

**ANALISIS *BURN UP MODIFIED* CANDLE *HIGH TEMPERATURE* GAS
REACTOR (HTGR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM ALAM
(NITRIDA)**

(Skripsi)

Oleh

Tasya Praditha Ningtyas

1817041007



JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS LAMPUNG

2023

ABSTRAK

ANALISIS *BURN UP MODIFIED CANDLE HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR* (HTGR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM ALAM (NITRIDA)

Oleh

Tasya Praditha Ningtyas

Telah dilakukan penelitian tentang analisis *burn up modified CANDLE High Temperature Gas Reactor* (HTGR) menggunakan bahan bakar uranium alam dengan desain geometri bahan bakar berbentuk heksagonal model IGT-12 pada $\frac{1}{2}$ bagian teras reaktor arah radial. Tujuan dari penelitian ini meliputi penentuan geometri sel, ukuran pin bahan bakar, fraksi volume, kekritisian, densitas atom, rasio konversi dan distribusi rapat daya. Parameter yang dianalisis dari penelitian ini meliputi kekritisian, densitas atom, rasio konversi dan distribusi rapat daya. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah nilai faktor multiplikasi (k_{eff}) sebesar 1,1612 dan nilai faktor infinitif (k_{inf}) sebesar 1,1612. Didapatkan nilai rasio konversi 0,6622 dan nilai densitas atom mengalami perubahan jumlah nuklida pada jenis nuklida U^{235} sebesar $2,3697 \times 10^{24}$ atom/cm³ dan Pu^{239} sebesar $7,5893 \times 10^{22}$ atom/cm³ pada periode *burn up* 70 tahun. Nilai rapat daya maksimum sebesar 64,381 Watt/cm³, faktor puncak daya sebesar 2,1303 (arah radial) dan 1,3978 (arah aksial).

Kata kunci : *Burn up*, densitas atom, reaktor HTGR, uranium, rapat daya

ABSTRACT

ANALYSIS OF BURN UP MODIFIED CANDLE HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR (HTGR) USING NATURAL URANIUM (NITRIDE) FUEL

By

Tasya Praditha Ningtyas

The research on the analysis of burn up modified CANDLE High Temperature Gas Reactor (HTGR) using natural uranium fuel with a hexagonal fuel geometry design model IGT-12 at $1/2$ radial direction of the reactor core has been carried out. 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 analyzed in this study are criticality, atomic density, conversion ratio and power density distribution. The results obtained in this study were the effective multiplication factor (k_{eff}) is 1.1612 and the infinit factor (k_{inf}) is 1.1612. The conversion ratio about 0.6622 and the atomic density about of the U^{235} is $2.3697 \times 10^{24} \text{ atom/cm}^3$ and Pu^{239} is $7.5893 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3$ in 70 year of the burn up period. Maximum power density is about $288.7461 \text{ watt/cm}^3$, peak power factor of 2.8351 (radial direction) and 2.8351 (axial direction).

Keywords: Burn up, atomic density, HTGR reactor, uranium, power density

**ANALISIS *BURN UP MODIFIED CANDLE HIGH TEMPERATURE GAS*
REACTOR (HTGR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM ALAM
(NITRIDA)**

Oleh

Tasya Praditha Ningtyas

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 Skripsi

: **ANALISIS BURN UP MODIFIED CANDLE
HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR
(HTGR) DENGAN BAHAN BAKAR
URANIUM ALAM (NITRIDA)**

Nama Mahasiswa

: **Tasya Praditha Ningtyas**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **1817041007**

Program Studi

: **Fisika**

Fakultas

: **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. **Komisi Pembimbing**

Pembimbing I

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

Pembimbing II

Iqbal Firdaus S.Si., M.Si.
NIP. 199006162019031016

2. **Ketua Jurusan Fisika FMIPA**

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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



Sekretaris

: **Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si.**



Penguji Bukan
Pembimbing

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



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **5 Juni 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, 5 Juni 2023

Penulis,

A handwritten signature in black ink is written over a yellow rectangular stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text "5000", "METERAI TEMPEL", and the serial number "270BAKX459461433".

Tasya Praditha Ningtyas
NPM. 1817041007

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Tasya Praditha Ningtyas, dilahirkan di Kotabumi 19 Mei 2000. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Suparji, S.T., M.TI. dan Ibu Tuti Rahayu, S.E., S.AP. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 2 Candimas pada tahun 2012, SMPN 1 Natar Pada tahun 2015, SMAN 1 Natar pada tahun 2018. Penulis diterima di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung pada tahun 2018. Melalui jalur penerimaan Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT Bukit Asam Lampung pada Tahun 2022 yang berjudul “Analisis Nilai Kalor Pada Batubara Jenis BB-51 di PT Bukit Asam TBK Pelabuhan Tarahan”. Penulis juga pernah melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Cipta Waras, Kecamatan Gedung Surian, Lampung Barat. Penulis mengikuti program Studi Independen MSIB dan Kampus Merdeka pada *Microredential Game Developer* dari *Indonesia Cyber Education* (ICE Institute) tergabung kedalam *Group 29 Capstone Project* membuat sebuah game yang berjudul “Do It All Alone”.

Kemudian penulis melakukan penelitian “ANALISIS *BURN UP MODIFIED CANDLE HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR* (HTGR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM ALAM (NITRIDA)” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.

MOTTO

Jika semangat ini runtuh, aku yakin akan ada orang yang tetap menyemangatiku untuk bangkit.

Jangan pernah bersedih dari apa yang terjadi hari ini, sebab kita tidak tahu apa yang akan terjadi pada esok hari.

Zaman boleh instan, diri kita tidak boleh instan. Karena pada akhirnya seseorang yang tidak mencapai sesuatu dengan instan, akan selalu tahu caranya bangkit kembali saat dijatuhkan.

Kamu memiliki kekuatan dalam diri sendiri untuk bangkit atas apapun yang saat ini sedang berusaha menjatuhkanmu.

Jangan menyerah jika impianmu belum terwujud. Dengan semangat, percaya, dan diiringi dengan doa, semua yang tidak mungkin bisa saja menjadi mungkin.

PERSEMBAHAN

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

Kedua Orang Tuaku

Bapak Suparji, S.T., M.TI. & Ibu Tuti Rahayu, S.E., S.AP.

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

Keluarga Besar & Teman-teman

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan
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 HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR* (HTGR) DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM ALAM (NITRIDA)”** 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 geometri sel, ukuran pin bahan bakar, fraksi volume, kekritisian, densitas atom, rasio konversi dan distribusi rapat daya. Pada skripsi ini dilakukan sebuah penelitian untuk mengetahui kekritisian, densitas atom, rasio konversi dan distribusi rapat daya agar memenuhi standar keselamatandesain teras reaktor.

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. Amiin.

Bandar Lampung, 5 Juni 2023

Tasya Praditha Ningtyas

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“ANALISIS *BURN UP MODIFIED CANDLE HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR (HTGR)* DENGAN BAHAN BAKAR URANIUM ALAM (NITRIDA)”**. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis 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 telah memberikan bimbingan, ilmu wawasan dan arahan yang mendukung dari awal sampai akhir penulisan skripsi.
2. Bapak Iqbal firdaus, S.Si., M.Si. sebagai pembimbing kedua yang senantiasa membantu penulis, membimbing, mengoreksi format penulisan, memberikan kritik dan saran selama penulisan skripsi.
3. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si. sebagai pembimbing akademik (PA) sekaligus dosen penguji yang telah memberikan bimbingan serta nasehat dari awal perkuliahan sampai menyelesaikan tugas akhir.
4. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung
5. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, S.Si., M.T. sebagai Dekan FMIPA Universitas Lampung.
6. Kedua orangtuaku, Bapak Suparji, S.T., M.TI. dan Ibu Tuti Rahayu, S.E., S.AP. serta adikku Zahra Syifaa Ningtyas yang telah mendoa'akan serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

7. Seluruh Dosen serta Staf Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
8. Teman-teman Fisika 2018 yang selama ini memberikan semangat dan motivasi selama perkuliahan.
9. Partner seperbimbingan skripsi Ria, Munir, Risdha, Riftaul, Mega, Tri, Jarod dan kak Tami yang telah membantu dan memberi support dalam pengerjaan tugas akhir.
10. Partner Group 29 Capstone Project, terutama pada team Game Programmer (GP) Chris, Pinky dan Hilman yang telah membantu dan mendoakan dalam menyelesaikan pengerjaan tugas akhir.
11. Partner Bocah Valorant Gama, Gilang dan Robert yang telah memberikan dukungan dan menyemangati dalam pengerjaan skripsi ini selesai.
12. Partner Squad SNOW Adi (Taro), Calvary dan Nendra Waradana (Cyzen) yang telah memberikan support, do'a, semangat dan candaan dalam menyelesaikan pengerjaan skripsi ini sehingga terselesaikan.
13. Temanku Errica dan Lulu yang telah membantu memberikan dukungan agar cepat lulus karena sudah ketinggalan.
14. *Last but not least, I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all these hard work, I wanna thank me for having no days off, I wanna thank me for never quitting, I wanna thank me always being a giver and trying to give more than I receive. I wanna thank me for to do more right than wrong, I wanna thank me for just being me all time.*

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 penulisan dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 5 Juni 2023

Tasya Praditha Ningtyas

DAFTAR ISI

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

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Reaktor Nuklir	5
2.1.1 Reaksi Fisi	5
2.1.2 Komponen Reaktor Nuklir	7
2.2 HTGR (<i>High Temperature Gas Reactor</i>)	9
2.3 Bahan Bakar Reaktor	10
2.4 Helium.....	12
2.5 Faktor Multifikasi	13
2.5.1 Densitas Atom.....	14
2.6 SRAC (<i>Standar Thermal Reactor Analysis Code</i>).....	16
2.7 Konsep <i>Modified CANDLE</i>	19
2.8 Strategi <i>Shuffling</i>	21

