

**DESAIN INTI REAKTOR SCWR (*SUPERCRITICAL WATER REACTOR*)
MODEL TERAS SILINDER (r, z) DENGAN BAHAN BAKAR THORIUM
HASIL DAUR ULANG**

(Skripsi)

Oleh

SETIYANINGSIH



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

ABSTRAK

DESAIN INTI REAKTOR SCWR (*SUPERCRITICAL WATER REACTOR*) MODEL TERAS SILINDER (*R, Z*) DENGAN BAHAN BAKAR THORIUM HASIL DAUR ULANG

Oleh

SETIYANINGSIH

Penelitian desain inti reaktor air superkritis (SCWR) model teras silinder dua dimensi (r, z) menggunakan program SRAC telah dilakukan. Kode dasar SRAC yaitu PIJ dan CITATION. PIJ digunakan untuk perhitungan tingkat sel bahan bakar dan CITATION digunakan untuk perhitungan tingkat teras reaktor. Perhitungan teras reaktor dilakukan pada $\frac{1}{4}$ bagian teras silinder (r, z) dan geometri sel bahan bakar berupa sel silinder. Material bahan bakar yaitu thorium dengan *burn up* 40 GWd/t dan 30 GWd/t. Parameter neutronik pada penelitian ini meliputi persentase pengayaan bahan bakar, *burn up*, ukuran teras reaktor, konfigurasi teras reaktor, faktor multiplikasi, dan distribusi rapat daya. Faktor multiplikasi (k -effektif) yang diperoleh pada penelitian ini sebesar 1,000004, dimana reaktor berada dalam kondisi kritis. Teras reaktor berada dalam kondisi kritis pada ukuran radius (r) 130 cm, tinggi (z) 270 cm dan pengayaan bahan bakar 2,8262 %. Rapat daya maksimal yang diperoleh sebesar 130,0808 Watt/cm³, terletak pada radius 25 cm dan tinggi 135 cm. Faktor puncak daya pada arah radial yaitu 1,6063 dan faktor puncak daya pada arah aksial yaitu 1,3189.

Kata Kunci: desain inti reaktor, rapat daya, SCWR, SRAC, thorium

ABSTRACT

DESIGN OF CORE SCWR (SUPERCRITICAL WATER REACTOR) REACTOR WITH CYLINDRICAL (R, Z) CORE MODEL USING RECYCLED THORIUM FUEL

By

SETIYANINGSIH

The Research of the supercritical water reactor (SCWR) core design of the two-dimensional cylinder core model (r, z) using the SRAC program has been done. The SRAC basic code was PIJ and CITATION. PIJ was used to calculate the fuel level and CITATION was used to calculate the reactor core level. The calculation of the reactor core has been done on the 1/4 cylinder core (r, z) and the geometry of the fuel cell was the cylindrical cell. Reactor fuel material was thorium burned 40 GWd/t and 30 GWd/t. The neutron parameters in this research were fuel enrichment, burn up, reactor core size, reactor core configurations, multiplication factor, and power density distribution. Multiplication factor (k-effective) in this research was 1.000004, which is reactor was in a critical condition. The reactor core in critical condition had the size of radius (r) was 130 cm, height (z) was 270 cm and fuel enrichment 2.8262 %. The maximum power density was 130.0808 Watts /cm³ which was located at a radius of 25 cm and 135 cm high. The peak power factor in the radial direction was 1.6063 and the peak power factor in the axial direction was 1.3189.

Keywords: reactor core design, power density, SCWR, SRAC, thorium

**DESAIN INTI REAKTOR SCWR (*SUPERCRITICAL WATER REACTOR*)
MODEL TERAS SILINDER (*r,z*) DENGAN BAHAN BAKAR THORIUM
HASIL DAUR ULANG**

Oleh

SETIYANINGSIH

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar
SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung



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

Judul Skripsi : **Desain Inti Reaktor SCWR (*Supercritical Water Reactor*) Model Teras Silinder (r, z) dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang**

Nama Mahasiswa : **Setiyaningsih**

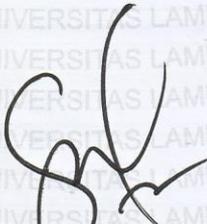
Nomor Pokok Mahasiswa : **1417041082**

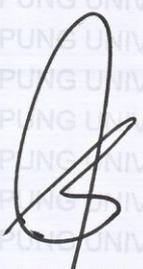
Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

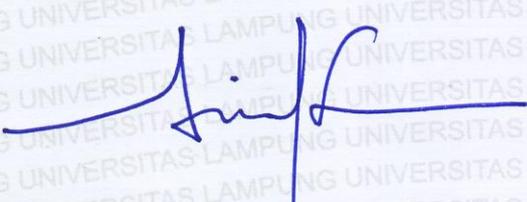


1. Komisi Pembimbing


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


Prof. Drs. Simon Sembiring, Ph.D.
NIP. 196110031991031002

2. Ketua Jurusan Fisika


Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

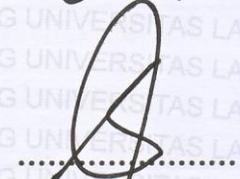
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

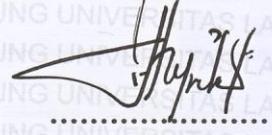
Ketua : Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.



Sekretaris : Prof. Drs. Simon Sembiring, Ph.D.



**Penguji
Bukan Pembimbing : Suprihatin, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Drs. Suratman, M. Sc.
NIP. 196406041990031002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 09 Mei 2019

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis dan diterbitkan 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 saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 09 Mei 2019



Setyaningsih
Setyaningsih
NPM. 1417041082

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Setiyaningsih, dilahirkan pada tanggal 04 Juli 1996 di Desa Sidorejo Kecamatan Bangunrejo Lampung Tengah. Penulis merupakan anak ke 8 dari 9 bersaudara pasangan Bapak Nartin dan Ibu Sademi. Penulis telah menempuh pendidikan di TK Pertiwi Sidorejo pada tahun 2002, dilanjutkan SDN 01 Sidorejo pada tahun 2008, SMPN 01 Bangunrejo pada tahun 2011, dan SMAN 01 Bangunrejo pada tahun 2014. Penulis diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) pada tahun 2014. Penulis mendapat Beasiswa Pendidikan Miskin Berprestasi (Bidikmisi) pada tahun 2014-2018. Selama menempuh pendidikan, penulis pernah menjadi asisten praktikum Fisika Dasar I pada tahun 2016/2017. Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di P2MM-LIPI Tangerang Selatan pada tahun 2016 yang berjudul “Uji Korosi Sumuran Lapisan *Electroless* Ni-P pada *Stainless Steel* 420”. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sidomulyo Kecamatan Sidomulyo Kabupaten Lampung Selatan pada tahun 2017. Selama menjadi mahasiswa penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan, antara

lain menjadi anggota magang bidang Sosial dan Masyarakat (SOSMAS) HIMAFI FMIPA tahun (2014-2015), anggota bidang Komunikasi dan Informasi (KOMINFO) HIMAFI FMIPA tahun (2015-2016), anggota bidang kajian ROIS FMIPA (2015-2016), Sekretaris Biro Dana dan Usaha (DANUS) HIMAFI FMIPA tahun 2016, Wakil Bendahara Kabinet BEM U KBM Unila tahun (2016-2017) dan menjadi Ketua Komisi Keuangan DPM U KBM Unila tahun (2018-2019). Penulis menyelesaikan skripsi dengan judul “Desain Inti Reaktor SCWR (*Supercritical Water Reactor*) Model Teras Silinder (r, z) dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang”.

MOTTO

“Man jadda wajada”

*“Dan bahwa manusia hanya memperoleh apa yang telah
diusahakannya”*

(Q.S. An-Najm : 39)

*“Semangatlah dalam hal yang bermanfaat untukmu, minta
tolonglah pada Allah dan jangan patah semangat”*

(H.R. Muslim)

PERSEMBAHAN

Skripsi ini ku persembahkan kepada:

Kedua orang tua tercinta, Bapak Nartin dan Ibu Sademi yang telah memberikan kasih sayang dan pendidikan terbaiknya kepadaku

Kakak-kakak dan adikku serta keluarga besar yang selalu menjadi penyemangatku

Almamater Kebanggaan
Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Desain Inti Reaktor SCWR (*Supercritical Water Reactor*) Model Teras Silinder (r, z) dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang”**. Tujuan dari penulisan skripsi ini yaitu sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar S1 Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung serta melatih berfikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari bahwa penyajian skripsi ini masih banyak kekurangan dalam penulisan maupun referensi data. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menjadi rujukan untuk penelitian berikutnya agar lebih sempurna.

Bandar Lampung, Mei 2019

Penulis

SANWACANA

Alhamdulillah puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan nikmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul **“Desain Inti Reaktor SCWR (*Supercritical Water Reactor*) Model Teras Silinder (r, z) dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang”**. Penulis menyadari bahwa dalam melakukan penelitian tidak lepas dan dukungan, bimbingan, motivasi serta do'a dari pihak lain. Oleh karena itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Yang tercinta, kedua orangtua dan keluarga yang selalu memberikan kasih sayang yang tak terhingga kepada penulis.
2. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing I yang senantiasa memberi ilmu wawasan dan bimbingan kepada penulis.
3. Bapak Prof. Drs. Simon Sembiring, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa membimbing penulis selama penelitian.
4. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji yang senantiasa memberi saran kepada penulis dalam melakukan penelitian.
5. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik atas bimbingannya kepada penulis selama masa kuliah.

6. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak Drs. Suratman, M.Sc. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
8. Seluruh Dosen serta Staf Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
9. Teman-teman Fisika 2014 dan teman seperjuangan TA (Anakan Bunda).
10. Sahabat – sahabatku, Nina Nurmala, Mey Puji Astuti, Aprilia Witari Anggiyani, Siti Istikomah, Latifah Kamalia, Ketrin Chintia Rizky, Megawati, Santi Komala Dewi, Citra Widyastuti, Eka H. Sururiah, Firyal N. Afifah.
11. Teman berjuang, Diah Ambar Sari, Dinati Syarafina, Arini K. Mujahidah, Erssa Fathiah Salsabilla, Anisya Anggraini, Bagus Prasajo, Amirudin, M. Hadiyan Rasyadi, Herwandovika Aulia dan Ari Yudha Prasetya.
12. Teman-teman organisasi ROIS FMIPA Unila, HIMAFI FMIPA Unila, Sahabat Himafi Unila, Keluarga besar BEM U KBM Unila 2017, Komisi III DPM U KBM Unila 2018 serta Keluarga besar MPM/DPM U KBM Unila 2018.
13. Serta semua pihak yang tidak penulis cantumkan, yang telah memberikan bantuan moril maupun materil kepada penulis.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya, serta memberkahi hidup kita. Aamiin.

Bandar Lampung, Mei 2019

Penulis

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	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian.....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Reaktor Nuklir	5
2.2. Jenis-jenis Reaktor	8
2.3. Bahan Bakar Reaktor Nuklir	11
2.4. Perkembangan Reaktor di Indonesia	16
2.5. Reaksi Fisi	18
2.6. Transport Neutron	19
2.7. <i>Burn Up</i> Bahan Bakar Nuklir	20
2.8. Faktor Multiplikasi	22
2.9. <i>System Reactor Atomic Code</i> (SRAC)	23

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	27
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	27
3.3. Prosedur Penelitian	27
3.4. Diagram Alir Penelitian	31

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Menentukan Fraksi Volume	36
4.2. Pengayaan dan Densitas Atom	38
4.3. Perhitungan Teras Reaktor	42

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	55
5.2. Saran	55

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skematik reaktor jenis SCWR	10
Gambar 2.2 Model rantai pembakaran nuklida jenis ^{232}Th	13
Gambar 2.3 Metode penyusunan bahan bakar dalam teras (a) <i>zonal loading</i> (b) <i>combination-zonal loading</i>	16
Gambar 2.4 Reaksi fisi berantai	18
Gambar 2.5 Struktur sistem SRAC	25
Gambar 3.1 Model geometri untuk 2-D silinder (r,z)	29
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 4.1 Geometri dan pembagian area sel bahan bakar ($\text{IGT} = 3$)	34
Gambar 4.2 (a) <i>R-region</i> bahan bakar, (b) Area homogenisasi sel	35
Gambar 4.3 Radius (r) sel bahan bakar	36
Gambar 4.4 Pengaruh pengayaan bahan bakar ^{233}U terhadap nilai k -efektif	41
Gambar 4.5 Pengaruh k -efektif pada tiap periode burn up dengan Pengayaan 1-5 %	43
Gambar 4.6 Geometri teras reaktor	45
Gambar 4.7 Pembagian <i>region</i> arah radial (<i>5 region</i>), (b) Pembagian <i>region</i> arah aksial (<i>5 region</i>)	46
Gambar 4.8 Bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor	46
Gambar 4.9 Syarat batas	50
Gambar 4.10 Rapat daya arah radial teras reaktor	52
Gambar 4.11 Rapat daya arah aksial teras reaktor	53

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Parameter dan karakteristik teras reaktor generasi IV	9
Tabel 4.1 Spesifikasi sel bahan bakar	33
Tabel 4.2 Fraksi volume sel bahan bakar	38
Tabel 4.3 Densitas atom moderator dan selongsong	40
Tabel 4.4 Densitas atom bahan bakar	40
Tabel 4.5 Keluaran <i>burn up</i> pada file MACRO	44
Tabel 4.6 Radius (r) teras reaktor pada tinggi (z) 340 cm	48
Tabel 4.7 Tinggi (z) teras reaktor pada radius (r) 110 cm	49
Tabel 4.8 Nilai rapat daya pada radius (r) dan tinggi (z) 270 cm	51

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan energi di Indonesia cenderung meningkat pesat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk, salah satunya adalah permintaan energi listrik. Sehubungan dengan peningkatan permintaan tenaga listrik tersebut, akan sulit apabila kita hanya mengandalkan sumber daya yang ada sekarang yang semakin terbatas. Oleh karena itu salah satu langkah penting adalah mencari alternatif sumber daya yang lain. Pemilihan alternatif pembangkit listrik harus dipertimbangkan dari beberapa aspek yaitu aspek ketersediaan energi, aspek teknis, aspek keselamatan, aspek sosial, aspek ekonomi dan aspek lingkungan. Pemilihan nuklir sebagai alternatif Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) karena PLTN merupakan pembangkit listrik yang aman, bersih, ramah lingkungan dan relatif ekonomis (Adiwardoyo, 1996).

Pada prinsipnya Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menggunakan reaktor nuklir untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu jenis reaktor nuklir yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Supercritical Water Reactor (SCWR)*. SCWR merupakan jenis reaktor termal yang dipromosikan sebagai reaktor generasi IV karena sederhana dalam pembangunannya dan memiliki efisiensi termal yang tinggi (Buongiorno, 2003).

Pada penelitian ini dilakukan desain inti reaktor SCWR. Desain reaktor yang aman diperlukan analisis yang terbagi menjadi 3 bagian umum yaitu analisis neutronik, analisis termal dan analisis keselamatan. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan desain reaktor SCWR yang memenuhi kriteria keselamatan melalui analisis neutronik. Analisis neutronik dilakukan dengan menggunakan program *System Reactor Atomic Code* (SRAC) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) pada tahun 1978. Program ini dapat membantu dalam mendesain dan menganalisis reaktor, khususnya reaktor termal (Okumura *et al.*, 2006).

Parameter yang dianalisis pada penelitian ini yaitu pengayaan bahan bakar, *burn up*, ukuran teras reaktor, konfigurasi teras reaktor, kekritisian, dan distribusi rapat daya. Kekritisian reaktor ditunjukkan oleh nilai faktor multiplikasi (*k*-efektif). Pada penelitian ini teras reaktor dimodelkan menggunakan model teras silinder (r, z) seperti pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Shofaa (2016), yaitu dengan pemodelan reaktor teras silinder (r, z) menggunakan bahan bakar uranium-thorium menghasilkan nilai *k*-efektif sebesar 1,000008 yang menandakan reaktor dalam kondisi kritis.

Bahan bakar yang biasa digunakan pada reaktor nuklir ada 2 jenis yaitu bahan bakar fisil dan bahan bakar fertil (Soentono, 1998). Penelitian ini menggunakan ^{232}Th hasil daur ulang sebagai bahan bakar yang bersifat fertil. Meskipun ^{232}Th tidak bersifat fisil, namun tetap dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir karena ^{232}Th akan menyerap neutron lambat untuk menghasilkan ^{233}U yang merupakan bahan fisil (Kidd, 2009). Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Harjanti (2018),

bahan bakar thorium hasil daur ulang digunakan untuk mendesain teras reaktor SCWR model teras 3-D (x, y, z) dan menghasilkan nilai k -effektif sebesar 1,00000 yang menandakan reaktor dalam kondisi kritis.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan *burn up* untuk mengetahui kekritisian teras reaktor. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Simanjuntak (2017), diperoleh bahwa nilai k -effektif berkurang seiring meningkatnya tingkat *burn up*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Putri (2017), diperoleh bahwa densitas daya menurun seiring pertambahan *burn up*. Penelitian ini dilakukan desain inti reaktor SCWR model teras silinder (r, z) dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang. Tujuannya yaitu untuk menghasilkan desain reaktor yang memenuhi kriteria keselamatan melalui analisis neutronik.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana pengayaan bahan bakar yang ideal untuk jenis SCWR model teras silinder (r, z) dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang untuk memenuhi standar kekritisian?
2. Bagaimana ukuran dan konfigurasi teras reaktor yang ideal untuk jenis SCWR model teras silinder (r, z) untuk memenuhi standar kekritisian?
3. Bagaimana distribusi rapat daya yang dihasilkan untuk jenis SCWR model teras silinder (r, z) dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang untuk memenuhi standar keselamatan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Desain reaktor yang dibuat adalah reaktor termal jenis SCWR dengan model teras silinder (r, z) .
2. Bahan bakar yang digunakan adalah ^{232}Th hasil daur ulang
3. Perhitungan pada teras reaktor (*core*) dilakukan secara 2 dimensi (r, z) pada $\frac{1}{4}$ bagian teras silinder.
4. Moderator menggunakan air superkritis (H_2O).
5. Sistem perhitungan menggunakan kode dasar SRAC modul PIJ dan CITATION.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini yaitu:

1. Menentukan persentase pengayaan bahan bakar yang memenuhi standar kekritisan.
2. Menentukan ukuran dan konfigurasi teras reaktor yang memenuhi standar kekritisan.
3. Menganalisis distribusi rapat daya sebagai standar keselamatan.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu :

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai desain reaktor nuklir yang memiliki efisiensi tinggi dan memenuhi standar kekritisan.
2. Memberikan kontribusi mengenai perkembangan penelitian pada bidang nuklir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Nuklir

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

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

a. Bahan Bakar (*fuel*)

Bahan bakar nuklir merupakan bahan yang akan menyebabkan terjadinya reaksi fisi berantai berlangsung sebagai sumber energi nuklir. Terdapat dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung dapat membelah apabila dikenai neutron, sedangkan bahan fertil

merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah setelah dikenai neutron tetapi akan membentuk bahan fisil (Lewis, 2008).

