

**DESAIN TERAS REAKTOR *HIGH TEMPERATUR GAS-COOLED REACTOR*(HTGR) MODEL *MESH TRIANGULAR* DUA DIMENSI
BERBAHAN BAKAR THORIUM BERPENDINGIN GAS CO₂**

(Skripsi)

Oleh

Nasta Meina Dilaga



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

DESAIN TERAS REAKTOR *HIGH TEMPERATUR GAS-COOLED REACTOR* (HTGR) MODEL *MESH TRIANGULAR* DUA DIMENSI BERBAHAN BAKAR THORIUM BERPENDINGIN GAS CO₂

Oleh

Nasta Meina Dilaga

Penelitian tentang desain teras reaktor *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR) dengan model *mesh triangular* dua dimensi berbahan bakar thorium berpendingin gas CO₂ telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain teras reaktor HTGR agar diperoleh kondisi kritis dan daya termal yang maksimal. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan kode CITATION program SRAC pada 1/6 bagian permukaan teras reaktor HTGR. Parameter yang dianalisis meliputi persentase pengayaan bahan bakar, ukuran dan konfigurasi teras reaktor, harga kekritisian dan rapat daya. Hasil yang diperoleh menunjukkan desain teras reaktor HTGR yang ideal dengan ukuran kolom (x) 202 cm dan baris (y) 101 cm. Persentase pengayaan bahan bakar bagian pertama sebesar 3% dan bahan bakar bagian kedua 2,731%. Desain teras reaktor ini menghasilkan daya termal sebesar 100 MWth, rapat daya maksimal sebesar 107,5371 watt/cm³ dan nilai *k*-efektif 1,000008.

Kata kunci: Desain reaktor, HTGR, thorium, rapat daya.

ABSTRACT

DESIGN OF REACTOR HTGR CELL CORE WITH TWO DIMENSIONAL TRIANGULAR MESH MODEL USING THORIUM FUEL AND CO₂ GAS COOLANT

By

Nasta Meina Dilaga

The research of design reactor HTGR cell core with two dimensional triangular mesh model using thorium fueled and CO₂ coolant has been done. Objective of the research was design critical condition of HTGR cell core so as obtained critical condition and high thermal power. The neutronic analyzed by CITATION of SRAC on 1/6 of reactor cell core. The parameter which analyzed were core fuel enrichment, size and configuration reactor cell core, critically and power density. The result was obtained the ideal reactor design with size (x) 202 cm and (y) 101 cm. The enrichment of first region was 3% and second region was 2.731%. The total thermal power of reactor was 100 MWth, maximum power density of reactor was 107.5371 Watt/cc and k_{eff} of reactor was 1.000008.

Keywords: Core design , HTGR, thorium, power density.

DESAIN TERAS REAKTOR *HIGH TEMPERATUR GAS-COOLEDREACTOR* (HTGR) MODEL *MESH TRIANGULAR* DUA DIMENSI BERBAHAN BAKAR THORIUM BERPENDINGIN GAS CO₂

Oleh

NASTA MEINA DILAGA

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
2019

Judul Skripsi

: **DESAIN TERAS REAKTOR
HIGHTEMPERATUR GAS-COOLED
REACTOR (HTGR) MODEL MESH
TRIANGULAR DUA DIMENSI BERBAHAN
BAKAR THORIUM BERPENDINGIN GAS CO₂**

Nama Mahasiswa

: **Nasta Meina Dilaga**

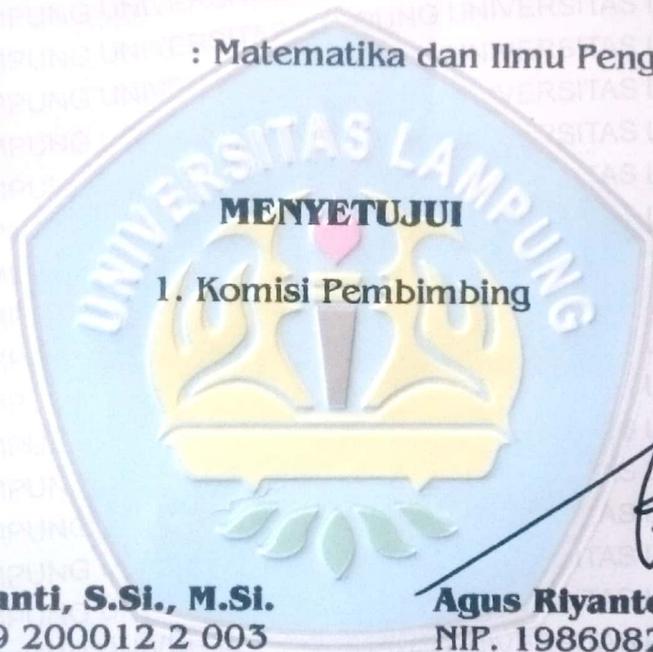
Nomor Pokok Mahasiswa : 1417041060

Jurusan

: Fisika

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

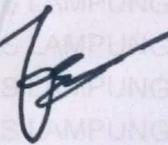


MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

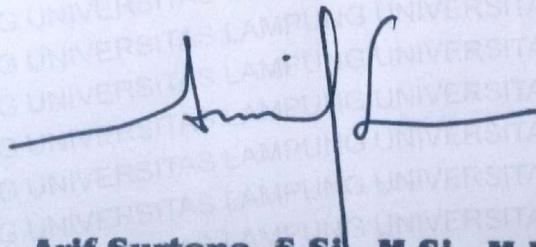


Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 19751219 200012 2 003



Agus Riyanto, S.Si., M.Sc.
NIP. 19860822 201504 1 002

2. Ketua Jurusan Fisika

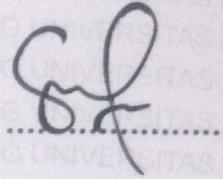


Arif Surtano, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 19710909 200012 1 001

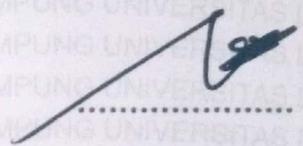
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



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



Penguji
Bukan Pembimbing : **Drs. Ediman Ginting, M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Prof. Warsito, S.Si., DEA., Ph.D.
NIP. 19710212 199512 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **24 Januari 2019**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis disebut dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, Januari 2019



Nasta Meina Dilaga
NPM. 1417041060

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Ciparay, Serang, Banten pada tanggal 15 Mei 1996. Anak pertama dari pasangan Bapak Nana Sumarna dan Ibu Ita Ipiyati. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 3 Batangharjo tahun 2008, SMP Negeri 1 Batanghari tahun 2011, dan SMA Negeri 1 Batanghari Lampung Timur tahun 2014.

Selanjutnya pada tahun 2014 penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di kegiatan kampus yaitu HIMAFI FMIPA UNILA sebagai anggota bidang kaderisasi dari tahun 2014-2015, anggota biro Kesekretariatan dari tahun 2015-2016, MATALAM FT UNILA sebagai anggota eksternal dari tahun 2014-2016.

Penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PSTBM BATAN Serpong dengan judul “Pembuatan Lapisan Tipis BST ($Ba_{0,5} Sr_{0,5} TiO_3$) pada Silikon 111 dengan Metode PLD (*Pulsed Laser Deposition*)”. Penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di desa Sumber Rejeki Kecamatan Gunung Agung Kabupaten Tulang Bawang Barat. Selanjutnya penulis melakukan penelitian “Desain Teras Reaktor *High Temperatur Gas-Cooled Reactor* (HTGR) Model *Mesh Triangular* Dua Dimensi Berbahan Bakar Thorium Berpendingin Gas CO_2 ” sebagai tugas

akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung.

MOTTO

**“MURADKAN TINDAKAN DEMI
KEMASHLAHATAN KABILAH”**

Aku persembahkan karya ku ini kepada:

Ayah dan Mamah ku yang selalu mendo'akanku,
mengasihiku, mendukungku, menyemangatiku dan sebagai
motivator terbesar dalam hidupku

Ibu Suhar serta Adik-adik ku yang menjadi penyemangatku

Dosenku yang telah mengajarkan banyak ilmu dan mendidik
serta membimbingku

Sahabat dan Teman-teman Seperjuanganku Fisika
FMIPA UNILA Angkatan 2014

Almamater Tercinta.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Desain Teras Reaktor *High Temperatur Gas-Cooled Reactor* (HTGR) Model *Mesh Triangular* Dua Dimensi Berbahan Bakar Thorium Berpendingin Gas CO₂”**. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar S1 dan juga melatih mahasiswa 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. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa pada khususnya dan masyarakat umum.