III. METODE PENELITIAN

1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.2 Alat dan Bahan.....	23
3.3 Prosedur Penelitian	23
3.3.1 Spesifik umum desain reaktor	23
3.3.2 Strategi <i>burn up modified CANDLE</i> arah radial.....	26
3.3.3 Prosedur perhitungan parameter neutronik menggunakan SRAC.....	27

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Geometri Sel, Ukuran Pin dan Fraksi Volume Bahan Bakar.....	30
4.2 Menghitung Densitas Atom	36
4.3 Perhitungan PIJ	37
4.4 Perhitungan <i>Burn Up</i> Pada Bahan Bakar.....	37
4.5 Keluaran <i>Burn Up</i> Pada File MACRO	45
4.6 Desain Teras Reaktor Menggunakan Program CITATION	46
4.6.1 CITATION <i>Case 1</i>	49
4.6.2 CITATION <i>Case 2</i>	52
4.6.3 CITATION <i>Case 3</i>	55
4.6.4 CITATION <i>Case 4</i>	58
4.6.5 CITATION <i>Case 5</i>	61
4.6.6 CITATION <i>Case 6</i>	64

4.6.7 CITATION <i>Case</i> 7	67
4.6.8 Nilai Faktor Multiplikasi (k_{eff}) Pada <i>Case</i> CITATION	71

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	72
5.2 Saran	72

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Reaksi fisi	6
Gambar 2.2 Skema umum reaktor HTGR.....	10
Gambar 2.3 Grafik kritikalitas reaktor ditinjau dari faktor multiplikasi	14
Gambar 2.4 Prinsip keseimbangan nuklida A	15
Gambar 2.5 Struktur program SRAC	18
Gambar 2.6 Strategi pembakaran model CANDLE	19
Gambar 2.7 Sistem <i>shuffling</i> arah radial	21
Gambar 3.1 Geometri PIJ dengan model perangkat annular IGT-12.....	25
Gambar 3.2 Penampang <i>region</i> bahan bakar teras reaktor arah radial.....	26
Gambar 3.3 Sistem <i>shuffling</i> arah aksial	27
Gambar 3.4 Diagram alir perhitungan neutronik menggunakan SRAC.....	29
Gambar 4.1 Output desain reaktor HTGR.....	31
Gambar 4.2 Radius (r) pin bahan bakar 1.....	32
Gambar 4.3 Radius (r) pin bahan bakar 2.....	32
Gambar 4.4 Radius (r) pin bahan bakar 3.....	34
Gambar 4.5 Grafik nilai k_{eff} terhadap periode <i>burn up</i>	39
Gambar 4.6 Grafik nilai k_{inf} terhadap periode <i>burn up</i>	40
Gambar 4.7 Rasio konversi	41
Gambar 4.8 Densitas atom U^{235}	42
Gambar 4.9 Densitas atom U^{238}	43
Gambar 4.10 Densitas atom Pu^{239}	44
Gambar 4.11 Geometri teras reaktor	46
Gambar 4.12 (a) pembagian 3 <i>region</i> radial, (b) pembagian 9 <i>region</i> aksial.....	47

Gambar 4.13 Bagian $\frac{1}{2}$ teras reaktor.....	48
Gambar 4.14 Pembagian <i>region 1</i> teras reaktor	49
Gambar 4.15 Rapat daya terhadap (r) arah aksial pada CITATION <i>case 1</i>	50
Gambar 4.16 Rapat daya terhadap (z) arah aksial pada CITATION <i>case 1</i>	51
Gambar 4.17 Pembagian <i>region 2</i> teras reaktor	53
Gambar 4.18 Rapat daya terhadap (r) arah aksial pada CITATION <i>case 2</i>	53
Gambar 4.19 Rapat daya terhadap (z) arah aksial pada CITATION <i>case 2</i>	54
Gambar 4.20 Pembagian <i>region 3</i> teras reaktor	56
Gambar 4.21 Rapat daya terhadap (r) arah aksial pada CITATION <i>case 3</i>	56
Gambar 4.22 Rapat daya terhadap (z) arah aksial pada CITATION <i>case 3</i>	57
Gambar 4.23 Pembagian <i>region 4</i> teras reaktor	58
Gambar 4.24 Rapat daya terhadap (r) arah aksial pada CITATION <i>case 4</i>	59
Gambar 4.25 Rapat daya terhadap (z) arah aksial pada CITATION <i>case 4</i>	60
Gambar 4.26 Pembagian <i>region 5</i> teras reaktor	62
Gambar 4.27 Rapat daya terhadap (r) arah aksial pada CITATION <i>case 5</i>	62
Gambar 4.28 Rapat daya terhadap (z) arah aksial pada CITATION <i>case 5</i>	63
Gambar 4.29 Pembagian <i>region 6</i> teras reaktor	65
Gambar 4.30 Rapat daya terhadap (r) arah aksial pada CITATION <i>case 6</i>	65
Gambar 4.31 Rapat daya terhadap (z) arah aksial pada CITATION <i>case 6</i>	66
Gambar 4.32 Pembagian <i>region 7</i> teras reaktor	68
Gambar 4.33 Rapat daya terhadap (r) arah aksial pada CITATION <i>case 7</i>	68
Gambar 4.34 Rapat daya terhadap (z) arah aksial pada CITATION <i>case 7</i>	69
Gambar 4.35 Hasil nilai k_{eff} pada CITATION.....	71

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi desain reaktor	24
Tabel 3.2 Komposisi uranium alam di setiap <i>region</i> teras reaktor	26
Tabel 4.1 Fraksi volume bahan bakar	35
Tabel 4.2 Densitas atom bahan bakar	37
Tabel 4.3 Perhitungan <i>burn up</i> selama 70 tahun	38
Tabel 4.4 Keluaran <i>burn up</i> pada file MACRO	45
Tabel 4.5 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada <i>case 1</i>	52
Tabel 4.6 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada <i>case 2</i>	55
Tabel 4.7 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada <i>case 3</i>	58
Tabel 4.8 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada <i>case 4</i>	61
Tabel 4.9 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada <i>case 5</i>	64
Tabel 4.10 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada <i>case 6</i>	67
Tabel 4.11 Hasil perhitungan teras reaktor program CITATION pada <i>case 7</i>	70

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan meningkatnya perkembangan jumlah penduduk, saat ini kebutuhan energi tersebut menggunakan sumber bahan fosil yang tidak dapat diperbaharui dan jumlahnya semakin berkurang. Diperlukan sumber energi alternatif yang dapat menjadi pertimbangan dalam kebutuhan energi listrik dengan jumlahnya masih banyak dan terbarukan salah satunya adalah energi nuklir (Liun dan Sunardi, 2014).

Sumber energi nuklir menghasilkan energi panas berasal dari bahan bakar yang terdapat dalam reaktor nuklir digunakan menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Energi panas dihasilkan dari reaksi pembelahan inti (fisi) yaitu pembelahan inti berat menjadi dua inti ringan disertai energi yang terjadi pada bahan bakar dalam reaktor nuklir. Bahan bakar reaktor nuklir terdiri dari bahan fisil dan fertil, salah satu bahan fisil adalah uranium 235 (U^{235}), dan plutonium 239 (Pu^{239}). Bahan bakar fertil adalah uranium 238 (U^{238}) (Soentono, 1998).

Pemanfaatan reaktor nuklir telah mengalami perkembangan dari generasi I, II, III dan IV. Kemajuan pengembangan reaktor sampai pada reaktor generasi IV masih dalam tahap pengembangan desain menggunakan energi termal atau panas dan konsep dioperasikan untuk memasok daya listrik dalam beberapa tahun kedepan sebagai jalur alternatif untuk bahan bakar fosil sehingga memenuhi kebutuhan energi listrik (Ariani, 2010). Salah satu reaktor generasi IV yaitu *High Temperature Gas Reactor* (HTGR) merupakan reaktor suhu tinggi memiliki sistem keselamatan pasif (*passive safety*) yang memungkinkan reaktor mampu meminimalkan kecelakaan reaktor menggunakan gas helium (He) sebagai pendingin (Dewita *et al*, 2011).

Saat reaktor beroperasi dalam jangka waktu tertentu, maka akan terjadi pengurangan atau penyusutan bahan bakar menyebabkan jumlah reaksi fisi menjadi berkurang. penurunan jumlah inti atom yang membelah selama proses pembelahan disebut *Burn up* bahan bakar. Pada tingkat efektivitas suatu reaktor salah satunya bergantung pada kualitas *burn up* terdapat Strategi baru yaitu metode *Modified CANDLE (Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy producing reaktor)*. Strategi ini merupakan modifikasi dari strategi CANDLE yang dikembangkan pertama kali di *Tokyo Institute of Technology* Jepang. Reaktor CANDLE adalah sebuah konsep reaktor nuklir dimana proses daerah pembakaran bahan bakar dibagi dalam beberapa *region-region* diskrit dapat dianalogikan dengan terbakarinya lilin (Ohaka *et al*, 2005).

Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan feriska pada tahun 2015 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 menandakan reaktor berada dalam keadaan kritis dan dapat dioperasikan skema *burn up Modified CANDLE* strategi *shuffling* tanpa dilakukan pengayaan dan menggunakan uranium alam sebagai bahan bakarnya (Irka, 2015).

