

**ANALISIS KECELAKAAN REAKTOR
*TRANSIENT OVER POWER (TOP) REAKTOR SCWR
(SUPERCRITICAL COOLED WATER REACTOR)***

(Skripsi)

Oleh

Abdullah Haris Tandoko



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2018**

ABSTRAK

ANALISIS KECELAKAAN REAKTOR *TRANSIENT OVER POWER* (TOP) REAKTOR SCWR (*SUPERCRITICAL COOLED WATER REACTOR*)

Oleh

ABDULLAH HARIS TANDOKO

Analisis kecelakaan reaktor TOP pada reaktor SCWR berbahan bakar thorium dilakukan dengan menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik secara metode Taylor untuk menganalisis kecelakaan reaktor TOP. Persamaan kinetika reaktor titik adalah persamaan differensial tingkat satu. Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung daya relatif yang dipengaruhi oleh reaktivitas dan dapat diselesaikan dengan program MATLAB. Reaktivitas awal menggunakan tiga variasi yaitu 0,0025; 0,00315; dan 0,005. Hasil analisis menunjukkan pola eksponensial untuk reaktivitas tanpa *feedback* dengan rapat daya sebesar 5314,72 Watt/cm³ dan temperatur *fuel* sebesar 13717,5 K pada $t = 1$ s. Sedangkan pada reaktivitas menggunakan *feedback* didapatkan kondisi stabil dengan rapat daya sebesar 204,765 Watt/cm³ dan temperatur *fuel* sebesar 636,1 K pada $t = 1$ s.

Kata kunci: Kinetika reaktor titik, TOP, *feedback*, metode Taylor, MATLAB.

ABSTRACT

ANALYSIS OF TRANSIENT OVER POWER (TOP) REACTOR ACCIDENT FOR SCWR REACTOR (SUPERCRITICAL COOLED WATER REACTOR)

By

ABDULLAH HARIS TANDOKO

Research about TOP reactor accident analysis for SCWR reactor used thorium fuel has done to solve point reactor kinetic equation by Taylor method for analyze TOP reactor accident. Point reactor kinetic equation has first order differential equation. This equation has used to calculate relative power behavior due to reactivity which can be solved with MATLAB program. Initial reactivity used three variation these are 0,0025; 0,00315; and 0,005. The analysis results showed exponential pattern for reactivity without feedback had obtained power density was 5314,72 Watt/cm³ and fuel temperature was 13717,5 K at t = 1 s. While on reactivity used feedback has given stable conditions had obtained power density was 204,765 Watt/cm³ and fuel temperature was 636,1 K at t = 1 s.

Key words: Point reactor kinetics, TOP, feedback, Taylor method, MATLAB.

**ANALISIS KECELAKAAN REAKTOR *TRANSIENT OVER POWER* (TOP)
REAKTOR SCWR (*SUPERCRITICAL COOLED WATER REACTOR*)**

Oleh

ABDULLAH HARIS TANDOKO

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

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



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2018**

**Judul : ANALISIS KECELAKAAN REAKTOR
TRANSIENT OVER POWER (TOP) REAKTOR
SCWR (SUPERCRITICAL COOLED WATER
REACTOR)**

Nama Mahasiswa : Abdullah Haris Tandoko

Nomor Pokok Mahasiswa : 1217041001

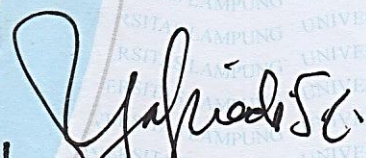
Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

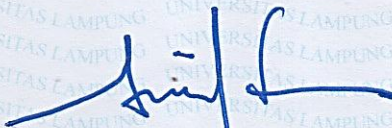
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


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


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

2. Ketua Jurusan Fisika



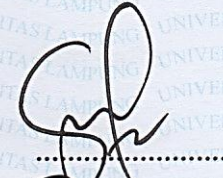
Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 19710909 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. **Tim Penguji**

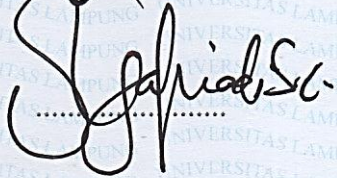
Ketua

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



Sekretaris

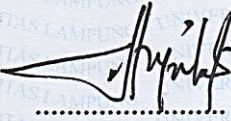
: Drs. Syafriadi, M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Suprihatin, S.Si., M.Si.



2. **Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



Prof. Dr. Warsito, S.Si., D.E.A.

NIP 19710212 199512 1 001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 17 Januari 2018

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, 22 Januari 2018



Abdullah Haris Tandoko
NPM. 1217041001

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Tanjung Karang Bandar Lampung pada tanggal 14 Mei 1994. Anak keenam dari pasangan Bapak Tasmanuddin dan Ibu Siti Aida Maryati. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 2 Teladan Bandar Lampung tahun 2006, MTS Negeri 1 Bandar Lampung tahun 2009, dan MA Negeri 1 Bandar Lampung 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). Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di kegiatan kampus yaitu HIMAFI FMIPA UNILA sebagai ketua bidang KRT dari tahun 2015-2016 dan UKMP UNILA sebagai ketua departemen pendidikan dari tahun 2016-2017.

Penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di UPT. BPML – LIPI Tanjung Bintang dengan judul “Proses Pembuatan Bata Refraktori”. Kemudian penulis melakukan penelitian dengan judul “Analisis Kecelakaan Reaktor *Transient Over Power* (TOP) Reaktor SCWR (*Supercritical Cooled Water Reactor*)” sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UNILA.

MOTTO

“Teruslah Mengenalí Diri hingga Tumbuh Menjadi Mandiri”

(Abdullah Haris Tandoko)

“Menjalani Hidup Seperti Mendaki Gunung, Puncak Memang Sangat Indah Ketika Dipandang, Tetapi Harus Tetap Menyadari dan Menjalani Panjangnya Pendakian”

(Drs. Syafriadi, M.Si.)

“Tersenyumlah Ketika Sedih Menangislah Ketika Bahagia”

(Abdullah Haris Tandoko)

“Ada Pertemuan Ada Perpisahan, Sebaiknya-baiknya Pertemuan Adalah Karena Allah dan Sebaik-baiknya Perpisahan Adalah Karena Allah”

(Al-Hadits)

Kuniatkan karya kecilku ini karena

ALLAH SWT

Aku persembahkan karya ini kepada:

Ayah, Ibu, kakak-kakakku serta keluarga besar yang selalu mendo'akan, mengasihi, mendukung dan memberi semangat.

Dosenku, yang telah mengajarkan banyak ilmu serta mendidik dan membimbingku.

Rekan-rekan seperjuanganku Fisika FMIPA UNILA Angkatan 2012 yang telah bersama-sama dan menemani dari awal hingga akhir perkuliahan.

Teman-teman seperjuangan UKMP UNILA yang telah memberi banyak pelajaran berharga padaku.

Almamater Tercinta.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**ANALISIS KECELAKAAN REAKTOR *TRANSIENT OVER POWER (TOP) REAKTOR SCWR (SUPERCRITICAL COOLED WATER REACTOR)***”. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar S1 dan melatih mahasiswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini.

Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua. Amin.

Bandar Lampung, Januari 2018
Penulis,

Abdullah Haris Tandoko

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Yang Maha Esa, karena atas kuasanya penulis masih diberikan kesempatan untuk mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini, terutama kepada:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang mendukung dari awal sampai akhir penulisan.
2. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si. sebagai Pembimbing II yang telah mengoreksi format penulisan, memberikan kritik, saran selama penulisan skripsi dan memberi bimbingan yang sangat bermanfaat sebagai bekal hidupku.
3. Ibu Suprihatin S.Si., M.Si. sebagai Penguji yang telah mengoreksi kekurangan, memberi kritik dan saran selama penulisan skripsi.
4. Kedua orangtuaku bapak Tasmanuddin dan ibu Siti Aida Maryati yang telah membesarkan, mendidik dan mendukungku disetiap aktivitas positifku. Serta kakak-kakakku Madra Tandoko, Muhammad Husein Haekal Tandoko, Alisa Fatmawati, Annisa Rahmasuri dan Ayumila Kurnia yang telah mendukung dan menyemangati di dalam hidupku. Terimakasih
5. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si. sebagai Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan serta nasehat dari awal perkuliahan sampai menyelesaikan tugas akhir.

6. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung, serta Para dosen dan karyawan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. sebagai Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Prof. Dr. Warsito, S.Si., D.E.A. sebagai Dekan FMIPA Universitas Lampung.
9. Sahabat-sahabatku Muhmmad Reza Pratama, Catur Hadi Siswondo, Dani Sayuti, Aji Gaston, Apriyanto Supriyo Giri , Giri Amirul Mukminin, Jayanti Pusvitasari, Riandini Pratiwi dan kawan-kawan lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per satu. Terima kasih untuk semangat, bantuan, dan do'anya
10. Rekan–rekan nuklir *project* Arizka Antartika Putri, Sri Aknes Simanjuntak, dan Wulan Kartika Wati yang selalu menyemangati.
11. Rekan-rekan seperjuangan angkatan 2012 yang selama ini memberikan semangat, candaan dan motivasi.
12. Rekan-rekan organisasi, kakak-kakak tingkat serta adik-adik tingkat dan semua teman-teman. Semoga Allah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Aamiin.