Bandar Lampung, Januari 2019

Penulis,

Nasta Meina Dilaga

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Yang Maha Esa, karena atas kuasanya 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. sebagai pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang mendukung dari awal sampai akhir penulisan.
2. Bapak Agus Riyanto, S.Si., M.Sc. sebagai pembimbing II yang telah mengoreksi format penulisan, memberikan kritik dan saran selama penulisan skripsi.
3. Bapak Drs. Ediman Ginting, M.Si. sebagai penguji yang telah mengoreksi kekurangan, memberi kritik dan saran selama penulisan skripsi.
4. Ayah dan Mamah ku yang telah membesarkan, mendoakan, mendidik, mendukung dan menjadi motivasi terbesar dalam hidupku.
5. Bapak Prof. Drs. Simon Sembiring, Ph.D. sebagai Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan serta nasehat dari awal perkuliahan sampai menyelesaikan tugas akhir.
6. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. selaku ketua jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

7. Bapak Prof. Dr. Warsito, S.Si., DEA selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
8. Para dosen serta karyawan di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
9. Apriliana yang telah membantu, mendoakan, menemani, dan mendukungku.
10. Suhadi, Juplek, Epenk, Angglenk, Irfan, Dika, Dani, Aziz, Uddin, Angga dan Alm. Alfin Afrizal yang selalu *mensupportku*.
11. Rekan satu tim Apriliana, Dika, Rasyid, Harry, Aning, Mey, Ica, Adel, dan Edo yang selalu menyemangati cepat selesainya tugas skripsi ini.
12. Rekan-rekan seperjuangan fisika FMIPA angkatan 2014 yang selama ini memberikan semangat, candaan dan motivasi.
13. Seluruh pihak yang telah membantu dan menyemangati dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, Januari 2019

Penulis

Nasta Meina Dilaga

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Batasan Masalah	4
D. Tujuan Penelitian	5
E. Manfaat Penelitian	5

II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Reaktor	6
B. <i>High Temperatur Gas-Cooled Reactor (HTGR)</i>	10
C. Thorium	12
D. Faktor Multiplikasi (K_{eff})	14
E. Difusi Neutron	16
F. <i>Standar Thermal Reactor Analysis Code(SRAC)</i>	18
G. Karbondioksida(CO_2) Sebagai Gas Pendingin	21
III. PROSEDUR PENELITIAN	
A. Waktu dan Tempat Penelitian	23
B. Alat dan Bahan	23
C. Prosedur Penelitian	23
D. Diagram Alir	32
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Desain Teras Reaktor HTGR Berbentuk Silinder	35
B. Densitas Atom dan Pengayaan Bahan Bakar	36
C. Konfigurasi Teras Reaktor HTGR	39
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan	54
B. Saran	54

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Reaksi fisi	6
Gambar 2. Skema umum reaktor HTGR.....	11
Gambar 3. Siklus reaksi thorium	13
Gambar 4. Grafik banyaknya neutron terhadap waktu di dalam reaktor	15
Gambar 5. Struktur program SRAC	20
Gambar 6. Model <i>mesh</i> triangular dua dimensi	25
Gambar 7. Diagram alir penelitian	33
Gambar 8. (a) Teras reaktor berbentuk silinder (b) 1/6 bagian dari teras reaktor	35
Gambar 9. Desain konfigurasi permukaan penuh teras reaktor HTGR	39
Gambar 10. Desain konfigurasi 1/6 bagian permukaan teras reaktor HTGR	40
Gambar 11. Rapat daya pada kolom (x) dengan mesh 36 pada pengayaan bahan bakar pertama 3% dan pengayaan bahan bakar bagian kedua 2,5%	45
Gambar 12. Rapat daya pada baris (y) dengan mesh 18 pada pengayaan bahan bakar pertama 3% dan pengayaan bahan bakar bagian kedua 2,5%	46

Gambar 13. Rapat daya pada kolom (x) dengan mesh 36 pada pengayaan bahan bakar kedua 3% dan pengayaan bahan bakar bagian pertama 3%	50
Gambar 14. Rapat daya pada baris (y) dengan mesh 18 pada pengayaan bahan bakar kedua 3% dan pengayaan bahan bakar bagian pertama 3%	51
Gambar 15. (a) Rapat daya kolom (x) (b) Rapat daya baris (y)	52
Gambar 16. (a) Permukaan 1/6 teras reaktor HTGR ideal (b) Teras reaktor HTGR ideal	53

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Sifat fisik gas CO ₂	21
Tabel 2. Karakteristik material	36
Tabel 3. Densitas atom CO ₂	37
Tabel 4. Densitas atom dan pengayaan bahan bakar	38
Tabel 5. Nilai <i>k</i> -efektif pada pengayaan U ²³³ pada bahan bakar bagian Pertama	39
Tabel 6. Besar ukuran baris (<i>y</i>) pada teras reaktor	43
Tabel 7. Besar ukuran kolom (<i>x</i>) pada teras reaktor	44
Tabel 8. Nilai <i>k</i> -efektif pada pengayaan U ²³³ pada bahan bakar bagian kedua	47
Tabel 9. Besar ukuran baris (<i>y</i>) pada teras reaktor	48
Tabel 10. Besar ukuran kolom (<i>x</i>) pada teras reaktor	49

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saat ini perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi semakin canggih dengan menghasilkan banyak alat elektronik. Di zaman ini, hampir setiap manusia menggunakan alat elektronik dalam kehidupan sehari-hari. Dengan banyaknya jumlah manusia yang menggunakan alat elektronik, maka kebutuhan energi listrik semakin bertambah. Di Indonesia sendiri, kebutuhan energi listrik meningkat setiap tahunnya. Tercatat penjualan tenaga listrik PLN pada tahun 2016 sebesar 216.004,32 GWh. Dibandingkan dengan tahun 2015 penjualan tenaga listrik tersebut naik sebesar 13.158,50 GWh atau 6,48% terdiri dari penjualan untuk sektor industri sebesar 68.145,32 GWh, sektor rumah tangga sebesar 93.634,63 GWh, sektor komersial atau usaha sebesar 14.149,99 GWh dan sektor publik atau umum sebesar 14.149,99 GWh (Kementerian ESDM, 2017). Saat ini, pembangkit listrik yang ada di Indonesia masih terfokus pada bahan bakar fosil. Mengingat ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin berkurang, maka diperlukan sumber energi listrik alternatif.

Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) merupakan salah satu sumber energi alternatif. Menurut IAEA (*International Atomic Energy Agency*) jumlah PLTN di dunia sudah mencapai 441 buah dan hingga tahun 2020 diperkirakan akan ada tambahan 126 PLTN baru. PLTN memanfaatkan energi dari reaktor nuklir

sebagai sumber energi listrik. Seperti pada pembangkit listrik lainnya, PLTN juga menggunakan tenaga panas untuk menggerakkan atau memutar turbin untuk kegenerator. Energi panas dihasilkan dari reaksi pembelahan inti (fisi) yang terjadi pada bahan bakar. Bahan bakar reaktor nuklir biasanya adalah bahan fisil dan fertil. Salah satu bahan fisil yang sering digunakan adalah Uranium. Uranium alami banyak terdapat pada kerak bumi yang susunnya terdiri atas campuran U-238 dan U-235 (Kidd, 2009).

Selain Uranium, bahan lain yang sering digunakan sebagai bahan bakar adalah Thorium. Thorium adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Th dan nomor atom 90. Logam thorium berwarna keperakan dan bernoda hitam saat terkena udara, membentuk dioksida, unsur ini cukup keras, mudah dibentuk, dan memiliki titik lebur yang tinggi. Thorium merupakan bahan fertil yang jika mengalami reaksi penangkapan neutron maka akan menghasilkan bahan fisil Uranium-233 (Stacey, 2001). Pertimbangan penggunaan Thorium adalah karena sumber daya Thorium di alam sekitar 3 kali lebih besar dari Uranium, dapat mengurangi jumlah limbah radioaktif (Ariani *et al*, 2015) dan lebih ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas CO₂ dari sektor energi listrik (ESDM, 2012).

High Temperatur Gas-cooled Reactor (HTGR) adalah salah satu jenis reaktor generasi ke-4 yang banyak dikembangkan sebagai sumber energi listrik. HTGR merupakan reaktor dengan temperatur keluaran lebih tinggi dari pada teknologi reaktor air ringan (LWR). HTGR mempunyai densitas daya rendah (4-6,6W/cm³) (Ortensi, 2012) dan kapasitas panas dari struktur grafit besar, panas peluruhan dalam elemen bakar dapat dipindahkan ke bagian luar bejana tekan dengan

konduksi panas dan radiasi, sehingga temperatur bahan bakar tidak mencapai batasan temperatur desain bahan bakar. HTGR memiliki skala *Small Medium Reactor* (SWR) atau reaktor skala kecil menengah, dengan fitur keselamatan melekat dan sistem keselamatan teknis pasif, sehingga mempunyai tingkat keselamatan dan keandalan yang baik. HTGR menggunakan grafit sebagai moderator & reflektor yang mempunyai titik leleh 3697 °C. Oleh karena itu, kecelakaan seperti pelelehan inti di LWR tidak akan terjadi, sehingga pelepasan besar dari produk fisi radioaktif juga tidak akan terjadi.

HTGR menggunakan pendingin berupa gas yang dikombinasikan dengan bahan teras yang tahan panas, gas yang sering digunakan adalah gas He (Helium). Penggunaan bahan teras yang bersifat tahan panas dikombinasi dengan pendingin helium menyebabkan suhu pendingin dapat mencapai 900 °C (Dewita *et al*, 2011), efisiensi termal yang tinggi dan kemampuan yang tinggi dari bahan bakar partikel berlapis dalam menahan produk fisi merupakan beberapa keuntungan Reaktor Temperatur Tinggi. Selain helium, karbon dioksida (CO₂) dapat juga digunakan sebagai pendingin pada reaktor cepat berpendingin gas. Gas CO₂ merupakan gas yang tersusun atas dua atom oksigen yang terikat dengan atom karbon. CO₂ berbentuk gas pada temperatur dan tekanan standar di atmosfer bumi. Konsentrasi CO₂ di atmosfer sekitar 387 ppm (Whorf dan Keeling, 2005). Keunggulan CO₂ adalah mampu bekerja pada tekanan yang rendah, dan CO₂ memiliki kapasitas panas, dapat menyerap gelombang infra merah dengan kuat dan memiliki koefisien panas yang tinggi dibandingkan dengan helium (Fauzia, 2009).

