

**PERHITUNGAN LAJU REAKSI NEUTRON DALAM REAKTOR SCWR
(*SUPERCRITICAL WATER REACTOR*) MODEL PERANGKAT
(*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL BERBAHAN BAKAR URANIUM**

(Skripsi)

Oleh

Sharen Herya Reafinola



JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS LAMPUNG

2021

ABSTRAK

PERHITUNGAN LAJU REAKSI NEUTRON DALAM REAKTOR SCWR (*SUPERCRITICAL WATER REACTOR*) MODEL PERANGKAT (*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL BERBAHAN BAKAR URANIUM

Oleh

Sharen Herya Reafinola

Telah dilakukan perhitungan laju reaksi fisi dan penangkapan neutron dengan filter dan tanpa filter model geometri heksagonal menggunakan program SRAC kode REACT. Penelitian ini menggunakan bahan bakar uranium-235 dan uranium-238. Hasil perhitungan Laju reaksi fisi pada material 1 dan material 3 dengan menggunakan filter dan tanpa filter meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase pengayaan U^{235} . Nilai tertinggi pada laju reaksi fisi neutron material 1 tanpa filter terdapat pada *mesh* ke-2 dengan pengayaan 1% yaitu sebesar $3,0747 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Sedangkan laju reaksi penangkapan neutron menggunakan filter meningkat seiring meningkatnya persentase pada U^{235} dengan pengayaan 1% *mesh* ke-5 yaitu dengan nilai sebesar $9,8627 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Kemudian Laju reaksi fisi neutron tanpa filter pada material 3 meningkat seiring dengan meningkatnya persentase pada pengayaan 1% *mesh* ke-5 yaitu sebesar $9,4778 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Hal ini dikarenakan meningkatnya persentase pada pengayaan U^{235} pada pin bahan bakar. Sedangkan laju reaksi penangkapan menggunakan filter pada material 1 dengan persentase 1% *mesh* ke-2 memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan filter yaitu sebesar $9,8181 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s.

Kata kunci : Uranium, SCWR, Laju Reaksi Neutron dan SRAC.

ABSTRACT

STUDY NEUTRON REACTION RATE CALCULATION IN THE REACTOR SCWR HEXAGONAL ASSEMBLY USING URANIUM AS FUEL MATERIALS

By

Sharen Herya Reafinola

Calculation of the rate of fission and neutron capture reactions with a filter and without a filter has been carried out using a hexagonal geometry model using the REACT code SRAC program. This research uses uranium-235 and uranium-238 as fuel. Calculation results The rate of fission reaction in material 1 and material 3 using a filter and without a filter increases with the increase in the percentage value of U235 enrichment. The highest value for the neutron fission reaction rate of material 1 without a filter is found in the second mesh with 1% enrichment, which is 3.0747×10^{-2} reactions/cm³s. Meanwhile, the rate of neutron capture reaction using a filter increases with the increase in the percentage of U235 with 1% enrichment of the 5th mesh, with a value of 9.8627×10^{-2} reactions/cm³s. Then the unfiltered neutron fission reaction rate on material 3 increased along with the increasing percentage in the 5th 1% enrichment mesh, which was 9.4778×10^{-2} reactions/cm³s. This is due to the increasing percentage of U235 enrichment in the fuel pin. While the rate of capture reaction using a filter on material 1 with a percentage of 1% of the second mesh has the highest value compared to the filter, which is 9.8181×10^{-2} reactions/cm³s.

Keywords: uranium, SCWR, neutron reaction rate, SRAC.

**PERHITUNGAN LAJU REAKSI NEUTRON DALAM REAKTOR SCWR
(*SUPERCRITICAL WATER REACTOR*) MODEL PERANGKAT
(*ASSEMBLY*) HEKSAGONAL BERBAHAN BAKAR URANIUM**

Oleh

Sharen Herya Reafinola

Skripsi

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

Pada

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



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2021**

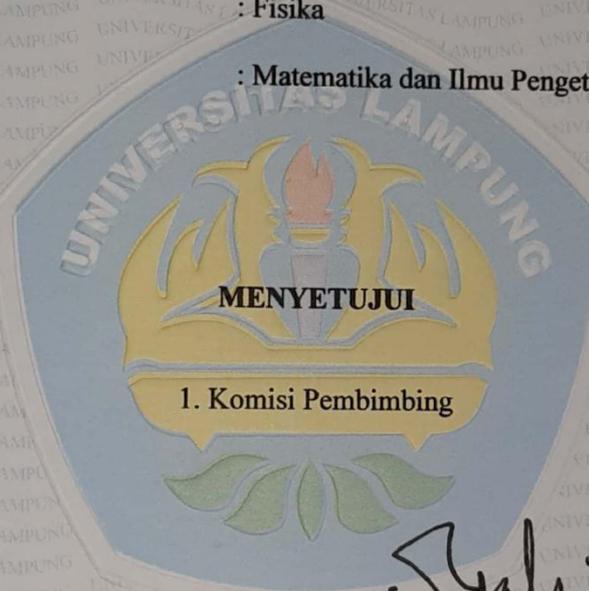
Judul Skripsi : **PERHITUNGAN LAJU REAKSI
NEUTRON DALAM REAKTOR SCWR
(SUPERCRITICAL WATER REACTOR)
MODEL PERANGKAT (ASSEMBLY)
HEKSAGONAL BERBAHAN BAKAR
URANIUM**

Nama Mahasiswa : **Sharen Herya Reafinola**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1517041066**

Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. Komisi Pembimbing

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

Drs. Stafriadi M.Si
NIP. 196108211992031002

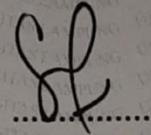
2. Ketua Jurusan Fisika

Gurun Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

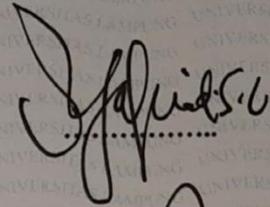
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

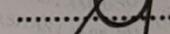
Ketua : Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.



Sekretaris : Drs. Syafriadi, M.Si.



**Penguji
Bukan Pembimbing : Prof. Drs. Simon Simbiring, Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Supto Dwi Yuwono, S.Si., M.T.
NIP. 197407052000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 14 Desember 2021

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak ada 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, 07 Desember 2021



Sharen Herya Reafinola
NPM. 1517041066

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Kotabumi, Lampung Utara pada tanggal 07 Agustus 1997.

Anak kedua dari pasangan Bapak Yasir Arafat dan Ibu Hermawati. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 02 Tatakarya tahun 2009, SMP Negeri 01 Tatakarya tahun 2012, dan SMA Negeri 01 Abung Semuli tahun 2015.

Selanjutnya, penulis diterima sebagai mahasiswa pada tahun 2015 di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam melalui jalur SNMPTN.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di kegiatan kampus yaitu Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) dan pada tahun 2015-2018. Penulis pernah melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di LIPI Serpong Tangerang Selatan dengan Judul “Laju Korosi Baja Karbon pada Media Larutan Air Laut dan Larutan Simulasi dengan Metode Polarisasi”. Penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Donomulyo, Kecamatan Banjit, Kabupaten Way Kanan.

Selanjutnya penulis melakukan penelitian dengan judul “Perhitungan Laju Reaksi Neutron dalam Reaktor SCWR (*Supercritical Water Reactor*) Model Perangkat (*Assembly*) Annular Berbahan Bakar Uranium” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

MOTTO

“PERCAYALAH HAL YANG MUNGKIN HARI INI ANDA ANGGAP
SUSAH BAKAL TERLEWATI, JANGAN PERNAH MENYERAH
APAPUN YANG TERJADI” *Shareen Hr*

“SELAGI MASIH ADA DO'A IBUMU MAKA ALLAH AKAN
SELALU MERESTUI SEMUA JALAN DAN NIAT BAIKMU”

Shareen Hr

Kuniatkan karyaku ini karena :

ALLAH

Aku Persembahkan Karyaku untuk :

Mamakku tercinta dan bapakku yang selalu mendo'akanku, menyemangatiku, dan sebagai motivator terbesar dalam hidup ini.

Saudariku Syarah, adik-adikku Rifky dan Savera serta keluarga besar ku sebagai penyemangatku.

Dosen-dosen yang mengajarkan banyak ilmu dan selalu membimbingku.

Sahabat dan teman-teman seperjuangan Fisika FMIPA Unila 2015.