Bandar Lampung, Januari 2018

Penulis

Abdullah Haris Tandoko

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Batasan Masalah	5
D. Tujuan	5
E. Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Reaktor Nuklir	6
B. Reaksi Fisi	9
C. Energi Ikat Inti Atom	12

D. Termodinamika Nuklir	13
E. <i>Supercritical Water Reactor</i> (SCWR).....	14
F. <i>Pressurized Water Reactor</i> (PWR).....	16
G. Kecelakaan Nuklir UTOP dan ULOF.....	18
H. Tragedi Kecelakaan Reaktor Nuklir	19
I. Reaktor Nuklir di Indonesia	23
J. Persamaan Kinetika Reaktor Titik	26
K. Software MATLAB	27
L. Penelitian Sebelumnya	28

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian	30
B. Alat dan Bahan Penelitian	30
C. Prosedur Penelitian.....	30
D. Diagram Alir Penelitian	35

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rapat Daya Terhadap Jarak.....	40
B. Analisis Daya Relatif Terhadap Waktu.....	43
C. Analisis Temperatur Terhadap Jarak.....	45
D. Analisis Temperatur <i>Clad</i> Terhadap Waktu	50
E. Analisis Temperatur <i>Gap</i> Terhadap Waktu	51
F. Analisis Temperatur <i>Fuel</i> Rata-Rata Terhadap Waktu.....	53
G. Analisis Reaktivitas Total Dengan <i>Feedback</i> Terhadap Waktu.....	55
H. Analisis Daya Terhadap Waktu.....	57

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan.....	60
B. Saran	61

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Prinsip kerja PLTN (<i>World Nuclear, 2017</i>)	7
2. Reaksi fisi (<i>Duederstadt and Hamilton, 1976</i>)	10
3. Reaktor jenis SCWR (<i>Shang, 2009</i>)	15
4. Skematik reaktor jenis PWR (<i>World Nuclear, 2017</i>)	17
5. Diagram alir penelitian.....	35
6. Grafik rapat daya relatif terhadap jarak.....	40
7. Grafik rapat daya terhadap jarak.....	42
8. Grafik daya relatif terhadap waktu (a) tanpa <i>feedback</i> $\rho = 0,0025$ (b) dengan <i>feedback</i> $\rho = 0,0025$ (c) dengan <i>feedback</i> $\rho = 0,00315$ (b) dengan <i>feedback</i> $\rho = 0,0054$	43
9. Ukuran elemen bahan bakar.....	45
10. Analisis temperatur terhadap jarak (a) tanpa <i>feedback</i> , $t = 0$ s (b) tanpa <i>feedback</i> , $t = 1$ s (c) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$; $\rho = 0,00315$ dan $\rho =$ $0,005$ pada $t = 1$ s.....	48
11. Temperatur <i>clad</i> terhadap waktu (a) tanpa <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (b) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (c) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,00315$ (d) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,005$	51
12. Temperatur <i>gap</i> terhadap waktu (a) tanpa <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (b) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (c) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,00315$ (d) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,005$	53

13. Temperatur <i>fuel</i> terhadap waktu (a) tanpa <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (b) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (c) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,00315$ (d) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,005$	55
14. Reaktivitas total terhadap waktu dengan <i>feedback</i> (a) $\rho = 0,0025$ (b) $\rho = 0,00315$ (c) $\rho = 0,005$	57
15. Daya terhadap waktu (a) tanpa <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (b) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,0025$ (c) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,00315$ (d) dengan <i>feedback</i> , $\rho = 0,005$	59

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai peluruhan neutron tunda dan data fraksi neutron relatif (Walter <i>and</i> Reynolds, 1981).....	38
2. Nilai peluruhan neutron tunda dan fraksi neutron tunda.....	39
3. Rapat daya relatif pada panjang (x) (Wati, 2017)	41
4. Rapat daya pada panjang (x) (Wati, 2017).....	42
5. Daya relatif terhadap waktu	44
6. Temperatur <i>clad</i> , <i>gap</i> , dan <i>fuel</i> terhadap jarak.....	49
7. Tempereatur <i>clad</i> terhadap waktu.....	50
8. Temperatur <i>gap</i> terhadap waktu	52
9. Temperatur <i>fuel</i> rata-rata terhadap waktu	54
10. Reaktivitas total terhadap waktu	56
11. Daya terhadap waktu.....	58

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sumber energi utama yang digunakan saat ini adalah sumber energi dari bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil didapat dari berbagai komponen di alam seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Saat pembakaran, bahan bakar tersebut mengeluarkan asap yang terdiri dari banyak karbon dioksida. Karbon dioksida yang menumpuk pada udara dan atmosfer berpotensi menimbulkan efek rumah kaca. Semakin berkurangnya pasokan sumber energi fosil dan kesadaran akan bahaya dari dampak pemanasan global, membuat para peneliti berupaya mencari solusi lain untuk menggunakan sumber energi yang lebih efektif dan efisien (EPA, 2017).

Energi nuklir adalah salah satu alternatif sumber energi yang dapat dijadikan solusi pada permasalahan energi saat ini. Selain untuk menghemat cadangan energi fosil di bumi, energi nuklir juga tidak menimbulkan efek gas rumah kaca. Energi nuklir merupakan satu alternatif diantara berbagai sumber energi lainnya. Usaha kearah itu telah dirintis sejak tahun 1968 melalui seminar pertama mengenai kemungkinan-kemungkinan penggunaan tenaga nuklir sebagai pembangkit tenaga listrik di pulau Jawa (Jatiman dan Soetrisnanto, 1986).

Secara sederhana reaktor nuklir juga dapat dianggap sebagai suatu perangkat pembakaran, dimana sebagai salah satu jenis bahan bakarnya adalah nuklida U (uranium) dan sebagai apinya adalah neutron (lebih tepatnya adalah neutron thermal) (Jatiman dan Soetrisnanto, 1986). Adapun analog dengan pembakaran yang terjadi pada bahan bakar konvensional, maka pada reaktor nuklir terjadi reaksi fisi yang menghasilkan dua atau tiga neutron baru, dua unsur radioaktif dan energi panas yang tinggi (Wardhana, 2007). Energi panas yang tinggi pada reaktor nuklir juga dapat dimanfaatkan untuk memanaskan air hingga menjadi uap yang dapat dipergunakan untuk menggerakkan turbin generator pada PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir), juga dapat untuk menggerakkan mesin, pada kapal selam nuklir atau kapal niaga nuklir (Jatiman dan Soetrisnanto, 1986).

Meskipun teknologi nuklir sudah semakin menunjukkan kehandalannya, namun masih banyak ditentang oleh tokoh masyarakat maupun aktivis lingkungan hidup. Permasalahan yang dikhawatirkan terjadi adalah resiko terjadinya kecelakaan nuklir. Sistem proteksi dan pengaman diperlukan dalam melindungi dan menekan konsekuensi kecelakaan. Bekerjanya sistem proteksi dan pengaman harus tepat untuk menjaga keutuhan teras. Ketidaktepatan dalam perlindungan akan dapat memberikan pemanasan berlebih pada selongsong bahan bakar. Akibat dari pemanasan yang gagal dikendalikan, maka kondisi tersebut akan membuat selongsong bahan bakar meleleh (Suharno, dkk. 1996).

Perhitungan dinamika reaktor merupakan kajian yang cukup penting dalam penelitian desain reaktor nuklir. Kecelakaan reaktor merupakan salah satu contoh keadaan reaktor yang cukup berbahaya, sehingga banyak dilakukan

penelitian dalam bidang ini. Salah satu kecelakaan terbesar sepanjang sejarah adalah kecelakaan reaktor nuklir Chernobyl yang terletak di negara Ukraina sebelah barat daya Rusia (Richard, 1988). Kecelakaan tersebut dikarenakan kritikalitas yang meningkat dalam waktu singkat yang menyebabkan kenaikan daya reaktor secara cepat yang disebut *prompt excursion* (IAEA, 1999). Kecelakaan reaktor nuklir besar lainnya adalah kecelakaan reaktor Fukushima yang terjadi setelah bencana gempa dan kecelakaan reaktor nuklir Three Miles Island akibat gagalnya sistem non-nuklir sekunder (Pane dkk, 2012).

Ada banyak jenis kecelakaan reaktor yang mungkin terjadi, misalnya kecelakaan reaktor karena gagalnya batang kendali yang berfungsi untuk mengendalikan populasi neutron dalam reaktor. Jika batang kendali ini gagal, maka populasi neutron akan naik dengan sangat cepat. Jumlah neutron yang tidak terkendali dalam reaktor akan menyebabkan kenaikan daya, dan temperatur. Kecelakaan tersebut disebut UTOP (*Unprotected Transient Over Power*). Karena kecelakaan tersebut, bahan bakar reaktor kemungkinan akan meleleh. Akibatnya radiasi nuklir akan keluar dari reaktor yang membahayakan alam sekitar reaktor tersebut berdiri (Yulianti dkk, 2009).

Satu aspek penting dari program simulator PLTN ini adalah aspek neutronik. Untuk menyederhanakan proses simulasi dinamika reaktor, sistem teras reaktor dimodelkan sebagai suatu titik. Pemodelan reaktor tersebut melahirkan persamaan kinetika reaktor yang dikenal sebagai persamaan kinetika reaktor titik. Sehingga diperoleh persamaan differensial simultan tingkat satu yang menghubungkan reaktivitas dengan populasi neutron (Cahyono dkk, 2012).

Metode numerik untuk penyelesaian persamaan kinetika reaktor yang relatif lebih sederhana dan memberikan hasil yang memuaskan adalah metode Taylor. Metode Taylor ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial tingkat pertama dari persamaan kinetika reaktor yang menghubungkan densitas neutron dan konsentrasi prekursor neutron tunda. Hasil yang diperoleh menunjukkan tingkat akurasi yang sebanding dengan metode numerik lainnya. Keunggulan metode Taylor adalah bahwa metode ini lebih sederhana dan sangat akurat (Cahyono dkk, 2012).

Pada penelitian ini akan menyajikan suatu pemograman persamaan kinetika reaktor titik yang diselesaikan dengan metode numerik deret Taylor. Perangkat lunak yang akan digunakan adalah MATLAB (*Matrix Laboratory*). MATLAB merupakan sistem interaktif dengan elemen basis data berupa *array* (Hernadi, 2012). MATLAB memiliki akurasi yang baik dan hasil yang efisien untuk menyelesaikan persamaan differensial biasa pada persamaan reaktor kinetika titik (Singh and Mohapatra, 2015).

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik dengan metode Taylor?
2. Bagaimana analisis kecelakaan reaktor TOP pada reaktor SCWR (*Supercritical Cooled Water Reactor*)?

C. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Persamaan yang diselesaikan pada penelitian ini adalah persamaan kinetika reaktor titik.
2. Metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik adalah metode Taylor.
3. Data daya yang digunakan adalah data data daya dari reaktor SCWR yang sudah diteliti oleh Wati (Wati, 2017).
4. Program dibuat menggunakan *software* MATLAB.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik dengan metode Taylor.
2. Membuat analisis kecelakaan reaktor TOP pada reaktor SCWR .

E. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi ilmiah tentang analisis kecelakaan reaktor nuklir sebagai antisipasi dari hal yang tidak diinginkan.
2. Mendukung perkembangan penelitian di bidang reaktor nuklir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

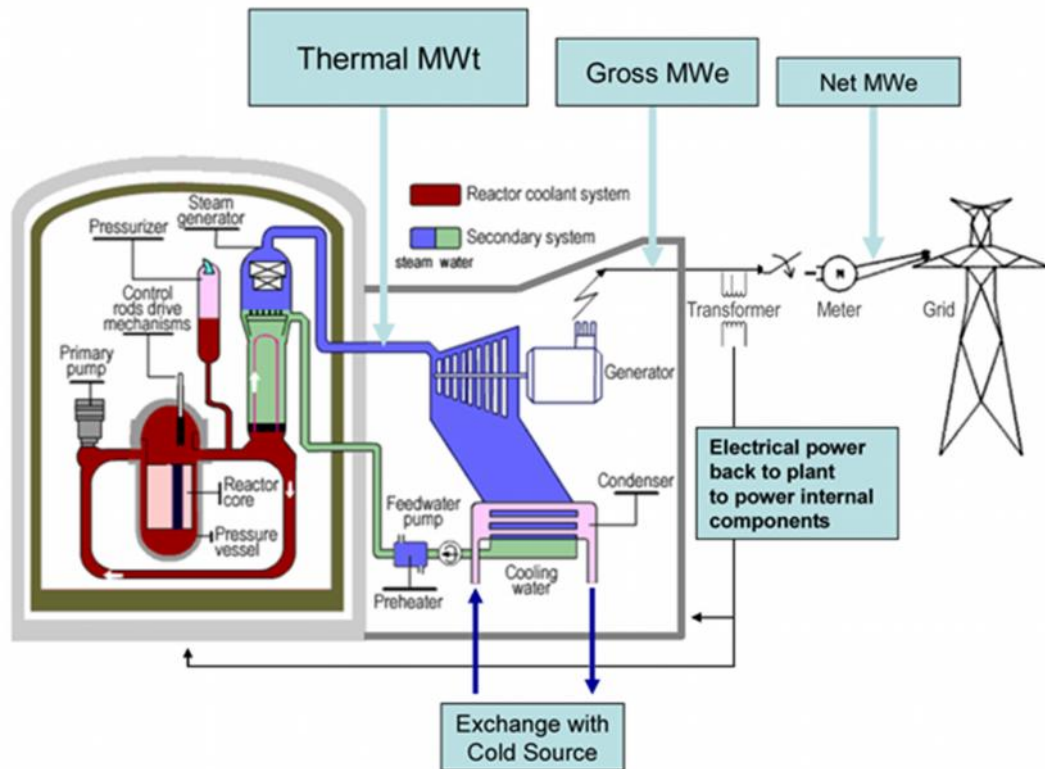
A. Reaktor Nuklir

Energi nuklir adalah energi yang tersimpan dalam atom. Energi dihasilkan ketika terjadi proses reaksi nuklir. Jadi, bisa disimpulkan bahwa energi nuklir dihasilkan dari perubahan sejumlah massa inti atom ketika berubah menjadi inti atom yang lain dalam reaksi nuklir.

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 (Duderstadt dan Hamilton 1976). Neutron awal berasal dari sumber neutron reaktor nuklir yang sudah tersedia untuk menjalankan reaksi inti (Wardhana, 2007).

Pada PLTN, tenaga panas yang dihasilkan dari reaksi pembelahan (fisi) di dalam reaktor daya dipergunakan untuk mendidihkan air dan menghasilkan uap panas bertekanan tinggi, yang selanjutnya dipergunakan untuk memutar turbin

dari generator. Secara sederhana prinsip kerja suatu PLTN ilustrasikan pada PGambar 1. (Jatiman dan Soetrisnanto, 1986).



Gambar 1. Prinsip kerja PLTN (*World Nuclear, 2017*).

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

a. Batang bahan bakar (*Fuel pin*)

Batang bahan bakar ini berbentuk pipa dengan diameter kira-kira 1 cm.

Dalam suatu reaktor daya besar, ada ribuan batang bahan bakar yang diletakkan saling berdekatan. Seluruh batang bahan bakar dan daerah

sekitarnya dinamakan teras reaktor. Sedangkan batang elemen bahan nuklir terdiri dari bahan bakar nuklir, misalnya uranium-233 (U^{233}), uranium-235 (U^{235}), plutonium-239 (Pu^{239}), dan thorium-232 (Th^{232}) (Yulianto, 1996).

b. Moderator

Moderator adalah komponen reaktor yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat sebesar +2 MeV menjadi neutron dengan energi termal yaitu +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). Moderator terbaik yang digunakan dan baik juga sebagai reflektor adalah air berat (D_2O), air ringan (H_2O) atau hidrogen (H_2) (Benjamin, 1983).

c. 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 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 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).

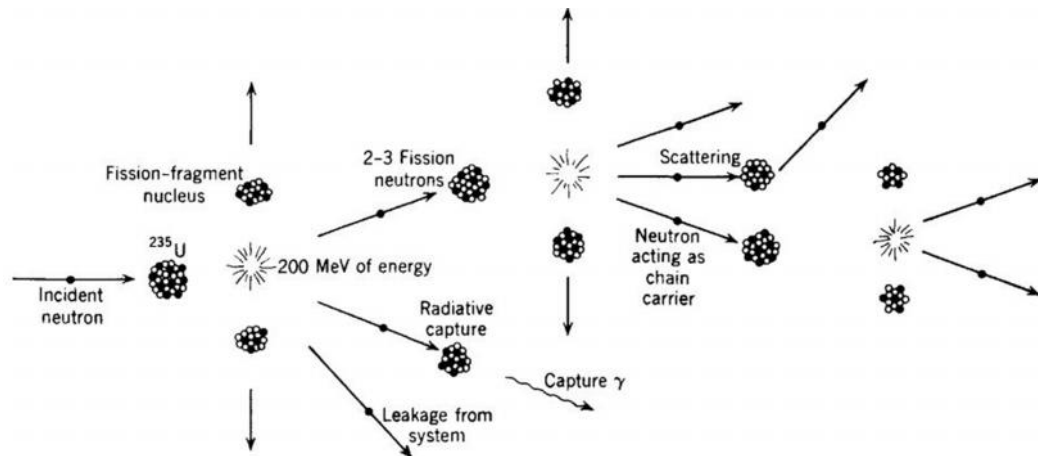
d. Perisai (*Shielding*)

Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Radiasi yang dihasilkan oleh reaktor antara lain radiasi partikel alfa, beta, produk fisi, sinar gamma, dan neutron. Untuk menahan radiasi ini, maka umumnya reaktor dikelilingi oleh perisai beton yang umumnya digunakan bahan timbal (Pb^{82}), bismuth (Bi^{83}), tungsten (W^{74}) sebagai pelindung radiasi sinar X, besi (Fe^{26}) sebagai pelindung radiasi gamma, Kadmium (Cd^{48}) dan Boron (B^5) sebagai pelindung radiasi neutron (Soentono, 1998).

B. Reaksi Fisi

Reaksi fisi terjadi jika sebuah inti berat membelah menjadi dua atau lebih inti atom yang lebih ringan seperti pada Gambar 2 reaksi fisi disertai pemancaran

energi dan partikel, misalnya neutron. Reaktor nuklir digunakan untuk pembangkit daya, penelitian, atau produksi radioisotop (Duderstadt *and* Hamilton, 1976).



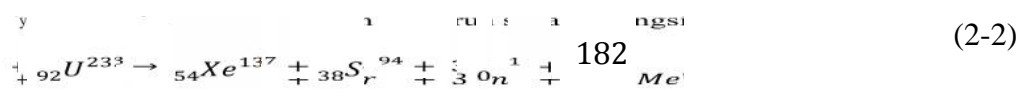
Gambar 2. Reaksi fisi (Duderstadt *and* Hamilton., 1976).

Energi nuklir dihasilkan dari reaksi fisi berantai. Pada proses ini yang digambarkan pada Gambar 2 neutron yang dipancarkan oleh reaksi fisi ini menyebabkan reaksi fisi lainnya dan seterusnya. Reaksi berantai seperti ini dapat dijelaskan secara kuantitatif dengan faktor multiplikasi, yang dilambangkan dengan simbol k . Hal ini dapat diartikan sebagai perbandingan jumlah fisi dalam satu generasi dibagi dengan jumlah fisi sebelumnya. Dapat dituliskan dalam persamaan seperti berikut ini (Lamarsh, 1983).

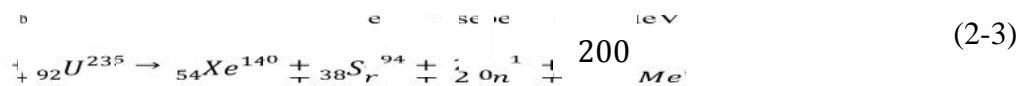
$$k = \frac{\text{jumlah fisi pada satu generasi}}{\text{jumlah fisi pada generasi sebelumnya}} \quad (2-1)$$

Secara umum perbandingan jumlah neutron pada satu generasi dengan jumlah neutron sebelumnya akibat dari reaksi fisi dapat dirumuskan k -efektif atau sering disebut dengan faktor multiplikasi. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor, dimana keadaan stabil

tercapai jika nilai k -efektif = 1. Jika besarnya $k_{\text{eff}} > 1$ disebut reaktor superkritis yang artinya jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu, sedangkan pada 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 (Zweifel, 1973).



Inti atom U^{233} tidak ditemukan secara alami melainkan buatan manusia. U^{233} diproduksi dari hasil peluruhan pada inti atom Th^{232} . Ketika inti atom U^{233} mengalami pembelahan dihasilkan dua inti atom baru yang lebih ringan, beberapa neutron baru, dan energi sebesar 182 MeV (Power, 2018).



Sebuah inti atom U^{235} ditembak menggunakan sebuah neutron berubah menjadi xenon-140 (Xe^{140}) dan stronsium-94 (Sr^{94}). Neutron yang dihasilkan dalam reaksi fisi itu selanjutnya akan membelah inti-inti uranium lainnya sehingga memicu terjadinya reaksi berantai (Tim BATAN, 2001).

Berdasarkan jumlah neutron yang dihasilkan pada reaksi fisi, dikenal 2 jenis reaksi fisi. Kedua jenis reaksi fisi tersebut adalah:

1. Reaksi fisi terkendali adalah reaksi fisi yang jumlah neutronnya dapat dikendalikan sehingga tetap sama dengan satu, seperti keadaan neutron semula. Pada reaksi fisi terkendali ini sebelum dan sesudah reaksi tetap sama dengan satu. Hal ini dapat dicapai dengan menyerap kelebihan neutron. Reaksi fisi terkendali adalah reaksi yang pada umumnya terjadi di dalam reaktor nuklir.

2. Reaksi fisi tak terkendali adalah reaksi fisi yang jumlah neutronnya tidak dikendalikan, sehingga neutron hasil pembelahan dapat menembak sasaran lain sehingga akan dihasilkan lebih banyak lagi radionuklida baru, seperti halnya yang terjadi pada ledakan bom atom (Wardhana, 2007).

Pada reaktor dibedakan dua jenis material yang dapat mengalami fisi atau pembelahan yaitu material fisil dan material fertil. Sebuah material fisil merupakan material yang akan mengalami pembelahan ketika ditembak oleh sebuah neutron dengan sejumlah energi (Lewis, 2008). Inti atom U^{233} , U^{235} , Pu^{239} , dan Pu^{241} dapat mengalami reaksi fisi oleh neutron termal (Duderstadt, 1976). Sedangkan material fertil adalah material yang akan menangkap neutron dan melalui peluruhan radioaktif akan berubah menjadi material fisil (Lewis, 2008). Adapun contoh material fertil adalah Th^{232} , U^{238} , Pu^{238} , dan Pu^{240} (Zhang, 2014).

