

**TUGAS AKHIR**  
**PENGEMBANGAN KODE OPERASI REAKTOR KARTINI**  
**UNTUK MENDUKUNG *INTERNET REACTOR LABORATORY***

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat  
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains Terapan

**Program Studi Elektronika Instrumentasi**  
**Jurusan Teknofisika Nuklir**



Disusun oleh

**Ardina Mei Devinta Suryana**  
**021300342**

**SEKOLAH TINGGI TEKNOLOGI NUKLIR**  
**BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL**  
**YOGYAKARTA**

**2017**

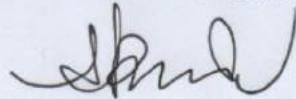
**LEMBAR PENGESAHAN**  
**TUGAS AKHIR**  
**PENGEMBANGAN KODE OPERASI REAKTOR KARTINI**  
**UNTUK MENDUKUNG *INTERNET REACTOR LABORATORY***

**Oleh:**  
**ARDINA MEI DEVINTA SURYANA**  
**NIM 021300342**

Telah dipertahankan didepan Dewan Penguji pada Juli  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat pada 1 Agustus 2017

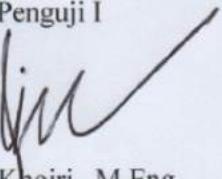
Susunan Dewan Penguji

Ketua Dewan Penguji,



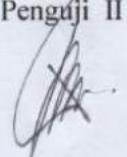
Dr. Anwar Budianto, DEA  
NIP 19570708 198203 1 005

Penguji I



Ir. M. Khoiri , M.Eng  
NIP 19620812 198703 1 001

Penguji II



Prof. Syarip  
NIP 19560204 198103 1 003



Mengetahui,  
Ketua Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir

Edy Giri Rachman Putra, Ph.D.  
NIP 19700327 199403 1 003

## **HALAMAN PERSETUJUAN**

### **TUGAS AKHIR**

### **PENGEMBANGAN KODE OPERASI REAKTOR KARTINI UNTUK MENDUKUNG *INTERNET REACTOR LABORATORY***

**Diajukan Oleh**

**ARDINA MEI DEVINTA SURYANA  
NIM 021300342**

Tugas Akhir ini telah diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing I



Dr. Eng. Sutanto, M.Eng  
NIP19820218 200604 1 016

Pembimbing II



Prof. Syarip  
NIP19560204 198103 1 003

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknafisika Nuklir



Dr. Muhtadan, M.Eng.  
NIP 19830301 200604 1 004

## **HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN**

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ardina Mei Devinta Suryana

NIM : 021300342

Program Studi : Elektronika Instrumentasi

Judul Tugas Akhir :

### **PENGEMBANGAN KODE OPERASI REAKTOR KARTINI UNTUK MENDUKUNG *INTERNET REACTOR LABORATORY***

Dengan ini saya menyatakan bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya penulis dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah penulis nyatakan dengan benar.

Yogyakarta, Juli 2017  
Penulis,

Ardina Mei Devinta Suryana  
021300342

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan segala nikmat dan anugerah-Nya sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Pengembangan Kode Operasi Reaktor Kartini Untuk Mendukung *Internet Reactor Laboratory*.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini tidak akan terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kepada:

1. Allah SWT, berkat rahmat, ridho, serta perlindungan-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar. Semoga tugas akhir ini barokah. Aamiin Allahhumma Aamiin.
2. Ayahanda Joko Suryono dan Ibunda Atik Prihantini yang senantiasa memanjatkan doa untuk kelancaran dan kemudahan penulis dalam menyelesaikan pendidikan di Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir. Serta Almarhum Nenek Suratmi yang berbahagia di alam-Nya.
3. Bapak Edy Giri Rachman Putra, Ph.D. selaku Ketua STTN-BATAN Yogyakarta.
4. Bapak Dr. Muhtadan, M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknofisika Nuklir STTN-BATAN Yogyakarta.
5. Bapak Dr.Eng. Sutanto, M.Eng. selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan ilmu pengetahuan, waktu, semangat, motivasi, serta bimbingan terbaik kepada penulis.

6. Bapak Prof. Syarip selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan ilmu pengetahuan, waktu, semangat, motivasi, serta bimbingan terbaik kepada penulis.
7. Bapak Dr Anwar Budianto, DEA dan Bapak Ir. M. Khoiri, M.Eng selaku Ketua Dewan Pengaji dan Pengaji I yang telah memberikan banyak masukan dan kritik kepada penulis dalam penelitian ini
8. Bapak Drs. Supriyono, Msc selaku dosen wali yang selalu memberi dukungan.
9. Bapak Ir. Djivo Harsono ,M.Eng yang telah memberikan tempat bagi penulis untuk mengejakan penelitian ini.
10. Segenap dosen STTN-BATAN Yogyakarta yang telah berbagi ilmu pengetahuan, pengalaman, dan pembelajaran kepada penulis selama menempuh pendidikan di STTN-BATAN Yogyakarta.
11. Danang Setyo, Rofi'atun, Nashir, Yuda, Devi, Vera, Intan, Popi, Prasasti, Indah, dan Sinta yang selalu memberi dukungan.
12. Keluarga besar Elektronika Instrumentasi 2013 yang telah berjuang bersama penulis dalam menempuh pendidikan di STTN-BATAN Yogyakarta.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan pada penyusunan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari berbagai pihak. Akhir kata, penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Yogyakarta, Juli 2017

Penulis,

Ardina Mei Devinta S  
NIM 021300342

## ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

CR	: <i>Control Rod</i>
IRL	: <i>Internet Reactor Laboratory</i>
KDLA	: Kanal Daya Logaritmis Analog
LWR	: <i>Light Water Reactor</i>
MCST	: <i>Maximum cladding surface temperature</i>
NTC	: <i>Nuclear Training Center</i>
SCWR	: <i>Super Cold Water Reactor</i>
SPRAT	: <i>Supercritical Pressure Reactor Accident and Transient</i>

## ***ABSTRACT***

*DEVELOPMENT OF KARTINI REACTOR CODE OPERATIONS TO SUPPORT THE INTERNET REACTOR LABORATORY.* Development of the Kartini reactor operating code is made to support Kartini reactor for nuclear training center. The development of codes was made using Fortran language which was then used to generate data to be validated with Kartini Reactor data such as Reactor power, control rod position and Kartini Reactor coolant temperature. The purpose of this research is to develop a code that is modify from The SCWR code and is expected to support the realization of IRL. Power distribution of the Kartini reactor is assumed as a cosine form to be included in the code to generate data and processed in graphical form. The reactor power depend on the control rods position. The comparition of the power resulted by between either reactor experiment data or the code one is similar by the correlation coefficient  $R^2 = 0.967$ . While the comparition of the cooling temperatures resulted by between either reactor experiment data or the code one is similar by the correlation coefficient  $R^2 = 0.985$ .

*Keywords:* *Code Development, Kartini Reactor, IRL, NTC, Fortran*

## INTISARI

PENGEMBANGAN KODE OPERASI REAKTOR KARTINI UNTUK MENDUKUNG *INTERNET REACTOR LABORATORY*. Pengembangan kode operasi Reaktor Kartini dibuat untuk mendukung pengembangan reaktor Kartini sebagai salah satu sarana (*Nuclear Training Center*) NTC. Pengembangan kode dibuat dengan menggunakan bahasa Fortran yang kemudian digunakan untuk membangkitkan data yang akan di validasi dengan data Reaktor Kartini seperti daya reaktor , posisi batang kendali dan suhu pendingin reaktor Kartini. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sebuah kode yang dimofifikasi dari kode (*Super Cooled Water Reactor*) SCWR dan diharapkan dapat mendukung realisasi Internet Reactor Laboratory) IRL. Distribusi daya reaktor Kartini diasumsikan dalam bentuk cosinus yang akan dimasukan kedalam kode untuk membangkitkan data dan diolah dalam bentuk grafik. Data daya terhadap perubahan posisi batang kendali dari perhitungan kode dan dari operasi reaktor Kartini adalah menyerupai dengan koefisien korelasi  $R^2= 0,967$  , serta data suhu pendingin dari perhitungan kode dengan data suhu pendingin operasi reaktor Kartini adalah menyerupai dengan koefisien korelasi  $R^2= 0,985$ .

