

**DESAIN TERAS REAKTOR MODEL GEOMETRI TRIANGULAR DUA
DIMENSI DENGAN PERANGKAT *ANNULAR* IGT 11 PADA REAKTOR
PHWR BERBAHAN BAKAR THORIUM HASIL DAUR ULANG**

(Skripsi)

Oleh

**Tamiimah Hari
1717041058**



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

ABSTRAK

DESAIN TERAS REAKTOR MODEL GEOMETRI TRIANGULAR DUA DIMENSI DENGAN PERANGKAT ANNULAR IGT 11 PADA REAKTOR PHWR BERBAHAN BAKAR THORIUM HASIL DAUR ULANG

Oleh

Tamiimah Hari

Telah dilakukan penelitian tentang desain teras reaktor PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*) dengan perangkat bahan bakar model IGT-11 SRAC pada 1/8 bagian teras reaktor (x,y) membentuk sudut 45° dengan model triangular menggunakan bahan bakar thorium daur ulang dan D₂O sebagai moderator. Tujuan dari penelitian ini meliputi penentuan geometri sel, ukuran pin bahan bakar, fraksi volume, persentase pengayaan bahan bakar, ukuran teras reaktor, pembakaran bahan bakar konfigurasi teras reaktor, kekritisannya, dan distribusi rapat daya. Parameter yang dianalisis dari penelitian ini meliputi pengayaan bahan bakar teras, ukuran dan konfigurasi teras sel reaktor, kritis dan rapat daya. Dari hasil tersebut diperoleh desain reaktor yang ideal dengan ukuran (x) 24,00954 cm dan (y) 48,01908 cm untuk masing-masing titik pada konfigurasi 22×11. Inti reaktor dalam kondisi kritis pada radius (x) dan (y) sebesar 528,20988 cm. Daerah pengayaan bahan bakar sebesar 3,5% dan terbakar pada periode 20 GWd/t dan 30 GWd/t, rapat daya maksimum reaktor adalah 235,75 Watt/cm³. Kondisi kritis dengan nilai rapat daya rata-rata (x) sebesar 161,4424 Watt/cm³ dengan faktor puncak sebesar 1,46003 dan (y) sebesar 140,089 Watt/cm³ dengan faktor puncak sebesar 1,682580 dan k_{eff} reaktor sebesar 1,000000.

Kata kunci: Teras reaktor, *annular* IGT-11, reaktor PHWR, thorium daur ulang

ABSTRACT

REACTOR TERRACE DESIGN TWO DIMENSIONAL TRIANGULAR GEOMETRY MODEL WITH IGT 11 ANNULAR DEVICE IN PHWR REACTOR FROM RECYCLED THORIUM FUEL

By

Tamiimah Hari

The research of PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor) desain cell with the IGT-11 SRAC annular fuel model device on 1/8 two dimensional core (x,y) form an angle of 45° with triangular model using recycled thorium fueled and D₂O coolant has been completed. Objective of the research is determining geometry of cell, size of fuel pin, volume fraction, percentage of fuel enrichment, size of reactor core, fuel burn up of reactor core configuration, criticality, and distribution of power density. 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) 24,00954 cm and (y) 48,01908 cm for each point in configuration 22×11. The reactor core in critical condition was in radius (x) and (y) of 528,20988 cm. The fuel enrichment of region was 3,5% and burn up the period 20 GWd/t dan 30GWd/t, maximum power density of reactor was 235,75 Watt/cm³, with average power density (x) was of 161,4424 Watt/cm³ with peak factor of 1,46003 and power density (y) was 140,089 Watt/cm³ with a peak factor 1,682580 and keff was 1.00000.

Keywords: Reactor core, IGT-11 annular, PHWR reactor, recycled thorium

**DESAIN TERAS REAKTOR MODEL GEOMETRI TRIANGULAR DUA
DIMENSI DENGAN PERANGKAT ANNULAR IGT 11 PADA REAKTOR
PHWR BERBAHAN BAKAR THORIUM HASIL DAUR ULANG**

Oleh

Tamiimah Hari

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

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



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

Judul Skripsi : **DESAIN TERAS REAKTOR MODEL GEOMETRI TRIANGULAR DUA DIMENSI DENGAN PERANGKAT ANNULAR IGT 11 PADA REAKTOR PHWR BERBAHAN BAKAR THORIUM HASIL DAUR ULANG**

Nama Mahasiswa : **Jamiimah Hari**

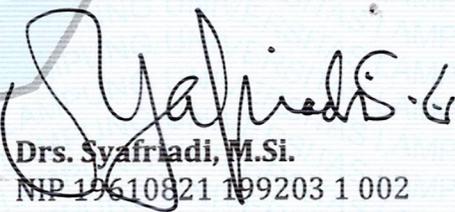
Nomor Pokok Mahasiswa : **1717041058**

Jurusan : **Fisika**

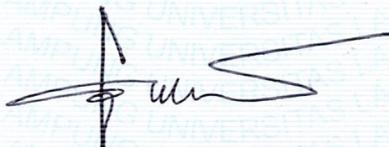
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**




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


Drs. Syafriadi, M.Si.
NIP 19610821 199203 1 002

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

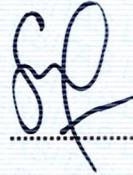


Gurum Ahmad Fauzi, S.Si., M.T.
NIP 19801010 200501 1 002

MENGESAHKAN

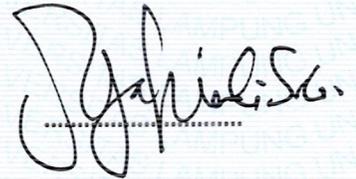
1. Tim Penguji

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



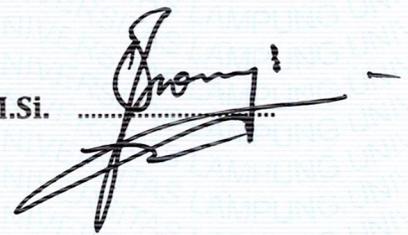
.....

Sekretaris : **Drs. Syafriadi, M.Si.**



.....

Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si.**



.....

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **22 Juni 2022**

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 22 Juni 2022

Penulis,



Tamiimah Hari
NPM. 1717041058

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Tamiimah Hari, dilahirkan di Kabupaten Tangerang, 22 Desember 1999. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Ujang Hari S.H. dan Ibu Lusianah. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Cisauk pada tahun 2011, SMPN 1 Cisauk pada tahun 2014, SMAN 28 Kab. Tangerang pada tahun 2017. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2017 melalui jalur penerimaan SBMPTN. Selama menempuh pendidikan, penulis pernah menjadi asisten praktikum Fisika Eksperimen pada tahun 2020, asisten Fisika dasar pada tahun 2020, dan asisten Optik pada tahun 2021. Penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Kawasan Puspitek, Serpong, Tangerang Selatan, dengan judul “Menghitung Ukuran dan Densitas Bahan Bakar Pelet UO_2 Diperkaya 2% yang Memenuhi Syarat Keberterimaan untuk Reaktor PWR”. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2020 di Desa Cisauk, Kec. Cisauk, Kab. Tangerang. Dalam bidang organisasi penulis sebagai anggota bidang sosial masyarakat HIMAFI FMIPA UNILA periode 2017-2020 dan juga sebagai Bendahara dinas Sosial dan Pengabdian Masyarakat (SPM) BEM FMIPA UNILA periode 2019-2020.

MOTTO

Keberhasilan bukan milik orang pintar. Keberhasilan
milik mereka yang terus berusaha

-B.J. Habibie-

Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada
kemudahan

-QS. Al-Insyirah: 6-

Jika hari ini kamu belum berhasil mencapainya maka
cobalah terus sampai kamu dapat menggapainya
karena proses yang telah kamu lalui akan menjadi
cerita indah di masa yang akan datang

-Tamiimah-

Nikmati, jalani dan syukuri setiap proses kehidupan
yang kita rasakan karena semua scenario yang Allah
buat pasti akan indah pada waktunya

-Tamiimah-

PERSEMBAHAN

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

Kedua Orang tuaku

Bapak Ujang Hari, S.H. & Ibu Lusianah

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

Keluarga Besar & Teman-teman

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

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Desain Teras Reaktor Model Geometri Triangular Dua Dimensi Dengan Perangkat *Annular* IGT 11 Pada Reaktor PHWR Berbahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang”** yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains (S. Si.) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang desain perangkat, teras, dan bahan bakar reaktor PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). Pada skripsi ini dilakukan sebuah penelitian untuk mengetahui pengaruh perubahan konfigurasi, panjang geometri teras, dan persentase pengayaan bahan bakar terhadap distribusi serta nilai rapat daya yang memenuhi standar kekritisian.

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

Bandar Lampung, 15 Juni 2022

Tamiimah Hari

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Desain Teras Reaktor Model Geometri Triangular Dua Dimensi Dengan Perangkat *Annular* IGT 11 Pada Reaktor PHWR Berbahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang”**. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang turut membantu. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terima kasih kepada:

1. Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai pembimbing utama dan pembimbing akademik yang tulus mengajari dan membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
2. Drs. Syafriadi, M.Si. sebagai pembimbing kedua yang senantiasa membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
3. Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus., M.Si. sebagai dosen penguji yang telah memberikan masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S. Si., M. T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi yuwono, M. T. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.

6. Kedua orangtuaku, Bapak Ujang Hari, S.H. dan Lusianah, serta adikku, Nurul Anisah dan Nabila Fajar Ningtyas yang telah mendo'akan serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Seluruh keluarga besar Kakek saya Bpk. Alm. H. Said dan keluarga besar Bpk. Rasmuji yang sangat saya sayangi sampai kapanpun yang selalu mendoakan dalam menyelesaikan kuliah di Jurusan Fisika Universitas Lampung.
8. Dwina, Fero, Manda, Mimi, Mario Fadilah, Raden, Septi, Ican, Feri, Oca, Fando, Rara, dan Olan selaku sahabat sekaligus partner diskusi dan mengerjakan skripsi sekaligus membantu dan mendoakan dalam menyelesaikan kuliah di Jurusan Fisika Universitas Lampung
9. Sahabat-sahabatku Ripan, Wulan, Muti, Adit, Lewi, Agung, Johan, Reza, Rizky dan Fachri yang sangat saya sayangi sampai kapanpun diluar kampus yang selalu memberikan support dalam menyelesaikan kuliah di Jurusan Fisika Universitas Lampung
10. Partner kepanitiaan konsumsi KWI 29, seluruh anggota serta pimpinan kepanitiaan KWI 30, keluarga besar BEM FMIPA 2019-2020, dan keluarga besar HIMAFI, keluarga besar Masuk Kampus 2018-2019.
11. Parter seperbimbingan skripsi kak Sharen, kak Yogi, Riftaul, Munir, Devika, Tasya, dan Ria yang telah membantu dan memberi support dalam pengerjaan tugas akhir.
12. Partner PKL BATAN Squad Jannariah, Nelli, Isna Fadilah dan teman-teman Teknik Nuklir UGM.

