

ANALISIS *BURN UP MODIFIED CANDLE* PADA *GAS COOLED FAST REACTOR* (GCFR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM OKSIDA

(Skripsi)

Oleh

RIA CHAROLINE BERU GINTING

NPM. 1817041006



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

ABSTRAK

ANALISIS *BURN UP MODIFIED CANDLE* PADA *GAS COOLED FAST REACTOR* (GCFR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM OKSIDA

Oleh

Ria Charoline Beru Ginting

Telah dilakukan penelitian tentang analisis *burn up modified CANDLE* dengan reaktor *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) menggunakan bahan bakar uranium oksida pada $\frac{1}{4}$ bagian teras reaktor dan desain geometri assembly bahan bakar berbentuk heksagonal yang didefinisikan IGT-12. Analisis dilakukan dengan simulasi komputasi menggunakan 2 kode dasar pada SRAC yaitu PIJ dan CITATION yang merupakan kode tambahan pada SRAC. Tujuan dari penelitian ini meliputi penentuan geometri sel, ukuran pin bahan bakar, fraksi volume, kekritisitas, densitas atom, rasio konversi dan distribusi rapat daya. Parameter yang dianalisis dari penelitian ini meliputi kekritisitas, densitas atom, rasio konversi dan distribusi rapat daya. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah nilai rasio konversi 1,15 dan nilai densitas atom mengalami perubahan jumlah nuklida pada jenis nuklida U^{235} sebesar $6,74 \times 10^{19}$ atom/cm³, U^{238} sebesar $1,81 \times 10^{22}$ atom/cm³ dan Pu^{239} sebesar $1,23 \times 10^{21}$ atom/cm³ pada periode *burn up* 70 tahun. Didapatkan nilai faktor multiplikasi (k_{eff}) dari 7 case untuk case 1 sebesar 1,028804, case 2 sebesar 1,025225, case 3 sebesar 1,020466, case 4 sebesar 1,011093, case 5 sebesar 0,9876864, case 6 sebesar 0,9245216 dan case 7 sebesar 0,9245214. Nilai faktor puncak daya semakin tajam yang dipengaruhi dengan lamanya bahan bakar uranium alam yang dibakar.

Kata Kunci: SRAC, densitas atom, rasio konversi, *burn up*.

ABSTRACT

ANALISIS BURN UP MODIFIED CANDLE PADA GAS COOLED FAST REACTOR (GCFR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM OKSIDA

By

Ria Charoline Beru Ginting

The Research on analysis a modified CANDLE with Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) using uranium oxide fuel has been carried out. It has 1/4 part of the reactor core and geometrical design assembly hexagonal shaped fuel defined as IGT-12. The analysis was carried out by computational simulation using 2 basic codes in SRAC, namely PIJ and CITATION which are additional codes in SRAC. The objectives of this study are determining cell geometry, fuel pin size, volume fraction, criticality, atomic density, conversion ratio, and power density distribution. The parameters of in this study are criticality, atomic density, conversion ratio, and power density distribution. The results were obtained in this study are conversion ratio is about 1.15 and atomic density of U^{235} is $6,74 \times 10^{19}$ atom/cm³, U^{238} is $1,81 \times 10^{22}$ atom/cm³, and Pu^{239} is $1,23 \times 10^{21}$ atom/cm³ at the end of reactor life on period burn up 70 years. The multiplication factor (k_{eff}) are 7 cases for 1st case is 1,028804, 2nd case is 1,025225, 3rd case is 1,020466, 4th case is 1,011093, 5th case is 0,9876864, 6th case is 0,9245216 and 7th case is 0,9245214. The peak factor value is getting sharper which is influenced by period of time natural uranium fuel is burned.

Keywords: SRAC, atomic density, conversion ratio, burn up.

ANALISIS *BURN UP MODIFIED CANDLE* PADA *GAS COOLED FAST REACTOR* (GCFR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM OKSIDA

Oleh

RIA CHAROLINE BERU GINTING

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

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



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

Judul Penelitian : **ANALISIS BURN UP MODIFIED CANDLE
PADA GAS COOLED FAST REACTOR (GCFR)
DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM OKSIDA**

Nama Mahasiswa : **Ria Charoline Beru Ginting**


Nomor Pokok Mahasiswa : **1817041006**

Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**




1. **Komisi Pembimbing**


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


Agus Riyanto, S.Si., M.Sc.
NIP. 198608222015041002

2. **Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung**


Gurum Ahmad Pauzi, S. Si., M. T.
NIP. 198010102005011002

MENGESAHKAN

1. **Tim Penguji**

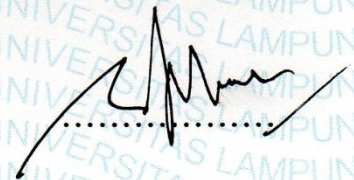
Ketua : Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.



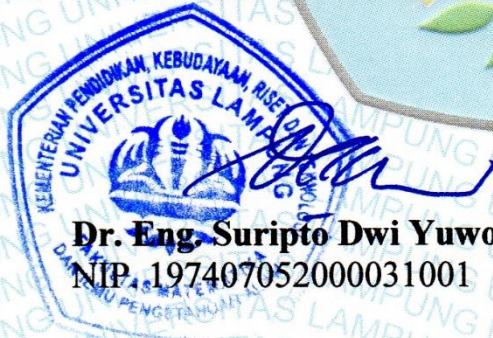
Sekretaris : Agus Riyanto, S.Si., M.Sc.



**Penguji
Bukan Pembimbing : Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si.**



2. **Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, S. Si., M. T.
NIP. 197407052000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 06 Februari 2023

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 06 Februari 2023

Penulis,



Ria Charoline Beru Ginting
NPM. 1817041006

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Ria Charoline Beru Ginting, dilahirkan di Bandar Lampung, 03 April 2000. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Dedi Sutansah Ginting dan Ibu Ruminah. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Xaverius 1 Bandar Lampung pada tahun 2012, SMPN 25 Bandar Lampung pada tahun 2015, SMA YP UNILA pada tahun 2018. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2018 melalui jalur penerimaan SNMPTN. Penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Jurusan Fisika FMIPA UNILA dengan judul “Pengembangan Prosedur Percobaan Praktikum Fisika Inti dan Eksperimen Melalui Visual Infografis dalam Laboratorium Fisika Inti dan Eksperimen (Studi Kasus : Jurusan Fisika Universitas Lampung)”. Dalam bidang organisasi penulis sebagai anggota Bidang Komunikasi dan Informasi HIMAFI FMIPA UNILA Periode 2019, Sekretaris Bidang Komunikasi dan Informasi HIMAFI FMIPA UNILA Periode 2020 dan staff Kemenkominfo IHAMAFI Periode 2021.

MOTTO

Semua ada waktunya. Jangan membandingkan hidupmu dengan orang lain. Tidak ada perbandingan antara matahari dan bulan, mereka bersinar saat waktunya tiba.

-B.J. Habibie-

Yakinlah, ada sesuatu yang menantimu setelah sekian banyak kesabaran yang kau jalani, yang akan membuatmu terpana hingga kau lupa betapa pedihnya rasa sakit.

-Ali bin Abi Thalib-

Berdamai dengan diri sendiri adalah kunci untuk menyelesaikan segala urusan dengan mudah tanpa merasakan kekecewaan saat gagal.

-Ria Charoline-

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah Subhanahu wa ta'ala, karya ini dipersembahkan kepada:

Kedua Orang tuaku

Bapak Dedi Sutansah Ginting & Ibu Ruminah

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

Keluarga Besar & Teman-teman

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

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Analisis *Burn Up Modified Candle* pada *Gas Cooled Fast Reactor (GCFR)* dengan Bahan Bakar Uranium Oksida”** yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang analisis *burn up modified* CANDLE pada reaktor GCFR menggunakan bahan bakar uranium oksida. Pada skripsi ini dilakukan sebuah penelitian untuk mengetahui perubahan nilai densitas atom, rasio konversi, kekritisan, dan distribusi nilai rapat daya yang memenuhi standar keselamatan.

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

Bandar Lampung, 06 Februari 2023

Ria Charoline Beru Ginting

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis *Burn Up Modified Candle* pada *Gas Cooled Fast Reactor (GCFR)* dengan Bahan Bakar Uranium Oksida**”. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang turut membantu. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai pembimbing utama yang tulus mengajari dan membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
2. Bapak Agus Riyanto, S.Si., M.Sc. sebagai pembimbing kedua yang senantiasa membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
3. Bapak Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si. sebagai dosen penguji yang telah memberikan masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasihat dari awal perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

6. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M. T. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Kedua orangtuaku, Bapak Dedi Sutansah Ginting dan Ibu Ruminah, serta adikku, Kesya Amalia Beru Ginting dan Raffi Leonardo Ginting yang telah mendo'akan serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
8. Keluarga Mamih (Anggi Purnomo, Intan Pubiyanti, Novia Rahmadiana Putri, Nur Isnaini Munafirdausi, Putu Bagus Raditya, Riftaul Kurniawati dan Yugo Chambioso) untuk semua dukungan, semangat, motivasi, hiburan dan tempat berkeluh kesah selama pengerjaan skripsi ini.
9. Atu Tamiimah Hari, Ahmad Saiful Munir, Riftaul Kurniawati, Risdha Ayu Shinta Dewi dan Tasya Praditha Ningtyas selaku rekan penelitian yang telah membantu dan juga tempat berdiskusi selama pengerjaan skripsi ini.
10. Seluruh mahasiswa/i jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung angkatan 2018, Keluarga Besar Himafi dan teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu.

