

**ANALISIS *BURN UP* DAUR ULANG PLUTONIUM DAN AKTINIDA
MINOR PADA *GAS COOLED FAST REACTOR* (GCFR)
MENGUNAKAN SRAC COREBN**

Skripsi

Oleh

Ahmad Saiful Munir



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

ANALISIS *BURN UP* DAUR ULANG PLUTONIUM DAN AKTINIDA MINOR PADA *GAS COOLED FAST REACTOR* (GCFR) MENGUNAKAN SRAC COREBN

Oleh

Ahmad Saiful Munir

Penelitian mengenai analisis *burn up* daur ulang plutonium dan aktinida minor pada *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) menggunakan SRAC COREBN telah dilakukan. Penelitian ini menggunakan bahan bakar campuran uranium, plutonium dan aktinida minor. Analisis dilakukan dengan simulasi komputasi menggunakan kode COREBN yang merupakan kode tambahan pada SRAC. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan plutonium dan aktinida terhadap komposisi bahan bakar nuklir pada akhir operasi reaktor dan terhadap nilai faktor multiplikasi (k_{eff}) pada akhir periode *burn up* reaktor. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah nilai akhir faktor multiplikasi (k_{eff}) sebesar 1,19964 dan nilai rasio konversi sebesar 0,766813 pada periode *burn up* 1515 hari serta nilai rapat daya maksimum sebesar 125,85 watt/cm³, nilai rapat daya relatif pada radius y sebesar 1,230263 dan radius x sebesar 1,19737. Nilai densitas atom mengalami perubahan jumlah nuklida pada jenis nuklida U²³⁵, U²³⁸, Pu²³⁹, Pu²⁴¹, Np²³⁷ dan Am²⁴³ pada akhir periode *burn up*.

Kata Kunci : *Burn Up*, COREBN, GCFR, Plutonium dan aktinda minor, SRAC

ABSTRACT

ANALYSIS OF BURN UP RECYCLING OF PLUTONIUM AND MINOR ACTINIDE IN GAS-COOLED FAST REACTOR (GCFR) USING SRAC COREBN

By

Ahmad Saiful Munir

Research on the analysis of the burn up of recycled plutonium and minor actinides in a Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) using SRAC COREBN was carried out. This research uses a mixture of uranium, plutonium, and minor actinides as fuel. The analysis is performed in a computational simulation using the COREBN code, which is an additional code in SRAC. The purpose of this study is to determine the effect of adding plutonium and actinide on the composition of nuclear fuel at the end of reactor operation and to the value of the multiplication factor (k_{eff}) at the end of the reactor burn period. The results obtained in this study are the final value of the multiplication factor (k_{eff}) of 1.19964 and the conversion ratio value of 0.766813 in the burn-up period of 1515 days and the maximum power density value of 125.85 watt/cm³, the relative power density value on the y radius is 1.230263 and the x radius is 1.19737. The atomic density value changes in the number of nuclides in the nuclide types U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{241} , Np^{237} , and Am^{243} at the end of the burning period.

Keywords: *Burn Up, COREBN, GCFR, Plutonium and minor actinides, SRAC*

**ANALISIS *BURN UP* DAUR ULANG PLUTONIUM DAN AKTINIDA
MINOR PADA *GAS COOLED FAST REACTOR* (GCFR)
MENGUNAKAN SRAC COREBN**

Oleh

Ahmad Saiful Munir

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA SAINS

Pada Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

Judul Skripsi : **ANALISIS *BURN UP* DAUR ULANG
PLUTONIUM DAN AKTINIDA MINOR
PADA *GAS COOLED FAST REACTOR*
(GCFR) MENGGUNAKAN SRAC COREBN**

Nama Mahasiswa : **Ahmad Saiful Munir**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1817041045**

Jurusan : **Fisika**

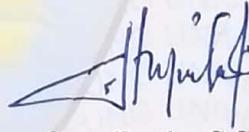
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

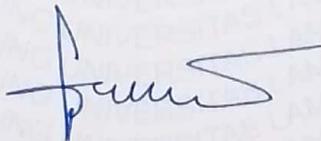


Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 197512192000122003



Suprihatin, S.Si., M.Si.
NIP. 197304141997022001

2. Ketua Jurusan Fisika

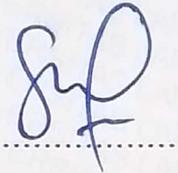


Gurum Ahmad Pauzi, S.Si.,M.T.
NIP. 198010102005011002

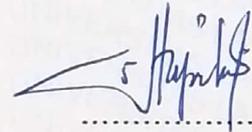
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

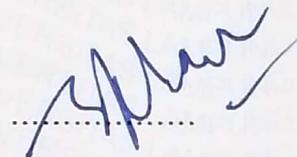
Ketua : **Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.**



Sekretaris : **Suprihatin, S.Si., M.Si.**



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



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Supto Dwi Yuwono, M. T.
NIP. 19740705 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **30 November 2022**

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, 30 November 2022

Penulis,



Ahmad Saiful Munir
NPM. 1817041045

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tulang Bawang pada tanggal 11 April 2000. Penulis adalah anak kedua dari 3 bersaudara pasangan Bapak Siswo Hadi dan Ibu Salami. Penulis menempuh Pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SDN 1 Mercu Buana pada tahun 2006-2012. Kemudian Penulis melanjutkan Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 1 Way Kenanga pada tahun 2012-2015 dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Way Kenanga pada tahun 2015-2018. Selanjutnya penulis diterima di Jurusan Fisika, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama berkuliah penulis mengikuti organisasi kampus seperti anggota bidang Saintek Himafi 2019/2020. Penulis juga berkesempatan mengikuti program PERMATASARI atau pertukaran mahasiswa antar PTN di seluruh wilayah Indonesia barat di Institut Teknologi Sumatera pada tahun 2021. Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Lab Fisika Dasar, Jurusan Fisika dengan judul “Pembuatan Video Praktikum Fisika Dasar II sebagai Pengganti Praktikum di Masa Pandemi Covid-19”. Pada masa akhir perkuliahan, penulis mengikuti program kampus

merdeka Studi Independen di PT. Ruang Raya Indonesia pada program *Data Bussiness and Operation Analytics*. Selanjutnya, penulis melakukan penelitian “Analisis *Burn Up* Daur Ulang Plutonium dan Aktinida Minor pada *Gas Cooled Fast Reactor* (CCFR) Menggunakan SRAC COREBN” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

MOTTO

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

(QS. Al-Insyirah: 6-8)

Jangan membenci siapapun, tidak peduli berapa banyak mereka bersalah padamu. Hiduplah dengan rendah hati, tidak peduli seberapa kekayaanmu. Berpikirlah positif, tidak peduli seberapa keras kehidupanmu. Berikanlah banyak, meskipun menerima sedikit. Tetaplah berhubungan dengan orang-orang yang telah melupakanmu, dan ampuni yang bersalah padamu. Jangan berhenti berdo'a untuk yang terbaik bagi orang yang kau cintai.

(Ali bin Abi Thalib)

Hidup Sekali, Hiduplah yang berarti

(KH. Imam Zarkasyi)

Tidak peduli seberapa tertinggal kamu dalam hidup. Kerjakan apapun yang menurutmu benar dan bersikap ikhlas serta serahkan semua ketentuan hidup hanya pada sang pemilik kehidupan. Niscaya Tuhan akan memberikan hal-hal baik pada hidupmu saat waktunya telah tiba.

(Ahmad Saiful Munir)

PERSEMBAHAN

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

Kedua Orang tuaku

Bapak Siswo Hadi & Ibu Salami

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

Kakakku dan adikku serta keluarga besar

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

Teman-teman Fisika Angkatan 2018

Terimakasih untuk canda tawa dan dukungan dari awal hingga akhir perkuliahan. Semoga kalian semua dilancarkan jalan kedepannya dan diberkahi dimanapun berada.

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan, rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Analisis *Burn up* Daur Ulang Plutonium dan Aktinida Minor pada *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) Menggunakan SRAC COREBN”**.

Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar S1 dan juga melatih penulis untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan masyarakat umum.

Bandar Lampung, 30 November 2022

Penulis,

Ahmad Saiful Munir

SANWACANA

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

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang mendukung dari awal sampai akhir penelitian ini.
2. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. selaku pembimbing II yang telah mengoreksi format penulisan, memberikan kritik dan saran selama penulisan skripsi.
3. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si. selaku pembahas yang telah mengoreksi kekurangan, memberi kritik dan saran selama penulisan skripsi.
4. Ibu Sri Wahyu Suciyati, S.Si., M.Si selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasehat dari awal perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku ketua jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung
8. Bapak Dr. Eng Suropto Dwi Yuwono, M.T. selaku Dekan FMIPA universitas lampung

9. Karyawan dan Staff di lingkungan Jurusan Fisika yang telah membantu penulis dalam administrasi dan ruangan.
10. Bapak dan ibu yang senantiasa mendoakan dan memberi dukungan tiada henti untuk kelancaran studiku.
11. Kakak dan adik serta keponakanku. Terima kasih untuk canda tawa dan dukungannya.
10. Lapet Family (Adi Sucipto, Faradila Nabila Putri, Rosanti Sitohang, Eza Ariyani, Tiara Widiastuti, Shabrina Yakosati, Mega Pertiwi, Selvi Hidayanti, Mirdha Khamidah, Sayyidah Wulan Khairunnisa, Chandra Gumilang, Ester Novi Andriani, Mayola Prantica, Wayan Putri Yanti, Dendi Rosandi, Hauzan Khairullah Miftah) untuk semua dukungan tanpa penghakiman dan tempat berkeluh kesah selama pengerjaan skripsi ini.
11. Silvi Indah K, Nindya Aisyah I, Desi Setianingsih, Grace Pricilya M, Nindia Agustin, Juana Santika dan Intan W terima kasih untuk bantuannya selama ini.
12. Teman-teman laboratorium Fisika (Anisyah Anggraini, Wiwin Sulistiani, Yessi Efridahniar dan Firmanda Fardony) Terimakasih untuk canda tawa dan kerbersamaanya.
12. Atu Tamimah Hari, Tasya Praditha Ningtyas, Ria Charoline Br Ginting, Riftaul Kurniawati dan Risdha Ayu Shinta Dewi selaku rekan penelitian yang telah membantu dan juga tempat berdiskusi selama pengerjaan skripsi ini.
13. Komunitas Konsultasi Luar Kampus (KLK) dan terkhusus Kak Ayu Jati P yang telah membantu penulis saat awal-awal penulisan skripsi.