“Almamater Tercinta”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“Perhitungan Laju Reaksi Neutron dalam Reaktor SCWR (*Supercritical Water Reactor*) Model Perangkat (*Assembly*) Annular Berbahan Bakar Uranium”**. Tujuan menulis skripsi ini yaitu untuk memenuhi syarat memperoleh gelar S1 fisika di Universitas Lampung dan melatih mahasiswa dalam berfikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan baik dalam isi maupun cara penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran guna perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya. Aamiin.

Bandar Lampung, 07 Desember 2021
Penulis,

Sharen Herya Reafinola

SANWACANA

Puji Syukur penulis panjatkan kepada kehadiran Allah yang Maha Esa, karena penulis dapat mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dan membantu penulis dalam menyelesaikan Skripsi diantaranya:

1. Ibu Dra. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si., I yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang mendukung dari awal hingga akhir penulisan.
2. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si., sebagai pembimbing II yang telah mengoreksi format penulisan, serta masukan-masukan dan saran selama penulisan skripsi.
3. Bapak Prof, Drs. Simon Simbiring, Ph.D. Sebagai pembimbing penguji yang telah mengoreksi dan memberikan kritik dan saran selama penulisan skripsi.
4. Bapak Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. sebagai Pembimbing Akademik, yang telah memberikan bimbingan serta nasihat dari awal hingga akhir perkuliahan sampai menyelesaikan tugas akhir.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. Selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA unila yang telah memberikan bimbingan serta arahan.
6. Para dosen-dosen yang telah mengajarku dan memberi banyak ilmu selama perkuliahan di Fisika FMIPA Unila.
7. Emak dan Bapakku tercinta yang telah mendo'akan membesarkan, menyemangati, mendidik, serta sebagai motivator terbesar dihidupku.
8. Saudariku syarah serta adik-adikku Rifky dan Savera, keluarga besar yang selalu menyemangatiku.

9. Dicky Kurniawan yang telah mendo'akan, membantu, menemani serta mendukungku.
10. Sahabat-sahabatku, Selly, Nanda, Desma, Ria, Intan, Yesi Mba Widi, Vera, Dewi, Tya, Ulfa, Risky dan Putri yang selalu menyemangatiku dan membantu.
11. Reakan-rekan seperbimbingan Mutte, Wara, Siska, Hasni, Yogi dan Bowo yang memberi doa dan semangat dan bantuannya.
12. Teman-teman seperjuangan Fisika FMIPA Unila angkatan 2015 yang telah memberikan semangat dan bantuan.
13. Seluruh pihak yang telah membantu menyelesaikan tugas akhir ini.

Bandar Lampung, 07 Desember 2021

Penulis

Sharen Herya Reafinola

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
HALAMAN JUDUL	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
LEMBAR PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv

DAFTAR TABEL	xvi
---------------------------	------------

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Uranium.....	6
2.2. Laju Reaksi Neutron	7
2.3. Reaksi Fisi.....	10
2.4. Faktor Multifikasi	11
2.5. Reaktor Nuklir.....	12
2.5.1 Bahan Bakar (<i>fuel</i>)	14
2.5.2 Moderator.....	14
2.5.3 Batang Kendali (<i>Control Rod</i>).....	14
2.5.4 Perisai (<i>Shield</i>)	16
2.6. Reaktor <i>Supercritical Water Reactor</i> (SCWR).....	16
2.7. Persamaan Kinetika <i>Reactor</i>	18
2.8. Perangkat Lunak <i>System Reactor Atomic Code</i> (SRAC).....	19

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2. Alat dan Bahan.....	22
3.3. Prosedur Penelitian.....	22
3.3.1 Menentukan Pengayaan	22
3.3.2 Menghitung Densitas Atom	22
3.3.3 Menentukan Geometri <i>Cell</i>	23
3.3.4 Menentukan Ukuran pin.....	23
3.3.5 <i>Input Data</i> pada REACT	24
3.3.6 Perhitungan Laju Reaksi	24
3.3.7 Hasil Perhitungan	24
3.4. Diagram Alir	24

BAB IV PEMBAHASAN

4.1. Pengaruh Variasi Pengayaan Uranium-235 dan Uranium-238 terhadap Fraksi Volume dan Laju Reaksi Fisi Neutron pada Reaktor SCWR dengan Filter dan tanpa Filter.....	26
4.2. Pengaruh Variasi Pengayaan Uranium-235 dan Uranium-238 terhadap Laju Penangkapan Neutron dengan Filter dan Tanpa Filter	35

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Siklus Rantai Uranium.....	7
Gambar 2. Reaksi Fisi	11
Gambar 3. Reaktor Nuklir	13
Gambar 4. Skematika Reaktor Jenis SCWR	17
<u>Gambar 5.</u> Struktur Sistem SRAC.....	20
Gambar 6. Geometri Untuk Pij dengan Model <i>Assembly</i> Heksagonal.....	23
Gambar 7. Diagram Alir Penelitian.....	25
Gambar 8. Desain Reaktor SCWR Model <i>Assembly</i> berbentuk Heksagonal.....	27
Gambar 9. (a) Laju Reaksi Fisi Material 1 (b) Laju Reaksi Penangkapan Material 1	35
Gambar 10. (a) Laju Reaksi Fisi Material 1 (b) Laju Reaksi Penangkapan Material 1	36
Gambar 11. (a) Laju Reaksi Fisi Material 3 (b) Laju Reaksi Penangkapan Material 3	37
Gambar 12. (a) Laju Reaksi Fisi Material 3 (b) Laju Reaksi Penangkapan Material 3	38

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Karakterisasi Material	28
Tabel 2. Nilai Laju Reaksi Fisi dan Penangkapan pada Material 1 dan Material 3 Tanpa Filter	29
Tabel 3. Hasil Laju Reaksi Fisi dan Penangkapan pada Material 1 dan Material 3 dengan Filter	31
Tabel 4. Fraksi Volume dari Material yang Digunakan	28
Tabel 2. Densitas Atom dan Pengayaan Bahan Bakar	24

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi berbasis bahan bakar fosil merupakan sumber utama yang telah digunakan penduduk dunia hingga saat ini. Energi fosil seperti bahan bakar minyak dan gas alam (Frick dan Muliani, 2006). Bahan bakar tersebut merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui sehingga ketersediannya semakin berkurang karena penggunaan energi terus meningkat. Salah satu upaya agar sumber energi alternatif yang cukup memadai untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, yaitu energi nuklir (Andris, et., all. 2016). Indonesia saat ini masih bergantung terhadap energi fosil, yaitu sekitar 50% dari kebutuhan, terutama pada bahan bakar minyak dan gas bumi. Secara keseluruhan energi dalam negeri 95% masih dipenuhi oleh energi fosil yang tidak terbarukan padahal cadangan energi fosil terbatas dalam negeri (Zuhail, 2010).

Sebagian besar energi alternatif yang sekarang sedang dikembangkan merupakan energi terbarukan. Adapun energi yang tidak terbarukan salah satunya adalah energi nuklir. Meskipun demikian energi nuklir adalah salah satu energi bersih masa depan karena tidak menghasilkan emisi (Ridwan, 2009). Energi nuklir adalah salah satu sumber energi alternatif yang layak dikembangkan. Energi yang dihasilkan dalam reaksi nuklir dapat digunakan untuk membangkitkan listrik atau biasa dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Reaktor nuklir

biasanya memanfaatkan bahan fisil dan fertil. Uranium merupakan salah satu bahan fisil yang digunakan untuk bahan bakar utama pembangkit listrik tenaga Nuklir (Kidd, 2009).

Uranium merupakan bahan bakar utama pembangkit listrik tenaga Nuklir. Konsep dasar dari sebuah reaktor adalah reaksi fisi dari sebuah material. Uranium merupakan unsur terberat dari seluruh unsur alami, memiliki titik leleh yaitu 1132°C dan tergolong sebagai logam putih keperakan. Uranium memiliki nomor atom 92, proton 92, elektron 92 dan elektron valensi 6. Inti uranium mengikat 141 sampai 146 neutron. Uranium alami yang ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U-238 (99,275%), U-235(0,720%) dan U-234 (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut yang memiliki sifat fisil adalah Uranium-235 (Kidd, 2009).