b. Moderator

Moderator nuklir adalah zat yang memperlambat neutron hingga kecepatan yang cukup rendah untuk menyebabkan fisi. Reaktor awal menggunakan grafit dengan kemurnian tinggi sebagai moderator. Reaktor modern di AS secara eksklusif menggunakan air ringan (H_2O biasa), sedangkan beberapa reaktor di negara lain menggunakan bahan lain, seperti karbon dioksida, berilium, atau grafit. Moderator berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat ($+ 2 \text{ MeV}$) menjadi neutron dengan energi termal ($+140,02 - 0,04 \text{ eV}$) agar dapat bereaksi dengan bahan bakar nuklir. Syarat bahan moderator adalah atom dengan nomor massa kecil, memiliki tampang lintang serapan neutron yang kecil, memiliki tampang lintang hamburan yang besar, sesuai dengan jenis reaktor yang akan didesain dan memiliki daya hantar panas yang baik serta tahan terhadap korosi (Lewis, 2008).

c. Batang Kendali (*Control Rod*)

Pada pembangkit listrik nuklir, batang kendali memainkan peran penting untuk mengontrol reaksi fisi. Batang kendali berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Bahan yang dipergunakan untuk batang kendali reaktor haruslah memiliki kemampuan tinggi menyerap neutron dan memiliki waktu hidup yang panjang (tidak mudah terbakar). Pemilihan material batang kendali tergantung pada desain reaktor nuklir yang digunakan. Material batang kendali yang digunakan dalam reaktor nuklir, memiliki karakteristik memiliki sifat konduktivitas panas yang cukup, tahan terhadap panas dan radiasi, tidak mudah

korosif, material harus cukup kuat untuk mematikan reaktor nuklir, dan memiliki tampang lintang serapan neutron yang tinggi (Johnsson, 2011).

Bahan material yang sering digunakan untuk pembuatan batang kendali adalah Hafnium (Hf), paduan Silver-Indium-Cadmium (Ag-In-Cd), dan Boron (B). Selama kondisi superkritis, daya yang dibebaskan oleh sebuah reaktor meningkat. Jika kondisi ini tidak dikendalikan, meningkatnya daya dapat mengakibatkan mencairnya sebagian atau seluruh teras reaktor, dan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan sekitar (Johnsson, 2011).

Pengendalian ini dilakukan oleh sejumlah batang kendali yang dapat bergerak keluar masuk teras reaktor. Jika reaktor menjadi superkritis, batang kendali secara otomatis bergerak masuk lebih dalam ke dalam teras reaktor untuk menyerap kelebihan neutron yang menyebabkan kondisi itu kembali ke kondisi kritis. Sebaliknya, jika reaktor menjadi subkritis, batang kendali sebagian ditarik menjauhi teras reaktor sehingga lebih sedikit neutron yang diserap. Dengan demikian, lebih banyak neutron yang tersedia untuk reaksi fisi dan reaktor kembali ke kondisi kritis. Untuk menghentikan operasi reaktor, batang kendali dimasukkan penuh sehingga seluruh neutron diserap dan reaksi fisi berhenti (Johnsson, 2011).

d. Perisai (*Shielding*)

Perisai berfungsi sebagai penahan agar radiasi hasil fisi bahan tidak menyebar pada lingkungan luar dari sistem reaktor, umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat dan struktur baja (*World Nuclear*, 2010).

e. Pendingin (*coolant*)

Suhu pada reaktor dapat meningkat diakibatkan oleh adanya energi yang dihasilkan oleh reaksi fisi. Suhu tersebut dapat dipindahkan dari reaktor dengan menggunakan bahan pendingin, misalnya air atau karbon dioksida. Bahan pendingin di sirkulasi melalui sistem pompa, sehingga air yang keluar dari bagian atas teras reaktor digantikan air dingin yang masuk melalui bagian bawah teras reaktor (Csom *et al.*, 2012).

2.2 Jenis-jenis Reaktor

Jenis reaktor dalam skala komersial dikategorikan menjadi 2 jenis, yaitu reaktor nuklir dengan proses reaksi fisi yang diakibatkan oleh neutron termal yang disebut reaktor termal dan reaktor nuklir dengan proses reaksi fisi yang terjadi pada energi neutron tinggi yang disebut reaktor cepat (*fast reactor*) (Permana, 2005).

Perkembangan teknologi PLTN dibagi menjadi 4 generasi, yaitu :

- a) Generasi pertama, merupakan prototipe awal dan merupakan realisasi PLTN pertama (tahun 1950-1970).
- b) Generasi kedua, merupakan teknologi PLTN yang sedang beroperasi saat ini (tahun 1970-2030).
- c) Generasi ketiga, merupakan perbaikan dari teknologi reaktor generasi kedua (tahun 2000 dan seterusnya) dan
- d) Generasi keempat, merupakan sistem reaktor maju (2030 dan seterusnya).

(Anggoro *et al.*, 2013).

Terdapat enam jenis konsep sistem reaktor dalam *Generation IV International Forum* (GIF) dan diklasifikasikan berdasarkan jenis pendingin dan spektrum

reaktor yang digunakan. Berikut ini Tabel 2.1 yang menyajikan parameter dan karakteristik teras reaktor generasi IV.

Tabel 2.1 Parameter dan karakteristik teras reaktor generasi IV

r	GFR	LFR	SFR	VHTR	SCWR	MSR
Daya (MWth)	1500-300	125-3000	400-4000	600	4000	2500
Densitas daya kW/1	100	100	300	4-8	70	20
Pengayaan (%)	16 (Pu)	15 (Pu)	16 (Pu)	8	6,3	3,3
Daya Spesifik (kW/kg HM)	38	30	80	100	30	30
Bahan Bakar	UC-SiC (U-TRU) Carbide, nitride, oxide	U-Zr atau UN (U-TRU) Nitride	U-Zr atau UO ₂ (U-TRU) Oxide, metal alloy	Triso particles (UO ₂ , UC _{0,5} O _{1,5})	UO ₂	UF ₆ dalam larutan garam
Pendingin Primer (Tout, °C)	He (600-850)	Pb-Bi (500-550)	Na (510-550)	He (1000)	H ₂ O super kritis (450-500)	Molten fluoride salt
Moderator	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Carbon/grafit	H ₂ O	Carbon/grafit
Spektrum neutron	Cepat	Cepat	Cepat	Termal	Termal	Termal/epitermal
Tekanan kerja	Tinggi	Rendah	Rendah	Tinggi	Sangat tinggi	Rendah
Siklus bahan bakar	Tertutup	Tertutup (regional)	Tertutup	Terbuka	Terbuka	Tertutup
Keluaran	Listrik dan produksi hidrogen	Listrik dan produksi hidrogen	Listrik	Listrik dan produksi hidrogen	Listrik	Listrik dan produksi hidrogen

Keterangan :

GFR = *Gas-cooled Fast Reactor*

LFR = *Lead-coolde fast Reactor*

SFR = *Sodium-cooled Fast Reactor*

VHTR = *Very High Temperature Reactor*

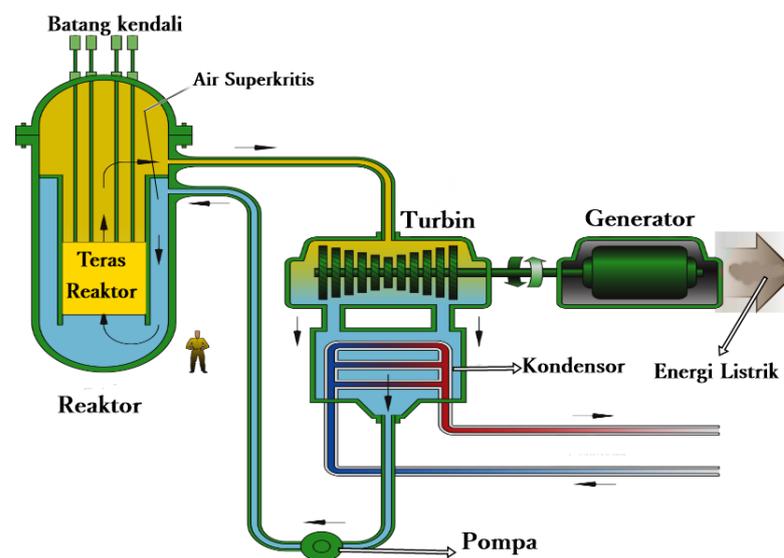
SCWR = *Supercritical Water Reactor*

MSR = *Molten Salt Reactor*

(Anggoro *et al.*, 2013).

SCWR merupakan satu-satunya konsep GIF yang menggunakan air sebagai pendingin, oleh karena itu SCWR merupakan evolusi alami dari teknologi reaktor berpendingin air yang canggih saat ini. SCWR adalah reaktor berpendingin air yang beroperasi di atas titik kritis termodinamika air (22,1 MPa, 374 °C) untuk mencapai efisiensi termal mendekati 44% (Schulenberg *et al.*, 2009). Reaktor SCWR dirancang hanya untuk memproduksi listrik (Anggoro *et al.*, 2013).

Skematik dari reaktor jenis SCWR ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skematik reaktor jenis SCWR (World Nuclear, 2012).

Gambar 2.1 menunjukkan skematik dari reaktor jenis SCWR. Pada dasarnya, reaktor nuklir terdiri dari beberapa komponen inti yaitu *fuel bundle* (bahan bakar) yang terdapat dalam teras reaktor, *control rod* (batang kendali) dan *coolant* (pendingin) berupa air superkritis. Di dalam teras reaktor terjadi reaksi fisi yang menghasilkan energi panas. Apabila tingkat reaksi fisi tidak diatur dan bahan bakar tidak didinginkan maka dalam waktu singkat inti reaktor pun akan mencapai suhu

yang sangat tinggi. Oleh karena itu, pada inti reaktor terdapat dua komponen penting selain bahan bakar, yaitu batang kendali dan pendingin.