Dalam penelitian ini dilakukan menggunakan strategi *shuffling* arah aksial periode *burn up* 70 tahun dengan bahan bakar Uranium Nitrida. Tujuan dalam penelitian ini untuk penerapan hasil dari metode *modified CANDLE* pada reaktor HTGR menggunakan bahan bakar Uranium Nitrida dan periode *burn up* selama 70 tahun dalam penerapan dalam reaktor nuklir lebih efektif. Analisis yang akan dilakukan dalam penelitian ini menggunakan CITATION dalam 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 dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana penerapan hasil *Modified CANDLE* pada reaktor HTGR terhadap nilai k_{inf} dan k_{eff} ?
2. Bagaimana densitas atom pada bahan bakar U^{238} dan Pu^{239} pada proses periode *burn up* HTGR?
3. Bagaimana rasio konversi kecepatan neutronik terhadap kecepatan deplesi uranium yang dihasilkan oleh HTGR selama proses *burn up* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini meliputi :

1. Mengetahui nilai k_{inf} dan k_{eff} yang dihasilkan *Modified CANDLE* dengan program SRAC.
2. Mengetahui densitas atom U^{238} dan Pu^{239} pada periode *burn up* dalam reaktor HTGR.
3. Mengetahui rasio konversi untuk perbandingan kecepatan neutronik terhadap kecepatan deplesi bahan bakar uranium yang dihasilkan oleh HTGR selama proses *burn up*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi :

1. Penelitian ini menggunakan perhitungan *burn up* pada *Modified CANDLE High Temperature Gas Reactor* (HTGR).
2. Jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah HTGR.
3. Bahan bakar yang digunakan adalah uranium alam.
4. Bahan pendingin adalah gas helium.
5. Model teras menggunakan silinder 3D R-Z.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini mendapatkan hasil analisis *burn up* pada reaktor HTGR menggunakan *Modified CANDLE* pada nilai multiplikasi tak hingga (k_{inf}), nilai multiplikasi efektif (k_{eff}), densitas atom dan nilai rasio konversi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

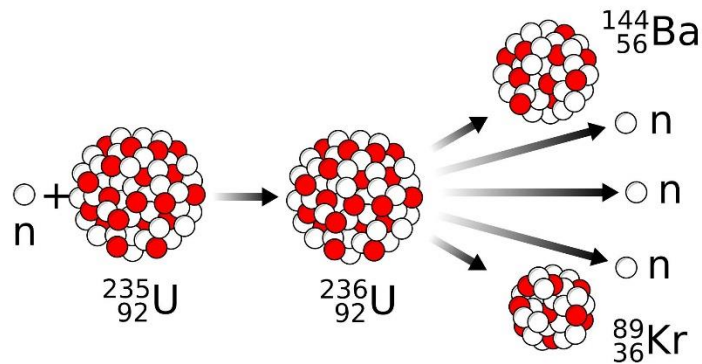
2.1 Konsep Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah sebuah sistem tempat mengontrol dan mempertahankan terjadinya reaksi nuklir. Prinsip kerja reaktor mirip dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada sumber energi dan jenis bahan bakar. Sumber energi konvensional berasal dari proses pembakaran secara kimia bahan bakar fosil, sedangkan reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir bahan bakar fisil (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Sebuah reaktor bekerja atas dasar reaksi fisi (pembelahan) suatu inti ada dua jenis bahan reaktor yang dapat mengalami fisi atau pembelahan disebut *fissionable material*, yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah bahan yang pecah saat ditembakkan oleh neutron dengan jumlah energi tertentu, sedangkan bahan yang subur adalah bahan yang menangkap neutron dan menjadi radioaktif melalui peluruhan diubah menjadi bahan fisil (Lewis, 2008).

2.1.1 Reaksi Fisi

Reaksi fisi terjadi di dalam teras reaktor, dimana bagian terkecil dari penyusun teras reaktor dinamakan sel bahan bakar. Fisi nuklir adalah sebuah inti berat yang ditumbuk oleh partikel (misalnya neutron) dapat membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan beberapa partikel lain. Contoh reaksi fisi nuklir ini adalah uranium yang ditumbuk atau menyerap neutron lambat yang akan menghasilkan neutron lain menjadi dua buah inti atom yang lebih ringan. Neutron ini mampu menumbuk (diserap) kembali oleh inti uranium untuk membentuk suatu reaksi fisi berikutnya. Proses ini terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat membentuk reaksi berantai tak terkendali (Ahied, 2015).



Gambar 2.1. Reaksi fisi (Mumtaz, 2021).

Untuk mengontrol reaksi berantai dan pelepasan energi, diperlukan mekanisme pengendalian seperti batang kendali yang terbuat dari bahan penyerap neutron. Mekanisme inilah yang mempertahankan kestabilan reaksi berantai dan daya keluaran (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Berdasarkan pada jumlah neutron yang dihasilkan dalam reaksi fisi dikenal 2 jenis reaksi fisi. Berikut kedua jenis reaksi fisi:

- Reaksi fisi terkendali adalah reaksi fisi yang jumlah neutronnya dapat dikendalikan sehingga tetap sama dengan satu, seperti keadaan neutron semula. Pada reaksi fisi terkendali ini sebelum dan sesudah reaksi tetap sama dengan satu. Hal ini dapat dicapai dengan menyerap kelebihan neutron. Reaksi fisi terkendali adalah reaksi yang pada umumnya terjadi didalam reaktor nuklir.
- Reaksi fisi tak terkendali adalah reaksi fisi yang jumlah neutronnya tidak dikendalikan sehingga neutron hasil pembelahan dapat menembak sasaran lain sehingga akan dihasilkan lebih banyak lagi radionuklida baru, seperti halnya yang terjadi pada ledakan bom atom (Wardhana, 2007).

2.1.2 Komponen Reaktor Nuklir

Komponen-komponen reaktor merupakan fasilitas yang harus dimiliki sebuah reaktor. Komponen tersebut harus memenuhi standar kualitas yang tinggi dan handal, sehingga kemungkinan terjadinya kecelakaan atau kegagalan komponen tersebut sangat kecil. Ada beberapa komponen dari sebuah reaktor nuklir adalah sebagai berikut:

1. Bahan bakar

Bahan bakar merupakan sumber energi nuklir. Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir adalah U^{233} , U^{235} , Pu^{239} , dan Th^{232} . Terdapat dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung dapat membelah apabila menangkap neutron, sedangkan bahan fertil merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah setelah menangkap neutron tetapi akan membentuk bahan fisil (Lewis, 2008).

2. Tangki Reaktor

Tangki ini berupa tabung silinder atau bola yang dibuat dari logam campuran. Fungsi dari tangki reaktor adalah sebagai wadah untuk menempatkan komponen-komponen reaktor lainnya dan sebagai tempat berlangsung reaksi nuklir. Adapun fungsi lain dari tangki yang ber dinding tebal yaitu untuk menahan radiasi agar tidak keluar dari sistem reaktor (Adiwardojo *et al*, 2010).

3. Teras Reaktor

Komponen yang memiliki fungsi sebagai tempat untuk bahan bakar. Teras reaktor dibuat berlubang (kolom) yang berguna untuk menempatkan bahan bakar reaktor *fuel assembly* yang berbentuk batang. Teras reaktor terbuat dari logam yang tahan panas dan tahan korosi (Adiwardojo *et al*, 2010).

4. Moderator

Moderator merupakan lapisan kedua komponen luar yang berhubungan langsung dengan bahan bakar. Moderator berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (2 MeV) menjadi energi neutron lambat (0,02 - 0,04 eV). Sehingga neutron dapat menyebabkan reaksi fisi berikutnya. Selain itu, moderator juga berfungsi sebagai pendingin primer. Persyaratan yang diperlukan untuk bahan moderator yang baik

adalah dapat menghilangkan sebagian besar energi cepat tersebut dalam setiap tumbukan. Bahan-bahan yang digunakan sebagai moderator antara lain : air ringan (H_2O), air berat (D_2O), grafit dan berilium (Mairing, 2009).

5. Batang kendali

Batang kendali merupakan komponen reaktor yang berfungsi untuk mengontrol keluaran daya dari sebuah reaktor dengan cara mengendalikan jumlah neutron yang dihasilkannya (Lewis, 2008). Bahan yang dipergunakan untuk batang kendali reaktor haruslah memiliki kemampuan tinggi menyerap neutron (Zweifel, 1973), memiliki karakteristik memiliki sifat konduktivitas panas yang cukup, tahan terhadap panas dan radiasi, tidak mudah korosif, dan material harus cukup kuat untuk mematikan reaktor nuklir (Chanakya *et al.*, 1981). Bahan-bahan tersebut antara lain Kadmium (Cd), Boron (B), atau Hafnium (Hf) (Zweifel, 1973).

6. Perisai

Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Radiasi yang dihasilkan oleh reaktor antara lain radiasi partikel alfa, beta, produk fisi, sinar gamma, dan neutron. Untuk menahan radiasi, umumnya reaktor dikelilingi oleh 9 perisai beton. Bahan perisai yang biasanya digunakan adalah timbal (Pb^{82}), bismuth (Bi^{83}), tungsten (W^{74}) sebagai pelindung radiasi sinar X, besi (Fe^{26}) sebagai pelindung radiasi gamma, Kadmium (Cd^{48}) dan Boron (B^5) sebagai pelindung radiasi neutron (Abdul *et al.*, 1998).

7. Pendingin (*Coolant*)

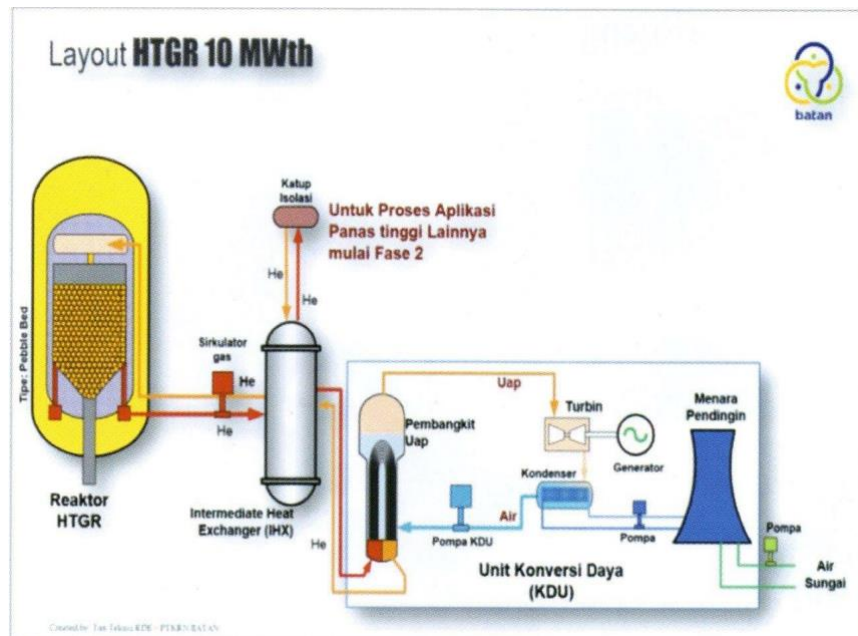
Energi yang dihasilkan oleh reaksi fisi meningkatkan suhu reaktor. Suhu ini dipindahkan dari reaktor dengan menggunakan bahan pendingin, misalnya air atau karbon dioksida. Bahan pendingin disirkulasikan melalui sistem pompa, sehingga air yang keluar dari bagian atas teras reaktor digantikan air dingin yang masuk melalui bagian bawah teras reaktor (Csom *et al.*, 2012).