13. ROMUSHA, HIMAPERA, dan KHONGGUAN yang telah membantu dan memberi support agar cepat lulus karena sudah ketinggalan.

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

Bandar Lampung, 15 Juni 2022

Tamiimah Hari

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xviii
 I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Konsep Dasar Reaktor	7
2.1.1	Reaksi Fisi	7
2.1.2	Komponen Reaktor Nuklir	9
2.2.	Energi Ikat Inti Atom.....	12
2.3	Jenis-Jenis Reaktor Nuklir.....	13
2.4	Bahan Bakar Reaktor Nuklir	14
2.4.1	Uranium.....	14
2.4.2	Thorium.....	15
2.4.2.1	Thorium Th ²³² Daur Ulang.....	17
2.5	Reaktor PHWR (<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i>).....	19
2.6	Faktor Multipikasi.....	22
2.7	Program <i>System Reaktor Atomic Code (SRAC)</i>	23
2.8	<i>Burn Up</i>	26

III. METODE PENELITIAN

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	29
3.2	Alat dan Bahan	29
3.3	Prosedur Percobaan	29
3.3.1	Menentukan Bentuk Geometri <i>Cell</i> dan Ukuran Pin Bahan Bakar.....	29
3.3.2	Menentukan Fraksi Volume.....	30
3.3.3	Menentukan Pengayaan (<i>Enrichment</i>) dan Densitas Atom.....	31
3.3.4	Input Data Pada <i>CITATION</i>	31
3.3.5	Perhitungan <i>Burn-Up</i> Bahan Bakar.....	41
3.3.6	Menentukan Ukuran Panjang Geometri dan Konfigurasi Teras.....	41
3.3.7	Perhitungan Teras Reaktor dengan Modul <i>CITATION</i>	42
3.3.8	Analisis Hasil <i>CITATION</i>	43
3.3.9	Diagram Alir.....	44

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Penentuan Geometri Sel dan Ukuran Pin Bahan Bakar.....	45
4.2	Menentukan Fraksi Volume Sel Bahan Bakar.....	47

4.3	Pengayaan Bahan Bakar dan Densitas Atom.....	49
4.3.1	Menentukan pengayaan.....	49
4.3.2	Menentukan densitas atom	50
4.4	Perhitungan <i>Burn up</i>	51
4.5	Perubahan Ukuran Panjang Geometri, Perhitungan dan Desain Teras Reaktor.....	53
4.5.1	Perubahan ukuran panjang geometri teras reaktor dan perhitungan.....	53
4.5.2	Desain Teras Reaktor	54
4.6	Pengaruh Panjang Geometri Terhadap Rapat Daya	55

V. KESIMPULAN

5.1	Kesimpulan.....	59
-----	-----------------	----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema reaksi fisi berantai	8
Gambar 2.2 Siklus rantai thorium	17
Gambar 2.3 Konstruksi Reaktor PHWR jenis CANDU	21
Gambar 2.4 Desain fuel bundel reaktor PHWR jenis CANDU	21
Gambar 2.5 Struktur sistem SRAC	25
Gambar 2.6 Prinsip keseimbangan nuklida A	27
Gambar 3.1 Geometri PIJ dengan model perangkat annular IGT-11 dengan batang pin assimetri dan memiliki pin dengan dua ukuran diameter yang berbeda	30
Gambar 3.2 Teras (<i>Core</i>) reaktor PHWR dengan $1/8$ bagian	42
Gambar 3.3 Contoh bagian $\frac{1}{8}$ teras reaktor PHWR membentuk triangular 2D	42
Gambar 3.3 Diagram Alir	44
Gambar 4.1 Model geometri sel <i>annular</i> dengan pin asimetris (IGT=11)	46
Gambar 4.2 Ukuran Jari-jari setiap material (IGT=11)	47
Gambar 4.3 Grafik nilai k_{eff} terhadap periode <i>burn up</i> dengan pengayaan 3-4% menggunakan rentang 0,1%	52
Gambar 4.4 Konfigurasi desain teras reaktor dengan ukuran (x) dan (y) 528,20988 cm	55
Gambar 4.5 Grafik pengaruh perubahan panjang geometri pada 22 nilai (x) dengan panjang (x) 528,20988 terhadap nilai rapat daya relatif	56
Gambar 4.7. Grafik pengaruh perubahan panjang geometri pada 11 nilai (y) dengan panjang (y) 528,20988 terhadap nilai rapat daya relatif	57

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Spesifikasi sel bahan bakar	45
Tabel 4.2 Fraksi volume bahan bakar, selongsong dan moderator.....	48
Tabel 4.3 Hasil densitas atom selongsong dan moderator.....	50
Tabel 4.4 Hasil perhitungan densitas atom pada bahan bakar.....	50
Tabel 4.5 Pengaruh perubahan panjang geometri (x) terhadap nilai k_{eff}	53
Tabel 4.6 Pengaruh perubahan panjang geometri (y) terhadap nilai k_{eff}	54

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan suatu kebutuhan yang sangat penting di era globalisasi saat ini. Kebutuhan akan energi yang semakin meningkat menyebabkan terjadinya eksploitasi yang tinggi terhadap sumber daya energi, yang umumnya seperti batu bara dan minyak bumi. Hal ini dapat berpengaruh pada terbatasnya sumber daya alam di Indonesia, serta berdampak buruk terhadap lingkungan (Pratama, 2015). Dibutuhkan pengembangan sumber daya energi alternatif seperti, energi nuklir untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan (Liun dan Sunardi, 2014).

Sumber daya energi nuklir dapat dihasilkan dari reaksi nuklir yang melibatkan atom-atom bahan bakar nuklir dalam sebuah reaktor (Subagyo, *et al*, 2007). Reaksi yang terjadi di dalam reaktor merupakan suatu reaksi fisi berantai dimana reaksi tersebut dihasilkan dari bahan bakar. Bahan bakar reaktor fisi merupakan radioisotop yang dapat membelah (fisil), dan dapat diperoleh di alam. Namun beberapa bahan fisil terbuat dari bahan yang dapat membiak (fertil), maka beberapa jenis bahan fertil dibutuhkan sebagai bahan baku pembuat bahan fisil dan dapat digolongkan sebagai bahan bakar reaktor fisi (BATAN, 2015).

Bahan fisil diantaranya U^{233} , U^{235} , Pu^{239} dan Pu^{241} serta bahan fertil Th^{232} dan U^{238} adalah bahan bakar dari beberapa tipe reaktor fisi yang telah banyak digunakan

dalam industri nuklir. Bahan bakar alam yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir, seperti uranium alam yang mengandung sekitar 0,7204% bahan fisil U^{235} dan bahan fertil yaitu U^{238} namun memerlukan proses pengayaan yang panjang dan mahal untuk menghasilkan bahan bakar reaktor yang dapat digunakan (Wegrich, 2021). Adapun thorium alam yang hampir seluruhnya berupa bahan fertil Th^{232} (National Nuclear Laboratory, 2012).

Thorium merupakan bahan fertil, karena itu penggunaannya dalam reaktor memerlukan bahan fisil sebagai penggerak (*driver*) sehingga reaksi berantai dapat dipertahankan. Telah banyak digunakan Th^{232} sebagai bahan bakar dari reaktor PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). Contoh dari jenis reaktor PHWR yang dikembangkan oleh Kanada, yaitu reaktor CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*) dengan moderator pendinginnya menggunakan D_2O (*deuterium*). Bahan bakar thorium telah dipelajari sebagai alternatif bahan bakar nuklir konvensional di reaktor PHWR untuk menghemat sumber daya uranium dan untuk menyediakan tingkat kemandirian energi yang besar. Siklus bahan bakar thorium memiliki karakteristik resistensi proliferasi. Siklus bahan bakar thorium dari reaktor PHWR layak dalam fisika maupun dari sudut pandang ekonomi (Jeong, 2006). Th^{232} yang digunakan berubah menjadi bahan fisil U^{233} . Bahan fisil U^{233} tersebut dapat diperoleh kembali sebagai hasil *reprocessing* bahan bakar basis thorium bekas. U^{233} yang telah dipisahkan maupun thorium dan isotop fisil lainnya dapat di prefabrikasi menjadi rakitan bahan bakar baru dan dikembalikan ke reaktor lainnya sebagai bagian dari daur ulang bahan bakar tertutup (Jeong, 2006).

Salah satu komponen reaktor yang memiliki fungsi sangat penting, yaitu teras reaktor. Bentuk teras reaktor di buat berlubang (kolom) yang berfungsi sebagai tempat dari beberapa rangkaian komponen utama, yaitu bahan bakar, moderator, reflektor, batang kendali dan perisai. Teras reaktor terbuat dari logam yang tahan panas dan tahan korosi (Adiwardoyo *et al.*, 2010). Dalam teras reaktor terdapat bahan bakar sebagai komponen utama. Bahan bakar (*fuel*) berupa pellet yang di susun di dalam kelongsong (pin bahan bakar) dengan panjang kelongsong 0,5 m dan diameter 1,3 cm yang kemudian di susun menjadi satu bundel bahan bakar (*fuel bundel*) dengan jumlah 37 pin bahan bakar yang di susun secara *annular* (Wasywich, 1993).

Jenis reaktor yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*) dengan moderator D₂O. Daur ulang thorium akan digunakan sebagai elemen bahan bakar pada reaktor ini. Dalam penelitian ini akan dilakukan perhitungan pembakaran (*burn up*) untuk mengetahui efisiensi energi yang memenuhi kekritisasi pada teras reaktor. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Prayogi pada tahun 2020 dalam penelitian tersebut dilakukan desain $\frac{1}{6}$ bagian inti teras reaktor (*core*) dengan sudut 60° membentuk model *mesh triangular* dengan panjang (*x*) dan (*y*) sebesar 553,67873 cm pada reaktor CANDU menggunakan bahan bakar daur ulang thorium dengan perangkat model *annular* IGT-10. Dalam model *annular* IGT-10 yang digunakan Prayogi memiliki jumlah pin bahan bakar sebanyak 28 pin dengan susunan 4, 8, dan 16 dalam satu bundel bahan bakar dengan tiga ukuran jari-jari cincin yang berbeda (Prayogi, 2020). Penelitian yang akan dilakukan saat ini, yaitu mendesain $\frac{1}{8}$ bagian teras

reaktor PHWR dengan sudut 45° yang membentuk geometri triangular dua dimensi dengan perangkat *annular* IGT-11. Pada penelitian yang akan dilakukan perangkat *annular* IGT-11 yang digunakan memiliki batang pin asimetris pada reaktor PHWR berbahan bakar thorium hasil daur ulang. Dalam desain *annular* IGT-11 memiliki jumlah pin bahan bakar sebanyak 6 pin bahan bakar dengan dua ukuran jari-jari yang berbeda dan di susun secara *annular* dengan dua ukuran jari-jari dari cincin yang berbeda. Tujuannya, yaitu untuk menghasilkan desain reaktor yang memiliki model perangkat dengan tempat penyusunan sel-sel dalam reaktor nuklir yang lebih efektif dan memenuhi standar kekritisasi. Analisis yang akan dilakukan dengan menggunakan *CITATION* pada program *Standard thermal Reaktor Analysis Code* (SRAC) yang dikembangkan di *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA), oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) Jepang (Okumura, 2007).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh perubahan konfigurasi dan panjang geometri teras reaktor PHWR terhadap nilai rapat daya dengan desain model perangkat *annular* IGT-11 pada $\frac{1}{8}$ bagian teras reaktor membentuk geometri triangular dua dimensi (x,y), dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang?
2. Bagaimana persentase pengayaan bahan bakar terhadap k_{eff} yang memenuhi standar kekritisasi untuk reaktor jenis PHWR dengan desain model perangkat

annular IGT-11 pada $\frac{1}{8}$ bagian teras reaktor membentuk geometri triangular dua dimensi (x,y), dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang ?

3. Bagaimana pengaruh perubahan panjang geometri (x,y) terhadap distribusi rapat daya yang dihasilkan pada reaktor PHWR dengan desain model perangkat *annular* IGT-11 pada $\frac{1}{8}$ bagian teras reaktor membentuk geometri triangular dua dimensi (x,y), dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang yang memenuhi standar kekritisasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan, sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh perubahan konfigurasi dan panjang geometri teras reaktor PHWR terhadap nilai rapat daya dengan desain model perangkat *annular* IGT-11 pada $\frac{1}{8}$ bagian teras reaktor membentuk geometri triangular dua dimensi (x,y), dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang.
2. Mengetahui persentase pengayaan bahan bakar terhadap k_{eff} yang memenuhi standar kekritisasi untuk reaktor jenis PHWR dengan desain model perangkat *annular* IGT-11 pada $\frac{1}{8}$ bagian teras reaktor membentuk geometri triangular dua dimensi (x,y), dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang.
3. Mengetahui pengaruh perubahan panjang geometri (x,y) terhadap distribusi rapat daya yang dihasilkan pada reaktor PHWR dengan desain model perangkat *annular* IGT-11 pada $\frac{1}{8}$ bagian teras reaktor membentuk geometri triangular dua dimensi (x,y), dengan bahan bakar thorium hasil daur ulang yang memenuhi standar kekritisasi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Desain model geometri yang digunakan yaitu model triangular dua dimensi (x,y) dengan bentuk perangkat *annular* IGT 11.
2. Bahan bakar yang digunakan adalah Th^{232} hasil daur ulang.
3. Moderator dan pendingin yang digunakan adalah D_2O .
4. Perhitungan ukuran teras reaktor dilakukan secara dua dimensi (x,y) pada bagian $\frac{1}{8}$ bagian triangular.
5. Pengayaan bahan bakar dilakukan pada persentase 3 – 4% dengan rentang 0,1%.
6. Sistem perhitungan menggunakan program dengan kode dasar SRAC modul PIJ dan *CITATION*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan informasi mengenai perkembangan ilmu pengetahuan dalam bidang reaktor nuklir.
2. Memberikan informasi mengenai pemanfaatan sumber daya energi nuklir.
3. Memberikan informasi ilmiah mengenai desain reaktor nuklir yang memiliki efisiensi tinggi dan memenuhi standar kekritisan

II. TINJAUAN PUSTAKA

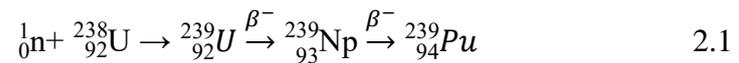
2.1 Konsep Dasar Reaktor

Energi nuklir merupakan suatu energi yang dapat dihasilkan melalui dua mekanisme, yaitu pembelahan inti atau reaksi fisi dan penggabungan beberapa inti melalui reaksi fusi (BATAN, 2015). Reaksi fisi atau pembelahan inti merupakan mekanisme yang banyak digunakan untuk menghasilkan energi nuklir melalui sebuah reaktor. Sebuah reaktor bekerja berdasarkan pada reaksi pembelahan (fisi) dari sebuah inti. Pada reaktor material yang digunakan dibedakan dua jenis material yang dapat mengalami fisi atau pembelahan yang disebut dengan fissionable material, yaitu material fisil dan material fertil. Sebuah material fisil merupakan material yang akan membelah ketika ditembak oleh sebuah neutron dengan sejumlah energi, sedangkan material fertil adalah material yang akan menangkap neutron dan melalui peluruhan radioaktif sehingga berubah menjadi material fisil. U^{235} (uranium-235) adalah material yang secara alami bersifat fisil dan U^{238} (uranium-238) adalah material fertil (Lewis, 2008).