C. Energi Ikat Inti Atom

Sumber energi nuklir dapat dipahami jika telah memahami konsep energi ikat inti atom. Inti atom diikat oleh gaya nuklir jarak pendek. Massa inti atom umumnya lebih kecil dari jumlah massa proton dengan neutron. Perbedaan massa tersebut disebut dengan *mass-defect*. Fenomena tersebut dapat diamati pada tingkat atom atau subatomik, tidak seperti yang biasa kita ketahui bahwa massa total harus sama dengan jumlah massa komponen. *Mass-defect* dibalik fenomena ikatan inti atom ini. Energi yang setara dengan *mass-defect* disebut dengan energi ikat inti atom (Nuceng, 2017).

Inti atom terdiri dari proton dan neutron, namun massa inti selalu kurang dari jumlah massa masing-masing proton dan neutron yang membentuk inti atom. Perbedaannya adalah ukuran energi ikat nuklir yang memegang inti bersama. Besarnya energi ikat inti atom lebih besar dibanding energi ikat elektron pada sebuah atom. Energi ikat inti atom satu juta kali lebih besar dibanding energi ikat elektron pada sebuah atom. Energi ikat ini dapat dihitung dengan rumus Einstein. (Hyperphysics, 2017).

$$E = mc^2 \quad (2-4)$$

Massa suatu inti atom tidak sama dengan jumlah massa proton (m_p) Z dan massa neutron (m_n) $A - Z$. Inti atom stabil memiliki *mass defect* (1-2).

$$\Delta = \frac{Zm_p + (A - Z)m_n - Am_i}{c^2} \quad (2-5)$$

Mass defect adalah konsep perubahan energi ($E = mc^2$) pada saat terbentuknya inti. Jumlah energi yang berubah menjadi massa pada pemisahan inti disebut dengan energi ikat inti, $BE = \Delta m c^2$ (Stacey, 2007).

D. Termodinamika Nuklir

Pengetahuan tentang termodinamika sangat penting bagi insinyur nuklir yang berurusan dengan reaktor tenaga nuklir. PLTN terlihat seperti pembangkit termal standar dengan satu pengecualian. Termodinamika adalah ilmu yang berhubungan dengan produksi energi, penyimpanan, pemindahan dan konversi. Termodinamika mempelajari pengaruh suatu kerja, panas dan energi pada sebuah sistem (Nuclear Power, 2017).

Hukum kedua termodinamika mengatakan bahwa “entropi dari setiap sistem yang terisolasi tidak pernah berkurang. Pada proses termodinamika alami, jumlah entropi sistem termodinamika yang berinteraksi meningkat”. Hukum ini menunjukkan ireversibilitas alami. Proses reversibel sangat berguna dan merupakan teori yang sesuai, tetapi tidak terjadi di alam. Dari mengikuti hukum ini, tidak mungkin membuat perangkat yang beroperasi pada siklus yang satu-satunya pengaruhnya adalah pemindahan panas dari bagian yang lebih dingin menuju bagian yang lebih panas. Akibatnya, pergerakan mesin secara terus menerus pada mesin kedua tidak mungkin dapat dilakukan (Nuclear Power, 2017).

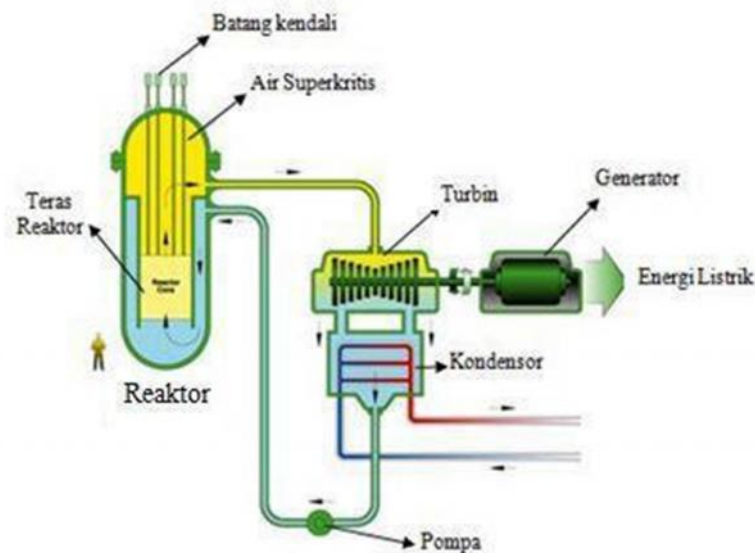
Suatu PLTN tertentu memiliki kapasitas listrik sebesar 1000 MWe. Sumber panas di PLTN berasal dari reaktor nuklir. Seperti pada umumnya, panas digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang terhubung ke generator yang dapat menghasilkan listrik. Turbin adalah mesin panas dan berguna untuk membatasi efisiensi yang sesuai dengan hukum termodinamika ke dua. Pada PLTN modern biasanya memiliki efisiensi termodinamika sekitar sepertiga (33%), jadi 3000 MWth daya termal dari reaksi fisi diperlukan untuk menghasilkan 1000 MWe daya listrik (Nuclear Power, 2017).

E. *Supercritical Water Reactor (SCWR)*

Reaktor SCWR merupakan reaktor air yang bekerja di atas titik kritis air, dimana SCWR beroperasi pada tekanan 25 MPa dengan menggunakan air sebagai pendingin dan moderator (Baindur, 2008). Pada tekanan tersebut jika

temperatur air terus dinaikkan tidak akan terjadi perubahan fasa sehingga perubahan entropi reaktor lebih besar dan efisiensi panas yang ditransfer oleh reaktor menjadi lebih besar seperti Gambar 3.

Supercritical Water Reaktor (SCWR) atau reaktor air superkritis merupakan jenis reaktor generasi IV yang disebut juga sebagai reaktor masa depan (Oka, 2010). Pada prinsipnya efisiensi yang lebih tinggi dan ekonomi yang lebih baik membuat konsep SCWR mampu bersaing dengan desain reaktor air ringan yang ada (Ammirabile, 2010).



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

Pada reaktor berpendingin air superkritis karakteristik dari air akan berubah di sekitar titik kritisnya. Untuk meningkatkan efisiensi dari SCWR dibutuhkan selongsong (*cladding*) bahan bakar yang mampu menahan suhu yang tinggi (Liu and Cheng, 2009). Tujuan utama dari desain SCWR adalah untuk mendapatkan energi listrik dengan harga per kWh yang lebih murah, selain itu

SCWR diharapkan digunakan untuk memproduksi hidrogen yang memanfaatkan temperatur tinggi (Suwoto dan Zuhair, 2012).

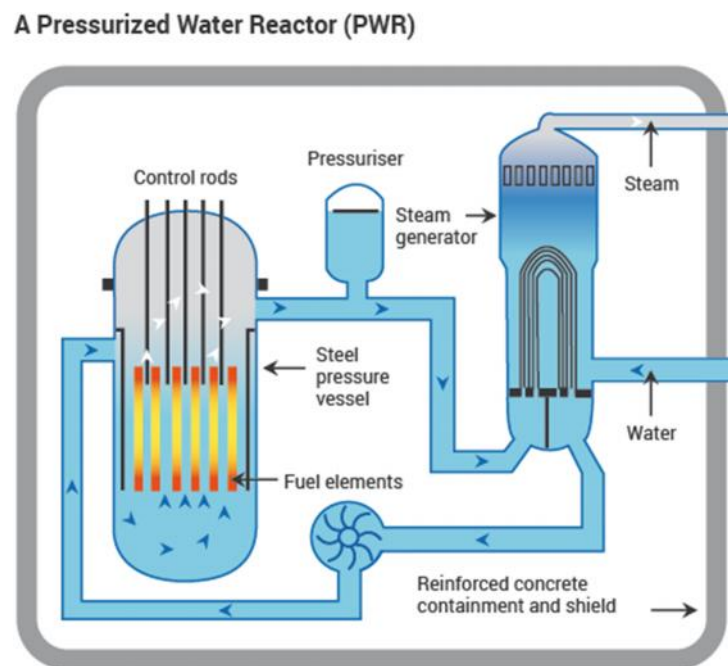
Desain SCWR cenderung untuk memperoleh efisiensi termal yang tinggi dan dengan konfigurasi sistem yang sederhana. Tantangan untuk SCWR adalah dalam mengembangkan desain inti yang layak, akurat dengan memperkirakan koefisien perpindahan panas dan mengembangkan bahan-bahan untuk struktur bahan bakar dan inti yang cukup tahan akan korosi untuk mempertahankan keadaan superkritisnya (Shan et al., 2009).

F. *Pressurized Water Reactor (PWR)*

Reaktor PWR menghasilkan energi listrik, air ringan digunakan sebagai pendingin dan medium pelambat neutron (moderator neutron). Teras reaktor diletakkan dalam satu bejana. Sistem air pendingin yang melalui teras reaktor disebut sistem pendingin primer. Di dalam sistem primer tidak diperbolehkan terjadi pendidihan, karena itu sistem dibuat bertekanan tinggi. Dari sistem pendingin primer yang bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi, air pendingin dialirkan ke pipa-pipa pada alat pembangkit uap. Di luar pipa ini air dalam sistem pendingin sekunder menerima panas dari air pendingin primer dan mengalami penguapan. Uap yang terjadi dari air pendingin sekunder ini kemudian dialirkan ke turbin untuk menggerakkan generator listrik (Diby, 2007).

Reaktor air tekanan dikembangkan oleh Westinghouse, juga sebuah perusahaan raksasa Amerika Serikat. Awal pengembangan jenis reaktor nuklir ini diperoleh pada pembuatan reaktor untuk kapal selam nuklir USA. Juga pada jenis reaktor ini, “air biasa” merupakan moderator maupun pendingin.

Gambar 4 memperlihatkan skema bekerja sebuah reaktor air tekanan. Reaktor terdiri atas sebuah bejana baja, yang penuh berisi air. Dalam bejana itu, dengan sendirinya sepenuhnya terendam air, terletak bahan bakar yang disusun dalam pipa-pipa yang dipasang secara berkelompok. Bahan bakar terdiri atas uranium-235 yang diperkaya. Setelah bahan bakar disulut, terjadi panas, air menjadi panas.



Gambar 4. Skematik reaktor jenis PWR (*World Nuclear*, 2017).

Karena bejana diisi air secara penuh, tidak terjadi pembentukan uap, melainkan air menjadi panas dan bertekanan. Air tekanan ini dibawa ke generator uap, yang juga merupakan sebuah bejana terbuat dari baja.