Kata kunci : Pengembangan Kode, Reaktor Kartini , *IRL*, *NTC*, Fortran

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN .....	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
INTISARI.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
HALAMAN PERSEMPERBAHAN.....	xiv
HALAMAN MOTTO .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Keaslian Penelitian.....	2
1.3 Rumusan Masalah .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Tujuan Penelitian .....	4
1.6 Manfaat Penelitian .....	4
BAB II LANDASAN TEORI .....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Landasan Teori.....	6
2.2.1 Kinetika reaktor .....	6
2.2.2 Pengendalian reaktor.....	7
2.2.3 <i>Start-up</i> reaktor.....	9
2.2.4 Operasi pada tingkat daya.....	10
2.2.5 <i>Shut-down</i> reaktor.....	10
2.2.6 Daya reaktor.....	10
2.2.7 Periode reaktor.....	11
2.2.8. Kode SPRAT .....	12
2.2.9 Model perpindahan panas bahan bakar.....	13
2.2.10 Model thermal-hidraulik.....	14
2.2.11 Pemrograman persamaan diferensial.....	15
2.2.11.1 Bahasa pemrograman dan metode numerik .....	15
2.2.12 Aliran sirkulasi natural .....	16

2.2.12.1 Prinsip kerja <i>loop</i> sirkulasi alami .....	17
BAB III METODE PENELITIAN .....	19
3.1 Alat dan Bahan .....	19
3.1.1 Alat .....	19
3.2 Tata Laksana Penelitian .....	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	24
4.1 Hasil Penelitian .....	30
4.1.1. Validasi kode operasi reaktor kartini daya terhadap posisi batang kendali .....	30
4.1.2 Hasil variasi nilai CRworth .....	34
4.1.3 Hasil variasi nilai k .....	36
4.1.4 Hasil Validasi Suhu Pendingin .....	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	41
5.1 Kesimpulan .....	41
5.2 Saran .....	42
DAFTAR PUSTAKA .....	43
Lampiran 1 Parameter Desain Reaktor .....	45
Lampiran 2 Spesifikasi elemen bakar standar TRIGA tipe 104 .....	46
Lampiran 3 Spesifikasi elemen bakar standar TRIGA tipe 204 ( IFE) .....	47
Lampiran 4 Tabel Kalibrasi Batang Kendali .....	48
Lampiran 5 Nuclear Calculation Code .....	51
Lampiran 6 Spesifikasi Reaktor SCWR .....	52

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Konfigurasi Teras Reaktor Kartini (Puradwi dkk., 2012).....	9
<b>Gambar 2.2</b>	Model perhitungan kode SPRAT (Oka et al., 2010).....	12
<b>Gambar 2.3</b>	Model perpindahan panas radial dari bahan bakar ke pendingin (Ikejiri et al., 2010).....	14
<b>Gambar 2.4</b>	Sirkulasi Alami Loop Tertutup.....	17
<b>Gambar 3.1</b>	Langkah penelitian .....	20
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram Alir Kode .....	21
<b>Gambar 3.3</b>	Algoritma kode.....	23
<b>Gambar 3.4</b>	Tampilan <i>running program</i> .....	23
<b>Gambar 4.1</b>	Distribusi daya arah aksial.....	25
<b>Gambar 4.2</b>	Pengaruh batang kendali terhadap daya saat posisinya diturunkan 5% secara step .....	26
<b>Gambar 4.3</b>	Kenaikan densitas rata-rata air pendingin akibat penyisipan batang kendali 5% secara step .....	27
<b>Gambar 4.4</b>	Penurunan suhu bahan bakar akibat penyisipan batang kendali 5% secara step .....	27
<b>Gambar 4.5</b>	Reaktivitas reaktor saat penyisipan batang kendali 5% secara step .....	28
<b>Gambar 4.6</b>	Pengaruh reaktivitas batang kendali terhadap penurunan daya akibat penurunan posisi batang kendali 5% secara step .....	29
<b>Gambar 4.7</b>	Pengaruh koefisien reaktivitas feedback terhadap daya saat posisi batang kendali diturunkan 5% secara step.....	30
<b>Gambar 4.8</b>	Tampilan <i>Running Program</i> .....	31
<b>Gambar 4.9</b>	Daya reaktor terhadap posisi batang kendali .....	32
<b>Gambar 4.10</b>	Korelasi antara daya operasi reaktor kartini dengan daya perhitungan kode .....	33
<b>Gambar 4.11</b>	Daya variasi nilai CRworth .....	35
<b>Gambar 4.12</b>	Reaktivitas variasi nilai CRworth .....	35
<b>Gambar 4.13</b>	Daya terhadap variasi nilai k .....	36
<b>Gambar 4.14</b>	Variasi reaktivitas terhadap perubahan nilai k .....	37
<b>Gambar 4.15</b>	Suhu Pendingin pada arah axial.....	39
<b>Gambar 4.16</b>	Korelasi antara suhu pendingin kode dan suhu pendingin reaktor kartini .....	40

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4.1</b> Spesifikasi Reaktor Kartini dan Reaktor SCWR.....	24
<b>Tabel 4.2</b> Daya terhadap perubahan posisi batang kendali.....	32
<b>Tabel 4.3</b> Data Suhu Pendingin ( $^{\circ}$ C) pada posisi axial (m) .....	38

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

Kupersembahkan untuk kedua orang tua tercinta, Bapak Joko Suryono dan Ibu Atik Prihantini telah memberikan dukungan secara moril dan materil Almarhumah simbah Suratmi yang telah bahagia disisiNya Calon masa depanku yang selalu memberikan doa dan semangat Sahabat dan temanku yang selalu menemani perjuanganku selama ini Untuk kampus Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir Tercinta yang memberi kesan yang tidak pernah saya lupakan selama masa perkuliahan dengan berbagai macam ilmu kehidupkan.

## **HALAMAN MOTTO**

***“Orang yang sukses adalah orang yang mampu berikhtiar dalam setiap kesulitan, bersyukur dan selalu berdoa kepadaNya”***

*Ardina Mei Devinta Suryana*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Reaktor Kartini adalah reaktor penelitian yang dirancang oleh BATAN dengan daya 250 kW untuk tujuan penelitian, pelatihan dan pendidikan serta beroperasi pada daya 100 kW. Reaktor Kartini merupakan reaktor tipe Triga Mark II dengan kolam terbuka, berpendingin air ringan. Pembangunan reaktor Kartini dimulai akhir tahun 1974, dan mencapai kondisi kritis untuk pertama kalinya pada 25 Januari 1979, diresmikan pada 1 Maret 1979 serta masih dioperasikan hingga sekarang (Suhemi dkk, 2003).

Saat ini BATAN mendorong revitalisasi Reaktor Kartini untuk pendidikan, pelatihan dan penelitian. Oleh karena itu, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA)-BATAN melakukan beberapa upaya pengembangan fasilitas Reaktor Kartini, yaitu sebagai *nuclear training center* (NTC) dan *Internet Reactor Laboratory*(IRL). Melalui IRL orang dapat belajar tentang reaktor Kartini dari jarak jauh secara *on line* (Syarip dkk, 2015). Beberapa pengembangan sistem instrumentasi Reaktor Kartini sudah dan sedang dilakukan untuk merealisasikan IRL tersebut (Abimanyu, 2016; Hakim, 2016; Septyawan, 2016).

Sebagai laboratorium reaktor, saat ini Reaktor Kartini sering digunakan untuk praktikum mahasiswa dari STTN-BATAN, UGM, UNDIP, UNS dan lain sebagainya. Praktikum dilakukan secara *onsite* sehingga mahasiswa harus datang ke Reaktor Kartini Yogyakarta. Dengan demikian

biaya praktikum mahal, disamping biaya untuk operasi reaktor, juga termasuk biaya transportasi dan akomodasi selama kegiatan praktikum. Oleh karena itu PSTA-BATAN mengembangkan fasilitas IRL, dimana mahasiswa dapat melakukan praktikum terkait Reaktor Kartini tanpa harus datang ke reaktor tersebut. Mahasiswa dapat melakukan kegiatan praktikum dari jarak jauh secara *online* dan *real time*.