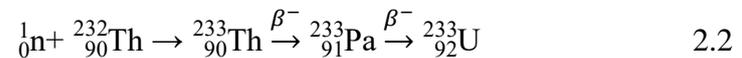
2.1.1 Reaksi Fisi

Reaksi fisi merupakan konsep dasar dari sebuah reaktor fisi yang terjadi ketika sebuah neutron menembak sebuah inti dengan persentase tertentu inti akan mengalami pembelahan (fisi) (Zweifel, 1973). Salah satu contoh reaksi fisi dari

uranium dapat dilihat pada Persamaan 2.1. U^{235} merupakan satu-satunya bahan fisil yang terjadi secara alami dan hanya terdapat sebanyak 0,7% dari uranium alam, dimana sejumlah kecil isotop lainnya merupakan U^{238} sebanyak 99,3% dari uranium alam. Dalam Persamaan 2.1 diperlihatkan U^{238} ditembak oleh sebuah neutron menjadi radioaktif dan meluruh menjadi Pu^{239} (plutonium-239):

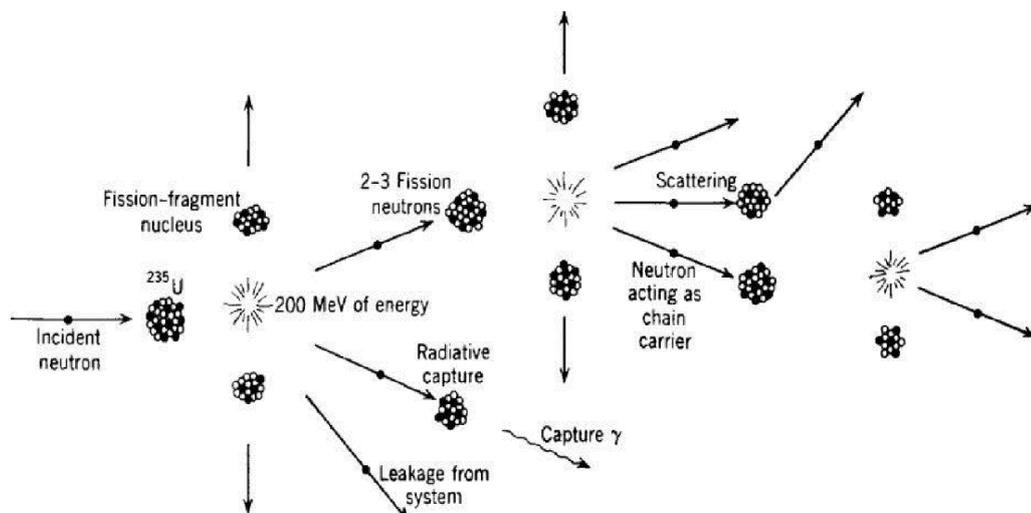


Bentuk reaksi dari Th^{232} menjadi U^{233} dapat dilihat pada Persamaan 2.2.



Untuk Th^{232} , karena tidak bersifat fisil maka Th^{232} akan terlebih dahulu menyerap neutron dan akan menghasilkan U^{233} bersifat fisil yang kemudian akan membelah ketika ditembak oleh neutron (Lewis, 2008). Fisi dari U^{233} ini menghasilkan energi dengan jumlah yang sama dengan U^{235} yaitu sebesar 200 MeV (Zweifel, 1973). Mekanisme produksi energi nuklir banyak menggunakan reaksi fisi nuklir.

Reaksi fisi dapat dilihat pada **Gambar 2.1**



Gambar 2.1 Skema reaksi fisi berantai (Duderstard dan Hamilton, 1976).

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

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

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

2.1.2 Komponen Reaktor Nuklir

Untuk dapat mengendalikan laju pembelahan (reaksi fisi), sebuah reaktor nuklir harus didukung oleh beberapa fasilitas yang disebut sebagai komponen reaktor. Komponen-komponen reaktor nuklir 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.

1. Tangki Reaktor

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

2. Teras Reaktor

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

3. Batang Bahan Bakar (*Fuel Pin*)

Batang bahan bakar bertujuan untuk menjaga bahan bakar dalam geometri yang terdefinisi dengan baik dan untuk menyediakan penghalang pertama yang memisahkan produk fisi dari lingkungan (Wiesenack, 2012). Dalam batang bakar nuklir terdapat bahan bakar yang akan menyebabkan terjadinya reaksi fisi berantai berlangsung sebagai sumber energi nuklir (Lewis, 2008). Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir diantaranya yaitu Uranium-235, Uranium-233, Plutonium-235 dan Thorium (BATAN, 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 (Murray dan Zinn, 1955).

5. Moderator

Moderator adalah komponen reaktor yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (+2MeV) menjadi neutron dengan energi termal (+0,02 - 0,04 eV) agar dapat bereaksi dengan bahan bakar nuklir. Selain itu, moderator juga berfungsi sebagai pendingin primer. Persyaratan yang diperlukan untuk bahan moderator yang baik adalah dapat menghilangkan sebagian besar energi neutron cepat tersebut dalam setiap tumbukan. Bahan-bahan yang digunakan sebagai moderator, antara lain: air ringan (H_2O), air berat (D_2O), Grafit dan Berilium (Mairing, 2009).

6. Batang Kendali (*Control Rod*)

Setiap reaksi fisi menghasilkan neutron baru yang lebih banyak (2 - 3 neutron baru), maka perlu diatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Komponen reaktor yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar adalah batang kendali. Bahan yang dipergunakan untuk batang kendali reaktor haruslah memiliki kemampuan tinggi menyerap neutron. Bahan-bahan tersebut antara lain Kadmium (Cd), Boron (B), atau Haefnium (Hf).

7. Perisai (*Shielding*)

Perisai (*shielding*), berfungsi sebagai penahan agar radiasi hasil fisi bahan tidak menyebar pada lingkungan luar dari sistem reaktor. Karena reaktor adalah sumber radiasi yang sangat potensial, maka diperlukan suatu sistem

perisai yang mampu menahan semua jenis radiasi tersebut pada umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat dan struktur baja (World Nuclear, 2012).

2.2. Energi Ikat Inti Atom

Perbedaan antara massa atom dan jumlah massa proton dengan neutron disebut cacat massa (*mass defect*). *Mass defect* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2. 3.

$$\Delta m = [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n] - m_{atom} \quad 2.3$$

Dengan,

Δm = *mass defect* (amu)

m_p = massa proton (1,007277 amu)

m_n = massa neutron (1,008665 amu)

m_e = massa electron (0,000548597 amu)

m_{atom} = massa inti A_ZX (amu)

Z = nomor atom (nomor proton)

A = nomor massa (nomor nukleon) (Miki, 1990).

Dalam menghitung *mass defect*, penting untuk menggunakan akurasi penuh pada pengukuran massa karena perbedaan massa inti atom umumnya lebih kecil dari jumlah massa proton dengan neutron (Miki, 1990).

Terbentuknya *mass defect* disebabkan karena terjadinya konversi massa menjadi energi ikat ketika nukleus terbentuk. Energi ikat (*Binding energy*) didefinisikan sebagai jumlah energi yang harus diberikan ke inti untuk memisahkan partikel inti

(*nucleons*). Dapat dipahami juga sebagai jumlah energi yang akan dilepaskan jika inti terbentuk dari partikel yang terpisah. Energi ikat adalah energi yang setara dengan *mass defect*. Karena *mass defect* diubah menjadi energi ikat ketika inti terbentuk, sehingga energi ikat dapat dihitung menggunakan faktor konversi yang diturunkan dari hubungan massa-energi menurut Teori Relativitas Einstein (Miki, 1990). Persamaan Einstein yang terkenal terkait massa dan energi adalah sebagai berikut:

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad 2.4$$

Dengan,

Δm = *mass defect* (amu)

c = $3,0 \times 10^8$ m/s (cepat rambat gelombang cahaya)

ΔE = energi ikat inti (Joule)

Energi yang setara dengan 1 amu dapat ditentukan dengan memasukkan jumlah massa ini ke dalam Persamaan Einstein dan menerapkan faktor konversi (Miki, 1990).

2.3 Jenis-Jenis Reaktor Nuklir

Berdasarkan pada fungsinya reaktor dapat dibedakan menjadi dua, yaitu reaktor penelitian dan reaktor daya. Reaktor penelitian digunakan untuk tujuan penelitian, pengujian bahan, pelatihan maupun pendidikan, dan digunakan juga untuk produksi radioisotop. Sedangkan reaktor daya merupakan reaktor nuklir yang digunakan untuk menganalisa daya listrik ataupun pembangkit tenaga listrik. Pada reaktor daya yang di manfaatkan berupa uap panas yang bersuhu tinggi yang

dihasilkan dari reaksi fisi yang terjadi didalam reaktor nuklir untuk memutar turbin (Adiwardojo *et al.*, 2010).

Berdasarkan bahan pendingin yang digunakan dalam reaktor nuklir dibedakan menjadi dua, yaitu PWR (*Pressurized Water Reactor*) yang merupakan reaktor air bertekanan, BWR (*Boiling Water Reactor*) yang merupakan reaktor air mendidih (Roulstone, 2011). Adapun PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*) yang merupakan reaktor air berat (Djokolelono, 1976). Selain itu reaktor dapat dikelompokkan kembali berdasarkan pada moderatornya, yaitu berupa air ringan, air berat (air yang memiliki kandungan *deuterium* lebih besar dari pada air ringan), dan grafit. Contoh reaktor yang menggunakan air ringan sebagai moderator diantaranya, reaktor PWR, BWR, BMBWR. Contoh reaktor yang menggunakan air berat sebagai moderator, yaitu reaktor PHWR yang salah satu jenisnya adalah reaktor CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*). Sedangkan contoh reaktor yang menggunakan grafit sebagai moderator diantaranya, reaktor MR, AGR, dan RBMR (reaktor yang di kembangkan Rusia) (Adiwardojo *et al.*, 2010).

2.4 Bahan Bakar Reaktor Nuklir

Bahan bakar reaktor yang sudah banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir antara lain, yaitu:

2.4.1 Uranium

Uranium ditemukan pertama kali oleh Klaproth seorang kimiawan Jerman pada tahun 1789 (Kidd, 2009). Dalam tabel skala unsur-unsur yang diurutkan

berdasarkan kenaikan massa inti atom, uranium adalah unsur terberat dari seluruh unsur alami dan diklasifikasikan sebagai logam. Uranium memiliki titik leleh yang relatif tinggi yaitu 1132 °C. Simbol kimia untuk uranium adalah U (World Nuclear, 2012).

Selama bertahun-tahun dari tahun 1940-an, hampir semua uranium yang ditambang digunakan untuk produksi senjata nuklir. Tetapi sejak tahun 1970-an uranium dikembangkan sebagai bahan bakar dalam reaktor nuklir. Uranium alami ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop, yaitu meliputi U^{238} (99,275%), U^{235} (0,720%) dan U^{234} (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut hanya U^{235} saja yang bersifat fisil (Kidd, 2009).