Batang kendali berfungsi untuk mengatur jumlah reaksi nuklir yang terjadi didalam inti reaktor dengan cara menangkap neutron bebas yang dihasilkan dari reaksi fisi. Sementara itu air superkritis berfungsi sebagai cairan pendingin untuk mendinginkan bahan bakar dan menjaga agar suhu reaktor berada ditingkat yang aman. Karena tingginya suhu ditingkat reaktor, air lama kelamaan akan mendidih dan menjadi uap bertekanan tinggi. Pada saat inilah reaktor mulai berperan dalam rangkaian produksi listrik.

Air yang dipanaskan didalam reaktor dan menjadi uap bertekanan tinggi kemudian disalurkan ke turbin. Tekanan uap yang sangat tinggi akan menggerakkan turbin yang tersambung dengan generator. Perputaran generator inilah yang akhirnya menghasilkan energi listrik. Sementara itu, uap yang keluar dari turbin akan masuk kedalam kondensor dan kemudian mengembun kembali ke bentuk cair. Air yang terkumpul di kondensor kemudian akan dipompa untuk kembali ke inti reaktor. Siklus ini akan terus berjalan seiring berjalannya reaksi nuklir didalam inti reaktor.

2.3 Bahan Bakar Reaktor Nuklir

1) Bahan Bakar

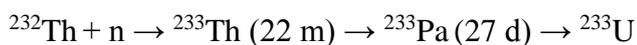
Bahan bakar yang biasa digunakan pada reaktor nuklir ada 2 jenis yaitu bahan bakar fisil dan bahan bakar fertil. Bahan bakar fisil contohnya ^{233}U , ^{235}U dan ^{239}Pu , sedangkan bahan bakar fertil contohnya ^{238}U dan ^{232}Th (Soentono, 1996).

a. Thorium

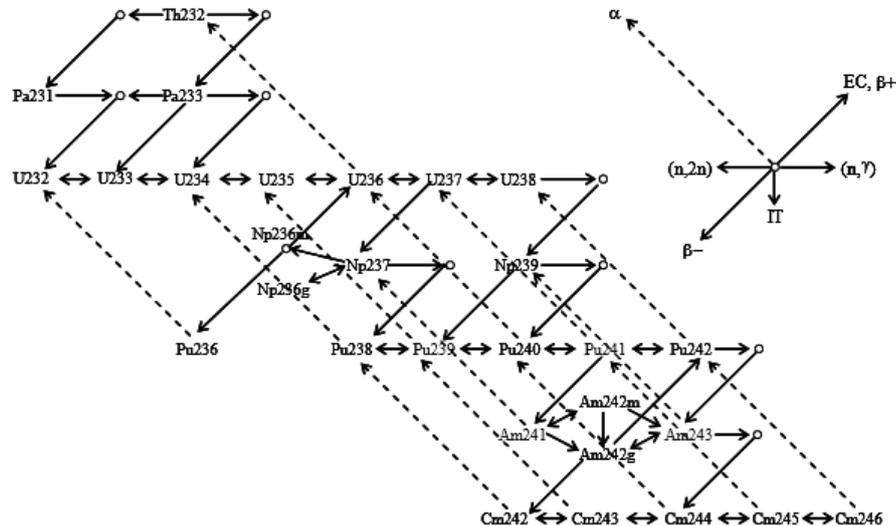
Thorium diperoleh sebagai hasil samping pertambangan mineral monazit, yang mengandung ThO_2 sebanyak 3 % - 9 % bersamaan dengan mineral radiokatif. Lambang thorium adalah Th dan memiliki nomor atom 90. Thorium murni merupakan logam bersifat radioaktif, berwarna putih keperakan yang relatif stabil dalam udara dan dapat mempertahankan warnanya selama beberapa bulan. Terdapat 25 isotop thorium yang dikenal dan semuanya tidak stabil dengan massa atom antara 212 hingga 236. Isotop thorium yang paling stabil adalah ^{232}Th dengan waktu paruh sekitar 14, 05 juta tahun. ^{232}Th merupakan bahan fertil namun dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir. Hal itu karena ^{232}Th akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan ^{233}U yang bersifat fisil (Kidd, 2009).

Jumlah cadangan thorium 3- 4 kali lebih besar dibanding uranium. Ditinjau dari aspek sifat neutronik, ^{232}Th merupakan bahan fertil yang lebih unggul dibanding ^{238}U , karena tampang lintang serap neutron ^{232}Th dalam spektrum termal 3 kali lebih tinggi dibandingkan ^{238}U dimana untuk ^{232}Th yaitu 7,4 barns dan ^{238}U yaitu 2,7 barns. Sehingga konversi ^{232}Th - ^{233}U lebih efisien di bandingkan ^{238}U - ^{239}Pu dalam spektrum neutron termal.

Dalam teras reaktor, ^{232}Th menyerap neutron menjadi ^{233}Th yang selanjutnya meluruh dengan sangat cepat (waktu peluruhan 22 menit) menjadi ^{233}Pa dan meluruh lagi menjadi ^{233}U (waktu peluruhan 27 hari) :



Reaksi berantai dari ^{232}Th hingga menghasilkan ^{233}U dan nuklida lain disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Model rantai pembakaran nuklida jenis ^{232}Th (Okumura, 2002).

b. Uranium

Uranium adalah unsur utama di antara bahan radioaktif alami yang ada di bebatuan, terutama batuan beku dan metamorfosa dari batuan sedimen yang bersifat asam, seperti granit, fosfat, dan *black shales* kaya organik, yang terdapat di kerak bumi dan air laut. Ada tiga isotop uranium di alam yaitu ^{234}U , ^{235}U , dan ^{238}U , yang mana sekitar 99,3 % dari total uranium alami adalah ^{238}U (Bastori dan Djoko, 2017).

Uranium adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang U dan nomor atom 92. Uranium merupakan logam putih keperakan yang termasuk dalam deret aktinida pada tabel peirodik. Uranium memiliki 92 proton dan 92 elektron, dan berelektron valensi 6. Inti uranium mengikat sebanyak 141 sampai dengan 146 neutron, sehingga terdapat 6 isotop uranium. Isotop yang paling umum adalah ^{238}U (146 neutron) dan ^{235}U (143 neutron) (Kidd, 2009).

Indonesia memiliki cadangan uranium sekitar 70.000 ton dalam bentuk *yellow cake* (U_3O_8) yang kebanyakan berada di Kalimantan Barat, Papua, Bangka Belitung dan Sulawesi Barat. Diperkirakan PLTN pertama di Indonesia akan beroperasi pada tahun 2027 atau 2030 dengan kapasitas 2 x 1.000 MWe, sehingga dari cadangan uranium terukur 1,608 ton yang dimiliki Indonesia hanya dapat memasok secara penuh kebutuhan bahan bakar PLTN selama 3 tahun. Jika hanya mengandalkan cadangan terukur, maka pada tahun keempat operasi PLTN harus mulai mengimpor uranium untuk memenuhi kebutuhan operasi PLTN. Jika Indonesia mampu untuk menambang seluruh cadangan uranium 70.000 ton tersebut maka dipastikan dapat menyediakan pasokan uranium untuk 7 unit PLTN dengan daya masing-masing 1.000 MWe yang beroperasi selama 40 tahun umur PLTN (Bastori dan Djoko, 2017).

2) Daur Bahan Bakar Thorium

Thorium merupakan bahan bakar yang ketersediaannya dialam cukup besar, sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk menjaga atau menjamin keberlanjutan jangka panjang tenaga nuklir. Meskipun begitu, daur bahan bakar thorium merupakan sebuah cara yang menarik untuk memproduksi energi nuklir jangka panjang dengan limbah radioaktif aktivitas rendah. Penggunaan thorium dalam reaktor memerlukan bahan fisil sebagai penggerak (*driver*) sehingga reaksi berantai dapat dipertahankan. Di dalam reaktor ^{232}Th berubah menjadi bahan fisil ^{233}U . Bahan fisil ^{233}U tersebut dapat diperoleh kembali sebagai hasil reprocessing bahan bakar basis thorium bekas yang biasa disebut dengan Thorex (*Thorium Extraction*). Pada daur bahan bakar ^{232}Th - ^{233}U , jumlah plutonium dan aktinida minor umur panjang (MA : Np, Am dan Cm) terbentuk

sangat sedikit di banding daur bahan bakar ^{238}U - ^{239}Pu , sehingga meminimalkan radiotoksitas bahan bakar bekas (Dewita, 2012).

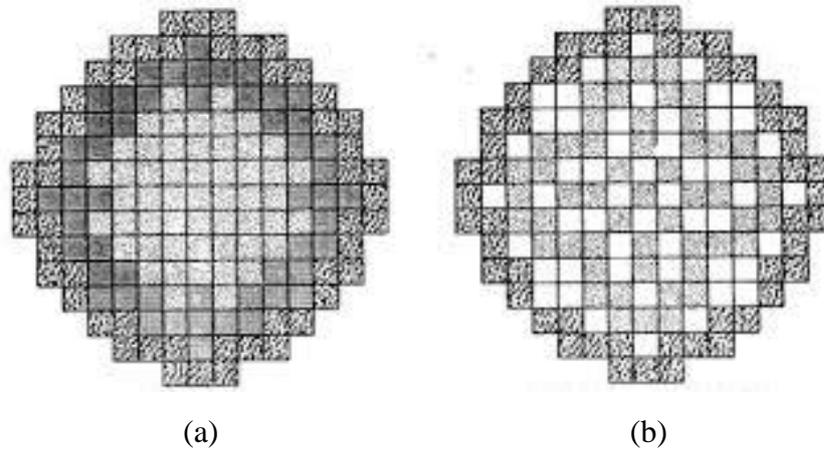
3). Pengayaan Uranium (*Enrichment*)

Ketika uranium ditambang dari bumi awalnya mengandung isotop ^{235}U dengan konsentrasi 0,72 %, ^{238}U 99,2745 % dan ^{234}U 0,0055 %. Isotop-isotop ini mempunyai sifat kimia yang relatif sama, akan tetapi dalam konteks sifat nuklir adalah sangat berbeda. Isotop yang digunakan dalam reaktor nuklir adalah ^{235}U karena merupakan bahan fisil. Karena konsentrasi ^{235}U hanya 0,72 % dari uranium alam yang ditambang maka perlu adanya peningkatan persentasenya menjadi 2-5 % agar efektif dipakai dalam reaktor nuklir. Bahkan untuk riset perlu konsentrasi yang lebih tinggi yaitu antara 20-90 %. Usaha peningkatan konsentrasi isotop ^{235}U disebut dengan istilah pengayaan uranium (*Enrichment*). Jadi uranium yang diperkaya adalah uranium dimana isotop ^{235}U mempunyai konsentrasi lebih besar dari nilai alamiahnya (Manurung, 2009).

