

**PERHITUNGAN *BURN UP* MODEL *ASSEMBLY* X-Y 2 DIMENSI PADA
SCWR MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR THORIUM**

(Skripsi)

Oleh

Arizka Antartika Putri



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

ABSTRAK

PERHITUNGAN *BURN UP* MODEL *ASSEMBLY X-Y* 2 DIMENSI PADA SCWR MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR THORIUM

Oleh

Arizka Antartika Putri

Penelitian tentang perhitungan *burn up* model *assembly x-y* 2 dimensi pada SCWR menggunakan bahan bakar thorium. Perhitungan dilakukan dengan simulasi komputasi menggunakan kode ASMBURN pada program *System Reactor Atomic Code* (SRAC). Parameter yang dianalisis pada penelitian ini meliputi pengayaan bahan bakar, radius pin bahan bakar, densitas daya, produksi bahan bakar yaitu uranium-233, uranium-235 dan plutonium-239, penambahan *burn up*, dan perubahan daya linear. Hasil perhitungan menunjukkan pengayaan yang kritis terdapat pada pengayaan 3%, radius pin bahan bakar sebesar 0,434 cm, selongsong 0,489 cm, dan moderator 0,640 cm. Nilai densitas daya menurun sebesar 0,00798% seiring pertambahan *burn up*. Nilai densitas atom pada produksi bahan bakar uranium-233 mengalami penurunan sebesar 40,77%, sementara itu densitas atom uranium-235 dan plutonium-239 mengalami kenaikan.

Kata Kunci : *burn up*, SCWR, thorium, uranium, k_{eff} .

ABSTRACT

BURN UP CALCULATION OF X-Y 2 DIMENSIONAL ASSEMBLY MODEL IN SCWR USING THORIUM AS FUEL MATERIALS

By

ARIZKA ANTARTIKA PUTRI

Research about study of burn up calculation of x-y 2 dimensional assembly model in SCWR using thorium as fuel materials has been done. The calculation was performed by using simulation computation ASMBURN code in System Reactor Atomic Code (SRAC) program. The analyzed parameters were fuel enrichment, fuel pin radius, power density, fuel production of uranium-233, uranium-235, and plutonium-239, increasing burn up level, and linear heat changed. The calculation results showed that critical condition of reactor at 3% of enrichment, 0.434 cm of fuel pin radius, 0.489 cm of cladding, and 0,640 cm of moderator. Due to power density decreased about 0.00798% by increasing burn up. Atomic density of uranium-233 decreased about 40.77%, uranium-235 and plutonium-239 were increased.

Keywords: burn up, SCWR, thorium, uranium, k_{eff} .

**PERHITUNGAN *BURN UP* MODEL *ASSEMBLY X-Y* 2 DIMENSI PADA
SCWR MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR THORIUM**

Oleh

ARIZKA ANTARTIKA PUTRI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

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



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

Judul Skripsi

: **PERHITUNGAN *BURN UP* MODEL
ASSEMBLY-X-Y 2 DIMENSI PADA
SCWR MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR
THORIUM**

Nama Mahasiswa

: **Arizka Antartika Putri**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1217041009

Jurusan

: Fisika

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

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

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

2. Ketua Jurusan Fisika

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

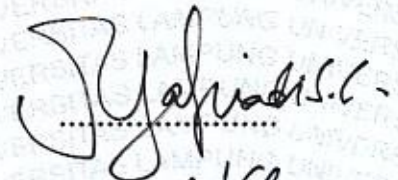
Ketua

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



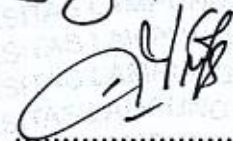
Sekretaris

: Drs. Syafrjadi, M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing : Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Prof. Warsito, S.Si., DEA., Ph.D.

NIP 19710212 199512 1 001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 13 April 2017

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, April 2017



Arizka Antartika Putri
NPM. 1217041009

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Metro pada tanggal 9 Mei 1994, anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak A. Tarmudhi dan Ibu Dra. Raden Suhartanti. Penulis menyelesaikan pendidikan di Tk Taman Indria, Tamansiswa Teluk Betung pada 2000, SD Taman Muda, Tamansiswa Teluk Betung pada 2006, SMP Negeri 3 Bandar Lampung pada 2009 dan SMA YP Unila Bandar Lampung pada 2012.

Selanjutnya, penulis diterima sebagai mahasiswi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN undangan pada tahun 2012. Selama menjadi mahasiswi, penulis aktif di kegiatan kampus antara lain Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) Unila pada 2012-2015. Penulis pernah melakukan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di Balai Besar Karet, Kulit, dan Plastik (BBKKP), Yogyakarta. Penulis melakukan KKN di Desa Sukaraja Tiga, Kecamatan Marga Tiga, Kabupaten Lampung Timur.

Selanjutnya penulis melakukan penelitian dengan judul “*Perhitungan Burn Up Model Assembly X-Y 2 Dimensi pada SCWR Menggunakan Bahan Bakar Thorium*” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

MOTTO

**“UNTUK MENCAPAI SUATU TUJUAN
KAMU BISA BERJALAN PERLAHAN ASAL
JANGAN PERNAH BERHENTI”**

Kuniatkan karya kecilku ini karena

ALLAH SWT

Aku persembahkan karya ini untuk:

Kedua orang tua dan dio yang selalu memberikan do'a,
semangat, kasih sayang dan dukungannya.

Dosenku, yang mengajarkan banyak ilmu serta mendidik
dan membimbingku

Sahabat dan teman-teman seperjuanganku

Almamater Tercinta.

“Universitas Lampung”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Perhitungan *Burn Up* Model *Assembly* X-Y 2 Dimensi pada SCWR Menggunakan Bahan Bakar Thorium”**. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar S1 dan juga melatih mahasiswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa pada khususnya dan masyarakat umum.

Bandar Lampung, April 2017

Penulis,

Arizka Antartika Putri

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena atas kuasa-Nya penulis masih diberikan kesempatan untuk mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian penelitian dan skripsi ini, terutama kepada:

1. Kedua orang tuaku Bapak A. Tarmudhi, S.E. dan Ibu Dra. Raden Suhartanti yang tiada henti memberiku semangat dan doa.
2. Ibu Dr. Yanti Yulianti, M.Si., sebagai pembimbing I yang telah memberikan bimbingan serta nasehat dalam menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si., sebagai pembimbing II yang senantiasa memberikan masukan-masukan serta nasehat dalam menyelesaikan tugas akhir.
4. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si. Ph.D., sebagai penguji yang telah mengoreksi kekurangan, memberi kritik dan saran selama penulisan skripsi.
5. Bapak Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D., sebagai Pembimbing Akademik, yang telah memberikan bimbingan serta nasehat dari awal perkuliahan sampai menyelesaikan tugas akhir.
6. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., selaku ketua jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

7. Bapak Prof. Dr. Warsito, S.Si., DEA selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
8. Para dosen serta karyawan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Sahabatku Anggita Maharani, Annisa Rizka Amalia dan Fransiska Meilyana, terimakasih atas semangat, doa dan semua bantuan yang telah diberikan.
10. Teman-teman satu tim penelitian Sri Aknes Simanjuntak dan Wulan Kartika Wati yang telah membantu dan menjadi teman diskusi yang baik.
11. Teman-teman seperjuangan Fisika FMIPA Unila angkatan 2012 yang selama ini telah memberikan semangat dan bantuan.