Generator uap ini menghasilkan uap, yang dibawa ke turbin untuk menjalankannya (Kadir, 1995).

G. Kecelakaan Nuklir UTOP Dan ULOF

Kecelakaan nuklir adalah kecelakaan yang berhubungan dengan reaksi nuklir di luar kendali dan kerusakan yang terjadi berhubungan langsung dengan material radioaktif. Reaksi nuklir di luar kendali ini bisa terjadi di dalam reaktor maupun tidak di dalam reaktor seperti di tempat pembuatan bahan bakar atau daur ulang bahan bakar. Dengan demikian, jika suatu kecelakaan PLTN hanya melibatkan bocornya pipa-pipa kondenser maka hal tersebut tidak termasuk kecelakaan nuklir, tapi masuk ke dalam kategori kecelakaan mekanis biasa. Selain itu, kecelakaan nuklir perlu pula dibedakan dari kecelakaan radiasi, misalnya sumber radioaktif di unit radiologi sebuah rumah sakit mengakibatkan operator terpapar radiasi maka itu bisa dikategorikan sebagai kecelakaan radiasi (Yoga dkk, 2008).

Dalam kecelakaan UTOP (Kecelakaan kelebihan daya akibat masuknya reaktivitas positif eksternal tanpa proteksi/*Unprotected transient over power*) maka masuknya reaktivitas positif menyebabkan kenaikan daya pada reaktor nuklir. Selanjutnya kenaikan daya ini memicu kenaikan temperatur pada bahan pendingin, selongsong dan bahan bakar. Kenaikan temperatur ini pada gilirannya menyebabkan terjadinya balikan reaktivitas negatif dari keempat komponen di atas yang akan mengkompensasi reaktivitas positif eksternal. Dalam keadaan asimtotik daya reaktor akan stabil pada harga yang lebih tinggi dari daya pada kondisi normal (Su'ud, 2006).

Pada kecelakaan ULOF (kecelakaan hilangnya daya pompa tanpa proteksi / *unprotected loss of flow*) terjadinya ketidakseimbangan daya dan aliran pendingin menyebabkan kenaikan temperatur pendingin dan bahan bakar. Kenaikan temperatur ini menyebabkan terjadinya balikan reaktivitas negatif yang kemudian menekan daya untuk turun untuk akhirnya menyesuaikan dengan kemampuan sirkulasi alamiah. Pada kondisi akhir terjadi keseimbangan reaktivitas antara reaktivitas positif akibat turunnya temperatur bahan bakar dan kenaikan temperatur pendingin (Su'ud, 2006).

H. Tragedi Kecelakaan Reaktor Nuklir

1. Kecelakaan Reaktor Chernobyl

Reaktor Chernobyl merupakan reaktor jenis RBMK 1000 (*Reactor Bolshoi Moshnosti Kanalye*), atau reaktor air didih dengan tenaga tinggi, atau disebut juga sebagai *High Power Pressure Tube Reactor* (Nrc, 2017). Chernobyl terletak di negara Ukraina (dulu merupakan bagian USSR) sebelah barat daya Rusia. Kota Chernobyl berpenduduk 12.500 jiwa berada 15 km sebelah tenggara reaktor. Sedangkan sebagian pekerja reaktor bermukim di Pripyat (sebuah kota satelit) dengan kepadatan 45.000 (Richard, 1988).

Rangkaian kecelakaan diawali oleh keputusan manajemen reaktor dan tim ahli untuk melakukan percobaan guna menguji respon turbin generator dalam menggerakkan pompa pendingin pada saat pasokan uap ke turbin terhenti. Namun ketika aliran air pendingin utama dan air umpan dikurangi, hal ini menyebabkan kenaikan suhu air yang memasuki reaktor dan meningkatkan

pembangkitan uap. Sejurus kemudian daya reaktor naik secara cepat (*prompt critical excursion*) dan mandor yang berjaga memerintahkan untuk segera menshutdown reaktor. Namun perintah tersebut sangat terlambat karena untuk menurunkan batang kendali secara otomatis dibutuhkan waktu 20 detik, padahal baru 0,03 detik berselang alarm sudah berbunyi. Sistem keadaan darurat tidak mampu mengatasi kondisi tersebut, daya reaktor naik menjadi 530 MWt dalam waktu 3 detik untuk kemudian naik secara drastis secara eksponensial yang menyebabkan terjadinya pembangkitan uap serentak. Uap dengan tekanan sangat tinggi yang terbentuk serentak tersebut menimbulkan ledakan dahsyat. Kurang dari sedetik setelah ledakan pertama segera disusul ledakan kedua yang disebabkan oleh masuknya udara ke teras yang menyebabkan bahan bakar dan beberapa elemen bereaksi dengan oksigen dan terbakar dahsyat (Richard, 1988).

Kritikalitas yang meningkat dalam waktu singkat menyebabkan kenaikan daya reaktor secara cepat disebut sebagai *prompt excursion*. Hal ini menyebabkan uap bertekanan sangat tinggi juga terbentuk secara spontan sehingga memicu ledakan teras dan terhamburnya zat radioaktif produk fisi ke udara. Ditinjau dari dampak yang diakibatkan berdasarkan *The International Nuclear Event Scale*, kecelakaan reaktor Chernobyl dikategorikan sebagai kecelakaan sangat parah (*severe accident*) atau masuk kategori kelas 7 (*major accident*). Ciri dari kategori kelas 7 adalah dampak luar biasa terhadap lingkungan maupun kesehatan masyarakat hingga area di luar tapak (IAEA, 1999).

2. Kecelakaan Reaktor Three Miles Island (TMI)

Reaktor TMI adalah reaktor jenis PWR yang mengalami kecelakaan pada tanggal 28 Maret 1979 di Three Mile Island, Dauphin County, Pennsylvania, Amerika Serikat. Reaktor ini dirancang oleh Babcock & Wilcox dan dioperasikan oleh Metropolitan Edison (Med Ed).

Kecelakaan itu dimulai pukul 4 pagi pada Rabu, Maret 28, 1979, dengan kegagalan dalam sistem non-nuklir sekunder, diikuti dengan kejadian terbukanya katup buang tekanan *Pilot Operated Relieve Valve* (PORV) dalam sistem primer, yang memungkinkan sejumlah besar pendingin reaktor terbuang. Kegagalan mekanik itu diperparah oleh kegagalan operator reaktor mengidentifikasi kondisi yang sudah dalam kecelakaan kehilangan pendingin (LOCA). Hal ini disebabkan kurangnya faktor manusia yang kurang terlatih dalam interaksi manusia-komputer, desain indikator ruang kontrol yang multitafsir dan user interface.

Kegagalan dalam sistem non-nuklir sekunder, diikuti dengan kejadian terbukanya katup buang tekanan PORV dalam sistem primer, yang memungkinkan sejumlah besar pendingin reaktor terbuang dan kegagalan operator reaktor mengidentifikasi kondisi yang sudah dalam kecelakaan kehilangan pendingin (LOCA) menunjukkan kurang terlatihnya operator dalam mengatasi masalah manajemen kecelakaan atau bahkan perlu dilakukan penyusunan Program Manajemen Kecelakaan Reaktor yang lebih rinci dan mudah dilaksanakan (Pane dkk, 2012).

3. Kecelakaan Reaktor Fukushima

Reaktor Fukushima adalah jenis reaktor didih air ringan yang mengalami kecelakaan pada tanggal 11 Maret 2012 di Prefecture Fukushima, Daichii, Jepang. Reaktor ini dirancang oleh *General Electric*, USA dan dioperasikan oleh *Tokyo Electric Power Company* (TEPCO) Kecelakaan PLTN Fukushima Daichi merupakan rangkaian dari kegagalan alat, pelelehan nuklir dan pelepasan bahan radioaktif pada lokasi Fukushima 1 setelah kejadian gempa Tohoku dan Tsunami pada 11 Maret 2011. Kejadian ini merupakan kejadian kecelakaan terbesar setelah kecelakaan Chernobyl tahun 1986.

Di Fukushima 1 terdapat enam reaktor BWR yang dirancang oleh *General Electric* dan dioperasikan oleh *Tokyo Electric Power Company* (TEPCO). Pada saat gempa, teras reaktor unit 4 sudah dikosongkan dan unit 5 dan 6 sedang dipadamkan untuk perawatan. Unit lain yaitu 1, 2, dan 3 segera pada secara otomatis setelah kejadian gempa dan generator darurat segera hidup untuk mengendalikan alat elektronik dan sistem pendingin. Kedatangan menyusul tsunami memutuskan semua hubungan ke sumber jaringan listrik dan juga menyebabkan banjir pada generator darurat. Sebagai akibatnya generator berhenti beroperasi yang menyebabkan pompa kehilangan daya untuk mensirkulasi air kedalam reaktor sehingga berdampak pemanasan yang semakin meningkat oleh sisa panas. Pada kondisi normal pengambilan panas sisa ini harus berjalan walaupun reaktor dalam kondisi padam. Kerusakan akibat banjir dan gempa menghalangi datangnya bantuan dari luar.

Dalam beberapa jam dan hari reaktor unit 1, 2, dan 3 mengalami pelelehan. Sambil pekerja berjuang untuk mendinginkan dan memadamkan reaktor, beberapa ledakan akibat proses kimia air-udara terjadi. Gas hydrogen dihasilkan oleh panas di reaktor yang menyebabkan reaksi produksi hidrogen antara pengungkung bahan bakar dan air disekitarnya. Saat tinggi air di kolam batang kendali menurun maka mulailah kejadian *overheating*. Kekhawatiran terlepasnya radionuklida maka pendudukpun disekitar radius 20 km dievakuasi. Pada awal-awal kejadian para pekerja dievakuasi sementara dalam waktu yang berbeda untuk keselamatan radiasi. Selanjutnya daya listrik mulai pulih pada beberapa reaktor sehingga memungkinkan terjadi pendinginan (Pane dkk, 2012).

I. Reaktor Nuklir di Indonesia

1. Reaktor Nuklir Triga Bandung

Pada hari sabtu tanggal 20 Februari 1965 Presiden Soekarno meresmikan berdirinya Pusat Reaktor Bandung (PRAB- BATAN) dengan reaktor Triga Mark II yang beroperasi pada daya 250 kW.

Untuk meningkatkan kemampuan produksi radioisotop dan meningkatkan jenis dan kemampuan penelitian disimpulkan daya reaktor perlu dinaikan menjadi satu megawat termal.

Pekerjaan dimulai pada awal September 1971 dan selesai pada akhir november 1971. *Criticality Experiment* Triga-1000 dilakukan pakar PRAB sendiri dengan

dipimpin oleh direktur PRAB Soetarjo Soepadi M.Sc dan dicapai pada 27 November 1971 pukul 02.47 dengan operator R. Suyadi.

