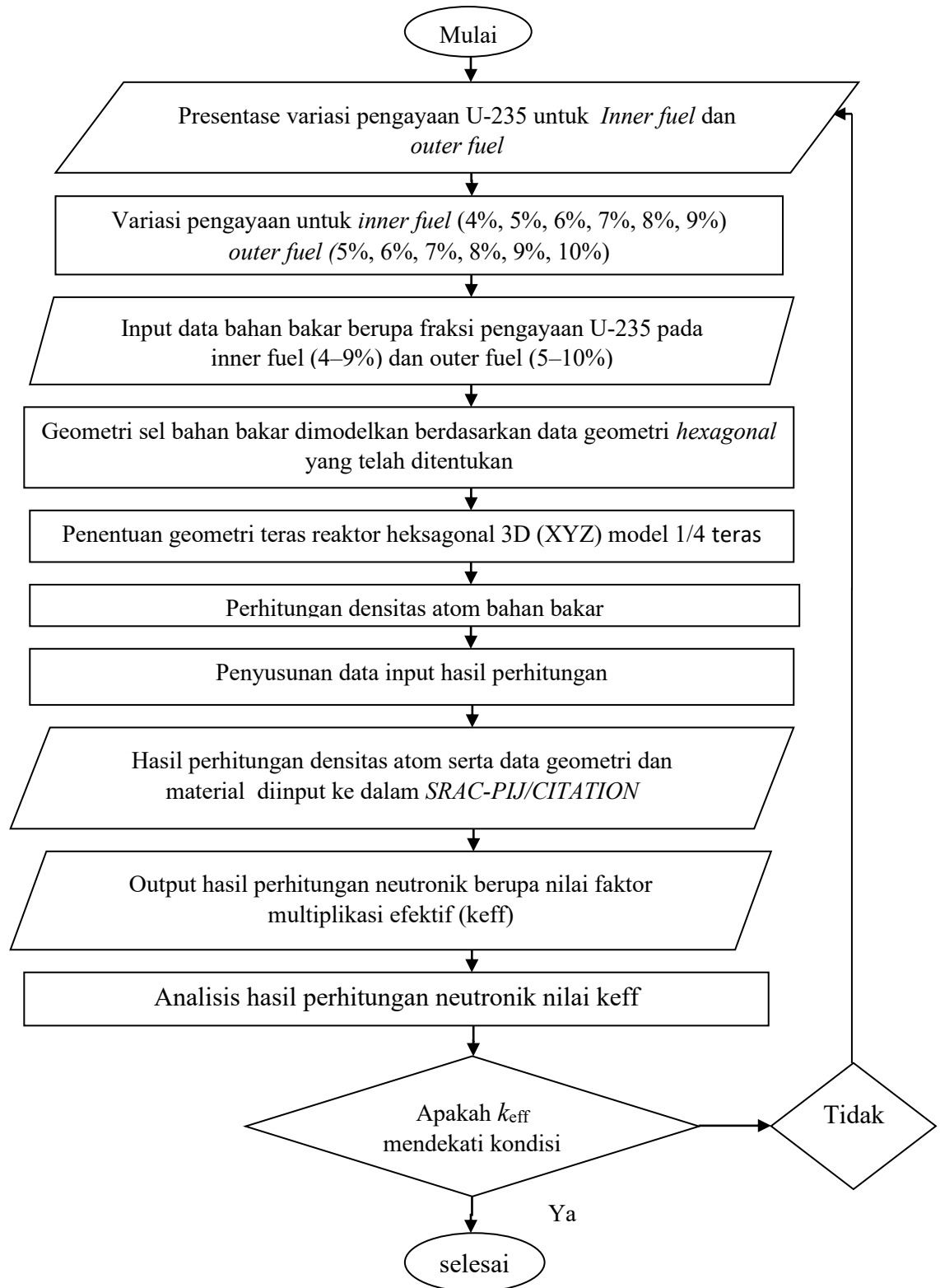
3.3.5 Analisis Hasil CITATION

Hasil perhitungan *cell* yang ditampilkan berupa nilai *output* faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Nilai k_{eff} ini menunjukkan kekritisan dari suatu reaktor, apabila nilai hasil multiplikasi besarnya $k_{\text{eff}} = 1$ maka dapat dikatakan reaktor kritis, jika nilai $k_{\text{eff}} > 1$ maka dikatakan reaktor superkritis, hal ini terjadi akibat bertambahnya jumlah neutron seiring berjalanya waktu, dan apabila nilai $k_{\text{eff}} < 1$ maka dikatakan subkritis akibat jumlah neutron menurun seiring berjalannya waktu (Taufiq, 2011).

Pada k_{eff} *output* dihasilkan dari distribusi rapat daya (ρ) dalam teras reaktor. Besar rapat daya (ρ) menunjukkan besarnya daya yang dihasilkan oleh persatuan volume. Distribusi rapat daya (ρ) digunakan untuk menentukan ada tidaknya reaktor daya puncak dan suhu pada bahan bakar minimum dari suatu teras reaktor yang melampaui batas izin (Björk *et al.*, 2011).