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

Bandar Lampung, April 2017

Penulis,

Arizka Antartika Putri

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Batasan Masalah	6
D. Tujuan Penelitian	6
E. Manfaat Penelitian	7

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Reaktor Nuklir	8
1. Batang Bahan Bakar (<i>Fuel Pin</i>)	9
2. Moderator	9
3. Batang Kendali (<i>Control Rod</i>)	10
4. Pendingin (<i>Coolant</i>)	10
5. Perisai (<i>Shielding</i>)	10
B. Jenis – Jenis Reaktor	11
1. <i>Pressurized Water Reactor</i> (PWR)	11
2. <i>Supercritical Cooled Water Reactor</i> (SCWR)	12

C.	Reaktor di Indonesia	13
1.	Reaktor Triga Bandung	13
2.	Reaktor Kartini	13
3.	Reaktor Nuklir Serpong	14
D.	Bahan Bakar Reaktor	14
1.	Uranium.....	14
2.	Thorium.....	15
E.	SRAC	16
F.	<i>Burn Up</i>	19

III. METODOLOGI PENELITIAN

A.	Waktu dan Tempat penelitian	22
B.	Alat dan Bahan Penelitian.....	22
C.	Prosedur Penelitian.....	22
1.	Menentukan Pengayaan (<i>Enrichment</i>)	22
2.	Menentukan Radius Pin	23
3.	Menentukan Periode <i>Burn Up</i>	24
4.	<i>Input Data</i>	24
5.	Perhitungan <i>Burn Up</i>	30
6.	Hasil Perhitungan	30
D.	Diagram Alir Penelitian	31

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A.	Perhitungan Densitas Atom.	34
B.	Menentukan Pengayaan.	34
C.	Menentuka Radius Pin	36
D.	Densitas Daya	38
E.	Uranium 233	41
F.	Uranium 235	44
G.	Plutonium 239.....	46
H.	Penambahan <i>Burn Up</i>	49
I.	Perubahan Daya Linear (<i>Linear Heat</i>).....	50

V. KESIMPULAN

A.	Kesimpulan.....	52
B.	Saran.....	52

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Reaksi fisi.....	8
2. Reaktor jenis PWR.....	11
3. Reaktor jenis SCWR.....	12
4. Siklus reaksi thorium	16
5. Struktur SRAC	18
6. Prinsip keseimbangan nuklida A	20
7. Tampang lintang pin bahan bakar.....	23
8. Diagram alir perhitungan <i>burn up</i> dengan SRAC.....	31
9. Desain elemen bahan bakar SCWR	33
10. Grafik k_{eff} terhadap <i>burn up</i> dengan mengubah pengayaan 1-5%	36
11. Grafik k_{eff} terhadap <i>burn up</i> dengan mengubah radius pin.....	37
12. Grafik densitas daya terhadap nomor pin	40
13. Grafik uranium 233 terhadap nomor pin	43
14. Grafik uranium 235 terhadap nomor pin.....	45
15. Grafik plutonium 239 terhadap nomor pin	48
16. Grafik k_{eff} terhadap <i>burn up</i> pada <i>burn up</i> 70.000 MWD/Ton	49
17. Grafik k_{eff} terhadap <i>burn up</i> pada <i>burn up</i> 110.000 MWD/Ton	50
18. Grafik k_{eff} terhadap <i>burn up</i> dengan perubahan daya linear	51

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Densitas atom bahan bakar, selongsong, dan moderator	34
2. Densitas atom pada pengayaan bahan bakar.....	35
3. Nilai k_{eff} pada pengayaan bahan bakar.....	35
4. Radius pin sebelum diubah	36
5. Radius pin sesudah diubah.....	37
6. Nilai k_{eff} dengan mengubah radius pin.....	38
7. Nilai densitas daya terhadap nomor pin.....	39
8. Nilai densitas atom uranium 233 terhadap nomor pin.....	42
9. Nilai densitas atom uranium 235 terhadap nomor pin.....	44
10. Nilai densitas atom plutonium 239 terhadap nomor pin.....	47
11. Nilai k_{eff} terhadap <i>burn up</i> pada 70.000 dan 110.000 MWD/Ton	49
12. Nilai k_{eff} terhadap sebelum dan sesudah perubahan daya linear.....	51

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi merupakan suatu kebutuhan bagi setiap negara, terutama energi listrik. Kebutuhan energi listrik di Indonesia setiap tahun makin bertambah. Pemakaian tenaga listrik di Indonesia saat ini dipergunakan untuk memenuhi kebutuhan dalam berbagai kebutuhan seperti rumah tangga, bisnis, industri, transportasi, komunikasi, konstruksi, petambangan, pertanian, dan penerangan. Namun sampai tahun ini pemadaman listrik masih saja sering terjadi di Indonesia. Hal ini dikarenakan terbatasnya energi listrik yang dapat disuplai oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN), sehingga PLN tidak mampu memenuhi peningkatan kebutuhan listrik di Indonesia. Untuk mengatasi krisis listrik yang terjadi di Indonesia maka diperlukan sumber energi lain, salah satunya pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) (Rijanti dan Sahala, 2011).

Reaktor nuklir adalah suatu alat untuk mengendalikan reaksi pembelahan (fisi) berantai dan sekaligus menjaga kesinambungan reaksi itu. Reaktor nuklir merupakan suatu alat dimana terjadi reaksi fisi berantai yang terkendali. Teknik pengendalian reaksi pembelahan ini merupakan dasar dari suatu reaktor nuklir. Dalam suatu reaktor nuklir, proses fisi dikendalikan dengan mengusahakan agar

secara rata-rata hanya 1 neutron yang dihasilkan untuk melakukan fisi berikutnya (Tadeus dkk., 2010). Reaktor nuklir pertama kali dibangun pada 2 Desember 1942 oleh Enrico Fermi dan Leo Szilard di Universitas Chicago. Reaktor dibangun dari logam uranium dan blok grafit dalam batang kendali yang dilapisi dengan Cadmium. Fermi dapat membuat reaktor dengan faktor multiplikasi (k_{eff}) lebih dari 1 ($k_{\text{eff}} > 1$) dan dapat membuktikan bahwa reaksi fisi terjadi secara berkelanjutan. Reaksi fisi yang berkelanjutan ditunjukkan dengan jumlah neutron yang tumbuh sehingga menghasilkan $k_{\text{eff}} > 1$ (Anggoro dkk., 2013).

Reaktor Nuklir yang pertama kali membangkitkan listrik adalah stasiun pembangkit percobaan EBR-1 pada 20 Desember 1951 di Arco Idaho, Amerika Serikat. Kemudian pada 27 Juni 1954, PLTN pertama di dunia yang menghasilkan energi listrik mulai beroperasi di Obinsk, Uni Soviet. Sedangkan PLTN skala komersial pertama adalah Calder Hall di Inggris yang dibuka pada 17 Oktober 1956. Di negara-negara lain PLTN sudah banyak dikembangkan contohnya negara dengan jumlah reaktor terbanyak yaitu Amerika Serikat dengan 104 reaktor, kemudian Perancis dengan 59 reaktor, Jepang 53 reaktor dan masih banyak negara yang sudah menggunakan PLTN untuk memenuhi kebutuhan listrik di negaranya (Anwar, 2010). Akan tetapi pemakaian energi nuklir masih dibayangi masalah kesehatan, kebocoran nuklir dan radiasi yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Maka pada desain maupun pengoperasian suatu PLTN, aspek keselamatan merupakan prioritas utama sehingga harus dilakukan evaluasi dan pengembangan secara terus menerus (Suhaimi dan Itje, 2008).

Untuk mengatasi kekurangan energi yang terjadi di negeri ini, banyak penelitian tentang pembangkit energi yang ramah lingkungan dan tidak menggunakan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, gas, dan batu bara. Hal ini dilakukan untuk mengatasi semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil di dunia serta mengurangi polusi akibat bahan bakar fosil. Bahan bakar yang biasa digunakan pada reaktor nuklir ada 2 jenis yaitu bahan bakar fisil dan bahan bakar fertil. Bahan bakar fisil contohnya uranium-233 (U^{233}), uranium-235 (U^{235}) dan plutonium-239 (Pu^{239}), sedangkan bahan bakar fertil contohnya uranium-238 (U^{238}) dan thorium-232 (Th^{232}). Bahan bakar nuklir fisil adalah nuklida yang apabila ditembakkan ke nuklida itu akan terjadi reaksi fisi. Bahan bakar yang dapat diperoleh di alam awalnya mengandung isotop U^{238} sebanyak 99,274%, U^{235} sebanyak 0,72 % dan U^{234} sebanyak 0,0058%. Dalam 1 gr uranium energi yang dihasilkan sebanding dengan 2,5 ton batu bara (Soentono ,1998).

Negara-negara pengguna PLTN saat ini mengembangkan bahan bakar thorium untuk menggantikan bahan bakar uranium yang selama ini telah digunakan. Cadangan thorium belum banyak dieksplorasi dibandingkan dengan uranium sehingga thorium dapat menjadi bahan bakar nuklir pengganti uranium. Umumnya thorium dapat ditemukan dalam mineral monasit, sedangkan monasit dapat ditemukan pada batuan granit. Beberapa tempat di Indonesia terdapat bukit-bukit yang tersusun dari batuan plutonik yang merupakan batuan sisa dari pelapukan dan erosi. Bukit-bukit tersebut antara lain bukit Maras (699 m) terletak antara kota Pangkal Pinang dan Bangka Barat, Bukit Tebas (654 m) di bagian tenggara pulau Bangka, bukit Permis (510 m) di Bangka Selatan, bukit Menumbing (455 m) di Bangka Barat, Gunung Mangol (398 m) di kota Pangkal

Pinang. Bukit-bukit sisa erosi yang tersusun atas batuan beku granit tersebut terdapat di Provinsi Bangka Belitung, sehingga pulau Bangka dapat dijadikan sumber eksplorasi thorium (Ngadenin dkk., 2014).