2.2 HTGR (*High Temperature Gas Reactor*)

HTGR adalah kelompok dari reaktor VHTR (*Very High Temperature Reactor*) yang merupakan reaktor generasi IV. Sesuai dengan namanya reaktor HTGR merupakan reaktor suhu tinggi yang menggunakan gas sebagai pendingin dan grafit sebagai moderator, yang didesain dengan LEU (*low Enriched Uranium*), dirancang dengan daya 30 MW dan dijaga keadaannya agar temperatur pusat bahan bakar maksimum 1600°C (Pramutadi dan Zaki, 2008).

Salah satu pengembangan HTGR dilakukan oleh JAERI dengan membuat HTTR di Jepang. Reaktor ini sebagai fasilitas uji coba bahan bakar, iradiasi material dan untuk mendemonstrasikan aplikasi pemanasan. HTTR dari jenis modular memiliki keistimewaan dalam hal kemampuan keselamatan, temperatur gas keluaran yang tinggi, serta ekonomis. Temperatur keluaran yang tinggi menghasilkan efisiensi yang tinggi dalam konversi ke listrik, dapat diaplikasikan pada produksi hidrogen, untuk pemompaan sumur minyak, ataupun untuk proses-proses kimia lainnya (Mardiansah dan Zaki, 2008).

Burn up bahan bakar pada reaktor HTGR dapat mencapai 90,000 Mwd/ton sehingga sisa bahan fisil dalam bahan bakar bekas sangat kurang dan tidak memenuhi syarat untuk digunakan sebagai senjata nuklir. Daur bahan bakar HTGR yang diadopsi saat ini adalah daur *once-through* (sekali lewat), tidak ada olah ulang bahan bakar bekas. Material hasil fisi akan tetap tertahan dalam elemen bakar selama struktur elemen bakar terproteksi secara fisik. Reaktor dilindungi bangunan reaktor dengan beton yang sangat tebal, sehingga merupakan pelindung yang sangat kuat terhadap serangan sabotase (Alimah, *et al.*, 2016). Skema umum untuk reaktor HTGR ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2. Skema umum reaktor HTGR (BATAN, 2015).

Terdapat dua tipe HTGR, yaitu HTGR yang menggunakan elemen bakar bentuk prismaatik dan HTGR menggunakan elemen bakar bentuk bola (*Pebble Bed*). Baik elemen bakar bentuk prismaatik maupun *pebble bed* masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Elemen bakar bentuk prismaatik mempunyai komposisi struktur geometri teras yang lebih pasti (mirip dengan teras LWR), dengan demikian analisis neutronik dan *thermal-flow* juga lebih mudah dan lebih akurat, teknologi reaktor daya ini terbukti dapat terbebas dari risiko pelelehan teras karena mengadopsi partikel *Tri Isostructural* (TRISO), dan memiliki reaktivitas umpan balik yang negatif (Elsheikh, 2013).

2.3 Bahan Bakar Reaktor

Uranium ditemukan pertama kali oleh Klaproth seorang kimiawan Jerman pada tahun 1789 (Kidd, 2009). Dalam tabel skala unsur-unsur yang diurutkan berdasarkan kenaikan massa inti atom, uranium adalah unsur terberat dari seluruh unsur alami (hidrogen adalah yang paling ringan) dan diklasifikasikan sebagai logam. Uranium

memiliki titik leleh yang relatif tinggi yaitu 1132°C (World Nuclear, 2012). Sejak tahun 1940, hampir semua uranium yang ditambang akan digunakan untuk produksi senjata nuklir. Mulai tahun 1970 uranium dikembangkan sebagai bahan bakar dalam reaktor nuklir. uranium mempunyai 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 dari bumi awalnya mengandung isotop U^{235} , U^{238} , dan U^{234} . Uranium memiliki titik leleh yaitu 1.132°C dan titik didih 4.131°C . Uranium terdapat pada batuan granit atau batuan sedimen di kerak bumi. Cadangan uranium yang paling banyak ditemukan di Amerika Serikat, Kanada, Rusia dan beberapa Negara di Afrika (IAEA, 2005).

Seperti diketahui, material yang diinginkan dalam pemakaian bahan bakar reaktor adalah U^{235} . Uranium alam terdiri dari U^{238} sebanyak 99,274%, U^{235} sebanyak 0,72 % dan U^{234} sebanyak 0,0058%. Ketersediaan U^{235} yang hanya 0,72% mengharuskan untuk melakukan peningkatan konsentrasinya dengan sekitar 2-5% agar efektif dipakai dalam reaktor daya nuklir. U^{238} memiliki waktu paruh 4.468×10^9 tahun, sedangkan U^{235} mempunyai waktu paruh 7.038×10^8 tahun dan U^{234} mempunyai waktu paruh 245.500 tahun (Takaki dan Mardiansah, 2012).

Uranium plutonium nitrida (UN-PuN) Penggunaan bahan bakar nitrit pada reaktor cepat memiliki andil yang besar untuk mencapai tingkat keamanan tinggi. Bahan bakar nitrit memiliki titik leleh yang tinggi sekitar 2500°C dan konduktivitas termal tinggi memungkinkan diperolehnya perbedaan temperatur relatif rendah antara titik pusat pin bahan bakar dengan bahan pendingin serta sangat fleksibel untuk sejumlah kinerja reaktor cepat seperti tingkat rasio pembiakan yang cukup tinggi, pembakaran aktinida dan juga untuk waktu operasi teras yang cukup lama (Lestari, 2014).

Bahan bakar (UN-PuN) uranium plutonium nitrida memiliki andil yang besar untuk mencapai tingkat keamanan yang tinggi pada reaktor cepat. Bahan bakar ini mempunyai titik leleh tinggi sekitar 2500°C dengan densitas sebesar $14,3 \text{ g/cm}^3$ dan

konduktivitas termal tinggi memungkinkan diperolehnya perbedaan temperatur relatif rendah antara titik pusat pin bahan bakar dengan pendinginnya. Nitrit juga merupakan bahan bakar yang fleksibel (Munita *et al.*, 2018).

2.4 Helium

Helium merupakan salah satu jenis *coolant* yang memiliki kelebihan dari *coolant* yang lainnya yang bersifat inert (sukar bereaksi dengan unsur lain). Gas Helium digunakan sebagai pendingin karena karakteristiknya sebagai gas ideal/gas inert, tidak mengalami perubahan sifat fisik maupun kimia pada temperatur sangat tinggi, tidak bereaksi dengan gas/zat lain, efektif untuk keperluan perpindahan panas dan mudah dimampatkan. Kemurnian gas helium sebagai pendingin HTGR harus dijaga, baik dari pengotor yang berbentuk partikulat maupun gas. Pengotor partikulat adalah debu karbon yang mempunyai kemungkinan bercampur dengan produk fisi, sedangkan pengotor berbentuk gas adalah O_2 , N_2 , H_2O , CH_4 dan H_2 (Alimah *et al.*, 2016).

Gas helium sangat tepat dijadikan sebagai fluida pendingin untuk transfer panas pada reaktor dengan temperatur sangat tinggi (untuk HTGR, VHTR dan jenis *gas cooled reactor*), mengingat karakteristik dari gas helium sebagai gas ideal/gas inert, tidak mengalami perubahan sifat fisik maupun kimia pada temperatur relatif sangat tinggi, tidak bereaksi dengan gas/zat lainnya, efektif untuk keperluan *heat transfer* dan mudah dimampatkan. Karakteristik gas helium bisa bertahan seperti ini jika kemurniannya (*purity*) bisa dijaga dengan baik, namun demikian unsur-unsur gas pengotor bias muncul dari akibat kebocoran orde mikro pada *system shield* antar sambungan pipa pendingin, sehingga gas pengotor (*impurity gas*) memungkinkan masuk ke dalam sistem pendingin. Tidak mustahil jika pelumas dari bearing dengan sistem penyekatan yang tidak sempurna, pada temperatur sangat tinggi akan menjadi gas kontaminan yang bisa merusak karakteristik dari gas helium. Setiap material yang mengalami kontak langsung dengan gas helium, cepat atau lambat akan mengalami kerusakan fisik akibat

temperature stress sehingga secara fisik menjadi lebih rapuh. Benda rapuh ini akan menghasilkan debu yang mengotori gas helium (Supriatna, 2009).

Pendingin harus memiliki titik leleh yang rendah dan titik didih yang tinggi. Selain itu, bahan yang digunakan sebagai pendingin tidak boleh bersifat korosif terhadap material yang kontak dengannya dan harus memiliki koefisien perpindahan panas yang tinggi (Mairing *et al.*, 2009).