14. Pak Wisnuwardhana dan Teh Fitri Miftasani yang telah membantu penulis dalam instalasi linux.

15. Rekan-rekan seperjuangan Fisika FMIPA angkatan 2018 yang selama ini memberikan semangat.

16. Seluruh pihak yang telah membantu dan menyemangati dalam menyelesaikan skripsi ini

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, 30 November 2022

Ahmad Saiful Munir

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	vxv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xixi
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Nuklir	7
2.2 Komponen Reaktor Nuklir	8
2.3 <i>Gas Cooled Fast Reactor</i> (GCFR)	10
2.4 Limbah Radioaktif	12
2.5 Plutonium dan Aktinida Minor	14
2.6 Pengelolaan Limbah Bahan Bakar Nuklir	15
2.7 <i>Burn Up</i>	18
2.8 Faktor Multiplikasi (k_{eff})	19
2.9 <i>Standard Reactor Analysis Code</i> (SRAC)	21
2.10 COREBN	23

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	25
3.3 Prosedur Penelitian	25
3.4 Diagram Alir Penelitian	29

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Fraksi volume bahan bakar, <i>cladding</i> dan <i>coolant</i>	32
4.2 Perhitungan Densitas atom	34
4.3 Perhitungan menggunakan PIJ	38
4.4 Input Data pada HIST	39
4.5 Perhitungan pada COREBN	40
4.6 Perubahan Periode <i>Burn Up</i>	42
4.7 Rapat Daya (<i>Power density</i>)	45
4.8 Densitas atom selama <i>burn up</i>	48

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Skema reaktor GCFR (Handayani dan Zaki, 2015).....	11
Gambar 2. Prinsip Keseimbangan Nuklida (Handayani dan Zaki, 2015)	19
Gambar 3. Grafik banyaknya neutron terhadap waktu dalam sebuah reaktor (Lewis, 2008).....	20
Gambar 4. Struktur dari Program SRAC (Okumura, 2007)	23
Gambar 5. Model perhitungan burn up inti 2-dimensi (Wulandari, 2020)	28
Gambar 6. Diagram alir penelitian	30
Gambar 7. Radius sel bahan bakar	32
Gambar 8. Nilai k_{eff} dengan komposisi Pu+Ma yang berbeda	38
Gambar 9. Grafik nilai k_{eff}	41
Gambar 10. Grafik nilai rasio konversi	42
Gambar 11. Grafik nilai k_{eff} setelah penambahan periode	43
Gambar 12. Grafik nilai rasio konversi setelah penambahan periode	44
Gambar 13. Konfigurasi 1/6 permukaan teras reaktor (Wulandari, 2020).....	45
Gambar 14. Rapat daya relatif pada arah (y).....	46
Gambar 15. Rapat daya relatif pada arah (x).....	47
Gambar 16. Grafik perubahan densitas atom pada U^{235}	48
Gambar 17. Grafik perubahan densitas atom pada U^{236}	49

Gambar 18. Grafik perubahan densitas atom pada U^{238}	49
Gambar 19. Grafik perubahan densitas pada atom Pu^{238}	50
Gambar 20. Grafik perubahan densitas atom pada Pu^{239}	50
Gambar 21. Grafik perubahan densitas atom pada Pu^{240}	51
Gambar 22. Grafik perubahan densitas atom pada Pu^{241}	51
Gambar 23. Grafik perubahan densitas atom pada Pu^{242}	52
Gambar 24. Grafik perubahan densitas atom pada Np^{237}	53
Gambar 25. Grafik perubahan densitas atom pada Am^{241}	53
Gambar 26. Grafik perubahan densitas atom pada Am^{242}	54
Gambar 27. Grafik perubahan densitas atom pada Am^{243}	54
Gambar 28. Grafik perubahan densitas atom pada Cm^{245}	55
Gambar 29. Model rantai peluruhan pada nuklida berat (model : u4cm6~)	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Spesifikasi reaktor GCFR (GIF IV, 2019)	12
Tabel 2. Komposisi Plutonium dan Aktinida minor (B.D Murphy, 1996)	26
Tabel 3. Fraksi volume tiap-tiap material pada teras reaktor	33
Tabel 4. Komposisi 8% dengan U235 3,1%, U238 88,9%, Pu 7,20% dan Aktinida Minor 0,80%	35
Tabel 5. Komposisi 10% dengan U235 3,3%, U238 86,7%, Pu 9.0% dan Aktinida Minor 1.0%	36
Tabel 6. Komposisi 12% dengan U235 3,5%, U238 84,5%, Pu 10.80% dan Aktinida Minor 1.20%	37
Tabel 7. Hasil nilai k_{eff} dan CR.....	40
Tabel 8. Hasil nilai k_{eff} dan rasio konversi setelah perubahan periode burn up....	43

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan energi listrik diproyeksikan meningkat mencapai 536 TWh (Terra Watt hour) pada tahun 2025 dan meningkat menjadi 2.162 TWh pada tahun 2050 (rata-rata sebesar 6,5% pertahun) yang didominasi oleh pembangkit listrik berbahan bakar batu bara (68%) (Dewan Energi Nasional, 2014). Penggunaan pembangkit listrik yang bersumber pada energi fosil minyak bumi dan batu bara memiliki berbagai keterbatasan. Misalnya ketersediaan sumbernya, dan juga dampak lingkungan yang ditimbulkan dari penggunaan energi tersebut. Menyadari hal tersebut dan kebutuhan permintaan terhadap listrik yang semakin besar, akibat pertumbuhan penduduk dan kebutuhan pembangunan, pemerintah melalui Peraturan Presiden No. 5 tahun 2006 menetapkan kebijakan bauran energi (*energy mix*) sebagai solusi masalah energi yakni dengan mengurangi penggunaan minyak bumi dan batu bara pada tahun 2025 menjadi masing-masing sebesar 20% dan 33%. Sebagai penggantinya, pemerintah menetapkan penggunaan energi baru dan terbarukan yang terdiri dari *biofuel*, energi angin, air, panas bumi dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) (Peryoga *et al.*, 2007).

PLTN dapat diperkenalkan sebagai salah satu alternatif pembangkit listrik pada tahun 2024 dengan kapasitas terpasang 2000 MW dan kemudian diproyeksikan

akan tumbuh mencapai 36000 MW pada tahun 2050 (Herutomo, 2015). Riset dan inovasi desain reaktor nuklir untuk pemanfaatan energi di masa mendatang semakin berkembang pesat. Hal ini dikarenakan energi nuklir merupakan salah satu pilihan dalam mengatasi keterbatasan energi fosil yang ada (Novalianda, 2019). Reaktor nuklir merupakan suatu tempat yang didesain sedemikian rupa sehingga di dalamnya dapat terjadi reaksi pembelahan inti secara berantai. (Nurkholilah dan Fitriyani, 2019).

Prinsip kerja reaktor nuklir sama dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada bahan bakar yang digunakan dan sumber energi. Bahan bakar reaktor nuklir dibedakan atas dua jenis material yaitu bahan fisil contohnya uranium 235, plutonium 239 dan bahan fertil seperti uranium 238, thorium 232 (Novalianda *et al.*, 2020). Saat ini reaktor nuklir yang dikembangkan adalah reaktor nuklir generasi IV. Reaktor generasi IV memiliki keunggulan di bidangnya antara lain: menghasilkan daya listrik, dapat menghasilkan energi termal dengan siklus bahan bakarnya tertutup, dan sistem keselamatannya dibuat secara *inherent* dan *passive safety*. Salah satu jenis reaktor generasi IV yang saat ini dikembangkan adalah *Gas-cooled Fast Reactor* (GCFR), yaitu reaktor cepat yang memanfaatkan spektrum neutron cepat dan menggunakan helium sebagai pendingin (Nurkholilah dan Fitriyani, 2019). Keunggulan dari reaktor GCFR meliputi pengurangan biaya pokok, keamanan nuklir yang dipertinggi, limbah nuklir yang diperkecil, dan pengurangan lebih lanjut dalam risiko pembuatan senjata (Driscoll dan Heizler, 2005).