Dari pembahasan sebelumnya, maka dilakukan penelitian Desain Teras Reaktor HTGR Model *Mesh Triangular* Dua Dimensi Berbahan Bakar Thorium

Berpendingin Gas CO₂. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain suatu reaktor jenis HTGR berbahan bakar thorium dan berpendingin gas CO₂. Dalam mendesain suatu reaktor, diperlukan analisis secara komprehensif, salah satunya analisis neutronik, yang meliputi perhitungan pengayaan bahan bakar, ukuran teras reaktor, dan konfigurasi teras yang memenuhi kriteria kekritisan dan menghasilkan energi secara maksimal. Perhitungan juga dilakukan untuk menganalisis *burn-up* pada reaktor. Analisis dilakukan dengan menggunakan CITATION pada program *Standard thermal Reactor Analysis Code* (SRAC) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) di *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) Jepang. SRAC menggunakan data nuklida dari JENDL-3.2 untuk menghasilkan data penampang mikroskopik dan makroskopik yang efektif dari masing-masing komposisi material teras reaktor (Okumura, 2006).

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Bagaimana desain reaktor yang ideal untuk jenis reaktor HTGR dengan model *mesh triangular* dua dimensi agar menghasilkan energi yang maksimal?
2. Bagaimana komposisi material yang digunakan untuk mendesain reaktor HTGR dengan model *mesh triangular* dua dimensi agar menghasilkan energi yang maksimal?
3. Bagaimana ukuran dan konfigurasi teras yang efisien untuk jenis reaktor HTGR dengan model *mesh triangular* dua dimensi agar menghasilkan energi yang maksimal?

C. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor HTGR.
2. Bahan bakar yang digunakan adalah Thorium.
3. Bahan pendingin yang digunakan adalah gas CO₂.
4. Desain *mesh* yang digunakan berbentuk *triangular* dua dimensi dengan teras berbentuk silinder.
5. Perhitungan yang dilakukan pada 1/6 bagian teras reaktor.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini meliputi:

1. Mendesain reaktor jenis HTGR dengan model *mesh triangular* dua dimensi berbahan bakar thorium berpendingin gas CO₂.
2. Menentukan pengayaan bahan bakar U²³³.
3. Menentukan ukuran dan konfigurasi teras reaktor agar menghasilkan energi yang maksimal.

E. Manfaat Penelitian

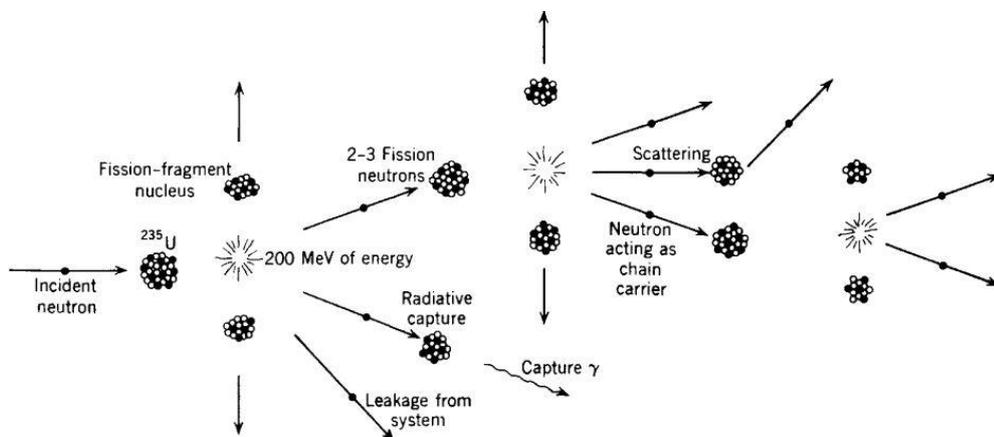
Manfaat dari penelitian ini meliputi:

1. Memberikan informasi ilmiah dalam penelitian dibidang reaktor nuklir jenis HTGR berbahan bakar thorium berpendingin gas.
2. Memberikan sumbang saran dalam masalah kekurangan energi listrik.
3. Mendukung penelitian dibidang reaktor nuklir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Reaktor

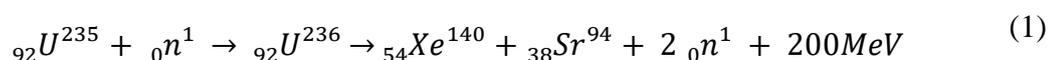
Istilah reaktor nuklir digunakan untuk perangkat yang berfungsi mengontrol terjadinya reaksi fisi. Pada reaktor ini berlangsung reaksi fisi berantai terkendali dan kontinu untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop dan nuklida baru. Terkendali yang dimaksud dalam hal ini adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaikkan-turunkan sesuai dengan kebutuhan energi. Sedangkan reaksi fisi kontinu harus terjadi dalam uranium alam, yang mengandung bahan fisil U-235 (0,7%). Reaksi fisi disertai pemancaran energi dan partikel, misalnya neutron. Neutron dalam reaktor nuklir digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi inti. Reaksi fisi terjadi jika sebuah inti berat membelah dan menghasilkan dua atau lebih inti atom yang lebih ringan, neutron dan energi sebesar 200 MeV seperti pada Gambar 1 (Duderstadt dan Hamilton, 1976).



Gambar 1. Reaksi fisi (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Reaktor nuklir mulai dikembangkan sebagai sumber energi sejak awal tahun 1950-an dan sejak saat itu teknologi nuklir mulai berkembang pesat. Era tahun 1950 sampai 1970 merupakan era emas untuk pengembangan reaktor nuklir. Pada saat itu penggunaan reaktor nuklir mendapat dukungan penuh berbagai pihak didunia, dengan adanya kecelakaan *chernobyl* pada tahun 1986, terjadi titik balik perkembangan reaktor nuklir. Banyak reaktor nuklir di dunia digugat keberadaannya dan banyak diantaranya yang kemudian ditutup. Namun perkembangan ini mempunyai banyak hikmahnya pula, khususnya bagi para ilmuwan dalam bidang reaktor nuklir. Kejadian ini memicu perubahan besar paradigma yang mengarah pada lahirnya era nuklir kedua, yang ditandai dengan kuatnya tuntutan keselamatan pasif, penanganan secara tuntas terhadap masalah limbah nuklir, kemampuan memanfaatkan uranium alam secara optimal dan kompetitif secara ekonomi (Su'ud, 1999).

Prinsip kerja reaktor nuklir mirip dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada sumber energi dan jenis bahan bakar. Sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran secara kimia bahan bakar fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir pada material-material fisil (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Jenis bahan bakar reaktor nuklir yang paling umum adalah U^{235} dan Pu^{239} Bahan bakar nuklir ini akan terpecah menjadi 2 bagian membentuk elemen kimia, berikut ini adalah salah satu contoh reaksi fisi (Duderstadt dan Hamilton, 1976).



Sebuah inti atom U^{235} ditembak menggunakan sebuah neutron berubah menjadi uranium-236 (U^{236}) kemudian menghasilkan xenon-140 (Xe^{140}) dan stronsium-94 (Sr^{94}), $2n$ dan sejumlah energi. Neutron yang dihasilkan dalam reaksi fisi itu selanjutnya akan diserap dan membelah menjadi Xe^{140} dan Sr^{94} lainnya sehingga terjadi reaksi berantai (Tim BATAN, 2001). Seperti diketahui bahan bakar reaktor yang biasa digunakan yaitu U^{235} , hal ini berkaitan dengan bahan bakar fisil dan fertil. Contoh bahan bakar fisil antara lain U^{233} , U^{235} , Pu^{239} , dan Pu^{241} . Sedangkan yang termasuk bahan bakar fertil yaitu Th^{232} , U^{238} , Pu^{238} , dan Pu^{240} (Zhang *et al*, 2014).

Hingga saat ini telah ada berbagai jenis dan ukuran reaktor nuklir, tetapi semua reaktor atom tersebut memiliki lima komponen dasar yang sama, yaitu: elemen bahan bakar, moderator, batang kendali, pendingin dan perisai.

1. Batang Bahan Bakar (*Fuel Pin*)

Batang bahan bakar ini berbentuk pipa dengan diameter kira-kira 1 cm. Dalam suatu reaktor daya besar, ada ribuan batang bahan bakar yang diletakkan saling berdekatan. Seluruh batang bahan bakar dan daerah sekitarnya dinamakan teras reaktor. Sedangkan batang elemen bahan nuklir terdiri dari bahan bakar nuklir, misalnya U^{233} , U^{235} , Pu^{239} , dan Th^{232} (Yulianto, 1996).

2. Moderator

Moderator adalah sebuah material yang dapat mengurangi kelajuan neutron-neutron yang energinya sangat besar sehingga neutron-neutron ini dapat dengan mudah membelah inti. Moderator yang umum digunakan adalah air ringan (H_2O) atau air berat (D_2O). Air ringan memiliki kepadatan 1 gr/cm^3 , titik lebur 0°C , dan titik didih 100°C . Sedangkan air berat memiliki kepadatan $1,11 \text{ gr/cm}^3$, titik lebur

3,8°C, dan titik didih 101°C (Price *et al.*, 2013). Ketika neutron berenergi tinggi keluar dari sebuah elemen bahan bakar, neutron tersebut memasuki air di sekitarnya dan bertumbukan dengan molekul-molekul air. Sebagai hasilnya neutron tersebut diperlambat (Cao *et al.*, 2008).

3. Batang Kendali (*Control Rod*)

Mekanisme kendali sangat diperlukan untuk menjaga jumlah neutron dalam reaktor berada pada keadaan kritis. Kendali ini dilakukan oleh sejumlah batang kendali yang dapat bergerak keluar-masuk teras reaktor. Batang kendali terbuat dari bahan-bahan penyerap neutron, seperti boron dan kadmium (Tadeus *et al.*, 2010).

4. 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).

5. Perisai (*Shielding*)

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 ini, maka umumnya reaktor dikelilingi oleh perisai beton. Bahan perisai yang umumnya 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 (Soentono, 1998).