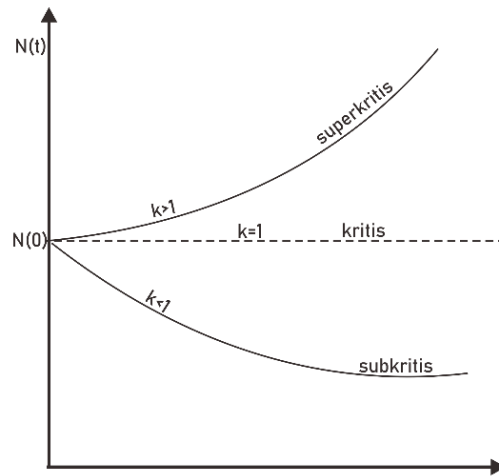
2.5 Faktor Multifikasi

Pada dasarnya merancang reaktor nuklir adalah bagaimana mengkondisikan reaktor tersebut dapat beroperasi secara stabil. Sebuah reaktor dikatakan stabil apabila terjadi keseimbangan antara jumlah reaksi fisi dengan jumlah neutron yang tertangkap dan neutron yang bocor. Keseimbangan ini akan memberikan sebuah reaktor yang dapat mempertahankan rantai reaksi fisinya tanpa mengalami pengurangan jumlah reaksi fisi ataupun pertumbuhan jumlah reaksi fisi. Parameter yang menjelaskan berbagai keseimbangan ini adalah faktor multiplikasi secara matematis dapat ditulis dalam persamaan 2.1.

$$k = \frac{\text{jumlah neutron pada suatu generasi}}{\text{jumlah neutron pada generasi sebelumnya}} \quad (2.1)$$

Berdasarkan nilai faktor multiplikasi, terdapat tiga jenis keadaan teras reaktor yaitu :

1. $k < 1$ disebut sebagai keadaan subkritis, dimana jumlah neutron yang dihasilkan lebih sedikit sehingga lama kelamaan reaktor bisa mati karena jumlah neutron tiap generasi semakin menurun.
2. $k = 1$ disebut sebagai keadaan kritis, dimana jumlah neutron pada satu generasi sama dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya.
3. $k > 1$ disebut sebagai keadaan superkritis, artinya jumlah neutron terus menerus (Duderstadt dan Hamilton, 1976).
4. Grafik yang menggambarkan ketiga keadaan ini disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.3 Grafik Kritikalitas Reaktor Ditinjau dari Faktor Multiplikasi
(Duderstadt & Homilton 1976).

2.5.1 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 2.2.

$$N_m = \frac{F_m \rho_m N_A}{M_m} \quad (2.2)$$

dengan:

N_m = densitas atom (atom/cm³)

F_m = fraksi volume

ρ_m = densitas (g/cm³)

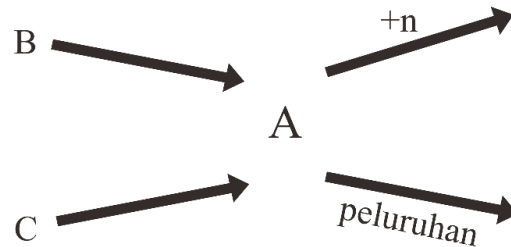
M_m = berat molekul (g/g-mol)

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 2.3.



Gambar 2.4 Prinsip Keseimbangan Nuklida A(Duderstadt & Homilton 1976).

Secara matematis dapat dituliskan dalam persamaan 2.3 :

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - [\sum_g \sigma_{a_g}^A \phi_g] N_A + \lambda_B N_B + [\sum_g \sigma_{a_g}^C \phi_g] N_C \quad (2.3)$$

Secara umum persamaan *burn up* untuk tiap material dapat dituliskan dalam persamaan 2.4 :

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_{a,i}\phi)N_i + \sum_m S_{m,i}N_m \quad (2.4)$$

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 & Hamilton 1976).

2.6 SRAC (*Standar Thermal Reactor Analysis Code*)

SRAC merupakan suatu sistem kode penghitungan neutron yang bersifat menyeluruh untuk beberapa jenis reaktor termal (Okumura *et al*, 2002). SRAC mulai berkembang pada tahun 1978 sebagai standar kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang (*Japan Atomic Energy Agency/JAEA*) (Okumura, 2007). Sistem SRAC terdiri dari penyimpanan data (*Libraries*) neutron (JENDL-3.3, JENDL-3.2, END/B-IV, JEF-2.2 dan sebagainya), lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi. Lima kode dasar SRAC meliputi :

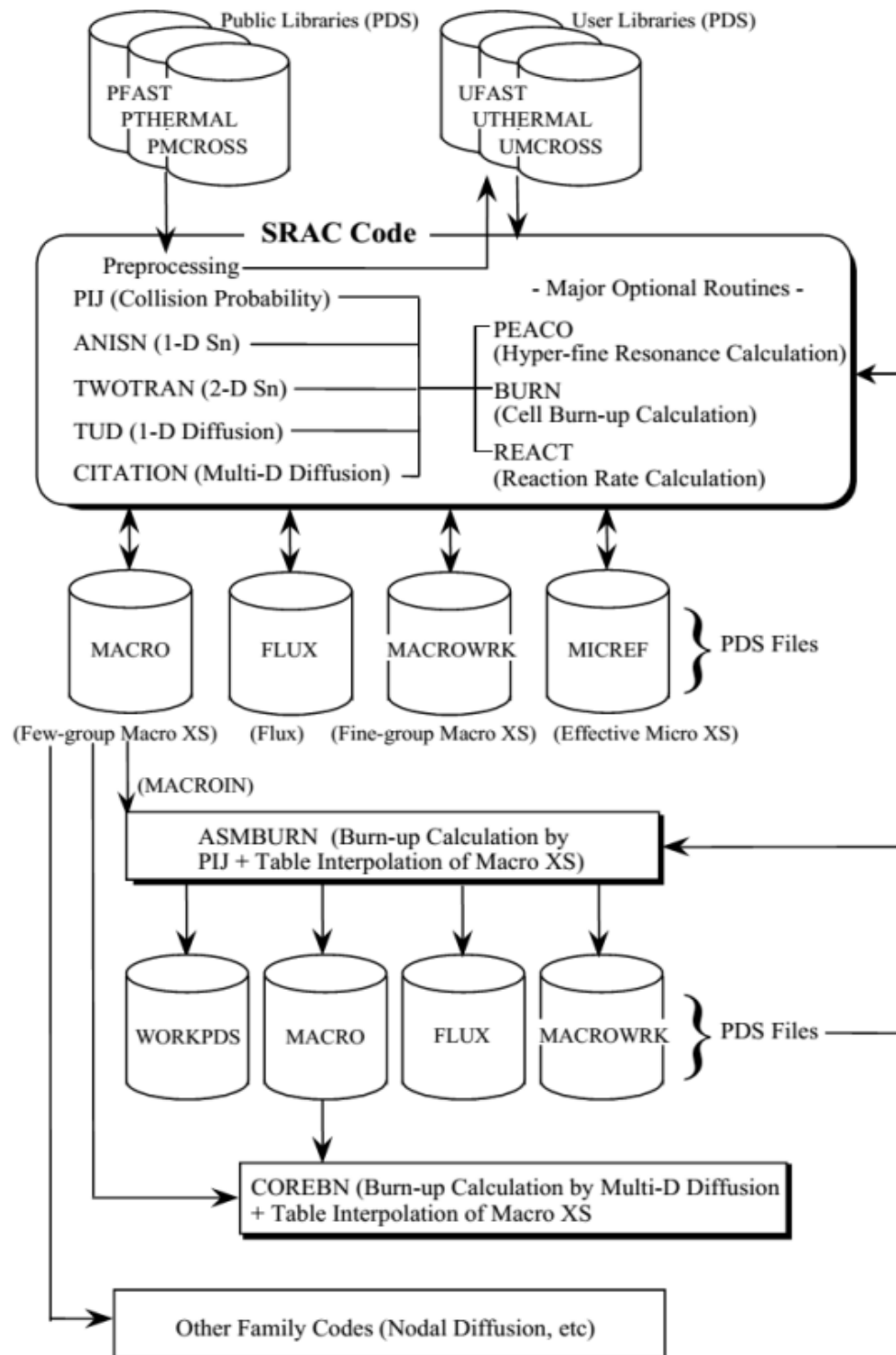
1. PIJ sebagai kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi 16 kisi geometri 19
2. ANISN sebagai kode transport satu dimensi (SN) yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (Rs).
3. TWOTRAN sebagai kode transport dua dimensi (SN) yang terdiri dari 3 geometri yaitu pelat (X-Y), silinder (R-Z), dan bola (R- θ).

4. TUD sebagai kode difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (Rs).
5. CITATION sebagai kode difusi multi dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segienam (Okumura *et al.*, 2002).

SRAC terdapat file *input* dan file *output*, file Input SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila input data pada SRAC telah selesai kemudian di *running* maka file *output* standar akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai tepat atau 21 tidak. Apabila bagian akhir dari hasil penghitungan (output) belum sampai pada pesan seperti

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

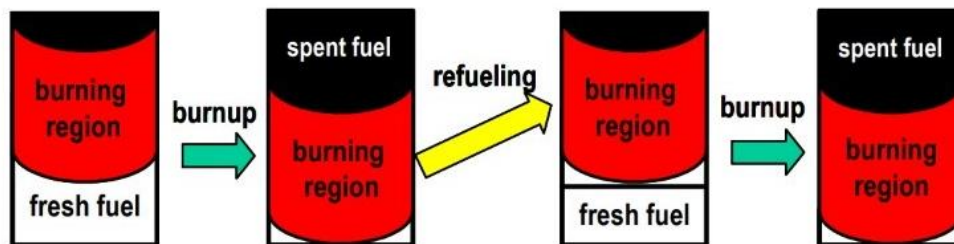
maka harus dilakukan pengecekan pada input dan memeriksa output standar. Setelah penghitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan standar kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2002).



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

2.7 Konsep *Modified CANDLE*

CANDLE adalah singkatan dari *Constant Axial Shape of Neutron Flux, Nuclide Densities, and Power Profile during Life of Energy Production* (Sekimoto, 2010). Reaktor CANDLE merupakan konsep reaktor nuklir dimana proses pembakaran bahan bakar dapat dianalogikan dengan proses pembakaran lilin. Zona pembakaran bergerak sepanjang sumbu reaktor. Semakin panjang teras reaktor, semakin lama umur reaktor. Reaktor CANDLE hanya membutuhkan uranium alam untuk mengoperasikan reaktor, tidak seperti reaktor konvensional yang membutuhkan uranium yang diperkaya selama operasi reaktor. Pada dasarnya, konsep reaktor pemulia cepat yang menghasilkan plutonium sebagai bahan fisil terbuat dari U^{238} . Plutonium 239 adalah bahan fisil yang sangat efektif dalam rentang energi cepat. Semakin banyak plutonium yang dihasilkan, semakin banyak energi yang dihasilkan. Komposisi reaktor CANDLE hanya berisi uranium alam setelah menjalankan inti awal yang mengandung uranium yang diperkaya, dianggap sebagai pemantik awal untuk memungkinkan reaktor terbakar *burn-up*.