Bahan bakar thorium apabila digunakan sebagai bahan bakar nuklir akan bereaksi secara keseluruhan berubah menjadi U^{233} dengan adanya neutron di dalam teras reaktor nuklir dan menghasilkan energi yang dapat digunakan sebagai energi listrik (Kasino dkk., 2012).

Supercritical Water Reactor (SCWR) pada prinsipnya adalah *Low Water Reactor (LWR)* yang beroperasi pada tekanan dan temperatur yang lebih tinggi, dengan menggunakan satu siklus langsung (*once-through cycle*). SCWR menggunakan air sebagai moderatornya. Air yang digunakan adalah air yang berada dalam fase superkritis pada tekanan tinggi yaitu sebesar 25 Mpa. Beroperasinya SCWR pada temperatur dan tekanan superkritis menghilangkan adanya proses pendidihan teras (*boiling*), karena pendinginannya menggunakan fase air yang sama (Anggoro dkk., 2013).

Hal yang menjadi acuan dilakukannya penelitian ini adalah penelitian tentang *Thorium as an Alternative Fuel for SCWRs*. Penelitian tersebut menggunakan bahan bakar thorium dan U^{233} . Kemudian dilakukan analisis pengayaan bahan bakar, energi dan daya. Hasilnya menunjukkan temperatur bahan bakar reaktor yang aman berada dibawah suhu 1.900K atau 1626°C (Csom *et al.*, 2012).

Dari penelitian Uji Kritikalitas dan Pengayaan Reaktor Air Superkritis (SCWR) dengan Bahan Bakar Uranium-Thorium dapat disimpulkan bahwa pengayaan yang paling efisien berada pada keadaan kritis 3,6%. Penelitian tersebut bertujuan

untuk mengetahui nilai kritikalitas dengan melakukan pengayaan agar memperoleh nilai $k_{\text{eff}} = 1$, mengetahui radius pin untuk mendapatkan bentuk pembakaran yang efisien dan menganalisis pembiakan (*breeding*) reaktor (Sevtiani, 2013).

Dengan adanya pembangunan PLTN di Indonesia ini maka dilakukan penelitian Perhitungan *Burn Up Model Assembly X-Y 2 Dimensi* pada SCWR Menggunakan Bahan Bakar Thorium. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana persentase pengayaan bahan bakar dan radius pin reaktor yang dapat menghasilkan reaktor yang efisien. Perbedaan dengan penelitian sebelumnya terdapat pada model *assembly* yang digunakan. Perhitungan analisis neutronik reaktor nuklir yang menggunakan persamaan transport atau persamaan difusi multi dimensi sangat sulit untuk dilakukan secara manual. Dalam penelitian ini program yang digunakan untuk mendesain reaktor adalah SRAC (*Standard thermal Reactor Analysis Code*). SRAC adalah sebuah program komputasi yang digunakan menganalisis sistem reaktor berdasarkan *library* data yang sudah ada. SRAC dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) di JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*) Jepang.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Bagaimanakah hasil k_{eff} pada perhitungan *burn up* setiap periode *burn up* pada SCWR dengan menggunakan bahan bakar thorium setelah pengayaan bahan bakar ?

2. Berapakah ukuran pin bahan bakar reaktor SCWR agar menghasilkan energi yang efisien ?
3. Bagaimanakah hasil densitas daya, produksi bahan bakar U^{233} , U^{235} , dan Pu^{239} tiap *burn up* ?
4. Bagaimanakah hasil k_{eff} setelah penambahan periode *burn up* dan perubahan daya linear ?

C. Batasan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal-hal berikut.

1. Jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah SCWR.
2. Perhitungan *burn up* dengan model *assembly* X-Y 2 Dimensi pada $\frac{1}{4}$ bagian teras reaktor.
3. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah Th^{232} dan U^{233} .
4. Pengayaan yang dilakukan pada penelitian ini 1-5%.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menentukan persentase pengayaan bahan bakar U^{233} dan Th^{232} .
2. Menentukan radius pin pada reaktor SCWR.
3. Menganalisis densitas daya, produksi bahan bakar U^{233} , U^{235} dan Pu^{239} pada reaktor SCWR.
4. Menambahkan periode *burn up* dan mengubah daya linear agar menghasilkan energi yang efisien.

E. Manfaat Penelitian

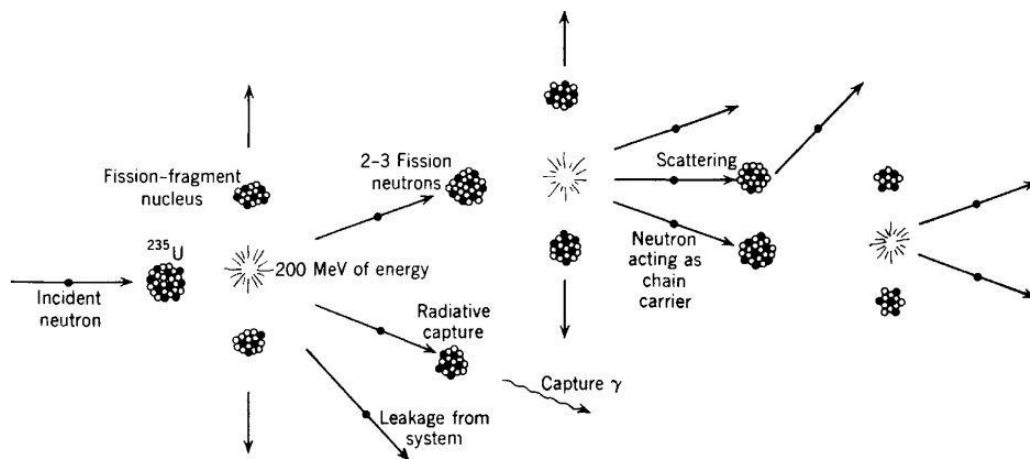
Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan sumbang saran penelitian reaktor nuklir berbahan bakar thorium.
2. Memberikan informasi ilmiah mengenai *burn up* SCWR.
3. Memberikan solusi masalah energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi dunia khususnya Indonesia.

II. TINJAUAN PUSTAKA

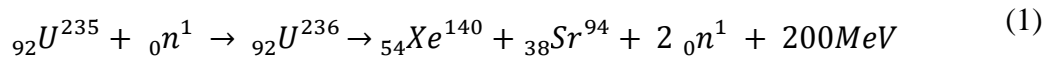
A. Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi nuklir berantai yang terkendali, baik itu reaksi fisi atau reaksi penggabungan inti (fusi). Reaksi fisi terjadi jika sebuah inti berat membelah menjadi dua atau lebih inti atom yang lebih ringan seperti pada Gambar 1. Reaksi fisi disertai pemancaran energi dan partikel, misalnya neutron. Reaktor nuklir digunakan untuk pembangkit daya, penelitian, atau produksi radioisotop (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).



Gambar 1. Reaksi fisi (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).

Jenis bahan bakar reaktor nuklir yang paling umum adalah U^{235} dan Pu^{239} . Bahan bakar nuklir ini akan terpecah menjadi 2 bagian membentuk elemen kimia, berikut ini adalah salah satu contoh reaksi fisi (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).



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

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

1. Batang Bahan Bakar (*Fuel Pin*)

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

2. Moderator

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

titik didih 100°C . Sedangkan air berat memiliki kepadatan $1,11 \text{ gr/cm}^3$, titik lebur $3,8^{\circ}\text{C}$, dan titik didih 101°C (Price *et al.*, 2013). Ketika neutron berenergi tinggi keluar dari sebuah elemen bahan bakar, neutron tersebut memasuki air di sekitarnya dan bertumbukan dengan molekul-molekul air. Sebagai hasilnya neutron tersebut diperlambat (Cao *et al.*, 2008).