Pada sebuah inti reaktor terdapat bahan bakar, selongsong, batang kendali dan pendingin reaktor (Tadeus et al., 2010). Ketika sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron, dengan fase tertentu maka inti akan mengalami pembelahan (fisi) (Zweifel, 1973). Secara umum penambahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan sebagai k -efektif atau sering disebut dengan faktor multiplikasi efektif. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor, dimana keadaan stabil keadaan stabil (kritis) dicapai jika nilai k -efektif=1 (Pramudya dan Waris, 2005). Energi yang dihasilkan dari sebuah reaktor sangat tergantung pada produksi neutron dari inti reaktor (Martha et al., 2016).

Laju reaksi fisi pada reaktor harus dikendalikan agar perubahan jumlah neutron dapat dibatasi, sehingga hanya satu neutron yang dapat diserap pada pembelahan inti berikutnya, dan dapat diperoleh reaksi berantai sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sesuai kebutuhan (Zweifel, 1973).

Secara umum dalam merancang reaktor nuklir harus memperhitungkan nilai daya suatu reaktor nuklir. Distribusi fluks neutron yang merata akan menentukan daya reaktor (Shafii, 2015). Oleh sebab itu perlu dilakukan perhitungan fluks neutron (Martha et al., 2016). Nilai fluks neutron dan penampang lintang yang dihasilkan digunakan untuk menghitung laju reaksi neutron dalam sel bahan bakar (Okumura, 2006).

Pada penelitian ini, perhitungan laju reaksi neutron yang digunakan adalah salah satu reaktor generasi IV, yaitu reaktor air superkritis atau *Supercritical Cooled Water Reaktor (SCWR)*. Yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)* pada tahun 1978. Menurut Tsiklauri, et al. (2004) pembangunan yang cukup sederhana, ukuran fisik yang lebih kecil namun mampu menghasilkan energi yang besar, sehingga SCWR juga memberikan potensi penghematan dalam hal biaya. Adapun reaktor jenis SCWR merupakan reaktor air yang bekerja di atas titik kritisair, yang beroperasi pada tekanan 25 MPa menggunakan air sebagai pendingin dan moderator dengan titik kritis air sebesar 22,1 MPa (Oka, et al., 2003). Desain SCWR lebih difokuskan untuk memperoleh efisiensi termal yang tinggi dengan konfigurasi sistem yang sederhana. Tantangan yang dihadapi peneliti pada proses laju freaksi neutron dengan reaktor jenis SCWR adalah mengembangkan desain inti yang layak dan akurat dengan memperkirakan koefisien perpindahan panas, dan mengembangkan bahan-bahan

untuk struktur bahan bakar dan inti yang cukup tahan akan korosi untuk mempertahankan keadaan kritisnya (World Nuclear, 2020).

Standart Reactor Analysis Code (SRAC) merupakan program komputasi perhitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor termal. Secara umum SRAC memiliki suatu *library* data yang terisi tampang lintang semua jenis nuklida yang ada dari berbagai sumber *library* (JENDL, JEF, ENDF). *Library* ini digunakan dalam perhitungan neutronik (fluks neutron) oleh SRAC dengan pendekatan berbeda sesuai maksud penggunaan (Okumura, 2006).

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi pengayaan Uranium-235 dan Uranium-238 terhadap fraksi volume dan laju reaksi fisi neutron pada reaktor SCWR dengan filter dan tanpa filter.
2. Bagaimana pengaruh variasi pengayaan Uranium-235 dan Uranium-238 terhadap laju penangkapan neutron dengan filter dan tanpa filter.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah.

1. Jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor jenis SCWR model heksagonal dengan pin asimetris.
2. Bahan bakar yang digunakan adalah Uranium-235 dan Uranium-238.

3. Variasi pengayaan sebesar 1%, 2%, 3%, 4% dan 5%.
4. Perhitungan laju reaksi dengan dan tanpa filter.
5. Menggunakan perangkat analisis SRAC.
6. Menggunakan perangkat keras *Acer Aspire One D270*.
7. Dikerjakan dilaboratorium Fisika Nuklir Universitas Lampung.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengaruh variasi pengayaan Uranium-235 dan Uranium-238 terhadap fraksi volume dan laju reaksi fisi neutron pada reaktor SCWR dengan filter dan tanpa filter.
2. Pengaruh variasi pengayaan Uranium-235 dan Uranium-238 terhadap laju penangkapan neutron dengan filter dan tanpa filter.

1.5. Manfaat Penelitian

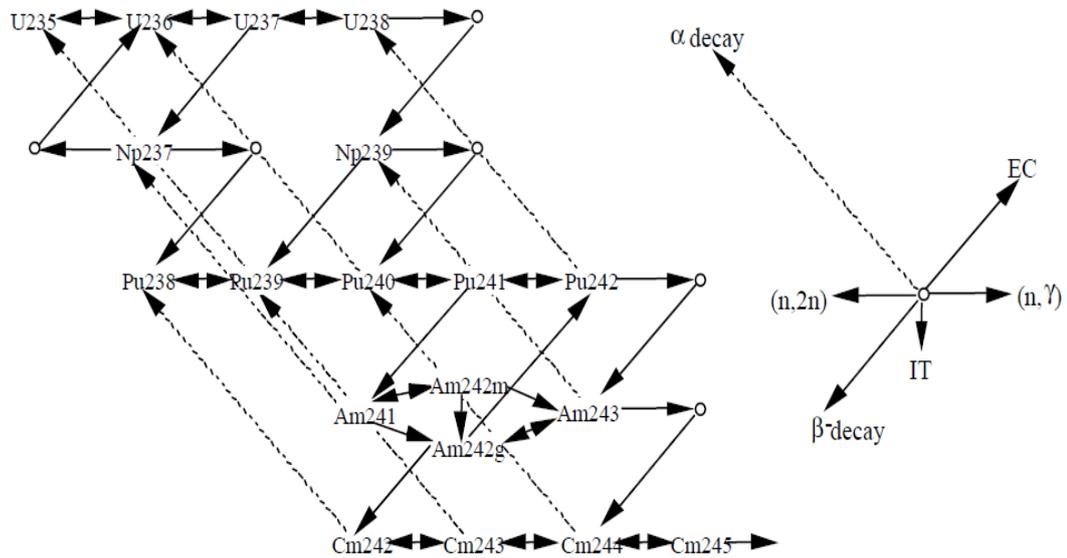
Manfaat dari penelitian ini yaitu untuk mendukung perkembangan penelitian dibidang reaktor nuklir, khususnya memberikan informasi ilmiah mengenai perhitungan laju reaksi neutron dengan menggunakan SCWR.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Uranium

Martin Klaproth adalah seorang kimiawan Jerman yang pertama kali menemukan uranium pada tahun 1789 (Kidd, 2009). Uranium adalah unsur terberat dari seluruh unsur alami, memiliki titik leleh yaitu 1132 °C dan tergolong sebagai logam putih keperakan. Simbol kimia uranium adalah U (Cothorn dan Rebers, 1991). Uranium memiliki nomor atom 92, proton 92, elektron 92 dan elektron valensi 6. Inti uranium mengikat 141 sampai 146 neutron. Uranium alami yang ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U-238 (99,275%), U-235 (0,720%) dan U-234 (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut yang memiliki sifat fisil adalah Uranium-235 (Kidd, 2009). Sedangkan uranium-238 bersifat fertil, namun dapat pula bersifat fisil dengan cara ditransmutasi menjadi plutonium-239. Uranium yang terkandung dalam batuan *phosphate* diperkirakan 22 juta ton dan di air laut 4200 juta ton (Husna, 1998).

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 kemudian berkembang untuk pembangkit listrik.



Gambar 1. Skema Peluruhan Uranium

2.2. Laju Reaksi Neutron

Pada reaktor nuklir, laju reaksi neutron hanya terjadi pada daerah bahan bakar. Sedangkan pada kelongsong dan pendingin tidak terjadi karena pada kedua daerah tersebut tidak terjadi reaksi fisi. Laju reaksi fisi mengalami penurunan di daerah energi tinggi akibat adanya peristiwa tumbukan elastik yang menyebabkan neutron lebih mudah kehilangan energi (Bell dan Glastone, 1970). Neutron dalam reaktor dapat mempunyai energi antara nol sampai ke energi neutron hasil pembelahan. Energi ini akan berkurang karena neutron yang bergerak dari tempat berlangsungnya reaksi pembelahan akan mengalami beberapa peristiwa yang menyebabkan energinya berkurang. (Prayoto, 1988).