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

Bandar Lampung, 06 Februari 2023

Ria Charoline Beru Ginting

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xix
 I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4

1.5	Batasan Masalah	4
-----	-----------------------	---

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1	PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir).....	6
2.2	Reaktor Nuklir	7
2.3	GCFR (<i>Gas Cooled Fast Reactor</i>)	9
2.4	Bahan Bakar	12
2.5	Reaksi Fisi	14
2.6	<i>Burn up</i>	16
2.7	<i>Burn up Modified CANDLE</i>	17
2.8	SRAC.....	19
2.9	Faktor Multipikasi	20
2.10	Densitas Atom	21

III. METODE PENELITIAN

3.1	Waktu dan Lokasi Penelitian.....	24
3.2	Alat dan Bahan	24
3.3	Spesifikasi Desain Teras Reaktor	24
3.4	Prosedur Perhitungan Parameter Neutronik Menggunakan SRAC	29

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Penentuan <i>Geometri Cell</i> , Fraksi Volume, dan Ukuran Pin Bahan Bakar ..	31
4.2	Penentuan Densitas Atom.....	36
4.3	Perhitungan PIJ	38
4.4	Perhitungan <i>Burn up</i> Bahan Bakar	38
4.5	<i>Input Data</i> pada CITATION.....	42
4.6	Perhitungan Teras Reaktor dengan Modul CITATION	45

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Saran	74

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Reaktor cepat berpendingin gas (GCFR).....	12
Gambar 2.2. Skema reaksi fisi.....	15
Gambar 2.3. Skema reaksi fisi berantai.....	15
Gambar 2.4. Skema pembakaran CANDLE.....	18
Gambar 2.5. Grafik kritikalitas reaktor ditinjau dari faktor multiplikasi.	21
Gambar 2.6. Prinsip keseimbangan nuklida A.	23
Gambar 3.1. Geometri pij dengan model perangkat annular IGT-12.....	26
Gambar 3.2. Geometri dan ukuran teras.....	27
Gambar 3.3. a. Pembagian <i>region</i> , b. Pemindahan bahan bakar teras reaktor	28
Gambar 3.4. Diagram alir.....	30
Gambar 4.1. Model geometri assembly heksagonal.....	33
Gambar 4.2. Radius (r) bagian 3 pin <i>fuel</i> berukuran kecil.	35
Gambar 4.3. Radius (r) bagian 3 pin <i>fuel</i> berukuran besar.....	36
Gambar 4.4. Hubungan k_{eff} dengan waktu operasi <i>burn up</i>	39
Gambar 4.5. Grafik perubahan densitas atom pada U^{235}	40
Gambar 4.6. Grafik perubahan densitas atom pada U^{238}	41
Gambar 4.7. Grafik perubahan densitas atom pada Pu^{239}	41
Gambar 4.8. Hubungan rasio konversi dengan waktu operasi 70 tahun.	42
Gambar 4.9. Geometri teras reaktor.	45

Gambar 4.10. Syarat batas dari $\frac{1}{4}$ bagian teras reaktor.	46
Gambar 4.11. (a) Pembagian <i>region</i> arah radial (3 <i>region</i>), (b) Pembagian <i>region</i> arah aksial (9 <i>region</i>).....	47
Gambar 4.12. Pembagian <i>region</i> dengan bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor.	49
Gambar 4.13. Grafik rapat daya relatif arah radial radius 380 cm dari kanan teras reaktor.....	50
Gambar 4.14. Grafik rapat daya relatif arah aksial radius 765 cm dari atas teras reaktor.....	51
Gambar 4.15. Pembagian <i>region</i> dengan bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor.	53
Gambar 4.16. Grafik rapat daya relatif arah radial radius 380 cm dari kanan teras reaktor.....	53
Gambar 4.17. Grafik rapat daya relatif arah aksial radius 765 cm dari atas teras reaktor.....	54
Gambar 4.18. Pembagian <i>region</i> dengan bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor.	56
Gambar 4.19. Grafik rapat daya relatif arah radial radius 380 cm dari kanan teras reaktor.....	57
Gambar 4.20. Grafik rapat daya relatif arah aksial radius 765 cm dari atas teras reaktor.....	57
Gambar 4.21. Pembagian <i>region</i> dengan bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor.	59
Gambar 4.22. Grafik rapat daya relatif arah radial radius 380 cm dari kanan teras reaktor.....	60
Gambar 4.23. Grafik rapat daya relatif arah aksial radius 765 cm dari atas teras reaktor.....	61
Gambar 4.24. Pembagian <i>region</i> dengan bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor.	63

Gambar 4.25. Grafik rapat daya relatif arah radial radius 380 cm dari kanan teras reaktor.....	64
Gambar 4.26. Grafik rapat daya relatif arah aksial radius 765 cm dari atas teras reaktor.....	64
Gambar 4.27. Pembagian <i>region</i> dengan bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor.....	66
Gambar 4.28. Grafik rapat daya relatif arah radial radius 380 cm dari kanan teras reaktor.....	67
Gambar 4.29. Grafik rapat daya relatif arah aksial radius 765 cm dari atas teras reaktor.....	68
Gambar 4.30. Pembagian <i>region</i> dengan bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor.....	70
Gambar 4.31. Grafik rapat daya relatif arah radial radius 380 cm dari kanan teras reaktor.....	71
Gambar 4.32. Grafik rapat daya relatif arah aksial radius 765 cm dari atas teras reaktor.....	71

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1. Spesifikasi umum desain reaktor.....	25
Tabel 3.2. Komposisi uranium alam di tiap <i>region</i> teras reaktor.....	28
Tabel 4.1. Karakteristik bahan bakar.....	32
Tabel 4.2. Fraksi volume bahan bakar.....	34
Tabel 4.3. Hasil perhitungan densitas atom pada bahan bakar.....	37
Tabel 4.4. Keluaran <i>burn up</i> pada file MACRO.	43
Tabel 4.5. Kode Material bahan bakar pada <i>region</i> setiap <i>case</i>	44
Tabel 4.6. Hasil perhitungan teras reaktor pada modul CITATION <i>case 1</i>	52
Tabel 4.7. Hasil perhitungan teras reaktor pada modul CITATION <i>case 2</i>	55
Tabel 4.8. Hasil perhitungan teras reaktor pada modul CITATION <i>case 3</i>	58
Tabel 4.9. Hasil perhitungan teras reaktor pada modul CITATION <i>case 4</i>	62
Tabel 4.10. Hasil perhitungan teras reaktor pada modul CITATION <i>case 5</i>	65
Tabel 4.11. Hasil perhitungan teras reaktor pada modul CITATION <i>case 6</i>	69
Tabel 4.12. Hasil perhitungan teras reaktor pada modul CITATION <i>case 7</i>	72

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi suatu kebutuhan penting masyarakat dalam kehidupan sehari-hari seperti untuk lampu penerangan, memanaskan, mendinginkan ataupun untuk menggerakkan kembali suatu peralatan mekanik untuk menghasilkan bentuk energi yang lain. Energi yang berasal dari muatan listrik menimbulkan medan listrik statis atau Bergeraknya elektron pada konduktor (pengantar listrik) atau ion (positif atau negatif) pada zat cair atau gas (Prastuti, 2017). Pertumbuhan penduduk di Indonesia yang semakin meningkat, sehingga diperlukan energi alternatif untuk menekan tingginya kebutuhan energi di Indonesia menyebabkan kebutuhan sumber energi juga mengalami peningkatan. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menjadi pilihan sumber daya energi alternatif. PLTN salah satu pembangkit daya thermal yang menggunakan satu atau beberapa reaktor nuklir sebagai sumber panasnya.

Tempat berlangsungnya fisi nuklir ada di reaktor nuklir yang merupakan sebuah proses terjadinya pembelahan inti atom berat akibat ditumbukkan oleh neutron, pembelahan ini menghasilkan energi, inti atom yang lebih ringan, neutron tambahan dan foton dalam bentuk sinar gamma (Tadeus et al., 2010). Reaksi yang terjadi di dalam reaktor merupakan suatu reaksi fisi berantai dimana reaksi tersebut dihasilkan dari bahan bakar.

Bahan bakar nuklir terbagi atas dua yaitu bahan bakar fisil dan bahan bakar fertil. Bahan bakar fisil adalah atom/unsur yang mudah membelah sehingga mudah menangkap neutron, contohnya U^{235} dan Pu^{239} . Sedangkan bahan fertil adalah atom/unsur yang tidak dapat membelah tetapi bisa menjadi bahan fisil dengan reaksi penangkapan neutron, contohnya U^{238} , Pu^{240} , dan sebagainya (Novalianda, 2019).

Bahan bakar U^{238} dan Pu^{239} sebagai bahan bakar reaktor *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) dengan moderator pendinginnya menggunakan helium. *Temperature outlet* yang tinggi dari pendingin helium memungkinkan untuk menghasilkan listrik hidrogen atau proses panas lain dengan efisiensi tinggi (Novalianda & Ramadhan 2020). GCFR memiliki kelebihan dalam hal ketahanan karena memiliki siklus bahan bakar tertutup, *inherent safety* dan dapat memproduksi hidrogen. Keunggulan dari reaktor ini yaitu bahan bakar berupa uranium alam tanpa pengayaan sehingga ramah lingkungan, lebih ekonomis dan mendukung *non* proliferasi nuklir (Monado et al., 2014).

