

**PERHITUNGAN PEMBAKARAN LENGKAP (*BURN-UP*)
REAKTOR AIR SUPERKRITIS BAHAN BAKAR THORIUM
MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL
MENGUNAKAN SRAC**

Skripsi

Oleh

Sri Aknes Simanjuntak



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

ABSTRAK

PERHITUNGAN PEMBAKARAN LENGKAP (*BURN-UP*) REAKTOR AIR SUPERKRITIS BAHAN BAKAR THORIUM MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL MENGUNAKAN SRAC

Oleh

Sri Aknes Simanjuntak

Penelitian perhitungan pembakaran lengkap (*burn-up*) reaktor air superkritis bahan bakar thorium model perangkat (*assembly*) heksagonal menggunakan SRAC telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung pembakaran lengkap model heksagonal reaktor jenis SCWR menggunakan bahan bakar thorium dengan menentukan pengayaan, radius sel, menganalisis densitas atom, penambahan *burn-up*, perubahan daya linear dan desain reaktor model heksagonal. Perhitungan pembakaran lengkap dilakukan menggunakan ASMBURN pada *System Reactor Atomic Code* (SRAC) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI). Parameter perhitungan pembakaran lengkap yang dianalisis pada penelitian ini meliputi persentase pengayaan bahan bakar, radius sel dan desain reaktor model heksagonal dengan melihat faktor multiplikasi (k_{eff}) yang paling landai. Hasil perhitungan pembakaran lengkap pengayaan yang efisien terdapat pada pengayaan 3% dan radius sel bahan bakar sebesar 0,405 cm, *cladding* 0,448cm dan moderator 0,532 cm. Densitas atom Pu²³⁹ dan U²³⁵ mengalami kenaikan sedangkan U²³³ mengalami penurunan sebesar 18,790 %. Nilai k_{eff} akan berkurang seiring dengan meningkatnya tingkat *burn-up* pada bahan bakar dan perubahan daya linear yang lebih besar menghasilkan nilai k_{eff} yang kecil.

Kata kunci: *burn-up*, pengayaan, radius sel, *assembly* heksagonal, ASMBURN, SCWR, thorium.

ABSTRACT

*Calculation of Burning Complete (Burn-Up) Reactor Supercritical Water
Fuel Thorium Hexagonal Device (Assembly) Model Using SRAC*

By

Sri Aknes Simanjuntak

The research of calculation of burning complete (burn-up) reactor supercritical water fuel thorium hexagonal device (Assembly) models using SRAC has been investigated. The objective of this research is to calculation hexagonal model SCWR type reactor using thorium fuel to analysis enrichment, pins cell, atomic density, increasing burn-up, change of power linear and design of reactor hexagonal assembly models. Burning complete calculation was performed by using SRAC on ASMBURN which was developed by JAERI. Burning complete calculation the most slightly slope of reactor hexagonal model parameters showed 3 % of enrichment and 0.405 cm of fuel pins cell, 0,448cm of cladding and 0,53 cm of moderator. Atomic density Pu²³⁹ and U²³⁵ by increasing meanwhile U²³³ by decreased 18,790%. Multiplicaton factor (k_{eff}) decreased by increasing burn-up and the greater change of linear heat by decreased k_{eff} .

Key words: *burn-up, enrichment, pin cell, hexagonal assembly, ASMBURN, SCWR, thorium.*

**PERHITUNGAN PEMBAKARAN LENGKAP (*BURN-UP*)
REAKTOR AIR SUPERKRITIS BAHAN BAKAR THORIUM
MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL
MENGUNAKAN SRAC**

Oleh

Sri Aknes Simanjuntak

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh 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 PEMBAKARAN LENGKAP (*BURN-UP*) REAKTOR AIR SUPERKRITIS BAHAN BAKAR THORIUM MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL MENGGUNAKAN SRAC**

Nama Mahasiswa : **Sri Aknes Simanjuntak**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1217041048

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



MENYETUJUI

1. Pembimbing

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

2. Ketua Jurusan Fisika

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

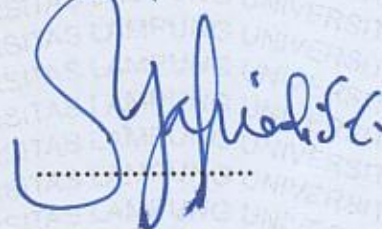
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



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



Penguji
Bukan Pembimbing : **Prof. Posman Manurung**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **07 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



Sri Aknes Simanjuntak
NPM. 1217041048

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Hutabayu Raja, Kecamatan Hutabayu Raja, Kabupaten Simalungun pada tanggal 28 Agustus 1994 sebagai anak kelima dari tujuh bersaudara dari pasangan Raya Maju Simanjuntak dan Megawati Simanungkalit.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar Negeri No 091537 Hutabayu Raja pada tahun 2006, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 1 Hutabayu Raja pada tahun 2009, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Swasta Harapan Pematang Siantar pada tahun 2012. Selanjutnya pada tahun 2012 penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Undangan. Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi Asisten Praktikum Sains Dasar, Asisten Praktikum Fisika Dasar I, dan Asisten Fisika Inti.

Penulis pernah aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan baik intra maupun ekstra kampus seperti: Unit Kegiatan Mahasiswa Kristen (UKMK), Persekutuan Kristen Antar Universitas (Perkantass), Persekutuan Oikumene Mahasiswa MIPA (POM MIPA), dan Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI).

Penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Lembaga Ilmu Pengetahuan

Indonesia (LIPI) Serpong, Tangerang Selatan dengan judul “Uji Korosi Baja yang Dicampur Karbon di Lingkungan Tanah dengan Pengaruh NaCl”. Kemudian penulis melakukan penelitian “Perhitungan Pembakaran Lengkap (*Burn-Up*) Reaktor Air Superkritis Bahan Bakar Thorium Model Perangkat (*Assembly*) Heksagonal Menggunakan Srac” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UNILA.

MOTTO

“Allah tidak pernah mempertanyakan kemampuan dan ketidakmampuan kita, melainkan kesediaan kita (Fletcher)”

“Ora et Labora”

“Segala perkara dapat ku tanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku (Filipi 4:13)”

“Tidak penting apapun agama atau sukumu, kalau kamu bisa melakukan sesuatu yang baik untuk semua orang, orang tidak pernah tanya apa agamamu (Gusdur)”

*Dengan rasa syukur atas kasih dan anugrah Tuhan Yesus Kristus karya kecil ini
kupersembahkan kepada:*

*“Bapak dan Omak yang tidak pernah letih mendoakan, memotivasiku,
terimakasih untuk semua pengorbanan kalian”*

*“Kakak, Abang dan adekk-adekku yang tak henti-hentinya selalu
menyemangati”*

“Almamater Tercinta”

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadiratNya, karena berkat rahmat dan karuniaNya yang berlimpah sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini untuk meraih gelar sarjana sains, dimana penulisan skripsi ini merupakan Tugas Akhir yang diwajibkan oleh pihak Akademika Universitas Lampung. Penulis berterimakasih kepada Ibu Yanti Yulianti dan Bapak Syafriadi atas bimbingannya serta Bapak Posman Manurung atas kritik dan sarannya dalam hal penelitian ini. Terima kasih juga kepada keluarga penulis yang selalu mendukung penulis dalam doa dan dana.

Penelitian mengenai reaktor yang berjudul “**Perhitungan Pembakaran Lengkap (*Burn-Up*) Reaktor Air Superkritis Bahan Bakar Thorium Model Perangkat (*Assembly*) Heksagonal Menggunakan Srac**” yang merupakan suatu penelitian yang ditujukan untuk menghitung pembakaran lengkap dari thorium dengan pengayaan yang tidak terlalu tinggi. Penulis menyadari penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan dan berharap semoga bermanfaat bagi pembaca agar dapat dilanjutkan ke penelitian berikutnya.

Bandar Lampung, April 2017

Penulis,

Sri Aknes Simanjuntak

SANWACANA

Pujian dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa, karena penulis menyadari atas berkat dan lindungan-Nya skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi dengan judul “**Perhitungan Pembakaran Lengkap (*Burn-Up*) Reaktor Air Superkritis Bahan Bakar Thorium Model Perangkat (*Assembly*) Heksagonal Menggunakan Srac**” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Sains di Universitas Lampung.

Penulis skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, informasi serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati penulis sampaikan terimakasih banyak kepada:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si, sebagai pembimbing I serta Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan serta nasehat dari awal perkuliahan sampai menyelesaikan skripsi.
2. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si, sebagai dosen pembimbing II, telah memberikan bimbingan yang berdasarkan motivasi sehingga dalam penyelesaian ini skripsi ini menjadi lebih baik.
3. Bapak Prof. Posman Manurung, sebagai penguji yang telah mengoreksi kekurangan, memberi kritik dan saran selama penulisan skripsi.

4. Kedua orangtuaku Bapak dan Mamakku yang selalu mendoakan dan mendidik, dan membesarkan serta yang selalu motivasi ku dalam setiap detik hidup ku.
5. Kakak Hester Rugun Simanjuntak, Abang Oliver Simanjuntak, Kakak Enny Rosenta Simanjuntak, Abang Ardi Simanjuntak, Adek Hartono Simanjuntak, Adek Basri Simanjuntak yang selalu memberikan semangat dan doa.
6. Arizka Antartika Putri dan Wulan Kartika Wati dan Izdiha Rolina Sofaa tim dalam penelitian ini.
7. Seluruh pihak yang turut serta membantu dan memotivasi, yang tidak dapat disebutkan namanya satu persatu.