Selain menghasilkan energi listrik yang cukup besar, reaktor nuklir yang telah dioperasikan memiliki konsekuensi akibat dari pemanfaatannya, yaitu limbah radioaktif berupa produk fisi dan aktinida sebagai produk samping yang tidak dapat dicegah. Akumulasi limbah radioaktif yang terus meningkat dari tahun ke tahun, khususnya plutonium (*plutonium*, Pu) yang diproduksi hampir 250 kg pertahun, aktinida minor (*minor aktinide*, MA) dan produk fisi lainnya (Marsodi dan Zuhair, 2008).

Dari statistik global pengelolaan bahan bakar bekas, memperlihatkan bahwa bahan bakar bekas yang dikeluarkan setiap tahun adalah 10.000 tHM (ton Heavy Metal) dan saat ini akumulasinya mencapai 225.000 tHM. Terdapat banyak solusi yang dilakukan untuk mengatasi bahan bakar bekas yang semakin meningkat setiap tahun. Di negara-negara eropa dan jepang serta negara lain dilakukan pemrosesan ulang bahan bakar bekas tersebut. Uranium dan plutonium dipisahkan dari nuklida-nuklida yang lain dan kemudian diolah menjadi bahan bakar nuklir baru. Penggunaan sumber bahan bakar bekas memberikan banyak keuntungan seperti beban limbah yang berkurang dan juga penggunaan kembali plutonium sangat efektif dalam hal penghematan penggunaan sumber bahan bakar uranium, memperbanyak sumber bahan bakar nuklir dan pengendalian bahan plutonium dikarenakan plutonium dapat diubah dan dimanfaatkan sebagai senjata nuklir, maka penggunaan kembali plutonium sebagai bahan bakar sangat penting untuk mencegah penyebarannya (Susilo, 2000).

Studi mengenai daur ulang plutonium dan aktinida minor telah beberapa kali dilakukan. Waris *et al.*, (2009) melakukan penelitian mengenai daur ulang

transuranium di reaktor *Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan analisis *burn up* 3-D menggunakan program SRAC kode COREBN dengan konsentrasi plutonium dan aktinida minor yang digunakan adalah 8%, 10% dan 12% sedangkan pengayaan uranium antara 3,1%-3,5%. Berdasarkan penelitian menggunakan konsentrasi plutonium dan aktinida tersebut maka dapat mengurangi pengayaan uranium yang dimuat dalam bahan bakar menjadi 2,7% , 1,52% dan 1,32%.

Mengacu pada penelitian sebelumnya, maka dilakukan penelitian dengan mengganti jenis reaktor dari PWR menjadi GCFR. Selanjutnya untuk konsentrasi plutonium dan aktinida minor yang digunakan adalah 8%, 10% dan 12% lalu analisis *burn up* dilakukan dengan program *System Reactor Analysis Code* (SRAC) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI). Program ini digunakan untuk membantu perhitungan sel dan kemudian menggunakan kode tambahan untuk perhitungan *burn up* pada teras menggunakan kode COREBN (Okumura, 2007).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh plutonium dan aktinida minor terhadap komposisi bahan bakar yang digunakan pada akhir operasi reaktor GCFR?
2. Bagaimana pengaruh komposisi bahan bakar terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah GCFR.
2. Pendingin yang digunakan adalah gas helium.
3. Geometri sel yang digunakan berbentuk silinder.
4. Komposisi plutonium dan aktinida minor yang digunakan adalah 8%, 10% dan 12%.
5. Perhitungan *burn up* pada sel bahan bakar menggunakan kode SRAC-PIJ dan untuk perhitungan *burn up* pada teras menggunakan kode COREBN.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh plutonium dan aktinida minor terhadap komposisi bahan bakar yang digunakan pada akhir operasi reaktor GCFR
2. Mengetahui pengaruh komposisi bahan bakar terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai solusi permasalahan krisis energi di Indonesia.

2. Memberikan solusi pengolahan limbah dari penggunaan reaktor nuklir di Indonesia maupun di negara luar.
3. Memberikan sumbang saran penelitian reaktor nuklir dengan bahan bakar Plutonium dan aktinida minor.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir merupakan suatu tempat yang didesain sehingga memungkinkan terjadinya reaksi pembelahan inti secara berantai. Saat ini reaktor nuklir yang dikembangkan adalah reaktor generasi IV. Reaktor generasi IV adalah jenis reaktor daya yang lebih inovatif dari reaktor generasi sebelumnya (Nurkholilah dan Fitriyani, 2019). Pada reaktor nuklir, inti atom yang berat (misalnya U235) dapat membelah menjadi dua bagian oleh neutron, di mana dapat dihasilkan energi yang relatif besar serta neutron-neutron baru yang selanjutnya dapat menyebabkan proses pembelahan inti. Jika satu neutron yang dihasilkan dari pembelahan inti menyebabkan pembelahan inti yang baru, akan dihasilkan reaksi berantai yang stasioner, di mana dibangkitkan energi yang berkelanjutan. Reaksi fisi ini akan melepaskan energi kira-kira sebesar 200 MeV ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$) (Agung, 2017).

Reaksi fisi di dalam reaktor akan menyebabkan terjadinya perubahan dari jumlah neutron, dimana perubahan tersebut dapat berupa penambahan dan pengurangan dari jumlah neutron tersebut (Zweifel, 1973). Bahan bakar reaktor yang biasa digunakan untuk sumber energi dalam reaktor nuklir adalah ${}_{92}\text{U}^{235}$, hal ini berkaitan dengan bahan bakar reaktor nuklir dapat dibedakan menjadi

dua yakni bahan bakar fisil dan fertil. Contoh bahan bakar fisil antara lain ${}_{94}\text{Pu}^{233}$, ${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{92}\text{U}^{239}$, dan ${}_{92}\text{Pu}^{241}$. Sedangkan yang termasuk bahan bakar fertil yaitu ${}_{90}\text{Th}^{232}$, ${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{94}\text{Pu}^{238}$, dan ${}_{94}\text{Pu}^{240}$ (Zhang *et al.*, 2014).

2.2 Komponen Reaktor Nuklir

Komponen reaktor merupakan bagian yang harus ada pada sebuah reaktor nuklir untuk mengendalikan laju pembelahan atau reaksi fisi (Yvon dan Carre, 2009).

Komponen dasar dari sebuah reaktor nuklir adalah:

a) Bahan Bakar

Bahan bakar reaktor nuklir adalah nuklida-nuklida yang dapat membelah (*fissionable nuclide*). Bahan bakar yang umumnya dipakai untuk reaktor nuklir saat ini adalah nuklir uranium dan plutonium oksida yang biasanya berbentuk silinder pejal dengan tinggi dan berdiameter sekitar 1 cm dan dinamakan *pellet* (Peryoga *et al.*, 2007). Terdapat dua jenis bahan bakar yakni bahan fisil dan bahan fertil. Untuk bahan fisil adalah unsur atau atom yang dapat secara langsung membelah apabila dikenai neutron, sedangkan bahan fertil merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat secara langsung membelah setelah dikenai neutron (Lewis, 2008).

b) Moderator

Kebanyakan reaktor nuklir saat ini menggunakan air ringan (H_2O) atau air berat (D_2O) sebagai moderator. Air juga bertindak sebagai pendingin bahan bakar di reaktor. Air ringan memiliki kepadatan 1 gr/cm^3 , titik lebur 0°C serta titik didih 100°C , kemudian untuk air berat sendiri memiliki kepadatan $1,11 \text{ gr/cm}^3$, titik lebur $3,8^\circ\text{C}$ dan titik didih 101°C (Price *et al.*, 2013). Reaktor

harus didinginkan karena panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi dalam bahan bakar akan menghasilkan suhu sekitar seribu derajat celcius di pusat alam. Jika tidak didinginkan suhu ini akan naik dan melelehkan bahan bakar yang menyebabkan kontaminasi radioaktif. Selain itu pendingin juga memindahkan panas keluar reaktor sehingga dapat digunakan sebagai pembangkit listrik dan juga berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (2-10 MeV) menjadi energi neutron termal (0,02-0,04 eV)

c) Batang Kendali (*control rod*)

Batang kendali merupakan komponen yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Bahan yang umum digunakan untuk batang kendali adalah boron karbida (B_4C) atau komposit perak-indium-kadmium yang dikemas dalam wadah logam. Batang kendali ini dimasukan di tengah bahan bakar, bisa turun atau naik. Selain itu batang kendali reaktor biasanya juga dikendalikan dengan menambahkan larutan boron ke pendingin atau moderator yang disebut *chemical shim* (Peryoga *et al.*, 2007)

d) *Shielding* (perisai)

Reaktor adalah sumber radiasi yang kuat. Tidak hanya personel operasi dan masyarakat yang perlu dilindungi dari radiasi ini, komponen reaktor juga perlu dilindungi dari radiasi yang kuat. Kemudian bahan penyerap dimasukkan untuk melemahkan radiasi neutron dan gamma yang dihasilkan. Pelindung panas digunakan untuk mengurangi radiasi yang dipancarkan dari teras ke tingkat yang tidak menghasilkan panas yang signifikan dan dengan demikian merusak komponen reaktor (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

e) Reflektor (*Reflector*)