3. Batang Kendali (*Control Rod*)

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

4. Pendingin (*Coolant*)

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

5. Perisai (*Shielding*)

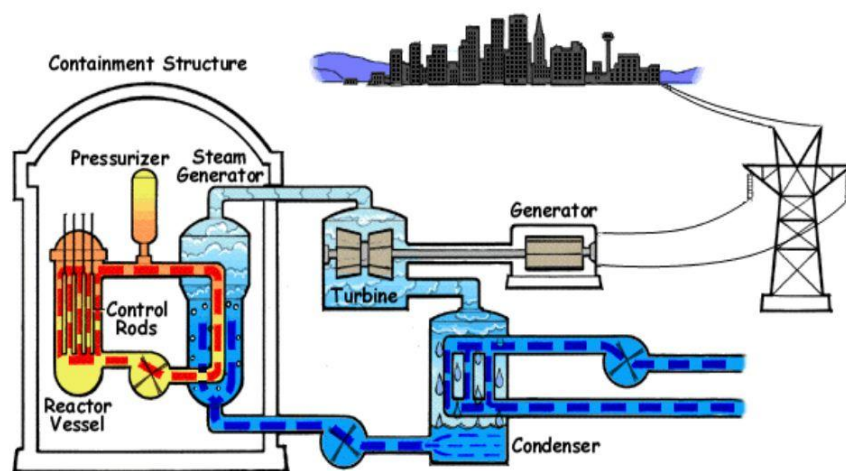
Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Radiasi yang dihasilkan oleh reaktor antara lain radiasi partikel alfa, beta, produk fisi, sinar gamma, dan neutron. Untuk menahan radiasi ini, maka umumnya reaktor dikelilingi oleh perisai beton. Bahan perisai yang umumnya digunakan adalah timbal (Pb^{82}), bismuth (Bi^{83}), tungsten (W^{74}) sebagai pelindung radiasi sinar X,

besi (Fe^{26}) sebagai pelindung radiasi gamma, Kadmium (Cd^{48}) dan Boron (B^5) sebagai pelindung radiasi neutron (Soentono, 1998).

B. Jenis – Jenis Reaktor

1. *Pressurized Water Reactor (PWR)*

Jenis reaktor ini paling banyak dipakai di beberapa negara di seluruh dunia. Reaktor ini memiliki 193 perangkat bahan bakar yang masing-masing terdiri dari susunan 17x17 posisi batang (*pin*). Dari ke-289 batang tersebut, 264 batang merupakan batang bahan bakar (*fuel pin*), 1 batang berada di tengah adalah tabung instrumen dan 24 batang yang lain adalah posisi pengatur, biasanya diisi dengan moderator (Lindley *et al.*, 2014).



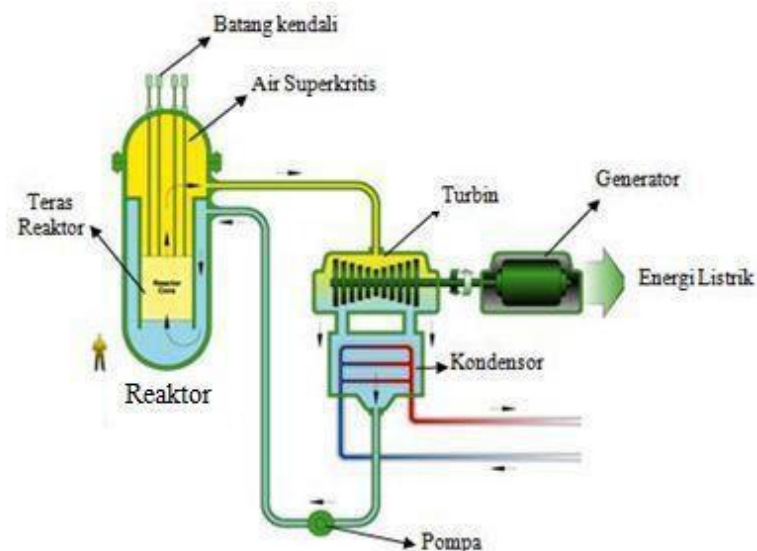
Gambar 2. Reaktor jenis PWR (Diby, 2007).

Gambar 2 memperlihatkan alur reaktor PWR menghasilkan energi listrik, air ringan digunakan sebagai pendingin dan medium pelambat neutron (moderator neutron). Teras reaktor diletakkan dalam satu bejana. Sistem air pendingin yang melalui teras reaktor disebut sistem pendingin primer. Di dalam sistem primer

tidak diperbolehkan terjadi pendidihan, karena itu sistem dibuat bertekanan tinggi. Dari sistem pendingin primer bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi, air pendingin dialirkan ke pipa-pipa pada alat pembangkit uap. Di luar pipa ini air dalam sistem pendingin sekunder menerima panas dari air pendingin primer dan mengalami penguapan. Uap yang terjadi dari air pendingin sekunder ini kemudian dialirkan ke turbin untuk menggerakkan generator listrik (Diby, 2007).

2. *Supercritical Cooled Water Reactor (SCWR)*

Reaktor SCWR merupakan reaktor air yang bekerja di atas titik kritis air, dimana SCWR beroperasi pada tekanan 25 MPa dengan menggunakan air sebagai pendingin dan moderator (Baindur, 2008). Pada tekanan tersebut jika temperatur air terus dinaikkan tidak akan terjadi perubahan fasa sehingga perubahan entropi reaktor lebih besar dan efisiensi panas yang ditransfer oleh reaktor menjadi lebih besar seperti Gambar 3.



Gambar 3. Reaktor jenis SCWR (Shang, 2009).

Pada reaktor berpendingin air superkritis karakteristik dari air akan berubah di sekitar titik kritisnya. Untuk meningkatkan efisiensi dari SCWR dibutuhkan

selongsong (*cladding*) bahan bakar yang mampu menahan suhu yang tinggi (Liu and Cheng, 2009). Tujuan utama dari desain SCWR adalah untuk mendapatkan energi listrik dengan harga per kwh yang lebih murah, selain itu SCWR diharapkan digunakan untuk memproduksi hidrogen yang memanfaatkan temperatur tinggi (Suwoto dan Zuhair, 2012).

C. 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 Indonesia adalah reaktor triga, nama triga sendiri merupakan singkatan dari "*Training, Research, Isotopes, General Atomic*". Reaktor ini mulai beroperasi tahun 1964. Waktu itu kapasitasnya masih 250 kW, kemudian mengalami beberapa kali peningkatan. Tahun 1971, Reaktor Triga ditingkatkan kapasitasnya jadi 1000 kW, dan tahun 1996 jadi 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).

D. Bahan Bakar Reaktor

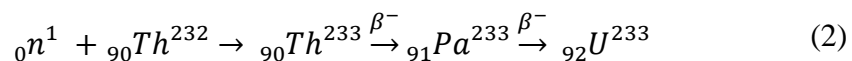
1. Uranium

Bahan radioaktif alam yang cukup lama dikenal dan hingga saat ini masih digunakan secara luas sebagai bahan bakar nuklir jenis fisi adalah uranium. Uranium memiliki lambang U dan mempunyai nomor atom 92, proton 92, elektron 92 dan elektron valensi 6. Inti uranium bervariasi antara 141 sampai 146 neutron, sehingga terdapat 6 isotop uranium. Ketika uranium ditambang dari bumi awalnya mengandung isotop U^{235} , U^{238} , dan U^{234} . Uranium memiliki titik leleh yaitu $1.132\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan titik didih $4.131\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uranium terdapat pada batuan granit atau

batuan sedimen di kerak bumi. Cadangan uranium yang paling banyak ditemukan di Amerika Serikat, Kanada, Rusia dan beberapa Negara di Afrika. (IAEA, 2005). Seperti diketahui material yang diinginkan dalam pemakaian bahan bakar reaktor adalah U^{235} . Uranium alam terdiri dari U^{238} sebanyak 99,274%, U^{235} sebanyak 0,72 % dan U^{234} sebanyak 0,0058%. Karena konsentrasi U^{235} hanya 0,72% maka dilakukan peningkatan konsentrasinya sekitar 2-5% agar efektif dipakai dalam reaktor daya nuklir. U^{238} memiliki waktu paruh $4,468 \times 10^9$ tahun, sedangkan U^{235} mempunyai waktu paruh $7,038 \times 10^8$ tahun, dan U^{234} mempunyai waktu paruh 245.500 tahun (Takaki *and* Deby, 2012).