Praktikum Reaktor Kartini jarak jauh dilakukan secara *real time*, yaitu parameter-parameter operasi dapat dibaca oleh praktikan secara *online* saat Reaktor Kartini beroperasi. Data operasi disimpan dalam komputer *database* yang kemudian dikirim ke praktikan melalui jaringan internet. Praktikan dapat mengajukan permintaan perubahan parameter untuk melihat pengaruhnya terhadap operasi reaktor. Namun demikian, tidak banyak data yang bisa disediakan pada saat operasi Reaktor Kartini karena keterbatasan sensor. Data secara lebih lengkap dapat dibangkitkan secara simulasi. Namun demikian, kode Reaktor Kartini yang dapat dipakai untuk membangkitkan data-data operasi Reaktor Kartini belum tersedia. Pada penelitian ini akan dibuat kode operasi Reaktor Kartini yang dapat digunakan untuk membangkitkan data dukung yang tidak dapat diperoleh melalui operasi Reaktor Kartini.

## 1.2 Keaslian Penelitian

Ishiwatari dkk. (2005) mengembangkan SPRAT (*Supercritical Pressure Reactor Accident and Transient*) code analisis keselamatan reaktor Super LWR (*Light Water Reactor*). Reaktor Super LWR merupakan reaktor thermal

berpendingin air dan merupakan salah satu reaktor generasi IV. Sutanto dan Oka (2015) memodifikasi kode tersebut untuk analisis keselamatan reaktor cepat generasi IV berpendingin air (*Super Fast Reactor*). Perbedaan kedua reaktor yaitu bahwa *Super Fast Reactor* tidak memerlukan moderator. Disamping itu skema aliran pendingin reaktor juga berbeda. Kedua reaktor termasuk tipe reaktor daya generasi IV dan beroperasi pada tekanan super kritis (25 MPa). Kedua kode juga menggunakan model kinetika reaktor titik untuk perhitungan dayanya.

Pada penelitian ini akan dilakukan modifikasi kode tersebut untuk mensimulasikan Reaktor Kartini. Reaktor Kartini juga berpendingin air. Namun demikian speifikasi operasi berbeda dengan reaktor Super LWR dan *Super Fast Reactor*. Tekanan operasi Reaktor Kartini adalah tekanan atmosfer dan tanpa aliran paksa pada pendingin teras. Daya Reaktor Kartini jauh lebih kecil, yaitu 100 kW saat operasi 100% dibanding dengan daya Super LWR dan *Super Fast Reactor* yang mencapai lebih dari 1000 MW.

### 1.3 Rumusan Masalah

Revitalisasi Reaktor Kartini diarahkan untuk membangun *Internet Reactor Laboratory* (IRL). Data operasi reaktor diharapkan dapat dikirim ke praktikan secara *online*. Namun demikian, data operasi reaktor yang dapat disediakan terbatas karena keterbatasan sensor. Hal tersebut dapat diatasi dengan membangkitkan data secara simulasi. Namun demikian, kode operasi reaktor yang dapat dipakai untuk membangkitkan data operasi Reaktor Kartini belum tersedia. Pada penelitian ini akan dibuat kode operasi Reaktor Kartini.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Kode Reaktor Kartini menggunakan model kinetika reaktor titik, yang mana hasil perhitungan mungkin tidak sama persis dengan data yang dibangkitkan oleh Reaktor Kartini. Validasi kode dilakukan terbatas pada pengaruh posisi batang kendali terhadap daya dan reaktivitas batang kendali, serta distribusi suhu pendingin saat operasi 100% daya.

#### **1.5 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah

1. Membangun kode operasi reaktor Kartini untuk mendukung *Internet Reactor Laboratory (IRL)*.
2. Melakukan simulasi nilai daya terhadap posisi batang kendali
3. Melakukan validasi kode terhadap data eksperimen operasi Reaktor Kartini.

#### **1.6 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah menyediakan kode operasi reaktor yang dapat diaplikasikan untuk *Internet Reactor Laboratory (IRL)*.

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Liu, et al, (2014) telah melakukan penelitian tentang Pengembangan kode untuk analisis keselamatan SCWR (*Supercritical Pressure Reactor Accident and Transient*). Kehandalan kode tersebut diverifikasi dengan membandingkan hasil dari SCAC-CSR1000 dan SCTRAN. Kemudian analisis keselamatan dilakukan dengan 5 peristiwa yaitu, hilangnya sebagian aliran pendingin reaktor, isolasi pipa uap utama, penarikan CR tidak terkendali, reaktor pompa pendingin kejang dan kehilangan pemanas air umpan. Dengan analisis numerik ditemukan bahwa MCST (*maximum cladding surface temperature*) tidak melebihi 1260 °C dan memenuhi persyaratan keselamatan desain. Kode analisis SCACCSR1000 ini adalah kode untuk analisis keselamatan. Hal ini dikembangkan dari kode SCAC, yang dibuat dengan bahasa *FORTRAN* menggunakan korelasi Watts dan metode saldo penurunan tekanan.

Sutanto dan Oka (2015) telah melakukan penelitian tentang analisis kehilangan aliran pendingin pada *Super Fast Reactor*. Total kerugian dari aliran umpan adalah suhu maksimal permukaan kelongsong bahan yang merupakan efek langsung dari kecelakaan kehilangan aliran pendingin, namun dengan sistem penurunan tekanan otomatis dapat mengurangi kecelakaan.

## 2.2 Landasan Teori

Untuk mendukung penelitian ini diperlukan pengetahuan mengenai persamaan kinetika reaktor beserta persamaan-persamaan yang berhubungan dengan operasi daya reaktor kartini.

### 2.2.1 Kinetika reaktor

Kinetika reaktor nuklir adalah bagian dari fisika reaktor yang mempelajari perilaku gerakan reaksi inti berantai (gayut waktu) yang terjadi di dalam reaktor nuklir. Di dalam kinetika reaktor, kondisi kekritisan selain dinyatakan dengan besaran  $k$ , juga bisa dinyatakan dengan perubahan  $k$  terhadap nilai satu dan biasa disebut sebagai reaktivitas dengan simbol  $\rho$  yang didefinisikan sebagai persamaan (2.1).

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad (2.1)$$

Pada pengendalian reaktor, nilai reaktivitas tersebut dikendalikan oleh batang-batang kendali sehingga batang-batang kendali dikatakan mempunyai nilai reaktivitas atau *rod worth*.

Kelakuan neutron dalam reaktor nuklir ditunjukkan dengan persamaan kinetika reaktor. Persamaan paling sederhana adalah persamaan kinetika pada model reaktor titik. Persamaan ini diturunkan dari kesetimbangan populasi neutron dalam teras dengan asumsi reaktor bertenaga tunggal (*thermal*), homogen, dan tidak bergantung pada variabel ruang. Untuk perhitungan dengan kinetika reaktor dilakukan dengan persamaan (2.2) dan (2.3).

$$\frac{d}{dt} n(t) = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt} C_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2.3)$$

Dengan

$n(t)$  : rapat neutron pada saat  $t$  (neutron/cm<sup>3</sup>)

$C_i(t)$  : konsentrasi prekursor neutron kasip kelompok ke- $i$

$\rho(t)$  : reaktivitas total teras pada saat  $t$

$\beta_i$  : fraksi neutron kasip kelompok ke- $i$

$\beta$  : fraksi kelompok neutron kasip efektif

$\lambda_i$  : konstanta peluruhan prekursor neutron kasip kelompok ke- $i$  (detik ke- $i$ )

$\Lambda$  : umur generasi neutron eksternal (neutron/cm<sup>3</sup>.detik)