Gambar 2.6 Strategi pembakaran model CANDLE (Sekimoto, 2010).

Strategi *burn up* CANDLE memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan strategi *burn up* yang diterapkan pada reaktor konvensional yaitu (Sekimoto, 2010) :

1. Strategi CANDLE tidak memerlukan mekanisme kontrol untuk *burn up*.
2. Karakteristik teras tidak berubah seiring berlangsungnya *burn up*.
3. Tidak perlu penyesuaian laju aliran dengan *orifice* selama berlangsungnya *burn up*.

4. Memungkinkan optimasi tingkat tinggi dari distribusi daya radial.
5. Masa hidup reaktor dapat dengan mudah diperpanjang dengan menambah tinggi teras.
6. Faktor multiplikasi tak hingga, k_{inf} bahan segar kurang dari satu.
7. Pemanfaatan yang efisien bahan bakar thorium.

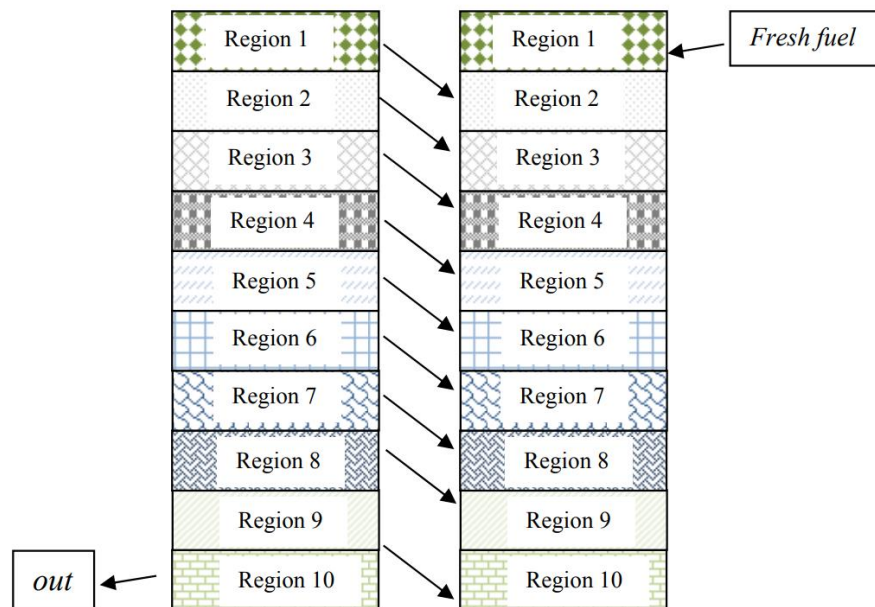
Akan tetapi, di sisi lain terdapat beberapa kelemahan dari strategi *burn up* CANDLE, diantaranya (Sekimoto, 2010):

1. Teras reaktor cenderung tinggi sehingga lebih banyak kehilangan tekanan pendingin.
2. Kemampuan menyesuaikan distribusi daya aksial terbatas.
3. Sulit untuk mempersiapkan teras awal.
4. Nilai *burn up* yang sangat tinggi sekitar 40% (400 MWd/t-HM).

MCANDLE (*Modified Constant Axial Shape of Neutron Flux, Nuclide Densities, and Power Profile during Life of Energy Production*) atau CANDLE yang dimodifikasi adalah bentuk evolusi dari strategi pembakaran CANDLE yang memperkenalkan wilayah-wilayah diskrit Sama seperti konsep CANDLE, bahan bakar segar dalam konsep MCANDLE adalah uranium alami tanpa pengayaan. Perbedaan yang muncul terletak pada konsep MCANDLE, yaitu dibagi menjadi beberapa daerah diskrit. Bahan bakar segar disuplai ke zona pertama, kemudian produk pembakaran dipindahkan ke zona kedua. Sementara itu, bahan bakar baru sedang diisi ulang di wilayah pertama. Selama periode pengisian berikutnya, produk pembakaran dipindahkan dari zona kedua ke zona ketiga dan seterusnya hingga mencapai zona terakhir. Produk pembakaran dari area terakhir dikeluarkan dari teras sebagai residu pembakaran. Area dapat dibagi dalam arah aksial, radial atau radial secara aksial dengan pembagian area yang berbeda (Sekimoto, 2014).

2.8 Strategi *Shuffling*

Strategi *shuffling* merupakan strategi yang digunakan supaya reaktor dapat beroperasi tanpa pengayaan dan menggunakan uranium alam sebagai bahan bakar. Pada strategi ini, teras reaktor dibagi menjadi 10 bagian yang memiliki volume sama secara radial. Pada awal operasi reaktor, masing-masing region diisi dengan bahan bakar uranium alam yang telah di *burn up* terlebih dahulu. Setelah 10 tahun pembakaran, hasil *burn up* pada region 1 di *shuffling* ke region 2, hasil *burn up* region ke-2 di *shuffling* ke region 3, begitu seterusnya sampai hasil *burn up* region ke-9 di *shuffling* ke region 10 dan hasil *burn up* region ke-10 dikeluarkan dari teras reaktor sehingga region 1 dapat diisi dengan bahan bakar baru (*fresh fuel*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Begitu seterusnya sampai 100 tahun operasi reaktor.



Gambar 2. 7 Sistem *shuffling* arah radial (Irka & Suud, 2015).

Strategi *shuffling* merupakan strategi yang diterapkan agar reaktor dapat beroperasi tanpa pengayaan dan menggunakan bahan bakar uranium alam. Uranium alam yang akan digunakan untuk bahan bakar reaktor terlebih dahulu di bakar dalam jangka waktu tertentu sehingga menghasilkan bahan bakar fisil (Irka & Suud, 2015).

Teras reaktor dibagi menjadi 10 *region* yang memiliki volume yang sama secara radial. Pada awal operasi reaktor, masing-masing *region* diisi dengan 21 bahan bakar uranium alam. Setelah 10 tahun pembakaran, hasil *burn up* pada *region* 1 di *shuffling* ke *region* 2, hasil *burn up region* ke-2 di *shuffling* ke *region* 3, begitu seterusnya sampai hasil *burn up region* ke-9 di *shuffling* ke *region* 10 dan hasil *burn up region* ke-10 dikeluarkan dari teras reaktor sehingga *region* 1 dapat diisi dengan bahan bakar baru (*fresh fuel*) begitu seterusnya sampai 100 tahun operasi reaktor (Su'ud *et al.*, 2013)

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan September 2022 – Maret 2023. Tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Mint 18.2 dan program SRAC (*Standard Thermal Reaktor Analysis Code*).

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.3.1 Spesifik umum desain reaktor

Desain reaktor yang digunakan adalah salah satu reaktor generasi ke-IV yaitu reaktor HTGR gas bersuhu tinggi. Spesifikasi desain reaktor yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi desain reaktor.

Parameter	Deskripsi
Daya	50 MWth
Tipe <i>pin cell</i>	<i>Hexagonal cell</i>
Geometri teras	<i>3-D Cylinder</i>
Jumlah <i>region</i> arah aksial	<i>7 region</i>
Periode <i>refueling</i>	70 tahun
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	UN dan PuN
Struktur (<i>cladding</i>)	<i>Graphite sleeve</i>
Pendingin (<i>coolant</i>)	Helium
Fraksi bahan bakar	36.14%
Fraksi struktur	39%
Fraksi pendingin	25.51%
Diameter pin/ <i>pitch</i>	1,8 cm

Pada reaktor ini, sel dibagi menjadi tiga *region* yang terdiri dari :

1. Bahan bakar (*fuel*)

Fraksi bahan bakar yang digunakan sebesar 36.14%, Bahan bakar yang digunakan dalam reaktor adalah uranium alam (UN-PuN).

2. Struktur (*cladding*)

(*Graphite sleeve*) blok hexagonal bahan bakar, bahan material struktur dapat ganti dengan *dummy block* bahan bakar. Keuntungan dari material grafit adalah penyerap neutron yang rendah, material yang stabil dalam lingkungan radiasi dan suhu tinggi mempunyai kekuatan mekanik yang baik dan tidak terkorosi oleh pendingin (helium), dan mempunyai sifat perpindahan panas yang baik.

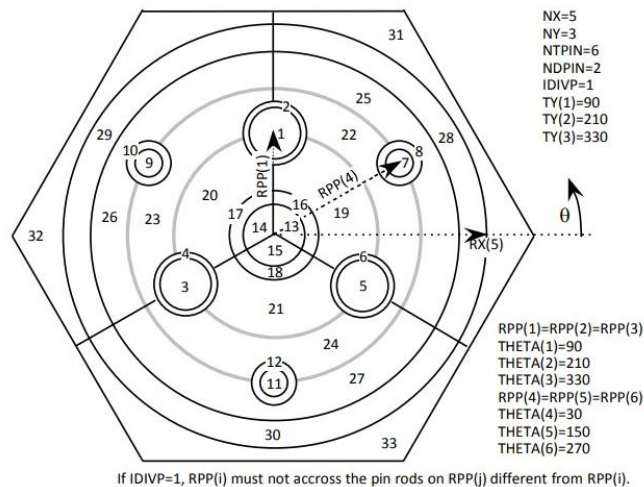
3. Pendingin (*coolant*)

Fraksi *coolant* yang digunakan sebesar 25.51%. Pendingin helium merupakan pendingin yang sering digunakan karena kecenderungannya rendah untuk menyerap neutron dan menjadi radioaktif. Selain itu, helium juga merupakan gas inert sehingga tidak mengalami reaksi kimia dengan material lain.

4. Geometri teras reaktor

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 digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.