2. Thorium

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



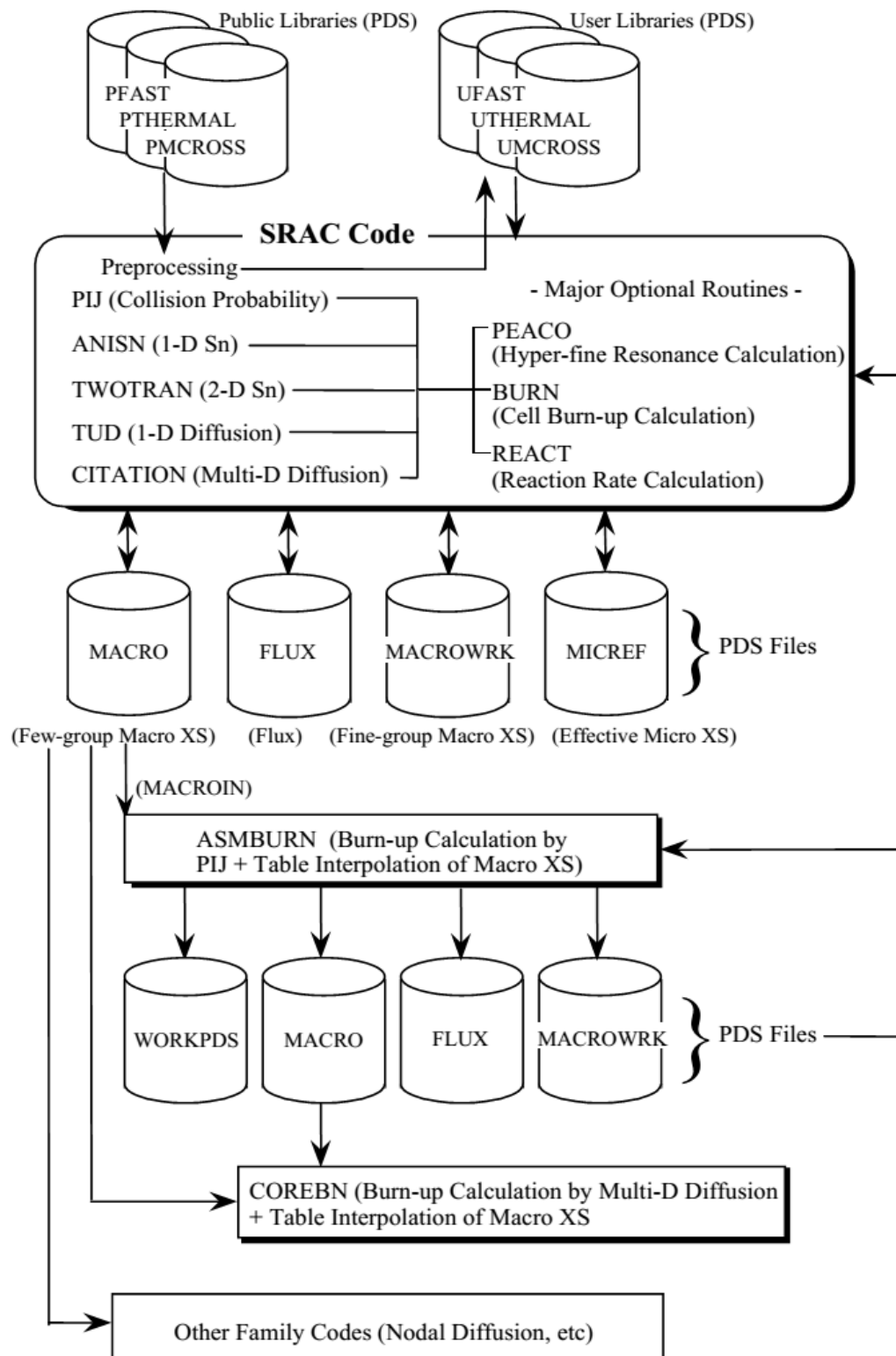
Dengan demikian, awalnya Th^{232} sekarang 99,9 % U^{233} . Siklus thorium menghasilkan limbah radioaktif yang terdiri dari aktinida dan elemen berat atom lebih rendah yang dapat didaur ulang sepenuhnya (Schaffer, 2013).

keras para ilmuwan *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) mulai berkembang pada tahun 1978 sebagai standar kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang (*Japan Atomic Energy Agency/JAEA*). Dikembangkan 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, mulai dari akademisi universitas, departemen penelitian, sampai 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), lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi. Lima kode dasar SRAC meliputi :

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

Gambar struktur SRAC ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur SRAC (Okumura *et al.*, 2002).

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=====

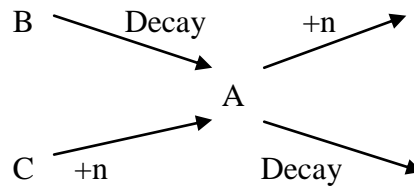
maka harus dilakukan pengecekan pada *input* dan melakukan perhitungan kembali. Setelah perhitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan standar kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2002).

F. Burn Up

Bahan bakar nuklir melakukan reaksi fisi di dalam teras reaktor untuk mendapatkan panas yang dapat dimanfaatkan. Pembakaran merupakan satu-satunya proses produktif dalam daur bahan bakar nuklir. 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). Makin tinggi derajat bakar, makin murah biaya pembangkitan energi

nuklir, dan lebih sedikit bahan bakar bekas sehingga menghemat biaya penyimpanan bahan bakar bekas (Ariani dkk., 2013).

Persamaan laju reaksi yang menggambarkan densitas jumlah inti dalam teras dapat digambarkan pada skema prinsip keseimbangan berikut.



Gambar 6. Prinsip keseimbangan nuklida A (Irka, 2015).

Persamaan *burn up* merupakan persamaan diferensial orde 1

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \left[\sum_g \sigma_{ag}^A \phi_g \right] N_A + \lambda_B N_B + \left[\sum_g \sigma_{cg}^C \phi_g \right] N_C \quad (3)$$

Dimana

A, B, C = 1, 2, 3

N = nomor densitas atom

ϕ = fluks absolut

λ = konstanta peluruhan

σ = penampang lintang mikroskopik

$\lambda_A N_A$ = hilang karena peluruhan radioaktif dari A

$[\sum_g \sigma_{ag}^A \phi_g] N_A$ = hilang karena tangkapan neutron oleh A

$\lambda_B N_B$ = nuklida tambahan akibat peluruhan dari B ke A

$[\sum_g \sigma_{cg}^C \phi_g] N_C$ = perpindahan dari C ke A melalui tangkapan neutron

Parameter *burn up* menjelaskan perbandingan jumlah isotop fisil yang telah berfisi dengan jumlah isotop fisil sebelum berfisi, sehingga dapat dianalisis jumlah bahan bakar yang terdapat pada teras dan efisiensi penggunaan isotop fisil pada satu siklus reaksi fisi berantai (Aida, 2015). Dalam proses *burn up* terjadi reaksi fisi berantai pada atom-atom bahan bakar bermassa besar menjadi isotop fisil. Nuklida yang terpenting setiap waktu *burn up* adalah U^{235} , U^{238} , Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , dan Pu^{242} (Omar and Ghazi, 2011).

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilaksanakan selama lima bulan yaitu pada bulan Agustus sampai Desember 2016 bertempat di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

B. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Ubuntu 15.04 dan program SRAC.

C. Prosedur Penelitian

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

1. Menentukan Pengayaan (*Enrichment*)

Pengayaan yang dilakukan pada reaktor SCWR dimulai dari 1 - 5%. Persentase pengayaan ditunjukkan dengan nilai *atomic density* (densitas atom) yang terus naik setelah dilakukan pembakaran. Dengan demikian dilakukanlah perhitungan densitas atom sebagai berikut.

Atomic Density (Densitas Atom)

Perhitungan densitas atom Th^{232} dan U^{233} sebagai fungsi pengayaan (*enrichment*) digunakan rumus berikut:

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad (4)$$

Dimana

N = densitas atom (atom/cm³)

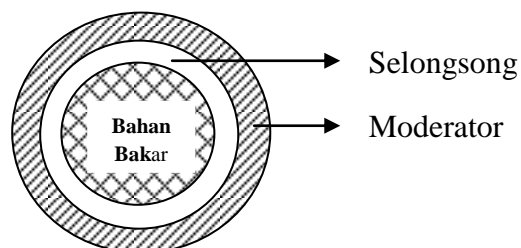
ρ = massa jenis (gr/cm³)

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

M = massa molekul (gr/mol)

2. Menentukan Radius Pin

Ukuran pin bahan bakar, selongsong, dan moderator pada reaktor SCWR diubah dari skala kecil ke besar (misalnya 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 dst) untuk mengetahui ukuran yang paling efektif. Bagian pin bahan bakar, selongsong, dan moderator dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Tampang lintang pin bahan bakar (Dobuchi *et al.*, 2016).