Salah satu strategi yang bisa digunakan agar reaktor dapat beroperasi dalam jangka panjang dan lebih ekonomis dalam penggunaan bahan bakar adalah strategi *burn up modified CANDLE*. Strategi ini merupakan pengembangan dari strategi *burn up CANDLE* yang dilakukan oleh Prof. Zaki Su'ud, daerah pembakaran teras reaktor dibagi dalam beberapa *region-region* diskrit. Dengan menggunakan reaktor GCFR, penelitian ini akan dilakukan perhitungan *burn up modified CANDLE*. Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Feriska, didapatkan hasil bahwa *burn up modified* dengan strategi *shuffling* arah radial dengan periode *burn up*

selama 100 tahun yang memungkinkan reaktor beroperasi menggunakan uranium alam tanpa pengayaan. Setelah 10 tahun pembakaran, hasil *burn up* pada *region 1* di *shuffling* ke *region 2* begitu seterusnya sampai hasil *burn up region 9* di *shuffling* ke *region 10* dan hasil *burn up region 10* dikeluarkan dari teras reaktor sehingga *region 1* dapat diisi dengan bahan bakar baru (*fresh fuel*). Dari penelitian tersebut terbukti dengan didapatkannya nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) lebih dari 1. Hal ini menunjukkan bahwa reaktor berada dalam keadaan kritis dan dapat dioperasikan (Irka & Su'ud, 2015).

Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Feriska dan beberapa penelitian lain maka dilakukan penelitian ini. Penelitian yang akan dilakukan menggunakan bahan bakar Uranium Oksida dengan strategi *shuffling* arah radial dengan periode *burn up* selama 70 tahun. Tujuannya, yaitu untuk penerapan hasil *modified CANDLE* pada reaktor GCFR menggunakan bahan bakar uranium oksida dan periode *burn up* selama 70 tahun dalam penerapan dalam reaktor nuklir lebih efektif. Analisis yang akan dilakukan dengan menggunakan CITATION pada program *Standard thermal Reaktor Analysis Code* (SRAC) yang dikembangkan di *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA), oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) Jepang (Okumura, 2007).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana penerapan hasil *modified CANDLE* pada reaktor GCFR terhadap nilai k_{inf} dan k_{eff} ?

2. Bagaimana densitas atom U^{235} , U^{238} dan Pu^{239} pada periode *burn up* dalam reaktor GCFR?
3. Bagaimana rasio konversi kecepatan produksi neutronik terhadap kecepatan deplesi uranium yang dihasilkan oleh GCFR selama proses *burn up*?

1.3 Tujuan

Tujuan pada penelitian ini meliputi:

1. Mengetahui nilai k_{inf} dan k_{eff} yang dihasilkan *modified* CANDLE dengan program SRAC;
2. Mengetahui densitas atom U^{235} , U^{238} dan Pu^{239} pada periode *burn up* dalam reaktor GCFR; dan
3. Mengetahui rasio konversi untuk perbandingan bahan bakar fertil (U^{238}) menjadi bahan fisil (Pu^{239}) yang dihasilkan oleh GCFR selama proses *burn up*;

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini mendapatkan hasil analisis *burn up* pada reaktor GCFR menggunakan *modified* CANDLE pada nilai k_{eff} , k_{inf} dan densitas atomnya.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah GCFR (*Gas Cooled Fast Reactor*);
2. Penelitian ini dilakukan menggunakan perhitungan *burn up* pada *modified* CANDLE program SRAC yang dikeluarkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*);

3. Bahan bakar yang digunakan Uranium Plutonium Oksida;
4. Bahan pendingin yang digunakan gas helium; dan
5. Model teras menggunakan 3-D *Cylinder*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir)

PLTN mulai dikembangkan secara komersial sejak tahun 1954. PLTN digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik yang relatif murah, aman, dan tidak mencemari lingkungan. PLTN mulai dikembangkan oleh beberapa negara seperti Uni Soviet, Amerika Serikat, dan Inggris. Uni Soviet mengoperasikan satu unit PLTN air ringan bertekanan tinggi yang setahun kemudian mencapai daya 5 MWe. Amerika Serikat juga mengoperasikan jenis reaktor yang sama dengan daya 60 MWe. Tahun 1956, Inggris mengembangkan jenis reaktor berpendingin gas dengan daya 100 MWe. PLTN menggunakan satu atau beberapa reaktor nuklir sebagai sumber panasnya yang dimanfaatkan untuk pembangkit daya termal.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah stasiun pembangkit listrik thermal, panas yang dihasilkan diperoleh dari satu atau lebih reaktor nuklir pembangkit listrik. PLTN termasuk dalam pembangkit daya *base load*, yang dapat bekerja dengan baik ketika daya keluarannya konstan (meskipun boiling water reactor dapat turun hingga setengah dayanya ketika malam hari). Daya yang dibangkitkan per unit pembangkit berkisar dari 40 MW hingga 1.000 MW. Di seluruh dunia saat ini ada 441 reaktor nuklir. Bahkan, sampai tahun 2020 PLTN akan bertambah 126 buah. Memperhatikan kondisi perkembangan energi

nuklir didunia, sudah saatnya pemerintah Indonesia kembali memprogramkan pembangunan reaktor nuklir dalam memenuhi kebutuhan energi nasional sebagaimana sudah pernah dirintis pada tahun 1976 lalu (Setia Budi, 2010).

Seiring dengan pertumbuhan penduduk di Indonesia yang semakin meningkat, sumber energi yang dibutuhkan juga semakin besar. Salah satu sumber energi yang sangat dibutuhkan yaitu energi listrik. PLTN menjadi salah satu sumber energi listrik alternatif yang memiliki beberapa keunggulan diantaranya biaya operasi murah, aman, dan tidak mencemari lingkungan. PLTN merupakan pembangkit listrik termal (panas), panas tersebut dihasilkan dari proses reaksi fisi pada reaktor nuklir. (Monado et al., 2014).

2.2 Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi inti berantai terkendali, baik pembelahan inti (fisi) atau penggabungan inti (fusi). Jenis dan fungsi reaktor nuklir bergantung pada tujuan pemanfaatan hasil reaksi, seperti untuk PLTN, produksi radionuklida, radiografi neutron, analisis aktivasi neutron dan berbagai eksperimen dengan hamburan neutron. Berdasarkan fungsinya reaktor nuklir dapat dibedakan menjadi reaktor daya, dan reaktor riset.

Reaksi nuklir merupakan sebuah proses dua partikel nuklir saling berinteraksi untuk memproduksi hasil nuklida yang berbeda dari produk awalnya. Reaksi nuklir terjadi apabila ada perubahan pada susunan inti atom, perubahan massa atom yang kemudian diubah menjadi energi. Berdasarkan partikel datang, reaksi nuklir dibagi dalam dua golongan yaitu reaksi partikel bermuatan dan reaksi neutron/partikel tak bermuatan (Stacey, 2007).

Dalam reaktor nuklir, neutron digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi inti berat. Reaksi fisi akan menghasilkan inti ringan (*fission product*), beberapa neutron dan energi sebesar 200 MeV. Prinsip kerja reaktor nuklir mirip dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada sumber energi dan jenis bahan bakar. Sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran secara kimia bahan bakar fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir pada material-material fisil (Duderstadt & Hamilton, 1976).

Reaktor nuklir terjadi berdasarkan proses reaksi pembelahan inti (fisi) secara berantai dan tak terkendali. Hal ini berhubungan dengan perlunya analisis interaksi neutron dengan nuklida dan proses yang terjadi untuk mempertahankan reaksi berantai dengan cara yang stabil dan aman. Reaksi berantai tersebut berasal dari peristiwa tumbukan antara neutron dengan nuklida di dalam reaksi nuklir menyebabkan terjadinya berbagai reaksi. *Macroscopic cross section* reaksi atau penampang lintang makroskopik diperlukan untuk mengetahui kuantitas dari masing-masing reaksi. Penampang lintang makroskopik menjadi sangat penting untuk menentukan distribusi neutron dalam teras reaktor. Perhitungan neutron pada teras berbahan bakar besarnya distribusi neutron bergantung pada penampang lintang removal dan hamburan (Islami, Tismawati, & Subkhi, 2019).

Reaksi tangkapan neutron pada energi tinggi (neutron cepat) untuk mengubah bahan fertil U^{238} menjadi bahan fisil Pu^{239} dijelaskan pada Persamaan 2.1.



Reaksi fisi berantai akan bergantung pada meningkatnya konsentrasi Pu^{239} yang berasal dari U^{238} . Pengendalian semua jenis reaktor pada umumnya dilakukan dengan cara mengendalikan populasi neutron dari hasil reaksi fisi. Ketika reaktor mulai beroperasi, bahan bakar yang mengandung bahan fisil U^{235} , Pu^{239} , dan bahan fertil U^{238} akan dibakar bersama-sama, sehingga pada saat yang bersamaan pembakaran bahan fertil akan menghasilkan bahan bakar baru. Jika jumlah bahan fisil yang dihasilkan melebihi jumlah yang telah dibakar, maka terjadilah pembiakan. Perbandingan antara jumlah bahan fisi terhadap jumlah yang telah terbakar disebut rasio pembiakan (Walter, A. E., & Reynolds, 1981).

2.3 GCFR (*Gas Cooled Fast Reactor*)

GCFR (*Gas Cooled Fast Reactor*) merupakan salah satu konsep dari enam jenis reaktor nuklir generasi IV yang akan dioperasikan pada tahun 2025. Keenam konsep tersebut saat ini masih dalam proses penelitian. Klasifikasinya dibedakan atas spesifikasi baik berupa penggunaan material maupun sistem yang berlangsung di dalam reaktor. Setiap jenis reaktor memiliki keunggulan masing-masing. Perbedaan GCFR dengan reaktor lainnya adalah reaktor ini memanfaatkan spektrum cepat dari neutron dan menggunakan jenis pendingin (*coolant*) berupa Helium (He), Karbondioksida (CO_2), atau N_2O_4 . Keunggulan dari pemanfaatan penggunaan gas sebagai pendingin, terutama Helium adalah Helium tidak dapat mendidih serta dapat beroperasi pada temperatur yang tinggi sebagai pendukung produktivitas gas hidrogen sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan merupakan reaktor terbaik dari segi ketahanan karena mempunyai siklus bahan bakar tertutup.