Enam hari kemudian, 3 Desember 1971, reaktor terbukti mampu bekerja pada daya 1000 kW dan diresmikan Presiden Suharto pada keesokan harinya yaitu 4 Desember 1971 bertepatan dengan ulang tahun BATAN. Kemudian pada tanggal 18 Maret 1980, nama Pusat Reaktor Atom Bandung diubah menjadi Pusat Penelitian Teknik Nuklir (PPTN) (BATAN A, 2017).

2. Reaktor Kartini Yogyakarta

Reaktor Kartini dibangun mulai akhir 1974 dan beroperasi pada Januari 1979, salah satu fasilitas yang dimiliki pusat penelitian bahan murni dan instrumentasi (PPBMI) – Batan Yogyakarta, tipe reaktor kolam dengan daya 100 kWatt, didesain untuk tujuan penelitian, latihan dan pendidikan.

Reaktor Kartini berada di PPBMI – BATAN Yogyakarta. Lokasi PPBMI terletak pada 7 km sebelah timur Yogyakarta, ± 500 meter masuk ke sebelah utara jalan Yogyakarta – Solo. Tempat ini termasuk wilayah kabupaten Sleman, kecamatan Depok, kelurahan Catur Tunggal. Luas kompleks PPBMI termasuk pengembangannya sebesar ± 12 ha.

Pembangunan reaktor Kartini dimulai pada akhir tahun 1974. Pelaksana pembangunan seluruhnya ditangani oleh tenaga-tenaga ahli BATAN yang didalam pelaksanaannya ditugaskan kepada sebuah kelompok yang disebut Tim Pembangunan Reaktor yang dibentuk menurut SK Dirjen BATAN No. 119/DJ/13/XI/1974 tertanggal 13 November 1974.

Reaktor Kartini mencapai kondisi kritis untuk pertama kalinya pada hari Kamis 25 Januari 1979 jam 17.40 WIB, diresmikan oleh Bapak Presiden RI pada tanggal 1 Maret 1979. Fungsi utama adalah untuk sarana penelitian, produksi isotop, pendidikan dan latihan kader-kader dalam bidang reaktor. Operasi reaktor telah dilakukan pada tingkat daya 100 Watt (BATAN B, 2017).

3. Reaktor Serba Guna GA Siwabessy

Reaktor Serba Guna didesain dan dibangun oleh Interatom GMBH dari Republik Federasi Jerman. Bangunan sipil dan prasarana fisik dikerjakan oleh kontraktor dalam negeri. Pembangunan reaktor serba guna berlangsung sekitar empat tahun, yaitu sejak tahap ekskavasi gedung pada bulan Mei 1983 sampai dengan reaktor kritis pada bulan Juli 1987 di Serpong. Akhirnya pada bulan Maret 1992 berhasil dicapai operasi reaktor pada daya penuh 30 MW.

Dalam operasionalnya sehari-hari RSG GA Siwabessy dijalankan dengan besar kapasitas 15 MW untuk efisiensi. Kapasitas itu sudah cukup untuk kegiatan penelitian, produksi isotop untuk bidang industri hingga kesehatan, tes maupun uji material, percobaan ilmu pengetahuan, dan lainnya.

Dijalankan sepenuhnya oleh tenaga ahli Indonesia, reaktor-reaktor BATAN telah berfungsi selama puluhan tahun dengan aman dan selamat tanpa mengalami insiden. Proses pengamanan di reaktor memakai sistem keselamatan berlapis untuk meminimalisir dampak kerusakan ke manusia dan lingkungan sekitar (BATAN C, 2017).

J. Persamaan Kinetika Reaktor Titik

Reaktor titik adalah suatu pemodelan yang mengabaikan distribusi spasial fluks neutron, sehingga perilaku reaktor terhadap waktu menjadi perhatian utama. Daya yang dihasilkan sangat tergantung pada waktu dan berkaitan erat dengan reaktivitas, serta karakteristik neutron cepat dan neutron lambat. Persamaan kinetika reaktor titik memodelkan perilaku reaktor menurut waktu. Solusi terhadap persamaan ini memberikan prediksi mengenai dinamika operasi reaktor nuklir dan bermanfaat untuk memahami fluktuasi daya yang dialami reaktor selama *start-up* atau pun *shut-down*.

Persamaan kinetika reaktor titik merupakan suatu sistem persamaan differensial densitas neutron dan konsentrasi prekursor neutron tunda. Densitas neutron dan konsentrasi prekursor neutron tunda ini menentukan perilaku menurut waktu (*time-dependent*) tingkat daya reaktor yang dipengaruhi oleh posisi batang kendali.

Persamaan kinetika reaktor titik ini bersifat deterministik dan hanya bisa digunakan untuk mengestimasi nilai rerata densitas neutron, konsentrasi prekursor neutron tunda, dan tingkat daya. Persamaan ini sebenarnya memodelkan suatu sistem populasi yang berinteraksi antara populasi neutron dan prekursor neutron tunda (Cahyono, 2012).

K. *Software* MATLAB

MATLAB adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik, merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Pada awalnya program ini merupakan *interface* untuk koleksi rutin-rutin numerik proyek LINPACK dan EISPACK, dikembangkan menggunakan bahasa FORTRAN. Namun sekarang, program ini merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan assembler (terutama fungsi-fungsi dasar MATLAB) (Arhami dan Destiani, 2005). Sejalan dengan berkembangnya teknologi informasi maka sistem komputasi numerik juga ikut berkembang, terutama ketika perangkat lunak matematis mulai bermunculan seperti: MATHEMATICA, MATHCAD, MAPLE, dan MATLAB. Khusus di kalangan perguruan tinggi, software MAPLE (*Mathematical Programming Language*) dan MATLAB sangatlah populer (Suarga, 2007).

Mungkin cara termudah untuk menggambarkan MATLAB adalah menganggapnya sebagai sebuah kalkulator. Seperti umumnya kalkulator biasa, MATLAB sanggup mengerjakan perhitungan sederhana seperti penambahan, pengurangan, perkalian dan pembagian. Seperti kalkulator sains, MATLAB dapat menangani bilangan kompleks, akar dan pangkat, logaritma, operasi trigonometri seperti sinus, cosinus, dan tangen (Hansleman dan Littlefield, 1997).

MATLAB merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematik elemen, matrik, optimasi, aproksimasi, dan lain-lain. MATLAB banyak digunakan pada:

- Matematika dan komputasi;
- Pengembangan dan algoritma;
- Pemrograman *modeling*, simulasi, dan pembuatan prototipe;
- Analisis data, eksplorasi, dan visualisasi;
- Analisis numerik dan statistik;
- Pengembangan aplikasi teknik (Arhami dan Destiani, 2005).

L. Penelitian Sebelumnya

Cahyono telah melakukan penelitian aspek neutronik dengan program simulator untuk membuat model sistem teras reaktor sebagai suatu titik dalam rangka untuk menyederhanakan proses simulasi dinamika reaktor. Luaran program berhasil menunjukkan adanya suatu *prompt jump* densitas neutron pada awal iterasi yang disebabkan oleh kontribusi neutron cepat. Dari luaran tersebut didapat bentuk grafik eksponensial. Penelitian yang dilakukan oleh Cahyono tidak menggunakan temperatur *feedback* (Cahyono, 2012).

Kohler melakukan penelitian dengan menganalisis pengaruh pada reaktor dengan model suatu titik. Model tersebut mempertimbangkan penambahan daya, temperatur, dan energi *prompt supercritical excursion* (Kohler, 1969).

Pada penelitian lainnya, Chen melakukan analisis numerik untuk proses *prompt supercritical* pada reaktor nuklir dengan temperatur *feedback* dan daya awal (Chen et al, 2007). Dam juga melakukan penelitian persamaan kinetika reaktor titik untuk mengetahui pengaruh reaktivitas temperatur *feedback* linear. Model tersebut mempertimbangkan panas inti setelah hilangnya pendingin yang batasannya adiabatik (Dam, 1996).

Aboanber telah mengembangkan penyelesaian numerik pada persamaan kinetika reaktor titik untuk mengetahui pengaruh model Newtonian *feedback* yang menggunakan aproksimasi Pade dan metode analisis inversi (Aboanber, 2002). Nahla juga telah melakukan penelitian untuk menganalisis penyelesaian persamaan kinetika titik dengan satu grup neutron tunda dan pengaruh adiabatik *feedback* (Nahla, 2009).

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih lima bulan terhitung dari bulan Juli sampai dengan November 2017. Adapun tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

B. Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah laptop dengan OS (*Operating System*) Windows 10 dan program MATLAB (*Matrix Laboratory*).

C. Prosedur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik yang diselesaikan secara metode numerik dengan prosedur sebagai berikut:

1. Menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik.

Persamaan kinetika reaktor titik merupakan persamaan neutron tunda terhadap waktu (*time-dependent*). Sehingga densitas nomor atom prekursor dapat ditulis seperti persamaan (3-1).

jumlah prekursor yang diharapkan pada titik (r, t) (3-1)

di dalam d^3r , dimana r selalu meluruh dengan memancarkan neutron tunda.

Hubungan keseimbangan konsentrasi prekursor dapat ditulis dengan menghubungkan peluruhan radioaktif (3-2 dan 3-3):

$$\text{Jumlah peluruhan prekursor radioaktif (3-2) dan (3-3):} \quad (3-2)$$

$$\frac{dC_i}{dt} d^3r = \lambda C_i d^3r$$

$$\text{Jumlah terbentuknya prekursor} \quad (3-3)$$

$$\frac{dC_i}{dt} d^3r = \beta^i v \Sigma_f \phi(r, t) d^3r$$

Adapun β_i adalah fraksi neutron tunda kelompok ke- i . Maka persamaan keseimbangan konsentrasi prekursor dapat ditulis:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\lambda C_i + \beta^i v \Sigma_f \phi(r, t) \quad (3-4)$$

Persamaan difusi satu-kecepatan dapat digunakan untuk menjelaskan ketersediaan fluks (ϕ), kemudian kontribusi neutron ke sumber fisi secara eksplisit dengan (3-5):

$$\text{dengan (3-4)} \quad (3-5)$$

$$\dot{S}(r, t) = (1 - \beta) v \Sigma_f \phi(r, t) + \sum_{i=1}^6 \lambda^i C_i(r, t)$$

Dengan β adalah fraksi total neutron tunda seluruh kelompok dan λ^i adalah tetapan peluruhan prekursor neutron tunda kelompok ke- i . Dimana, persamaan difusi satu kecepatan dapat ditulis pada persamaan 3-6.

$$\text{persamaan difusi satu kecepatan dapat ditulis pada persamaan} \quad (3-6)$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} - D \nabla^2 \phi + \sum_a a \phi(r, t) = \dot{S}(r, t)$$