3. Menentukan Periode *Burn Up*

Periode waktu pembakaran pada komposisi pengayaan ditentukan untuk mendapatkan efisiensi yang paling tinggi. Periode *burn up* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 70.000 MWD/Ton. Kemudian periode *burn up* akan ditambah menjadi 110.000 MWD/Ton untuk mengetahui efisiensi energi.

4. *Input Data*

Data yang diperoleh dihitung menggunakan kode ASMBURN pada SRAC berupa *input*. Setelah itu dilakukan perhitungan *burn up*. Terdapat dua buah *input* yang terdiri dari *input* tiap sel bahan bakar dan *input* secara keseluruhan pin bahan bakar (*assembly*). Di bawah ini contoh *input* tiap sel perhitungan *burn up* pada program SRAC.

```
#===== Exec SRAC code with the following input data =====#
cd $WKDR
cat - << END_DATA | $LM >& $OUTLST
CELL
SQUARE UNIT PIN CELL CALCULATION (for Material-wise XS)
1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 0 0 0 2 0 -1 0 0 1 / SRAC CONTROL
1.000E-15 / BUCKLING
$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pfast      Old      File
$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pthml     O        F
$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pmcrs     O        F
$PDS_DIR/UFAST                    Scratch  Core
$PDS_DIR/UTHERMAL                  S        C
$PDS_DIR/UMCROSS                   S        C
$PDS_DIR/MACROWRK                  S        C
$MACRO                             New      C
$PDS_DIR/FLUX                      S        C
$PDS_DIR/MICREF                    S        C
61 46 5 5 /
61(1) /
46(1) /
10 10 8 17 16 / CONDENSED FAST  GROUP STRUCTURE
3 8 8 10 17 / CONDENSED THERMAL GROUP STRUCTURE

4 7 7 7 3 1 7 0 0 0 5 0 6 4 5 0 0 9 0 0
```

```

0 100 50 5 5 5 -1 0.0001 0.00001 0.001 1.0 10. 0.5
1 1 1 2 3 3 3 /R-X
1 1 1 2 3 3 3 /R-M
0.0 0.2413 0.3413 0.418 0.475 0.5267 0.5783 0.630 /RX
3 /NMAT
FUE1X0XX 0 3 900.0 0.836 0.0 /MAT 1 FUEL(3.2W/O UO2)
XU030009 2 1 4.772187E-04 /1
XTH20009 2 1 2.338371E-02 /2
XO060009 0 1 4.772187E-02 /3
CLD1X0XX 0 3 600.0 0.114 0.0 /MAT 2 CLADDING
XZRN0008 2 1 4.2672E-2 /1
XFEN0008 2 1 1.5450E-4 /2
XCRN0008 2 1 9.0126E-5 /3
MOD1X0XX 0 2 600.0 1.0 1.0 /MAT 3 LIGHT WATER
XH01H008 0 1 4.7508E-02 /1
XO060008 0 1 2.3754E-02 /2
9 1 1 1 0 0 0 0 0 10(0) / Burnup Control
9(1.830E-04) / POWER LEVEL MW/CM
2.0000E+2 5.000E+3 1.000E+4 6*1.000E+4 / EXPOSURE (MWd/t)
0 / PEACO PLOT
HOMO
SQUARE UNIT PIN CELL CALCULATION (for Homogenized Fuel XS)
1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 0 0 0 2 0 -1 0 0 1 /SRAC CONTROL
1.000E-15 /BUCKLING
4 7 7 7 1 1 7 0 0 0 5 0 6 4 5 0 0 9 0 0
0 100 50 5 5 5 -1 0.0001 0.00001 0.001 1.0 10. 0.5
7(1) /X-R
1 1 1 2 3 3 3 /M-R
0.0 0.2413 0.3413 0.418 0.475 0.5267 0.5783 0.630 /RX
3 /NMAT
FUE2Y0YY 0 3 900.0 0.836 0.0 /MAT 1 FUEL(3.2W/O UO2)
XU050009 2 1 7.1414E-4 /1
XU080009 2 1 2.1331E-2 /2
XO060009 0 1 4.4089E-2 /3
CLD2Y0YY 0 3 600.0 0.114 0.0 /MAT 2 CLADDING
XZRN0008 2 1 4.2672E-2 /1
XFEN0008 2 1 1.5450E-4 /2
XCRN0008 2 1 9.0126E-5 /3
MOD2Y0YY 0 2 600.0 1.0 1.0 /MAT 3 LIGHT WATER
XH01H008 0 1 4.7508E-02 /1
XO060008 0 1 2.3754E-02 /2
9 1 1 1 0 0 0 0 0 10(0) / Burnup Control
9(1.830E-04) / POWER LEVEL MW/CM
2.0000E+2 5.000E+3 1.000E+4 6*1.000E+4 / EXPOSURE (MWd/t)
0 / PEACO PLOT

END_DATA

```

```

#
#===== Remove scratch PS files =====#
cd $HOME
rm -r $WKDR
#
#===== 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

```

Berikut ini *input data assembly* program SRAC yang digunakan pada penelitian ini.

```

#===== Exec ASMBURN code with the following input data =====#

cd $WKDR
cat - << END_DATA | $LM >& $OUTLST
PWRA
17*17 SCWR TYPE FUEL ASSEMBLY (HETEROGENEOUS MODEL)
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1.00E-20 19.0 / Buckling & CPU Limit(min.)
$MACROIN Old Core
$PDS_DIR/MACROWRK Scratch C
$PDS_DIR/MACRO New C
$PDS_DIR/FLUX S C
$PDS_DIR/WORKPDS S C
5 5 1 1 / 10-Group Calculation => 2-Group Condensed Macro XS
5 /
5 /
16 486 196 196 1 0 18 18 81 0 1 0 6 21 2 1 45 0 / Pij Control
0 100 50 5 5 5 -1 0.0001 0.00001 0.001 1.0 10. 0.5 /
1 2 3 3 4 5 6 7 8 8 9 10 11 12 13 13 14 15
2 16 3 3 17 18 19 20 8 8 21 22 23 24 13 13 25 26
3 3 27 27 28 28 29 29 30 30 31 31 32 32 33 33 34 26
3 3 27 27 28 28 29 29 30 30 31 31 32 32 33 33 35 36
4 17 28 28 37 38 39 40 41 41 42 43 44 45 46 46 47 36
5 18 28 28 38 48 49 50 41 41 51 52 53 54 46 46 55 56
6 19 29 29 39 49 57 58 59 59 60 61 62 63 64 64 65 56
7 20 29 29 40 50 58 66 59 59 67 68 69 70 64 64 71 72

```

8 8 30 30 41 41 59 59 73 74 75 76 77 77 78 78 79 72
 8 8 30 30 41 41 59 59 74 80 81 82 77 77 78 78 83 84
 9 21 31 31 42 51 60 67 75 81 85 86 87 87 88 88 89 84
 10 22 31 31 43 52 61 68 76 82 86 90 87 87 88 88 91 92
 11 23 32 32 44 53 62 69 77 77 87 87 93 93 94 94 95 92
 12 24 32 32 45 54 63 70 77 77 87 87 93 93 94 94 96 97
 13 13 33 33 46 46 64 64 78 78 88 88 94 94 98 99 100 97
 13 13 33 33 46 46 64 64 78 78 88 88 94 94 99 101 102 103
 14 25 34 35 47 55 65 71 79 83 89 91 95 96 100 102 104 105
 15 26 26 36 36 56 56 72 72 84 84 92 92 97 97 103 105 106
 & T-S(MODERATOR)
 107 113 158 119 159 120 108 114 160 121 161 122 109 115 162 123 163 124
 158 119 164 125 165 126 166 127 167 128 168 129 169 130 170 131 171 132
 159 120 165 126 172 133 173 134 174 135 175 136 176 137 177 138 178 139
 108 114 166 127 173 134 110 116 179 140 180 141 111 117 181 142 182 143
 160 121 167 128 174 135 179 140 183 144 184 145 185 146 186 147 187 148
 161 122 168 129 175 136 180 141 184 145 112 118 188 149 189 150 190 151
 109 115 169 130 176 137 111 117 185 146 188 149 191 152 192 153 193 154
 162 123 170 131 177 138 181 142 186 147 189 150 192 153 194 155 195 156
 163 124 171 132 178 139 182 143 187 148 190 151 193 154 195 156 196 157
 & T-S(PIN ROD) 1-106:MODERATOR,107-112:INSIDE OF TUBE
 & 113-118:GUIDE TUBE,119-157:CLADDING,158-196:FUEL
 196(1) / X-R(=T)
 112(41) 45(40)
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26
 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 / M-R 1-39:FUEL
 0.0 17*0.63 10.75 / RX
 0.0 17*0.63 10.75 / TY
 9(1 3 5 7 9 11 13 15 17) / IXP
 9(1) 9(3) 9(5) 9(7) 9(9) 9(11) 9(13) 9(15) 9(17) / IYP
 0.0 0.569 0.610 & RDP FOR GUIDE TUBE
 2(0.0 0.418 0.475) & RDP FOR FUEL ROD
 0.0 0.569 0.610 2(0.0 0.418 0.475) 0.0 0.569 0.610 2(0.0 0.418 0.475)
 9(0.0 0.418 0.475)
 9(0.0 0.418 0.475)
 0.0 0.569 0.610
 2(0.0 0.418 0.475)
 0.0 0.569 0.610 2(0.0 0.418 0.475) 0.0 0.569 0.610 2(0.0 0.418 0.475)
 9(0.0 0.418 0.475)
 5(0.0 0.418 0.475) 0.0 0.569 0.610 3(0.0 0.418 0.475)
 0.0 0.569 0.610 2(0.0 0.418 0.475) 0.0 0.569 0.610 5(0.0 0.418 0.475)
 9(0.0 0.418 0.475)
 9(0.0 0.418 0.475)
 41 / NMAT
 PN01X01X CELLA010 / 3.2W/O UO2 FUEL
 1 0.0 0.0 / IMFLAG BPINIT GAMMAT
 PN02X01X CELLA010
 1 0.0 0.0