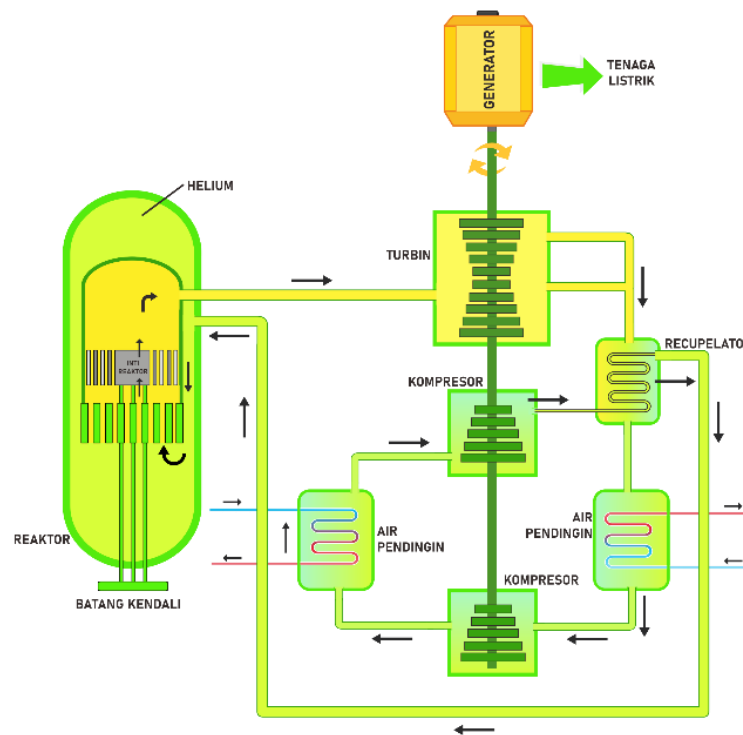
Reaktor cepat generasi IV merupakan reaktor yang sedang dikembangkan saat ini, salah satunya adalah GCFR (*Gas Cooled Fast Reactor*).

GCFR salah satu reaktor yang baik dalam hal ketahanan karena mempunyai siklus bahan bakar tertutup dan sangat bagus dalam manajemen aktinida. Selain itu, GCFR yang beroperasi pada suhu 850 °C juga mendukung dalam produksi hidrogen. Pada penelitian sebelumnya menggunakan gas helium sebagai pendingin pada GCFR. Helium sudah dibuktikan mempunyai beberapa keunggulan seperti memiliki kemampuan menyerap neutron dan daya moderasi yang rendah, beroperasi pada satu fasa yaitu gas, tidak menjadi radioaktif dan lain-lain. Namun helium akan bekerja maksimal pada saat kemurniannya (*purity*) terjaga. Pada saat helium sudah tercampur dengan unsur pengotor yang masuk ke sistem pendingin, maka pada suhu yang sangat tinggi akan menjadi gas kontaminan yang bisa menurunkan efisiensi transfer panas dari sistem pendingin. Selain helium, karbon dioksida dan nitrogen dapat juga digunakan sebagai pendingin pada reaktor cepat berpendingin gas (Supriatna, 2009).

Berbeda dengan reaktor termal, GCFR tidak menggunakan grafit sebagai moderator. Massa termal dan konduktivitas termal lebih rendah dibandingkan dengan reaktor termal sehingga temperatur teras dapat naik mencapai 1.600 °C/menit. Untuk mengeliminasi temperatur ekstrim maka diperlukan keramik carbide dan nitrit seperti SiC, ZrC, TiC, TiN dan ZrN sebagai material campuran penyusun bahan bakar. Sistem GCFR mengutamakan spektrum neutron cepat dan perputaran bahan bakar tertutup GCFR menggunakan gas SiC sebagai pendingin untuk mengefisienkan konversi uranium fertil dan manajemen aktinida. GCFR

beroperasi dalam putaran bahan bakar yang tertutup dengan interval pengisian bahan bakar yang lama (10 sampai 20 tahun). Keutamaannya adalah desain yang diperuntukkan bagi produksi listrik dalam jaringan kecil dan bagi negara berkembang yang tidak mau menyebarkan infrastuktur perputaran bahan bakar alaminya untuk mendukung sistem energi nuklirnya. Sistem baterai ini didesain untuk pembangkitan listrik yang terdistribusi dan produk lain, termasuk hidrogen dan air yang dapat diminum (Fielding et al., 2012).

Sistem GCFR mengutamakan spektrum neutron cepat dan perputaran bahan bakar tertutup GCFR menggunakan gas SiC sebagai pendingin untuk mengefisienkan konversi uranium fertil dan manajemen aktinida. GCFR beroperasi dalam putaran bahan bakar yang tertutup dengan interval pengisian bahan bakar yang lama (10 sampai 20 tahun). Keutamaannya adalah desain yang diperuntukkan bagi produksi listrik dalam jaringan kecil dan bagi negara berkembang yang tidak mau menyebarkan infrastuktur perputaran bahan bakar alaminya untuk mendukung sistem energi nuklirnya. Sistem baterai ini didesain untuk pembangkit listrik yang terdistribusi dan produk lain, termasuk hidrogen dan air yang dapat diminum (Riska, Fitriani, & Handayani Irka, 2016). Proses pembakaran terjadi di dalam teras reaktor, panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi di dalam teras reaktor ditransfer ke pembangkit uap, uap yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin yang dihubungkan dengan generator listrik dan akan menghasilkan listrik yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Irka & Su'ud, 2015).



Gambar 2.1. Reaktor cepat berpendingin gas (GCFR).

2.4 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan bahanyang akan menyebabkan terjadinya reaksi fisi berantai berlangsung sebagai sumber energi nuklir. Terdapat dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung dapat membelah apabila menangkap neutron seperti U^{235} , Pu^{239} , sedangkan bahan fertil merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah seperti U^{238} (Lewis, 2008). Bahan bakar merupakan sumber energi nuklir. Ada dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil.

Bahan fisil adalah unsur atau atom yang dapat langsung membelah apabila ditumbuk oleh neutron sedangkan bahan fertil adalah unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah apabila ditumbuk oleh neutron tetapi akan membentuk

bahan fisil. Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir adalah U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Th^{232} (Benedict, 1981).

Bahan bakar nuklir merupakan jenis material yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi nuklir. Hingga saat ini bahan bakar nuklir yang umum digunakan adalah bahan fisil yang dapat menghasilkan reaksi nuklir berantai di dalam reaktor nuklir. Selain menggunakan bahan fisil, reaktor juga dapat dioperasikan menggunakan bahan fertil. Bahan fertil di dalam teras reaktor akan bereaksi dengan cara menangkap neutron cepat dan menghasilkan bahan fisil baru di dalam teras reaktor. Reaktor yang bekerja berdasarkan prinsip penangkapan neutron cepat dan mengubah bahan fertil menjadi bahan fisil disebut reaktor cepat. Selain bahan fisil dan fertil, bahan bakar reaktor juga dapat berupa campuran dari beberapa aktinida. Contoh campuran bahan bakar pada reaktor cepat yang merupakan campuran uranium dan plutonium.

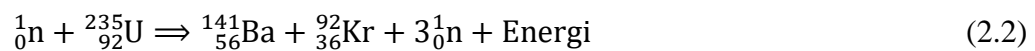
Bahan bakar *mixed oxide* atau biasa dikenal MOX merupakan bahan bakar yang berisi lebih dari satu oksida bahan fisil, biasanya terdiri dari plutonium yang dicampurkan dengan uranium alam, uranium proses ulang, atau terdepleksi. Bahan bakar MOX mempunyai temperatur leleh tinggi ($\sim 2.750^{\circ}\text{C}$) yang sebagian besar mengimbangi konduktivitas termalnya yang rendah. Bahan bakar MOX dapat dibuat dengan cara mencampurkan 80% uranium oksida (UO_2) dan 20% plutonium oksida (PuO_2). Sebelum pencampuran oksida diubah terlebih dahulu ke dalam bentuk pelet, yang mempunyai kekurangan karena membentuk banyak debu radioaktif. Bahan bakar oksida memiliki densitas daya yang rendah, konduktivitas

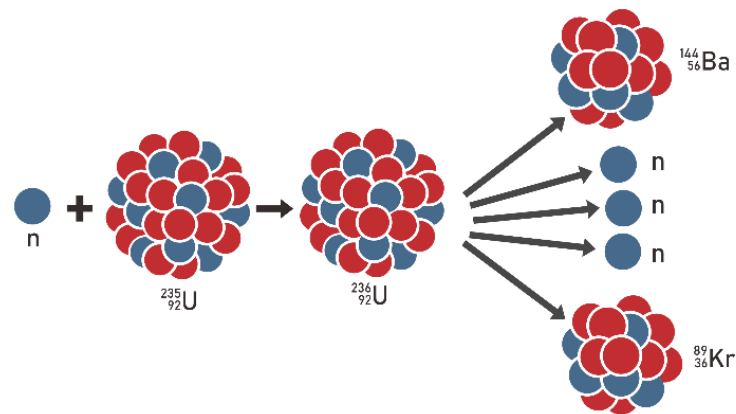
termalnya rendah, dan rasio pembiakannya agak rendah (Walter, A. E., & Reynolds, 1981).