Ketika persamaan (2.2) dan (2.3) didiskritisasi dengan waktu, itu menjadi persamaan (2.4) :

$$\begin{cases} \frac{n^{k+1} - n^k}{\Delta t} = \frac{\rho^k - \beta}{\Lambda} n^{k+1} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i^k \\ \frac{C_i^{k+1} - C_i^k}{\Delta t} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n^k - \lambda_i \cdot C_i^k \end{cases} \quad (2.4)$$

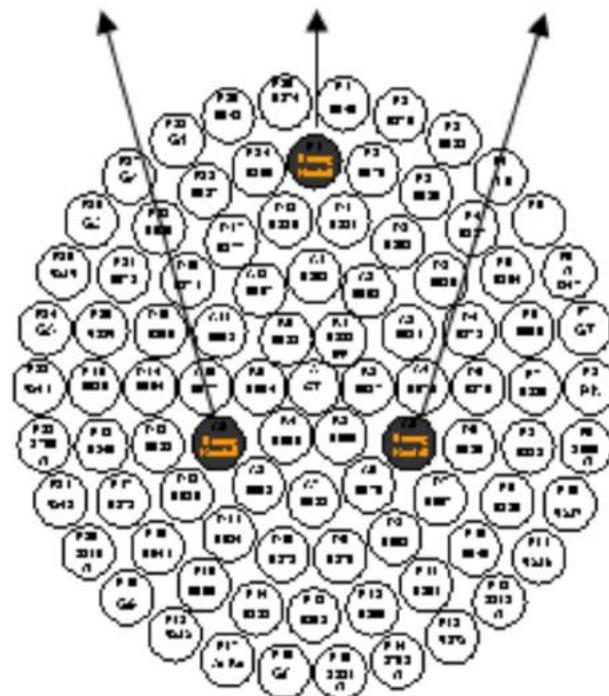
## 2.2.2 Pengendalian reaktor

Sistem pengendalian reaktor adalah sarana untuk mengatur mengendalikan proses reaksi pembelahan inti yang terjadi di dalam reaktor, sedemikian rupa sehingga reaktor dapat dioperasikan mulai dari kondisi subkritik sampai pada tingkat daya yang ditentukan, kemudian

menaikkan dan mempertahankan daya reaktor pada tingkat daya tertentu, dan menurunkan, menghentikan atau mematikan operasi reaktor. Instrumentasi untuk pengukuran fluks neutron mempunyai waktu tanggap yang lebih cepat dibandingkan dengan pengukuran suhu. Oleh karena itu pada dasarnya sistem pengendalian reaktor terdiri dari sistem pengukuran atau instrumentasi parameter fisis reaktor terutama fluks neutron, dan sistem penggerak batang-batang kendali. Fluks neutron di dalam reaktor dapat diubah dengan beberapa metode yaitu mengubah bahan bakar (jumlah atau posisinya di dalam teras reaktor), mengubah moderator atau reflektor, dan menambah/mengurangi bahan penyerap neutron yaitu penyisipan dan penarikan bahan-bahan penyerap neutron seperti boron atau cadmium pada teras reaktor.

Batang-batang kendali reaktor ini dibedakan menjadi batang-batang kendali pengaman berada di ring C5, batang kendali kompensasi berada di ring C9, dan batang kendali pengatur berada di ring E1. Konfigurasi teras reaktor Kartini dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Batang Kompensasi	Batang Pengatur	Batang Pengaman
-------------------	-----------------	-----------------



**Gambar 2.1** Konfigurasi Teras Reaktor Kartini (Puradwi dkk., 2012)

### 2.2.3 *Start-up* reaktor

Sebelum reaktor dioperasikan harus dilakukan pengujian terhadap semua sistem dan parameter fisis operasi reaktor. Setelah semua sistem berfungsi dengan baik dan semua parameter telah sesuai dengan spesifikasi teknisnya, kemudian semua data tersebut telah dicatat pada *logbook* operasi maka reaktor dapat mulai di *start-up*. *Start-up* operasi reaktor adalah kegiatan memulai operasi reaktor dengan cara menarik batang-batang kendali dari dalam teras reaktor sesuai prosedur yang telah ditentukan.

#### 2.2.4 Operasi pada tingkat daya

Untuk mempertahankan tingkat daya reaktor pada suatu tingkat yang diinginkan, dilakukan dengan pengaturan posisi batang kendali pengatur, yaitu batang kendali yang memiliki nilai reaktivitas yang paling kecil. Sedangkan untuk merubah dari suatu tingkat daya ke tingkat daya lainnya dilakukan dengan batang kendali kompensasi. Untuk efektivitas dan memudahkan pengendalian maka harus diperhatikan posisi batang kendali pengatur sedemikian rupa sehingga pada kondisi reaktor kritis pada tingkat daya tertentu batang kendali tersebut ditarik sampai pada posisi di sekitar tengah-tengahnya.

#### 2.2.5 *Shut-down* reaktor

*Shut-down* adalah proses mematikan reaktor dengan cara menyisipkan/menurunkan batang–batang kendali ke dalam teras reaktor. *Shut-down* dapat dilakukan dengan cara menyisipkan semua batang–batang kendali sekaligus secara bersamaan.

#### 2.2.6 Daya reaktor

Daya reaktor ditimbulkan oleh energi yang dibebaskan dari reaksi pembelahan yang terjadi di dalam reaktor yang sedang beroperasi. Banyaknya reaksi pembelahan yang terjadi tiap detik tiap satuan volume reaktor ditentukan oleh  $\phi \cdot \Sigma_f$ . Kalau banyaknya reaksi pembelahan tiap detik yang perlu untuk menghasilkan daya sebesar 1 watt adalah  $3,2 \times 10^{10}$

pembelahan, maka daya total  $P$  dari reaktor diberikan oleh persamaan (2.5).

$$P = \frac{\Sigma_f}{3,2 \times 10^{10}} \int_0^{vt} \phi(v) dv \text{ (watt)} \quad (2.5)$$

dengan ketentuan

$\Sigma_f$ : tumpang lintang makroskopis pembelahan

$V_f$  : volume reaktor.

$\phi$  : fluks neutron

### 2.2.7 Periode reaktor

Periode reaktor didefinisikan sebagai selang waktu yang diperlukan untuk menaikkan daya reaktor sebesar e kalinya ( $e = 2,71828$ ). Secara matematik dapat dituliskan seperti persamaan (2.6) :

$$\frac{P(t)}{P(0)} = e^{(t/T)} \quad (2.6)$$

dengan ketentuan  $T$  adalah periode reaktor.  $P(t)$  dan  $P(0)$  masing masing adalah daya reaktor sesudah  $t$  detik dan daya reaktor pada saat awal.

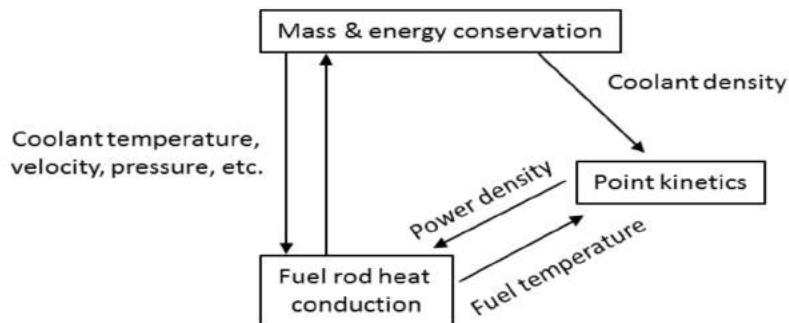
Di dalam praktikum ditentukan  $P(t)/P(0)$  sebesar 1,5 atau 2 kemudian diukur waktu yang diperlukan untuk peningkatan daya tersebut. Berdasarkan pada praktek pengukuran ini, periode reaktor ( $T$ ) dapat dihitung berdasarkan pada persamaan (2.7).

$$T = \frac{t}{\ln \left( \frac{P(t)}{P(0)} \right)} \quad (2.7)$$

dengan ketentuan  $t$  adalah waktu yang diperlukan untuk menaikkan daya reaktor 1,5 kali atau 2 kali.