Kritikalitas efektif atau faktor multiplikasi efektif ($k = k_{eff}$) merupakan perbandingan dari laju pembangkitan neutron pada medium dari reaksi fisi dengan laju pengurangan neutron akibat serapan neutron dan akibat kebocoran neutron melalui permukaan medium reaktor nuklir. Jika suatu medium atau reaktor

nuklir memiliki nilai $k > 1$, maka laju penambahan neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi lebih banyak daripada laju pengurangan neutron akibat serapan neutron dan kebocoran neutron. Dalam kondisi ini, jumlah neutron dalam medium menjadi bertambah. Fluks neutron menjadi bertambah dan laju reaksi fisi juga bertambah. Hal ini berarti daya yang dihasilkan dari reaksi fisi pada medium atau reaktor tersebut naik. Kondisi ini disebut sebagai kondisi superkritis (Deuderstadt dan Hamilton, 1976).

Fluks neutron adalah banyaknya neutron yang lewat pada tiap satuan luas per sekon. Secara matematis dinyatakan:

$$\varphi = N v$$

(1)

dimana:

φ = fluks neutron (neutron/cm².s)

N = densitas atom (atom/cm²)

v = kecepatan neutron (cm/s)

Tampang lintang dari satu inti bahan terhadap neutron merupakan suatu ukuran kemungkinan terjadinya interaksi antara inti bahan tersebut dengan neutron yang datang. Tampang lintang dari satu inti disebut sebagai mikroskopik sedangkan tampang lintang total dari suatu bahan disebut tampang lintang makroskopik. Dengan mengetahui fluks neutron dan penampang lintang, maka besarnya tingkat laju reaksi dapat ditentukan. Laju reaksi didasarkan pada jumlah interaksi inti neutron dinyatakan sebagai:

$$R = \varphi_{x,g} (\sigma N) = \varphi_{x,g} \Sigma_{x,g}$$

(2)

dimana:

R = Laju reaksi (reaksi/cm³s) Σ = Penampang lintang makroskopik (cm⁻¹) dan σ = Penampang lintang mikroskopik (cm²)

Indeks x menunjukkan *region* dan g merupakan grup energi (Deuderstadt dan Hamilton, 1976).

Kode REACT pada SRAC berperan sebagai kode difusi yang memungkinkan perhitungan laju reaksi (fisi dan penangkapan) dengan atau tanpa filter.

1. Laju reaksi detektor tanpa filter (reaksi/cm³s) dapat dihitung dengan rumus:

$$R = \sum_{g=1}^{IGMAX} \Sigma_{x,g} \varphi_g$$

(3)

dimana:

 $IGMAX$ = Indeks grup energi maksimum.

2. Laju reaksi detektor dengan filter (reaksi/cm³s) dapat dihitung dengan rumus :

$$R = \sum_{g=1}^{IGMAX} f_g \Sigma_{x,g} \varphi_g$$

(4)

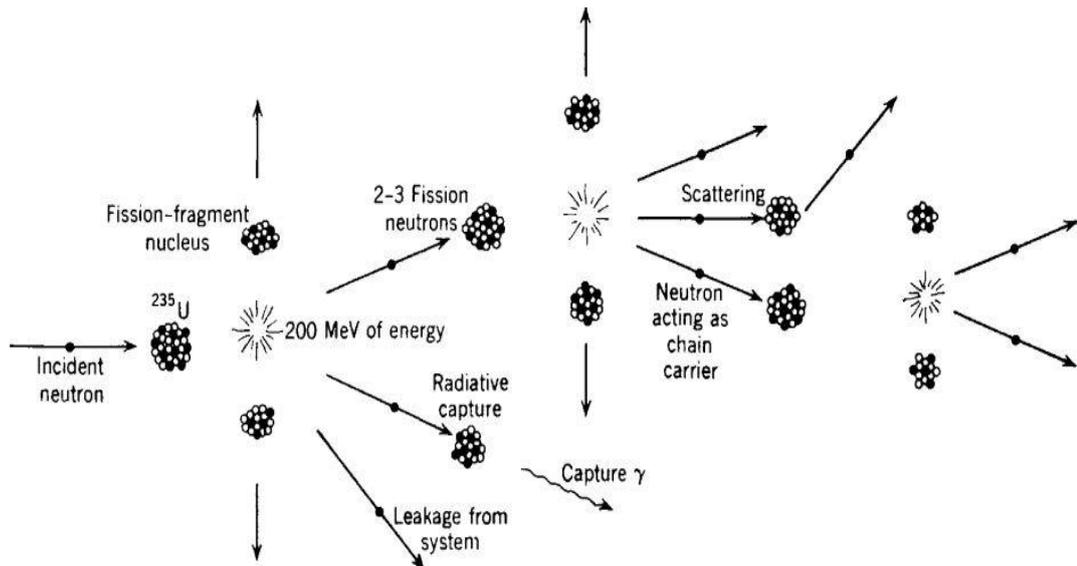
dimana:

 f_g = faktor transmisi filter (Okumura *et al.*, 2002).

2.3. Reaksi Fisi

Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat yang bersifat fisil seperti U-235 atau Pu-239 menjadi inti yang lebih ringan massanya yang disertai dengan pelepasan energi. Setiap reaksi fisi menghasilkan energi yang besarnya sekitar 200 MeV. Reaksi fisi sulit terjadi secara spontan. Reaksi fisi akan terjadi apa bila inti berat ditumbuk oleh sebuah neutron. Partikel neutron yang telah menumbuk inti berat seperti U-235 atau Pu-239 lalu akan memproduksi (2-3) neutron yang baru. Neutron tersebut dapat menumbuk kembali inti berat seperti U-235 atau Pu-239 untuk membentuk reaksi fisi berikutnya. Reaksi ini dikendalikan dalam sebuah reaktor, karena neutron yang ditangkap adalah neutron cepat maka reaktor yang digunakan juga reaktor cepat (Andris, 2016).

Reaksi fisi uranium akan menghasilkan neutron. Neutron yang dihasilkan dapat menumbuk kembali inti uranium untuk membentuk reaksi fisi selanjutnya. Mekanisme ini terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat hingga membentuk reaksi berantai tak terkendali. Akibatnya terjadi pelepasan energi yang besar secara singkat. Siklus rantai U238 hingga menghasilkan U235 dan hasil fisi yang lain Fisi dapat terjadi spontan akibat irradiasi neutron. Reaksi fisi melepaskan sejumlah energi yang setara antara massa diam neutron dan hasil fisi dengan jumlah massa diam inti awal (Ardra, 2018). Untuk mengontrol reaksi berantai dan pelepasan energi, diperlukan mekanisme pengendali seperti batang kendali yang terbuat dari bahan penyerap neutron. Mekanisme inilah yang mempertahankan kestabilan reaksi berantai dan daya keluaran (Duderstard dan Hamilton, 1976).



Gambar 2. Reaksi fisi (Duderstadt *et al.*, 1976).

2.4. Faktor Multifikasi

Faktor multiplikasi (k_{eff}) adalah besaran yang menunjukkan perbandingan antara jumlah neutron pada suatu generasi dengan jumlah populasi neutron pada generasi berikutnya pada suatu medium tertentu. Faktor multiplikasi dibagi menjadi dua yaitu k_{eff} (k efektif) dan k_{inf} (k infintif). Perbedaan antara keduanya yaitu jika medium mempunyai dimensi ruang yang terbatas maka faktor multiplikasi disebut dengan faktor multifikasi k_{eff} , sedangkan jika mediumnya tak berhingga maka disebut faktor multiplikasi k_{inf} (Richardina, 2015). Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor yang mencapai keadaan stabil (kritis) jika nilai $k_{\text{eff}} = 1$ dapat dinyatakan dengan Persamaan 5.