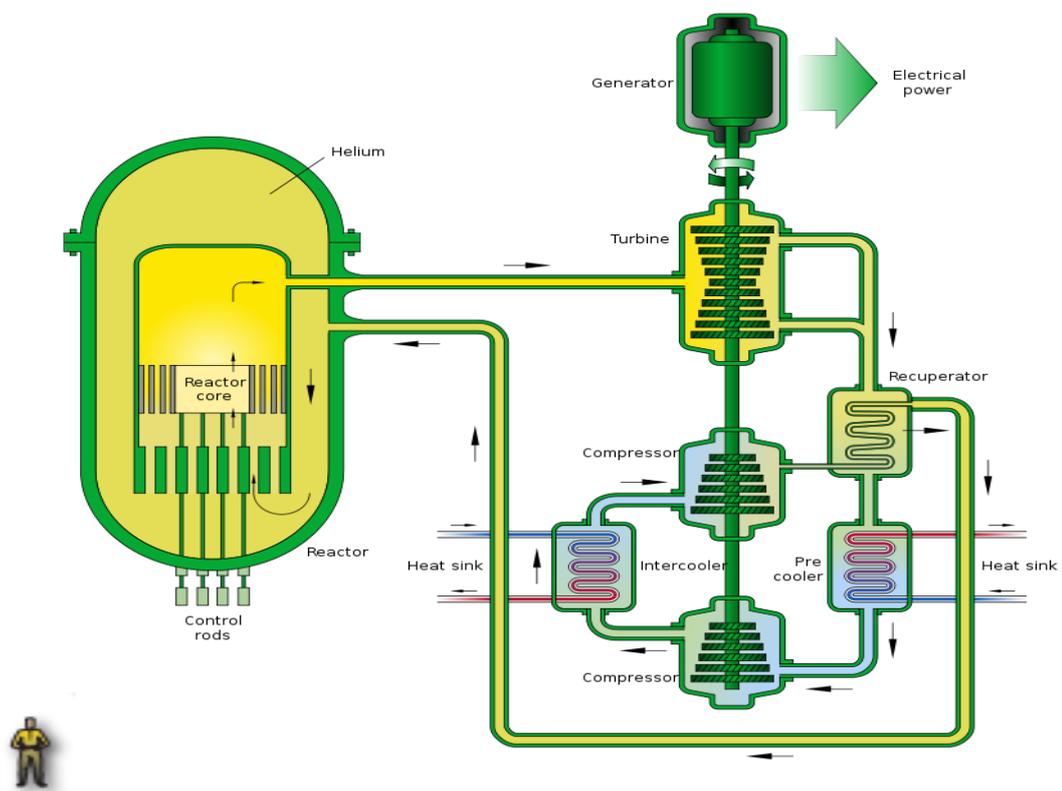
Bahan yang biasanya digunakan sebagai reflektor dalam reaktor nuklir adalah grafit dan berilium. Reflektor adalah suatu cara yang dilakukan dengan mengelilingi atau menyelubungi teras reaktor agar ketika terjadi reaksi fisi di dalam teras reaktor, neutron yang keluar dari pembelahan bahan fisil tidak dapat lolos keluar dari teras reaktor atau hilang dari sistem. Keadaan dimana neutron yang hilang atau keluar dari teras reaktor memberikan kerugian secara ekonomi dikarenakan neutron tersebut tidak dapat digunakan untuk proses fisi selanjutnya (Yulianto, 1996).

2.3 Gas Cooled Fast Reactor (GCFR)

Salah satu jenis reaktor generasi IV adalah *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) yaitu reaktor cepat yang memanfaatkan spektrum neutron cepat dan menggunakan helium sebagai pendingin. dengan fitur spektrum neutron cepat dan beroperasi dengan sistem pembakaran tertutup (*closed fuel cycle*). 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 (Handayani dan Zaki, 2015).

Salah satu konsep paling awal untuk GCFR dikembangkan oleh *General Atomics*. GCFR akan menghasilkan 835 MW daya termal dengan bahan bakar oksida campuran yang diatur dalam pin dan suhu outlet pendingin 550°C. GCFR adalah tipikal reaktor yang memiliki inti berpendingin helium dengan bahan bakar keramik yang beroperasi pada suhu tinggi, yaitu 14500°C dalam desain *General Atomics*

dan suhu *cladding* mencapai 1000°C . Spektrum neutron cepat memfasilitasi pembakaran uranium, thorium dan plutonium dengan akumulasi minimal aktinida kecil. GCFR melalui kombinasi spektrum neutron cepat dan daur ulang penuh aktinida dapat meminimalkan produksi isotop limbah radioaktif berumur panjang, dengan membakar bahan fisil dan bahan fertil yang tersedia termasuk uranium yang habis dari pabrik pengayaan. (Idaho National Laboratory, 2017). Gambar 1 merupakan skema dari reaktor GCFR.



Gambar 1. Skema reaktor GCFR (Handayani dan Zaki, 2015)

Secara umum spesifikasi dari reaktor GCFR ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi reaktor GCFR (GIF IV, 2019)

No	Parameter	Spesifikasi
1	Daya termal	2400 MW
2	Daya teras	75 MWth
3	Rata-rata densitas daya teras	100 MW/m ³
4	Pendingin (<i>coolant</i>)	Helium
5	Geometri	Silinder
6	Tekanan Pendingin	7 MPa
7	Temperatur <i>inlet</i>	450 °C
8	Temperatur <i>outlet</i>	850 °C
9	Laju alir	940,1 kg/s

2.4 Limbah Radioaktif

Masalah yang muncul dalam penggunaan energi nuklir untuk pembangkit listrik adalah masalah penerimaan masyarakat (*public acceptance*) merupakan masalah berat yang harus dilewati. Salah satu resistansi masyarakat terhadap hal tersebut adalah masalah radiotoksitas umur panjang dari limbah yang disisakan oleh bahan bakar bekas (Silakhuddin, 2008). Limbah PLTN volumenya sangat kecil dibandingkan kemampuan PLTN untuk menghasilkan daya listrik. Satu unit PLTN dengan daya 1000 MW hanya menghasilkan sekitar 3 ton uranium pertahun. Apabila umur reaktor mencapai 40 tahun maka limbah yang dihasilkan hanya sekitar 1200 ton. Limbah tersebut hanya memerlukan kolam penyimpanan dengan ukuran 3 x 4 x 10 m² (Peryoga *et al.*, 2007). Limbah dari proses reaksi nuklir sendiri tergolong atas tiga jenis limbah, yaitu:

1. Limbah tingkat rendah, *Low-Level Waste* (LLW).

Limbah jenis ini sebagian besar terdiri dari unsur berumur pendek dan tidak mengandung atau mengandung sedikit aktinida yang tidak memberikan dampak radiologis. Penanganannya dilakukan untuk mengurangi jumlahnya, limbah ini biasanya dipadatkan dan mengamankannya dengan solusi ditimbun dalam penguburan dangkal (sampai 10 meter di bawah permukaan tanah).

2. Limbah tingkat menengah, *Medium-Level Waste* (MLW).

Limbah ini merupakan limbah yang dihasilkan selama operasi reaktor dan dalam proses pengolahan kembali bahan bakar. Limbah ini memiliki umur paruh limbah tingkat menengah kurang lebih 30 tahun. Limbah tingkat ini cukup membahayakan, maka diperlukan penyimpanan khusus dan penguburan pada kedalaman tertentu (antara 500-1000 meter di bawah permukaan tanah).

3. Limbah tingkat tinggi, *High-Level Waste* (HLW).

Limbah ini mengandung produk fisi dari hasil proses pengolahan kembali dari uranium dan hasil pemrosesan bahan bakar di reaktor. Limbah ini adalah limbah paling berbahaya. Oleh karena itu, limbah pada tingkat ini membutuhkan penyimpanan khusus dan pendinginan karena memiliki banyak isotop dari alfa berumur panjang (interval berusia 30 tahun), puluhan ribu tahun. Selain penyimpanan khusus, harus dilakukan lagi untuk mengurangi tingkat bahaya HLW (Nawangary, 2007).

2.5 Plutonium dan Aktinida Minor

Plutonium dalam bahan bakar bekas yang mengandung isotop campuran dengan waktu paruh berbeda, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241 dan Pu-242. Selain uranium 233 adapun material fisil yang digunakan sebagai pemicu reaksi fisi nuklir adalah plutonium 239. Plutonium 239 merupakan material fisil, yakni material yang dapat membelah ketika ditembak oleh neutron, akan melepaskan energi, radiasi gamma, dan neutron yang lebih banyak. Oleh karena peristiwa itu, plutonium 239 dapat mempertahankan reaksi rantai nuklir setelah mencapai massa kritis. Sifat-sifat inilah yang memungkinkan plutonium digunakan sebagai bahan bakar pada beberapa reaktor nuklir (Mayanti *et al.*, 2017).

Aktinida minor merupakan unsur-unsur yang terbentuk pada bahan bakar bekas PLTN dari reaksi tangkapan neutron oleh inti-inti uranium. Unsur-unsur tersebut terdiri atas nuklida-nuklida: Np-237, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-242 dan Cm-244. Konsentrasi massa dalam bahan bakar bekas hanya 0,11% tetapi bersama dengan plutonium memberikan radiotoksisitas sebesar 100 Sv/gr dan meluruh untuk jangka waktu ratusan ribu tahun. Penanganan unsur-unsur aktinida minor tidak terlepas dari sistem daur bahan bakar yang diterapkan. Unsur-unsur aktinida minor (*minor actinides*, MA) memberikan kontribusi yang tinggi sifat radiotoksisitas dalam bahan bakar bekas PLTN, khususnya karena umurnya yang sangat panjang (Silakhuddin, 2008).