4) Penyusunan Bahan Bakar dalam Teras Reaktor

Terdapat dua metode penyusunan bahan bakar dalam teras yang biasa digunakan secara umum yaitu metode *zonal loading* dan *scatter loading*. Pada metode *zonal loading*, bahan bakar yang belum teriradiasi ditempatkan didaerah keliling teras. Bahan bakar yang telah teriradiasi di acak di daerah yang lebih dalam, sedang bahan bakar pada daerah tengah diambil dari teras. Tujuan dari pola ini adalah memanfaatkan pengurangan reaktivitas akibat deplesi bahan bakar sebagai mekanisme pemerataan daya.

Berikut ini metode penyusunan bahan bakar dalam teras disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Metode penyusunan bahan bakar dalam teras, (a) *zonal loading* (b) *combination scatter - zonal loading* (Sitompul, 2010).

Sedangkan pola pengisian bahan bakar *scatter loading* adalah pola tersebar atau acak untuk mencapai distribusi bahan bakar yang lebih seragam. Keuntungan lain dari pola *scatter loading* adalah tidak perlu dilakukan pengaturan ulang bahan bakar teriradiasi (Soewono *et al.*, 2009).

2.4 Perkembangan Reaktor di Indonesia

Indonesia memiliki tiga reaktor yang digunakan untuk kepentingan penelitian bukan sebagai pembangkit listrik. Ketiga reaktor tersebut adalah sebagai berikut.

1. Reaktor Triga Bandung

Reaktor nuklir pertama di Indonesia adalah reaktor triga di Bandung, nama triga sendiri merupakan singkatan dari "*Training, Research, Isotopes, General Atomics*". Reaktor ini mulai beroperasi tahun 1964. Pada saat itu kapasitasnya masih 250 kW, kemudian mengalami beberapa kali peningkatan. Tahun 1971, Reaktor Triga ditingkatkan kapasitasnya menjadi 1000 kW, dan tahun 1996 menjadi 2000 kW.

Reaktor ini digunakan untuk memproduksi zat radioaktif, analisa aktivasi neutron, dan penelitian mengenai reaktor nuklir (Mandala, 2010).

2. Reaktor Kartini

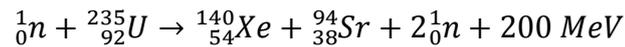
Reaktor nuklir kedua dibangun di Sleman, Yogyakarta. Menggunakan jenis reaktor yang sama yakni Triga Mark II, Reaktor Kartini mulai beroperasi tahun 1979. Dibandingkan reaktor Triga Bandung, reaktor ini jauh lebih kecil dengan kapasitas yang tetap sama sejak didirikan, yakni 250 kW. Reaktor kartini dimanfaatkan untuk pendidikan, iradiasi penelitian dasar dalam bidang fisika dan teknologi reaktor (Rohman dan Daddy, 2011).

3. Reaktor Nuklir Serpong

Reaktor nuklir termuda di Indonesia adalah reaktor di serpong. Reaktor Serpong dibangun sebagai pusat penelitian, pengembangan, dan perekayasaan (litbangyasa) IPTEK nuklir untuk mengembangkan industri nuklir dan PLTN di Indonesia. Kawasan nuklir tempat reaktor ini berada mulai dibangun tahun 1983 dan selesai pada 1992. Reaktor yang dipakai di sini adalah RSG-GA Siwabessy dengan kapasitas daya yang lebih besar dibanding dua reaktor terdahulunya, yakni mencapai 30 MW. Kawasan ini juga dipenuhi pusat-pusat pengembangan dan instalasi. Nama reaktor sendiri diambil dari nama Menteri Kesehatan era Soekarno dan Menteri Energi Atom era Soeharto, Gerrit Augustinus Siwabessy (Udiyani, 2006).

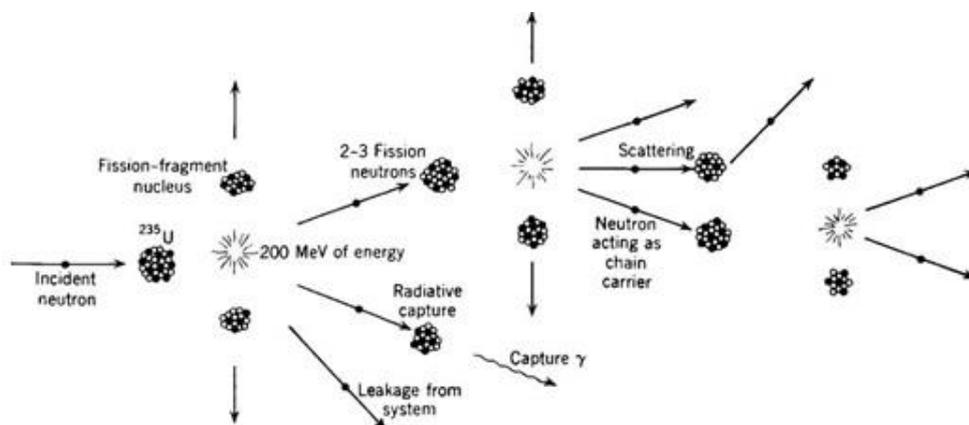
2.5 Reaksi Fisi

Reaksi fisi terjadi jika sebuah inti berat membelah menjadi dua atau lebih inti atom yang lebih ringan seperti pada Gambar 2.3. Reaksi fisi yang terjadi disertai pemancaran energi dan partikel, misalnya neutron seperti contoh berikut ini :



(Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Reaksi fisi terjadi di dalam teras reaktor, dimana bagian terkecil dari penyusun teras reaktor dinamakan sel bahan bakar (Sudarsono, 2011). Fisi nuklir adalah sebuah inti berat yang ditumbuk oleh partikel (misalnya neutron) dapat membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan beberapa partikel lain. Contoh reaksi fisi nuklir ini adalah uranium yang ditumbuk atau menyerap neutron lambat yang akan menghasilkan neutron lain menjadi dua buah inti atom yang lebih ringan. Neutron ini mampu menumbuk (diserap) kembali oleh inti uranium untuk membentuk suatu reaksi fisi berikutnya. Proses ini terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat membentuk reaksi berantai tak terkendali. Berikut ini reaksi berantai disajikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Reaksi Fisi Berantai (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Neutron yang dilepaskan oleh fisi mempunyai energi kinetik yang relatif sangat tinggi (sekitar 200 MeV) dengan kecepatan yang sangat tinggi. Agar neutron dapat menyebabkan fisi yang berikutnya lagi, energinya harus dikurangi sampai mencapai energi termik (0.025 eV). Untuk memperlambat neutron cepat sampai mencapai energi yang lebih rendah, neutron yang berenergi tinggi itu ditumbukkan pada atom-atom yang terdapat dalam bahan tertentu yang disebut moderator. Syarat untuk memilih dan menentukan bahan moderator adalah pada tiap tumbukan terdapat kehilangan energi neutron yang besar, penampang penyerapan yang rendah, dan penampang penghamburan yang rendah (Ahied, 2015).

2.6 Transport Neutron

Penyelesaian persamaan transport neutron untuk menentukan distribusi neutron dalam teras reaktor merupakan salah satu masalah penting dan paling sulit dalam analisis reaktor nuklir. Persoalan transport neutron perlu dipecahkan untuk menentukan distribusi neutron sebagai fungsi waktu, posisi dan energi. Distribusi neutron sangat berpengaruh terhadap produksi daya reaktor. Gambaran perhitungan rapat neutron di dalam teras reaktor dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan transport neutron (Stacey, 2001). Metode-metode numerik yang dipakai untuk menyelesaikan persamaan transport neutron antara lain metode diskrit ordinat (S_N), metode harmonik bola (P_N), metode Monte Carlo (MC), metode *Collision Probability* (CP), dan metode karakteristik (MOC).

Metode *Collision Probability* (CP) memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode lainnya. Selain akurat, metode CP tidak memerlukan komputasi yang lama, umum dipakai, dan mudah diterapkan. Metode CP yang mendasarkan diri pada

integral transport telah terbukti sangat efektif dan cocok dalam menyelesaikan masalah transport neutron dalam reaktor nuklir, terutama untuk menghitung matriks CP dan distribusi fluks disetiap *region* dalam sel bahan bakar nuklir (Shafii, 2013).

2.7 Burn Up Bahan Bakar Nuklir

Pada reaktor nuklir bahan bakar melakukan reaksi fisi di dalam teras reaktor untuk mendapatkan panas yang dapat dimanfaatkan. Tempat dan lamanya pembakaran di dalam teras diatur melalui program pengelolaan bahan bakar sehingga dapat dicapai tingkat pembakaran yang optimum. Dalam proses pembakaran ini dikenal adanya istilah derajat bakar (*burn up*) yang dipakai untuk menyatakan jumlah bahan bakar yang terbakar (fisi). Derajat bakar dapat dinyatakan dalam beberapa cara, yang paling populer adalah dengan satuan MWd/ton (jumlah energi yang telah dihasilkan dalam megawatt-hari dari tiap ton uranium) (Ariani *et al.*, 2013).