2.5 Reaksi Fisi

Reaksi fisi nuklir adalah suatu proses pembelahan inti berat atau yang tidak stabil menjadi inti yang lebih ringan, memiliki ukuran yang hampir sama dengan membebaskan dua atau tiga neutron dan energi dalam jumlah yang besar. Inti yang lebih ringan disebut sebagai hasil fisi atau pecahan fisi dan banyak berupa inti yang tidak stabil. Untuk menjadi stabil inti-inti tersebut meluruh (*decay*) dengan mengeluarkan sinar-sinar maupun partikel. Neutron-neutron baru yang dihasilkan dari reaksi inti dapat melanjutkan reaksi fisi hingga terjadi reaksi berantai. Gambaran umum tentang reaksi fisi terlihat pada Gambar 2.2.

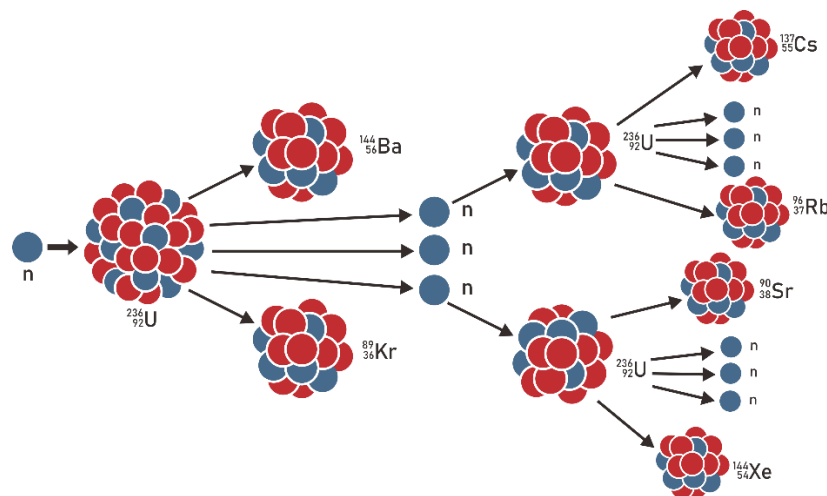
Dari Gambar 2.2 dijelaskan bahwa neutron yang ditembakkan menabrak U^{235} sehingga isotop berubah menjadi U^{236} . Bahan bakar U^{236} terbelah lagi menjadi inti Ba^{141} dan Kr^{92} . Neutron yang dihasilkan dalam reaksi fisi itu selanjutnya akan membelah inti-inti uranium lainnya sehingga memicu terjadinya reaksi berantai (*Chain Reaction*). Proses reaksi fisi dalam reaktor dapat ditulis pada Persamaan 2.2.





Gambar 2.2. Skema reaksi fisi.

Dari Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa selain menghasilkan dua atom yang lebih ringan reaksi fisi juga melepaskan tiga neutron bebas yaitu energi panas serta radiasi alfa, beta, dan gamma. Tiga neutron bebas yang dihasilkan dari reaksi akan menabrak atom-atom uranium yang disekitarnya, sehingga terjadilah reaksi fisi berantai yang biasa disebut sebagai *nuclear chain reaction* yang bersifat radioaktif. (Duderstadt & Homilton, 1976).



Gambar 2.3. Skema reaksi fisi berantai.

2.6 *Burn up*

Pada perancangan reaktor nuklir, analisis *burn up* merupakan perhitungan standar yang menitik beratkan pada manajemen bahan bakar yaitu ukuran konsumsi bahan bakar, proses pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar yang dinyatakan dalam Mega Watt-hari (MWd) dari tiap ton bahan bakar. Perhitungan dasar dalam manajemen bahan bakar adalah perhitungan penyusutan dan produksi isotop sebagai fungsi waktu. Material bahan bakar di reaktor nuklir tentu mengalami reaksi selama reaktor beroperasi. Selama waktu tertentu, bahan bakar tentu akan mengalami pengurangan jumlah akibat terjadinya fisi serta mengalami transmudasi inti. Perubahan komposisi ini harus dipantau terus karena dengan berubahnya komposisi bahan bakar, berubah pula nilai-nilai parameter neutronik yang terdapat dalam reaktor.

Oleh karena itu, perlu analisis mengenai perubahan komposisi tersebut. Pada proses depleksi bahan bakar, terjadi dua jenis reaksi yakni transmudasi dan fisi. Reaksi transmudasi membuat inti yang sebelumnya tidak stabil menjadi inti lebih stabil dengan proses penangkapan neutron dan atau peluruhan radioaktif. Reaksi yang terjadi pada proses depleksi bahan bakar yang menyatakan densitas (n) (Walter, A. E., & Reynolds, 1981).

Analisa *burn up* merupakan suatu perhitungan standar yang memusat pada manajemen bahan bakar diantaranya, yaitu ukuran konsumsi bahan bakar, proses pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan per-satuan berat, bahan bakar yang dinyatakan dalam Megawatt-day (MWd) dari tiap ton bahan bakar (Lestari, A. M., & Fitriyani, 2014).

2.7 *Burn up Modified CANDLE*

Constant Axial Shape of Neutron Flux, Neutron Densities and Power Profile During Life of Energy Production atau disingkat CANDLE merupakan suatu sistem *burn up* bahan bakar seperti terbakarnya lilin. Material fertil di masukkan ke dalam *fresh fuel region* dan menyerap neutron yang bocor dari *burning region* dan menjadi material fisil. Densitas material fisil akan terus meningkat di daerah perbatasan *fresh fuel region* dan *burning region*, dan menjadi konstan ketika laju produksi sama dengan laju pengurangannya. Untuk memudahkan pemodelan matematis, teras diasumsikan memiliki tinggi tak hingga (Monado et al., 2014).

Namun demikian, dalam kenyataannya, panjang *spent fuel region* dan *fresh fuel region* lebih pendek daripada *burning region*. Selain itu, meskipun dimodelkan memiliki alur pembakaran seperti lilin, *burning region* memiliki kemungkinan untuk bergerak dalam arah yang berlawanan, yaitu dari bawah ke atas. Strategi pengisian ulang bahan bakar dalam CANDLE dapat disimak pada Gambar 2.4. Bahan bakar diganti dengan mengeluarkan *spent fuel* dan memasukkan *fresh fuel* dalam arah *burn up* ketika *burning region* sampai pada akhir teras (Okumura, 2007).

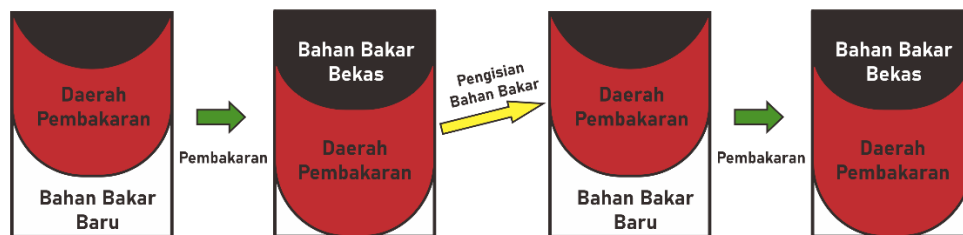
Terdapat beberapa keunggulan strategi *burn up* CANDLE antara lain:

1. Strategi CANDLE tidak memerlukan mekanisme kontrol *burn up*;
2. Karakteristik teras tidak berubah seiring berjalannya *burn up*;
3. Memungkinkan optimasi tingkat tinggi dari distribusi daya radial;
4. Masa hidup reaktor dapat diperpanjang dengan menambah tinggi teras;
5. Faktor multiplikasi tak hingga atau k_{inf} bahan segar bernilai kurang dari satu; dan

6. Pemanfaatan bahan bakar lebih efisien.

Namun demikian, sumber yang sama mengungkapkan bahwa terdapat pula kekurangan strategi *burn up* CANDLE yaitu:

1. Teras reaktor cenderung tinggi, sehingga menyebabkan kehilangan tekanan pendingin yang lebih besar;
2. Terbatasnya kemampuan menyesuaikan distribusi daya aksial;
3. Persiapan awal teras sulit; dan
4. Nilai *burn up* tinggi, yaitu sekitar 40% (400MWd/t-HM) (Sekimoto, 2005).



Gambar 2.4. Skema pembakaran CANDLE.

MCANDLE atau *modified-CANDLE* merupakan bentuk perkembangan dari strategi *burn up* CANDLE yang memperkenalkan *region-region* diskrit (Su'ud, 2007). Sama seperti pada konsep CANDLE, untuk konsep MCANDLE, bahan bakar segar berupa uranium alam tanpa pengayaan. Perbedaan yang muncul adalah pada konsep MCANDLE, teras dibagi ke dalam beberapa *region* diskrit. Bahan bakar segar dimasukkan ke dalam *region* pertama, kemudian hasil pembakarannya dipindahkan ke dalam *region* kedua. Sementara itu, bahan bakar segar kembali dimasukkan ke dalam *region* pertama. Pada masa pengisian selanjutnya, hasil pembakaran dari *region* kedua dipindahkan ke *region* ketiga, dan seterusnya hingga mencapai *region* terakhir. Hasil pembakaran dari *region* terakhir dikeluarkan dari

teras sebagai sisa pembakaran. Pembagian *region* dapat dilakukan pada arah aksial, radial, ataupun aksial radial, dengan berbagai skema pembagian *region* yang berbeda (Sekimoto et al., 2010).