### 2.2.8. Kode SPRAT

SPRAT kependekan dari *Supercritical Pressure Reactor Accident and Trasient*. Kode SPRAT dipakai untuk analisis keselamatan reaktor berpendingin air yang dioperasikan pada tekanan superkritis (Oka et al., 2010). Persamaan-persamaan pokok yang digunakan dalam kode tersebut meliputi persamaan konservasi massa dan energi, persamaan transfer panas, dan persamaan kinetika reaktor. Struktur atau model perhitungan dalam kode tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Model perhitungan kode SPRAT (Oka et al., 2010)

Pada Gambar 2.2 merupakan interaksi dari persamaan konservasi masa dan energi, persamaan kinetika reaktor, dan persamaan perpindahan panas. Persamaan kinetika reaktor akan menghasilkan panas yang mengalir ke klading secara konduksi yang kemudian panas akan diambil oleh pendingin secara konveksi dengan menggunakan persamaan konservasi masa dan energi yang akan menghasilkan suhu pendingin yang

mempengaruhi tekanan dan kecepatan. Panas batang bahan bakar akan memberikan *feedback* kepada persamaan kinetika reaktor berupa suhu bahan bakar lalu persamaan konservasi massa dan energi akan memberikan *feedback* pada persamaan kinetika reaktor berupa densitas pendingin.

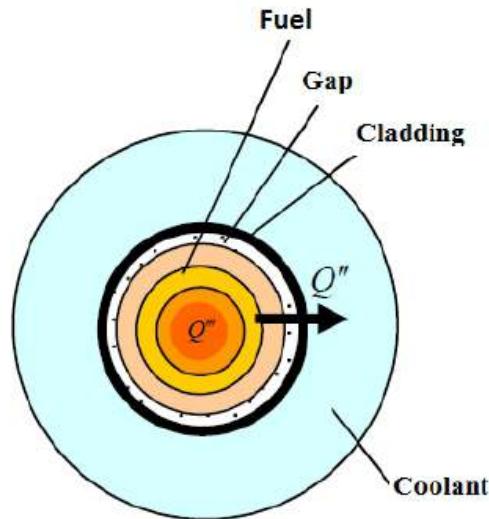
### 2.2.9 Model perpindahan panas bahan bakar

Perpindahan energi dengan cara konveksi terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel fluida yang berbatasan. Sehingga akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida ini. Lalu partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu lebih rendah, bercampur lalu memindahkan sebagian energinya ke partikel fluida lainnya.

Pada perbatasan suatu permukaan dan suatu fluida akan terjadi perpindahan panas secara konduksi dan konveksi. Tanpa adanya aliran yang dipaksakan terhadap fluida, maka sekitar permukaan akan terjadi konveksi secara alamiah. Perbedaan temperatur antara bagian-bagian fluida menyebabkan perbedaan densitas dan karena itu timbul gerakan dan aliran dalam fluida. Cara perpindahan panas semacam ini disebut konveksi alamiah atau konveksi bebas.

Model perpindahan panas dari bahan bakar ke pendingin ditunjukkan pada Gambar 2.3. Model terdiri dari bagian bahan bakar yang dibagi menjadi 4 mesh, bagian gap (sela-sela antara bahan bakar dan klading), bagian klading dan paling luar bagian pendingin. Reaksi fisi

terjadi pada bahan bakar dan secara konduksi panas yang dihasilkan akan merambat ke luar melalui gap, kladding dan ke pendingin.



**Gambar 2.3** Model perpindahan panas radial dari bahan bakar ke pendingin (Ikejiri et al., 2010)

Model perpindahan panas pada bahan bakar ditunjukkan pada persamaan (2.8) :

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{product} \quad (2.8)$$

$C_p$	Panas spesifik [J/kg · K]
$Q_{in}$	Panas yang masuk ke <i>mesh</i> [J]
$Q_{out}$	Panas yang keluar dari <i>mesh</i> [J]
$Q_{product}$	Panas yang dibangkitkan [J]
$T$	Suhu bahan bakar [K]
$V$	Volume bahan bakar [ $\text{m}^3$ ]
$\rho$	Densitas bahan bakar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

### 2.2.10 Model thermal-hidraulik

Saat pendingin menerima panas dari bahan bakar, maka enthalpi, densitas dan suhu pendingin akan berubah. Nilai enthalpi, densitas dan suhu pendingin

dapat dihitung dengan menggunakan persamaan konservasi massa dan energi seperti persamaan (2.9), (2.10), dan (2.11) :

Persamaan konservasi massa

$$\frac{\partial \rho(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial G(z,t)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Persamaan konservasi energi

$$\frac{\partial \{\rho(z,t)h(z,t)\}}{\partial t} + \frac{\partial \{G(z,t)h(z,t)\}}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \{\rho(z,t)h(z,t)\}}{\partial t} + \frac{\partial \{G(z,t)h(z,t)\}}{\partial z} = \frac{1}{A_f} l_f Q_n^{nk}(z, t) \quad (2.11)$$

Dengan

$A_f$  : Luas permukaan pin bahan bakar ( $\text{m}^2$ )

$G$  : Fluks massa ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )

$h$  : *Enthalpy* ( $\text{J}/\text{kg}$ )

$k$  : *Time step*

$l_f$  : Tinggi *mesh* (m)

$Q$  : Flux panas ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$t$  : Waktu (s)

$z$  : Posisi (m)

$\rho$  : Densitas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

## 2.2.11 Pemrograman persamaan diferensial

### 2.2.11.1 Bahasa pemrograman dan metode numerik

Bahasa pemrograman yang dimaksudkan sebenarnya merupakan bahasa artifisial yang dibuat secara khusus dan digunakan untuk menulis

berbagai instruksi yang dapat langsung diterjemahkan ke dalam bahasa mesin sehingga dapat dengan mudah dieksekusi oleh komputer.

Bahasa pemrogram FORTRAN (FORmula TRANslator) merupakan bahasa pemrograman yang paling lama populer, yaitu sejak diperkenalkan pertama kali pada tahun 1950an oleh perusahaan IBM. Fitur utama Bahasa FORTRAN adalah bahasa yang lebih mengutamakan penulisan program yang tepat, efisien dan dapat berulang dalam suatu sub-program tertentu (*procedure-oriented language*).

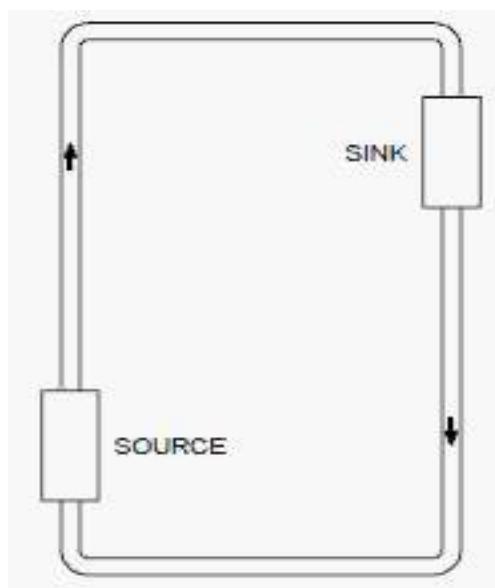
Persamaan diferensial yang sering digunakan untuk penggambaran sistem dinamis, kelandaian kurva, posisi sebaran, atau profil grafis dari satu atau lebih variabel terikat (*dependent variable*) sepanjang sumbu tegak (ordinat) terhadap variabel bebasnya (*independent variable*) sepanjang sumbu datar (aksis). Secara umum, persamaan-persamaan diferensial yang terbentuk dapat dibedakan atas persamaan diferensial biasa atau PDB (*ordinary differential equation*) dan persamaan diferensial parsial (*partial differential equation*) atau PDP.

### **2.2.12 Aliran sirkulasi natural**

Sirkulasi alamiah adalah fenomena yang muncul berdasarkan hukum-hukum fisika, dimana sirkulasi yang timbul secara alami tanpa menggunakan alat bantu seperti pompa, fan, dll. Sirkulasi alamiah timbul akibat perbedaan kerapatan fluida dan perbedaan ketinggian, salah satu penyebab perbedaan kerapatan adalah beda temperatur.