Akumulasi dari limbah radioaktif yang terus meningkat dari tahun ke tahun, khususnya plutonium, aktinida minor dan produk fisi berumur panjang (*long live fission product*, LLFP) yang diklasifikasikan sebagai limbah radioaktif tingkat

tinggi (*high level waste*, HLW) merupakan masalah yang sangat serius dan mengandung banyak pertanyaan dari beberapa aspek: teknis, sosial, lingkungan dan keselamatan jangka panjang. Untuk mengatasi masalah HLW, sejumlah ilmuwan nuklir di berbagai pusat riset fisika dan teknologi reaktor di dunia terlibat dalam suatu konsep teknologi transmudasi yang diinvestigasi sejak tahun 1900-an. Strategi transmudasi dalam skema daur ulang tertutup yang memasukkan pembakaran plutonium (Pu) dan aktinida minor (MA) ke dalam reaktor cepat adalah sebuah solusi yang tepat karena selain meningkatkan probabilitas terjadinya reaksi fisi yang konsekuensinya mendestruksi aktinida minor (MA), juga mereduksi produk aktinida minor (MA) dengan tangkapan radiatif neutron (Marsodi dan Zuhair, 2008).

2.6 Pengelolaan Limbah Bahan Bakar Nuklir

Dalam pengoperasian PLTN terdapat hal yang harus diperhatikan yakni limbah yang berasal dari elemen bahan bakar. Elemen bahan bakar tersebut bersifat radioaktif dari hasil pembelahan inti atom uranium dan merupakan sesuatu yang harus diwaspadai dan diamankan agar tidak membahayakan makhluk hidup di sekitarnya. Berikut ini adalah tahapan pengolahan limbah elemen bahan bakar bekas:

1. Memindahkan elemen bahan bakar yang sudah habis pakai dari teras reaktor menggunakan peralatan khusus dan juga dioperasikan dengan alat pengendali jarak jauh (*remote control*),

2. Menempatkan elemen bahan bakar di dalam kolam penyimpanan sementara yang telah diisi air untuk proses pendinginan dan penurunan aktivitas radiasinya.
3. Elemen bahan bakar bekas berada di kolam penyimpanan sementara kurang lebih 5 tahun dan aktivitas radiasinya sudah relatif rendah, elemen bahan bakar tersebut dipindahkan ke tempat penyimpanan yang bersifat lestari. Tempat penyimpanan limbah lestari ini biasanya berupa kolam beton yang letaknya di bawah permukaan tanah dengan kedalaman kira-kira 1000 meter (Parmanto dan Irawan, 2007).

Selain dilakukan proses penyimpanan lestari, saat ini dikembangkan juga proses daur ulang dari elemen bahan bakar bekas yang akan digunakan kembali menjadi bahan bakar baru. Daur ulang bahan bakar bekas dari PLTN dapat dibagi menjadi 3 opsi yaitu :

1. Daur ulang sekali pakai (daur ulang terbuka)

Pada daur ulang jenis ini, bahan bakar bekas dikeluarkan dari reaktor setelah melalui proses pendinginan selama 30-50 tahun, kemudian dipadatkan, lalu dikemas dalam bentuk yang aman, kemudian dipindahkan ke fasilitas pembuangan akhir (penyimpanan lestari). Beberapa negara yang menggunakan opsi daur ulang ini adalah Amerika Serikat, Swedia, Kanada, Spanyol, Finlandia dan Afrika Selatan.

2. Daur ulang tertutup

Pada daur ulang ini, bahan bakar bekas dipindahkan ke fasilitas daur ulang dimana kandungan bahan fisil sisa (U-235 dan Pu-239) dari bahan bakar bekas

dipisahkan dari produk fisi dan aktinida-aktinida lain. Uranium dan plutonium dari hasil daur ulang ini akan digunakan sebagai bahan bakar *Mixed Oxide (MOX)* melalui proses fabrikasi bahan bakar MOX, plutonium dan uranium olah ulang dicampur dengan *depleted* atau uranium oksida alam. Produk fisi dan aktinida yang tertinggal, merupakan limbah radioaktif aktivitas tinggi dari daur ulang, dan dipadatkan untuk dibuang dalam penyimpanan lestari. Jumlah limbah dari daur ulang tersebut hanya sekitar 3% berat dari bahan bakar bekas. Dengan daur ulang ini akan mengurangi jumlah total dari bahan bakar bekas yang akan dibuang.

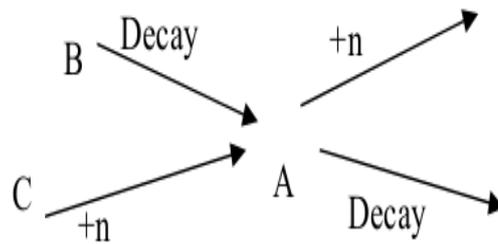
3. Daur ulang " *Wait and See* "

Daur ulang ini adalah sistem yang paling fleksibel. Pada daur ulang ini belum diputuskan apakah bahan bakar bekas akan didaur ulang atau tidak. Keputusan yang diambil akan berdampak pada penyimpanan sementara. Oleh karena itu, pengambilan keputusan ini harus hati-hati karena dibutuhkan perencanaan yang tepat karena berdampak pada instalasi PLTN yang akan dibangun. Perencanaan tersebut adalah pemindahan bahan bakar bekas dari *AR storage* kemudian dipindahkan ke fasilitas penyimpanan sementara jangka panjang *AR storage*, sampai pada saat kebijakan selanjutnya ditetapkan. Jadi opsi ini memerlukan penyimpanan bahan bakar bekas untuk periode yang lama sekitar 50 tahun atau bahkan lebih dari 100 tahun, sebelum diteruskan ke langkah selanjutnya (Parapak dan Siti, 2009).

2.7 Burn Up

Populasi neutron selama reaktor beroperasi akan berpengaruh pada komposisi bahan bakar yang berubah-ubah. Permasalahan komposisi bahan bakar ini diselesaikan menggunakan *burn up*. *Burn up* diartikan sebagai total energi yang dilepaskan per unit massa bahan bakar sebagai hasil pembakaran bahan bakar. Selama proses *burn up*, densitas setiap atom akan berubah sesuai dengan waktu *burn up* nya (Novalianda, 2019).

Perhitungan *burn up* dilakukan untuk mengetahui karakteristik perubahan isotop dalam reaktor yaitu pada manajemen penggunaan bahan bakar yang meliputi perhitungan penyusutan dan produksi isotop serta banyaknya energi yang dihasilkan per satuan waktu bahan bakar yang dinyatakan dalam Mega Watt-hari (MWD) per ton bahan bakar. Perhitungan *burn up* berkaitan dengan perubahan jangka panjang (hari-bulan dan tahun) komposisi bahan-bahan dalam reaktor akibat berbagai reaksi nuklir yang terjadi saat pengoperasian reaktor nuklir. (Novalianda *et al.*, 2020). Perhitungan terhadap deplesi bahan bakar melibatkan beberapa jenis proses nuklir. Pertama, perhitungan dilakukan dengan menyelesaikan terlebih dahulu persamaan difusi multigrup untuk mendapatkan fluks neutron. Kemudian baru menyelesaikan persamaan *burn up*, yaitu pemecahan densitas inti sebagai fungsi waktu dan posisi (Nurul *et al.*, 2015). Persamaan laju reaksi yang menggambarkan densitas jumlah inti dalam teras dapat diperoleh menggunakan prinsip keseimbangan yang sederhana. Misalkan $N_A(r,t)$ adalah densitas untuk nuklida jenis A, maka persamaan laju reaksi secara umum dapat digambarkan dalam skema pada Gambar 2.



Gambar 2. Prinsip Keseimbangan Nuklida (Handayani dan Zaki, 2015)

Secara matematis skema tersebut dapat ditulis dalam persamaan 1.

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A [\sum \sigma_{Ag}^A \phi_g] N_A + \lambda_B N_B + [\sum_g \sigma_{\lambda g}^C \phi_g] N_C \quad (1)$$

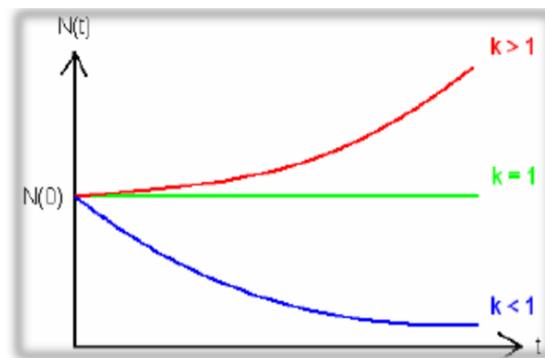
Dimana suku $\lambda_A N_A$ menyatakan bagian yang hilang karena peluruhan radioaktif, sedangkan $[\sum \sigma_{Ag}^A \phi_g] N_A$ adalah bagian yang hilang karena tangkapan neutron, $\lambda_B N_B$ merupakan nuklida tambahan A akibat peluruhan B menjadi A dan $[\sum_g \sigma_{\lambda g}^C \phi_g] N_C$ adalah perubahan C menjadi A melalui tangkapan neutron (Handayani dan Zaki, 2015).