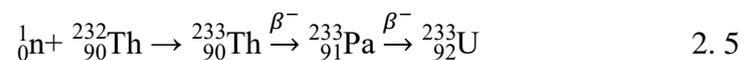
Saat ini dan di masa depan, uranium merupakan sumber energi penting mengingat kelimpahannya yang cukup besar. Meskipun demikian uranium dikategorikan sebagai sumber energi tak-terbarukan (*non-renewable energy source*). Uranium yang terkandung dalam batuan phosphate diperkirakan 22 juta ton, dan di air laut adalah 4200 juta ton (Info Nuklir, 2010).

2.4.2 Thorium

Thorium adalah logam alami yang bersifat radioaktif, ditemukan pada tahun 1828 oleh Jons Jacob Berzelius seorang kimiawan Swedia. Thorium ditemukan dalam bentuk kecil diantara batu dan tanah dimana jumlahnya tiga kali lipat lebih banyak daripada uranium. Tanah umumnya mengandung 6 Ppm thorium. Pada keadaan murni thorium merupakan logam putih keperakan yang berkilau. Namun, bila terkontaminasi oksigen, thorium perlahan akan memudar di udara menjadi abu-abu dan akhirnya hitam (Syarip dan Widodo, 2019).

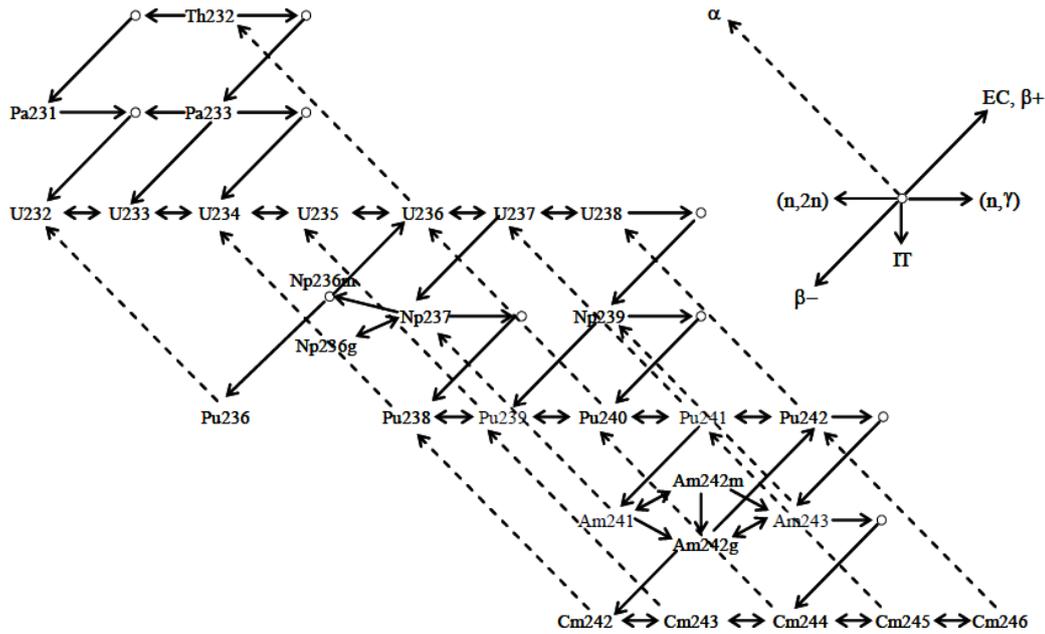
Thorium seperti uranium dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir meskipun tidak bersifat fisil (Kidd, 2009). Oleh karena itu Th^{232} (thorium-232) tidak dapat langsung digunakan dalam reaktor termal. Namun, Th^{232} yang bersifat fertil akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan U^{233} yang bersifat fisil (World Nuclear, 2012) sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam reaktor.

Bahan bakar thorium memerlukan bahan fisil yang berfungsi sebagai penggerak sehingga terjadi reaksi berantai dan pasokan neutron dapat dipertahankan. Bahan fisil yang dapat digunakan sebagai penggerak adalah U^{233} , U^{235} atau Pu^{239} , namun semua bahan tersebut tidak mudah untuk dihasilkan. Dalam bahan bakar thorium, semua fisi berasal dari komponen penggeraknya misalnya U^{233} . Fisi dari U^{233} ini menghasilkan jumlah energi yang sama dengan U^{235} yaitu sebesar 200 MeV (World Nuclear, 2012).



Reaksi pembelahan thorium terjadi penangkapan neutron oleh thorium yang akan menjadi isotop baru, yaitu Th^{233} (thorium-233). Selanjutnya terjadi pemecahan elektron (peluruhan beta) karena peralihan cepat menjadi Pa^{233} (protactinium-233) dalam waktu tertentu. Kemudian Pa^{233} mengalami proses transmudasi lambat dengan peluruhan beta yang pada akhirnya menjadi fisil U^{233} . Reaksi fisi berantai dari Th^{232} hingga menghasilkan U^{233} dan hasil fisi yang lain dapat dilihat pada

Gambar 2.2



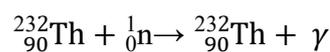
Gambar 2.2 Siklus rantai thorium (Okumura *et al.*, 2002)

2.4.2.1 Thorium Th^{232} Daur Ulang

Bahan bakar daur ulang thorium adalah salah satu cara untuk menghasilkan energi nuklir jangka panjang dengan limbah radioaktif tingkat rendah. Th^{232} dapat diubah menjadi isotop U^{233} dengan tingkat konversi yang jauh lebih tinggi dalam reaktor termal. Jika konversi dari Th^{232} ke U^{233} tidak didorong oleh isotop fisil lain. Oleh karena itu sulit untuk mempertahankan daur ulang bahan bakar yang berkelanjutan. Thorium dioksida merupakan sebuah senyawa utama yang dihasilkan dari thorium alami. Th^{232} memiliki umur paruh 3 kali dari U^{238} , maka dari itu thorium alami hampir murni. Energi ambang batas fasa Th^{232} cukup tinggi sebesar ν ($>1,4$ MeV) dengan penampang fisi lebih kecil, dimana thorium dalam reaktor bekerja sebagai bahan isotop yang baik dibandingkan dengan bahan fisil (IAEA, 2005).

Dalam teknologi daur bahan bakar nuklir, dikenal istilah dikenal istilah daur dengan olah ulang dan daur sekali ulang (*once through*). Proses pengolahan kembali atau dikenal dengan istilah olah ulang dimana suatu sistem pengolahan kembali bahan bakar nuklir dengan melakukan proses olah ulang bahan bakar bekas pakai untuk mengambil uranium sisa (*recovered uranium*) dan bahan fisil plutonium untuk digunakan kembali sebagai bahan bakar. Sedangkan pada daur sekali pakai, tidak dilakukan proses olah ulang (Salimy dan Finahari, 2008).

Tidak seperti siklus bahan bakar pada U^{238} - Pu^{239} fisil hanya dapat dicapai dengan spektrum jeram. Keuntungan untuk siklus bahan bakar thorium, yaitu dimana siklus pembiakan Th^{232} - U^{233} dapat bekerja dengan spektrum epitermal atau termal. Pada siklus bahan bakar thorium, total *transuranik* (TRU) yang diperoleh cenderung lebih sedikit. Proses kerja bahan bakar thorium dalam teras reaktor sangat bergantung dengan kinerja sintesis yang terdapat pada masing-masing isotop, terkhusus Th^{232} dan U^{233} . Pada proses transmudasi dapat dilihat pada persamaan berikut.



Pada Persamaan 2.6 merupakan suatu proses transmudasi isotop untuk bahan bakar berbasis thorium. Th^{232} berubah menjadi Th^{233} setelah menyerap satu neutron dan memancarkan sinar gamma. Th^{233} terjadi peluruhan beta (β^-) menjadi Pa^{233} yang kemudian, Pa^{233} melepaskan elektron lain dengan peluruhan beta (β^-) kedua menjadi Pa^{233} , yang merupakan bahan fisil baik. Ketika terjadi reaksi fisi

U^{233} dapat menghasilkan energi serta beberapa neutron yang berguna sebagai transmudasi bahan bakar putaran berikutnya (IAEA, 2005).

2.5 Reaktor PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*)

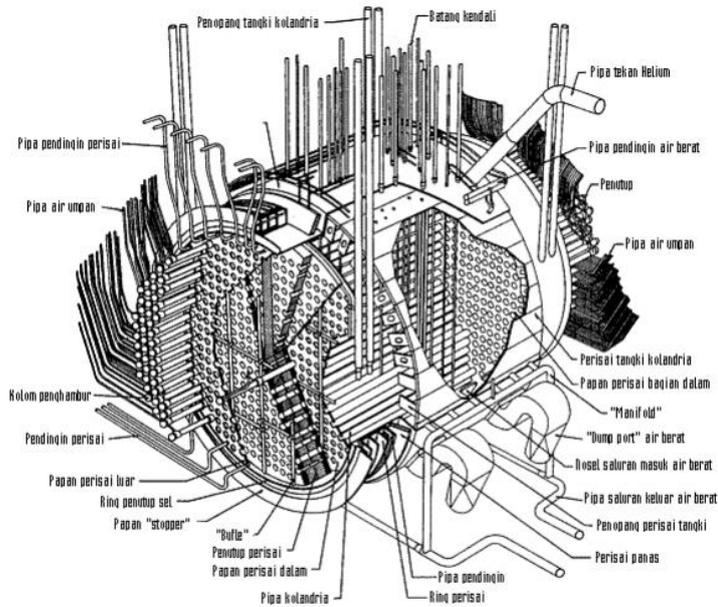
Reaktor PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*) adalah reaktor tabung bertekanan air berat yang dikenal secara komersial berpendingin D_2O (*deuterium*) dan menggunakan bahan bakar uranium alami, tetapi mampu juga menggunakan berbagai siklus bahan bakar uranium dan plutonium yang diperkaya. Reaktor Nuklir PHWR salah satu jenisnya adalah CANDU (*Canadian Duterium Uranium*) dirancang oleh AECL (*Atomic Energy of Canada Limited*). Reaktor jenis ini memiliki perkembangan neutron yang sangat baik dan mampu untuk menggunakan siklus bahan bakar thorium (River, 1906). Reaktor terdiri dari stainless steel horizontal silinder (*caldanria*) yang memiliki ukuran dengan panjang ± 5 m, ditutup pada masing-masing perisai ujung demi ujung, yang saluran bahan bakar membentang horizontal di *caldanria*, dan menyediakan pelindung personel. *Caldanria* ditempatkan di dan didukung oleh struktur beton berlapis baja berisi air ringan (*the reactor vault*) yang menyediakan pelindung termal. *Caldanria* mengandung moderator air berat (D_2O) pada suhu dan tekanan rendah, mekanisme kontrol reaktivitas dan beberapa ratus saluran bahan bakar. Desain reaktor yang populer dengan pemanfaatan bahan bakar uranium alam ini mempunyai keunggulan dibandingkan dengan desain PLTN yang lain (Bereznai, 1998).

Keunggulan desain reaktor nuklir PHWR jenis CANDU yang terdapat sekarang mempunyai bermacam keunggulan, antara lain:

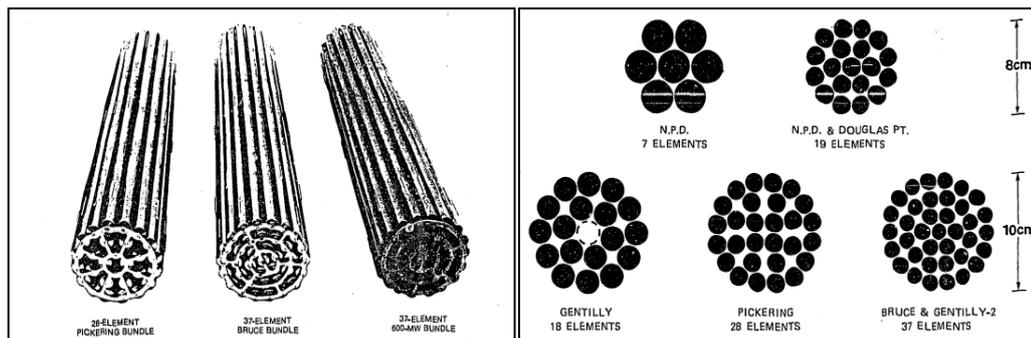
1. Memakai moderator D₂O serta bahan bakar uranium alam oksida;
2. Memakai konsep " *on power refueling*";
3. Memiliki daya spesifik relatif lebih rendah;
4. Memakai moderator yang terpisah dari pendingin dan bisa dioperasikan pada temperatur dan tekanan rendah (Bereznai, 1998);
5. Moderator bisa berperan sebagai pembuang kalor (*heat sink*) dalam permasalahan LOCA untuk waktu yang lumayan lama (Snell dan Webb, 1998);
6. Memiliki batang kendali yang diletakkan pada moderator dingin serta bertekanan rendah;
7. Memiliki sifat yang fleksibel dalam pemakaian bahan bakar, seperti: uranium alam, sisa bahan bakar BWR serta PWR, uranium berpengayaan rendah, MOX (*mixed oxide fuel*) dan kombinasi uranium berpengayaan rendah dengan thorium (Hedges dan Yu, 1998).