Berdasarkan hasil penelitian Feriska (2015) dengan membagi teras menjadi 10 *region* yang memiliki volume sama secara radial seperti terlihat pada Gambar 2.4. Pada penelitian tersebut reaktor yang digunakan GCFR dengan bahan bakar uranium alam. Dari kondisi reaktor yang telah dirancang didapatkan nilai k_{eff} yang di hasilkan berkisar di atas 1, yang menandakan reaktor yang dirancang berada dalam keadaan kritis. Untuk nilai k_{inf} diawal periode *burn up* (10 tahun pertama) memiliki nilai kurang dari 1, yang disebabkan pada awal periode *burn up*, densitas bahan bakar fisil (U^{235} dan Pu^{239}) masih kecil. Level *burn up* sebanding dengan periode *burn up*, dengan naiknya periode *burn up* jumlah bahan bakar yang diburn semakin besar. Untuk rasio konversi bahan fertil U^{238} menjadi Pu^{239} semakin lama periode *burn up* nilainya semakin kecil. Sedangkan analisis *burn up* bahan bakar menunjukkan densitas U^{238} dan U^{235} semakin berkurang seiring dengan bertambahnya periode *burn up* (Irka & Su'ud, 2015).

2.8 SRAC

SRAC merupakan sebuah sistem kode yang terpadu untuk analisis perhitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor termal. Program SRAC juga dapat melakukan perhitungan sel bahan bakar dan *burn up* pada teras reaktor. Dikembangkan pada tahun 1978 sebagai standar untuk kode analisis reaktor termal di Badan Energi Atom Jepang (*Japan Atomic Energy Agency/JAEA*). Sistem pada SRAC terdiri dari penyimpanan data neutron (JENDL-3.1, JENDL-3.2, ENDF/B-IV, JEF-2.2) dan

lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi. Kode dasar pada sistem SRAC yaitu sebagai berikut:

- a. PIJ yaitu kode untuk probabilitas tumbukan yang telah dikembangkan oleh JAERI meliputi 16 kisi geometri;
- b. ANISN yaitu kode transpor satu dimensi (SN) yang terdiri dari tiga jenis geometri slab (X), silinder (Y), dan bola (RS);
- c. TWOTRAN yaitu kode transpor dua dimensi (SN) yang terdiri dari tiga jenis geometri slab (X-Y), silinder (R-Z), dan lingkaran (R- θ);
- d. TUD yaitu kode untuk persamaan difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI, terdiri dari geometri slab (X), silinder (Y), dan bola (RS); dan
- e. CITATION yaitu kode untuk persamaan difusi multi-dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segi enam (heksagonal) (Okumura et al., 2007).

2.9 Faktor Multipikasi

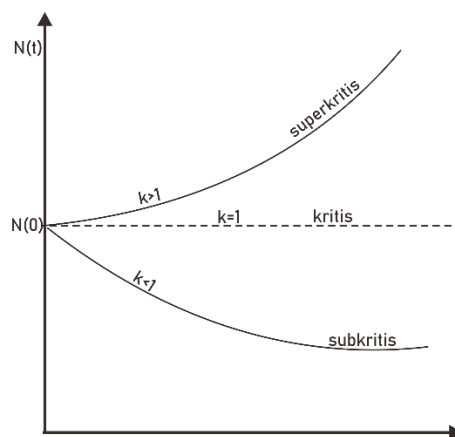
Sebuah reaktor dapat beroperasi dengan baik, dan aman, reaktor tersebut haruslah dapat beroperasi dengan stabil. Sebuah reaktor dikatakan stabil apabila terjadi keseimbangan antara jumlah reaksi fisi dengan jumlah neutron yang tertangkap dan neutron yang hilang karena kebocoran. Keseimbangan ini akan memastikan rantai reaksi fisi sebuah reaktor tetap stabil, tanpa mengalami pengurangan atau penambahan jumlah reaksi fisi. Parameter yang dapat menggambarkan kesetimbangan ini adalah faktor multiplikasi atau k .

$$k = \frac{N_{i+1}}{N_i} \quad (2.3)$$

dengan : N_{i+1} = jumlah neutron pada satu generasi dan N_i = jumlah neutron pada satu generasi. Berdasarkan nilai faktor multiplikasi ini, terdapat tiga jenis keadaan teras reaktor:

1. $k < 1$ adalah keadaan subkritis, dimana jumlah neutron yang dihasilkan lebih sedikit sehingga lama kelamaan reaktor bisa mati karena jumlah neutron tiap generasi semakin berkurang;
2. $k = 1$ adalah keadaan kritis, dimana jumlah neutron pada satu generasi sama dengan jumlah neutron generasi sebelumnya; dan
3. $k > 1$ adalah keadaan superkritis, dimana jumlah neutron yang dihasilkan terus bertambah dari generasi sebelumnya.

Grafik yang menggambarkan ketiga keadaan ini disajikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Grafik kritisitas reaktor ditinjau dari faktor multiplikasi.

2.10 Densitas Atom

Densitas atom berbagai jenis isotop dalam teras reaktor secara kontinyu berubah melalui berbagai proses nuklir seperti reaksi fisi, penangkapan neutron dan hamburan radioaktif. Reaksi fisi akan mengurangi konsentrasi isotop-isotop fisil

seperti U^{233} , U^{235} atau Pu^{239} . Disamping itu, dihasilkan juga beberapa jenis inti produksi fisi (*fission product*) yang kebanyakan merupakan inti radioaktif dan dari tangkapan neutron pada bahan lain kemudian meluruh menjadi isotop lain (aktinida). Perhitungan densitas atom untuk material m ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$N_m = \frac{F_m \rho_m N_A}{M_m} \quad (2.4)$$

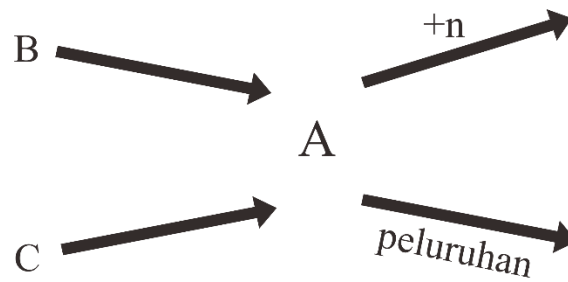
dengan: N_m = densitas atom (atom/cm³), F_m = fraksi volume, ρ_m = densitas (g/cm³), M_m = berat molekul (g/g-mol) dan, N_A = bilangan Avogadro ($6,023 \times 10^{23}$ atom/g-mol).

Perhitungan terhadap susutan bahan bakar melibatkan beberapa jenis proses nuklir.

Secara umum perhitungannya meliputi:

1. Penyelesaian persamaan difusi multigrup statik untuk mendapatkan fluks neutron
2. Penyelesaian persamaan susutan bahan bakar, yaitu pemecahan densitas inti sebagai fungsi dari waktu dan posisi (fluks neutron perlu diketahui).

Perhitungan dasar dalam manajemen bahan bakar adalah perhitungan penyusutan dan produksi isotop sebagai fungsi dari waktu. Persamaan kecepatan reaksi yang menggambarkan densitas jumlah inti dalam teras dapat diperoleh dengan menggunakan prinsip keseimbangan yang sederhana. Misal, $N_A(r, t)$ adalah densitas untuk nuklida jenis A, maka persamaan kecepatan secara umum dapat digambarkan dalam skema yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Prinsip keseimbangan nuklida A.

Secara matematis dapat dituliskan pada Persamaan 2.5.

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - [\sum_g \sigma_{a_g}^A \phi_g] N_A + \lambda_B N_B + [\sum_g \sigma_{a_g}^C \phi_g] N_C \quad (2.5)$$

Secara umum persamaan *burn up* untuk tiap material dapat dituliskan pada Persamaan 2.6

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_{a,i} \phi) N_i + \sum_m S_{m,i} N_m \quad (2.6)$$

dengan: N_i = densitas atom inti ke-i, λ_i = konstanta peluruhan, $\sigma_{a,i}$ = penampang lintang absorpsi mikroskopik, ϕ = fluks neutron, dan $S_{m,i}$ = kecepatan produksi inti ke-i dari inti ke-m (Duderstadt & Homilton, 1976).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Dasar Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada Juni 2022 - Oktober 2022.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu seperangkat Laptop ASUS dengan *Operating System* (OS) Linux Ubuntu 16.04 dan program *Standard Thermal Reactor Analysis Code* (SRAC).

3.3 Spesifikasi Desain Teras Reaktor

Desain reaktor yang digunakan adalah salah satu reaktor generasi ke-IV yaitu *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) berpendingin gas helium. Spesifikasi umum desain reaktor yang digunakan dalam penelitian ini pada Tabel 3.1

Tabel 3.1. Spesifikasi umum desain reaktor.

Parameter	Deskripsi
Daya	500 MWth
Tipe pin cell	<i>Hexagonal cell</i>
Geometri teras	<i>2-D Cylinder</i>
Jumlah <i>region</i> arah radial	<i>7 region</i>
Periode <i>refueling</i>	70 tahun
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	UO ₂ – PuO ₂
Struktur (<i>cladding</i>)	SS316
Pendingin (<i>coolant</i>)	Helium
Fraksi Bahan Bakar	65%
Fraksi struktur	25%
Diameter pin/pitch	1,4 cm
Tinggi teras aktif	310 cm
Diameter teras aktif	154 cm

3.3.1 Geometri *Cell* dan Ukuran Pin Bahan Bakar

Sel bahan bakar yang digunakan berbentuk pin yang terdiri dari *fuel*, *cladding* dan *coolant*. Adapun karakteristik dari *fuel*, *cladding* dan *coolant* diantaranya:

1. *Fuel* (bahan bakar)

Fraksi bahan bakar yang digunakan sebesar 65%. Setelah bereaksi dengan neutron cepat U²³⁸ akan menghasilkan Pu²³⁹ yang digunakan sebagai bahan bakar. Bahan bakar yang dipakai adalah uranium alam (UO₂ – PuO₂).