Bandar Lampung, April 2017

Penulis

Sri Aknes Simanjuntak

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Batasan Masalah	6
D. Tujuan Penelitian	6
E. Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Reaktor Nuklir	8
B. Komponen-Komponen Dasar Reaktor Nuklir	11
C. Jenis-Jenis Reaktor	14

D. Jenis-jenis Reaktor di Indonesia.....	17
E. Bahan Bakar Reaktor	19
F. Pembakaran Lengkap (<i>Burn-Up</i>)	22
G. SRAC	27

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian	31
B. Alat dan Bahan Penelitian	31
C. Prosedur Penelitian.....	31
D. Diagram Alir Penelitian	39

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penghitungan Densitas Atom.....	42
B. Menentukan Pengayaan (<i>Enrichment</i>)	43
C. Menghitung Radius Sel	45
D. Densitas Atom	47
E. Penambahan <i>Burn-up</i>	52
F. Perubahan Daya Linear (<i>Linear Heat</i>).....	53

V. KESIMPULAN

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Faktor multiplikasi	13
Gambar 2. Skematik reaktor jenis PWR	15
Gambar 3. Skematik reaktor jenis BWR.....	16
Gambar 4. Skematik reaktor jenis SCWR.....	17
Gambar 5. Rantai reaksi nuklida thorium	21
Gambar 6. Skema reaksi pada inti radioaktif	23
Gambar 7. Struktur SRAC	28
Gambar 8. Input-an SRAC	30
Gambar 9. Geometri untuk PIJ pada SRAC dengan model <i>hexagonal</i> (IGT=15).....	33
Gambar 10. Diagram alir penelitian.....	39
Gambar 11. Desain perangkat heksagonal	41

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi reaktor SCWR.....	4
Tabel 2. Densitas atom moderator dan selongsong.....	42
Tabel 3. Densitas atom pada pengayaan bahan bakar.....	44
Tabel 4. Nilai k_{eff} terhadap <i>burn-up</i> pada pengayaan bahan bakar U^{233}	44
Tabel 5. Radius sel sebelum diubah.....	45
Tabel 6. Radius sel setelah diubah	46
Tabel 7. Nilai k_{eff} terhadap <i>burn-up</i> dengan mengubah radius sel	46
Tabel 8. Densitas atom Pu^{239} setelah pembakaran terhadap setiap Nomor sel bahan bakar.....	48
Tabel 9. Densitas atom U^{233} setelah pembakaran terhadap setiap Nomor sel bahan bakar	50
Tabel 10. Densitas atom Pu^{239} setelah pembakaran terhadap setiap Nomor sel bahan bakar	51
Tabel 11. Perbandingan sebelum dan sesudah penambahan <i>burn-up</i>	52
Tabel 12. Perbandingan sebelum dan sesudah perubahan daya linear.....	53

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sumber-sumber energi terbarukan seperti tenaga air, angin, surya, dan gelombang belum dapat membantu kebutuhan energi listrik di Indonesia baik secara teknologis maupun kapasitas, sementara diperkirakan pada tahun 2025 akan menjadi lebih dari tiga kali lipat kebutuhan energi listrik sekarang (Aziz, 2008). Penduduk dunia terus bertambah dengan laju yang terus meningkat dan akan berdampak pada krisis energi listrik di dunia. Indonesia termasuk negara dengan tingkat pertumbuhan penduduk yang sangat tinggi, sehingga membutuhkan jumlah energi listrik yang sangat besar (Kementerian Energi dan Sumberdaya Alam, 2016).

Indonesia suatu negara berpenduduk besar dengan daratan yang luas memerlukan sumber energi yang ramah lingkungan dan berintensitas tinggi seperti Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Bahan bakar reaktor nuklir yang biasanya digunakan dalam reaktor adalah uranium. Uranium merupakan bahan bakar utama untuk PLTN. Uranium (U) alami sebagaimana yang terdapat dalam lapisan kerak bumi utamanya tersusun atas campuran isotop U^{238} dan U^{235} (Kidd, 2009). Indonesia memiliki bahan bakar nuklir uranium yang dapat segera dimanfaatkan, bila tidak maka akan terbuang percuma. Sumber daya energi fosil yang terus

terkurus di tengah tuntutan kehidupan yang lebih layak dan lingkungan hidup yang lebih bersih, menjadikan pilihan hanya pada energi nuklir. Penggunaan PLTN dan sumber energi terbarukan secara optimal merupakan solusi bijak, cerdas, dan tepat untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi tertentu saja (Aziz, 2008). Berdasarkan perhitungan termodinamika, energi reaksi fisi dapat disetarakan dengan hasil pembakaran energi fosil seperti berikut: 1 gram Uranium = 2,5 ton batubara (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Cadangan uranium diperkirakan masih cukup, namun penggunaan uranium secara terus-menerus menyebabkan jumlah cadangannya semakin menipis. Karena itu, dalam rangka menjaga keamanan energi dan berkelanjutan (*sustainability*) energi nuklir, maka akhir-akhir ini perhatian dunia mulai mengarah pada penggunaan thorium sebagai bahan bakar nuklir alternatif. Thorium (Th) akan menghasilkan U^{233} (material yang bersifat fisil) jika menyerap neutron yang dalam reaktor nuklir dapat menghasilkan reaksi berantai sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN (Carrera et al., 2007).

Thorium memiliki beberapa keunggulan dibanding uranium, diantaranya rasio konversi thorium menjadi isotop U^{233} lebih tinggi dibanding dengan U^{238} menjadi Pu^{239} . Hal ini disebabkanampang lintang serap neutron termal thorium sebesar 7,4 barns kira-kira lebih tinggi dibanding uranium yaitu 2,7 barns dan diketahui $1 \text{ barns} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ (Wiley, 1992). Thorium digunakan sebagai bahan bakar nuklir oleh karena thorium lebih murah, lebih ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas CO_2 dari sektor energi listrik dan lebih aman oleh karena

itu dalam penelitian ini dilakukan perhitungan pembakaran lengkap terhadap thorium (Wilson et al., 2008).

Penyelidikan mengenai potensi thorium sebagai bahan bakar pada reaktor cepat berpendingin gas untuk PLTN, dari penelitian yang dilakukan thorium menghasilkan bahan bakar fisil lebih cepat sehingga memiliki tingkat *burn-up* yang lebih tinggi dibandingkan dengan uranium (Ariani dkk, 2013).

Reaktor nuklir dalam perkembangannya mengalami empat fase regenerasi yaitu generasi I, II, III dan IV. Reaktor generasi IV merupakan reaktor yang dirancang tidak hanya untuk memasok daya listrik, tetapi juga untuk memasok energi termal. Melalui Forum Internasional Generasi IV (*Generation IV International Forum* atau yang disingkat dengan GIF) menetapkan enam jenis reaktor yang layak dikembangkan dan salah satu dari enam reaktor yang sedang dikembangkan adalah *Supercritical Cooled Water Reactor* (SCWR). SCWR merupakan reaktor yang bekerja diatas titik kritis air, yang mampu beroperasi pada tekanan 25 Mpa menggunakan air sebagai pendingin dan moderator dengan titik kritis air sebesar 22,1 Mpa (Oka et al., 2003).

SCWR memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis reaktor yang lain dan SCWR lebih sederhana dalam pembangunannya (Cheng et al., 2007). Selain itu, juga ukuran fisik yang lebih kecil namun mampu menghasilkan energi yang besar, sehingga SCWR juga memberikan potensi penghematan dalam hal biaya oleh karena itu SCWR sangat cocok diaplikasikan di Indonesia (Tsiklauri et al. 2004). Upaya yang dilakukan dalam mengantisipasi pemanfaatan energi nuklir sebagai pembangkit listrik di Indonesia di masa

mendatang yaitu Korea Selatan (*Korea Electric Power Company* atau KEPCO) dan Indonesia (Badan Tenaga Nuklir Indonesia atau BATAN) telah menjalin kerjasama dalam bentuk *joint study* untuk mengimplementasikan *Korea Standard Nuclear Power Plant* (KSNP) di Indonesia (Herutomo, 1998). Penelitian ini menggunakan jenis reaktor air superkritis (SCWR) dengan komposisi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi reaktor SCWR

Bahan Bakar (Fuel)	
Material	Th ²³² dan U ²³³
Temperatur	1200°C
Massa Jenis	10,5 gram/cm ³
Pengayaan	1-5%
Selongsong (Cladding)	
Material	Stainless stell 304
Temperatur	873°C
Massa jenis	8 gram/cm ³
Moderator	
Material	air ringan (H ₂ O)
Temperatur	658°C
Massa jenis	0,78 gram/cm ³ (Shan et al., 2010)

Tabel 1 menunjukkan komposisi bahan bakar, selongsong dan moderator yang akan digunakan dalam penelitian ini. Pembuatan reaktor membutuhkan perhitungan dan desain yang dapat memberikan suatu sistem yang efektif, aman dan ekonomis dalam hal energi dan waktu operasi. Umumnya reaktor yang aman diperlukan analisis yang akurat yang dibagi dalam tiga bagian yaitu; analisis neutronik, termal dan keselamatan. Analisis neutronik terkait dengan pengendalian bahan bakar (Arisa dan Fitriyani, 2009). Secara umum, perubahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan dengan faktor multiplikasi yang disebut k efektif atau k_{eff} . k_{eff} menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi didalam teras reaktor, keadaan stabil dicapai jika nilai $k_{\text{eff}} = 1$ (Zweifel, 1973).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui banyaknya energi yang dihasilkan atau ukuran konsumsi bahan bakar reaktor selama pembakaran persatuan berat bahan bakar dalam SCWR pada model perangkat bahan bakar heksagonal (*hexagonal fuel assembly*) dan dinyatakan dalam satuan megawatt day (MWd) per ton menggunakan bahan bakar thorium. Proses pembakaran lengkap bahan bakar reaktor merupakan proses utama yang terjadi didalam teras reaktor nuklir, dan *burn-up* menjadi parameter yang sangat berhubungan dengan faktor ekonomis reaktor sehingga dilakukan penelitian ini. Perhitungan pembakaran lengkap dilakukan dengan menggunakan program *Standar thermal Reactor Analysis Code* (SRAC) merupakan sebuah sistem dengan kode yang dapat diterapkan pada analisis neutronik sebagai salah satu variasi dari beberapa tipe reaktor. Kode tersebut dibuat oleh K. Tsuchihashi et al, yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) dan sudah teruji dapat memperkirakan karakteristik reaktor, aspek keselamatan reaktor, strategi siklus bahan bakar dan fungsi lainnya yang lebih akurat, sistem ini mengedepankan keefektifan dari penampang lintang mikro dan makro, serta mencakup dua kode tambahan: ASMBURN untuk perhitungan pembakaran lengkap perangkat bahan bakar dan COREBN untuk perhitungan *core burn-up* (*burn-up* inti) multi dimensi (Okumura et al., 2002).

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimanakah hasil k_{eff} pada perhitungan pembakaran lengkap thorium setiap periode pada SCWR setelah pengayaan bahan bakar?
2. Berapakah ukuran sel SCWR agar menghasilkan energi yang efisien?

3. Bagaimanakah hasil densitas atom U^{233} , U^{235} dan Pu^{239} tiap *burn-up*?
4. Bagaimanakah hasil k_{eff} setelah penambahan *burn-up* dan perubahan daya linear?

C. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Perhitungan pembakaran lengkap thorium dilakukan pada jenis SCWR
2. Perhitungan pembakaran lengkap dengan model perangkat bahan bakar heksagonal
3. Bahan bakar yang digunakan adalah Th^{232} dan U^{233} .
4. Penambahan *burn-up* hingga 100.000 Mwd/ton.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

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

E. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Memberikan informasi mengenai perhitungan pembakaran lengkap untuk jenis SCWR yang memiliki energi efisien yang tinggi.