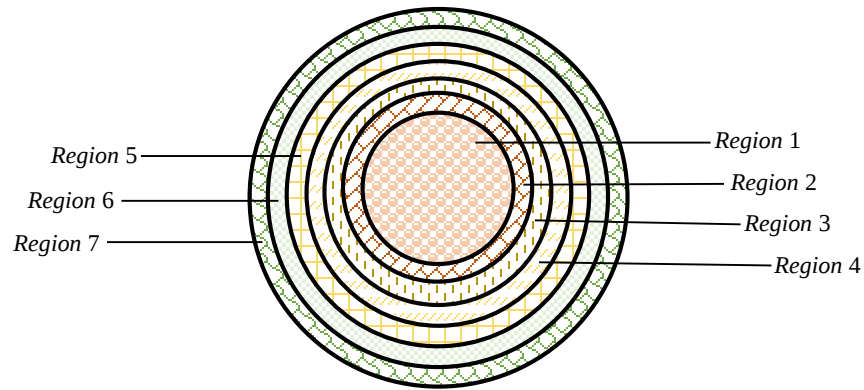
Pada penelitian ini desain reaktor yang digunakan bertipe silinder 3D R-Z. Ilustrasi teras dapat dilihat pada Gambar 3.2. Mendapatkan pendekatan serta kesesuaian pada model teoritis teras reaktor dapat dilakukan diskritisasi ruang dalam pembagian teras reaktor. Sesudah teras reaktor dibagi menjadi 7 bagian aksial. Untuk *region* pertama merupakan menempatkan bahan bakar *fresh fuel* selanjutnya *region* ke tujuh adalah reflektor.



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

3.3.2 Strategi *burn up modified CANDLE* arah radial

Strategi *burn up* ini diterapkan agar reaktor dapat beroperasi menggunakan bahan bakar uranium alam. Uranium alam dibakar dalam jangka waktu tertentu sehingga menghasilkan bahan bakar fisil yang dapat berfisi di dalam reaktor. Ilustrasi teras dapat dilihat pada Gambar 3.2.



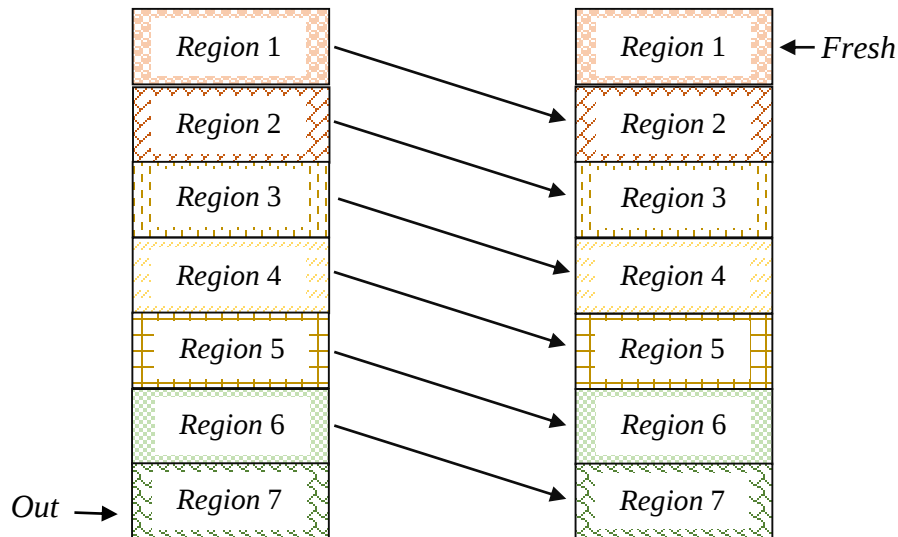
Gambar 3.2 Penampang *region* bahan bakar teras reaktor arah radial.

Teras reaktor dibagi menjadi 7 *region* dengan volume yang sama dalam arah aksial. Pada awal operasi, masing-masing *region* diisi dengan bahan bakar uranium alam dengan komposisi yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Komposisi uranium alam di setiap *region* teras reaktor

<i>Region</i>	Komposisi bahan bakar
<i>Region-1</i>	Bahan bakar <i>fresh</i> , yaitu uranium alam (nitrida)
<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 *burn up* 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 dalam proses ini dapat berlangsung selama 70 tahun operasi. Dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Sistem *shuffling* arah aksial.

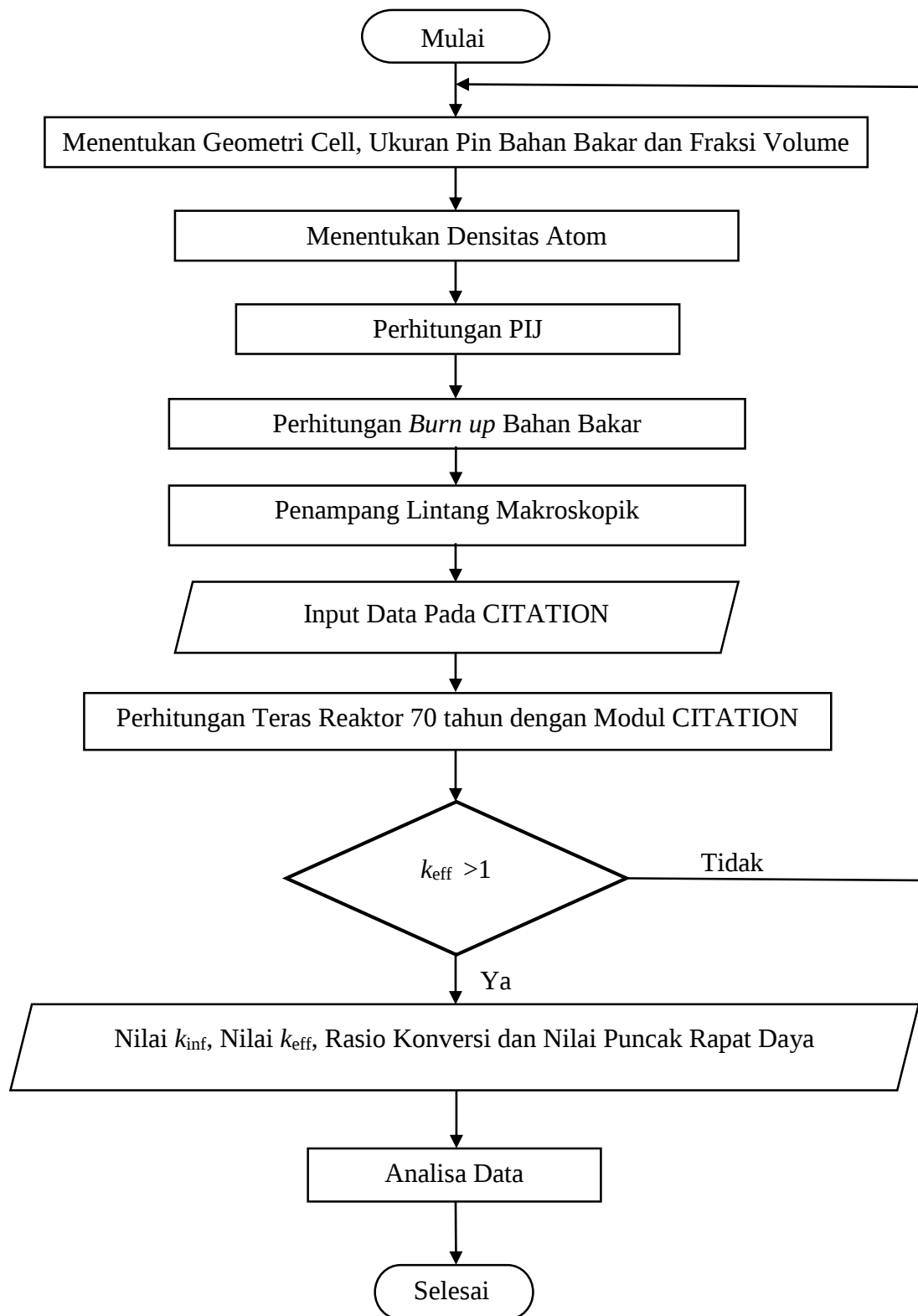
3.3.3 Prosedur perhitungan parameter neutronik menggunakan SRAC

Pengambilan data pada penelitian ini menggunakan program SRAC. Data yang digunakan adalah JENDL-3.2. SRAC akan melakukan perhitungan dan menghasilkan data penampang lintang makroskopik dan mikroskopik dari masing-masing material teras reaktor. Secara garis besar langkah dalam penelitian ini adalah :

1. Menentukan *geometri cell*, ukuran pin bahan bakar dan fraksi volume.
2. Menentukan densitas atom.
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 $k_{eff} > 1$.
8. Analisis hasil CITATION dari nilai *output* k_{inf} , k_{eff} , rasio konversi, dan nilai puncak rapat daya.