2. *Cladding* (struktur)

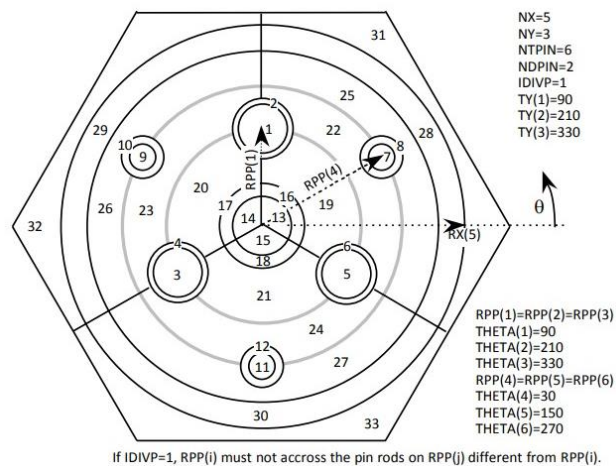
Fraksi *cladding* yang digunakan dalam teras reaktor sebesar 10% dengan jenis stainless steel 316 (SS316). Jenis SS316 dipilih karena karakteristiknya yang sangat

tahan pada *temperature* tinggi, ketahanan menghadapi “pembengkakan”, dan harga relatif murah.

3. Coolant (pendingin)

Fraksi coolant yang digunakan sebesar 25%. Helium adalah satu-satunya elemen yang tidak padat di bawah tekanan biasa dan tetap cair bahkan pada titik nol. Helium merupakan salah satu gas *inert* atau mulia, yang berarti bahwa kulit luarnya yang penuh dengan elektron.

Dalam penelitian ini, geometri teras inti berupa heksagonal dua dimensi dengan geometri sel bahan bakar berupa *hexagonal cell* yang didefinisikan dengan IGT = 12 pada SRAC. Berikut adalah model perangkat yang akan di gunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.

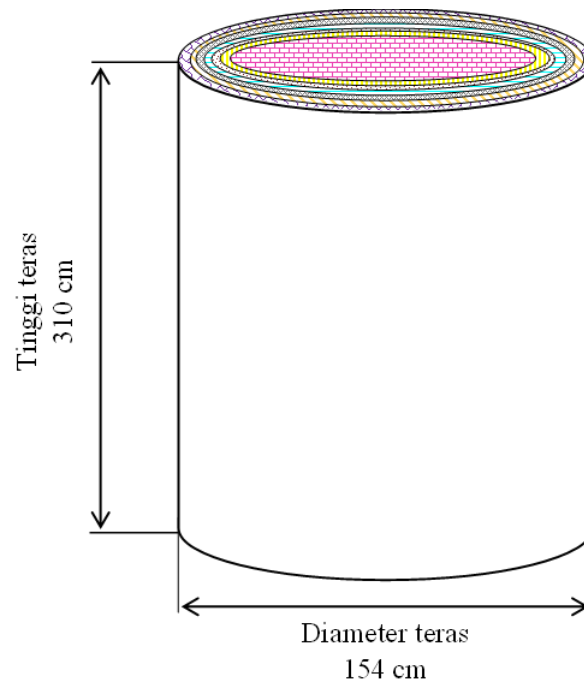


Gambar 3.1. Geometri pij dengan model perangkat annular IGT-12.

3.3.2 Geometri Teras Reaktor

Desain teras reaktor yang digunakan pada penelitian bertipe silinder 3D yang dapat dilihat pada Gambar 3.2. Ditinjau dari faktor kebocoran neutron (*neutron leakage*)

dan aliran pendingin, maka geometri silinder adalah geometri yang memberikan kinerja optimal.



Gambar 3.2. Geometri dan ukuran teras.

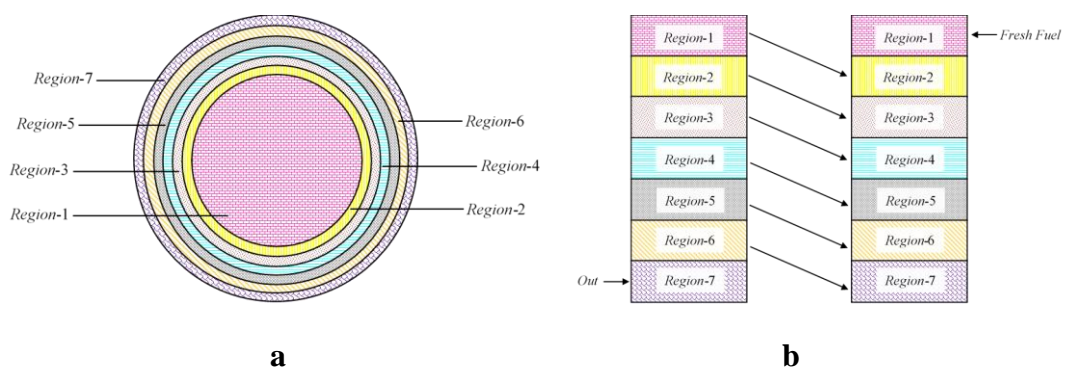
3.3.3 Strategi *burn up modified* CANDLE arah radial

Penelitian ini, menggunakan strategi *burn up modified* yang diterapkan agar reaktor dapat beroperasi dengan menggunakan bahan bakar uranium alam. Uranium alam terlebih dahulu dibakar dengan jangka waktu tertentu sehingga menghasilkan bahan bakar fisil yang dapat berfisi di dalam reaktor. Teras reaktor dibagi ke dalam 7 *region* arah radial dengan volume yang sama. Masing-masing *region* diisi dengan bahan bakar uranium alam ($\text{UO}_2\text{-PuO}_2$). Untuk komposisi pembagian *region* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Komposisi uranium alam di tiap *region* teras reaktor.

<i>Region</i>	Komposisi bahan bakar
<i>Region-1</i>	Bahan bakar <i>fresh</i> , yaitu uranium alam (UO_2 - PuO_2)
<i>Region-2</i>	Hasil pembakaran uranium alam selama 10 tahun
<i>Region-3</i>	Hasil pembakaran uranium alam selama 20 tahun
<i>Region-4</i>	Hasil pembakaran uranium alam selama 30 tahun
<i>Region-5</i>	Hasil pembakaran uranium alam selama 40 tahun
<i>Region-6</i>	Hasil pembakaran uranium alam selama 50 tahun
<i>Region-7</i>	Hasil pembakaran uranium alam selama 60 tahun

Setelah reaktor beroperasi selama 10 tahun, hasil *burnup* pada *region-1* dipindahkan ke *region-2*, hasil *burn up* *region-2* dipindahkan ke *region-3*, begitu seterusnya sampai hasil *burn up* *region-6* dipindahkan ke *region-7* dan hasil *burn up* *region-7* dikeluarkan dari teras reaktor. Oleh sebab itu, *region-1* dapat diisi kembali dengan bahan bakar yang baru dan proses ini dapat berlangsung selama 70 tahun. Proses pemindahan bahan bakar secara skematik dengan strategi *modified CANDLE* dalam arah radial dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. a. Pembagian *region*, b. Pemindahan bahan bakar teras reaktor arah radial.

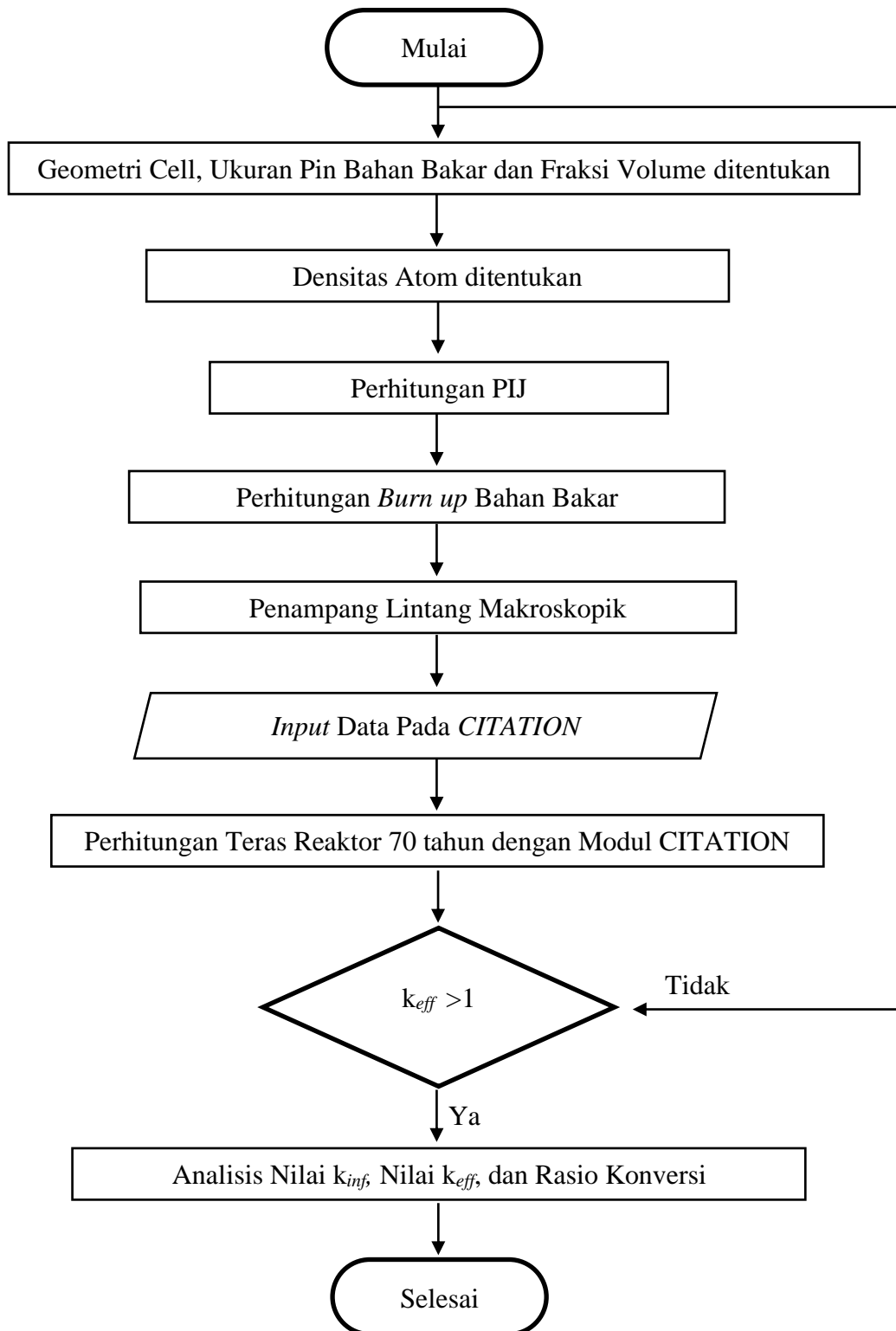
3.4 Prosedur Perhitungan Parameter Neutronik Menggunakan SRAC