Proses *burn up* merupakan proses utama yang terjadi di dalam teras reaktor nuklir. Dalam proses ini terjadi reaksi fisi berantai pada atom–atom bahan bakar bermassa besar (*heavy nucleid fuel*). Parameter *burn up* ini sangat berhubungan dengan faktor ekonomis reaktor, karena parameter *burn up* dapat menjelaskan perbandingan jumlah isotop fisil yang telah berfisi dengan jumlah isotop fisil sebelum berfisi. Dengan melihat perbandingan tersebut, kita dapat menganalisis jumlah bahan bakar yang terdapat pada teras dan secara tidak langsung kita dapat mengetahui efisiensi penggunaan isotop fisil pada satu siklus reaksi fisi berantai (Aida, 2015).

Berikut adalah persamaan yang digunakan dalam *burn up* :

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - [\sum_g \sigma_{ag}^A \phi_g] N_A + \lambda_B N_B + [\sum_g \sigma_{cg}^C \phi_g] N_C \quad (2.1)$$

dimana

N	Densitas atom
A, B, C	Jenis nuklida
ϕ_g	Fluks neutron grup g
λ	Konstanta peluruhan radioaktif
σ_{ag}^A	<i>Cross section</i> absorpsi neutron nuklida A pada grup g
σ_{cg}^C	<i>Cross section</i> penangkapan neutron nuklida C pada grup g
$\lambda_A N_A$	hilang karena peluruhan radioaktif A,
$[\sum_g \sigma_{ag}^A \phi \lambda_A N_{Ag}] N_A$	hilang karena tangkapan neutron oleh A,
$\lambda_B N_B$	masuk karena peluruhan dari B ke A,
$[\sum_g \sigma_{cg}^C \phi_g] N_C$	masuk karena perpindahan dari C ke A melalui tangkapan neutron

Persamaan 2.1 merupakan persamaa depleksi isotop A, dimana pada suku pertama di ruas kanan merupakan suku peluruhan isotop A, suku kedua merupakan proses absorpsi dari isotop A, suku ketiga merupakan suku peluruhan isotop B menjadi isotop A, dan suku keempat adalah suku penangkapan neutron oleh isotop C sehingga menjadi isotop A (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Pada sistem SRAC, proses perhitungan *burn up* teras dilakukan dalam 2 tahapan. Pada tahap pertama dilakukan perhitungan *burn up* pada tingkat sel. Pada tahap ini akan didapat data tampang lintang makroskopik tiap step *burn up* dari sel yang terhomogenisasi. Data tampang lintang makroskopik hasil perhitungan *burn up* tingkat sel berupa tabulasi tampang lintang terhadap suhu teras, suhu pendingin, dan tingkat *burn up* pada pemodelan perangkat bahan bakar yang disimpan dalam file MACRO. Data tampang lintang makroskopik ini kemudian akan diinterpolasi

untuk menghitung *burn up* teras pada tahap kedua (Okumura *et al.*, 2002). Material bahan bakar di reaktor nuklir tentu mengalami reaksi selama reaktor beroperasi. Selama waktu tertentu, bahan bakar tentu akan mengalami pengurangan jumlah akibat terjadinya reaksi fisi serta mengalami transmudasi inti. Perubahan komposisi ini harus dipantau terus karena dengan berubahnya komposisi bahan bakar, berubah pula nilai-nilai parameter neutronik yang terdapat dalam reaktor. Oleh karena itu, perlu analisis mengenai perubahan komposisi tersebut melalui perhitungan *burn up*.

2.8 Faktor Multiplikasi

Faktor multiplikasi (k -effektif) 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 k -effektif, sedangkan jika mediumnya tak berhingga maka disebut faktor multiplikasi tak berhingga (k -inf) (Surbakti, 2009). Salah satu besaran penting dalam analisis neutronik adalah nilai k -effektif yaitu

$$k\text{-effektif} = \frac{\text{Jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{Jumlah neutron pada generasi berikutnya}} \quad (2.2)$$

dengan ketentuan :

k -effektif = 1 disebut keadaan kritis, dimana jumlah neutron tetap (konstan).

k -effektif < 1 disebut keadaan sub kritis, dimana jumlah neutron berkurang.

k -effektif > 1 disebut keadaan super kritis, dimana jumlah neutron bertambah

(Novalinda *et al.*, 2016).

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. Nilai faktor multiplikasi yang diharapkan selalu berada dalam rentang nilai $(1 \pm 0,05)$ selama reaktor beroperasi (Riska *et al.*, 2016).

2.9 System Reactor Atomic Code (SRAC)

System Reactor Atomic Code (SRAC) adalah program yang digunakan sebagai sistem kode neutronik untuk mensimulasikan perilaku nuklir di dalam teras reaktor. Sistem yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) pada tahun 1978 ini dapat membantu dalam mendesain dan menganalisis reaktor khususnya reaktor termal (Okumura *et al.*, 2002).

SRAC diatur oleh tiga pustaka tampang lintang yang dinamakan *public libraries* dan satu pustaka *burnup* (*burnup chain library*). *Public libraries* ditulis dalam format file PDS. *Public libraries* terdiri dari *public fast library* yang berisi tampang lintang group cepat, *public thermal library* yang berisi tampang lintang group termal, dan *public MCROSS library* yang berisi tampang lintang group *hyper-fine* dalam rintang energi resonansi. Pustaka data yang ada dikonversi dari data evaluasi memiliki suatu *library* yang berisi tampang lintang semua jenis nuklida yang ada dari berbagai sumber *library* yaitu ENDF/B-IV, -V, -IV, JENDL-3.1, JENDL-3.2 dan JEF-2.2. Secara keseluruhan terdapat 346 nuklida yang diberikan di dalam struktur 107 group (Okumura *et al.*, 2002)..

Secara umum, terdapat dua langkah utama yang dilakukan oleh SRAC. Pada langkah pertama dilakukan perhitungan spektrum multigrup sel dasar dari sebuah teras untuk mendapatkan tampang lintang grup *collapsed* dan terhomogenisasi.

Sedangkan langkah kedua merupakan perhitungan tingkat teras penuh dengan menggunakan tampang lintang beberapa grup yang diberikan oleh perhitungan sel (langkah pertama) untuk menghasilkan faktor pelipatan efektif (k -efektif), distribusi daya, laju reaksi, dan *burn up*.

SRAC memiliki kode dasar yang terdiri dari beberapa modul kode perhitungan yaitu sebagai berikut:

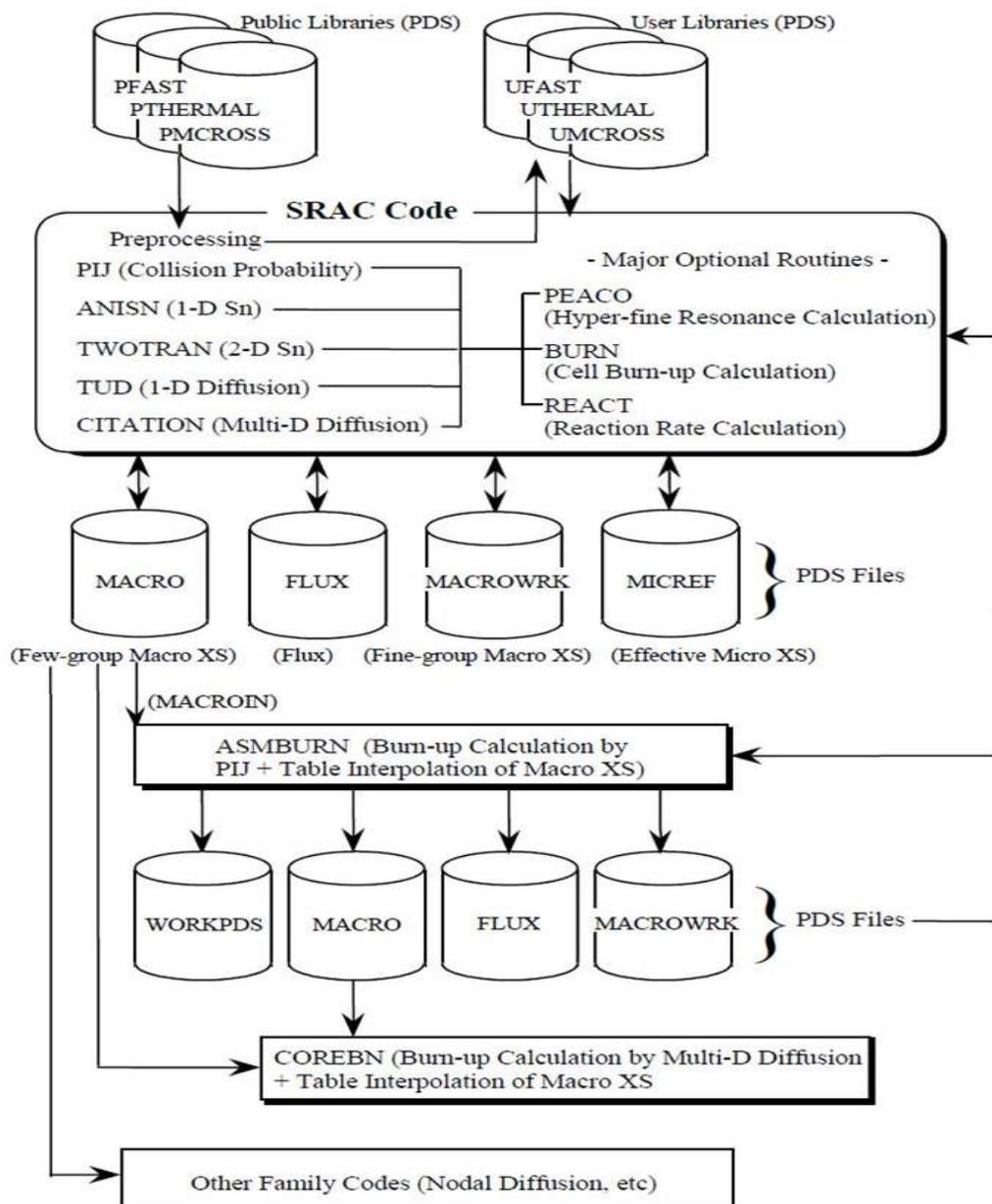
1. PIJ : Kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi 16 kisi geometri.
2. ANISN : Kode transport satu dimensi (SN) yang terdiri dari tiga jenis geometri yaitu slab (X), silinder (R) dan bola (RS).
3. TWOTRAN : Kode transport dua dimensi (SN) yang terdiri dari tiga jenis geometri 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 (RS).
5. *CITATION* : kode difusi multi dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan hexagonal.