Rancangan reaktor PHWR jenis CANDU saat ini mempunyai 2 sistem *shutdown* aktif (Bereznai, 1998). Sistem awal memakai batang penyerap neutron sebaliknya system kedua memakai sistem penginjeksi larutan penyerap neutron (Gd- nitrat) dalam D₂O ke moderator. Dengan demikian persyaratan system berlapis (*redundancy*) terpenuhi.

Deskripsi AECL dari reaktor PHWR jenis CANDU dan struktur teras reaktor ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3. Konstruksi Reaktor PHWR jenis CANDU (Wasywich, 1993).



Gambar 2.4. Desain fuel bundel reaktor PHWR jenis CANDU (Wasywich, 1993).

Rancang reaktor PHWR jenis CANDU menggunakan bahan bakar (*fuel*) berupa pelet yang di susun di dalam kelongsong (pin bahan bakar) dengan panjang kelongsong 0,5 m dan diameter 1,3 cm yang kemudian di susun menjadi satu bundel bahan bakar (*fuel bundel*) yang di susun secara *annular* (Wasywich, 1993). Jumlah pin bahan bakar yang digunakan pada setiap bundel memiliki ukuran diameter serta jumlah pin elemen bahan bakar yang bervariasi diantaranya 7 dan 19 pin elemen bahan bakar pada satu bundel bahan bakar dengan diameter bundel 8 cm. Adapun 18, 28, dan 37 pin elemen bahan bakar pada satu bundel bahan

bakar dengan diameter 10 cm (Palleck *et al*, 1996). Dalam sistem pada program SRAC desain reaktor PHWR jenis CANDU memiliki bentuk bundel bahan bakar dengan susunan geometri *annular* dengan kode IGT-10 dimana jumlah pin bahan bakar yang digunakan sebanyak 28 pin bahan bakar dengan susunan 4, 8, 16 pada bundel dengan cincin jari-jari yang berbeda (Okumura *et al.*, 2001). Desain bahan bakar yang relatif sederhana telah memungkinkan keberhasilan fabrikasi bahan bakar PHWR oleh pengguna lainnya, seperti Argentina, India, Korea Selatan, dan Rumania (River, 1906).

2.6 Faktor Multiplikasi

Faktor multiplikasi (k_{eff}) merupakan suatu besaran yang menunjukkan perbandingan antara jumlah populasi neutron pada suatu generasi dengan jumlah populasi neutron pada generasi sebelumnya dalam suatu medium tertentu. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor yang mencapai keadaan stabil (kritis) jika nilai $k_{eff} = 1$ dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.7.

$$k_{eff} = \frac{\text{jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{jumlah neutron pada satu generasi sebelumnya}} \quad 2.7$$

Jika besarnya $k_{eff} > 1$ disebut reaktor superkritis yang artinya jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu atau jumlah neutron bertambah, jika $k_{eff} = 1$ reaktor dalam keadaan kritis dapat diartikan bahwa jumlah neutron tidak berkurang maupun bertambah melainkan konstan (tetap), dan jika besarnya nilai $k_{eff} < 1$ disebut reaktor subkritis yang memiliki arti dimana jumlah neutron

menurun sebagai fungsi waktu atau jumlah neutron berkurang (Duderstard dan Hamilton, 1976).

Faktor multiplikasi memperlihatkan keadaan neutronik dari sebuah reaktor dan dapat menjadi suatu acuan dalam mendesain sebuah reaktor. Faktor multiplikasi yang diharapkan dalam sebuah reaktor adalah selalu bernilai kritis agar dapat menjamin keberlangsungan reaktor dengan pembangkit daya yang dapat terkendali dan stabil selama reaktor beroperasi (Riskha dan Irka, 2016).

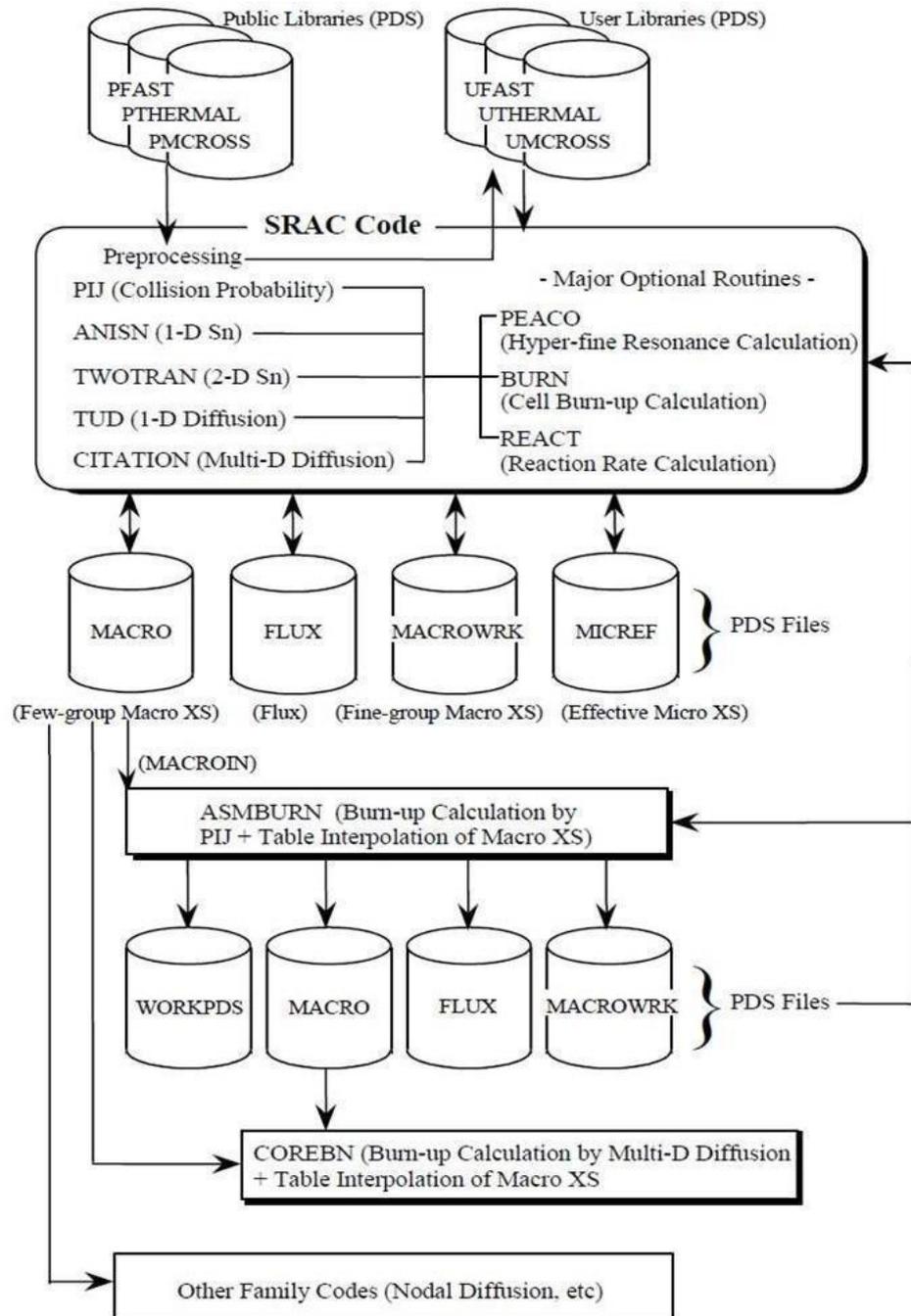
2.7 Program System Reaktor Atomic Code (SRAC)

SRAC (*System Reaktor Atomic Code*) adalah suatu sistem kode yang berlaku untuk analisis neutron dari berbagai jenis reaktor. SRAC merupakan buah kerja keras para ilmuwan JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*) mulai berkembang pada tahun 1978 sebagai standar kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*). Diperbarui oleh Tsuchihashi di tahun 1980an, lalu dilanjutkan oleh Okumura di awal tahun 90an, varian SRAC beroperasi dalam sistem operasi UNIX, pertama kali dirilis di tahun 1996 dengan nama SRAC95. Program ini banyak digunakan untuk keperluan analisis neutronik di Jepang oleh berbagai pihak, seperti para akademisi universitas, departemen penelitian, dan analisis perusahaan penyedia perangkat nuklir (Okumura *et al.*, 2002).

Sistem SRAC terdiri dari penyimpanan data (*Libraries*) neutron (JENDL-3.3, JENDL-3.2, END/B-IV, JEF-2.2 dan sebagainya), terdapat lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi. Lima kode dasar SRAC meliputi :

Sistem SRAC terdiri dari beberapa kode dasar yaitu PIJ, ANISN, TWOTRAN, TUD, CITATION.

1. PIJ sebagai kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI, meliputi 16 kisi geometri.
2. ANISN sebagai kode transport satu dimensi (SN) yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (Rs).
3. TWOTRAN sebagai kode transport dua dimensi (SN) yang terdiri dari 3 geometri yaitu pelat (X-Y), silinder (R-Z), dan bola (R- θ).
4. TUD sebagai kode difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI yang terdiri dari pelat (X), silinder (R), dan bola (Rs).
5. CITATION sebagai kode difusi multi dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segienam (Okumura et al., 2002).



Gambar 2.5 Struktur sistem SRAC (Okumura *et al*, 2007)

SRAC terdiri dari dua file yaitu, 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* akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai tepat atau

tidak. Jika bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) belum sampai pada pesan seperti,

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

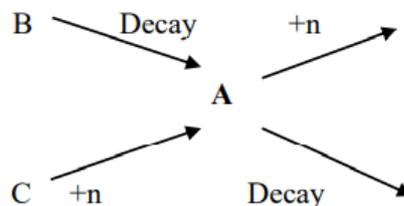
maka harus dilakukan pengecekan pada input dan melakukan perhitungan kembali. Setelah perhitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan standar kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2002).

2.8 Burn Up

Pembakaran bahan bakar merupakan perlakuan reaksi fisi di dalam teras reaktor berguna untuk memperoleh panas yang dapat dimanfaatkan. Proses pembakaran merupakan satu-satunya proses produksi yang digunakan dalam daur bahan bakar nuklir. Tingkat pembakaran yang optimum terjadi sebab tepat dan lamanya pembakaran yang dilakukan di dalam teras reaktor sudah melalui tahap pengelolaan bahan bakar. Dalam kegiatan pembakaran ini dikenal dengan istilah derajat bakar (*burn up*) yang digunakan untuk menyatakan jumlah bahan bakar yang terbakar (fisi) (Okumura *et al.*, 2007)

Analisa *burn-up* merupakan suatu perhitungan standar yang memusat pada manajemen bahan bakar diantaranya, yaitu ukuran konsumsi bahan bakar, proses pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan per-satuan berat, bahan bakar yang dinyatakan dalam Megawatt-day (MWd) dari tiap ton bahan bakar (Lestari *et al.*, 2014). Persamaan laju reaksi yang menggambarkan densitas

jumlah inti dalam teras dapat digambarkan pada skema prinsip keseimbangan berikut.



Gambar 2.6 Prinsip keseimbangan nuklida A (Walter dan Reynolds, 1981).