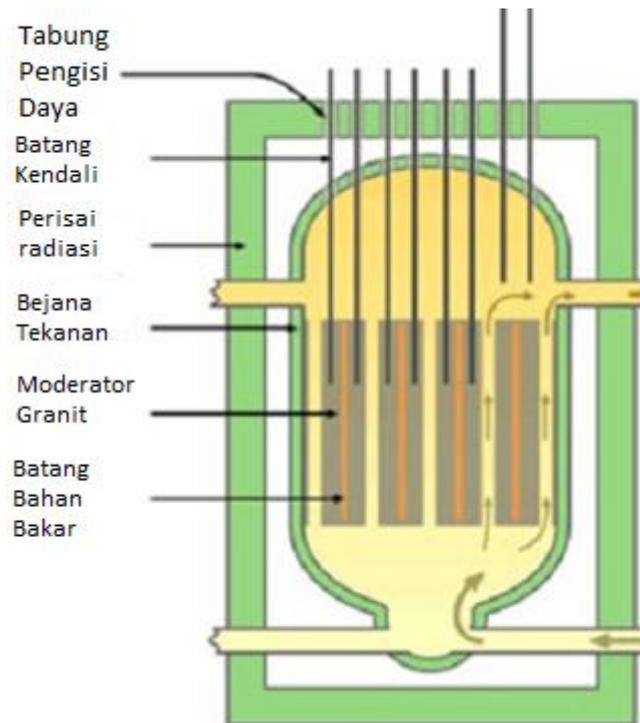
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{jumlah neutron pada generasi sebelumnya}} \quad (5)$$

jika besarnya $k_{\text{eff}} > 1$ disebut reaktor superkritis yang artinya jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu atau jumlah neutron bertambah, jika $k_{\text{eff}} = 1$ reaktor dalam keadaan kritis artinya jumlah neutron tidak berkurang atau pun bertambah tetapi konstan (tetap), dan jika besarnya nilai $k_{\text{eff}} < 1$ disebut reaktor subkritis yang artinya jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu atau jumlah neutron berkurang (Zweifel, 1973).

2.5. Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir merupakan sebuah peralatan sebagai tempat berlangsungnya reaksi berantai, fisi nuklir terkendali untuk menghasilkan energi nuklir, Radioisotop atau nuklida baru (World Nuclear, 2010). Dalam reaktor nuklir neutron digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi inti pada inti berat. Reaksi fisi ini menghasilkan inti ringan (*fission product*), beberapa neutron dan energi sebesar 200 MeV (Deuderstadt dan Hamilton, 1976).

Tujuan utama dalam laju reaksi neutron dan operasi reaktor nuklir adalah pemanfaatan energi atau radiasi yang dilepaskan oleh reaksi berantai yang terkendali dan mempertahankan peristiwa fisi nuklir dalam inti reaktor. Reaktor moderen dibuat lebih kompleks, tidak hanya bahan bakar yang dibuat dengan sangat hati-hati tetapi juga menyediakan pendingin (*coolant*) selama berlangsungnya reaksi fisi dan pelepasan energi (Deuderstadt dan Hamilton, 1976).



Gambar 3. 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. Persyaratan utama untuk bahan yang akan digunakan dalam sistem reaktor ini yaitu memiliki stabilitas di bawah dimensi radiasi, di bawah tekanan atau tanpa tekanan, sifat mekanik (kekuatan tarik, *ductility*, ketahanan mulur, tidak mudah retak, kekuatan tekan) dan tahan terhadap korosi akibat cairan pendingin reaktor (Yvon, 2009). Adapun komponen dari sebuah reaktor nuklir adalah sebagai berikut.

2.5.1 Bahan Bakar (*fuel*)

Bahan bakar nuklir merupakan bahan yang akan menyebabkan terjadinya reaksi fisi berantai berlangsung sebagai sumber energi nuklir. Terdapat dua jenis bahan bakar nuklir yaitu bahan fisil dan bahan fertil. Bahan fisil adalah unsur atau atom

yang langsung dapat membelah apabila dikenai neutron, sedangkan bahan fertil merupakan suatu unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah setelah dikenai neutron tetapi akan membentuk bahan fisil. Bahan bakar yang biasa digunakan dalam reaktor nuklir adalah U_{233} , U_{235} , Pu_{239} , dan Th_{232} (Lewis, 2008).

2.5.2 Moderator

Moderator adalah komponen reaktor yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (+ 2 MeV) menjadi neutron dengan energi termal (+140,02 - 0,04 eV) agar dapat bereaksi dengan bahan bakar nuklir. Selain itu, moderator juga berfungsi sebagai pendingin primer. Syarat bahan moderator adalah atom dengan nomor massa kecil, memiliki tampang lintang serapan neutron yang kecil, memiliki tampang lintang hamburan yang besar, sesuai dengan jenis reaktor yang akan didesain dan memiliki daya hantar panas yang baik serta tahan terhadap korosi. Moderator merupakan material yang memperlambat kelajuan neutron, moderator yang umum digunakan adalah air (Lewis, 2008).

2.5.3 Batang Kendali (*Control Rod*)

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 dan memiliki waktu hidup yang panjang (tidak mudah terbakar). Pemilihan material batang kendali tergantung pada desain reaktor nuklir yang digunakan. Material batang kendali yang digunakan dalam reaktor nuklir, memiliki karakteristik memiliki sifat konduktivitas panas yang cukup tahan terhadap panas dan radiasi, tidak mudah korosif, material harus cukup kuat untuk mematikan

reaktor nuklir, dan memiliki tampang lintang serapan neutron yang tinggi (Chanakya, dkk., 2001).

Bahan material yang sering digunakan untuk pembuatan batang kendali adalah Hafnium (Hf), paduan Silver-Indium-Cadmium (Ag-In-Cd), dan Boron (B). Selama kondisi superkritis daya yang dibebaskan oleh sebuah reaktor meningkat. Jika kondisi ini tidak dikendalikan, meningkatnya daya dapat mengakibatkan mencairnya sebagian atau seluruh teras reaktor, dan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan sekitar. Pengendalian ini dilakukan oleh sejumlah batang kendali yang dapat bergerak keluar masuk teras reaktor (Chanakya, dkk., 2001).

Jika reaktor menjadi superkritis, batang kendali secara otomatis bergerak masuk lebih dalam ke dalam teras reaktor untuk menyerap kelebihan neutron yang menyebabkan kondisi itu kembali ke kondisi kritis. Sebaliknya, jika reaktor menjadi subkritis, batang kendali sebagian ditarik menjauhi teras reaktor sehingga lebih sedikit neutron yang diserap. Dengan demikian, lebih banyak neutron yang tersedia untuk reaksi fisi dan reaktor kembali ke kondisi kritis. Untuk menghentikan operasi reaktor, batang kendali dimasukkan penuh sehingga seluruh neutron diserap dan reaksi fisi berhenti (Chanakya, dkk., 2001).

2.5.4 Perisai (*Shield*)

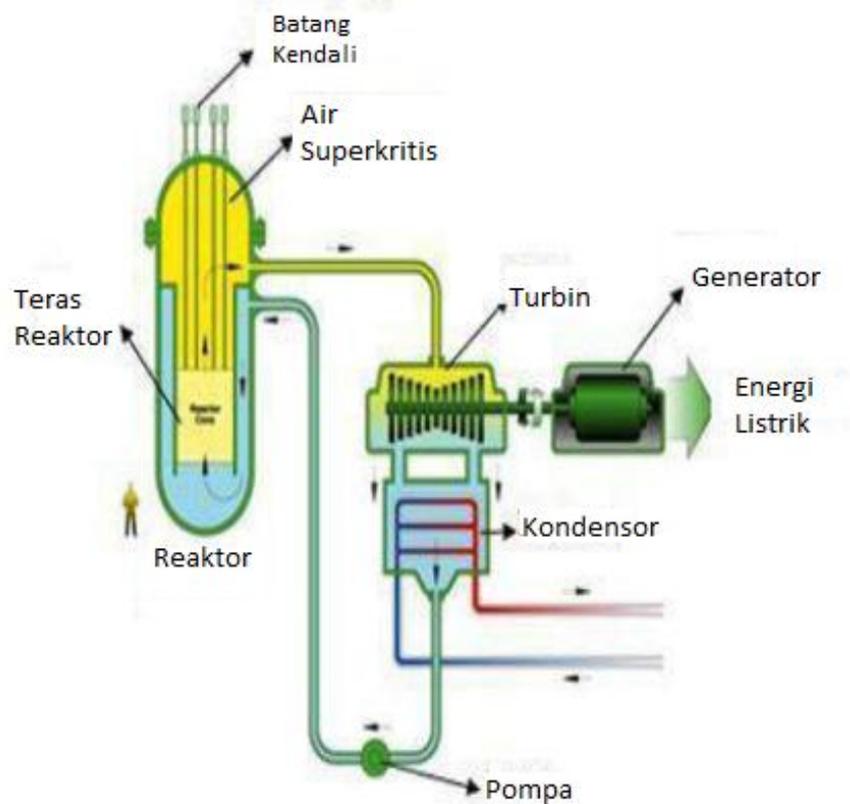
Perisai berfungsi sebagai penahan agar radiasi hasil fisi bahan tidak menyebar pada lingkungan luar dari sistem reaktor, umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat dan struktur baja (World Nuclear, 2010). Pada Inti-inti atom dari hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Radiasi yang telah dihasilkan oleh reaktor yaitu radiasi partikel alfa, beta, produk fisi, sinar gamma, dan

neutron. Untuk menahan radiasi umumnya reaktor dikelilingi oleh perisai beton. Bahan perisai yang biasanya digunakan adalah timbal (Pb82), bismuth (Bi83), tungsten (W74) sebagai pelindung radiasi sinar X, besi (Fe26) sebagai pelindung radiasi gamma, Kadmium (Cd48) dan Boron (B5) sebagai pelindung radiasi neutron (Soentono, 1998).