PN03X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN04X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN05X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN06X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN07X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN08X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN09X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN10X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN11X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN12X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN13X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN14X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN15X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN16X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN17X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN18X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN19X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN20X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN21X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN22X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN23X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN24X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN25X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN26X01X CELLA010
1 0.0 0.0

```

PN27X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN28X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN29X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN30X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN31X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN32X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN33X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN34X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN35X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN36X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN37X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN38X01X CELLA010
1 0.0 0.0
PN39X01X CELLA010
1 0.0 0.0
CLADXCLX CELLA020 / 40 : Cladding
0 0.0 0.0
H2OWXWAX CELLA030 / 41 : Moderator
0 0.0 0.0
10 1 / NEP IBUNIT(MWd/t)
10(1.2078E-2) / POWER FOR 1/4 ASSEMBLY (LINEAR HEATING
RATE=183W/CM)
200.0 5000.0 1.0E4 1.5E4 2.0E4 2.5E4 3.0E4 3.5E4 4.0E4 5.0E4
1 1 0 0 0 0 0 0 0 / EDIT OPTION

END_DATA
#
#===== Remove scratch PS files =====#
cd $HOME
rm -r $WKDR
#
#===== Remove PDS files if you don't keep them =====#
rm -r $PDS_DIR
#
# rm -r $PDS_DIR/MACROWRK
# rm -r $PDS_DIR/MACRO
# rm -r $PDS_DIR/FLUX

```

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

5. Perhitungan *Burn Up*

Perhitungan *burn up* secara manual dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 3 yang telah dijelaskan pada bab 2. Akan tetapi perhitungan secara manual membutuhkan perhitungan yang panjang serta waktu yang lama. Sehingga diperlukan program SRAC untuk memecahkan persamaan matematis.

6. Hasil perhitungan

Perhitungan *burn up* yang telah selesai akan ditunjukkan dengan *output file* data SFT99 dan SFT98. Apabila *input data* benar, maka pada *output* akan terdapat pesan seperti berikut.

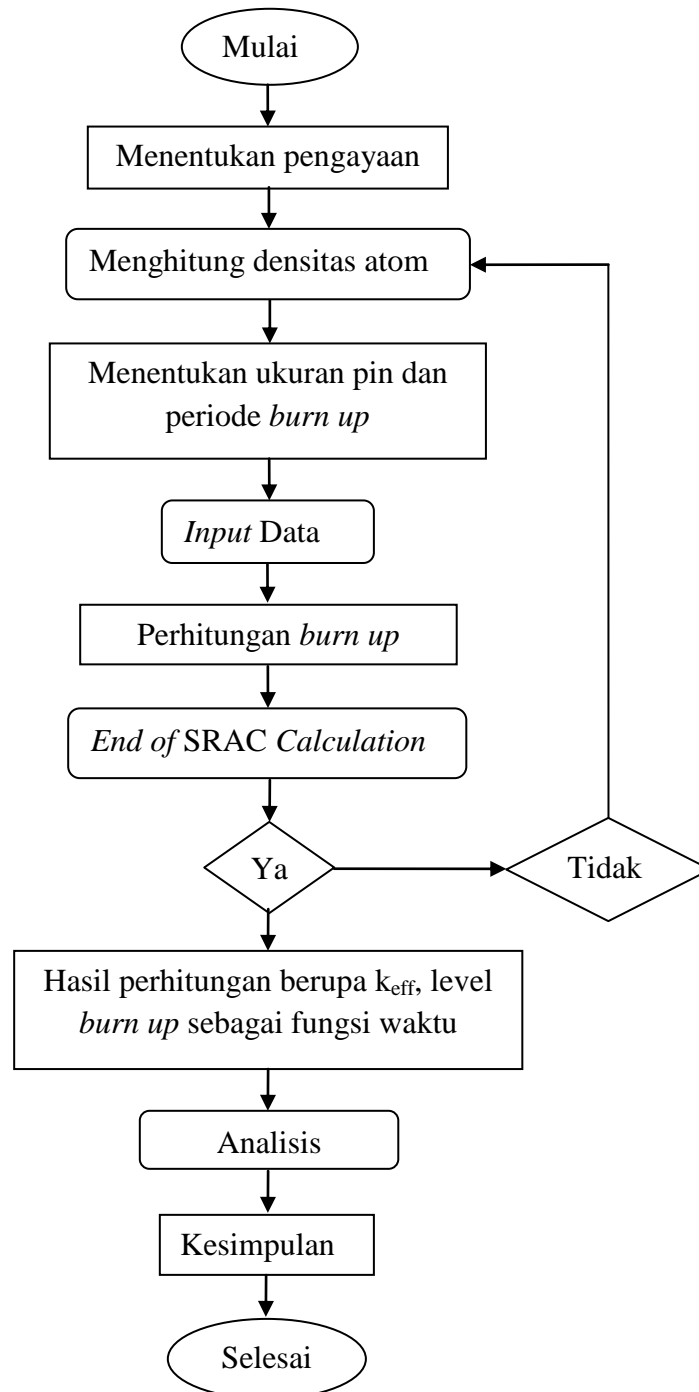
```
===== END OF SRAC CALCULATION=====
```

Hasil keluaran yang belum sampai pada pesan tersebut maka harus dilakukan pengecekan pada *input* dan melakukan perhitungan *burn up* kembali. Setelah perhitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan yang diinginkan kemudian melakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura *et al.*, 2002).

Hasil perhitungan *burn up* yang ditampilkan berupa nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Nilai k_{eff} ini menunjukkan kekritisitas suatu reaktor, apabila nilai k_{eff} besarnya sama dengan 1 ($k_{\text{eff}} = 1$) maka reaktor kritis. Apabila nilai k_{eff} besarnya lebih dari 1 ($k_{\text{eff}} > 1$) maka reaktor superkritis, hal ini karena jumlah neutron meningkat seiring pertambahan waktu. Apabila nilai k_{eff} kurang dari 1 ($k_{\text{eff}} < 1$) maka reaktor dikatakan subkritis karena jumlah neutron menurun seiring pertambahan waktu (Björk *et al.*, 2011).

D. Diagram Alir Penelitian

Gambar 8 merupakan diagram alir yang dilakukan pada penelitian.