2. Mendukung perkembangan penelitian dibidang reaktor nuklir.
3. Memberikan kontribusi dalam pemecahan masalah kelangkaan energi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Reaktor Nuklir

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

Reaktor nuklir merupakan tempat terjadinya reaksi pembelahan inti (nuklir) atau dikenal dengan reaksi fisi berantai yang terkendali dan kontinu untuk menghasilkan energi, radioisotop dan nuklida baru. Terkendali yang dimaksud dalam hal ini adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan sesuai dengan

kebutuhan. Neutron dalam reaktor nuklir digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi. Reaksi fisi nantinya akan menghasilkan inti ringan, neutron dan energi sebesar 200 MeV. Reaksi fisi berantai terjadi apabila inti dari suatu unsur yang dapat berfisi (U^{235} dan U^{233}) bereaksi dengan neutron termal yang akan menghasilkan unsur-unsur lain dengan cepat serta menimbulkan energi panas dan neutron-neutron baru (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Berbagai teknologi reaktor telah dikembangkan di dunia. Reaktor fisi secara garis besar dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu:

1. Reaktor termal, reaksi fisi didominasi oleh neutron termal. Reaktor ini dikarakterisasi oleh adanya moderator yang digunakan untuk menurunkan energi kinetiknya.
2. Reaktor cepat yaitu fisi yang didominasi oleh neutron cepat, ditandai dengan pengurangan bahan moderator. Reaktor ini memerlukan bahan yang diperkaya dengan sangat tinggi, atau plutonium, untuk mengurangi jumlah U^{238} yang akan menyerap neutron cepat (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Perkembangan reaktor nuklir terjadi beberapa generasi, sebagian besar reaktor generasi I menggunakan uranium alam sebagai bahan bakar dan grafit sebagai moderator. Reaktor generasi II menggunakan bahan uranium yang telah diperkaya dan sebagian besar didinginkan serta dimoderatori oleh air. Reaktor generasi III adalah reaktor lanjutan dari beberapa reaktor generasi I yang beroperasi di Jepang dan pengembangan dari reaktor generasi II (World Nuclear, 2016). Reaktor generasi IV berbeda dengan reaktor I, II dan III karena reaktor ini dirancang tidak hanya memasok daya listrik tapi juga untuk memasok energi termal. Pada reaktor

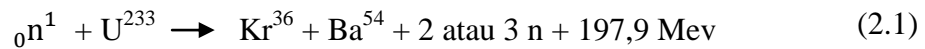
generasi IV, terdapat enam tipe reaktor yaitu: Reaktor Cepat dengan Pendingin Gas (*Gas Cooled Fast Reactor* atau GFR), Reaktor cepat dengan Pendingin Metal Cair (*Lead Cooled Fast Reactor* atau LFR), Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactor* atau MSR), Reaktor cepat dengan Pendingin Sodium (*Sodium Cooled Fast Reactor* atau SFR), Reaktor Air Superkritis (*Supercritical Cooled Water Reactor* atau SCWR), Reaktor Temperatur Sangat Tinggi (*Very High Temperature Reactor* atau VHTR) (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

Prinsip kerja reaktor nuklir mirip dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada sumber energi dan jenis bahan bakar. Sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir pada material-material fisil. Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir terkendali di dalam sebuah reaktor nuklir berupa energi panas. Energi panas ini dapat menguapkan air sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pemutar turbin pembangkit listrik (Duderstadt dan Hamilton, 1976).

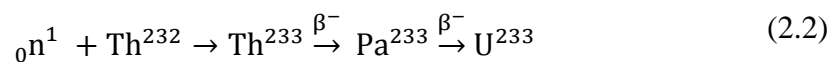
Bahan bakar reaktor terbagi dalam dua jenis material yang dapat mengalami reaksi fisi (pembelahan) yang disebut dengan *fissionable* material yaitu material fisil dan material fertil. Sebuah material fisil merupakan material yang akan mengalami pembelahan ketika ditembak oleh neutron dengan sejumlah energi, sedangkan material fertil merupakan material yang akan menangkap neutron dan melalui peluruhan radioaktif akan berubah menjadi material fisil (Lewis, 2008).

Contoh reaksi fisi adalah inti uranium yang ditembak oleh neutron, saat sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron dengan presentasi tertentu, inti akan

mengalami pembelahan atau reaksi fisi (Zweifel, 1973). Persamaan (2.1) adalah salah satu contoh reaksi fisi dari uranium:



Sedangkan yang bersifat fertil yaitu Th^{232} yang akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan U^{233} yang merupakan material fisil yang kemudian membelah ketika ditembak oleh neutron. Persamaan (2.2) merupakan bentuk dari Th^{232} menjadi U^{233} seperti reaksi berikut:



Reaksi fisi uranium seperti di atas menghasilkan neutron. Neutron yang dihasilkan dapat menumbuk kembali inti uranium untuk membentuk reaksi fisi selanjutnya. Mekanisme akan terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat hingga membentuk reaksi berantai tak terkendali. Akibatnya terjadi pelepasan energi yang besar dalam waktu singkat (Zweifel, 1973).

B. Komponen-Komponen Dasar Reaktor Nuklir

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 sebagai berikut.

a. Bahan Bakar

Bahan bakar nuklir merupakan bahan yang akan menyebabkan terjadinya reaksi fisi berantai berlangsung sebagai sumber energi nuklir. Terdapat dua jenis bahan

bakar nuklir yaitu bahan fisil dan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom yang langsung dapat membelah apabila menangkap neutron, sedangkan bahan fertil merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah setelah menangkap neutron tetapi akan membentuk bahan fisil (Lewis, 2008). Bahan yang banyak digunakan sebagai bahan nuklir diantaranya yaitu U^{235} , U^{233} , Pu^{239} dan Th^{232} (Benedict et al., 1981).

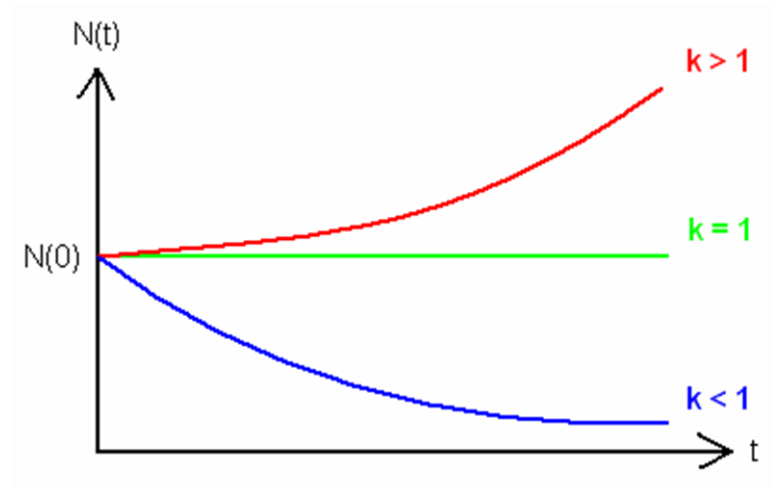
b. Moderator

Moderator adalah komponen reaktor yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (+2 MeV) 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 reaktor nuklir, antara lain: air ringan (H_2O), air berat (D_2O), grafit dan berilium (Roulstone, 2011).

c. Batang Kendali (*control rod*)

Secara umum 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 Hafnium (Hf). Jika keluaran daya dari sebuah reaktor dikehendaki konstan, maka

jumlah neutron yang dihasilkan harus dikendalikan. Jika neutron yang dihasilkan selalu konstan dari waktu ke waktu ($k_{\text{eff}} = 1$), maka reaktor dikatakan berada pada kondisi kritis. Gambar 1 menunjukkan tiga jenis keadaan teras reaktor berdasarkan faktor multiplikasinya.



Gambar 1. Faktor multiplikasi (Zweifel, 1973)

Gambar 1 menunjukkan jika besarnya $k > 1$ disebut reaktor superkritis yang artinya jumlah neutron bertambah sebagai fungsi waktu, jika $k = 1$ reaktor dalam keadaan kritis artinya jumlah neutron tidak berkurang atau pun bertambah tetapi konstan (tetap), dan besarnya nilai $k < 1$ disebut reaktor subkritis yang artinya jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu (Zweifel, 1973).

d. Perisai (*Shielding*)

Perisai berfungsi sebagai penahan agar radiasi hasil fisi bahan tidak menyebar pada lingkungan dari luar sistem reaktor. Karena reaktor adalah sumber radiasi yang sangat potensial, maka diperlukan suatu sistem perisai yang mampu menahan semua jenis radiasi adalah beton yang dikelilingi pada reaktor. Umumnya perisai yang digunakan adalah besi (Fe^{26}) sebagai pelindung gamma,

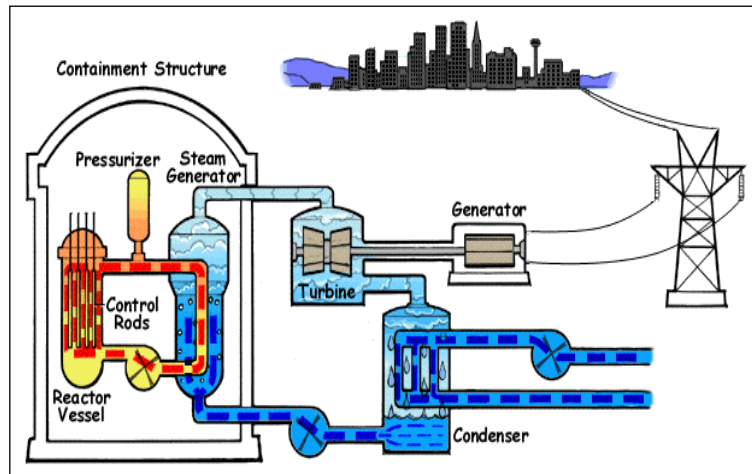
timbal (Pb^{82}), Tungsten (W^{24}) sebagai pelindung radiasi sinar X, dan Kadmium (Cd^{48}) dan boron (B^5) sebagai pelindung radiasi neutron (Lewis, 2008).

C. Jenis-Jenis Reaktor

Jenis reaktor nuklir yang cukup terkenal dan telah dikembangkan oleh beberapa negara adalah reaktor air bertekanan (*Pressurized Water Reactor* atau PWR), reaktor air mendidih (*Boiling Water Reactor/BWR*) (Roulstone, 2011) dan jenis terbaru yang sedang dikembangkan yaitu reaktor air superkritis (SCWR) (Buongiorno, 2003).

a. PWR

PWR merupakan salah satu jenis reaktor air ringan dan banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Reaktor ini menggunakan teknik fisi nuklir dalam memanaskan air di bawah tekanan tinggi di dalam reaktor yang kemudian dilewatkan alat penukar panas (*steam generator*) sehingga dihasilkan uap untuk menggerakkan turbin generator listrik (Driscoll dan Heizler, 2005). Reaktor jenis PWR memiliki efisiensi termal yang rendah sekitar 33%, PWR beroperasi pada tekanan 16 MPa dengan temperatur rata-rata 280-290°C. Skematik reaktor jenis PWR ditunjukkan pada Gambar 2.