2.6. Reaktor *Supercritical Water Reactor* (SCWR)

Reaktor *Supercritical Water Reactor* (SCWR) saat ini dipelajari sebagai salah satu reaktor nuklir dari enam konsep reaktor Generasi IV karena efisiensi termodinamika yang tinggi sehingga terjadi peningkatan yang signifikan dalam daya turbin dan efisiensi termal pembangkit listrik dan keuntungan ekonomi (Gen IV, 2002). Saat ini, sejumlah konsep reaktor SCWR yang sudah ada, seperti reaktor SCWR di Amerika, CANDU-SCWR di Kanada, HPLWR (*High Performance Light Water Reactor*) di Eropa, Super LWR di Jepang dan SCWR di Korea. Jenis reaktor SCWR yang memiliki keuntungan lebih besar saat ini adalah reaktor LWR (*Light Water Reactor*) (Reiss et al., 2010).

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 4.



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

Desain SCWR mampu menghasilkan efisiensi termal yang tinggi dengan konfigurasi sistem yang sederhana. Namun, disisi lain, SCWR masih harus mengembangkan desain inti yang layak, dapat memperkirakan koefisiensi perpindahan panas dan mengembangkan bahan-bahan untuk struktur bahan bakar dan inti yang tahan korosi dalam mempertahankan keadaan superkritis (Shan et al., 2010). Tujuan utama dari desain SCWR adalah untuk mendapatkan energi listrik dengan harga per kw yang lebih murah, selain itu SCWR diharapkan digunakan untuk memproduksi hidrogen yang memanfaatkan temperatur tinggi (Suwoto dan Zuhair, 2012).

2.7. Persamaan Kinetika Reaktor

Persamaan kinetika reaktor titik adalah persamaan differensial tingkat satu untuk menghitung daya reaktivitas yang dapat diselesaikan dengan progeaktivitas dengan ram MATLAB (*Matrix Laboratory*) (Haris, 2017). Materi kinetik reaktor diturunkan dari persamaan transport bergantung waktu yang disederhanakan menjadi persamaan difusi bergantung waktu. Untuk mengetahui hubungan antara reaktivitas dengan populasi neutron, digunakanlah analisis kinetika reaktor yang menganggap bahwa teras reaktor merupakan titik dalam rangka sehingga proses simulasi dinamika reaktor dapat mudah dilakukan. Persamaan yang digunakan analisis dinamakan persamaan point kinetik (kinetika reaktor titik) yang merupakan persamaan diferensial simultan tingkat satu. Adapun rumus persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{eff}}{\Lambda} + \sum_{i=1}^G \lambda_i C_i(t) \quad (6)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \lambda_1 C_1(t) + \frac{\beta_1}{\lambda} p(t) \quad (7)$$

dimana:

$p(t)$: daya reaktor pada saat t,

$C_1(t)$: konsentrasi nuklida-nuklida *precursor* neutron tunda grup 1 pada saat t,

Λ : waktu generasi neutron,

β_1 : fraksi neutron tunda grup 1,

β_{eff} : fraksi neutron tunda efektif dari seluruh grup (total),

λ_1 : tetapan peluruhan *precursor* neutron tunda grup 1,

$\rho(t)$: reaktivitas pada saat t,

t : perubahan waktu,

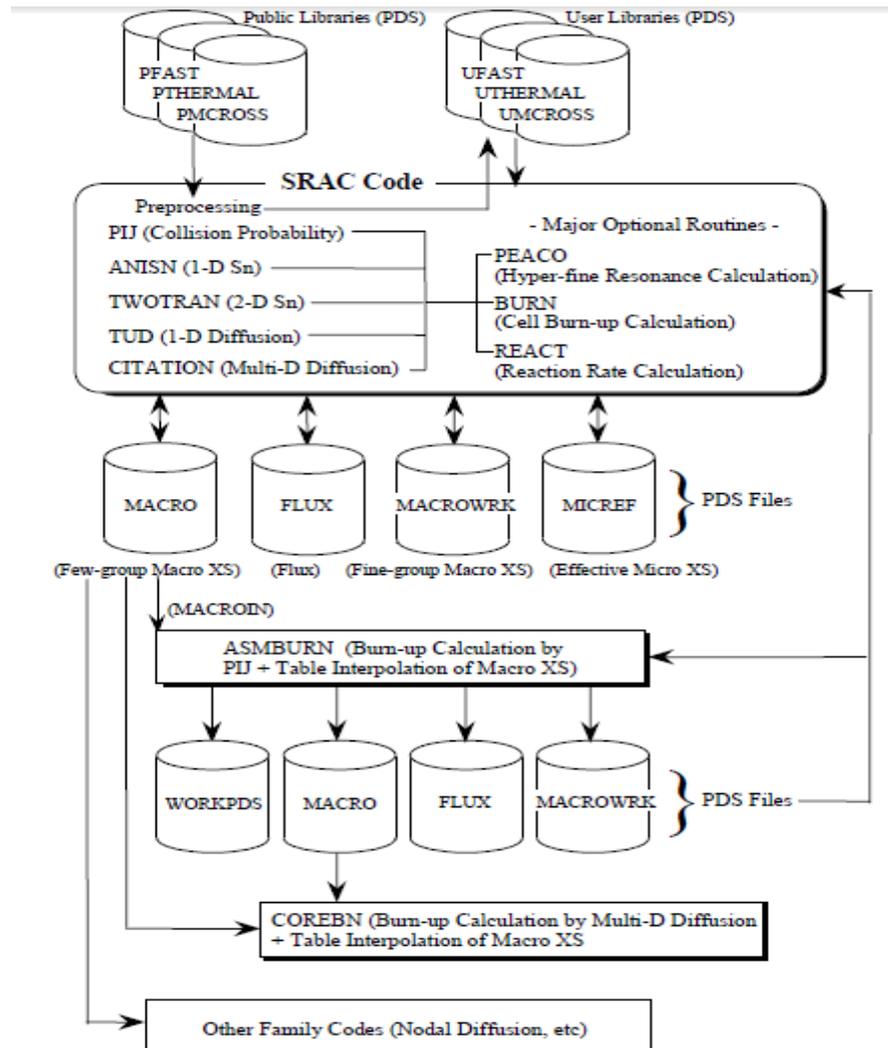
I : indeks grup energy 1,2,...6 (Rouf, 2014)

2.8. Perangkat Lunak *System Reactor Atomic Code (SRAC)*

System Reactor Atomic Code (SRAC) adalah sebuah sistem kode untuk analisis penghitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor termal (Okumura, 2006). SRAC mulai dikembangkan pada tahun 1978 sebagai standar untuk kode analisis reaktor termal di badan energi atom Jepang (Japan Atomic Energy Agency/JAEA) (Okumura, 2007).

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

1. PIJ: kode probabilitas tumbukan yang dikembangkan oleh JAERI.
2. ANISN: kode transport satu dimensi (SN) yang terdiri dari tiga jenis geometri slab (X), silinder (Y) dan bola (RS).
3. TWOTRAN: kode transport dua dimensi (SN) yang terdiri tiga jenis geometri slab (X-Y), silinder (R-Z) dan lingkaran (R- θ).
4. TUD: kode persamaan difusi satu dimensi yang dikembangkan oleh JAERI.
5. CITATION, yaitu kode untuk persamaan difusi multi-dimensi yang terdiri dari 12 jenis geometri termasuk segitiga dan segi enam (heksagonal), (Okumura, 2006).