Secara matematis skema pada **Gambar 2.6** dapat dituliskan dengan Persamaan deplesi bahan bakar seperti yang diperlihatkan pada Persamaan 2.8 berikut ini:

$$\frac{dN_{Ad}}{dt} = -\lambda_A N_A - [\sum_g \sigma_{ag}^A \varphi_g] N_A + \lambda_B N_B + [\sum_g \sigma_{cg}^C \varphi_g] N_C \quad 2.8$$

Dengan N_A adalah kerapatan atom nuklida A, N_B adalah kerapatan atom nuklida B, N_C adalah kerapatan atom nuklida C, λ_A adalah konstanta peluruhan radioaktif nuklida A, λ_B adalah konstanta peluruhan radioaktif nuklida B, φ_g adalah fluks neutron grup g, σ_{ag}^A adalah *cross section* absorpsi neutron nuklida A pada grup g dan σ_{cg}^C adalah *cross section* penangkapan neutron nuklida C pada grup g (Walter dan Reynolds, 1981).

Persamaan 2.8 adalah penipisan isotop A dimana suku di sebelah kanan adalah suku peluruhan A, suku kedua adalah proses penyerapan A, suku ketiga adalah suku peluruhan isotop A, isotop B menjadi isotop A dan istilahnya adalah istilah penangkapan neutron dari isotop C menjadi isotop A. Proses penipisan bahan bakar juga dapat didefinisikan sebagai reaksi pembakaran sempurna. Ada beberapa cara untuk menyatakan pembakaran sempurna, salah satunya adalah

dengan menunjukkan jumlah energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar di dalam reaktor. Persamaan 2.8 digunakan untuk analisis bahan bakar (Walter dan Reynolds, 1981).

Perhitungan dasar dalam manajemen bahan bakar merupakan perhitungan penyusutan dan produksi isotop sebagai fungsi waktu. Material bahan bakar di reaktor nuklir tentu mengalami reaksi selama reaktor beroperasi. Selama waktu tertentu, bahan bakar tentu akan mengalami pengurangan jumlah akibat terjadinya 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. Pada proses depleksi bahan bakar, terjadi dua jenis reaksi yakni transmudasi dan fisi. Reaksi transmudasi adalah reaksi yang membuat inti sebelumnya tidak stabil menjadi inti yang stabil dengan menggunakan proses penangkapan neutron dan peluruhan radioaktif. Reaksi yang terjadi pada proses depleksi bahan bakar yang menyatakan densitas (N) suatu nuklida pada teras (Walter dan Reynolds, 1981).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2021 – Mei 2022. Tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah di jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian ini, yaitu seperangkat personal komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Mint 18.2 hp 32 bit dan program *Standard Thermal Reaktor Analysis Code* (SRAC).

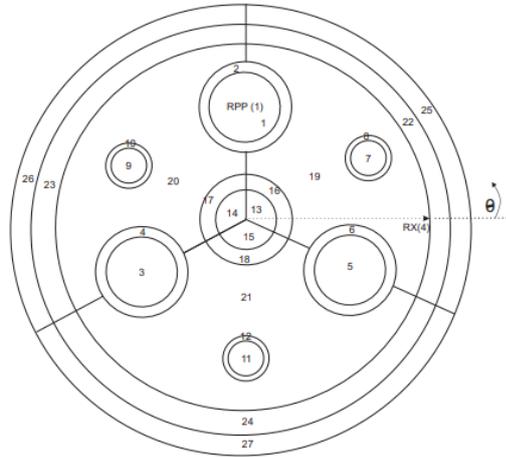
3.3 Prosedur Percobaan

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini memiliki beberapa tahapan sebagai berikut :

3.3.1 Menentukan Bentuk Geometri *Cell* dan Ukuran Pin Bahan Bakar

Bentuk Geometri *cell* reaktor PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*) jenis CANDU dalam program SRAC memiliki bentuk model perangkat IGT-10 dengan batang pin satu ukuran diameter.

Pada penelitian ini model perangkat akan di ubah ke bentuk IGT-11 dengan batang pin asimetris dan memiliki dua bentuk pin dengan diameter yang berbeda. Berikut adalah model perangkat yang akan digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.1 Geometri PIJ dengan model perangkat annular IGT-11 dengan batang pin assimetri dan memiliki pin dengan dua ukuran diameter yang berbeda (Okumura *et al.*, 2001)

Dengan keterangan :

- 1,3,5,7,9,11 = Bahan Bakar
- 2,4,6,8,10,12 = Selongsong
- 13 sampai 27 = Moderator

Menentukan ukuran pin bahan bakar, selongsong, dan moderator pada reaktor PHWR jenis CANDU untuk memperoleh nilai daya yang efisien.

3.3.2 Menentukan Fraksi Volume

Menentukan fraksi volume pada penelitian ini yang memiliki tujuan untuk mengetahui perbandingan antara volume bahan bakar terhadap volume sel bahan bakar yang terdiri dari bahan bakar, *cladding* dan pendingin (Dudestradt dan Hamilton, 1976).

3.3.3 Menentukan Pengayaan (*Enrichment*) dan Densitas Atom

Pada penelitian ini dilakukan pengayaan guna meningkatkan konsentrasi isotop pada nuklida sehingga dapat efektif digunakan dalam reaktor nuklir. Pada setiap reaktor terdapat komponen yaitu bahan bakar, *cladding* dan moderator yang akan dihitung densitas atomnya untuk digunakan sebagai *input* CITATION pada program SRAC. Perhitungan densitas atom yang dilakukan pada setiap nuklida harus sesuai dengan persentase pengayaan bahan bakar yang digunakan.

3.3.4 Input Data Pada CITATION

```
#!/bin/csh
#
#####
###
#
# << run SRAC >>
#
# by Keisuke OKUMURA (E-mail:okumura@mike.tokai.jaeri.go.jp)
#
#####
###
# sample problem CANDU : CANDU Type cell (IGT=11) by Pij
#####
###
```

```
#  
  
# Fortran logical unit usage (allocate if you need)  
  
#  
  
# The meaning of each file depends on sub-programs used in SRAC.  
# [ ]:important files for users.  
  
#  
  
# 1 binary (ANISN,TWOTRAN,CITATION)  
# 2 binary (ANISN,CITATION), scratch  
# 3 binary (SRAC,ANISN,TWOTRAN,CITATION), scratch  
# 4 binary (PIJ,ANISN,TWOTRAN), scratch  
# [ 5] text:80 standard input  
# [ 6] text:137 standard output, monitoring message  
# 8 binary (ANISN,TWOTRAN), angular flux in TWOTRAN  
# 9 binary (TWOTRAN,CITATION)  
# flux map in CITATION, angular flux in TWOTRAN  
# 10 binary (ANISN,TWOTRAN,CITATION), scratch  
# 11 binary (TWOTRAN,CITATION), Sn constants in TWOTRAN  
# 12 binary (TWOTRAN), restart file for TWOTRAN  
# 13 binary (TWOTRAN,CITATION), restart file for TWOTRAN &  
CITATION  
# 14 binary (TWOTRAN,CITATION), scratch  
# 15 binary (CITATION), scratch (fast I/O device may be effective)  
# 16 binary (CITATION), scratch  
# 17 binary (CITATION), fixed source in CITATION
```

18 binary (CITATION), scratch

19 binary (CITATION), scratch

20 binary (CITATION), scratch

21 binary (PIJ), scratch

22 binary (PIJ,CITATION), scratch

26 binary (CITATION), scratch

28 binary (CITATION), scratch

31 text:80 (SRAC-CVMACT,CITATION), macro-XS interface for
CITATION

32 binary (PIJ,ANISN,TWOTRAN,TUD,CITATION)

fixed source for TWOTRAN, power density map in CITATION

33 binary (PIJ,TWOTRAN,TUD), total flux in TWOTRAN & TUD

49 device internally used to access PDS file

[50] text:80 burnup chain library (SRAC-BURNUP)

52 binary (SRAC-BURNUP), scratch

81 binary (PIJ), scratch

82 binary (PIJ), scratch

83 binary (PIJ), scratch

84 binary (PIJ), scratch

85 binary data table (PIJ), always required in PIJ

[89] plot file : PostScript (SRAC-PEACO,PIJ)

91 text:80 (CITATION), scratch

92 binary (CITATION), scratch

93 text:80 (SRAC-BURNUP), scratch

```

# 95 text:80 (SRAC-DTLIST), scratch
# 96 binary (SRAC-PEACO), scratch
# 97 binary (SRAC-BURNUP), scratch
# [98] text:137 (SRAC-BURNUP) summary of burnup results
# [99] text:137 calculated results

#

#=====

#

alias mkdir mkdir
alias cat cat
alias cd cd
alias rm rm

```

Beberapa perintah UNIX digunakan, dengan menggunakan penggunaan 'Alias' akan dipulihkan ke yang asli selama proses ini.

```

#

#===== Set by user

=====

#

# LMN : load module name

# = SRACsc.30m(Scalar,30M), SRACvp.50m(Vector,50M), ....

# BRN : burnup chain library data

# =ucm66fp : U-Np-Pu-Am-Cm & 65+1 FP & B-10 (standard model)
# =thcm66fp : Th-Pa-U-Np-Pu-Cm & 65+1 FP & B-10 (Th model)
# =ucm34fp : U-Np-Pu-Am-Cm & 30+4 FP & B-10 (simple FP model)

# ODR : direktory name in which output data will be stored

# CASE : case name which is referred as names of output files dan PDS

```

```
# WKDR : direaktory name in which scratch PS files will be made dan
deleted
```

```
# PDS_D : direaktory name in which PDS files will be made
```

```
#
```

```
set LMN = SRACsc.30m
```

```
set BRN = ucm66fp
```

```
set ODR = $HOME/baru/output
```

```
set CASE = CANDU_IGT11
```

```
set PDS_D = $HOME/baru/pds
```

**Bahan bakar, hasil output,
keluaran pds dan reaktor yang
digunakan**

```
#
```

```
#===== mkdir for PDS =====
```

```
#
```

```
# PDS_DIR : direaktory name of PDS files
```

```
# PDS file names must be identical with those in input data
```

```
#
```

```
set PDS_DIR = $PDS_D/$CASE
```

```
mkdir $PDS_DIR
```

```
mkdir $PDS_DIR/UFAST
```

```
mkdir $PDS_DIR/UTHERMAL
```

```
mkdir $PDS_DIR/UMCROSS
```

```
mkdir $PDS_DIR/MACROWRK
```

```
mkdir $PDS_DIR/MACRO
```

```
mkdir $PDS_DIR/FLUX
```

```
mkdir $PDS_DIR/MICREF
```

```

#
#===== Change if you like =====
#
set SRAC_DIR = $HOME/SRAC
set LM      = $SRAC_DIR/bin/$LMN
set DATE    = `date +%b%d.%H.%M.%S`
set WKDR    = $HOME/SRACtmp.$CASE.$DATE
mkdir $WKDR
#
setenv fu50 $SRAC_DIR/lib/burnlibT/$BRN
setenv fu85 $SRAC_DIR/lib/kintab.dat
setenv fu89 $ODR/$CASE.SFT89.$DATE
# setenv fu98 $ODR/$CASE.SFT98.$DATE
setenv fu99 $ODR/$CASE.SFT99.$DATE
set OUTLST = $ODR/$CASE.SFT06.$DATE
#
#===== Exec SRAC code with the following input data =====
#
cd $WKDR
cat - << END_DATA | $LM >& $OUTLST
DCA1
DCA CELL 1.2W/O 28 ROD CLUSTER 22.5CM PITCH
1 1 1 1 0 1 4 0 -2 1 0 0 0 0 2 2 2 0 0 0 / SRAC CONTROL
9.0E-4 / AXIAL BUCKLING

```

\$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pfast	Old File	}	Menemukan perpustakaan umum yang akan digunakan
\$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/phtml	O F		
\$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pmcrs	O F		

\$PDS_DIR/UFAST	Scratch	Core	}	Menemukan perpustakaan umum yang akan digunakan
\$PDS_DIR/UTHERMAL	S	C		
\$PDS_DIR/UMCROSS	S	C		
\$PDS_DIR/MACROWRK	S	C		
\$PDS_DIR/MACRO	S	C		
\$PDS_DIR/FLUX	S	C		
\$PDS_DIR/MICREF	S	C		

22 31 1 1 /

6(2) 6(4) 8(3) 2 4 / 66 GROUPS INTO 22 FINE GROUPS EC=1.2752EV

5 3 2 2 1 1 2 2 23(1) / 41 GROUPS INTO 31 FINE THERMAL

22 / 22 INTO 1 FEW GROUP

31 / 31 INTO 1 FEW GROUP

11 27 5 5 1 1 5 3 6 0 2 0 6 180 2 0 360 1 / Pij Control → **Blok 1 untuk menemukan variabel control, model geometri, akurasi perhitungan, dan pilihan yang digunakan untuk perhitungan dari probilitas tumbukan**