Penelitian ini menggunakan program SRAC. Data yang digunakan adalah JENDL-

3.2. Langkah-langkah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Geometri *cell*, ukuran pin bahan bakar dan fraksi volume ditentukan terlebih dahulu;
2. Densitas atom ditentukan;
3. Perhitungan PIJ untuk mendapatkan penampang lintang makroskopik;
4. Perhitungan *burn up* bahan bakar;
5. Hasil dari *burn up* berupa penampang lintang makroskopik dimasukkan pada *CITATION*;
6. Perhitungan teras reaktor 70 tahun dengan modul *CITATION*;
7. Proses kembali di ulangi ke langkah 2 sampai didapatkan nilai $k_{eff} > 1$; dan
8. Analisis hasil *CITATION* dari nilai *output* k_{inf} , k_{eff} , densitas atom dan rasio konversi.

Diagram alir prosedur perhitungan parameter neutronik menggunakan SRAC dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram alir.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Perubahan nilai densitas atom U^{235} diawal periode *burn up* sebesar $1,61 \times 10^{21}$ atom/cm³ dan diakhir periode *burn up* sebesar $6,74 \times 10^{19}$ atom/cm³ dan densitas atom U^{238} diawal periode *burn up* sebesar $2,43 \times 10^{22}$ atom/cm³ dan diakhir periode *burn up* sebesar $1,81 \times 10^{22}$ atom/cm³. Nilai densitas atom Pu^{239} diawal periode *burn up* masih 0 dan diakhir periode *burn up* didapatkan nilai sebesar $1,23 \times 10^{21}$ atom/cm³. Adanya kenaikan dan penurunan nilai densitas atom dikarenakan terjadinya reaksi fisi di dalam teras reaktor.
2. Nilai rasio konversi diawal periode *burn up* sebesar $8,07 \times 10^{-1}$ yang terus mengalami kenaikan diakhir periode *burn up* didapatkan nilai sebesar 1,15 dikarenakan semakin tinggi periode *burn up* daya yang digunakan juga semakin besar.
3. Perhitungan modul CITATION teras reaktor dibagi 9 *region* untuk *region* 1 dan 9 diisi dengan pendingin, *region* 2 sampai 8 diisi bahan bakar dengan waktu pembakaran yang berbeda-beda yang dilakukan sebanyak 7 case. Didapatkan nilai faktor multiplikasi (k_{eff}) untuk *case* 1 sebesar 1,028804, *case* 2 sebesar 1,025225, *case* 3 sebesar 1,020466, *case* 4 sebesar 1,011093, *case* 5 sebesar 0,9876864, *case* 6 sebesar 0,9245216 dan untuk *case* 7 sebesar 0,9245214.

4. Perbedaan dalam pengisian bahan bakar mengakibatkan nilai faktor puncak daya yang didapatkan semakin tajam untuk *case* yang bahan bakar uranium alaminya dibakar dengan waktu yang lebih lama.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk membuat bentuk konfigurasi teras reaktor yang lain agar penyebaran bahan bakar dapat merata. Untuk mendapatkan faktor puncak daya dari satu titik ke titik lainnya tidak terlalu jauh hal ini mempengaruhi bagian di teras reaktor agar temperature di teras reaktor panas yang dihasilkan secara merata untuk setiap titiknya agar didapatkan keselamatan pada reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariani, M., Su'ud, Z., Monado, F., Waris, A., Khairurrijal, Arif, I., Ferhat, A., & Sekimoto, H. (2013). Optimization of Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 14 No. 1 Hal. 261-262, 307-311.
- Benedict, M. (1981). *The Nuclear Fuel Cycle : An Overview*. Japan. University of Tokyo Press. Hal. 31-32.
- Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (1976). Nuclear Reactor Analysis. In *Proceedings of the IEEE*. Vol. 66 No. 5 Hal. 611-612.
- Fielding, J. E., Grant, K. A., Tran, T., & Kelly, H. A. (2012). Moderate Influenza Vaccine Effectiveness in Victoria. *Eurosurveillance*. Vol. 17 No. 11 Hal. 1-5.
- Irka, F. H., & Su'ud, Z. (2015). Analisis *Burn up* pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika / Universitas Andalas*. Vol.7 No.2 Hal. 78-86.
- Islami, I. N., Tismawati, H., & Subkhi, M. N. (2019). Studi Distribusi Neutronik Fluks Pada Reaktor Nuklir Sederhana. *Wahana Fisika*. Vol. 4 No. 1 Hal. 35.
- Lestari, A. M., dan Fitriyani, D. (2014). Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC dan MOX terhadap Nilai Breeding Ratio Pada Reaktor Pembiak Cepat. *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 3 No. 1 Hal. 14-19.
- Monado, F., Ariani, M., Su'Ud, Z., Waris, A., Basar, K., Aziz, F., Permana, S., & Sekimoto, H. (2014). Conceptual Design Study on Very Small Long Life Gas Cooled Fast Reactor Using Metallic Natural Uranium-Zr as Fuel Cycle Input. *AIP Conference Proceedings*. Hal. 105-108.
- Novalianda, S. (2019). Power Flattening. *Journal of Electrical Technology*. Vol. 4 No. 3 Hal. 2502-3624.
- Novalianda, S., & Ramadhan, A. (2020). Analysis of Enhance Reliability Gas-Cooled Fast Reactor (GCFR) Based on Fuel Uranium Nitride (UN). *International Journal of Scientific Engineering and Science*. Vol. 4 No. 8 Hal. 4-8.
- Okumura, K. (2007). *Introduction of Core Burn up Calculation with SRAC Contents Contents*. Reactor Physics Group Nuclear Science and Engineering Directorate. Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Tsuchihashi, K. (2007). *SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA-Data/Code.
- Prastuti, O. P. (2017). Pengaruh Komposisi Air Laut dan Pasir Laut Sebagai Sumber Energi Listrik. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*. Vol. 1 No. 1 Hal. 35.
- Riska, Fitriani, D., & Handayani Irka, F. (2016). Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 5 No. 1 Hal. 28-34.
- Sekimoto, H. (2005). Application of “CANDLE” Burn up to LBE Cooled Fast Reactor. *Iaea Tecdoc*. Vol. 1451 Hal. 203-212.
- Sekimoto, H., Nakayama, S., & Taguchi, H. (2010). *Power Flattening for Sodium Cooled Metallic Fuel “Candle” Reactor by Adding Thorium in Inner Core*. Japan. Center for Research into Innovative Nuclear Energy Systems. Hal. 1-7.
- Setia Budi, B. (2010). Dampak Pembangunan PLTN Terhadap Perubahan Tata Ruang Kabupaten Jepara. *Gema Teknologi*. Vol. 16 No. 1 Hal. 11.
- Stacey, W. (2007). Nuclear Energy. *Economist (United Kingdom)*. Vol. 412 No. 8985.
- Su’Ud, Z., Miftasani, F., Ilham, Sarah, A., Ariani, M., Sekimoto, H., Waris, A., & Sidik, P. (2017). Design Study of Small Modified CANDLE based Long Life Gas Cooled Fast Reactors. *Energy Procedia*. Vol. 131 Hal. 6-14.
- Supriatna, P. (2009). *Kajian Awal Pemurnian Gas He Pendingin Primer Reaktor Kogenerasi*. Buku I Prosiding PPI-PDIPTN Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN. Hal. 125-130.
- Tadeus, D. Y., Setiyono, B., & Setiawan, I. (2010). Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Transmisi*. Vol. 12 No. 1 Hal. 8-13.
- Utari, M., Yulianti, Y., & Riyanto, A. (2020). Desain High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) Model Geometri Heksagonal Dua Dimensi dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*. Vol. 1 No. 1 Hal. 2-16.
- Walter, A. E., dan Reynolds, A. B. (1981). Fast Breeder Reactors. *Stockholm Int Peace Res Inst, Nucl Proliferation Probl, Meet*. Hal. 41-55.