Keterangan

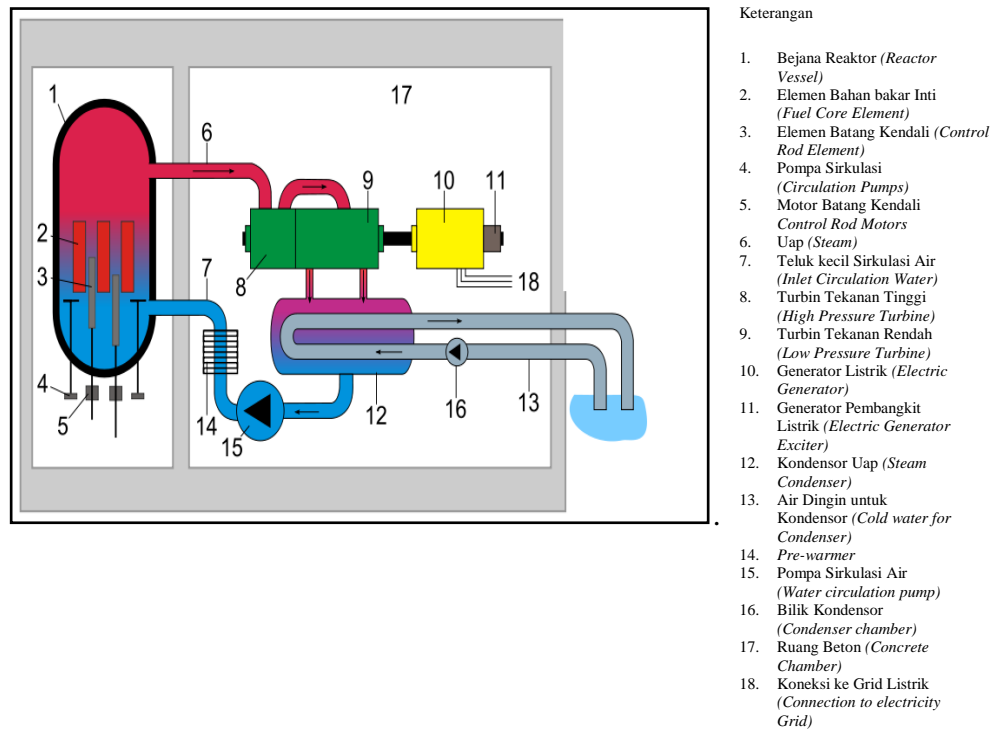
1. Struktur Penahanan (*Containment Structure*)
2. Tekanan (*Pressurized*)
3. Generator Uap (*Steam Generator*)
4. Batang Kendali (*Control Rods*)
5. Bejana Reaktor (*Reactor Vessel*)
6. Turbin (*Turbine*)
7. Generator (*Generator*)
8. Kondensor (*Condenser*)

Gambar 2. Skematik reaktor jenis PWR (Buongiorno, 2003)

Reaktor jenis ini banyak digunakan di Amerika Serikat, Perancis, Jerman, Spanyol, Rusia, dan China. Bahan bakar reaktor ini adalah 3% uranium dengan selongsong yang terbuat dari bahan *zircalloy* sedangkan batang kendali (*control rods*) dioperasikan dari bagian atas reaktor, penggantian bahan bakar dilakukan setiap 3 tahun sekali (Roulstone, 2011).

b. BWR

Reaktor jenis BWR beroperasi pada tekanan 7,3 MPa dengan temperatur rata-rata 310 °C. Bahan bakar reaktor ini adalah 3% uranium dengan selongsong yang terbuat dari bahan *zircalloy* sedangkan batang kendali dioperasikan dari bagian bawah reaktor sehingga tidak jatuh ke inti dan menghentikan reaktor, penggantian bahan bakar dilakukan setiap 2 tahun sekali. Pendingin pada reaktor jenis ini terjadi secara alami. Reaktor jenis ini banyak digunakan di Amerika Serikat, Swedia dan Jepang (Roulstone, 2011). Skematik reaktor jenis BWR ditunjukkan pada Gambar 3.

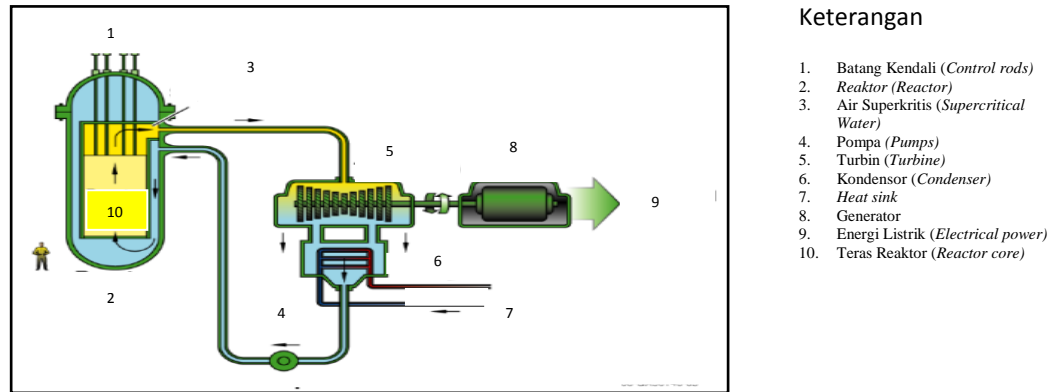


Gambar 3. Skematik reaktor jenis BWR (Buongiorno, 2003)

c. SCWR

SCWR merupakan salah satu reaktor generasi ke IV yang menjanjikan sebab reaktor ini sederhana, efisiensi termal yang tinggi (Oka et al., 2003). Pembangunan yang cukup sederhana, ukuran fisik yang lebih kecil namun mampu menghasilkan energi yang besar, sehingga SCWR juga memberikan potensi penghematan dalam hal biaya (Tsiklauri et al., 2004). Adapun jenis SCWR merupakan reaktor air yang bekerja di atas titik kritis air, yang beroperasi pada tekanan 25 MPa menggunakan air sebagai pendingin dan moderator dengan titik kritis air 22,06 Mpa. Pada tekanan tersebut, jika temperatur air terus dinaikkan maka tidak akan terjadi perubahan fasa sehingga entropi reaktor dan efisiensi panas lebih besar. Pada keadaan *supercritis* air mengalami *pseudo-critical* pada temperatur 385 °C dan tekanan 25 MPa. Pada temperatur dan tekanan tersebut air memiliki kapasitas panas yang lebih tinggi sehingga disebut keadaan efisiensi

paling tinggi (Oka et al., 2003). Efisiensi SCWR dapat ditingkatkan selongsong bahan bakar yang mampu menahan suhu tinggi (Tsiklauri et al., 2004). Skematik reaktor jenis SCWR ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skematik reaktor jenis SCWR (Buongiorno, 2003)

D. Jenis-jenis Reaktor di Indonesia

Indonesia belum memiliki PLTN untuk dimanfaatkan sebagai potensi energi dimasa depan. Indonesia sedang menuju kearah pembangunan program tersebut kedalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2014-2019. Namun sebelum membangun PLTN , Indonesia telah memiliki tiga reaktor nuklir yang difungsikan sebagai reaktor riset sesuai kebutuhan kedepannya, seperti yang dijelaskan berikut ini (BATAN, 2015).

a. Reaktor TRIGA 2000 Bandung

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR) BATAN memiliki fasilitas reaktor riset TRIGA Mark II yang disebut dengan reaktor TRIGA 2000. Nama TRIGA berasal dari singkatan *Training, Research dan Isotope production* dari *General Atomic (GA) - USA*. Reaktor TRIGA banyak digunakan di Asia, terutama di Asia Timur dan Asia Tenggara. Sedangkan Mark II merupakan tipe

reaktor yang dibuat GA tersebut. Pada awalnya reaktor TRIGA mempunyai daya 250 kW dan mencapai kekritisan pada 10 Oktober 1964 kemudian pada tahun 1971 daya reaktor ditingkatkan menjadi 1000 Kw (1 MW) dan telah dioperasikan dengan keadaan normal dan aman, dengan tujuan produksi radioisotop, penelitian dan pendidikan. Reaktor TRIGA bertipe tanki, bahan bakarnya merupakan campuran homogen dari paduan uranium dan zirkonium Hibrida (U-ZrH). U-ZrH mempunyai koefisien reaktivitas temperatur negatif yang sangat besar, yang secara otomatis akan membatasi daya reaktor pada satu nilai tertentu ketika terjadi ekskursi daya (Imron, 2012).

b. Reaktor Kartini Yogyakarta

Reaktor Kartini dibangun mulai akhir 1974 dan beroperasi pada Januari 1979, salah satu fasilitas yang dimiliki Pusat Penelitian Bahan Murni dan Instrumen (PPBMI) BATAN Yogyakarta, tipe reaktor kolam dengan daya 100 kW, didesain untuk sarana penelitian, produksi isotop, pendidikan dan latihan kader-kader dalam bidang reaktor. Reaktor Kartini mencapai kondisi kritis untuk pertama kalinya pada 25 Januari 1979. Elemen bakar reaktor Kartini terdiri dari campuran homogen Uranium Zirkonium Hibrida (U Zr H) dalam bentuk *alloy*, dengan kandungan uranium sebanyak 8,5 % berat (Soemarno, 1999).

c. Reaktor Serpong

Reaktor serpong merupakan reaktor termuda di Indonesia. Reaktor Serpong dibangun sebagai pusat penelitian, pengembangan dan perekayasaan (litbangyasa) IPTEK nuklir untuk pengembangan industri nuklir dan PLTN di Indonesia. Reaktor yang dipakai disini adalah RSG-Ga Siwabessy dengan kapasitas daya

yang lebih besar dibanding dua reaktor terdahulunya (reaktor TRIGA 2000 Bandung dan Kartini Yogyakarta) yakni mencapai 30 MW (BATAN, 2015).

E. Bahan Bakar Reaktor

Bahan bakar reaktor yang banyak digunakan sebagai bahan bakar nuklir yaitu uranium dan thorium (Kidd, 2009).

a. Uranium

Uranium adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang U dan nomor atom 92. Uranium merupakan logam putih keperakan yang termasuk dalam deret aktinida pada tabel periodik. Uranium memiliki 92 proton dan 92 elektron, dan berelektron valensi 6. Inti uranium mengikat sebanyak 141 sampai dengan 146 neutron, sehingga terdapat 6 isotop uranium. Isotop yang paling umum adalah U^{238} (146 neutron) dan U^{235} (143 neutron). Uranium alami yang ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U^{238} , U^{235} dan U^{234} . Uranium merupakan sumber energi dengan kelimpahan yang sangat besar. Meski bukan termasuk energi yang terbarukan, uranium banyak digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir yang kemudian dimanfaatkan untuk produksi senjata nuklir hingga berkembang untuk pembangkit listrik (Kidd, 2009).

b. Thorium

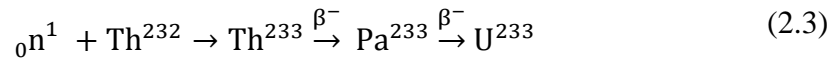
Tahun 1828 oleh John Jacob Berzelius seorang kimiawan Swedia, menemukan logam alami yang bersifat radioaktif yang disebut thorium. Pada keadaan murni thorium merupakan logam putih keperakan yang berkilau. Namun, bila terkontaminasi oksigen, thorium perlahan akan memudar di udara menjadi abu-

abu dan akhirnya hitam (Kidd, 2009). Thorium merupakan bahan fertil yang apabila menyerap neutron akan menjadi bahan fisil U^{233} yang dalam reaktor nuklir dapat menghasilkan reaksi berantai sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN. Jumlah cadangan thorium di dunia cukup besar yaitu 3-4 kali lebih banyak dibanding uranium dan terdistribusi secara merata. Selain sumberdaya thorium yang lebih besar dibanding uranium, diantaranya rasio konversi thorium menjadi isotop U^{233} lebih tinggi dibanding uranium, diantaranya U^{238} menjadi Pu^{239} . Hal ini disebabkan tampang lintang serap neutron termal thorium (7,4 barns) kira-kira 3 kali lebih tinggi dibanding uranium yaitu 2,7 barns (Wiley, 1992).