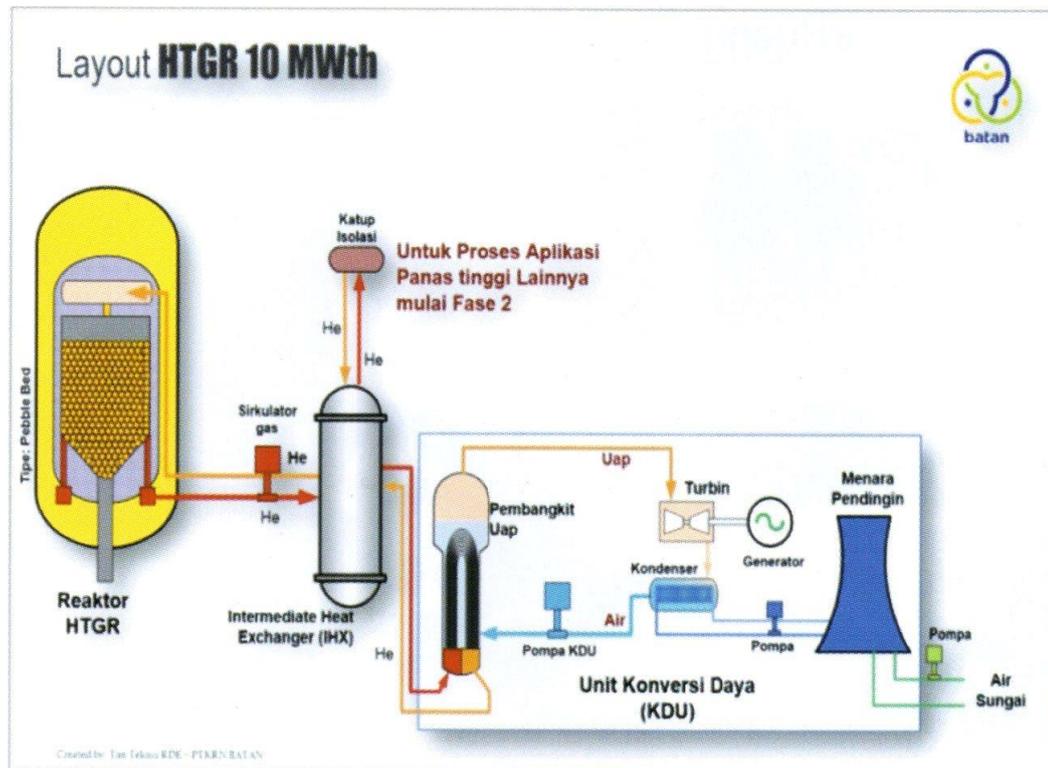
B. High Temperatur Gas-Cooled Reactor (HTGR)

Reaktor Temperatur Tinggi *High Temperature Reactor* (HTR) adalah salah satu jenis reaktor daya tipe maju dengan efisiensi termal tinggi yang mempunyai sistem keselamatan pasif dan melekat (*passive and inherent safety*) dan sangat andal. Dari beberapa tipe reaktor temperatur tinggi, salah satunya adalah *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR) (Zhong dan Tang, 2011). HTGR merupakan reaktor dengan temperatur keluaran lebih tinggi dari pada teknologi *Low Water Reactor* (LWR). Reaktor ini merupakan reaktor skala *Small Medium Reactor* (SMR) atau reaktor skala kecil menengah, yang mempunyai fitur keselamatan melekat dan sistem keselamatan teknis pasif, sehingga mempunyai tingkat keselamatan dan keandalan yang lebih baik (Alimah *et al*, 2014).

Reaktor ini menggunakan grafit sebagai moderator dan reflektor, gas helium sebagai pendingin inert yang mempunyai fase tunggal, bahan bakar partikel berlapis dan teras berdensitas daya rendah. Penggunaan bahan teras yang bersifat tahan panas dikombinasi dengan pendingin helium menyebabkan suhu pendingin dapat mencapai 900 °C, efisiensi termal yang tinggi dan kemampuan yang tinggi dari bahan bakar partikel berlapis dalam menahan produk fisi merupakan beberapa keuntungan Reaktor Temperatur Tinggi (Dewita *et al*, 2011).

Burn-up bahan bakar dapat mencapai 90,000Mwhari/tonU (Sandell, 2004), sehingga sisa bahan fisi 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*, 2014). Skema umum reaktor HTGR ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema umum reaktor HTGR (Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2015)

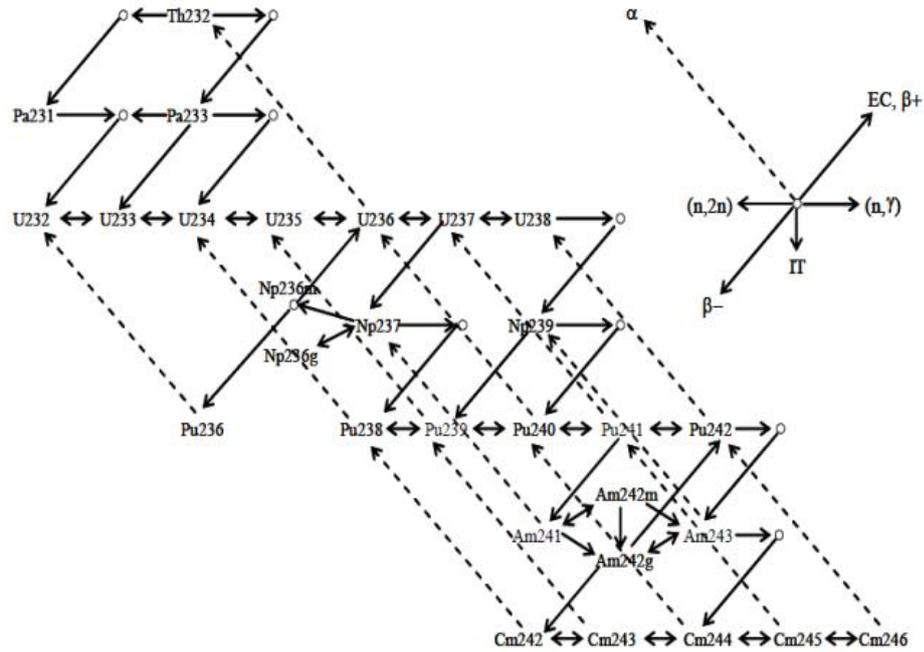
Terdapat dua tipe HTGR, yaitu HTGR yang menggunakan elemen bakar bentuk prisma dan HTGR menggunakan elemen bakar bentuk bola (*Pebble Bed*). Baik elemen bakar bentuk prisma maupun *pebble bed* masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Elemen bakar bentuk prisma mempunyai komposisi struktur geometri 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). Sedangkan, HTGR dengan elemen bakar bentuk pebble bed mempunyai kelebihan dalam fleksibilitas pola pengisian bahan bakar, karena pengisian bahan bakar dapat dilakukan secara on-line dengan beberapa kali melewati teras (multi pass). Selain itu, konduktivitas panas elemen bakar bentuk pebble bed relatif lebih tinggi dibandingkan elemen bakar bentuk prismatic (Tran dan Liem, 2016).

C. Thorium

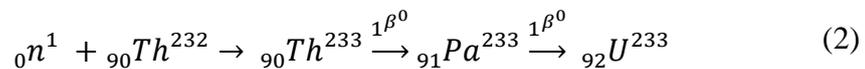
Thorium seperti halnya Uranium dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir meskipun tidak bersifat fisil (Kidd, 2009). Oleh karena itu Thorium-232 (Th^{232}) tidak dapat langsung digunakan dalam reaktor termal. Namun, Th^{232} yang bersifat fertil akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan Uranium-233 (U^{233}) yang bersifat fisil (World Nuclear, 2010) sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam reaktor.

Thorium merupakan logam bersifat radioaktif, berwarna putih keperakan yang relatif stabil, bila terkontaminasi oksida akan berubah warna menjadi abu-abu lalu menjadi hitam. Thorium mempunyai titik leleh sekitar 3.300 °C. Selain itu thorium bersifat reaktif dan bereaksi dengan oksigen, hidrogen, halogen dan sulfur. Thorium bereaksi secara lambat terhadap air, namun tidak mudah larut pada hampir semua asam, kecuali asam klorida (Dewita, 2012). Reaksi fisi berantai pada Th^{232} menghasilkan U^{233} dan hasil fisi yang lain dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Siklus reaksi thorium (Okumura *et al.*, 2002).

Thorium alam mengandung 100% Th^{232} . Waktu paruh unsur radioaktif ini sekitar 14×10^9 tahun. Th^{232} tersebut tidak dapat membelah, tetapi dapat berubah menjadi Th^{233} setelah menyerap neutron. Th^{233} menjadi Pa^{233} setelah meluruhkan beta (β). Pa^{233} mempunyai waktu paruh 27 hari, berubah menjadi U^{233} setelah melepaskan beta. U^{233} adalah unsur dapat membelah dan dapat digunakan sebagai bahan bakar. Hal ini sama dengan pembuatan Pu^{239} yang dapat membelah dari U^{238} di dalam reaktor nuklir. Th^{232} merupakan bahan fertil sama dengan U^{238} (Susilo, 2002). Reaksi pembelahan Th^{232} sebagai berikut.



Dengan demikian, awalnya Th^{232} sekarang 99,9 % U^{233} . Siklus thorium menghasilkan limbah radioaktif yang terdiri dari aktinida dan elemen berat atom lebih rendah yang dapat didaur ulang sepenuhnya (Schaffer, 2013).