2.8 Faktor Multiplikasi (k_{eff})

Secara umum perubahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan dengan faktor multiplikasi (k_{eff}) (Permata *et al.*, 2016). Selain itu dapat didefinisikan juga sebagai perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan dalam suatu generasi dibagi dengan jumlah neutron yang dihasilkan pada generasi sebelumnya. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor yang mencapai keadaan stabil (kritis) jika nilai $k_{\text{eff}} = 1$ dapat dinyatakan dalam persamaan 2.

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

Harga dari faktor multiplikasi tersebut dapat digunakan sebagai parameter suatu teras dalam keadaan subkritis, kritis atau superkritis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik banyaknya neutron terhadap waktu dalam sebuah reaktor (Lewis, 2008)

Jika faktor multiplikasi ($k_{\text{eff}}=1$), maka reaktor berada dalam keadaan kritis yang artinya jumlah neutron dalam suatu generasi akan sama dengan jumlah neutron dalam generasi sebelumnya atau tetap. Jika faktor multiplikasi ($k_{\text{eff}}<1$), reaktor dalam keadaan subkritis yang artinya jumlah neutron dalam suatu generasi lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah neutron dalam generasi sebelumnya dan reaksi berantai akan terus berkurang. Kemudian jika faktor multiplikasi ($k_{\text{eff}}>1$), maka reaktor dikatakan dalam keadaan superkritis atau jumlah neutron pada satu generasi lebih banyak dari jumlah neutron pada generasi sebelumnya, sehingga reaksi berantai semakin lama akan semakin banyak atau dapat tidak terkontrol dan akan menyebabkan efek seperti bom nuklir (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

2.9 Standard Reactor Analysis Code (SRAC)

Standard Reactor Analysis Code (SRAC) merupakan sistem kode yang berlaku untuk analisis neutronik dari berbagai jenis reaktor yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) Jepang. SRAC dioperasikan pada sistem operasi Linux. (Syarifah *et al.*, 2021). Sistem SRAC saat ini termasuk perpustakaan data neutron utama (JENDL-17 3.3, JENDL-3.2, ENDF/B-VI, dan JEF-2.2). Sistem SRAC memiliki lima kode dasar yaitu:

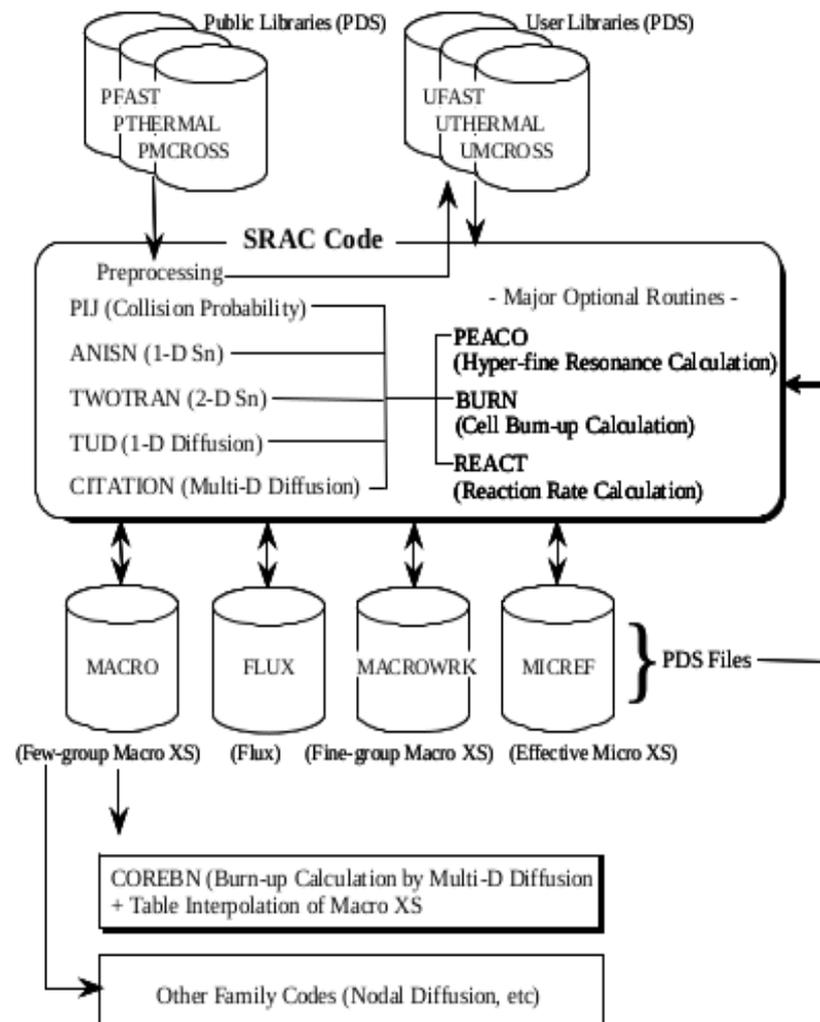
1. PIJ: kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi 16 kisi geometri.
2. ANISN: kode transport satu dimensi (S N) yang terdiri dari tiga jenis geometri yaitu *slab* (X), silinder (R) dan bola (R-S).
3. TWOTRAN: kode *transport* dua dimensi (SN) yang terdiri dari tiga jenis geometri yaitu *slab* (X-Y), silinder (R-Z), dan bola (R- θ).
4. TUD: kode difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI, terdiri dari tiga jenis geometri yaitu *slab* (X), silinder (R) dan bola (R-S).
5. CITATION: kode difusi multidimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan heksagonal.

SRAC juga memiliki 2 modul tambahan yaitu ASMBURN (modul perhitungan *burn up assembly*) dan COREBN (modul perhitungan *burn up* teras) (Okumura *et al.*, 2007). Tujuan utama SRAC adalah sebagai sistem kode neutronik yang dapat diterapkan pada analisis teras berbagai macam reaktor, termasuk perhitungan sel dan analisis *burn up*. SRAC terdiri dari dua *file* yaitu *file input* dan *file output*. *File*

input SRAC dapat diedit sesuai dengan data desain reaktor yang diinginkan. Setelah semua *input* telah selesai dimasukkan, kemudian di *run* maka *file output* akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa serangkaian perhitungan telah selesai dengan tepat atau tidak. Jika bagian akhir dari hasil perhitungan (*output*) belum sampai pada pesan seperti:

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

maka harus dilakukan pengecekan kembali pada *file input* dan melakukan perhitungan kembali. Setelah perhitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek hasilnya pada *file output* telah sesuai dengan standar atau belum, kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2007). Gambar 4 merupakan struktur dari program SRAC.



Gambar 4. Struktur dari Program SRAC (Okumura, 2007)

2.10 COREBN

COREBN merupakan kode tambahan yang ada dalam program SRAC yang digunakan untuk melakukan perhitungan *burn up* teras berdasarkan interpolasi tampang lintang makroskopik dan teori difusi *finite difference*. Versi pertama kode COREBN dan HIST dikembangkan pada tahun 1980-an dan diimplementasikan ke

dalam sistem SRAC. Kemudian, COREBN dan HIST digunakan untuk keperluan manajemen pembakaran inti penelitian dan reaktor uji seperti JRR-2, JRR-3, JRR-4 dan JMTR di *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA). *Inputan* dalam COREBN adalah kondisi operasi reaktor, misal daya termal, berapa lama reaktor akan dioperasikan, tata letak perangkat bahan bakar dan perangkat batang kendali dalam teras, geometri teras, semua jenis perangkat bahan bakar serta perangkat non bahan bakar yang berada dalam teras, perlu dideklarasikan terlebih dahulu dalam *file history* dengan menggunakan kode HIST.

Selain itu, HIST juga berfungsi untuk konversi *file* data tampang lintang makroskopik berformat PDS menjadi PS agar dapat dibaca oleh COREBN. COREBN akan membaca informasi yang dibutuhkan dalam perhitungan dan sekaligus merekam data *burn up* terbaru dan komposisi tiap elemen teras hasil perhitungan pada *file history*. Dengan informasi yang didapat dari *file history*, COREBN melakukan perhitungan *burn up* hingga reaktivitas lebih mencapai nilai yang diinginkan. Pada akhir perhitungan, COREBN akan menunjukkan kondisi operasi siklus pertama, *burn up* dan komposisi nuklida hasil peluruhan tiap elemen bahan bakar dalam teras ke *file history* (Okumura, 2007).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama bulan Juli-Agustus 2022 di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Mint 18.3 Sylvia dan program SRAC kode COREBN.