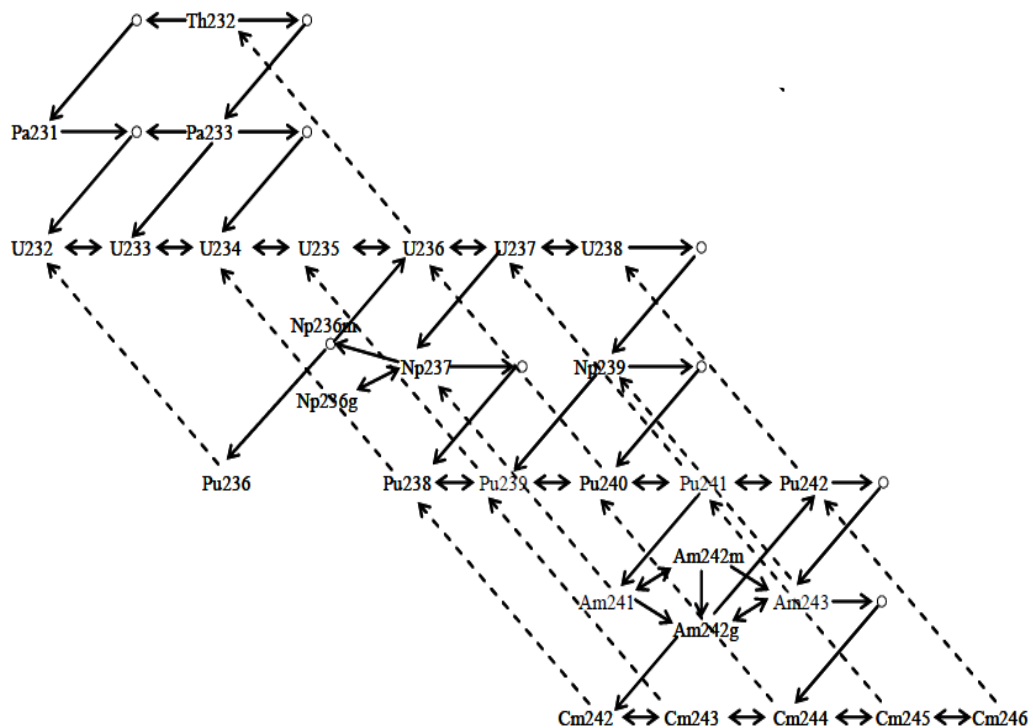
Di alam, bisa dikatakan semua thorium adalah Th^{232} , dan mempunyai waktu paruh sekitar 14.05 milyar tahun. Jumlah thorium di kulit bumi diperkirakan sekitar empat kali lebih banyak dari uranium. Saat ini Thorium biasanya digunakan sebagai elemen dalam bola lampu dan sebagai bahan campuran logam. Banyak negara di seluruh dunia mulai mempertimbangkan rencana untuk menggunakan thorium sebagai pembangkit listrik tenaga nuklir karena keamanannya dan ketersediaan bahan baku yang lebih banyak dibanding uranium. Thorium dapat terbakar lebih lama dan suhu lebih tinggi untuk mendapatkan efisiensi lebih tinggi dibanding bahan bakar lainnya, termasuk bahan bakar, tidak perlu mengemas limbah, dan secara signifikan mengurangi isotop radioaktif yang memiliki waktu paruh yang lama, berdasarkan keistimewaan-keistimewaan diatas, meskipun akan lebih sedikit mahal dalam fabrikasinya, thorium tetap berpotensi menjadi bahan bakar masa depan, karena bahan bakar ini akan memberikan faktor daya pembangkit dan *burn-up* yang lebih tinggi sehingga umur operasi akan lebih lama, limbahnya akan lebih stabil dan resistan terhadap produk material senjata (*weapon*

material proliferation) sehingga akan lebih ekonomis dan mengurangi biaya pembuangan limbah bahan bakar (Okumura et al., 2002).

Th^{232} merupakan bahan fertil yang apabila menangkap neutron akan meluruh seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3:



Persamaan 3 yaitu thorium menangkap neutron lalu menjadi isotop baru yaitu Th^{233} , selanjutnya memancarkan elektron (peluruhan beta) karena peralihan cepat menjadi protactinium (Pa^{233}) dalam waktu tertentu. Lalu 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 5.



Gambar 5. Rantai reaksi nuklida thorium (Okumura et al., 2002)

Thorium dalam reaktor nuklir dapat menghasilkan reaksi berantai sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN. Penggunaan thorium sebagai bahan bakar reaktor nuklir ini lebih aman, lebih murah dan lebih ramah lingkungan. Selain itu, bahan bakar thorium lebih bersih dan ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas CO₂ dari sektor energi listrik (Wilson et al., 2008).

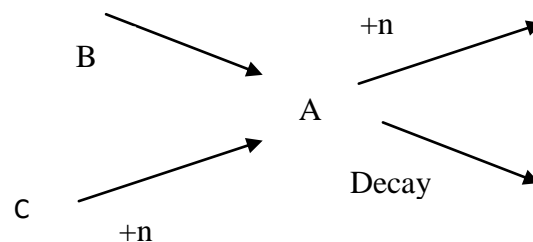
F. Pembakaran Lengkap (*Burn-Up*)

Desain reaktor yang aman memerlukan analisis yang akurat, dibagi menjadi 3 bagian umum yaitu, analisis neutronik, termal dan keselamatan. Analisis neutronik terkait dengan pengendalian bahan bakar. Analisis *burn-up* dilakukan untuk mengetahui karakteristik perubahan isotop dalam reaktor. Analisis pembakaran juga memberikan parameter densitas atom yang menunjukkan perubahan densitas bahan bakar reaktor (Arisa dan Fitriyani, 2009).

Perancangan reaktor nuklir, analisis *burn-up* merupakan perhitungan standar yang menitikberatkan pada manajemen bahan bakar yaitu ukuran konsumsi bahan bakar, proses pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar yang dinyatakan dalam Mega Watt-hari (MWd) dari tiap ton bahan bakar (Lestari dan Fitriyani, 2014).

Perhitungan dasar dalam manajemen bahan bakar adalah 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 membuat inti yang sebelumnya tidak stabil menjadi inti yang lebih stabil dengan proses penangkapan neutron dan atau peluruhan radioaktif. Reaksi yang terjadi pada proses depleksi bahan bakar yang menyatakan densitas (N) suatu nuklida pada teras dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema reaksi pada inti radioaktif (Walter dan Reynolds, 1981)

Secara matematis skema tersebut dapat dituliskan persamaan depleksi bahan bakar seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.4

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \left[\sum_g \sigma_{ag}^A \varphi_g \right] N_A + \lambda_B N_B + \left[\sum_g \sigma_{cg}^C \varphi_g \right] N_C \quad (2.4)$$

N_A = Kerapatan atom nuklida A

N_B = Kerapatan atom nuklida B

N_C = Kerapatan atom nuklida C

λ_A = Konstanta peluruhan radioaktif nuklida A

λ_B = Konstanta peluruhan radioaktif nuklida B

φ_g = Fluks neutron grup g

σ_{ag}^A = Cross section absorpsi neutron nuklida A pada grup g

σ_{cg}^C = Cross section penangkapan neutron nuklida C pada grup g (Walter dan

Reynolds, 1981).

Persamaan 2.4 merupakan deplesi isotop A dimana pada suku pertama diruas kanan merupakan suku peluruhan isotop A, suku kedua merupakan proses absorpsi dari isotop A, suku ketiga merupakan suku peluruhan isotop B menjadi isotop A, dan suku keempat adalah suku penangkapan neutron oleh isotop C sehingga menjadi isotop A. Proses deplesi bahan bakar dapat didefinisikan juga sebagai reaksi pembakaran lengkap. Ada beberapa cara untuk menyatakan pembakaran lengkap salah satunya adalah dengan menyatakan persentase atom yang mengalami fisi atau bisa juga dengan menyatakan banyaknya energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar dalam reaktor. Solusi dari persamaan 2.4, tentu dengan melakukan penyederhanaan karena persamaan di atas digunakan untuk analisis deplesi bahan bakar multigrup. Misal kasus pada bahan bakar reaktor nuklir tipe PWR dengan kasus 1 grup energi, reaktor nuklir tipe PWR menggunakan bahan bakar UO_2 dengan pengayaan 1.5 – 2.5 %, sehingga komposisi awal bahan bakar hanyalah uranium dimana terdiri atas U-235 sebagai isotop fisil dan U-238 sebagai isotop fertil. Untuk U-235, persamaan deplesi-nya dituliskan pada persamaan 2.5

$$\frac{dN_{U-235}}{dt} = -\sigma_a^{U-235} \phi N_{U-235} \quad (2.5)$$

Suku pertama pada ruas kanan diabaikan karena konstanta peluruhan U-235 sangat kecil sehingga tidak begitu berpengaruh, suku ketiga tidak ada karena tidak ada sumber lain yang meluruh menjadi U-235, dan suku keempat juga diabaikan karena tidak ada sumber lain yang menangkap neutron untuk bertransmutasi menjadi U-235. Karena pada isotop fisil seperti U-235, cross section fisi nilainya

jauh lebih besar daripada cross section penangkapan, maka bisa dilakukan pendekatan $\sigma_a \approx \sigma_f$. Sehingga persamaan 2.5 menjadi seperti pada persamaan 2.6

$$\frac{dN_{U-235}}{dt} = -\sigma_f^{U-235} \varphi N_{U-235} \quad (2.6)$$

Dari penjelasan di atas, Isotop U-235 disini dianggap tidak mengalami transmudasi karena nilai koefisien peluruhan dan cross section penangkapannya sangat kecil. Selanjutnya adalah persamaan deplesi untuk U-238 diberikan pada persamaan 2.7

$$\frac{dN_{U-238}}{dt} = -\sigma_a^{U-238} \varphi N_{U-238} \quad (2.7)$$

Dengan alasan yang sama seperti pada penjelasan persamaan deplesi U-235, persamaan deplesi U-238 di atas juga hanya menggunakan suku kedua pada ruas kiri dari persamaan 2.4. Selanjutnya, neutron yang terserap oleh U-238 ada yang digunakan untuk fisi, dan ada pula yang digunakan untuk transmudasi menjadi U-239. Adapun persamaan hasil transmudasi dari U-238 menjadi U-239 adalah seperti persamaan 2.8

$$\frac{dN_{U-239}}{dt} = -\lambda_{U-239} N_{U-239} + \sigma_c^{U-238} \varphi N_{U-238} \quad (2.8)$$