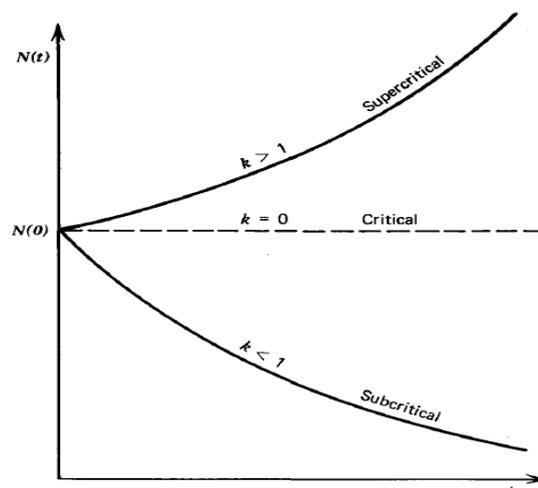
Ditinjau dari aspek sifat fisika, kimia, dan sifat neutronik maupun jumlah cadangannya thorium potensi untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir alternative. Ditinjau dari aspek sifat neutronik, Th^{232} merupakan bahan fertile yang lebih unggul dibanding U^{238} , karena tampang lintang serap neutron Th^{232} (7,4 barns) dan U^{238} (2,7 barns) (Wilson et al, 2009).

Penggunaan thorium sebagai bahan bakar reaktor nuklir ini lebih aman, lebih murah dan lebih ramah lingkungan. Thorium lebih aman karena tidak memiliki isotop yang bersifat fisil sehingga tidak cocok digunakan untuk senjata nuklir (Kamei dan Hakami, 2011). Thorium lebih murah karena jumlahnya yang melimpah di bumi, yaitu empat kali lebih banyak dibandingkan dengan jumlah Uranium. Selain itu, bahan bakar thorium lebih bersih dan ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas CO_2 dari sektor energi listrik dan menghasilkan limbah yang lebih sedikit (Wilson et al, 2009).

D. Faktor Multiplikasi (K_{eff})

Reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor mengakibatkan dihasilkan/hilangnya neutron dalam jumlah tertentu. Secara umum perubahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan k -efektif atau sering disebut dengan faktor multiplikasi (Zweifel, 1973). Di dalam fisika reaktor, faktor multiplikasi adalah besaran yang menunjukkan perbandingan antara jumlah populasi neutron pada suatu generasi dengan jumlah populasi neutron pada generasi sebelumnya dalam suatu medium tertentu. Jika medium tersebut mempunyai dimensi ruang yang terbatas maka faktor multiplikasi disebut dengan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), sedangkan jika mediumnya tak berhingga maka disebut faktor multiplikasi

tak berhingga (*k-inf*). Faktor multiplikasi (*k*) merupakan salah satu parameter perhitungan teras dalam menetapkan batasan keselamatan dan panjang siklus operasi reaktor. Batasan keselamatan tersebut antara lain mencakup harga reaktivitas lebih teras, reaktivitas batang kendali, margin reaktivitas padam, koefisien reaktivitas suhu/*void*. Sedangkan panjang siklus operasi menentukan batasan fraksi bakar buang bahan bakar yang selain bergantung pada harga multiplikasi juga dengan besarnya daya yang dibangkitkan. Harga faktor multiplikasi tersebut dapat digunakan sebagai parameter suatu teras reaktor apakah dalam keadaan subkritis, kritis atau superkritis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 (Duderstadt dan Hamilton, 1976).



Gambar 4. Grafik banyaknya neutron terhadap waktu di dalam reaktor (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor, dimana keadaan stabil (kritis) dicapai jika nilai *k*-efektif = 1. Jika besarnya $k_{\text{eff}} > 1$ disebut reaktor superkritis yang artinya jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu, jika $k_{\text{eff}} = 1$ reaktor dalam keadaan kritis artinya jumlah neutron tidak berkurang atau pun bertambah tetapi konstan (tetap), dan

jika besarnya nilai $k_{\text{eff}} < 1$ disebut reaktor subkritis yang artinya jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu (Zweifel, 1973).

Faktor multiplikasi menunjukkan keadaan neutronik dari sebuah reaktor dan menjadi salah satu acuan dalam mendesain sebuah reaktor. Faktor multiplikasi diharapkan selalu bernilai kritis untuk menjamin keberlangsungan operasi reaktor dengan pembangkitan daya yang terkendali dan stabil selama reaktor beroperasi (Riska, 2016).

E. Difusi Neutron

Neutron dalam reaktor bertumbukan dan berhamburan, karena neutron selalu berpindah tempat dari titik hamburan satu dan ke titik hamburan yang lainnya. Hingga akhirnya, neutron mengalami reaksi serapan. Proses berpindahnya neutron ini adalah proses transport. Persamaan yang mendeskripsikan proses transport yang lengkap adalah proses transport. Dan bentuk paling sederhana terhadap teori transport adalah teori difusi (Glasstone dan Edlund, 1952).

Persamaan difusi menunjukkan hubungan antara perubahan produksi neutron, perubahan karena serapan neutron dan perubahan karena bocoran produksi neutron dalam suatu elemen volume teras reaktor yang berasal dari hasil reaksi fisi, peristiwa hamburan inelastik (*removal inelastic scattering*), serta sumber neutron di luar elemen. Perubahan karena serapan neutron disebabkan oleh reaksi absorpsi neutron oleh inti-inti atom medium. Sedangkan perubahan karena bocoran neutron disebabkan oleh hamburan yang keluar menuju elemen ruang lain atau keluar dari batas luar medium. Untuk melakukan penurunan persamaan difusi diterapkan konsep keseimbangan jumlah neutron yang masuk dan neutron yang keluar dari teras.

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla \cdot D_g \nabla \phi - \sum a_g \phi_g + S_g - \sum S_g \phi_g + \sum_{g'}^G S_{g'g} \phi_{g'} \quad (3)$$

$$g = 1, 2, \dots, G$$

dimana sumber S_g dapat dituliskan pada persamaan 4.

$$\sum S_g = \sum_{g'=1}^G \sum S_{gg'} \quad (4)$$

Perubahan neutron yang hilang karena absorpsi dan tumbukkan (*scattering*) dapat dituliskan pada persamaan 5.

$$\sum r_g \phi_g = \sum a_g \phi_g + \sum S_g \phi_g \quad (5)$$

Pada keadaan tunak (*steady state*) yaitu keadaan yang tidak tergantung waktu, besarnya laju perubahan neutron adalah 0, yang dapat dituliskan pada persamaan 6.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Persamaan difusi neutron dituliskan sebagai berikut :

$$-\vec{\nabla} \cdot D_g \vec{\nabla} \phi_g + \Sigma r_g \phi_g = \frac{\chi_g}{K_{eff}} \Sigma_{g'}^G v_{g'} \Sigma_{fg'} \phi_{g'} + \Sigma_{g'}^G \Sigma_{sg'} \phi_{g'} \quad (7)$$

Keterangan,

D_g = Tetapan difusi kelompok g

$\Sigma_{g'}$ = Penampang lintang makroskopis kelompok g

$v \Sigma_{fg}$ = Probabilitas terjadinya reaksi fisi tiap detik pada kelompok g

ϕ_g = Fluks neutron yang bergantung pada ruang dan energi pada kelompok g

K_{eff} = Faktor multiplikasi efektif

χ_g = Probabilitas neutron hasil fisi memiliki energi dalam grup g

$\sum r_g$ = Penampang lintang *removal* makroskopis grup g

$\Sigma f_{g'}$ = Penampang lintang fisi makroskopis grup g

$\Sigma S_{g'}$ = Penampang lintang *scattering* makroskopis grup g.

Pada persamaan 7 energi neutron dianggap memiliki kelompok energi sehingga disebut persamaan difusi multigrup (Duderstand dan Hamilton, 1976).

Dalam analisis reaktor, persamaan difusi seringkali dihitung secara berulang. Misalnya, untuk perhitungan *burn up* bahan bakar pada jangka waktu lama, nilai fluks neutron harus diperbaharui secara berkala. Sehingga secara keseluruhan waktu perhitungan persamaan difusi menjadi cukup besar. Dengan demikian percepatan perhitungan persamaan difusi akan sangat mempercepat analisis reaktor secara keseluruhan (Taufiq, 2011).