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



Gambar 3.4 Diagram alir perhitungan neutronik menggunakan SRAC.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Penerapan hasil *Modified* CANDLE desain teras reaktor HTGR model teras silinder dengan radius 120 cm dan tinggi 320 cm pada periode *burn up* selama 70 tahun reaktor beroperasi diperoleh nilai k_{inf} sebesar 1,1612 dan nilai k_{eff} sebesar 1,1612 menghasilkan reaktor dalam keadaan kritis.
2. Pada reaktor HTGR 70 tahun beroperasi selama periode *burn up* diperoleh nilai densitas atom U^{238} sebesar 2,3697 dan nilai densitas atom Pu^{239} sebesar 0,0758 hal ini bahan bakar tersebut dapat digunakan di dalam reaktor.
3. Desain Teras reaktor HTGR model teras silinder (r-z) dengan radius 120 cm dan tinggi 320 cm, pada rasio konversi diperoleh nilai maksimal sebesar 0,6622. Hal ini menunjukkan bahwa memenuhi keadaan standar optimal reaktor. Terdapat nilai rapat daya maksimum sebesar 288,7461 Watt/cm³ dengan faktor puncak daya sebesar 2,8351 (arah radial) dan 2,8351 (arah aksial) memenuhi standar keselamatan dalam desain teras reaktor.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan diharapkan pada penelitian selanjutnya dapat melakukan variasi bahan bakar, waktu periode *burn up* dan jenis reaktor yang berbeda agar mendapatkan desain reaktor yang lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul R. J. K., Barat, K., dan Prapatan, M. 1998. Soedyartomo Soentono. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III Serpong*. Hal. 20–22.
- Adiwardojo., Lasman, N., Ruslan. Pratama, M., dan Efendi, E. 2010 *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta: PDIN-BATAN.
- Ahied, M. 2015. Efisiensi Material Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Lwr (*Light Water Reactor*) dan PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). *Jurnal Pena Sains*. Vol. 2. No.1. Hal. 1-6
- Alimah, S., Dewita, E., dan Ariyanto, S. 2016. Analisis komparasi HTGR tipe prismatic dan pebble bed. *Jurnal Pengembangan Energi*. Vol. 16. Hal. 11–21.
- Alimah, S., dan Sriyono. 2016. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Kajian Sistem Pemurnian Helium Reaktor HTGR Berdaya Kecil*. Vol. 18. No. 2. Hal. 123–133.
- Ariani, M., Shafii, M. A., Abdullah, A. G., dan Su'ud, Z. 2010. Studi Awal Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbasis Bahan Bakar Uranium Alam. *Proceeding Seminar dan Workshop Nasional Pendidikan Teknik Elektro (SWNE)*. Hal. 93-98.
- Ariani, M., Su'ud, Z. dan Monado, F. 2013. Design of Gas-Cooled Fast Reactor 600MWth with Natural Uranium As Fuel Circle Input. *Jurna Ilmu Dasar*, Vol. 14. No. 1. Hal 11.

Bastori, I., Djoko, M., Pusat, B., Sistem, K., Nuklir, E., Tenaga, B., Nasional, N., Kuningan Barat, J., Prapatan, dan M., Selatan, J., R. 2017. Energi Nuklir Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 19. No. 2. Hal. 95–102.

BATAN. 2015. *Reaktor Daya Eksperimental*. (online) tersedia:
<http://www.batan.go.id/index.php/id/reaktor-daya-eksperimental-rde>. Diakses pada 3 juli 2022.

Budhi, W. 1999. *Penentuan Burn Up Bahan Bakar Reaktor Kartini Berdasarkan Aktivitas Produksi Fisi Cs-137*. Tesis. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.

Chanakya, Sarma., Rawat, R., dan Sharma, A. 2001. *Simulating of Using Control Rods to Control Nuclear Reactor Core*. University of Petroleum and Energy Studies. 28-34.

Csom, G., Reiss, T., Feher, S., dan Czifrus, S. 2012. Thorium as an alternative fuel for SCWRs. *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 41. Hal. 67–78.

Dewita, E., Dedi, P. dan Siti, A. 2011. *Sistem Kopling PLTN Tipe HTGR dengan Instalasi Produksi Hidrogen*. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV Jakarta Hal. 184-194.

Dewita, E. dan Alimah, S. 2017. Analisis Kinerja Bahan Bakar Reaktor Tipe HTGR Sebagai Penghalang Produk Fisi. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 19 No.1.

Duderstadt, J. J., dan Hamilton, J. H. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. Jhon WILEY DAN Sons Inc. USA.

Elsheikh, B. M. 2013. Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, Vol. 6. No.2. Hal. 63–70.

Fatkhiatul, A., Budi, S.W., Anam, C., dan Tjiptono, W.T. 2004. Distribusi Fluksneutron Sebagai Fungsi *Burn Up* Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Youngster Physisc Journal*. Vol.3 No.2. Hal. 108-109.

IAEA (International Atomic Nuclear Energy). 2005. *Thorium Fuel Cycle-Potential Benefits and Challenges*. International Atomic Energy Agency. Autria. Hal. 6-10.

Irka, F. H., dan Suud, 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.

Jatiman, S dan Soetrisnanto, A.Y. 1986. *Buku Materi Pokok Pengetahuan Nuklir*. Jakarta: Karunika. Hal. 12, 25, dan 30.

Kidd, S.W. 2009. *Nuclear Fuel Resource*. Nuclear Engineering Handbook. USA.

Lestari, A. M., dan Fitriyani, D. 2014. *Pengaruh Bahan Bakar UN-PiN, UC-PuC dan MOX Terhadap Nilai Breeding Ratio Pada Reaktor Pembiak Cepat*. Vol. 3. No. 1. Hal. 14–19.

Lewis. E.E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reaktor Physics*. Academic Press. USA.

Liun, E. dan Sunardi. 2014. Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan Dan Fosil. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 16 No. 3 Hal. 119-130.

Mairing, M.P., dan Prihatnadi, H. 2009. Tinjauan Bahan Moderator Untuk Kompenen Reaktor Nuklir. In *jurnal Perangkat Nuklir* Vol. 3. No. 5. Hal. 49–51.

Mardiansah, D., dan Zaki, S. 2008. Studi Desain Reaktor Temperature Tinggi Berumur Panjang Berpendingin Pb-Bi dan Pb Menggunakan Bahan Bakar Thorium. *Lokakarya Komputai dalam Sains dan Teknologi Nuklir* Hal. 55–64.

Menik, A., Zaki, S., Manado, F., Rijal, A., Arif, K., Ferhat, A., and Sekimoto, H. 2013. Optimization Of Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors With Natural Uranium As Fuel Cycle Input. *Applied Mechanics and Materials*. Vol.260-261. pp. 307-311.

Mumtaz, A. 2020. *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. (Online) Tersedia: <https://www.sainstron.com/2021/01/pembangkit-listrik-tenaga-nuklir.html>. diakses pada 29 Mei 2022.

Munita, L., Shafii, M. A., Irka, F. H., dan Su'ud, 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.

Ortensi, J. 2012. *Prismatic Modular High Temperature Gas Cooled Reactor*. IAEA Course on High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Tsinghua University. Beijing.

Parmanto, S., Harto, A. W., dan Sardjono, Y. 2011. Studi Desain Down Scale Teras Reaktor dan Bahan bakar PLTN Jenis Pebble Bed Modular Reactor- HTR 100Mwe. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13 No.2 Hal 194-205.

Pramutadi, A., dan Zaki, S. 2006. *Studi Desain Reaktor Temperature Tinggi Berumur Panjang Tanpa Pengisian Ulang Bahan Bakar Menggunakan Siklus Thorium*. Vol. 1. No. 13. Hal. 51–62.

Raja, A. K., Srivastava, A. P. and Dwivedi, M. 2006. *Power Plant Engineering*. New Delhi: New Age International Publisher. Hal. 322-407 dan 331- 332.

Rizal, M., Harto, A.W., dan Sihana. 2011 Analisis Transien pada Fixed Bed Nuclear Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13 No. 3 Hal 149-160.

Rokhman, S.N., Widiharto, A., dan Kusnanto. 2011. Performa Neutronik Bahan Bakar LiF-BeF₂-ThF₄-UF₂ pada Small Mobile-Molten Salt Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13 No.3. Hal. 173-185.

Rouf. 2014. Persamaan Deplesi Bahan Bakar Reaktor Nuklir. <https://nuclearthinker.file.wordpress.com/2014/04/srac.jpg>. Diakses Tanggal 5 Desember 2022 Pukul 10.00.

Sekimoto, H. 2010. *Light a CANDLE An Innovative Burn up Strategy of Nuclear Reactors*.

Sekimoto, H. 2014. *Modified CANDLE Burn up Scheme And Its Application For Long Life Pb-Bi Cooled Fast Rractor With Natural Uranium As Fuel Cycle*. Hal. 13-14.

Siswandi, T, S., dan Zaki S. 2017. *Startup Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbahan Bakar UN-PuN dengan Daya 800MWth*. Jurnal Positron. Vol. 7. No. 1. Hal 12-16.

Soentono, S. 1998. *Bahan-Bahan untuk Industri Reaktor Nuklir*. Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III. Hal. 22-31.

Su'ud, Z., Fitria, M., Ilham., Sarah. A., Menik A., Sekimoto, H., Waris, A., dan Sidik, P. 2017. *Design Study of Small Modified CANDLE Based Long Life Gas Cooled Fast Reactors*. Vol. 6. No. 14. Hal 6-14.

Su'ud, Z., Irka, F. H., Imam, T. T., Sekimoto, H., dan Sidik, P. 2013. *Desain study of Pb-Bi cooled fast reactors with natural uranium as fuel cycle input using special shuffling strategy in radial direction*. *Advanced Materials Research*. Hal. 530–535.

Supriatna, P. 2009. *Kajian awal kogenerasi*. Hal. 125–130.

Syarifah, R. D. dan Maemunah, I. R. 2015. Perhitungan Neutronik Teras Homogen dari High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) dengan Bahan Bakar Uranium Nitrida. *Prosiding Simposium Nasional Inovasi Dan Pembelajaran Sains*, Vol.1, Hal. 41–44.

Takaki, N., dan Mardiansah, D. 2012. *Core design and deployment strategy of heavy water cooled sustainable thorium reactor*. Vol. 4. No. 8. Hal. 1933–1945.

Ohaka, Y., Takashi W., dan Hiroshi S. 2005. *Research Laboratory for Nuclear Reactors*. Tokyo Institute of Technology, Okayama, Meguro-ku, Tokyo.

Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihasi, K. 2007. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA. Hal. 4-26.

Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihasi, K. 2002. *A General Description and Input Intruction*. Japan. JAERI. Hal. 5, 64, dan 186.

Wardhana, W., A. 2007. *Teknologi Nuklir: Proteksi Radiasi dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Dani. Hal. 126-127.

Walter, A.E., & Reynolds, A.B. 1981. *Fast Breeder Reactor*. USA: Pergmamon Press.

Yan, M., & Sekimoto, H. 2008. *Design research of small long life CANDLE fast reactor*. Hal. 18–36.

Zweifel, P. F. 1973. *Reaktor Physics*. USA. McGrow-Hill. Hal. 74.