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

SRAC adalah system yang terdiri dari penyimpanan data (*libraries*) neutron (JENDL-3.3, JENDL-3.2, END/B-VI, JEF-2.2, dan sebagainya), dan lima kode dasar untuk perpindahan neutron dan perhitungan difusi. Adapun struktur dari sistem SRAC adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

SRAC terdapat file *input* dan file *output*, file input SRAC dapat diedit sesuai dengan desain reaktor yang diinginkan. Apabila pemasukan data pada SRAC telah selesai kemudian dijalankan maka file *output* standar akan memberikan informasi tertulis untuk memeriksa apakah serangkaian perhitungan telah selesai atau tidak.

Apabila bagian akhir hasil perhitungan (*output*) belum sampai pada pesan seperti dibawah.

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

Maka harus dilakukan pengecekan pada input dan memeriksa output standar. Setelah penghitungan selesai dengan benar, langkah selanjutnya adalah mengecek apakah hasilnya telah sesuai dengan standar kemudian dianalisis terhadap hasil yang diperoleh (Okumura et al., 2002).

III. METODELOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan juli - September 2020 di jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

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

3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur dari penelitian yang akan dilakukan adalah:

3.3.1. Menentukan pengayaan

Melakukan perhitungan pengayaan misalkan 1-5% dengan interval 1 nilai densitas atom (*atomic density*) dari U-235 pada reaktor SCWR.

3.3.2. Menghitung densitas atom

Melakukan perhitungan densitas atom U-235 dan U-238 sebagai fungsi pengayaan dengan menggunakan rumus:

$$N(UO_2) = \frac{\rho(UO_2) \times N_A}{M(UO_2)} \quad (8)$$

dimana:

N = densitas atom (atom/cm³)

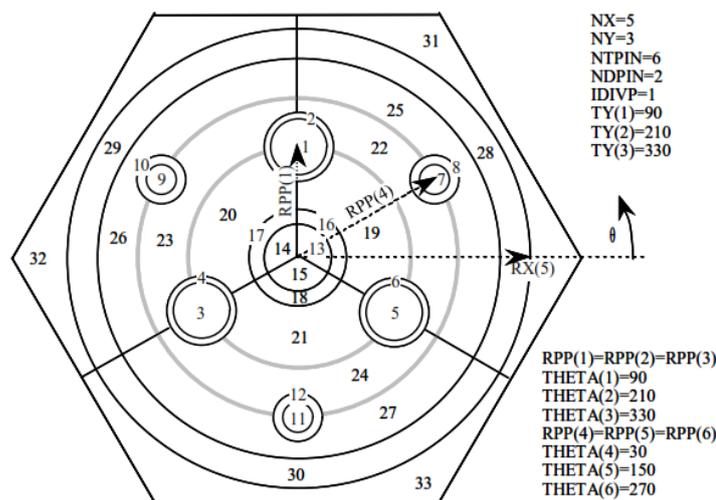
p = massa jenis (gr/cm^3)

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

M = massa molekul (gr/mol)

3.3.3. Menentukan geometri *cell*

Geometri *cell* REACT pada SRAC berbentuk persegi panjang dengan pin bahan bakar dan selongsong berbentuk lingkaran. Pada penelitian ini model *assembly* akan diubah ke bentuk heksagonal dengan pin bahan bakar dan selongsong berbentuk lingkaran yang asimetris. Berikut adalah model perangkat yang akan digunakan.



Gambar 6. Geometri untuk Pij dengan model *assembly* heksagonal (IGT = 12) (Okumura, 2002).

3.3.4. Menentukan ukuran pin

Menentukan ukuran pin bahan bakar, selongsong, dan moderator pada reaktor SCWR untuk mendapatkan nilai daya yang efisien.

3.3.5. Meng-*Input* data pada REACT

Hasil perhitungan densitas atom yang telah didapatkan digunakan sebagai data *input* REACT pada SRAC. Kemudian dilakukan perhitungan laju reaksi. Berikut ini merupakan contoh input REACT pada SRAC.

3.3.6. Perhitungan laju reaksi

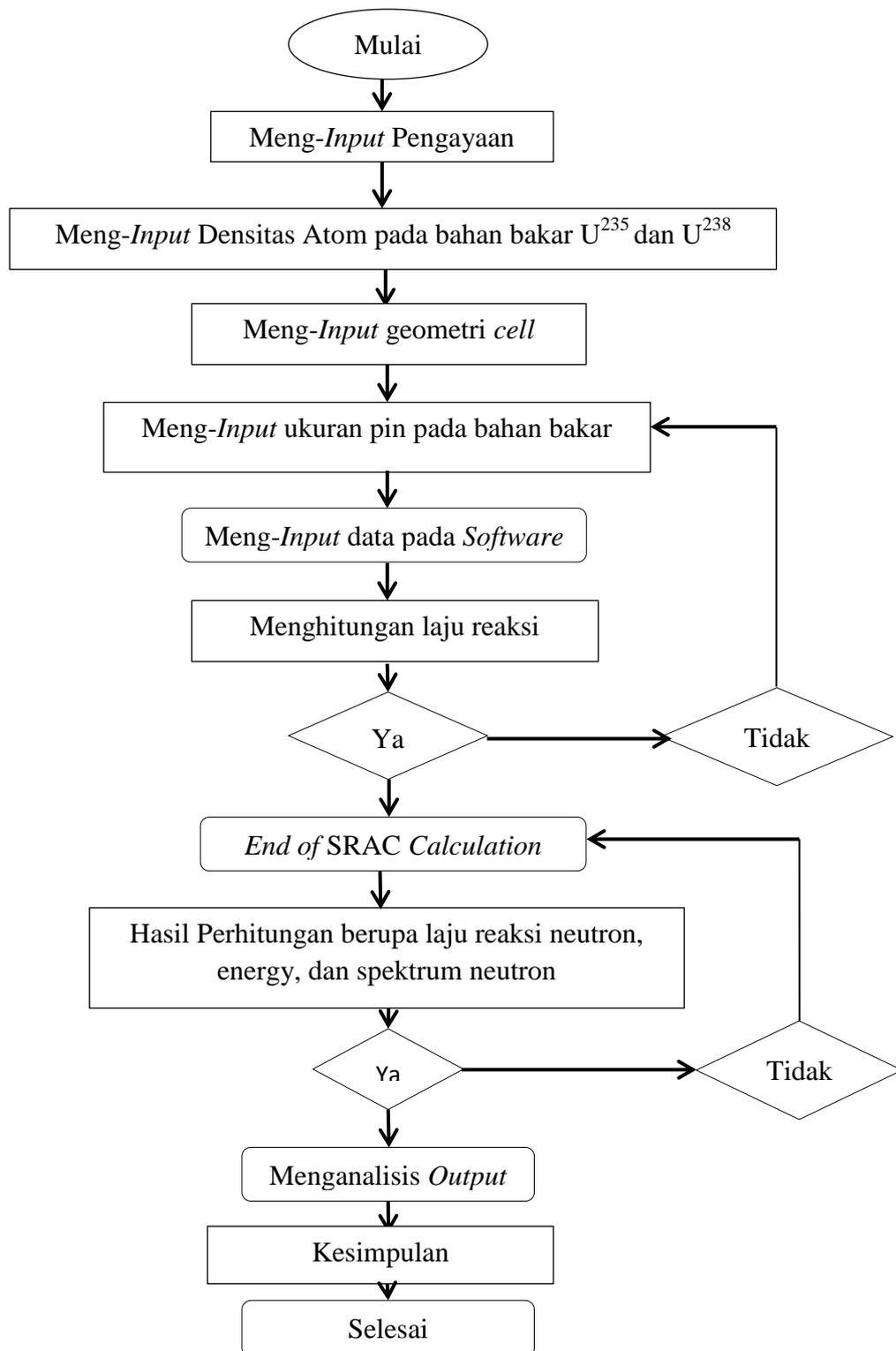
Laju reaksi dapat dihitung secara manual. Namun, perhitungan dengan cara manual akan memakan waktu yang cukup lama. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan laju reaksi dengan REACT pada SRAC.

3.3.7. Hasil perhitungan

Perhitungan laju reaksi yang telah selesai akan ditunjukkan dengan *file output* SFT98 dan SFT99. Hasil perhitungan berupa energi dan spektrum neutron, dan laju reaksi detektor dengan dan tanpa filter.