Yang diambil hanya suku pertama dan keempat saja dari ruas kanan persamaan 2.4. U-239 ini dalam waktu yang relatif cukup cepat meluruh menjadi Np-239. Persamaan 2.9 berikut.

$$\frac{dN_{Np-239}}{dt} = -\lambda_{Np-239} N_{Np-239} + \lambda_{U-239} N_{U-239} \quad (2.9)$$

Np-239 juga dalam waktu yang relatif singkat mengalami peluruhan menjadi Pu-239 seperti persamaan 2.10 berikut

$$\frac{dN_{Pu-239}}{dt} = \lambda_{Np-239}N_{Np-239} - \sigma_a^{Pu-239}\varphi N_{Pu-239} \quad (2.10)$$

Pu-239 pun mengalami reaksi fisi dan transmudasi sehingga menghasilkan Pu-240. Pu-240 juga mengalami fisi dan transmudasi menjadi Pu-241, dan Pu-241 fisi serta transmudasi menjadi Pu-242 yang relatif lebih stabil.

$$\frac{dN_{Pu-240}}{dt} = \sigma_c^{Pu-239}\varphi N_{Pu-239} - \sigma_a^{Pu-240}\varphi N_{Pu-240} \quad (2.11)$$

$$\frac{dN_{Pu-241}}{dt} = \sigma_c^{Pu-240}\varphi N_{Pu-240} - \sigma_a^{Pu-241}\varphi N_{Pu-241} \quad (2.12)$$

$$\frac{dN_{Pu-242}}{dt} = \sigma_c^{Pu-241}\varphi N_{Pu-241} - \sigma_a^{Pu-242}\varphi N_{Pu-242} \quad (2.13)$$

$$\frac{dN_{U-238}}{N_{U-238}} = -\sigma_a^{U-238}\varphi dt \quad (2.14)$$

Kedua ruas diintegrasikan hingga akhirnya menjadi seperti persamaan 2.15

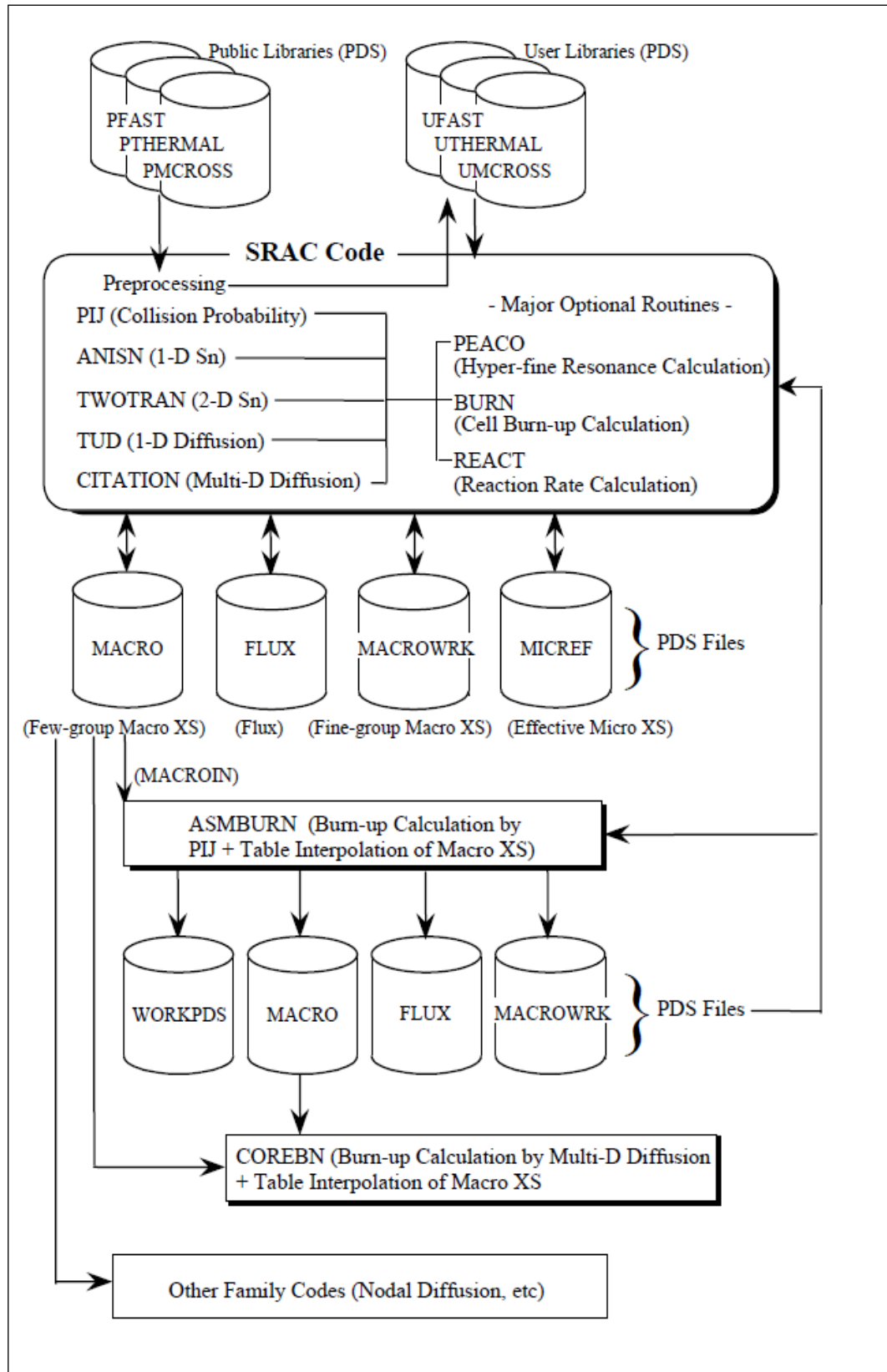
$$N(t)_{U-238} = N(0)_{U-238}e^{-\sigma_a^{U-238}\varphi t} \quad (2.15)$$

Persamaan pembakaran lengkap biasanya dipecahkan bergantian dengan persamaan difusi multigrup. Fluks neutron dari hasil difusi multigrup digunakan untuk melakukan analisis pembakaran lengkap, selanjutnya perubahan komposisi akibat persamaan pembakaran lengkap pada gilirannya perlu dimasukkan dalam perhitungan kembali ke dalam persamaan difusi.

G. SRAC

Standard Thermal Reactor Analysis Code (SRAC) merupakan buah kerja keras para ilmuwan *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) sejak tahun 1978 untuk menyusun sebuah program perhitungan neutronik yang komprehensif. Dikembangkan oleh Tsuchihashi et al di tahun 1980an, lalu dilanjutkan oleh Okumura et al di awal tahun 90an, varian SRAC, beroperasi dalam sistem operasi UNIX, pertama kali dirilis di tahun 1996 dengan nama SRAC95. Sampai generasi SRAC terbaru muncul, masih dalam sistem operasi UNIX, SRAC2K3 dan SRAC2K6. 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. SRAC2K3 adalah program komputasi neutronik deterministik yang komplit, karena dilengkapi oleh berbagai modul yang disesuaikan dengan tujuan penggunaan program (Okumura et al., 2002) dan SRAC yang digunakan pada penelitian ini adalah code 2001 yang dilengkapi dengan kode bantu (Okumura et al., 2001).

SRAC terdiri dari berbagai perpustakaan data nuklir yang telah dimodifikasi dari lima kode modulus yang terintegrasi dalam SRAC95; modul perhitungan probabilitas tumbukan (PIJ), modul perhitungan difusi (TUD, CITATION) dan dua kode pilihan: ASMBURN untuk *assembly* bahan bakar dan COREBN untuk perhitungan *burn up* teras (Okumura et al., 2006). Dalam ASMBURN terdapat dua *file* didalamnya yaitu sh untuk menghitung *burn-up* dalam satu *assembly*, sedangkan xs yaitu digunakan untuk menghitung *burn-up* per sel dan pada penelitian ini file yang digunakan adalah xs (Okumura et al., 2001).



Gambar 7. Struktur SRAC (Okumura et al., 2006)

Sistem SRAC memiliki kode dasar yaitu sebagai berikut:

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

SRAC terdapat *file input* dan *file output*, *file Input* SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila *penginput-an* data pada SRAC telah selesai kemudian di *run* maka *file output* standar akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai tepat atau tidak. Apabila bagian akhir dari hasil penghitungan (*output*) belum sampai pada pesan seperti

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

maka harus dilakukan pengecekan pada *inputan* dan memeriksa *output* standar. Setelah penghitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan standar kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura et al., 2002). *Input-an* pada SRAC dapat dilihat pada Gambar 8.

```

UO2F ← Case name for UO2 cell calculation
Macro-XS for UO2 CELL BY PIJ ← Comment for this case
1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 0 0 0 2 0 1 0 0 0 ← Option control
1.0E-3 / BUCKLING FOR P1/B1
/home/okumura/SRACLIB-JDL32/pds/pfast      Old      File
/home/okumura/SRACLIB-JDL32/pds/phtml     O        F
/home/okumura/SRACLIB-JDL32/pds/pmcrs     O        F
/home/okumura/MyPDS/UFAST                  Scratch  Core
/home/okumura/MyPDS/UTHERMAL              S        C
/home/okumura/MyPDS/UMCROSS               S        C
/home/okumura/MyPDS/MACROWRK              S        C
/home/okumura/MyPDS/MACRO                 New      C
/home/okumura/MyPDS/FLUX                 New      C
/home/okumura/MyPDS/MICREF                S        C
60 30 3 1 / Fast (60g)+Thermal (30g) => Fast (3G)+Thermal (1G)
:
:      { Energy Group Structure }
:
:      { Geometry for PIJ }
:
3 / Number of Materials
FUE1X01X 0 3 300. 0.84 0.0 / 1 : UO2 FUEL
XU050001 2 0 6.086E-4
XU080001 2 0 2.255E-2
XO060001 0 0 4.725E-2
CLADX02X 0 1 300. 0.11 0.0 / 2 : CLADDING
XZRN0001 0 0 4.311E-2
MODEX031 0 2 300. 0.00 0.0 / 3 : MODERATOR
XH01H001 0 0 6.676E-2
XO060001 0 0 3.338E-2
:
:
MOXF ← Case name for MOX cell calculation
Macro-XS for MOX CELL BY PIJ ← Comment for this case
1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 0 0 0 2 0 1 0 0 0 ← Option control
1.0E-3 / BUCKLING FOR P1/B1
:
:      { Geometry for PIJ }
:
:      { material specification for MOX fuel }
:
CORE ← Case name for Core calculation
2-dimensional Core calculation by CITATION (4-group) ← Comment for this case
0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 5 0 0 2 0 1 0 0 0 ← Option control
1.0E-20 / dummy BUCKLING (not effective)
:
:      { Control and Geometry data for CITATION }
:
005
1 1 1
1 2 1 ← Zone map
1 1 1
:
999

1 2 / Material No. by Zone
2 / Number of Materials
UO2FA010 0 0 0. 0. / ← Homogenized X-section provided by the first case
MOXFA010 0 0 0. 0. / ← Homogenized X-section provided by the second case
/ End job ← Blank case name to terminate job

```

Gambar 8. Input-an SRAC (Okumura et al., 2002)

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan selama empat bulan yaitu mulai Juli sampai dengan Oktober 2016. Adapun tempat pelaksanaan penelitian ini adalah 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 Mint 17 Cinnamon 32bit dan program *System Reactor Atomic Code* (SRAC).

C. Posedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan dengan beberapa langkah sebagai berikut:

1. Menentukan pengayaan

Menghitung pengayaan misal dari 1-5% U^{233} pada reaktor SCWR diperoleh persen pengayaan yang baik. Pengayaan ditandai dengan dengan nilai densitas atom dari U^{233} yang terus naik setelah dilakukan pembakaran.

Atomic Density (Densitas Atom)

Menghitung densitas atom U^{233} sebagai fungsi pengayaan menggunakan rumus (5) untuk menghitung densitas atom (Lewis, 2008).

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

Dimana :

N = densitas atom (atom/cm³)

ρ = massa jenis bahan (gram/cm³)

N_A = bilangan Avogadro ($0,602 \times 10^{24}$ atom/mol)

M = nomor massa (gram/mol)

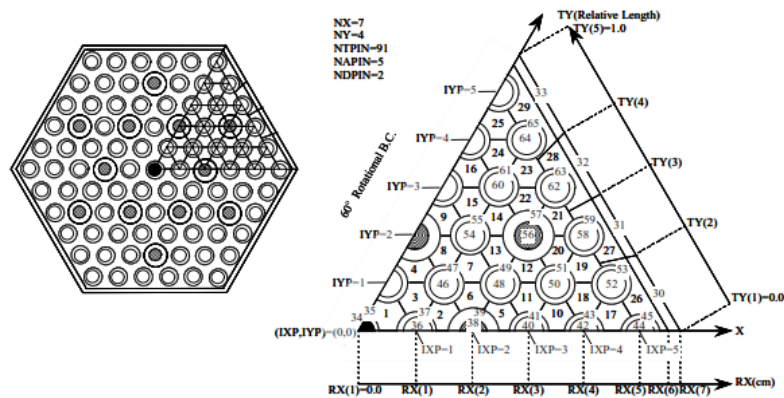
perhitungan densitas atom ini nantinya yang akan digunakan sebagai input yang akan dihitung selanjutnya menggunakan ASMBURN pada SRAC.

2. Menghitung radius sel

Persen pengayaan yang efisien yang sudah diperoleh, selanjutnya hasil persen pengayaan digunakan pada input penentuan pin *fuel*, *cladding* dan moderator pada reaktor SCWR dengan mengubah pin dari skala kecil ke besar (misalnya 0,5; 1; 1,5; 2 dan seterusnya) untuk mendapat pin bahan bakar yang efisien.

3. Penambahan *burn-up*

Pengayaan dan radius pin yang sudah dihitung dan dianalisis pengayaan dan radius pin yang efisien maka selanjutnyadilakukan penambahan *burn-up* serta menganalisis nya. Contoh model geometri menggunakan ASMBURN ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Geometri untuk PIJ pada SRAC dengan model *hexagonal* (IGT=15) (Okumura et al., 2002)

4. Penghitungan dengan menggunakan ASMBURN

Hasil penghitungan dari densitas atom yang dilakukan sebelumnya, akan menjadi *input* pada penghitungan menggunakan ASMBURN pada SRAC. Pada ASMBURN ini akan dapat diketahui hasil penghitungan secara keseluruhan dari model reaktor yang telah dibuat dengan komposisi dan ukuran tertentu. Hasil penghitungan dari output ASMBURN akan menunjukkan apakah dengan model reaktor yang telah dibuat dapat menghasilkan energi yang efisien. Berikut adalah contoh input penghitungan menggunakan ASMBURN pada SRAC

```
#!/bin/csh
#
#####
#
# << run SRAC >>
#
# by Keisuke OKUMURA (E-mail:okumura@mike.tokai.jaeri.go.jp)
#
#####
# HCLWRxs : make macro XS(20g) for ASMBURN(HCLWR.sh)
#####
#
# 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
#
#===== 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   : directory name in which output data will be stored
# CASE  : case name which is referred as names of output files and PDS

```

```

# WKDR : directory name in which scratch PS files will be made and deleted
# PDS_D : directory name in which PDS files will be made
#
set LMN = SRACsc.30m
set BRN = ucm66fp
set ODR = $HOME/ASMBURN/smpl/outp
set CASE = HCLWRxs
set PDS_D = $HOME/ASMBURN/tmp
set MACRO = $HOME/ASMBURN/smpl/macro/HCLWR20g
if ( ! -e $MACRO ) then
mkdir $MACRO
endif
#
#===== mkdir for PDS =====
#
# PDS_DIR : directory 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 $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
CELL
HEXAGONAL UNIT PIN CELL CALCULATION (20G) FOR HCLWR
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/phtml O F
$HOME/SRACLIB-JDL32/pds/pmcrs O F
$PDS_DIR/UFAST Scratch Core
$PDS_DIR/UTHERMAL S C
$PDS_DIR/UMCROSS S C
$PDS_DIR/MACROWRK S C

```

```

$MACRO          New  C
$PDS_DIR/FLUX   S    C
$PDS_DIR/MICREF S    C
61 46 10 10 /
61(1)/
46(1)/
2 2 6 2 8 8 17 10 4 2 / CONDENSED FAST  GROUP STRUCTURE
3 2 2 4 4 4 4 6 10 7 / CONDENSED THERMAL GROUP STRUCTURE
6 6 6 3 3 1 6 0 0 0 5 0 6 30 0 0 60 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 / R-T
1 2 3      / M-R
0.0 0.2511 0.3552 0.435 0.475 0.5316 0.555 / RX
3 / NMAT
FUE1X0XX 0 7 900.0 0.87  0.0 / MAT 1 FUEL(MOX 9.0W/O PU-FIS)
XU050009 2 0 3.8645E-5 /1
XU080009 2 0 1.9041E-2 /2
XPU90009 2 0 1.6373E-3 /3
XPU00009 2 0 7.7603E-4 /4
XPU10009 2 0 3.3511E-4 /5
XPU20009 2 0 1.9107E-4 /6
XO060009 0 0 4.4038E-2 /7
CLD1X0XX 0 4 600.0 0.08  0.0 / MAT 2 CLADDING(SUS-304)
XFEN0008 2 0 5.9620E-2 /1
XCRN0008 2 0 1.7380E-2 /2
XNIN0008 2 0 8.0980E-3 /3
XMN50008 2 0 8.6590E-4 /4
MOD1X0XX 0 2 600.0 1.0  1.0 / MAT 3 LIGHT WATER
XH01H008 0 0 4.7508E-2 /1
XO060008 0 0 2.3754E-2 /2
9 1 1 1 0 0 0 0 0 10(0) / Burnup Control
9(1.694E-04) / AV. Linear Heating Rate = 169.4W/cm
2.0000E+2 5.000E+3 1.000E+4 6*1.000E+4 / EXPOSURE (MWd/t)
0 / PLOT FOR PEACO
CEL1
HEXAGONAL UNIT PIN CELL CALCULATION (HOMOGENIZED CELL XS)
1 1 1 1 2 1 4 3 -2 1 0 0 0 0 2 0 -1 0 0 0 / SRAC CONTROL
1.000E-15 / BUCKLING
6 6 6 3 1 1 6 0 0 0 5 0 6 30 0 0 60 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 / R-T(IRR)
3(1)      / X-R(IXR)
1 2 3      / M-R(MAR)
0.0 0.2511 0.3552 0.435 0.475 0.5316 0.555 / RX
3 / NMAT
FUE2Y0YY 0 7 900.0 0.87  0.0 / MAT 1 FUEL(MOX 9.0W/O PU-FIS)
XU050009 2 0 3.8645E-5 /1
XU080009 2 0 1.9041E-2 /2
XPU90009 2 0 1.6373E-3 /3
XPU00009 2 0 7.7603E-4 /4
XPU10009 2 0 3.3511E-4 /5
XPU20009 2 0 1.9107E-4 /6
XO060009 0 0 4.4038E-2 /7
CLD2Y0YY 0 4 600.0 0.08  0.0 / MAT 2 CLADDING(SUS-304)
XFEN0008 2 0 5.9620E-2 /1
XCRN0008 2 0 1.7380E-2 /2
XNIN0008 2 0 8.0980E-3 /3
XMN50008 2 0 8.6590E-4 /4

```

```

MOD2Y0YY 0 2 600.0 1.0 1.0 / MAT 3 LIGHT WATER
XH01H008 0 0 4.7508E-02 /1
XO060008 0 0 2.3754E-02 /2
0 / PLOT FOR PEACO
CEL2
SUPER CELL CAL.(WATER TUBE SURROUNDED BY HOMOGENIZED FUEL)
1 1 1 1 0 1 4 0 -2 1 0 0 0 0 2 0 -1 0 1 0 / SRAC CONTROL
1.000E-15 / BUCKLING
3 1 0 1 0 1 0 4 0 1 0 0 0 0 5 0 8 1 3 0 0 4 5 0 / PATH
2 1 0 0 5 0 5 5 5 -1 0.0001 0.00001 0.001 1.0 10. 0.5
1 1 2 3 4 4 4 4 4 4 / X-R(IXR)
1 1 2 3 4 4 4 4 4 4 / M-R(MAR)
0.0 0.364 0.515 0.555 0.5828 0.836 1.089 1.342 1.595 1.848 2.10129
4 / NMAT
HOLEZ0ZZ 0 2 600.0 1.0 0.0 / MAT 1 WATER IN GUIDE TUBE
XH01H008 0 0 4.7508E-02 /1
XO060008 0 0 2.3754E-02 /2
TUBEZ0ZZ 0 4 600.0 0.08 0.0 / MAT 2 GUIDE TUBE
XFEN0008 0 0 5.9620E-2 /1
XCRN0008 0 0 1.7380E-2 /2
XNIN0008 0 0 8.0980E-3 /3
XMN50008 0 0 8.6590E-4 /4
GAPWZ0ZZ 0 2 600.0 1.0 0.0 / MAT 3 WATER SURROUNDING TUBE
XH01H008 0 0 4.7508E-02 /1
XO060008 0 0 2.3754E-02 /2
CEL1X01X 0 0 600.0 1.0 0.0 / MAT 4 HOMOGENIZED FUEL
CEL3
SUPER CELL CAL.(TIE ROD SURROUNDED BY HOMOGENIZED FUEL)
1 1 1 1 0 1 4 0 -2 1 0 0 0 0 2 0 -1 0 0 0 / SRAC CONTROL
1.000E-15 / BUCKLING
3 9 9 9 3 0 9 0 0 0 5 0 8 1 3 0 0 4 5 0 / PATH
0 1 0 0 5 0 5 5 5 -1 0.0001 0.00001 0.001 1.0 10. 0.5
1 1 2 3 3 3 3 3 3 3 / X-R(IXR)
1 1 2 3 3 3 3 3 3 3 / R-M(MAR)
0.0 0.400 0.555 0.5828 0.836 1.089 1.342 1.595 1.848 2.10129
3 / NMAT
TIERW0WW 0 4 600.0 0.08 0.0 / MAT 1 TIE ROD(SUS-304)
XFEN0008 0 0 5.9620E-2 /1
XCRN0008 0 0 1.7380E-2 /2
XNIN0008 0 0 8.0980E-3 /3
XMN50008 0 0 8.6590E-4 /4
GAPWW0WW 0 2 600.0 1.0 0.0 / MAT 2 WATER SURROUNDING TIE ROD
XH01H008 0 0 4.7508E-02 /1
XO060008 0 0 2.3754E-02 /2
CEL1X01X 0 0 600.0 1.0 0.0 / MAT 3 HOMOGENIZED FUEL
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
```