Serta 2 modul tambahan yaitu ASMBURN (modul perhitungan *burn up assembly*) dan COREBN (modul perhitungan *burn up teras*) (Okumura *et al.*, 2002).

COREBN merupakan kode yang digunakan untuk melakukan perhitungan *burn up* teras berdasarkan interpolasi tampang lintang makroskopik dan teori difusi *finite difference*. 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 merekam kondisi operasi siklus pertama, *burn up*, dan komposisi nuklida hasil peluruhan tiap elemen bahan bakar dalam teras ke file *history* (Okumura, 2007).

Berikut ini bagan yang menyajikan struktur system SRAC pada Gambar 2.5.



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

SRAC terdapat file input dan file output, file Input SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila penginputan data pada CITATION telah selesai kemudian di *run* maka akan diikuti dengan pesan pada bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) seperti di bawah ini.

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

Apabila bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) belum sampai pada pesan tersebut maka harus dilakukan pengecekan pada input dan melakukan perhitungan kembali. Hasil perhitungan (*output*) dari CITATION akan menunjukkan apakah model teras reaktor yang dibuat berada dalam keadaan kritis dan dapat menghasilkan energi yang maksimal (Okumura *et al.*, 2002).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2018 sampai Februari 2019 bertempat 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 17.1 dan program SRAC.

3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini memiliki beberapa tahapan yaitu :

1. Menentukan Pengayaan

Pengayaan adalah peningkatan konsentrasi isotop suatu nuklida agar suatu nuklida efektif dipakai dalam reaktor nuklir. Pengayaan bahan bakar dilakukan agar reaksi fisi terjadi di dalam reaktor. Pada penelitian ini dilakukan variasi pengayaan sebesar 1-5 %. Penentuan pengayaan pada reaktor air superkritis (SCWR) dilakukan agar reaktor berada dalam keadaan kritis (k -efektif = 1). Persentase pengayaan ditunjukkan dengan nilai *atomic density* (densitas atom) yang terus naik setelah dilakukan pembakaran.

2. Menghitung Densitas Atom

Persentase pengayaan ditunjukkan dengan nilai densitas atom (*atomic density*) yang terus naik setelah dilakukan pembakaran. Dengan demikian, dilakukanlah perhitungan densitas atom dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

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

Keterangan :

N = Densitas atom (atom/cm³)

ρ = Massa jenis (gr/cm³)

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

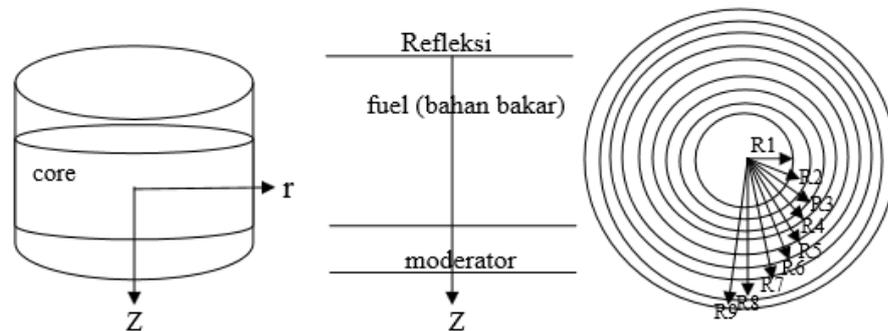
M_r = Massa molekul (gr/mol)

3. Melakukan Perhitungan *Burn-up* Bahan Bakar

Perhitungan dasar dalam manajemen bahan bakar adalah perhitungan penyusutan dan produksi isotop sebagai fungsi waktu. Perhitungan *burn-up* adalah perhitungan yang menitik beratkan pada manajemen bahan bakar, yaitu pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar yang dinyatakan dalam GWd/t (jumlah energi yang dihasilkan dalam gigawatt-hari dari tiap ton uranium) (Walter dan Reynolds, 1981). Perhitungan *burn-up* dilakukan dengan mengaktifkan *script burn up* pada file *input* program *SRAC*. Keluaran (*output*) yang dihasilkan berupa bahan bakar yang sudah dibakar untuk beberapa periode yang disimpan ke dalam *MACRO*.

4. Menentukan Ukuran dan Konfigurasi Teras Reaktor

Model geometri yang ideal diperoleh dengan melakukan penentuan ukuran teras reaktor kemudian mengubah-ubah konfigurasi bahan bakar tanpa mengubah ukuran teras reaktor (Okumura, 2007). Contoh model geometri menggunakan *CITATION* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Model geometri untuk 2-D silinder (r,z) (Okumura *et al.*, 2002).

5. Melakukan Perhitungan teras reaktor dengan CITATION

Hasil penghitungan densitas atom digunakan sebagai *input* pada penghitungan *CITATION* pada *SRAC*. Pada *CITATION* akan dapat diketahui hasil penghitungan secara keseluruhan dari model reaktor yang telah dibuat dengan ukuran dan komposisi tertentu.

6. Melakukan Pengecekan Output pada CITATION

Apabila penginputan data pada *CITATION* telah selesai kemudian di run maka akan diikuti dengan pesan pada bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) seperti di bawah ini.

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

Apabila bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) belum sampai pada pesan tersebut maka harus dilakukan pengecekan pada *input* dan melakukan penghitungan

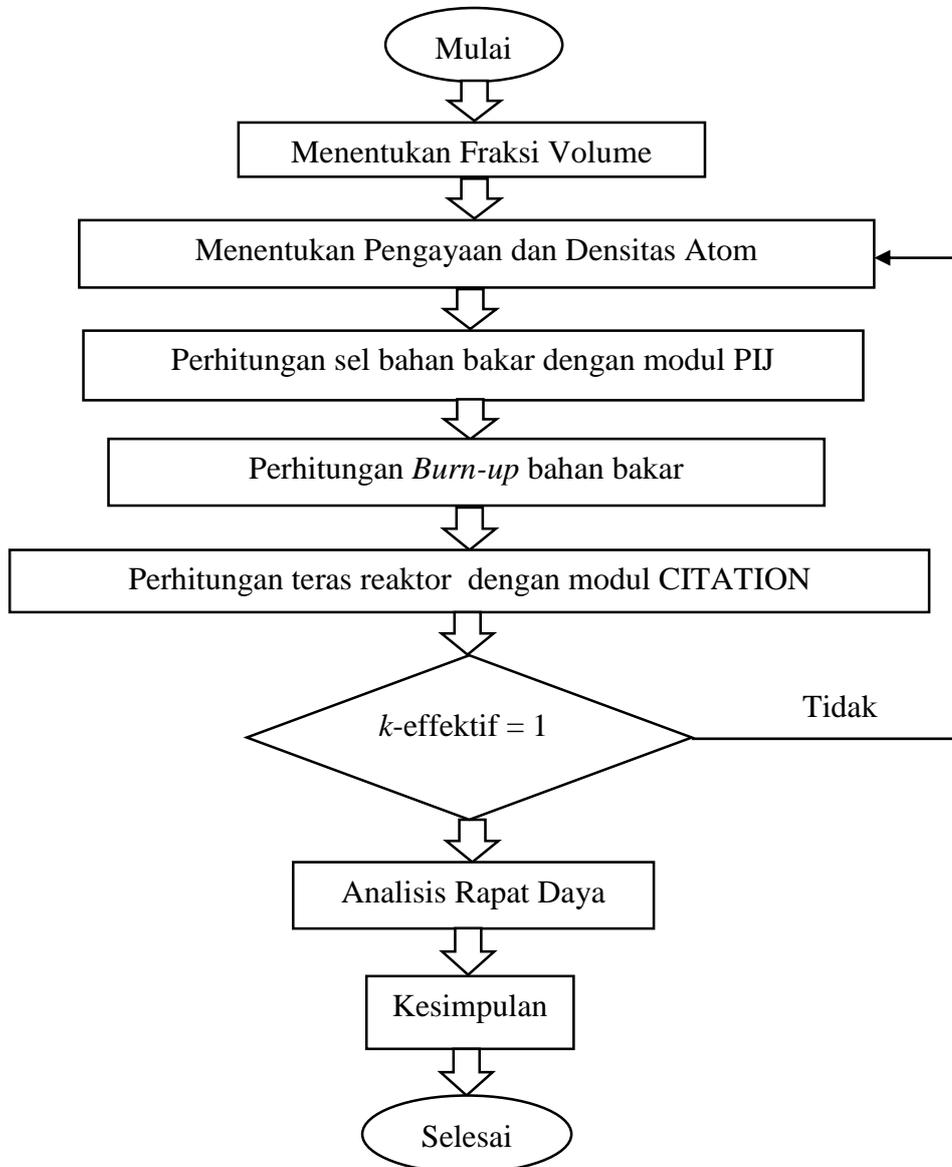
kembali. Hasil penghitungan (*output*) dari CITATION akan menunjukkan apakah model teras reaktor yang dibuat berada dalam keadaan kritis dan dapat menghasilkan energi yang maksimal.