Gambar 8. Diagram alir perhitungan *burn up* dengan SRAC.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Persentase pengayaan hasil perhitungan *burn up* yang paling efisien pada pengayaan 3%.
2. Radius pin yang efektif berada pada ukuran sel bahan bakar 0,434 cm, selongsong 0,489 cm, dan moderator 0,640 cm.
3. Nilai densitas daya mengalami penurunan sebesar 0,00798% dan nilai densitas atom pada produksi bahan bakar U^{235} dan Pu^{239} mengalami kenaikan seiring dengan penambahan *burn up*, sedangkan densitas atom U^{233} mengalami penurunan sebesar 40.77%.
4. Penambahan *burn up* pada reaktor menyebabkan k_{eff} yang dihasilkan semakin kecil karena laju reaksi fisi dalam reaktor menurun dan perubahan daya linear yang lebih besar pada reaktor menghasilkan nilai k_{eff} semakin kecil karena berkurangnya nuklida fisi seiring bertambahnya *burn up*.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan membuat analisis ulang pengayaan bahan bakar U^{233} dengan persentase kenaikan 0,1% dan radius pin dengan faktor multiplikasi infinit sebagai variabelnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aida, N. 2015. Perhitungan *Burn Up* pada Reaktor Sub Kritis Berdaya Sedang Berpendingin Pb – Bi. *Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN Barat 2015*. Hlm. 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*. Hlm. 69-79.
- Anwar, C. 2010. Energi Nuklir Indonesia dalam Konteks Energi Nuklir Dunia : Antara Harapan dan Kenyataan. *Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir*. Hlm. 19–32.
- Ariani, M., Zaki, S., 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*. Hlm. 11-15.
- Baindur, S. 2008. Materials Challenges for The Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR). *Bulletin of the Canadian Nuclear Society Vol. 29 No. 1*. Page 32-38.
- Björk, K. I., Valentin, F., Christophe, D. 2011. Comparison of Thorium-Based Fuels with Different Fissile Components in Existing Boiling Water Reactor. *Progress in Nuclear Energy 53*. Page 618-625.
- Cao, L., Yoshiaki, O., Yuki, I., Zhi, S. 2008. Fuel, Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 No. 2*. Page 138-148.

- Chaudri, K. S., Wenxi, T., Guanghui, S., Shuizheng, Q. 2013. Coupled Neutronics/Thermal Hydraulic Evaluation for Thorium Based Fuel in Thermal Spectrum SCWR. *Progress in Nuclear Energy* 68. Page 55-64.
- Csom, G., Reiss, T., Fehér, S., Czifrus, S. 2012. Thorium as an Alternative Fuel for SCWRs. *Annals of Nuclear Energy* 41. Page 67-78.
- Dewita, E. 2012. Analisis Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Vol. 14 No. 1*. Hlm. 45-56.
- Dibyoy, S. 2007. Studi Karakteristik Pressurizer pada PWR. *Prosiding PPI PDIPTN 2007*. Hlm. 179–185.
- Duderstadt, J. J., Louis, J. H. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley and Sons, Inc. United States of America. Page 66–68.
- Dobuchi, N., Satoshi, T., Takanori, K. 2016. Study on the Relation between Doppler Reactivity Coefficient and Resonance Integrals of Thorium and Uranium in PWR Fuels. *Annals of Nuclear Energy* 90. Page 191-194.
- Fegghi, S. A. H., Gholamzadeh, Z., Soltani, L., 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*. Page 30-33.
- IAEA (International Atomic Nuclear Energy). 2005. *Thorium Fuel Cycle – Potential Benefits and Challenges*. International Atomic Energy Agency. Austria. Page 6-10.
- Irka, F. H., Zaki, S. 2015. Analisis *Burn Up* pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika Vol. 7 No.2*. Hlm. 78-86.
- Kasino, P., Tri, Y., Meniek, R., Ety, M. 2012. Teknologi Pembuatan Bahan Bakar Pelet Reaktor Daya Berbasis Thorium Oksida. <http://pkpp.ristek.go.id/index.php/penelitian/detail/74>. Diakses pada tanggal 25 Mei 2016 pukul 18.56 WIB.

- Lindley, B. A., Fausto, F., Geoffrey, T. P. 2014. The Closed Thorium-Transuranic Fuel Cycle in Reduced-Moderation PWRs and BWRs. *Annals of Nuclear Energy* 63. Page 241-254.
- Liu, X. J., Cheng, X. 2009. Core and Sub-Channel Evaluation of a Thermal SCWR. *Nuclear Engineering and Technology Vol. 41 No.5*. Page 677-640.
- Mandala, G. A. 2010. Simulasi Modifikasi Reaktor TRIGA 2000 Bandung dengan Bahan Bakar Jenis Pelat. *Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir*. Hlm. 769-775.
- Ngadenin., Heri, S., Kurnia, S. W., I Gde, S., Fd. Dian, I. 2014. Studi Potensi Thorium pada Batuan Granit di Pulau Bangka. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Vol. 16 No. 2*. Hlm. 143-155.
- Okumura, K., Teruhiko, K., Kunio, K., Keichiro, T. 2002. *General Description and Input Instruction*. JAERI. Japan. Page 1-188.
- Okumura, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analyses*. JAERI. Japan. Page 10-15.
- Omar, H., Ghazi, N. 2011. Time Dependent Burn-up and Fission Products Inventory Calculations in the Discharged Fuel of the Syrian MSR. *Annals of Nuclear Energy* 38. Page 1698-1704.
- Price, D. L., Ling, F., Bermejo, F. J., Felix, F. A., Marie, L. S. 2013. Hydrogen/Deuterium Isotope Effects in Water and Aqueous Solutions of Organic Molecules and Proteins. *Chemical Physics* 424. Page 62-69.
- Rijanti, R. A. P., Sahala L. M. 2011. Dampak Kecelakaan Reaktor Fukushima terhadap Rencana Pembangunan PLTN di Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV*. Hlm. 290-300.
- Rohman, B. Daddy, S. 2011. Kajian Pengaruh Penempatan *Instrumented Fuel Element* pada Pengukuran Suhu Elemen Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*. Hlm. 39-49.

- Schaffer, M. B. 2013. Abundant Thorium as an Alternative Nuclear Fuel Important Waste Disposal and Weapon Proliferation Advantages. *Energy Policy* 60. Page 4-12.
- Sevtiani, M. 2013. Uji Kritikalitas dan Pengayaan Reaktor Air Superkritis (SCWR) dengan Bahan Bakar Uranium – Thorium (Skripsi). Universitas Lampung, Bandar Lampung. Hlm. 31-34.
- Shang, Z. 2009. CFD in Supercritical Water-cooled Nuclear Reactor (SCWR) with Horizontal Tube Bundles. *The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*. Page 1-14.
- Soentono, S. 1998. Bahan-Bahan untuk Industri Reaktor Nuklir. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III*. Hlm. 22-31.
- Suhaemi, T., dan Itjeu, K. 2008. Kajian Keselamatan Nuklir dalam Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. *Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir*. Hlm. 409-420.
- Susilo, J. 2002. Transmutasi Aktinida Minor dalam Teras BWR Berbahan Bakar Thorium. *Prosiding Seminar Ke-7 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*. Hlm. 245-259.
- Suwoto dan Zuhair. 2012. Studi dan Observasi Awal Kebutuhan Data Nuklir untuk Reaktor Generasi IV. *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia Vol. 11 No. 1(B)*. Hlm. 18-25.
- Syarifah, R. D., Indah, R. M., Zaki, S. 2015. Perhitungan Neutronik Teras Homogen dari *High Temperature Gas Cooled Reactor* (HTGR) dengan Bahan Bakar Uranium Nitrida. *Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains*. Hlm. 41-44.
- Tadeus, D. Y., Budi, S., Iwan, S. 2010. Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Jurnal Universitas Diponegoro Transmisi* 12, (1). Hlm. 8-13.
- Takaki, N., Deby, M. 2012. Core Design and Deployment Strategy of Heavy Water Cooled Sustainable Thorium Reactor. *Sustainability* 4. Page 1933-1945.

- Tim BATAN. 2001. Bahan Bakar Thorium. <http://www.batan.go.id/ensiklopedi/15/04/01/02/15-04-02.html>. Diakses pada tanggal 23 Mei 2016 pukul 20.30 WIB.
- 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*. Hlm. 50-59.
- Wojciechowski, A. 2016. Criticality of the Thorium Burn up in Equilibrium State. *Progress in Nuclear Energy* 92. Page 81-90.
- Yulianto, T. 1996. Kajian Kemungkinan Modifikasi Peralatan Fabrikasi untuk Fabrikasi Elemen Bakar Jenis HWR dan LWR. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. Hlm. 190-198.
- Zainuddin, N. Z., Geoffrey, T. P., Eugene, S. 2016. The Factor Affecting MTC of Thorium-Plutonium-Fuelled PWRs. *Annals of Nuclear Energy* 98. Page 132-143.
- Zhang, P., Kan W., Ganglin Y. 2014. A simplified Supercritical Fast Reactor with Thorium Fuel. *Science and Technology of Nuclear Installations*. Page 1-9.