### 2.2.12.1 Prinsip kerja *loop* sirkulasi alami

Sirkulasi alami dalam cairan *loop* tertutup dibuat dengan menempatkan *heat sink* atau penyerap panas dalam lingkaran pada elevasi yang lebih tinggi dari sumber panas. Sebuah *loop* persegi panjang sederhana diilustrasikan pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4** Sirkulasi Alami Loop Tertutup

Cairan dalam kontak dengan sumber panas dipanaskan sehingga densitasnya menurun. Cairan dalam kontak dengan penyerap panas didinginkan sehingga densitasnya meningkat. Oleh karena itu, densitas fluida dalam *loop* berbeda. Perbedaan kepadatan ini, diketahui oleh gravitasi lebih antara perbedaan sumber dan penyerap panas, menghasilkan tenaga apung yang mendorong cairan melalui putaran dalam *loop*. Perilaku ini dikenal sebagai sirkulasi alami. Perbedaan densitas fluida dapat dibuat oleh perubahan suhu atau perubahan fase (yaitu uap / cair), seperti halnya untuk cairan dua

fase. Laju aliran melalui *loop* dibatasi oleh jumlah tersebut dari resistensi dalam komponen dan interkoneksi pipa. Karena kesederhanaannya, *loop* sirkulasi alami secara luas digunakan dalam sistem konversi energi.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Alat dan Bahan**

Pada penelitian Pengembangan Kode Operasi Reaktor Kartini untuk Mendukung Realisasi *Internet Reactor laboratory*, digunakan beberapa peralatan dan bahan.

##### **3.1.1 Alat**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :

- a. Perangkat keras

Perangkat keras yang digunakan adalah *Laptop*

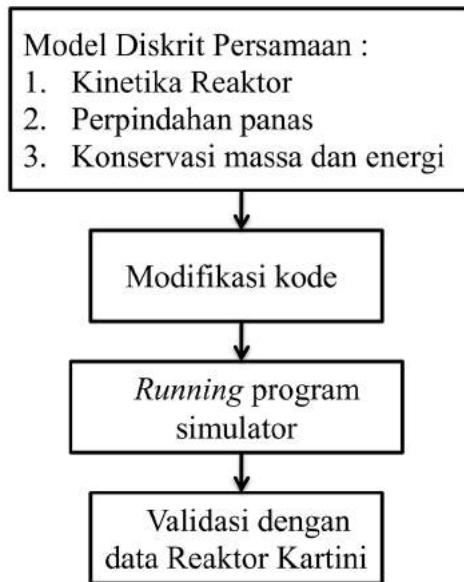
- b. Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan adalah *software fortran* dengan SPRAT *code*

#### **3.2 Tata Laksana Penelitian**

Secara umum, tahapan penelitian digambarkan seperti Gambar 3.1. Penelitian diawali dengan mengubah persamaan kinetika reaktor, perpindahan panas, dan konservasi masa dan energi menjadi model persamaan diskrit lalu memodifikasi kode dari kode (*Super Cooled Water Reactor*) SCWR menjadi kode yang sesuai dengan spesifikasi Reaktor Kartini, pada kode SCWR pendingin dibagi menjadi 2 lalu dimodifikasi sesuai reaktor Kartini yaitu aliran pendingin hanya 1. Setelah itu dapat

melakukan *running* program simulator yang kemudian didapatkan data yang dapat divalidasi dengan data secara eksperimen di reaktor Kartini.

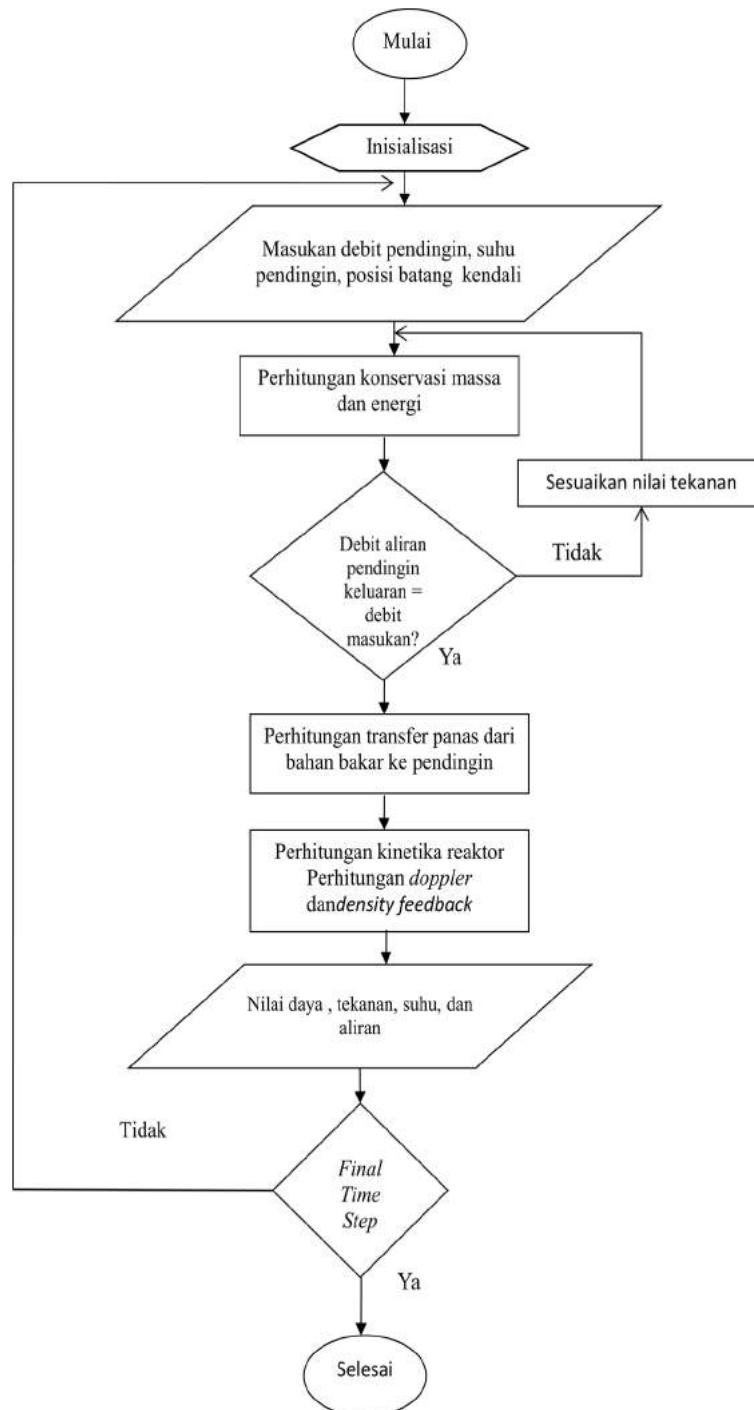


**Gambar 3.1** Langkah penelitian

Sesuai dengan Gambar 3.2, untuk membuat kode operasi pertama kali yang dilakukan adalah melakukan inisialisasi yang berupa masukan debit pendingin, suhu pendingin, dan posisi batang kendali setelah itu melakukan perhitungan konservasi masa dan energi untuk kemudian membandingkan nilai debit keluaran sama dengan nilai debit masukan, jika tidak sama maka harus menyesuaikan nilai tekanan, dan jika sama maka akan dilanjutkan keperhitungan transfer panas dari bahan bakar ke pendingin.

Setelah melakukan perhitungan transfer panas dari bahan bakar ke pendingin lalu melakukan perhitungan kinetika reaktor, perhitungan *doppler*, dan perhitungan densitas *feedback* yang akan diperoleh nilai daya, tekanan, suhu, dan aliran jika nilai tersebut sudah sesuai dengan *final time*

*step* maka pengerajan selesai, jika tidak sesuai maka kembali melakukan inisialisasi masukan debit pendingin, suhu pendingin, dan posisi batang kendali.