F. Standar Thermal Reactor Analysis Code (SRAC)

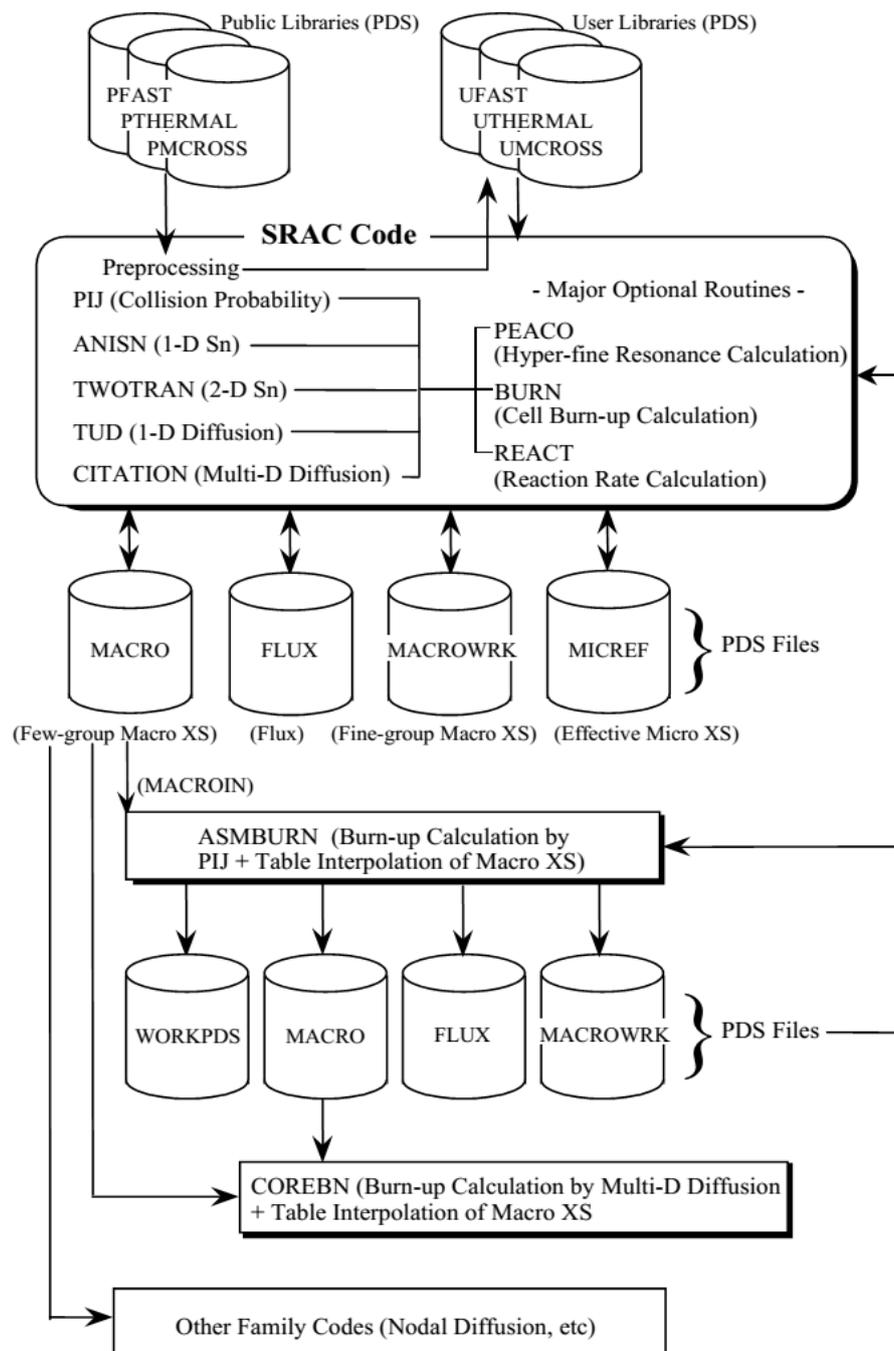
SRAC merupakan suatu sistem kode penghitungan neutron yang bersifat menyeluruh untuk beberapa jenis reaktor termal (Okumura, 2002). SRAC mulai berkembang pada tahun 1978 sebagai standar kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang (*Japan Atomic Energy Agency/JAEA*) (Okumura, 2007).

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.

2. ANISN sebagai kode transport satu dimensi (S_N) yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (R_s).
3. TWOTRAN sebagai kode transport dua dimensi (S_N) 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 (R_s).
5. *CITATION* sebagai kode difusi multi dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segienam (Okumura *et al.*, 2002).

Gambar struktur program SRAC ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur program SRAC (Okumura, 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 *run* maka *file output* standar akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai tepat atau

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).

G. Karbon Dioksida (CO₂) Sebagai Gas Pendingin

Pendingin adalah komponen yang digunakan untuk memberi suplai dan sirkulasi gas pendingin untuk mendinginkan teras reaktor, akibat reaksi nuklir yang terjadi. Bahan 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 dan Prihatnadi, 2009). Bahan yang sering digunakan sebagai pendingin reaktor adalah gas helium (He). Selain gas helium, Karbon dioksida (CO₂) dapat juga digunakan sebagai gas pendingin pada reaktor cepat berpendingin gas. Gas CO₂ adalah sejenis senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Ia berbentuk gas pada keadaan temperatur dan tekanan standar dan hadir di atmosfer bumi. Rata-rata konsentrasi karbon dioksida di atmosfer bumi kira-kira 387 ppm berdasarkan volume walaupun jumlah ini bisa bervariasi tergantung pada lokasi dan waktu. Karbon dioksida adalah gas rumah kaca yang penting karena ia menyerap gelombang inframerah dengan kuat (Whorf dan Keeling, 2005). Sifat

fisik dari Gas CO₂ yaitu tidak berbau, tidak berwarna, tidak mudah terbakar, sedikit asam, lebih berat dari pada udara dan mudah larut dalam air. Selain itu, sifat fisik juga dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Fisik Gas CO₂

Parameter	Keterangan
Titik lebur	-56 °C (216 K)
Titik didih	-78 °C (195 K)
Densitas	1,98 gram/L

Keunggulan CO₂ adalah mampu bekerja pada tekanan yang rendah, dan CO₂ memiliki kapasitas panas, dapat menyerap gelombang infra merah dengan kuat dan memiliki koefisien panas yang tinggi dibandingkan dengan helium (Fauzia, 2009).

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli - Oktober 2018 di jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

B. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat personal komputer dengan OS (*Operating System*) Linux Mint dan program SRAC.

C. Prosedur Penelitian

Prosedur dari penelitian yang akan dilakukan adalah:

1. Menentukan pengayaan (*Enrichment*)

Bahan bakar terdiri dari tiga komposisi yaitu *fuel first region*, *fuel second region* dan *fuel third region* dengan pengayaan yang berbeda jumlahnya. Komposisi bahan bakar untuk *fuel first region* dengan persentase pengayaan sebesar 1-5% dan sedangkan untuk *fuel second region* persentase pengayaan yaitu 2,5% pada pengayaan bahan bakar bagian pertama. Pada bahan bakar bagian kedua pengayaan bahan bakar bagian kedua 1-5% dan pengayaan bahan bakar bagian pertama dari hasil pengayaan bahan bakar pertama yang

mendekati $k_{eff} = 1,00$. Perhitungan pengayaan dilakukan agar diperoleh nilai $k_{eff} = 1,00$ yang menandakan reaktor berada dalam kondisi kritis.

2. Menghitung densitas atom (*Atomic density*)

Melakukan perhitungan densitas atom Th^{232} dan U^{233} sebagai fungsi pengayaan dengan menggunakan rumus:

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad (8)$$

Dimana

N = densitas atom (atom/cm³)

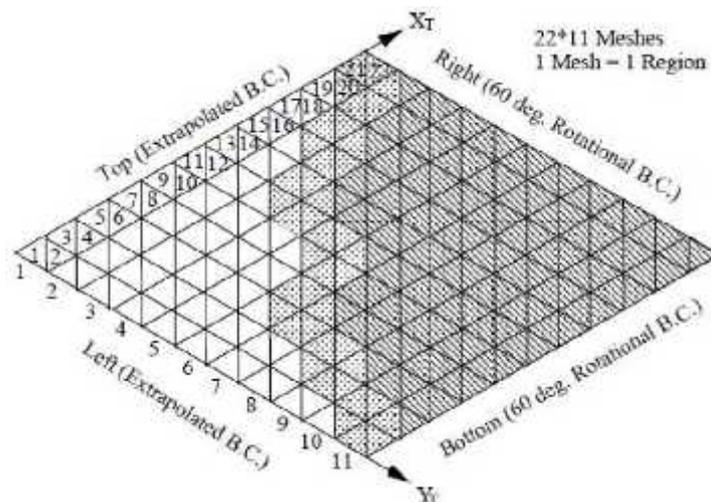
= massa jenis (gr/cm³)

N_A = bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ atom/mol)

M = massa molekul (gr/mol)

3. Menentukan Ukuran dan Konfigurasi Teras Reaktor

Ukuran teras reaktor ditentukan dengan perhitungan secara dua dimensi yaitu *row* (x) dan *column* (y), (x,y) keduanya menunjukkan radius pada sebuah teras reaktor berbentuk silinder. Contoh model *mesh triangular* yang akan dihitung secara dua dimensi (x,y) dengan menggunakan *CITATION* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Model mesh triangular dua dimensi (Okumura, 2002). Model geometri teras reaktor yang ideal, dapat diperoleh dengan melakukan penentuan ukuran teras reaktor kemudian mengubah-ubah konfigurasi bahan bakar tanpa mengubah ukuran dari teras reaktor (Okumura, 2007).

4. *Input* data pada *CITATION*

Hasil perhitungan densitas atom yang telah didapatkan digunakan sebagai data *input CITATION* pada SRAC. Pada *CITATION* akan diketahui hasil penghitungan secara keseluruhan dari model reaktor yang di desain dengan ukuran dan komposisi tertentu. Keluaran dari *CITATION* akan menampilkan hasil perhitungan yang menunjukkan apakah model teras reaktor yang dibuat berada dalam keadaan kritis, dapat menghasilkan energi yang maksimal dan memenuhi standar keamanan. Berikut adalah contoh *input* penghitungan menggunakan *CITATION* pada SRAC.

```
#===== Exec SRAC code with the following input data =====#
cd $WKDR
cat - << END_DATA | $LM >& $OUTLST
HFA0
MACRO FOR HCLWR CORE CALCULATION (6.5WT.%)
1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 0 0 0 0 2 0 3 0 0 0 / SRAC CONTROL
3.6273E-4 / BUCKLING
$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pfast Old File
```