3.3 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan program SRAC dengan kode tambahan COREBN serta sumber data nuklida yang berasal dari JENDL-3.2 yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA). Prosedur pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Menentukan komposisi bahan bakar dan pengayaan (*Enrichment*)

Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah campuran plutonium, aktinida minor dan uranium dengan konsentrasi plutonium serta aktinida minor dalam 3 komposisi adalah 8%, 10% dan 12%. Komposisi dari plutonium dan aktinida minor dalam bahan bakar diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Plutonium dan Aktinida minor (B.D Murphy, 1996)

Bahan bakar	Pemuatan bahan bakar
Plutonium %wt	7,2% / 9.05% / 10.80%
Pu-238	1.81%
Pu-239	59,14%
Pu-240	22,96%
Pu-241	12,13%
Pu-242	3,96%
Aktinida Minor %wt	0,8% / 1,0% / 1,2%
Np-237	16,67%
Am-241	52,05%
Am-242m	1.51%
Am-243	29,23%
Cm-245	0,54%

2. Menghitung densitas atom

Menghitung densitas atom tiap-tiap komponen reaktor seperti bahan bakar (*fuel*), pendingin (*coolant*) dan juga kelongsong (*cladding*). Hasil dari perhitungan tersebut akan digunakan sebagai *inputan* di PIJ. PIJ sendiri merupakan salah satu kode yang terdapat di SRAC yang digunakan untuk perhitungan neutronik tingkat sel menggunakan metode probabilitas

tumbukan. Rumus yang digunakan untuk menghitung densitas atom ditunjukkan pada persamaan

$$N = \rho \frac{N_A}{M} \quad (3)$$

Keterangan :

N = densitas atom (atom/cm³)

ρ = massa jenis (gram/cm³)

N_A = bilangan Avogadro (6,02 x 10²³ atom/mol)

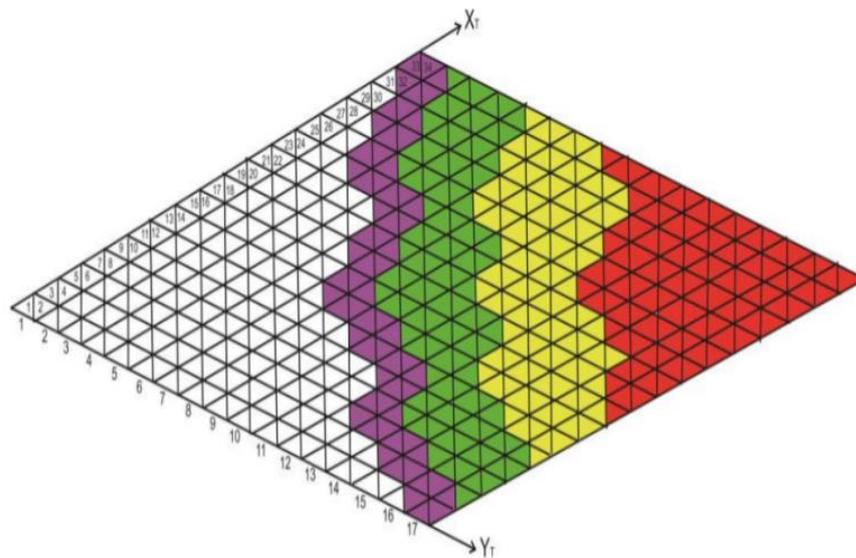
M = massa molekul (gram/mol)

3. Melakukan *Input Data* pada *file* HIST

File (History File) HIST ini berfungsi untuk menentukan geometri teras dan registrasi material, menentukan jenis elemen bahan bakar, menentukan jenis elemen non bahan bakar dan memasukan elemen bahan bakar.

4 Melakukan Perhitungan pada COREBN

COREBN merupakan kode tambahan dalam program SRAC yang dapat digunakan untuk perhitungan pembakaran (*burn up*) pada tingkat teras inti. Di dalam COREBN terdapat *input* data yang diperlukan adalah kondisi operasi seperti daya termal, periode operasi, pola pemuatan dari elemen bahan bakar, dan pola pemuatan elemen kendali. Contoh model perhitungan *burn up* inti 2-dimensi yang dihitung menggunakan kode COREBN dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Model perhitungan burn up inti 2-dimensi (Wulandari, 2020)

Keterangan

-  Bahan bakar 1 dengan komposisi Pu+MA 8%
-  Bahan bakar 2 dengan komposisi Pu+MA 10%
-  Bahan bakar 3 dengan komposisi Pu+MA 12%
-  Reflektor
-  *Blackness*

Langkah-langkah yang diubah pada COREBN adalah

- a) Menentukan periode *burn up*. Periode *burn up* pada penelitian ini dikonversikan ke dalam bentuk jam pada saat memasukan *input* ke dalam program.

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

6. Hasil Perhitungan

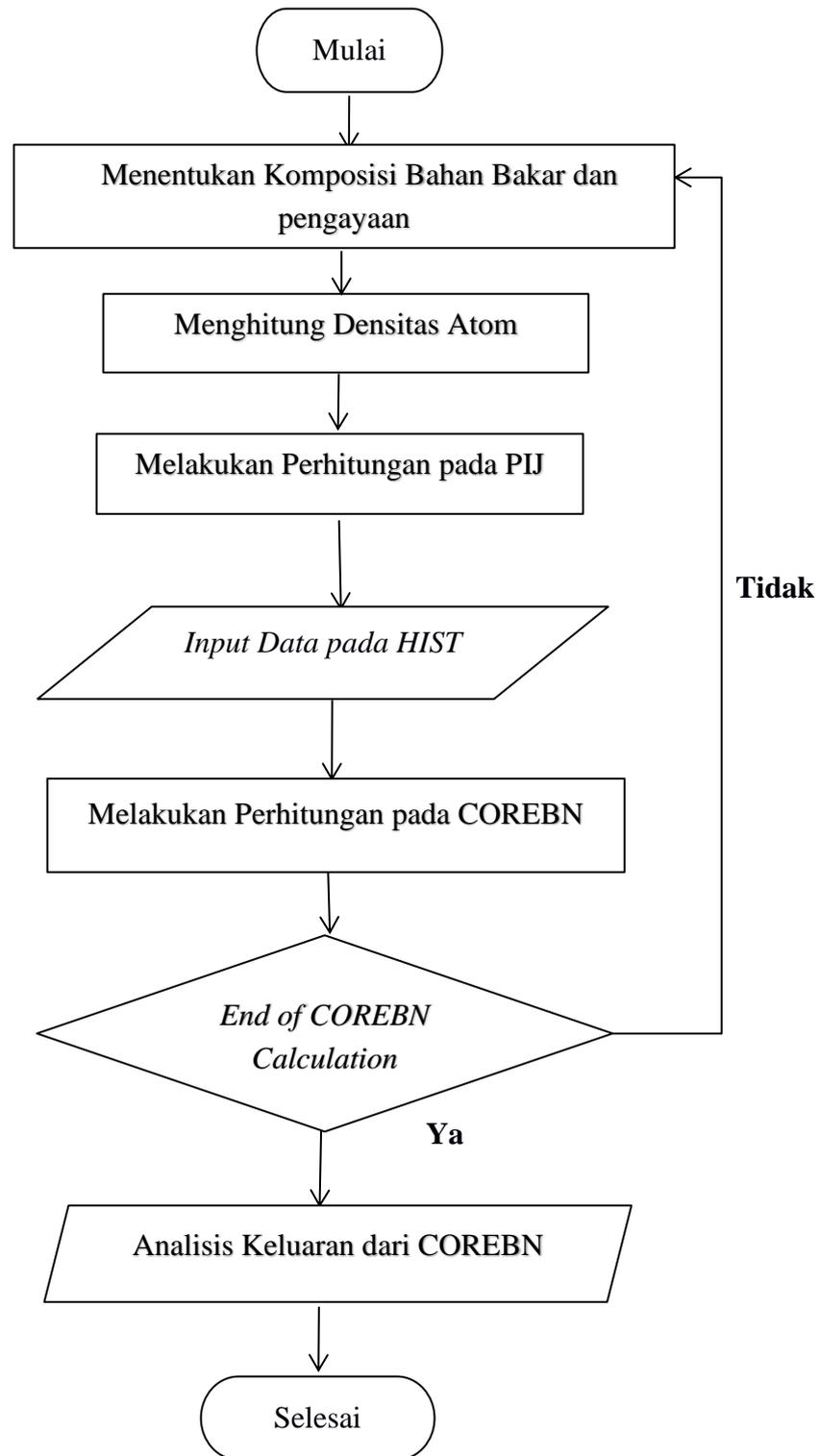
Perhitungan pembakaran pada COREBN yang telah selesai ditampilkan pada keluaran *file* SFT99. Apabila masukan benar maka pada *file output* terdapat pesan sebagai berikut

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

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

3.4 Diagram Alir Penelitian

Gambar 6 merupakan diagram alir pada penelitian ini.



Gambar 6. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Nilai faktor multiplikasi (k_{eff}) dari perhitungan sel mengalami penambahan nilai dikarenakan besarnya persentase di uranium dan juga persentase Pu+Aktinida Minor di dalam bahan bakar.
2. Pada akhir operasi reaktor, nilai faktor multiplikasi (k_{eff}) mengalami penurunan nilai sebesar 1,199649 pada periode 1515 hari.
3. Nilai dari densitas atom pada akhir periode reaktor mengalami perubahan pada nuklida jenis uranium seperti U^{235} dan U^{238} yang mengalami penurunan jumlah densitas atom sedangkan pada U^{236} yang semula tidak terdapat pada bahan bakar kemudian muncul pada bahan bakar.
4. Perubahan densitas atom juga terdapat pada nuklida jenis plutonium seperti pada nuklida Pu^{239} dan Pu^{241} yang mengalami penurunan jumlah nuklida sedangkan pada nuklida jenis plutonium lainnya mengalami penambahan jumlah densitas atom
5. Perubahan densitas atom juga terdapat pada nuklida jenis aktinida minor seperti pada nuklida Np^{237} dan Am^{243} yang mengalami penurunan jumlah

nuklida sedangkan pada nuklida jenis aktinida minor lainnya mengalami penambahan jumlah densitas atom.