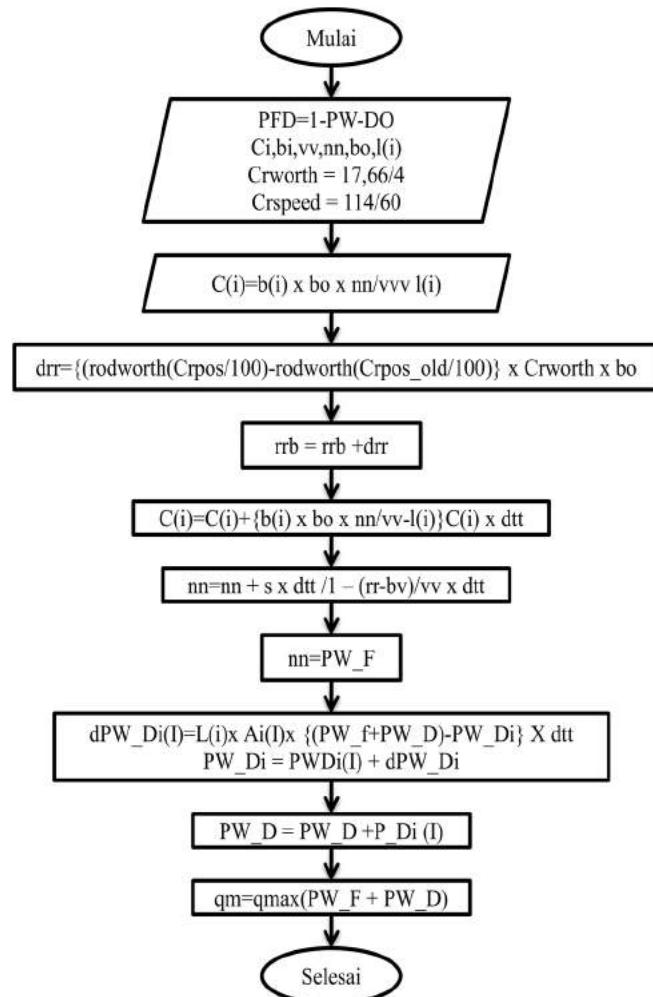


**Gambar 3.2** Diagram Alir Kode

Pada Gambar 3.3 tentang algoritma kode yang pertama melakukan inisialisasi parameter apa saja yang dibutuhkan seperti  $C_i$  yang merupakan nilai konsentrasi prekursor neutron klasik kelompok ke- $i$ ,  $b_i$  merupakan fraksi neutron klasik kelompok ke- $i$ ,  $v_v$  merupakan umur generasi neutron,  $n_n$  merupakan populasi neutron,  $b_o$  merupakan fraksi neutron klasik total, dan  $\lambda_i$  merupakan konstanta peluruhan neutron serta nilai  $CRworth$  dan  $Crspeed$ .

Setelah melakukan inisialisasi lalu melakukan perhitungan nilai  $C_i$  dengan persamaan (2.3) selanjutnya melakukan perhitungan delta reaktivitas untuk mencari reaktivitas totalnya. Kemudian menghitung nilai  $C_i$  selanjutnya, setelah mendapatkan nilai  $C_i$  maka menghitung nilai populasi neutronya dimana nilai populasi neutronnya menunjukkan nilai daya yang dihasilkan dari bahan bakar lalu melakukan perhitungan untuk memperoleh perubahan *power decay* yang digunakan untuk menghitung *power decay* total dari semua perhitungan tersebut akan diperoleh daya total.

Setelah kode dibuat, dilakukan *running* program *simulator* seperti pada gambar 3.4 untuk memastikan apakah program dapat berjalan dengan baik atau tidak. Kemudian langkah terakhir melakukan validasi dengan data reaktor kartini yang sudah ada atau dengan operasi reaktor secara langsung.



Gambar 3.3 Algoritma kode

```

*****
* KARTINI REACTOR OPERATION CODE *
* STUDY PROGRAM OF INSTRUMENTATION ELECTRONICS *
* NUCLEAR TECHNOPHYSICS DEPARTMENT *
* POLYTECHNIC INSTITUTE OF NUCLEAR TECHNOLOGY *
* 2017 *
*****
***** TYPES OF CALCULATION *****
Initialization 1
Reactor operation 2
*****
Please select the type of calculation:
2
Using BOC
Inlet coolant temperature = 0.00
Initial condition type = 1
Feedback type = 1
Power control by CR? Yes--1. No--2.
2

```

Gambar 3.4 Tampilan running program

## **BAB IV**

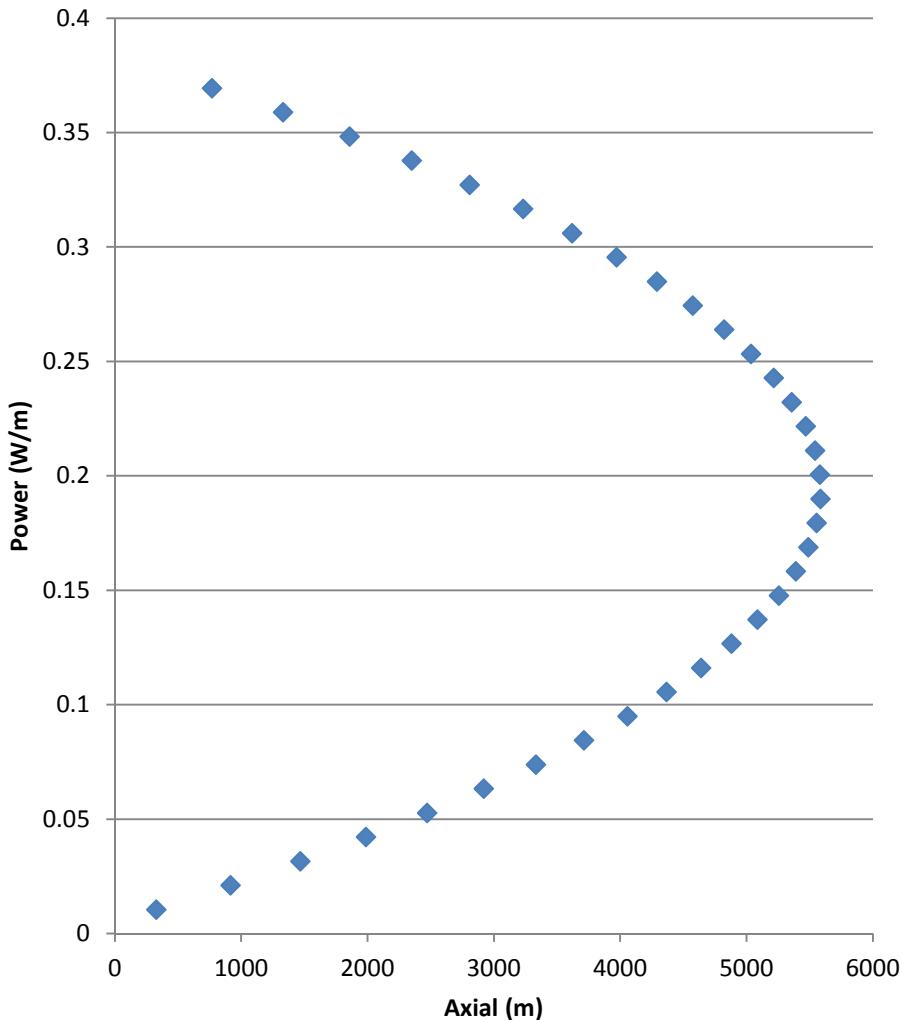
### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan dipaparkan beberapa hasil dan pembahasan yang telah dilakukan selama penelitian. Hasil yang didapat pada penelitian ini adalah validasi data yang dihasilkan dari kode yang dibuat pada program Fortran dengan data operasi Reaktor Kartini. Kode operasi reaktor tersebut dibuat dengan menyesuaikan dengan spesifikasi Reaktor Kartini Tabel 4.1 berikut menunjukan spesifikasi Reaktor Kartini.