3.4 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.5 merupakan diagram alir yang dilakukan pada penelitian.



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian, analisis dan pembahasan diperoleh berupa kesimpulan sebagai berikut.

1. Desain dan permodelan k_{eff} dipengaruhi oleh variasi pengayaan bahan bakar yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan pemilihan nilai pengayaan yang tepat agar reaktor LFR dapat mencapai kondisi kritis yang stabil dan aman. Model terbaik diperoleh pada ukuran teras (x) 370 cm menghasilkan nilai k_{eff} sebesar 1,00010, sedangkan pada ukuran (y) 200 cm diperoleh nilai k_{eff} sebesar 1,00000 dengan kombinasi pengayaan 8% pada *inner fuel* dan 9% pada *outer fuel*, yang menunjukkan kondisi kritis.
2. Kekritisian reaktor LFR pada variasi pengayaan bahan bakar yang lebih tinggi terjadi penurunan nilai k_{eff} . Pada penelitian ini, pengayaan 8% pada *inner fuel* dan 9% pada *outer fuel* menghasilkan nilai k_{eff} sebesar 0,99990 yang memenuhi syarat kekritisian awal.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan analisis pengayaan bahan bakar yang lebih luas agar diperoleh desain reaktor LFR dengan k_{eff} yang lebih stabil dan distribusi daya yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Alemberti,A.2016. The Lead Fast Reactor: An Opportunity for the Future?.*Journal Engineering*. Vol.2.Hal 59-62
- Alemberti., Tucek,A., Takahashi,K., Obara,M., Kondo,T., Moiseev,M., Tocheny,A., Smith, L., Hwang, Wu soon., dan Yican.2020. *GIF-LFR System Safety Assessment*. Faculty and Reseachers's publication.Canada. Hal 5
- Ardhanti. W. R., Yulianti. Y., Riyanto. A., dan Syafriadi.2020. Perhitungan Burn Up pada Reaktor HCLWR Model Geometri Heksagonal Dua Dimensi BahanBakar Uranium menggunakan SRAC COREBN. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, Vol. 1. No. 1. Hal. 16-22
- Asnita,R.,danFitriyani,D.2019.Analisis Neutronik pada Reaktor Cepat denganVariasi Fraksi Pengayaan Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC dan MOX. *Jurnal Fisika Unand*.Vol.8. No.3. Hal. 266-272.
- Björk. K. I., Fhager.V., Demaziere. C. 2011. Comparison of thorium-based fuels with different fissile components in existing boiling water reactors. *Progress in Nuclear Energy*.Vol. 5.No.3. Hal. 618-625
- Cao.L. Oka. Y., dan Ishiwa. Y.2012. Fuel, Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology*. Vol. 45. No. 2. Hal 138-148
- Cinantya. D. N., Fitryani.D.2014. Analisis Neutronik Pada Reaktor Cepat Dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC Dan MOX). *Jurnal Fisika Unand*.Vol. 3. No. 1. Hal 1-7
- Dewi. S. R. A., Yulianti. Y., dan Firdaus. I.2023. Solusi Persamaan Difusi Neutron Pada Pwr (Pressurized Water Reactor) Berbentuk Heksagonal Dengan Bahan Bakar Uranium Daur Ulang. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. Vol. 11. No. 2. Hal 29-38
- Duderstadt.J.J., dan Hamilton.L.J.1976. *Nuclear Reactor Analysis*.John wiley and Sons, Inc. New York
- Ibrahim, A. (2023). Original article Analysis of Thorium Performance in Lead cooled Fast Reactor Graphical abstract. *International Journal of The oretical and Applied Research*, 2023, Vol. 2, No. 1. Hal. 125-130.