6. Penggunaan bahan bakar bekas seperti plutonium dan aktinida Minor sebagai campuran pada uranium dapat menghasilkan nilai faktor multiplikasi (k_{eff}) reaktor sebesar 1,199649 pada periode 1515 hari yang berarti reaktor masih akan menyala pada periode tersebut namun reaktor belum dapat dikategorikan sebagai reaktor *breeding* dikarenakan nilai rasio konversi sebesar 0,766813.
7. Pada periode 1515 hari, beberapa nuklida di dalam reaktor mengalami pengurangan jumlah seperti Pu^{239} , Pu^{241} , Np^{237} dan Am^{243} yang berarti operasi reaktor dapat mengurangi beberapa nuklida bekas bahan bakar.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan jenis reaktor yang berbeda dan dengan persentase pengurangan jumlah U235 kurang dari 3,5% lalu memperbanyak persentase plutonium dan aktinida minor menjadi lebih dari 12% di dalam komposisi bahan bakar tetapi dapat menghasilkan nilai $k_{\text{eff}} = 1$.

DAFTAR PUSTAKA

- Agung, A. 2017. *Diktat Kuliah: Analisis Reaktor Nuklir*. Universitas Gajah Mada (UGM). Yogyakarta. Hal. 221.
- Ardanti W R., Yulianti, Y., Riyanto, A dan Syafriadi. 2020. Perhitungan Burn Up pada Reaktor HCLWR Model Geometri Heksagonal Dua Dimensi Menggunakan SRAC COREBN. *Journal of Energy Material and Instrumentation Technology*. Vol. 1. No. 1. Hal 16-22.
- Ariani, M., Su'ud, dan Z., Monado, F. 2013. Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 MWth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar. *Jurnal Ilmu Dasar*. Vol. 14. No. 1. Hal. 11-15.
- B.D. Murphy.1996. Characteristics of Spent Fuel from Plutonium Disposition Reactor. Oak Ridge National Laboratory. ORNL/TM-13170/VII.
- Duderstadt, J.J. dan Hamilton, L.J. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Dewan Energi Nasional. 2014. *Outlook Energi Nasional 2014*. Jakarta. Indonesia.
- Driscoll, M, J., dan P, Heizler. 2005. Reactor Physics Challenges in Gen IV Reactor Design. *Nuclear Engineering and Technology*. Vol. 27. No. 1. Hal. 1-10.
- Gen International Forum IV. 2019. Gas Cooled Fast Reactor. *13th GIF-IAEA Interface Meeting IAEA Headquarters*. Vienna.
- Handayani, F, I., dan Zaki, S. 2015. Analisis Burn Up Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*. Vol. 7. No. 2. Hal. 78-86.
- Herutomo, B. 2015. Strategi Daur Bahan Bakar Nuklir Mendukung Pengoperasian PLTN Yang Berkelanjutan. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir PRSG Tahun 2015*. BATAN. Vol. 1. No. 6. Hal. 94- 102.

- Idaho National Laboratory. 2017. *Gas-Cooled Fast Reactor Research and Development Roadmap*. INL ART TDO Program Idaho Falls.
- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press, USA.
- Marsodi, S dan Zuhair. 2008. Studi Kapabilitas Transmutasi Plutonium Dan Aktinida Minor Dengan Reaktor Cepat Berpendingin Natrium, Timbal Dan Gas Helium. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*. Vol. 8. No. 2. Hal. 8-20.
- Mayanti, R., Ariani, M dan Manado, F. 2017. Studi Parameter Burnup Sel Bahan Bakar Berbasis Thorium Nitride Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Prosiding Seminar Nasional Fisika SNF20* Vol. VI. No. 1. Hal 1-6.
- Nawanggary, W. 2007. Studi awal Daur Ulang Plutonium dan Aktinida Minor dalam BWR Berbahan Bakar Thorium dengan Model *Burn up* Standar Menggunakan Modul Perhitungan Sel PIJ dari Code SRAC 2022. *Skripsi*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Novalianda, S., Ariani M., Manado, F dan Suud, Z. 2016. Studi awal perhitungan sel bahan bakar berbasis uranium (UO_2) Pada reaktor cepat berpendingin helium. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*. Vol. 2. No. 1. Hal 381-390.
- Novalianda, S., Andi R ., dan Zaki S. 2020. Perhitungan *Burn up* Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains* 22. Vol. 2. No. 6. Hal. 50-55.
- Novalianda, S. 2019. Power Flattening Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U, Pu)N. *Journal of Electrical Technology*. Vol. 4. No. 3. Hal. 1-6.
- Nurkholilah dan Fitriyani, D. 2019. Analisis *Burn Up* pada Reaktor Pembiak Cepat Berpendingin Pb-Bi dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar dan Bahan Pendingin. *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 8. No. 2. Hal 184-190.
- Nurul, M.S., Su'ud, Z., Waris, A., dan Permana, S. 2015. Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR) Berukuran Kecil Berumur Panjang Berbahan Bakar Thorium. Vol 9. No 1. Hal. 32-49.
- Okumura, K. 2007. COREBN: *A Core Burn-Up Calculation Module for SRAC2006*. Reactor Physics Group, Nuclear Science and Engineering Directorate, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken. Japan.

- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Thuchihashi, K. 2007. *The comprehensive neutronics calculation code system*. JAEA.Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken. Japan.
- Parapak, B dan Siti.,A.2009. Strategi Pengelolaan Bahan Bakar Bekas PLTN. *PRIMA - Aplikasi dan Rekayasa dalam Bidang Iptek Nuklir*. Vol. 6. No. 12. Hal. 388-395.
- Parmanto, E.M dan Irawan, D. 2007. Mengenal PLTN dan Prospeknya di Indonesia. Pusat Disemanasi Iptek Nuklir. Badan Tenaga Nuklir Nasional. Jakarta. Hal. 24.
- Permata, N.S., Fitriyani, D., dan Handayani, F.I. 2016. Analisis Neutronik Super Critical Water Reactor (SCWR) dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC, dan MOX). *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 5. No. 1. Hal. 47-52.
- Peryoga, Y., Madi, E P dan Pranoto, A. 2007. *Mengenal Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. Kementerian Riset dan Teknologi. Jakarta.
- Price, D. L., Ling, F., Bermejo, F. J., Felix, F. A., dan Marie, L. S. 2013. Hydrogen/Deuterium Isotope Effects in Water and Aqueous Solutions of Organic Molecules and Proteins. *Chemical Physics*. Vol. 42 No. 4. Hal. 61-69.
- Setiyaningsih., Yulianti, Y dan Sembiring, S. 2019. Desain Inti Reaktor Supercritical Water Reactor (SCWR) Model Teras Silinder (R,Z) dengan Bahan bakar Thorium Hasil Daur Ulang. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. Vol. 7. No.2. Hal 215-222.
- Silakhuddin. 2008. Analisis Dan Konsep Penanganan Aktinida Minor Dalam Limbah PLTN Menggunakan Teknologi ADS. *GANENDRA*. Vol. XI. No. 2. Hal. 53-59.
- Silakhuddin. 2008. Estimasi Akumulasi Limbah Transnuranium Dari PLTN Dan Kemungkinan Transmutasinya Dengan ADS. *Prosiding Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah V*. Vol. V. No. 6. Hal. 110-118.
- Susilo, J. 2000. Transmutasi Aktinida Minor Dengan BWR Berbahan Bakar Campuran Oksida. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir-IRI DASA MEGA*, Vol 2. No 1. Hal 33-45.
- Syarifah, R.D., Nabhan, N.MH.,Hanifah, Z.,Karomah, I.,Mabruri,A.M., Arkundato,A. 2021. Analisis Fraksi Volume Bahan Bakar Uranium Karbida Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan SRAC Code. *Jurnal Jaring Saintek (JJST)*.Vol. 3. No 1. Hal 13-18.

- Waris, A dan Budiono. 2008. Studi Tentang Fisibilitas Daur Ulang Aktinida Minor Dalam BWR. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology* Vol. IX. No. 1. Hal. 11-24.
- Waris, A., Rahmanto, T., Taufik, I., Kurniadi, R dan Su'ud, Z. 2009. Study of Transuranium Recycling in PWR with 3-D Burnup Analysis using SRAC-COREBN Code. *Indonesian Journal of Physics* Vol. 20. No. 4. Hal. 95-98.
- Wulandari, S. 2020. Perhitungan Burn Up Pada Reaktor HCLWR Model Geometri Silinder 2 Dimensi Menggunakan Kode COREBN. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Yulianto, T. 1996. Kajian Kemungkinan Modifikasi Peralatan Fabrikasi untuk Fabrikasi Elemen Bakar Jenis HWR dan LWR. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. Hal. 190-198.
- Yvon, P., and Carre, F. 2009. Structural Materials Challenges for Advanced Reactor Systems. *Journal of Nuclear Materials*. Hal. 217-222.
- Zhang, P., Kan W., and Ganglin Y. 2014. A Simplified Supercritical Fast Reactor with Thorium Fuel. *Science and Technology of Nuclear Installations*. Hal. 1-9.
- Zweifel, P.F. 1973. *Reactor Physics*. McGraw-Hill. USA. Hal. 74.