0 20 50 5 5 5 -1 0.0001 0.00001 0.001 1.0 10. 0.5 / → **Blok 2 Kontrol parameter iterasi**

5 5 5 5 5 5 5 5 5 1 2 1 2 1 2&

3 4 3 4 3 4 &

5 5 5 &

5 5 5 & T-S

5(1) / X-R → **Blok 4** jika jumlah T-region<R-region

1 2 3 4 5 / M-R → **Blok 6** material di wilayah R-Region

0.0 0.516 0.8324 3.268 3.784 4.128 / RX → **Blok 7** ukuran bahan bakar, selongsong, pendingin, celah udara, dan moderator

0.0 90.0 210.0 330.0 / TY

3(2.064) &

3(2.263)/RPP → **Blok 10** ukuran jari-jari (cm) dari lingkaran dimana batang pin berada

90.0 210.0 330.0 &

30.0 150.0 270.0 /THETA → **Blok 11** posisi sudut setiap batang pin pada θ

3(0.0 0.602 0.774) &

3(0.0 0.125 0.387) / RDP → **Blok 12** jari-jari (cm) untuk sub-divisi annular batang pin dimana RDP (1)=0 ; jari-jarinya umumnya melalui semua batang pin)

1 1 1 / PLOT PIJ GEOMETRY → **Blok 13** plot option integer kontrol plot diperlukan jika IPLOT 0 di Blok-1 ditentukan signed integer untuk menentukan kombinasi wilayah yang dibutuhkan, bilangan bulat dari penjumlahan bilangan bulat disesuaikan dengan jenis peta = 0 (tidak ada), indikator sekala angka dan indikator kelanjutan

5 / NMAT → **Jumlah material ada 5**

MAT1X01X 0 3 849.12 0.67 0.58755 / MAT 1 : FUEL 1 3% → **Bahan bakar**

XU030001 2 0 0.73626E-03 / 1

} **Nuklida**

XTH20001 2 0 2 2.380574E-02 / 2

XO060000 0 0 4.736440E-02 / 3

MAT2XO2X 0 1 586.88 0.10 1.0 / MAT 2 : CLADDING → **Tempat bahan bakar**

XZRN0001 0 0 4.224885E-02 / 1 } **Nuklida**

MAT3X03X 0 3 849.12 0.67 0.58755 / MAT 3 : Fuel 3% → **Sebagai bahan untuk memindahkan peningkatan suhu reaktor yang terjadi karena energi yang dihasilkan oleh reaksi fisi**

XU030001 2 0 0.73626E-03 / 1

XTH20001 2 0 2 2.380574E-02 / 2

XO060000 0 0 4.736440E-02 / 3

} **Nuklida**

MAT4X04X 0 1 586.88 0.10 1.0 / MAT 3 : CLADDING → **Celah udara untuk pendingin eksternal dalam reaktor)**

XZRN0001 0 0 4.224885E-02 / 1 } **Nuklida**

MAT5X05X 0 2 578.15 0.10 1.0 / MAT 5 : LIGHT WATER → **Moderator untuk menurunkan energi neutron cepat menjadi neutron dengan energi thermal agar dapat bereaksi dengan bahan bakar nuklir.**

XD02D001 0 0 6.6568E-02 / 1

XO060001 0 0 3.326E-02 / 2

} **Nuklida**

& Burn up

7 1 1 1 0 0 0 0 0 10(0) / IBC

7(2.700E-04) / POWER LEVEL MW/CM

1.0000E+3 5.000E+3 1.0000E+4 1.500E+4 2.0000E+4

3.0000E+4 4.000E+4 / EXPOSURE (MWD/TON)

0 / PEACO

/ BLANK(A4) case to terminate job.

END_DATA → Akhir dari data input

#

#===== Remove scratch PS files

=====

#

```
cd $HOME      }
rm -r $WKDR   } Direktori kerja dihapus setelah selesainya
                } perhitungan MOSRA-SRAC
```

#

#===== Remove PDS files if you don't keep them

=====

#

```
rm -r $PDS_DIR
```

#

```
# rm -r $PDS_DIR/UFAST
```

```
# rm -r $PDS_DIR/UTHERMAL
```

```
# rm -r $PDS_DIR/UMCROSS
```

```
# rm -r $PDS_DIR/MACROWRK
```

```
# rm -r $PDS_DIR/MACRO
```

```
# rm -r $PDS_DIR/FLUX
```

```
# rm -r $PDS_DIR/MICREF
```

Banyak file disimpan dalam file PDS pengguna, hapus mereka jika tidak perlu, didalam kasus, hanya file MACRO yang disimpan. Jika Core ditentukan untuk PDS di input MOSRA-SRAC. Semua file anggota di PDS secara otomatis dihapus oleh kode, meskipun direktori kosong diberikan

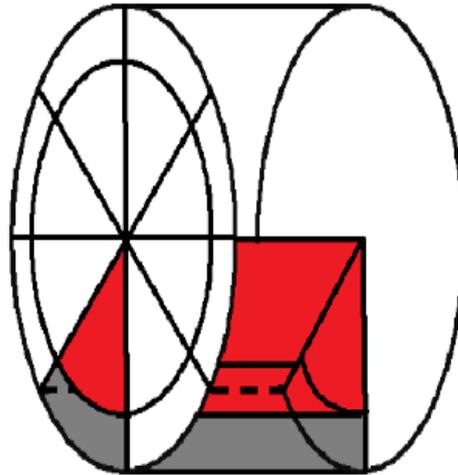
3.3.5 Perhitungan *Burn-Up* Bahan Bakar

Perhitungan *burn-up* dilakukan dengan mengaktifkan *burn-up* pada file *input* dalam program. *Output* yang dihasilkan berupa bahan bakar untuk periode yang disimpan dalam MAKRO. Perhitungan *burn-up* juga merupakan perhitungan yang menitik beratkan pada pengelolaan bahan bakar, yaitu perlakuan dan untuk menentukan jumlah energi yang dihasilkan satuan berat bahan bakar yang dinyatakan dalam GWd/t. Pada penelitian ini lama waktu pembakaran yang digunakan adalah 20 GWd/t untuk bagian pertama pengayaan dan 30 GWd/t untuk bagian kedua pengayaan.

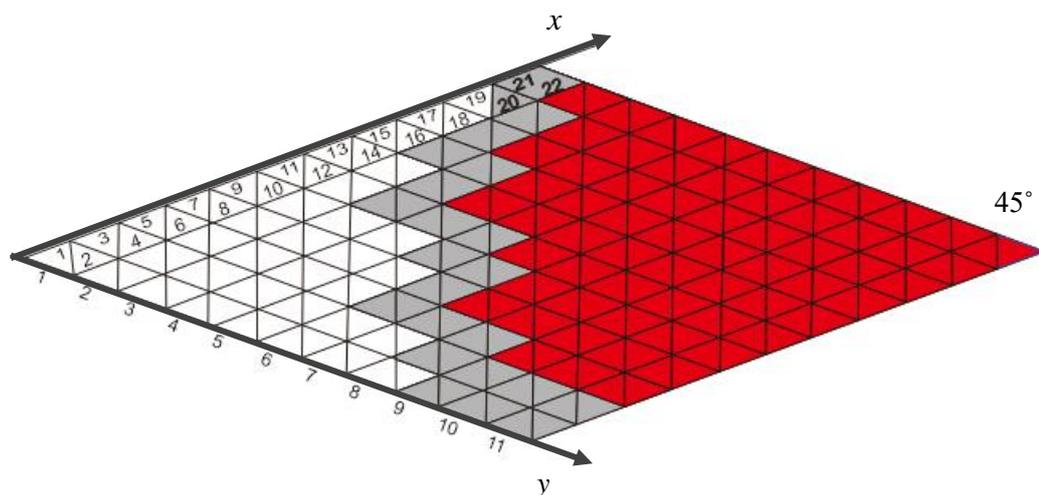
Periode ini digunakan untuk menentukan efisiensi energi yang memenuhi kekritisan, karena selama periode pembakaran, pengayaan ditentukan untuk mendapatkan efisiensi tertinggi.

3.3.6 Menentukan Ukuran Panjang Geometri dan Konfigurasi Teras

Untuk memperoleh model geometri teras reaktor yang baik, dilakukan penentuan ukuran teras reaktor kemudian mengubah konfigurasi bahan bakar tanpa mengubah ukuran dari teras reaktor (Okumura, 2007). Teras reaktor memiliki bentuk tabung silinder dengan dua sisi, yaitu depan dan belakang. Pada bagian depan tabung silinder dibuat berlubang (kolom) sebagai tempat bahan bakar dengan sisi belakang tertutup. Pada sisi depan teras reaktor bila di bagi $\frac{1}{8}$ bagian akan membentuk geometri triangular dua dimensi (x,y) dengan sudut 45°. Gambaran contoh teras reaktor dengan $\frac{1}{8}$ bagian yang membentuk geometri triangular dua dimensi.



Gambar 3.2 Teras (*Core*) Reaktor PHWR dengan $\frac{1}{8}$ bagian (Okumura, 2007)



Gambar 3.3 Contoh bagian $\frac{1}{8}$ Teras Reaktor PHWR membentuk triangular 2D (Okumura, 2007)

3.3.7 Perhitungan Teras Reaktor dengan Modul *CITATION*

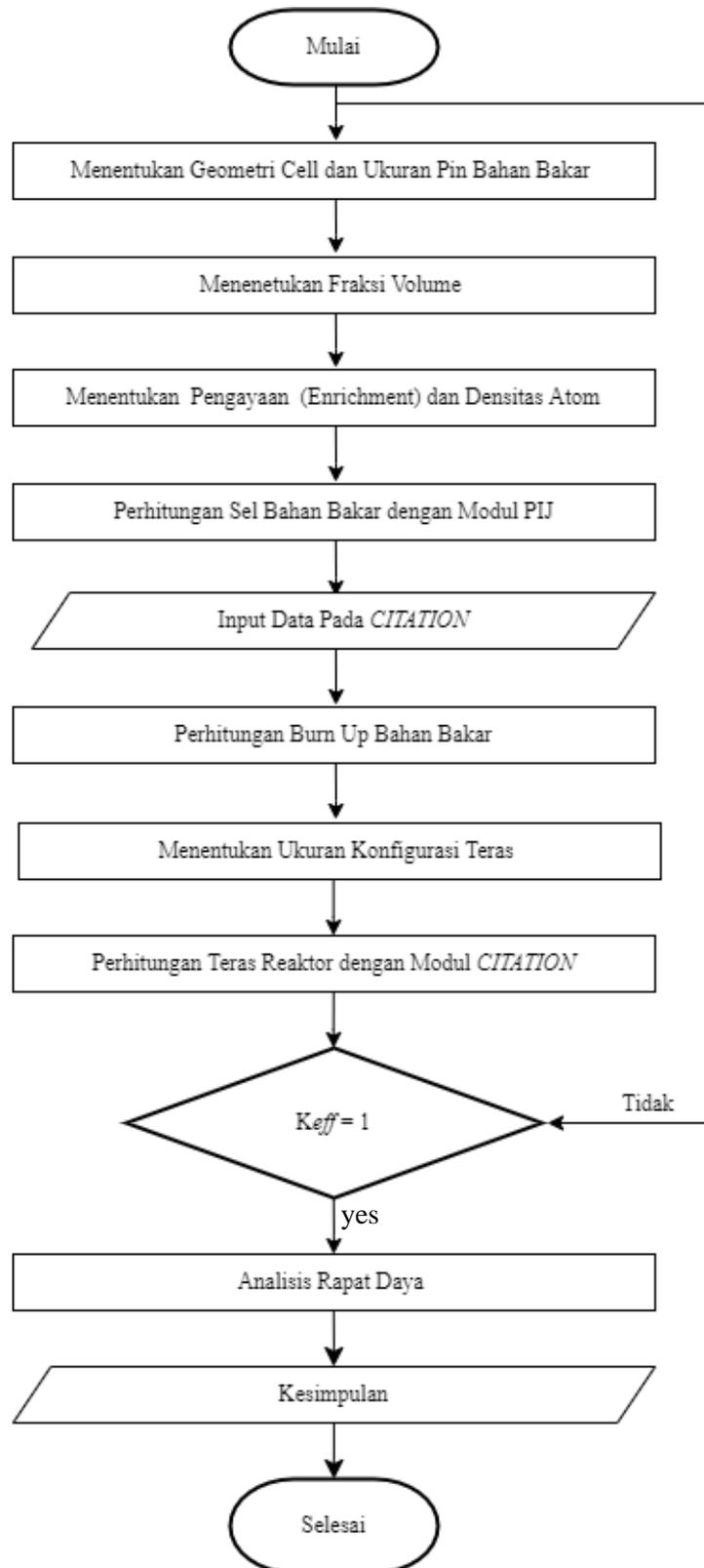
Pada hasil penghitungan densitas atom digunakan sebagai *input*, penghitungan *CITATION* pada SRAC. Pada *CITATION* akan dapat diketahui hasil penghitungan secara keseluruhan dari model reaktor yang telah dibuat dengan ukuran dan komposisi tertentu.