\$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/phtml O F
 \$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pmcrs O F
 \$PDS_DIR/UFAST Scratch Core
 \$PDS_DIR/UTHERMAL S C
 \$PDS_DIR/UMCROSS S C
 \$PDS_DIR/MACROWRK S C
 \$PDS_DIR/MACRO N C
 \$PDS_DIR/FLUX S C
 \$PDS_DIR/MICREF S C
 59 31 5 2 /
 59(1) /
 15(1) 15(2) 3 /
 10 10 8 17 14 /
 15 16 /
 6 6 6 3 1 1 6 0 0 0 -5 0 6 15 0 0 30 0 / Pij Control
 0 100 100 5 5 5 -1 0.0001 0.00001 0.001 1.0 10. 0.5 /
 1 1 1 2 3 3 / R-T
 3(1) / R-X
 1 2 3 / M-R
 0.0 0.2511 0.3552 0.435 0.475 0.530 0.5946 / RX
 3 / NMAT
 FUE1P0PP 0 8 1000. 0.870 0.0 / 1 : FUEL FIRST REGION
 XPU90009 2 0 1.1854E-3 /1 (6.5WT.%PU-F)
 XPU00009 2 0 5.0889E-4 /2
 XPU10009 2 0 2.2481E-4 /3
 XPU20009 2 0 1.1445E-4 /4
 XAM10009 2 0 1.0219E-5 /5
 XU050009 2 0 4.0019E-5 /6
 XU08W009 2 0 1.9718E-2 /7
 XO06W009 0 0 4.3603E-2 /8
 CLD1P0PP 0 4 600. 0.08 0.0 / 2 : CLADDING
 XFEN0008 2 0 5.9620E-2 /1 (SUS-304)
 XCRN0008 2 0 1.7380E-2 /2
 XNIN0008 2 0 8.0980E-3 /3
 XMN50008 2 0 8.6590E-4 /4
 MOD1Q0QQ 0 6 581. 1.0 0.0 / 3 : MODERATOR
 4 XH01H008 0 0 4.21634E-2 /1
 XO060008 0 0 2.10817E-2 /2
 XFEN0008 0 0 6.70725E-3 /5
 XCRN0008 0 0 1.95525E-3 /4
 XNIN0008 0 0 9.11025E-4 /3
 XMN50008 0 0 9.74138E-5 /6
 0 / PEACO
 HFB0
 MACRO (HIGH TEMP.,FULL POWER ,SECOND REGION(B),0% VOID)
 1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 1 0 0 0 2 0 3 0 0 0 / SRAC CONTROL
 3.6273E-4 / GEOMETRICAL BUCKLING
 3 / NMAT

FUE2R0RR 0 8 1000. 0.870 0.0 / 1 : FUEL SECOND REGION
 XPU90009 2 0 1.3637E-3 /1 (7.5WT.%PU-F)
 XPU00009 2 0 6.4402E-4 /2
 XPU10009 2 0 2.6346E-4 /3
 XPU20009 2 0 1.5613E-4 /4
 XAM10009 2 0 1.2197E-5 /5
 XU050009 2 0 3.9212E-5 /6
 XU08W009 2 0 1.9320E-2 /7
 XO06W009 0 0 4.3598E-2 /8
 CLD2R0RR 0 4 600. 0.08 0.0 / 2 : CLADDING
 XFEN0008 2 0 5.9620E-2 /1 (SUS-304)
 XCRN0008 2 0 1.7380E-2 /2
 XNIN0008 2 0 8.0980E-3 /3
 XMN50008 2 0 8.6590E-4 /4
 MOD2S0SS 0 6 581. 1.0 0.0 / 3 : MODERATOR
 XH01H008 0 0 4.21634E-2 /1
 XO060008 0 0 2.10817E-2 /2
 XFEN0008 0 0 6.70725E-3 /3
 XCRN0008 0 0 1.95525E-3 /4
 XNIN0008 0 0 9.11025E-4 /5
 XMN50008 0 0 9.74138E-5 /6
 0 / PEACO
 HFC0
 MACRO (HIGH TEMP.,FULL POWER ,THIRD REGION(C),0% VOID)
 1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 1 0 0 0 2 0 3 0 0 0 / SRAC CONTROL
 3.6273E-4 / GEOMETRICAL BUCKLING
 4 / NMAT
 FUE3U0UU 0 8 1000. 0.870 0.0 / 1 : FUEL THIRD REGION
 XPU90009 2 0 1.6413E-3 /1 (9.0WT.%PU-F)
 XPU00009 2 0 7.0464E-4 /2
 XPU10009 2 0 3.1129E-4 /3
 XPU20009 2 0 1.5847E-4 /4
 XAM10009 2 0 1.4149E-5 /5
 XU050009 2 0 3.8417E-5 /6
 XU08W009 2 0 1.8929E-2 /7
 XO06W009 0 0 4.3594E-2 /8
 CLD3U0UU 0 4 600. 0.08 0.0 / 2 : CLADDING
 XFEN0008 2 0 5.9620E-2 /1 (SUS-304)
 XCRN0008 2 0 1.7380E-2 /2
 XNIN0008 2 0 8.0980E-3 /3
 XMN50008 2 0 8.6590E-4 /4
 MOD3V0VV 0 6 581. 1.0 0.0 / 3 : MODERATOR
 XH01H008 0 0 4.21634E-2 /1
 XO060008 0 0 2.10817E-2 /2
 XFEN0008 0 0 6.70725E-3 /3
 XCRN0008 0 0 1.95525E-3 /4
 XNIN0008 0 0 9.11025E-4 /5
 XMN50008 0 0 9.74138E-5 /6

REF0X0XX 0 6 581. 1.0 0.0 / 4 : REFLECTOR
 XH01H008 0 0 3.32556E-2 /1
 XO060008 0 0 1.66278E-2 /2
 XFEN0008 0 0 1.78860E-2 /3
 XCRN0008 0 0 5.21400E-3 /4
 XNIN0008 0 0 2.42940E-3 /5
 XMN50008 0 0 2.59770E-4 /6
 0 / PEACO
 CITA
 TRIANGULAR 1/6-CORE:34*17 (2D BY CITATION)
 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 5 0 0 2 0 1 0 0 0 / SRAC CONTROL
 1.9847E-4 / Buckling (Not effective)
 57 0 -3 / CITATION : 57-Zones to edit assembly power
 1 1 / Material Dependent Spectrum & Kinetics Parameter Option
 56(5) 1 / Benoist-D for Fuel Region
 TRIANGULAR GEOMETRY (34*17) , 7-GROUPS , B.C. :
 60DEG.ROTATIONAL
 HIGH TEM. HIGH POWER 0% VOID (FIRST CYCLE NO BURN-UP)
 001
 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
 1 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0
 0
 0.
 003
 0 0 0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 0 0 58
 0.00001 0.00001 0.00001
 0. 0.0 3411.0 1.0 0.000747384
 004
 34 202.1881
 17 202.1881
 005
 58
 006
 1
 34 34 17 17 0 0
 2
 32 34 16 16 0 0 31 33 17 17 0 0
 3
 28 30 17 17 0 0
 4
 30 32 15 15 0 0 29 31 16 16 0 0
 5
 34 34 14 14 0 0 33 34 15 15 0 0
 6
 26 28 16 16 0 0 25 27 17 17 0 0
 7
 28 30 14 14 0 0 27 29 15 15 0 0
 8

32 34 13 13 0 0 31 33 14 14 0 0
9
22 24 17 17 0 0
10
24 26 15 15 0 0 23 25 16 16 0 0
11
26 28 13 13 0 0 25 27 14 14 0 0
12
30 32 12 12 0 0 29 31 13 13 0 0
13
34 34 11 11 0 0 33 34 12 12 0 0
14
20 22 16 16 0 0 19 21 17 17 0 0
15
22 24 14 14 0 0 21 23 15 15 0 0
16
24 26 12 12 0 0 23 25 13 13 0 0
17
28 30 11 11 0 0 27 29 12 12 0 0
18
32 34 10 10 0 0 31 33 11 11 0 0
19
16 18 17 17 0 0
20
34 34 8 8 0 0 33 34 9 9 0 0
21 / SECOND REGION FUEL B001
18 20 15 15 0 0 17 19 16 16 0 0
22
20 22 13 13 0 0 19 21 14 14 0 0
23
22 24 11 11 0 0 21 23 12 12 0 0
24
26 28 10 10 0 0 25 27 11 11 0 0
25
30 32 9 9 0 0 29 31 10 10 0 0
26
14 16 16 16 0 0 13 15 17 17 0 0
27
16 18 14 14 0 0 15 17 15 15 0 0
28
18 20 12 12 0 0 17 19 13 13 0 0
29
20 22 10 10 0 0 19 21 11 11 0 0
30
24 26 9 9 0 0 23 25 10 10 0 0
31
28 30 8 8 0 0 27 29 9 9 0 0
32