3.4. Diagram Alir

Diagram penelitian dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai material 1 meningkat seiring dengan peningkatan persentase pengayaan bahan bakar U^{235} pada nilai laju reaksi fisi neutron menggunakan detektor dengan dan tanpa filter. Sedangkan nilai laju reaksi penangkapan neutron dengan menggunakan filter ataupun tanpa filter mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya presentase pengayaan. Nilai material 3 laju reaksi fisi neutron dan reaksi penangkapan neutron dengan detektor menggunakan filter ataupun tanpa filter mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya presentase pengayaan pada material 1 didalam bahan bakar.
2. Fraksi volume pada bahan bakar Uranium-235 dan Uranium-238 memiliki nilai sebesar 9,2818% dan 7,7995% yang digunakan untuk menganalisis reaksi yang terjadi pada reaktor. Laju reaksi fisi pada material 1 dan material 3 dengan menggunakan filter dan tanpa filter meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase pengayaan pada *mesh* ke-5 dan pengayaan 5% yaitu sebesar $2,0780 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s dan $2,2589 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s.
3. Laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan tanpa filter pada material 1 dengan persentase 1% memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan filter. Pada material 3 laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan dengan filter

memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan tanpa filter pada persentase 1% *mesh* ke-5 yaitu $7,0586 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s dan 5% pada *mesh* ke-2 yaitu $7,8082 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s .

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan bahan bakar yang berbeda untuk menghitung laju reaksi neutron dengan jenis reaktor lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Andris, D., Fitriyani, D., Handayani, I., dan Feriska. 2016. Optimasi Ukuran Teras Reaktor Cepat Berbanding Gas dengan Uranium Alam Sebagai Bahan Bakar. *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 5. No 1. Hal. 21-27.
- Apriliana, 2018. Studi Perhitungan Laju Reaksi Neutron dalam Reaktor SCWR (*Supercritical Water Reactor*) Model Perangkat (*Assembly*) Heksagonal Berbahan Bakar Thorium. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. Vol. 06. No. 02.
- Ardra. 2018. *Reaksi inti nuklir, Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi*. <http://ardra.biz/tag/pengertian-reaksi-fisi/>. Diakses pada Tanggal 2 Agustus 2020.
- Bell, G. dan Glasstone, S. 1970. *Nuclear Reactor Teory*. Van Nostrand Reinhold Company. New York.
- Baindur, S. 2008. Materials Challenges for The Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR). *Bulletin of the Canadian Nuclear Society*. Vol. 29. No. 1. Hal 32-38.
- Bungiorno, J. dan Donald, M.P. 2003. Generation R&D Activities for Development of The SCWR. *Progress Report for the FY-03 Idaho National Engineering & Design*. USA: INEEL.
- Carrera., Alejandro, N., Gilberto, E.P., dan Juan, L.F. 2007. Transient and Stability Alysis of a BWR Core with Thorium-Uranium Fuel. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Vol. 35. Hal. 1550-1563.
- Chanakya., Sarma., Rawat, R., dan Sharma, A. 2001. *Simulating of Using Control Rods to Control Nuclear Reactor Core*. University of Petroleum and Energy Studies. Hal. 28-34.
- Cothorn, C. dan Richard, Rebers, P. 1991. *Radon, Radium, and Uranium in Drinkin Water*. Lewis Publishers, Inc. In The United States of America. Hal. 159-165.

- Deuderstadt, J.J. dan Hamilton, L.J. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley and Sons, Inc. New York. Hal. 447-460.
- Dewita, E. 2012. Analisis Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar Nukli Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol.14 No.1. Hal 45-56.
- Elkhadrawi, A. 2008. *Thorium Based Nuclear Reactors*. Department of Physics. University of Surrey.
- Frick, H dan Muliani, H. 2006. *Arsitektur Ekologis Kanikius*. Yogyakarta. Hal. 161.
- GEN IV, 2002. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Gen IV International Forum. Hal. 40-45.
- Husna, A.M. 1998. *Prospek Bahan Bakar Maju U-Mo Berdensitas Tinggi sebagai Bahan Bakar Reaktor Riset*. Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir IV PEBN-BATAN. Jakarta. Hal 252-258.
- Kidd, S.W. 2009. *Nuclear Fuel Resources*. New York: CRC Press. Hal. 85.
- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press. USA. Hal. 134.
- Oka, Y., Koshizuki, S., Ishiwatari, Y., dan Yamaji, A. 2003. *Conceptual Design of High Temperature Reactor Cooled by Supercritical Light Water*. ICAAP. Cordoba: Spain. Hal. 77.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihashi, K. 2002. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. JAEA. Japan. Hal. 4-26.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan. JAEA. Hal. 4-26.
- Okumura, K. 2006. *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analyses*. JAEA. Japan. Hal. 10-15.
- Okumura, K. 2007. *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analysis*. Japan: JAEA. Hal. 10-15.
- Martha, R., Shafii, M. A., dan Afdal. 2016. Analisis Laju Reaksi Neutron Dalam Sel Bahan Bakar Nuklir pada Reaktor Cepat. *Jurnal Ilmu Fisika*. Vol. 8. No.2. Hal. 70-76.
- Pramuditya, S dan Abdul, W.2005. *Analisis Neutronik, Termal-hidrolik, dan Termodinamik pada Perancangan Pressurized Water Reactor*. <http://www.scribd.com/doc/25692769/61/Gambar4-6-Profil-Power-Density-Aksial>. Diakses 25 April 2020.

- Prayoto. 1988. *Pengantar Teori Reaktor Jilid I,II,III dan IV*. Teknik Nuklir Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Ridwan, N. 2009. *The Extreme Future, 10 Tren Utama yang membentuk Ulang 20 Tahun Kedepan*. Tangerang. Hal. 43.
- Reiss, T., Csom, Gy., Feher, S., dan Czirus. 2010. The Simplified Water-cooled Reactor (SSCWR), a New SCWR Design. *Journal of Progress in Nuclear Energy*. Vol. 57. Hal. 177-189.
- Rouf. 2013. <https://nuclearthinker.wordpress.com/2014/04/08/kinetika-reaktor-persamaan-point-kinetik/UU>. Diakses pada tanggal 20 Juni 2021.
- Shafii, M.A. 2015. Perhitungan Penampang Lintang Mikroskopik dalam Sel Bahan Bakar Nuklir. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. Vol.16 No.1. Hal 23-27.
- Shan, J., Chen, W., Rhee, B.W., dan Leung, K.H.L. 2010. *Coupled Neutronics /Thermal-Hydraulics Analysis of CANDU-SCWR Fuel Channel*. Annals of Nuclear Energy. Hal. 58-65.
- Soentono, S. 1998. Bahan-Bahan untuk Industri Reaktor Nuklir. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III*. Hal. 22-31.
- Richardina, V. Setia, Budi. W., dan Wulan, Tri. T. 2015. Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar UO_2 dengan Moderator H_2O dan Pendingin H_2O . *Jurnal Fisika Universitas Diponegoro*. Vol. 18, No. 3, Hal. 95-100.
- Suwoto dan Zuhair. 2012. Studi Observasi Awal Kebutuhan Data Nuklir untuk Reaktor Generasi IV (Gen-IV). *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*. Vol. 1 No.1. Hal. 3-4.
- Tadeus, D.Y., Budi, S., dan Iwan, S. 2010. Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Jurnal Universitas Diponegoro Transmisi 12*. Vol.1. Hal. 8-13.
- Tsiklauri, G., Talbert R., Schmitt, B., Phillipov, G., Bogoyavlensky, R., dan Grishanin, E. 2005. Supercritical Steam Cycle for Nuclear Power Plant. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. Vol. 235. Hal. 1651-1664.
- Wilson, J. N. A., Bidaud, N., Capellan, R., Chambon, S., David, P., Guillemin, E., Ivanov, A., Nuttin, O., dan Meplan. 2009. Economy of Uranium Resources in a Three Component Reactor Fleet With Mixed Thorium/Uranium Fuelcycles. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Vol. 36. Hal. 404-408.

- World Nuclear, 2020. <http://www.worldnuclear.info/world-population/>. *World Population: Past, Present, and Future*. Diakses pada tanggal 22 Maret 2020.
- World Nuclear. (2010). *Nuclear Power Reactors*. (Online) tersedia: <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>. Diakses pada 23 Maret 2020.
- Yvon, P dan Carre, F. 2009. Structural Materials Challenges for Advanced Reactor Systems. *Journal of Nuclear Materials*. Hal. 217-222.
- Zweifel, P.F. 1973. *Reactor Physics*. McGraw-Hill. USA. Hal. 74.
- Zuhal. 2010. *Knowledge Platform Kekuatan Daya Saing dan Innovation*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. Hal. 203.