3.3.8 Analisis Hasil *CITATION*

Nilai dari *output* yang diperlihatkan berupa nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Nilai k_{eff} ini memperlihatkan kekritisitas suatu reaktor, apabila nilai k_{eff} besarnya sama dengan 1 ($k_{eff} = 1$) maka reaktor kritis. Apabila nilai k_{eff} besarnya lebih dari 1 ($k_{eff} > 1$) maka reaktor superkritis, hal ini dikarenakan jumlah neutron meningkat seiring dengan pertambahan waktu. Apabila nilai k_{eff} kurang dari 1 ($k_{eff} < 1$) maka reaktor dikatakan subkritis karena terjadi penurunan jumlah neutron seiring bertambahnya waktu (Wiesenack, 2012)

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

3.3.9 Diagram Alir



Gambar 3.3 Diagram Alir

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang di peroleh dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Perubahan konfigurasi (x) dan (y) serta panjang geometri pada $\frac{1}{8}$ bagian teras dengan konfigurasi 22×11 dengan jarak tiap titik sebesar 24,00954 cm pada (x) dan 48,01908 cm pada (y) pada panjang geometri teras sebesar 528,20988 cm pada (x) maupun (y) berpengaruh terhadap nilai rapat daya maksimum yang di hasilkan sebesar 235,71 Watt/cm³ yang memenuhi standar kekeritisan.
2. Persentase pengayaan bahan bakar yang digunakan pada setiap pinnya sebesar 3,5% dengan periode *burn up* 20 GWd/t dan 30 GWd/t pada $\frac{1}{8}$ bagian teras reaktor PHWR menghasilkan k_{eff} dalam keadaan kritis sebesar 1,000000.
3. Pengaruh perubahan panjang (x) dan (y) pada rentang 473,20988 - 583,20988cm diperoleh panjang optimal sebesar 528,20988 cm dalam keadaan kritis dengan nilai rapat daya rata-rata (x) sebesar 161,4424 Watt/cm³ dengan faktor puncak sebesar 1,46003 dan (y) sebesar 140,089 Watt/cm³ dengan faktor puncak sebesar 1,682580, faktor puncak yang di hasilkan pada penelitian ini tidak melebihi nilai 2,0 sehingga pada rapat daya (x) dan (y) telah memenuhi standar keselamatan dan dapat digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardoyo., Lasman, N., Ruslan. Pratama, M., dan Efendi, E. 2010 *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta: PDIN-BATAN.
- Ariani, M., Su'ud, Z., dan Manado, F. 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.
- BATAN. 2015. *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. (Online) Tersedia:<http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn/924> . diakses pada 2 Juli 2021 pukul 21.30.
- BATAN. 2010. *Bahan Bakar Reaktor Fisi*. (Online) Tersedia: <http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn/924> diakses pada 2 Juli 2021 pukul 21.30.
- Bae, J. U. N. H. O. dan Jeong, J. Y. 2015. Thermal E Hydraulic Characteristics For Canflex Fuel Channel Using Burnable Poison In CANDU Reaktor, *Nuclear Engineering dan Technology*, Vol. 47 No. 5, Pp. 559–566.
- Bereznai,G. 1998. *Nuclear Power Plant System dan Operation Reference Text*, Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkom University, Bangkok
- Cycle, R. 2021. *Thermodynamics as Energy Conversion Science*, nuclear-power.com. (Online) Tersedia: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics> di akses pada 8 November 2021 pukul 22.14.

- Dewita, E., Barat, J. K. dan Prapatan, M. 2012. Analisis Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* Vol. 14 No. 1, Pp. 45–56.
- Duderstadt, J. J., dan Hamilton, J. H. 1976. *Nuclear Reaktor Analysis*. Jhon Wiley dan Sons Inc. USA
- Fatkhiatul, A., Budi, S.W., Anam, C., dan Tjiptono, W. T.2004. Distribusi Fluksneutron Sebagai Fungsi *Burn Up* Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Youngster Physisc Journal*. Vol.3 No. 2. Pp.108-109
- Gholamzadeh, Z., Soltani, L. dan Tenreiro, C. 2013. Comparison of (Th- 233 U) O₂ dan (Th- 235 U) O₂ fuel *burn up* into a thermal research reactor using MCNPX, *International Journal of Radiation Research*, Vol. 11 No.1. Pp. 29 – 33
- Hedges, K. R. dan Yu, S. K. W., 1998. Next Generation CANDU Plants, *1998 Pacific Basin Nuclear Conference Proceeding*, Pp. 729 – 735.
- IAEA (International Atomic Nuclear Energy). 2005. Thorium Fuel Cycle – Potential Benefits dan Challenges. *International Atomic Energy Agency. Austria*. Pp. 6 – 10.
- Irka, F. H., dan Su'ud, Z. 2015. Analisis *Burn Up* pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika*. Vol.7 No.2, Pp. 78–86.
- Jeong, C. J. 2006. Dynamic Analysis of the Thorium Fuel Cycle in CANDU Reactors, *KAERI*. Pp. 43 – 60.
- Kidd, S. W. 2009. *Nuclear Fuel Resource*. Nuclear Engineering Handbook. USA.
- Liun, E. dan Sunardi. 2014. Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan Dan Fosil, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 16 No.3, Pp. 119 –130.
- 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 –18.

- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of nuclear Reaktor Physics*. Academic Press. USA.
- Majalah Energi. 2010. *Nuklir:Energi Alternatif Solusi Pemanasan Global*.(Online)Tersedia:[http://majalahenergi.com/forum/energi-baru-dan-terbarukan/bentuk-energi-baru/inheren-safety-pada-reaktor-nuklir\(online\)](http://majalahenergi.com/forum/energi-baru-dan-terbarukan/bentuk-energi-baru/inheren-safety-pada-reaktor-nuklir(online)) diakses pada 2 Juli 2021 pukul 22.00.
- Mairing, M.P., Prihatnadi, H. 2009. Tinjauan Bahan Moderator Untuk Komponen Reaktor Nuklir, *Jurnal Perangkat Nuklir*, Vol.3 No.5, Pp. 49 – 51.
- Miki, H. 1990 Binding energy and mass defect, *Physics Education*, Vol. 25 No. 6, Pp. 322–324.
- Murray, R. L. 2000. *Nuclear Reaktor Types*, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.
- Murray, R. L. dan Zinn, W. H. 1955. Introduction to Nuclear Engineering, *American Journal of Physics*. Vol.23 No.1, Pp. 74 – 75
- Ngadenin., Syaeful, H., Widana, K. S., Sukadana, I Gde., dan Indrastomo,Fd. D. 2014. Studi Potensi Thorium pada Batuan Granit di Pulau Bangka. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 16 No. 2. Pp. 143 – 155.
- Nuttin, A. Prévot, P. Capellan, N. David, S. Doligez, X. dan Méplan, O. 2016. Validation of the minimalistic Nodal Drift Method for spatial kinetics on a simple CANDU LOCA benchmark Annals of Nuclear Energy Validation of the minimalistic Nodal Drift Method for spatial kinetics on a simple CANDU LOCA benchmark, *Annals Of Nuclear Energy*, Vol. 88 No.10. Pp. 135 – 150.
- National Nuclear Laboratory. 2012. Comparison of thorium dan uranium fuel cycles, *National Nuclear Laboratory report*, Vol.5 Pp.31. (Online) Tersedia:https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/65504/6300-comparison-fuel-cycles.pdf diakses pada 8 September 2021 pukul 15.00.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Tsuchihashi, K. 2002. *General Description dan Input Intruction*. Jepang: JAERI. Pp. 5, 64, 186.

- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihashi, K. 2007. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA. Pp. 4 – 26.
- Okumura, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reaktor Physics Analysis*. Japan. JAEA. Pp. 10-15.
- Palleck, S. J., Sejnoha, R. and Wong, B. J. 1996 Bundle Uranium Content and Performance of Candu Fuel. *Fuel Design Brach*.AECL. Pp. 243-255
- Parmanto, S., Danang, W, H, Y, S. 2011. Studi Desain Down Scale Teras Reaktor dan Bahan Bakar PLTN Jenis Pebble Bed Modular Reactor - HTR 100 MWe, *Tesis*, Vol.13 No.2, Pp. 194 – 205.
- Prayogi, I. 2020. Desain Inti Teras Reaktor (CORE) Model Mesh Triangular Pada Reaktor CANDU Menggunakan Bahan Bakar Daur Ulang Thorium. *Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung*.
- Pratama, Yoga. 2015. *Dampak Negatif Penggunaan Energi Fosil dari Sektor Transportasi dan Industri*, environment-indonesia. (Online) Tersedia: <https://environment-indonesia.com/category/news-2/> diakses pada 21 September 2021 pukul 17.33
- River, C., Laboratories, N. dan River, C. 1906. *Atomic Energy Of Canada Limited Energieatomique Radiation Risks dan Radiation Protection At Crnl*, Risques de rayonnement et protection contre le rayonnement aux LNCR.
- Riska, D. dan Irka, F. 2016. Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reaktor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂), *Jurnal Fisika Unand*, Vol.5 No.1, Pp. 28 – 34.
- Salimy, D. H. dan Finahari, I.N. 2009. Berbasis Reaktor Pwr Dan CANDU, *Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) BATAN*, Pp. 1 – 9.
- Schulenberg, T. dan Starflinger, J. 2012 *High performance light water reactor: Design dan analyses*, High Performance Light Water Reactor: Design dan Analyses.
- Setiyaningsih, S., Yulianti, Y. dan Sembiring, S. 2019. Desain Inti Reaktor SCWR (Supercritical Water Reactor) Model Teras Silinder (r, z) dengan

Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang, *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, Vol.7 No.2, Pp. 215 – 222.

Sell, V. G., dan Webb, J. R., 1998. CANDU-9 – The CANDU Product to Meet Customer dan Regulator Requirements Now dan in The Future, *Pacific Basin Nuclear Conference Proceeding*, Pp. 1445 – 1453.

Soewono, C. N., Alexdamer, 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.

Syarip, S. dan Widodo, S. 2019. *Dari Pasir Monasit ke Torium : Bahan Baku Bahan Bakar Nuklir dan Radioisotop Medik*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Subagyo, Y., Irawan, D. dan Santosa, J. 2007. *Listrik Dari Energi Nuklir*. Prof. Dr. Jakarta: Kementrian Negara Riset Dan Teknologi, Jakarta.

Walter, A. E., dan Reynolds, A. B., 1981. *Fast Breeder Reaktor*. Pergamon Press.USA.

Wardhana, W., A. 2007. *Teknologi Nuklir: Proteksi Radiasi dan Aplikasinya*.Yogyakarta: Dani. Pp.51 dan Pp.126 – 127.

Wasywich, K. M. 1993.Characteristics of used CANDU fuel relevant to the Canadian nuclear fuel waste management program, *Atomic Energy of Canada Limited, AECL (Report)*, Pp. 1–159.

Wegrich, K. 2021 Nuclear reaktor . *Fissile dan fertile materials*, Pp. 1–6. Tersedia :<https://www.britannica.com/technology/nuclear-reaktor/Fissile-dan-fertile-materials> Diakses pada 9 Agustus 2021 16.09.

Wiesenack, W. 2012 *Nuclear fuel assembly design and fabrication, Advances in polymer nanocomposites: Types and applications*. Woodhead Publishing Limited.Pp. 203-233

World Nuclear. 2021. *Nuclear Power Reactors*. (Online) Tersedia: <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html> Diakses pada 2 Juli 2021 20.45.

World Nuclear. 2021. *Technology System SCWR*. (Online) Tersedia: <http://www.gen-4.org/Technology/systems/scwr.htm>. Diakses pada 6 Juli 2021 11.00.

Zweifel, P. F. 1973. *Reaktor Physics*. USA. *McGraw-Hill*. Pp. 74.