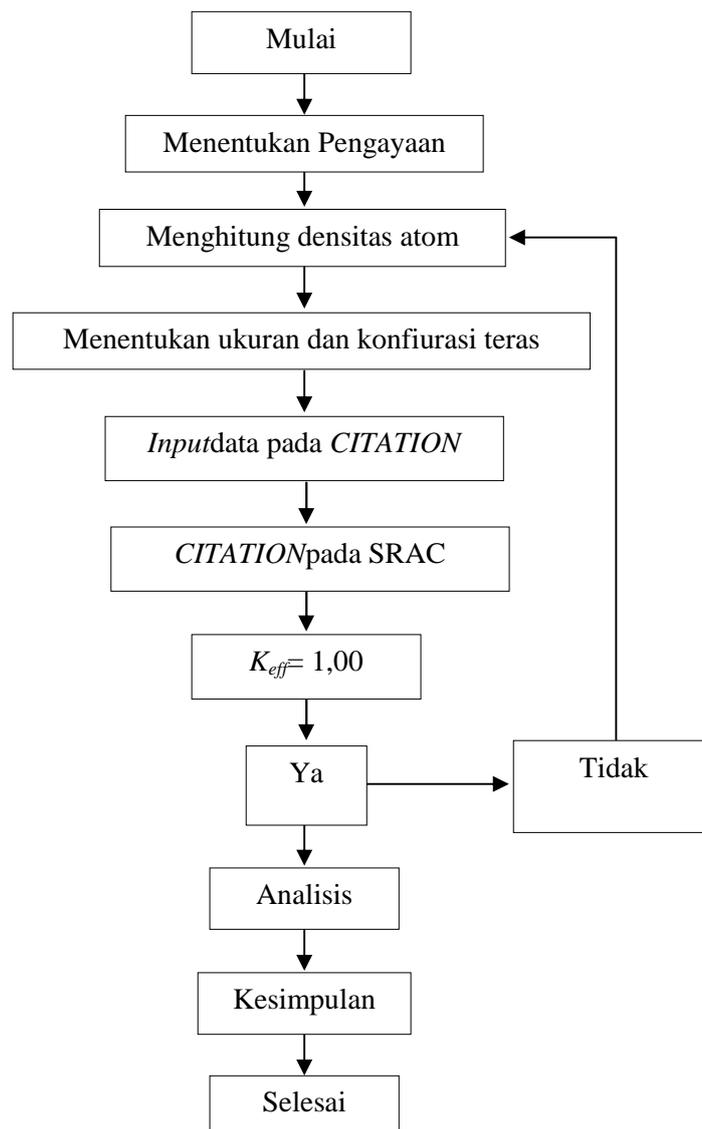
32 34 7 7 0 0 31 33 8 8 0 0
33
10 12 17 17 0 0
34
12 14 15 15 0 0 11 13 16 16 0 0
35
14 16 13 13 0 0 13 15 14 14 0 0
36
26 28 7 7 0 0 25 27 8 8 0 0
37
30 32 6 6 0 0 29 31 7 7 0 0
38
34 34 5 5 0 0 33 34 6 6 0 0
39 / THIRD REGION FUELC001
16 18 11 11 0 0 15 17 12 12 0 0
40
18 20 9 9 0 0 17 19 10 10 0 0
41
22 24 8 8 0 0 21 23 9 9 0 0
42
8 10 16 16 0 0 7 9 17 17 0 0
43
10 12 14 14 0 0 9 11 15 15 0 0
44
12 14 12 12 0 0 11 13 13 13 0 0
45
14 16 10 10 0 0 13 15 11 11 0 0
46
16 18 8 8 0 0 15 17 9 9 0 0
47
20 22 7 7 0 0 19 21 8 8 0 0
48
24 26 6 6 0 0 23 25 7 7 0 0
49
28 30 5 5 0 0 27 29 6 6 0 0
50
32 34 4 4 0 0 31 33 5 5 0 0
51
4 6 17 17 0 0
52
6 8 15 15 0 0 5 7 16 16 0 0
53
8 10 13 13 0 0 7 9 14 14 0 0
54
26 28 4 4 0 0 25 27 5 5 0 0
55
30 32 3 3 0 0 29 31 4 4 0 0
56

superkritis karena jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu. Sedangkan jika besarnya nilai $k_{eff} < 1$ reaktor subkritis karena jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu (Zweifel, 1973).

Selain k_{eff} , *output* yang akan dihasilkan adalah distribusi rapat daya di dalam teras reaktor. Besarnya rapat daya sebuah reaktor menunjukkan besarnya daya yang dihasilkan persatuan volume. Distribusi rapat daya merupakan salah satu analisis keselamatan reaktor. Distribusi rapat daya tersebut dapat digunakan untuk menentukan ada tidaknya reaktor daya puncak dan suhu bahan bakar minimum dari suatu teras reaktor yang melampaui batas yang diizinkan.

D. Diagram Alir

Gambar 7 merupakan diagram alir penelitian.



Gambar 7. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Harga *k-efektif* yang menunjukkan kondisi kritis diperoleh pada bahan bakar bagian pertama dengan pengayaan U^{233} 3% dan bahan bakar bagian kedua dengan pengayaan U^{233} 2,731% dengan ukuran kolom (x) 202 cm dan baris (y) 101 cm yaitu 1,000008.
2. Rapat daya maksimal yang diperoleh sebesar 107,5371 watt/cm³ pada ukuran teras reaktor kolom (x) 202 cm dan baris (y) 101 cm.
3. Rapat daya rata-rata pada kolom (x) sebesar 59,465 watt/cm³ dengan faktor puncak daya sebesar 1,4093746.
4. Rapat daya rata-rata pada baris (y) sebesar 57,605 watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,4137644.

B. Saran

Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mendesain reaktor jenis HTGR dengan bahan bakar, bahan pendingin dan model *mesh* yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfa, T. 2015. *Fisika Reaktor-Pelatihan Penyelenggaraan Operator dan Supervisor Reaktor TRIGA 2000*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. Bandung.
- Ariani, M., Supardi., Fiber, M. & Zaki, S. 2015. Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN. *Prosiding Semirata 2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat*. Hal 39-45.
- Alimah, S, Erlan, D. & Sudi, A. 2014. Analisis Komparasi HTGR Tipe Prismatik dan Pebble Bed. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol 16. No 1. Hal 11-21.
- Badan Tenaga Nuklir Nasional. 2015. *Pilihan Teknologi RDE*. (Online) tersedia: <http://www.batan.go.id/index.php/id/pilihan-teknologi-rde>. Diakses pada 1 Juni 2018.
- Bawani, S. 2016. Desain Reaktor Air Super Kritis (*Super Critical Cooled Water Reactor*) dengan Menggunakan Bahan Bakar Uranium Thorium Model Teras Silinder. *Skripsi* Hal 42 dan 51.
- Cao, L., Yoshiaki, O., Yuki, I. & Zhi, S. 2008. Fuel, Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology* Vol 45. No 2. Hal 138-148.
- Csom, G., Reiss, T., Fehér, S. & Czifrus, S. 2012. Thorium as an Alternative Fuel for SCWRs. *Annals of Nuclear Energy* 41. Hal 67-78.
- Dewita, E., Dedi, P. & 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. 2012. Analisis Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* Vol 14. No.1. Hal 45-56.
- Duderstadt, J.J. & Hamilton, L.J. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. Michigan: The University of Michigan.
- 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.

- Fauzia, A. S. 2009. Studi Perbandingan Penggunaan Gas Helium Dan Karbon Dioksida sebagai Pendingin pada *High Temperature Engineering Test Reactor* (HTTR) Berbahan Bakar Mixed Oxide dan Aktinida Minor. *Skripsi*. ITB. Bandung.
- Glasstone, S. & Edlund M.C. 1952. *The Element of Nuclear Reactor Theory*. D Van Nostrand Company Inc. New York.
- Kamei, T. & Hakami, S. 2011. Evaluation of Implementation of Thorium Fuel Cycle with LWR and MASR. *Journal of Progres in Nuclear Energy*. Vol 53. Hal 820-824.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Manusia, 2017. *Statistik Ketenagalistrikan 2016*. Direktorat Jendral Ketenagalistrikan Kementrian ESDM. Jakarta. Hal v.
- Kidd, S.W. 2009. *Nuclear Fuel Resources*. New York: CRC Press. Hal 85.
- Mcdowell, B.K., Junior, R.N., Mitchell, M.R., Swearingen, G.L. & Pugh, R. 2011. *High Temperature Gas Reactors: Assessment of Applicable Codes and Standards*. Pacific Northwest National Laboratory. United States of America. Hal 3-12.
- Muldiani, R.F. 2007. Studi Desain Reaktor Temperatur Tinggi Berpendingin Gas Helium Berbahan Bakar Uranium Dioksida. Politeknik Negeri Bandung. Bandung. Hal 22.
- Okumura, K., Teruhiko, K., Kunio, K. & Keichiro, T. 2002. *General Description and Input Instruction*. JAERI. Japan. Hal 1-188.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA. Hal 4-26.
- Okumura, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reactor Phisics Analysis*. Japan: JAEA. Hal 10-15.
- Ortensi, J. 2012. *Prismatic Core Neutronics Design and Fuel Cycle*. IAEA Course on High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Tsinghua University. Beijing
- Riska., Dian, F. & Feriska H.I. 2016. Analisis Neutronik pada *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand* . Vol 5. No 1. Hal 28-34.
- Sandell., L. 2004. *A Review of Radionuclide Release From HTGR Cores During Normal Operation, Final Report*. Electric Power Research Institute.
- Schaffer, M. B. 2013. Abudant Thorium as an Alternative Nuclear Fuel Important Waste Disposal and Weapon Proliferation Advantages. *Energy Policy* 60. Hal 4-12.

- Soentono, S. 1998. Bahan-Bahan untuk Industri Reaktor Nuklir. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III*. Hal 22-31.
- Stacey, W.M.. 2001. *Nuclear Reactor Physics*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Su'ud, Z. 1999. Komputasi untuk Reaktor masa Depan. *Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir (IX)*.
- Tadeus, D. Y., Budi, S. & Iwan, S. 2010. Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Jurnal Universitas Diponegoro Transmisi*. Vol1. Hal 8-13.
- Tran, H.N & P. H. Liem. 2015. Neutronic Feasibility Study of U–Th–Pa Based High Burnup Fuel For Pebble Bed Reactors. *Progress in Nuclear Energy* Vol 80. Hal 17–23.
- Taufiq, I. 2011. Komputasi Paralel Persamaan Difusi Neutron pada Reaktor Cepat dengan Menggunakan Intel Threading Building Blocks. *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*. Vol 3. No 1. Hal 38-47.
- Wilson, J.N., Bidaud, A., Callan, N., Chambon, R., David, A., Guillemin, P., Ivanov, E., Nuttin, A. & Meplan, O. 2009. Economy of Uranium Resources In A Three-component Reactor Fleet with Mixed Thorium/Uranium Fuel Cycles. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Hal 404 – 408.
- World Nuclear. 2010. *Nuclear Power Reactors*. (Online) tersedia: <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>. Diakses pada 1 Juni 2018.
- 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.
- Zhang, P., Kan W. & Ganglin Y. 2014. A simplified Supercritical Fast Reactor with Thorium Fuel. *Science and Technology of Nuclear Installations*. Hal 1-9.
- Zhou, X. W & C. H. Tang. 2011. Current Status and Future Development of Coated Fuel Particles for High Temperature Gas-Cooled Reactors. *Progress in Nuclear Energy*. Vol 53. No 2. Hal 182–188.
- Zweifel, P.F. 1973. *Reactor Physics*. USA. McGraw-Hill. Hal 74.