5. Hasil penghitungan

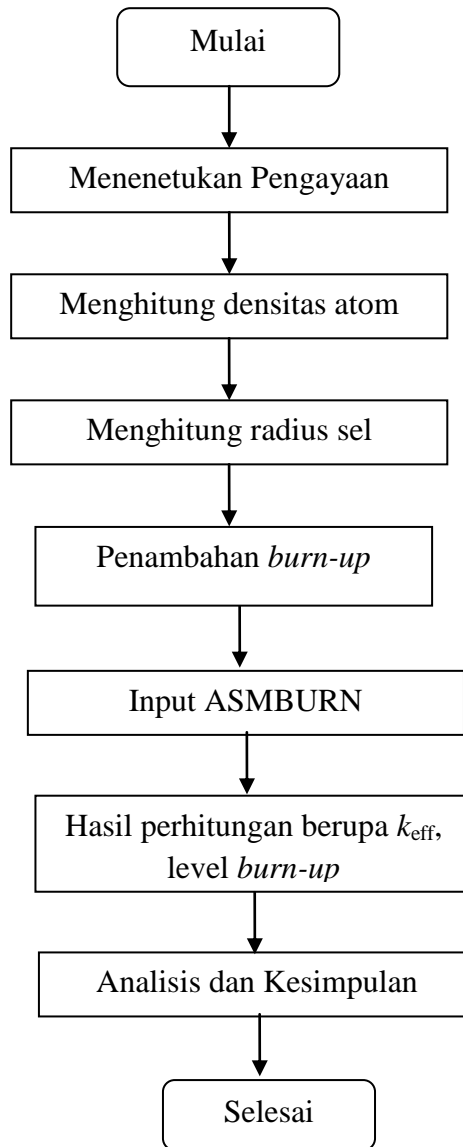
Apabila bagian akhir dari hasil penghitungan (output belum sampai pada pesan

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

Maka harus dilakukan pengecekan pada input dan melakukan penghitungan kembali hingga diperoleh pesan seperti diatas (Okumura, et al., 2002).

D. Diagram Alir Penelitian

Dibawah ini Gambar 10 adalah diagram alir yang akan dilakukan pada penelitian.



Gambar 10. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Pengayaan yang efisien terdapat pada persentase 3% dilihat dari history grafik nilai k_{eff} yang paling landai.
2. Radius sel yang efisien terdapat pada radius sel bahan bakar sebesar 0,405 cm, *cladding* 0,448 cm dan moderator 0,532 cm, dilihat dari history grafik nilai k_{eff} yang paling landai .
3. Densitas atom Pu^{239} dan U^{235} mengalami kenaikan yang besar sedangkan U^{233} mengalami penurunan sebesar 18,790 %, dari ketiga atom fisil tersebut densitas yang lebih besar terdapat pada Pu^{239} .
4. Nilai k_{eff} akan berkurang seiring dengan meningkatnya tingkat *burn-up* pada bahan bakar, karena semakin tinggi tingkat *burn-up* maka akan berkurang massa dari bahan bakar dan perubahan daya linear yang lebih besar menghasilkan nilai k_{eff} yang kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariani, M., Su'ud, Z., Monado, F. 2013. Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 MWth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar. *Jurnal ILMU DASAR*. Volume 14. No. 1. Page 12.
- Ariani, M., Shafii, MA., Abdullah, AG., Su'ud, Z. 2010. Studi Awal Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbasis Bahan Bakar Uranium Alam. *Proceeding Seminar dan Workshop Nasional Pendidikan Teknik Elektro (SWNE)*. Page 93-98.
- Arisa, D., Fitriyani, D. 2009. Breeding Analyzing of Plutonium-239 in Liquid Metal-Cooled Fast Breeder Reactor with Variation of Core Geometry and Volume. *Proceedings of The 3rd Asian Physics Symposium (APS 2009)*. Page 413-418.
- Aziz, F. 2008. Solusi Bijak Krisis Listrik, *Majalah Gatra*, ed. 12 November 2008.
- BATAN. 2015. <https://www.batan.go.id/index.php/id/statusenerginuklir/189/batan-kuasai-teknologi-pengolahan-pemisahan-uranium-dan-thorium>. Diakses 20 Mei 2016.
- Benedict, M., Pigford, T.H and Levi, H.W. 1981. *Nuclear Chemical Engineering*. Mc Graw-Hill. New York. Page 647 and 693–697.
- Buongiorno, J. 2003. Generation IV R & D activities for the Development of the SCWR. *Progress report for the FY-03 idaho national engineering and design*. Volume 240. Page 1.
- Carrera., Alejandro, N., Gilberto, E.P., Juan, L.F. 2007. Transient and Stability Aalysis of a BWR Core with Thorium-Uranium Fuel. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Volume 35.
- Cheng, X., Kuang, B., Yang, YH. 2007. Numerical Analysis of Heat Transfer in Supercritical Water Cooled Flow Channels. *Journal of Nuclear Engineering and Design* 237 (2007). Page 240 – 252.
- Duderstadt, J. J., and Hamilton, J. L. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. Michigan: The University of Michigan.

- Driscoll, Michael J., and Pavel Heizler. 2005. Reactor Physics Challenges in Gen-IV Reactor Design. *Nuclear Engineering and Technology Journal*. Volume 27 No. 1.
- Fatkhiyatul, A., Budi, S.W., Anam, C., and Tjiptono, W.T. 2014. Distribusi Fluks Neutron sebagai Fungsi *Burn-Up* Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Youngster physics journal*. Volume 3, No 2. Page 108-109.
- Herutomo, dan Bambang. 1998. Evaluasi Kinerja Termo-Mekanika Kondisi Mantap Elemen Bakar KSN-1000. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daure Bahan Bakar Nuklir IV*. Page 73-74.
- Imron. M. 2012. Perhitungan *Burn-up* Bahan Bakar Reaktor RSG-Gas Menggunakan Paket Program BATAN-Fuel. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir*. ISBN 978-979-17109-7-8.
- Kementrian energi dan sumberdaya alam. 2016. <http://esdm.go.id/berita/323-energi-baru-dan-terbarukan/4145-saatnya-mengoptimalkan-pemanfaatan-energi-non-fosil.html>. Diakses 15 Juni 2016.
- Kidd, S.W. 2009. *Nuclear Fuel Resources*. New York: CRC Press. Page 85.
- Lewis, E. E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. AP. Page 134.
- Lestari, A. M., Fitriyani, D. 2014. Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC Dan MOX terhadap Nilai Breeding Ratio Pada Reaktor Pembiak Cepat. *Jurnal Fisika Unand*. Volume 3 No.1. Page 14.
- Oka, Y., Koshizuka, S., Yamasaki, T., 1992. Direct Cycle Light Water Reactor Operating At Supercritical Pressure. *Nuclear Science & Technology*. Volume 29. Page 585-588.
- Oka, Y., Koshizuka, S., Ishiwatari, Y., Yamaji, A. 2003. *Conceptual Design Of High Temperature Reactor Cooled By Supercritical Light Water*. ICCAP. Cordoba: Spain.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., Tsuchihashi, K., 2001. *ASMBURN and COREBN; Auxiliary Burn-Up Codes Of SRAC*. Japan: JAERI. Page 5, 32.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., Tsuchihashi, K. 2002. *General Description and Input Instruction*. Jepang: JAERI. Page 5, 64, 186.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., and Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA. Page 4-26.
- Roulstone, T. 2011. *A Designers View of Nuclear Energy*. University of Cambridge.

- Shan, J., Chen, W., Rhee, B. W., Leung, L.K.H. 2010. Coupled Neutronics/Thermal-Hydraulics Analysis of CANDU-SCWR Fuel Channel. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Page 58 – 65.
- Sahasrabudde, K. 2010. *Nuclear Breeding*. Stanford University. Page 1.
- Santoso, W.S., Widiharto, A., Sardjono, Y. 2014. Desain Teras Dan Bahan Bakar PLTN Jenis Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) dengan Menggunakan Program SRAC. *J.Tek.Reaktor.Nukl.* Volume 16. No. 2. Page 111-112.
- Soemarno. B. 1999. Perhitungan Pelepasan Zat Radioaktif Bahan Bakar Reaktor Kartini Fungsi Ring/Burn-up dalam Keadaan Kecelakaan. *Proseding Pertemuan dan Persentasi Ilmiah*. ISSN 0216-3128.
- Su'ud, Z. 1999. Komputasi untuk Reaktor masa Depan, *Lokakarya Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir (IX)* :17 - 19 Februari 1999.
- Tsikklauri, G.V., Talbert,R.J., Schmitt, B.E., Filippov, G.A., Bogojavlensky, R.G., and Grishanin, E.I. 2005. Supercritical Steam Cycle for Nuclear Power Plant. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. Volume.235. Page 1651-1664.
- Utami, R., dan Yanti Y. 2013. Desain Reaktor Air Superkritis (*Super Critical Water Reactor*) dengan Bahan Bakar Thorium. *Jurnal Ilmu Dasar*. Volume 14. No 1. Page 1-6.
- Walter, A. E., and Reynolds, A. B., 1981, *Fast Breeder Reactor*. Pergamon Press. U.S.A.
- Wilson, J.N., Bidaud, A., Callan, N., Chambon, R., David, A., Guillemin, P., Ivanov, E., Nuttin, A., Meplan, O. 2009. Economy of Uranium Resources In A Three-component Reactor Fleet with Mixed Thorium/Uranium Fuel Cycles. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Page 404 – 408.
- Wiley, J. 1992. *Modern Physisc*. Departement of Physics. Universitas Indonesia.
- World Nuclear. 2016. <http://www.worldnuclear.info/world-population/>. *World Population: Past, Present, and Future*. Diakses pada tanggal 20 Mei 2016.
- Zweifel, P. F.1973. *Reactor Physics*.USA: McGraw-Hill. Page 1, 2, 10, 74.