7. Analisis Hasil *CITATION*

Setelah selesai melakukan perhitungan, langkah selanjutnya adalah melihat apakah hasilnya telah sesuai dengan standar. Kemudian melakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura, 2006). Nilai dari *output* yang dilihat sebagai standar adalah besarnya k_{eff} (faktor multiplikasi efektif). Dimana nilai k -efektif ini menunjukkan kekritisian pada reaktor yang besarnya sama dengan satu (k -efektif = 1). Jika besarnya k -efektif > 1 disebut reaktor superkritis karena jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu. Sedangkan jika besarnya nilai k -efektif < 1 disebut reaktor subkritis karena jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu (Zweifel, 1973).

3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Teras reaktor SCWR model teras silinder (r,z) berada pada kondisi kritis pada radius 130 cm dan tinggi 270 cm, diperoleh nilai k -effektif sebesar 1,000004 dengan pengayaan bahan bakar 2,8262 %.
2. Teras reaktor SCWR model teras silinder (r,z) memenuhi kriteria standar keselamatan pada titik radius 25 cm dan tinggi 135 cm dengan nilai rapat daya maksimal sebesar 130,0808 Watt/cm³, faktor puncak daya 1,6063 (arah radial), 1,3189 (arah aksial) dan k -effektif = 1 .
3. Rapat daya rata-rata arah radial yang diperoleh sebesar 80,0977 Watt/ cm³.
4. Rapat daya rata-rata arah aksial yang diperoleh sebesar 98,6241 Watt/cm³.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan diharapkan pada penelitian selanjutnya dapat menganalisis aspek keselamatan lainnya untuk mendapatkan desain reaktor yang lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardoyo. 1996. Prospek PLTN dalam Penyediaan Energi Nasional. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir II PEBN-BATAN Jakarta*. pp. 16-17.
- Ahied, M. 2015. Efisiensi Material pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir LWR (*Light Water Reactor*) dan PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). *Jurnal Pena Sains*. Vol. 2 No. 1. pp. 5.
- Aida, N. 2015. Perhitungan *Burn Up* pada Reaktor Subkritis Berdaya Sedang Berpendingin Pb–Bi. *Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN Barat*. pp. 46–52.
- Anggoro, Y. D., Dharu, D., Nurlaila, Arief, T. Y. 2013. Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 15 No. 2. pp. 69-79.
- Ariani, M., Zaki, S., dan Fiber, M. 2013. Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 Mwth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar. *Jurnal Ilmu Dasar*. Vol. 14 No. 1. pp . 11-15.
- Bastori, I dan Birmano, M. D.. 2017. Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 19 No. 2. pp. 95-102.
- Buongiorno, J. 2003. *Generation IV R & D Activities For The Development Of The SCWR*. INEEL. USA.
- Csom, G., Reiss, T., Feher, S., dan Czifrus, S. 2012. Thorium as an Alternative Fuel for SCWR. *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 41 No. 1. pp. 67-68.
- Dewita, E. 2012. Analisis Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 14 No. 1. pp. 45-56.
- Duderstadt, J.J dan Hamilton, J.H. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley and Sons Inc. USA.

- Fatkhiyatul, A., Budi, S.W., Anam, C., dan Tjiptono, W.T. 2014. Distribusi Fluks Neutron sebagai Fungsi Burn-Up Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Youngster physics journal*. Vol. 3 No 2. pp. 108-109.
- Fegghi, S. A. H., Gholamzadeh, Z., Soltani, L., and Tenreiro, C. 2013. Comparison of (Th-²³³U) O₂ and (Th-²³⁵U) O₂ Fuel Burn Up Into a Thermal Research Reactor Using MCNPX 2.6 Code. *International Journal of Radiation Research*. Vol. 11 No. 1. pp. 30-33.
- Harjanti, S. 2017. Desain Inti (Core) Tiga Dimensi (X-Y-Z) Reaktor SCWR (Super Critical Water-Cooled Reactor) Menggunakan Thorium Hasil Daur Ulang. (*Skripsi*). Universitas Lampung. Bandar Lampung
- Johnsson, J. 2011. *Detailed ¹⁰B Depletion in Control Rods Operating in A Nuclear Boiling Water Reactor*. UPTec K11 015. Swedia.
- Kidd, S.W. 2009. *Nuclear Fuel Resource*. Nuclear Engineering Handbook. USA.
- Lamarsh, J. R. 1983. *Introduction To Nuclear Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company. USA.
- Lestari, A. M., dan Fitriyani, D. 2014. Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC dan MOX terhadap Nilai Breeding Ratio pada Reaktor Pembiak Cepat. *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 3 No.1. pp. 14.
- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press. USA.
- Mandala, G. A. 2010. Simulasi Modifikasi Reaktor TRIGA 2000 Bandung dengan Bahan Bakar Jenis Pelat. *Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir*. pp. 769-775.
- Manurung, P. 2009. *Fisika reaktor*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Menik, A., Zaki, S., Monado, F., Rijal, A., Arif, K., Ferhat, A., and Sekimoto, H. 2013. Optimization Of Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors With Natural Uranium As Fuel Cycle Input. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 260-261. pp. 307-311.
- Miller, G. L. 1957. *Zirconium*. Butterworths Scientific Publication. London.
- Novalianda, S., Menik, A., Fiber, M., dan Zaki, S. 2016. Studi Awal Perhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida (UO₂) pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*. Vol. 2 No 1. pp. 6-15.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., and Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. JAEA. Japan.

- Okumura, K., Teruhiko, K., Kunio, K., and Keichiro, T. 2002. *General Description and Input Instruction*. JAERI. Japan
- Okumura, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analyses*. JAERI. Japan.
- Parmanto, S., Harto, A. W., dan Sardjono, Y., 2011. Studi Desain Down Scale Teras Reaktor dan Bahan Bakar PLTN Jenis Pebble Bed Modular Reactor – HTR 100 MWe. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13 No.2. pp. 194-205.
- Permana, S. 2005. Energi Nuklir dan Kebutuhan Energi Masa Depan. *INOVASI*. Vol.5 No. 17. pp. 5.
- Putri, A. A. 2017. Perhitungan Burn Up Model Assembly X-Y 2 Dimensi pada SCWR menggunakan Bahan Bakar Thorium. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Riska, Fitriyani. D., dan Irka, F. H. 2016 .Analisis Neutronik pada Gas *Cooled Fast Reactor* (GFCR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand*. Vol.5 No. 1. pp. 31.
- Rizaal, M., Harto, A.W., dan Sihana. 2011. Analisis Transien pada Fixed Bed Nuclear Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13 No. 3. pp 149-160.
- Rohman, B dan Daddy, S. 2011. Kajian Pengaruh Penempatan Instrumented Fuel Element pada Pengukuran Suhu Elemen Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*. pp. 39-49.
- Rokhman, S. N., Widiharto, A., dan Kusnanto. 2011. Performa Neutronik Bahan Bakar LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄ pada Small Mobile-Molten Salt Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13 No.3. pp. 173-185.
- Rouf. 2014. Persamaan Deplesi Bahan Bakar Reaktor Nuklir.<https://nuclearthinker.files.wordpress.com/2014/04/srac.jpg>. Diakses Tanggal 4 Juni 2018 Pukul 10.00.
- Shafii, M. A. 2013.Beberapa Metode Penyelesaian Persamaan Transport Neutron dalam Reator Nuklir. *Jurnal Ilmu Dasar*. Vol. 14 No 2. pp. 59-66.
- Schulenberg, T., Leungb, L. K. H., Bradyc, D., Okad, Y., Yamadae, K., Baef, Y. dan Willermozg, G. 2009. *Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR) Development Through GIF Collaboration*. IAEA. pp. 1-3.
- Simanjuntak, S. A. 2017. Perhitungan Pembakaran Lengkap (Burn Up) Reaktor Air Superkritis Bahan Bakar Thorium Model Perangkat (Assembly) Heksagonal Menggunakan SRAC. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.

- Sitompul, Y. P. 2010. *Managemen Bahan Bakar dalam Teras*. [http:// yossitompul.blogspot.com](http://yossitompul.blogspot.com). Diakses Tanggal 15 Juli 2018 Pukul 08.00.
- Soentono, S. 1996. Bahan-bahan untuk Industri Reaktor Nuklir. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III*. pp. 22-31.
- Soewono, C. N., Alexander, A dan Sihana. 2009. Implementasi Metode Multi Objectif Simulated Annealing dalam Optimasi Susunan Bahan Bakar Teras Reaktor PWR Menggunakan Code COREBN. *Prosiding Seminar Nasional ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*. pp. 120-121.
- Sofaa, I. R. 2016. Desain Reaktor Air Superkritis (Supercritical Water Reactor) Model Teras Silinder (r,z) Menggunakan Bahan Bakar Uranium-Thorium. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Stacey, W. 2001. *Nuclear Reactor Physics*. John Wiley & Son. NY.
- Sugiyono, A. 2012. Outlook kelistrikan Indonesia 2010-2030 Prospek Pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir V*. pp. 90-92.
- Surbakti, Tukiran. 2009. Studi Karakteristik Fisika Reaktor Teras PWR Bahan Bakar UO₂. *Prosiding PPI - PDIPTN Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan - BATAN Yogyakarta*. pp. 111.
- Udiyani, P. M. 2006. Perhitungan Dispersi Zat Radioaktif Reaktor RSG-Gas pada Kondisi Operasi Normal pada Daya 30 MW. *Prosiding PPI – PDIPTN Pusat Akselerator dan Proses Bahan BATAN*. pp. 50-59.
- Utami, R dan Yanti, Y. 2013. Desain Reaktor Air Superkritis (Super Critical Water Reactor) dengan Bahan Bakar Thorium. *Jurnal Ilmu Dasar*. Vol.14 No 1. pp. 1-6.
- World Nuclear. 2012. *Tecnoogy System SCWR*. [http://www.gen4.org/Technology/systems/ scwr.html](http://www.gen4.org/Technology/systems/scwr.html). Diakses Tanggal 15 Mei 2018 Pukul 10.00.