- Lewis. 2008. *Fundamental Of Nuclear Reactor Physiscs*. Academic Press. USA . Hal. 115- 134.
- Makmur.M.(2011).Mekanisme Penjerapan Plutonium Pada Sedimen. *Pusat Teknologi Limbah Radioaktif -BATAN*. Vol. 14. No. 10. Hal. 236–242.
- Maria, B., Costa, T., dan Kraka, E. 2022. Uranium:The Nuclear Fuel Cyclean Beyond. *International journal of Molecular Sciences*.Vol. 23. No. 9. Hal. 4655
- Marini,D., Ariani, M., Supardi., dan Johan, A.2022. Analisis neutronik reaktor cepat berpendingin Helium dengan daya 900 MWth berbasis bahan bakar Thorium Mixed Oxyde.*Jurnal Penelitian Sains*.Vol.24. No.2. Hal. 59-63
- Munita,L.,Shaffii, M.A.,Irka,F.H., dan Su,Z.2018. Analisis Kekritisan Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) Berdasarkan Variasi Bahan Bakar (U-Zr dan UN-PuN). *Jurnal Fisika Unand*.Vol. 7. No. 1. Hal. 80-83.
- Nailatusaadah. dan Irsyad. 2021. Neutronic Analysis of The SMART Modular Reactor Fuel Using SRAC 2006.*Computational and Experimental Researchin Materials and Renewable Energy (CERiMR)*. Vol . 4. No.Hal. 60–70.
- Novalianda, S., Ariani, M., Monado, F., dan Su, Z. (2018). Neutronic Design Of Uranium- Plutonium Nitride Fuel-Based Gas-Cooled Fast Reactor(GFR). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia* .Vol.14. No. 2. Hal. 92-98.
- Novalianda. S., Ramadhan. A., dan, Su'ud.(2020).Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*. Vol. 22. No. 2. Hal. 50–54.
- Oktavianto,P.,Saputra,A.,danSaputra,A. (2024).Pengolahan Uranium Dalam Bentuk Yello Cake CO gema Menjadi Serbuk Uo2 Sebagai Bahan Bakar Reaktor Nuklir. *Jurnal Teknologi Kimia Mineral*. Vol. 4. No. 1. Hal. 1–9.
- Okumura.2002. *SRAC (Ver.2002); The comprehensive neutronics calculation code system. I*. Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Japan.
- Oludare. A. I., Agu., Umar. A. M., Adedayo. S. O., Omolara., and Okafor. L. N. 2014. Control Rods Drop Failure On Reactors Stability And Safety. *Advances in Physics Theories and Applications*. Vol. 27. Hal. 58-73
- Pioro and Igor.2023. *Handbook Of Generation IV Nuclear Reactor*. Erragounta Saibabu Rao. India. Hal. 209
- Setyahandayani, N, E., Wulandari, S, Y., dan Makmur, M.2016. Studi Plutonium 239/240 (239/240 Pu) Dalam Sedimen Di Perairan Sluke, Rembang.Vol. 5. Hal. 40–44.
- Smith, C. F and Cinotti,L.2016.Lead Cooled Fast Reactor. *Handbook Generation IV Nuclear Reactor*.Vol. 10. Hal. 119-155

- Soentono. S. 1996. Kebijakan Daur Bahan Bakar Nuklir Nasional. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. Hal. 22-31
- Stainz,P., Oettingen,M., dan Cetnar,J.2016. Monte Carlo modeling of Lead-Cooled Fast Reactor in adiabatic equilibrium state. *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 30. No. 1. Hal. 341-352
- Sylvia.D.(2021).Politik Nuklir diIndonesia Masa Sukarno,1958-1967. *Lembar Sejarah*. Vol. 16. No. 1. Hal. 114-122.
- Tadeus,D.Y.,Setiyono,B., dan Setiawan,I.(2010). Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Jurnal Undip*. Vol.12. No. Hal. 8–13.
- Takaki. N and Mardiansah. D. 2012. Core Design and Deployment Strategy of Heavy Water Cooled Sustainable Thorium Reactor. *Sustainability* . Vol 4. Hal. 1933-1945
- Tarantino, M., Angiolini, M., Bassini, S., Cataldo, S., Ciantelli, C., Cristalli, C., Nevo, A. Del, Piazza,I. Di, Diamanti, D., Eboli, M., Fiore, A., Grasso, G., Lodi, F., Lorusso,P., Marinari, R., Martelli, D., Papa, F., Sartorio, C., Utili, M., dan Venturini, A. (2021). Overview on Lead-Cooled Fast Reactor Design and Related Technologies Development in ENEA. *Energies*.Vol. 14. No. 16. Hal. 5157
- Taufiq. I. 2011. Komputasi Paralel Persamaan Difusi Neutron Pada Reaktor Cepat Dengan Menggunakan Intel Threading Building Blocks. *Jurnal Ilmu Fisika* . Vol. 1. No.3. Hal. 38-47
- Vionita,V., Monado, F., Ariani, M., dan Royani, I.2022. Perhitungan Desain Konsep Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida Superkritis dan Berbahan Bakar Uranium Metalik Alam. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. Vol. 10. No. 2. Hal. 243–250.
- Wang Chen.2019. *A Preliminary Design Study for a Small Passive Lead-bismuth Cooled Fast Reactor*. Degree Project In Engineering Physics. Stockholm, Sweden. Hal 1-2
- Widiawati, N., Suud, Z., dan Irwanto, D.2000. Studi Perbandingan Ukuran Reflektor pada Reaktor Cepat Berpendingin Pb208-Bidengan Skema MCANDLE. *Jurnal Fisika Nuklir dan Biofisika*. Hal.174–179.
- Yulianto. T. 1996. Kajian Kemungkinan Modifikasi peralatan Fabwksi Untuk Fabrikasielemen Bakar Jenis HWR Dan LWR. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. Vol. 14. No. 10. Hal 190-198
- Zuhair dan Suwoto.2009. Studi dan Investigasi Awal Konsep Desain Reaktor Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol.11. No. 2. Hal. 63-72.
- Zwelfel. P. F. 1973. *Reactor Physics*. Mc Graw-Hill. USA. Hal. 74