Lalu persamaan (3-5) didistribusikan ke persamaan (3-6), oleh karena itu sistem persamaan fluks neutron di reaktor termasuk neutron tunda dapat diketahui (3-7 dan 3-8):

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} - D \nabla^2 \phi + \Sigma_a \phi(r, t) = (1 - \beta) v \Sigma_f \phi(r, t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(r, t) \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\lambda_i C_i(r, t) + \beta_i v \Sigma_f \phi(r, t), \quad i = 1, \dots, 6. \quad (3-8)$$

Persamaan diatas dapat diterapkan pada situasi asimtotik pada kedua fluks dan konsentrasi prekursor dapat ditulis sebagai fungsi yang terpisah pada ruang dan waktu:

$$\text{fungsi ruang dan waktu:} \quad (3-9)$$

$$\begin{aligned} \phi(r, t) &= v n(t) \psi_1(r) = v n_0 \exp \left[\left(\frac{k-1}{l} \right) t \right] \psi_1(r), \\ &= v n(t) \psi_1(r) = v n_0 \exp \\ C_i(r, t) &= C_i(t) \psi_1(r), \end{aligned} \quad (3-10)$$

Persamaan (3-9) dengan k adalah faktor multiplikasi dan l adalah waktu neutron di reaktor, dapat disubstitusikan ke persamaan difusi satu kecepatan maka didapatkan:

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{k-1}{l} \right) n(t) \quad (3-11)$$

Adapun $n(t)$ adalah daya relatif pada saat t . Sehingga persamaan (3-7) dan (3-8) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(1-\beta) - 1}{l} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t), \quad (3-12)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \beta^i \frac{k}{l} n(t) - \lambda C_i(t), \quad i = 1, \dots, 6. \quad (3-13)$$

Adapun $C_i(t)$ adalah konsentrasi nuklida prekursor neutron tunda kelompok ke- i pada saat t . Adapun Λ sebagai waktu generasi neutron sebagai berikut:

$$\Lambda \equiv \frac{l}{k} \equiv \text{Waktu generasi antara lahirnya neutron dan penyerapan selanjutnya yang disebabkan oleh fisi.} \quad (3-14)$$

Jika $k \sim 1$, lalu Λ pada dasarnya hanya massa neutron cepat l . Selanjutnya kuantitas yang sangat penting untuk diketahui sebagai *reaktivitas*, yang pada dasarnya adalah deviasi multiplikasi inti dari nilai kritis $k = 1$,

$$\rho(t) \equiv \frac{k(t) - 1}{k(t)} \equiv \text{reaktivitas terhadap waktu} \quad (3-15)$$

Dapat dilihat dari persamaan di atas bahwa k dan ρ adalah fungsi waktu. Sehingga persamaan (3-14) dan (3-15) dapat disubstitusi ke persamaan (3-12) dan persamaan (3-14) ke persamaan (3-13) dapat ditulis menjadi:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t)k - k\beta}{\Lambda k} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t), \quad (3-16)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \beta^i \frac{1}{\Lambda} n(t) - \lambda C_i(t), \quad i = 1, \dots, 6. \quad (3-17)$$

Persamaan (3-16 dan 3-17) dapat disederhanakan menjadi persamaan (3-18 dan 3-19).

$$\frac{dn}{dt} = \left[\frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} \right] n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t), \quad (3-18)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t), \quad i = 1, \dots, 6. \quad (3-19)$$

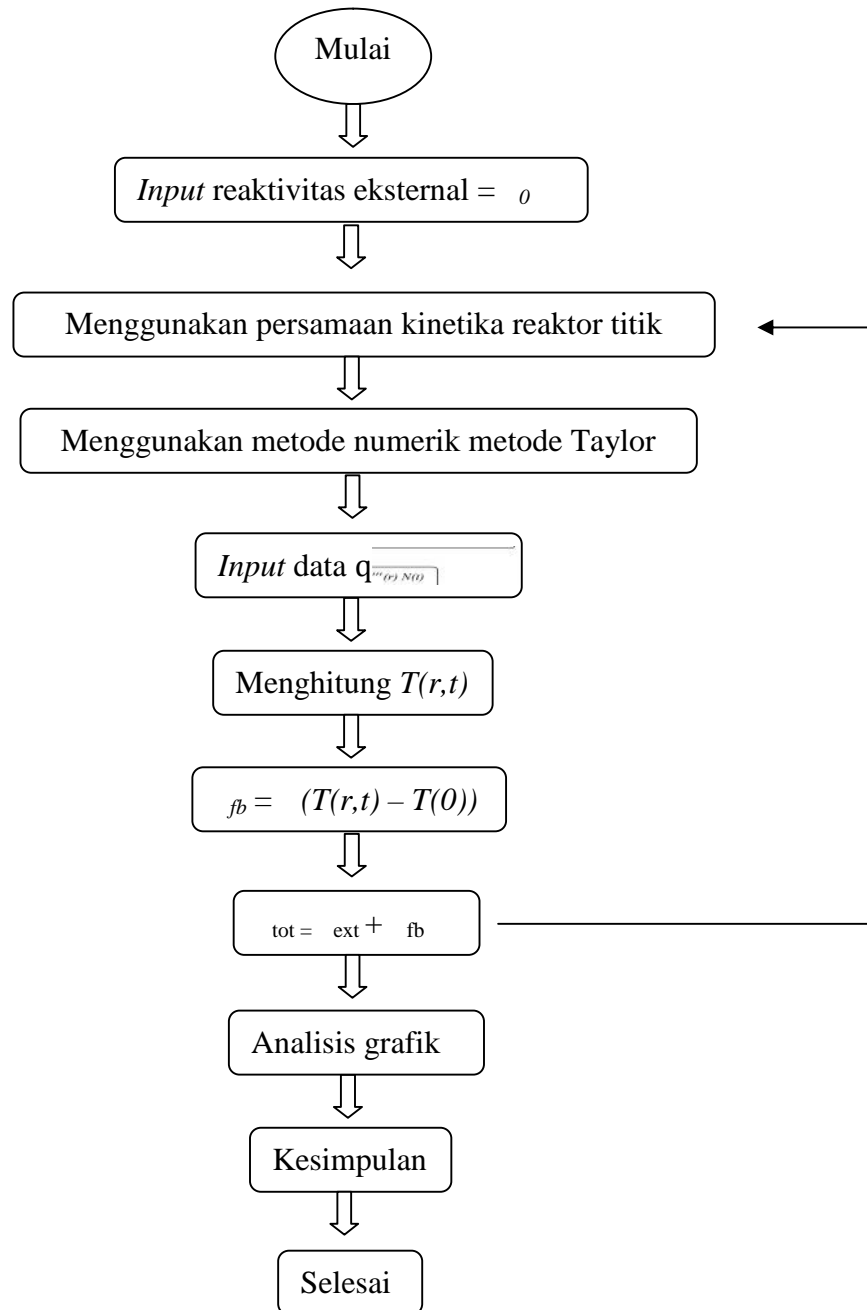
2. Pemograman dengan MATLAB

Untuk menganalisis data digunakan *software* pembantu untuk membantu perhitungan. Pada penelitian ini digunakan *software* MATLAB dengan prosedur sebagai berikut:

1. Membuat program untuk persamaan kinetika reaktor titik pada MATLAB.
2. Menentukan data awal untuk daya relatif (N_0), konsentrasi awal prekursor (C_0), fraksi neutron tunda (), reaktivitas awal (), konstanta peluruhan neutron tunda (), dan waktu generasi neutron (Λ).
3. Menentukan ukuran langkah (h).
4. Data daya pada penelitian ini, menggunakan data daya dari reaktor SCWR yang telah diteliti oleh Wati yaitu sebesar $204,7664 \text{ Watt/cm}^3$ (Wati, 2017).
5. Memasukkan data tersebut ke dalam program lalu melakukan *run*.
6. Menganalisis grafik yang didapatkan setelah dilakukan proses *run*.

D. Diagram Alir Penelitian

Adapun Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada reaktivitas tanpa *feedback* dengan reaktivitas awal (ρ_0) = 0,0025 dan daya relatif awal (N_0) = 1, didapatkan daya relatif (N) = 25,9 saat iterasi ke-1000. Nilai N pada iterasi ke-1000 bahkan seterusnya sesuai dengan teori, sehingga persamaan reaktor kinetika titik dengan metode Taylor dapat dengan baik menghitung daya relatif.
2. Pada reaktivitas tanpa *feedback* dengan (ρ_0) = 0,0025, saat waktu (t) = 1 s didapatkan nilai daya relatif (N) = 25,9; temperatur *clad* (T_C) = 752,1 K; temperatur *gap* (T_G) = 4073,8 K; temperatur *fuel* (T_F) rata-rata = 4073,8 K dan rapat daya (q''') = 5314,72 Watt/cm³. Didapatkan hasil nilai yang terus naik dalam jumlah yang sangat tinggi sehingga menghasilkan grafik eksponensial. Pada reaktivitas tanpa *feedback* dengan $\rho_0 = 0,0025$, didapatkan nilai tertinggi yaitu $N = 1,79$; $T_C = 156,1$ K; $T_G = 385,3$ K; T_F rata-rata = 1050,5 K dan $q''' = 366,64$ Watt/cm³. Pada reaktivitas menggunakan *feedback* dengan $\rho_0 = 0,0025$, didapatkan nilai tertinggi yaitu $N = 2,09$; $T_C = 162,8$ K; $T_G = 426,6$ K; T_F rata-rata = 1210,9 K dan $q''' = 429,29$ Watt/cm³. Pada reaktivitas menggunakan *feedback* dengan $\rho_0 = 0,00315$, didapatkan nilai tertinggi yaitu $N = 3,27$; $T_C = 192,7$ K; $T_G = 599$ K;

T_F rata-rata = 1828,5 K dan $q''' = 670,53 \text{ Watt/cm}^3$. Pada reaktivitas menggunakan *feedback* dengan $\rho = 0,0025$; $\rho = 0,00315$ dan $\rho = 0,005$ didapatkan hasil dengan nilai puncak yang hanya sesaat saja. Setelah mengalami lonjakan nilai puncak, nilai tersebut mengalami penurunan yang hanya sesaat juga. Kemudian nilai tersebut mendekati nilai awal dan menjadi stabil, dari ketiga ρ yang berbeda didapatkan nilai yang hampir sama (perbedaan nilainya sangat kecil) saat $t = 1 \text{ s}$ yaitu $N = 0,99$; $T_C = 136,6 \text{ K}$; $T_G = 246,6 \text{ K}$; T_F rata-rata = 636,1 K dan $q''' = 204,765 \text{ Watt/cm}^3$.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik dengan metode numerik selain metode Taylor.
2. Melakukan analisis kecelakaan reaktor TOP pada jangka waktu lebih dari satu hari.
3. Menyelesaikan dan membandingkan hasil dari penyelesaian persamaan kinetika reaktor titik secara analitis dengan penyelesaian secara numerik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboanber, A.E. and Nahla, A.A. 2002. Solution of The Point Kinetics Equations in The Presence of Newtonian Temperature Feedback by Pade Approxiamations Via the Analytical inversion Method. *J. Phys. A: Math. Gen. Vol. 35*. Page 9609-9627.
- Alfa, T. 2005. *Fisika Reaktor – Pelatihan Penyelenggaraan Operator dan Supervisor Reaktor TRIGA 2000*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. Bandung. Page 156-158.
- Ammirabile, L. 2010. Studies on Suoercritical Water Reactor Fuel Assemblies Using The Sub-channel Code COBRA-EN. *Journal of Nuclear Engineering and Design. Vol. 240*. Page 3087-3094.
- Arhami, M dan Desiani, A. 2005. *Pemograman MATLAB*. Yogyakarta: Andi. Page 1-2.
- Baindur, S. 2008. Materials Challenges for The Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR). *Bulletin of The Canadian Nuclear Society. Vol. 29 No. 1*. Page 32-38.
- BATAN, A. 2017. *Reaktor Triga* (Online) tersedia: <http://www.batan.go.id/index.php/id/kedeputian/fasilitas-nuklir/142-trigamark/152-reaktor-triga>. Diakses pada 10 Desember 2017.
- BATAN, B. 2017. *Sejarah Reaktor Kartini Yogyakarta* (Online) tersedia: <http://www.batan.go.id/index.php/id/kedeputian/fasilitas-nuklir/869-sejarah-reaktor-kartini-yogyakarta>. Diakses pada 10 Desember 2017.
- BATAN, C. 2017. *Reaktor Serba Guna GA Siwabessy* (Online) tersedia: <http://www.batan.go.id/index.php/id/kedeputian/fasilitas-nuklir/144-gasiwabessy/153-reaktor-serba-guna-ga-siwabessy>. Diakses pada 10 Desember 2017.
- Benjamin, M. 1983. *Nuclear Reactor Materials and Applications*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. Page 51-52.

- Cahyono, A., Handoyo, D., dan Teguh, S. 2012. Pemograman Persamaan Kinetika Reaktor Titik Dengan Labview. *PRIMA: 1411-0296. Vol. 9 No. 1.* Page 42-29.
- Chanakya., Sarma., Rawat, R., Sharma, A. 2001. *Simulating of Using Control Rods to Control Nuclear Reactor Core.* Bidholi: University of Petroleum and Energy Studies. Page 28-34.
- Chen, W.Z., Gou, L.F., and Zhu, B. 2007. Accuracy of Analytical Methods Obtaining Supercritical Transients with Temperature Feedback. *Prog. Nucl Energy Vol. 49 No. 4.* Page 290-302.
- Dam, V.H. 1996. Dynamics of Passive Reactor Shutdown. *Nucl. Energy Vol. 30 No. 3.* Page 255-264.
- Dewita, E. 2012. Analisis Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Vol. 14 No.1.* Page 45-56.
- Dibyoy, S. 2007. Studi Karakteristik Pressurizer pada PWR. *Prosiding PPI PDIPTN 2007.* Hlm. 179–185.
- Duderstadt, J.J. and Hamilton, L.J. 1976. *Nuclear Reactor Analysis.* New York: John Wiley and Sons, Inc. Page 55, 64,66-68 ;447-460 dan 489-481.
- Dobuchi, N., Takeda, S., and Kitada, T. 2016. Study on The Relation Between Doppler Reactivity Coefficient and Resonance Integrals of Thorium and Uranium in PWR Fuels. *Analysis of Nuclear Energy. Vol. 90.* Page 191-194.
- EPA. 2017. *Climate Change Is Happening.* (Online) tersedia: https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/climate-change-basic-information_.html. Diakses pada tanggal 8 Juni 2017.
- Hansleman, D dan Littlefield, B. 1997. *MATLAB.* Diterjemahkan oleh: Edyanto, Jozep. Yogyakarta: Andi. Page 1.
- Hernadi, J. 2012. *Matematika Numerik dengan Implementasi Matlab.* Yogyakarta: Andi Page 1.
- Hyperphysics. 2017. *Nuclear Binding Energy.* (Online) tersedia: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/nucbin.html>. Diakses pada tanggal 11 Desember 2017.
- IAEA. 1999. *The INES: For prompt of communication of safety significant.* Vienna: INES.

- Jatiman, S dan Soetrisnanto, A.Y. 1986. *Buku Materi Pokok Pengetahuan Nuklir*. Jakarta: Karunika. Page 4.12, 4.25. dan 4.30.
- Kadir, A. 1995. *Energi: Sumberdaya, Inovasi, Tenaga Listrik, dan Potensi Ekonomi. Edisi Kedua*. Jakarta: UI-Press. Page 343-344.
- Kohler, W.H. 1969. Reactivity Feedback With Short Delayed Times. *J. Nuclear Vol 23*. Page 569-574.
- Lamarsh, J.R. 1983. *Introduction To Nuclear Engineering*. New York: Addison-Wesley Publishing Company. Page 102.
- Lewis, E.E. 2008. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Academic Press. USA. Page 134.
- Liu, X. J., Cheng, X. 2009. Core and Sub-Channel Evaluation of a Thermal SCWR. *Nuclear Engineering and Technology. Vol. 41 No.5*. Page 677-640.
- Munir, R. 2006. *Metode Numerik*. Bandung: Informatika. Page 378-379.
- Nahla, A.A. 2009. An Analytical Solution of The Point Reactor Kinetics Equation With One Group of Delay Neutron and The Adiabatic Feedback. *Prog. Nucl. Energy Vol 51*. Page 124-128.
- Nrc. 2017. *Backgrounder on Chernobyl Nuclear Power Plant Accident*. (Online) tersedia: www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/chernobyl-bg.html. Diakses pada 8 Juni 2017.
- Nuclear Power. 2017. *Thermodynamics*. (Online) tersedia : <http://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/>. Diakses pada 11 November 2017.
- Nuceng. 2017. *Binding Energy*. (Online) tersedia : http://www.nuceng.ca/igna/binding_energy.htm. Diakses pada 11 Desember 2017.
- Oka, Y., Koshizuki, S., Ishiwatari, Y., and Yamaji, A. 2010. *Super Light Water Reactor and Super Fast Reactors*. New York: Springer. Page 56.
- Pane, J.S., Suharno., Udiyani, P.M., Sugiyanto., Kuntjoro., dan Sri. 2012. *Perbandingan Manajemen Kecelakaan Parah TMI, Chernobyl, dan Fukushima*. Serpong: BATAN.
- Power, N. 2018. *Uranium 233*. (Online) tersedia : <http://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/uranium/uranium-233/>. Diakses pada 17 Januari 2018.

- Richard, F.M. 1988. *Chernobyl: The Real Story*. New South Wales: Pergamon Press,
- Shan, J., Chen, W., Rhee, B.W., and Leung, K.H.L. 2010. Coupled Neutronics/Thermal-Hydraulics Analysis of CANDU-SCWR Fuel Channel. *Annals of Nuclear Energy*. Page 58-65.
- Shang, Z. 2009. CFD in Supercritical Water-cooled Nuclear Reactor (SCWR) with Horizontal Tube Bundles. *The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*. Page 1-14.
- Singh, S.S. and Mohapatra, D. 2015. Solution Of The Reactor Point Kinetics Equations by MATLAB Computing. *Nuclear Technology and Radiation Protection*. Vol. 30 No. 1. Page 11-17.
- Soentono, S. 1998. Bahan-Bahan untuk Industri Reaktor Nuklir. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi III*. Page 22-31.
- Stacey, W.M. 2007. *Nuclear Reactor Physic*. Weinheim: Wiley Vch Verlag Gmbh & Co. Kгаа. Page 3-4.
- Suarga. 2007. *Fisika Komputasi Solusi Problema Fisika Dengan MATLAB*. Yogyakarta: Andi. Page 1.
- Suharno, Tjahjono, H., dan Sugiyanto. 1996. Reaktor Nuklir dan Aspek Radiologinya. *Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan: 0854-4085*. Page 152-158.
- Su'ud, Z. 2006. Sistem Analisa Kecelakaan Reaktor Cepat Berpendingin Logam Cair Dengan Tingkat Kompleksitas Berjenjang. *Risalah Lokakarya Komputasi Dalam Sains Dan Teknologi Nuklir XVII*. No. 1-19. Page 1-19.
- Suwoto dan Zuhair. 2012. Studi dan Observasi Awal Kebutuhan Data Nuklir untuk Reaktor Generasi IV. *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*. Vol. 11 No. 1(B). Page 18-25.
- Tim BATAN. 2001. Bahan Bakar Thorium. <http://www.batan.go.id/ensiklopedi/15/04/01/02/15-04-01-02.html>. Diakses pada 7 Juni 2017.
- Walter, A.E. and Reynolds, A.B. 1981. *Fast Breeder Reactor*. New York: Pergamon Press. Page 185.
- Wardhana, W., A. 2007. *Teknologi Nuklir: Proteksi Radiasi Dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Andi. Page 51 dan 126-127.

- Wati, W.K. 2017. *Desain Inti Teras Reaktor (Core) X-Y Dua Dimensi Model Reaktor PWR Untuk Reaktor SCWR Menggunakan Bahan Bakar Thorium*. Page 46-49.
- World Nuclear. 2010. *Nuclear Power Reactors*. (Online) tersedia: <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>. Diakses pada 6 Juni 2016.
- World Nuclear. 2017. *Nuclear Power Reactors*. (Online) tersedia: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>. Diakses pada 30 Maret 2017.
- Yoga, P., Madi, E.P., dan Pranoto, Alvini. 2008. *Mengenal Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. Jakarta: Kementrian Riset dan Teknologi. Page 36.
- Yulianti, Y., Su'ud, Z., Waris, A., dan Khotimah, S.N. 2009. Analisis Persamaan Difusi Ruang-Waktu Silinder 1-Dimensi Pada Kecelakaan Reaktor UTOP (*Unprotected Transient Over Power*) Untuk Jenis Reaktor Cepat. *J. Sains MIPA: 1978-1873. Vol.15 No 2*. Page 100-110.
- Yulianto, T. 1996. Kajian Kemungkinan Modifikasi Peralatan Fabrikasi untuk Fabrikasi Elemen Bakar Jenis HWR dan LWR. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*. Page 190-198.
- Zhang, P., Kan W., Ganglin Y. 2014. A simplified Supercritical Fast Reactor with Thorium Fuel. *Science and Technology of Nuclear Installations*. Page 1-9.
- Zweifel, P.F. 1973. *Reactor Physics*. USA. McGraw-Hill. Page 74.