**Tabel 4.1** Spesifikasi Reaktor Kartini dan Reaktor SCWR

Spesifikasi	Reaktor Kartini	Reaktor SCWR
Panjang aktif bahan bakar	0,38 m	4,27 m
Jumlah batang bahan bakar	71 batang	216 batang
Tekanan	1 atm	25 Mpa
Daya Termal	250 kW	350 MW

Spesifikasi daya maksimal adalah 250 kW sesuai dengan spesifikasi design daya Reaktor Kartini. Distribusi daya secara aksial diasumsikan berbentuk cosinus dan seluruh bahan bakar (berjumlah 71 batang) diasumsikan memiliki distribusi dan nilai yang sama Gambar 4.1 menunjukkan distribusi daya arah aksial.



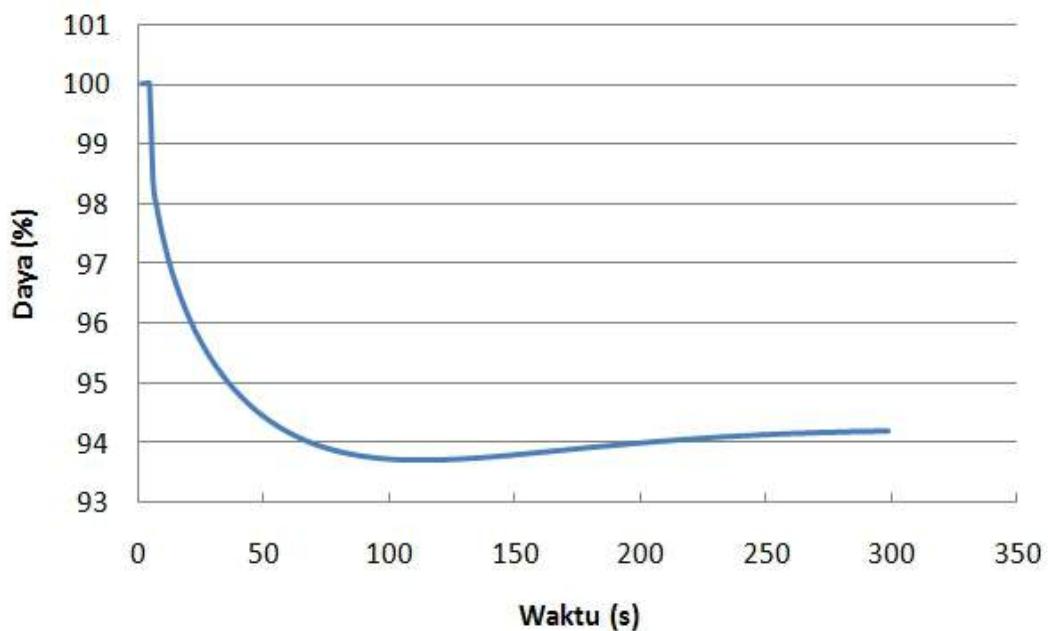
**Gambar 4.1** Distribusi daya arah aksial

Nilai total daya dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Total daya} = n \times \sum_{i=1}^{36} \text{daya linear ke-} i \times \text{panjang mesh}$$

n adalah jumlah batang bahan bakar, dan i adalah jumlah *mesh* bahan bakar, yaitu 36 mesh. Tinggi *mesh* yaitu panjang bahan bakar dibagi jumlah *mesh*. Panjang bahan bakar, yaitu 0.38 m. Hasil perhitungan daya total, yaitu 250644 watt (250.6 kW).

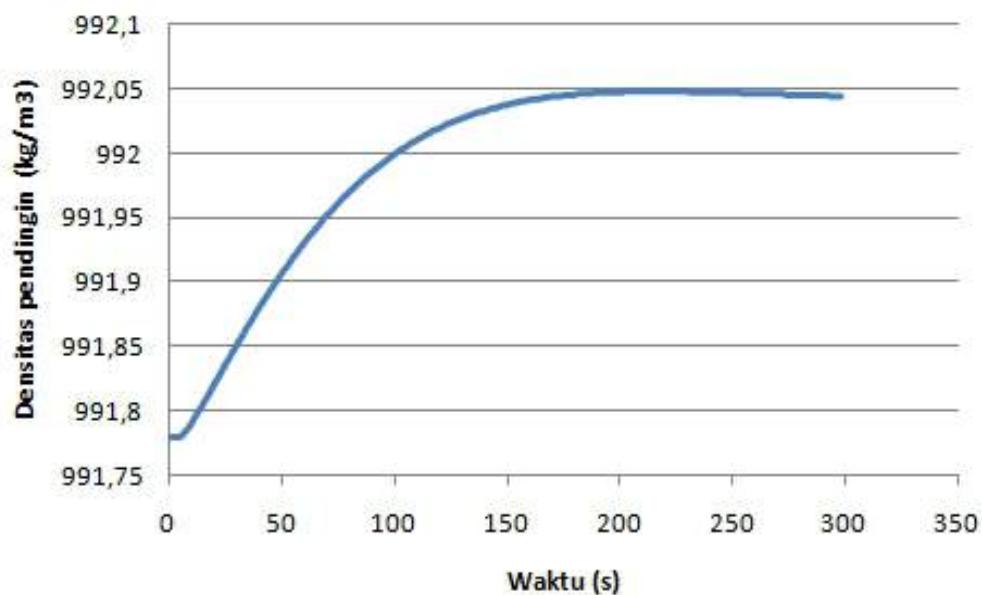
Batang kendali berfungsi untuk mengendalikan jumlah neutron saat terjadi reaksi fisi dengan cara menyerap neutron. Gambar 4.2 menunjukkan nilai daya saat posisi batang kendali diturunkan 5%, yaitu dari posisi 100% menjadi 95%.



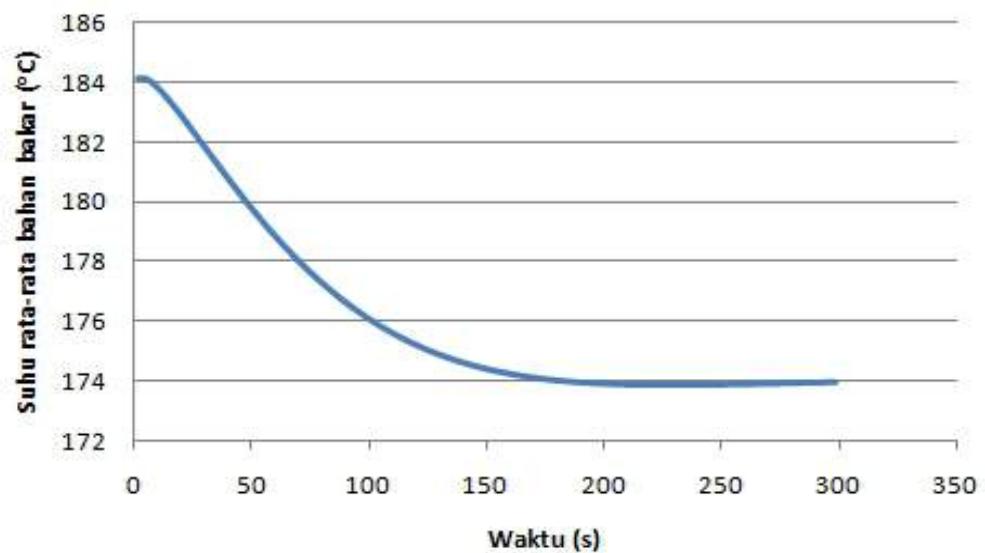
**Gambar 4.2** Pengaruh batang kendali terhadap daya saat posisinya diturunkan 5% secara step

Penurunan batang kendali tersebut akan menyisipkan reaktivitas negatif, sehingga populasi neutron berkurang akibat terserap material batang kendali. Pengurangan populasi neutron berarti penurunan daya reaktor, yang mengakibatkan densitas pendingin naik dan suhu bahan bakar turun, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Hal tersebut akan memberikan reaktivitas positif yang akan mengkompensasi reaktivitas negatif dari bahan bakar, sehingga reaktivitas total menjadi nol dan daya menjadi stabil (dalam kondisi *steady*). Gambar 4.5 menunjukkan nilai

reaktivitas batang kendali dan reaktivitas *feedback* akibat perubahan posisi batang kendali.

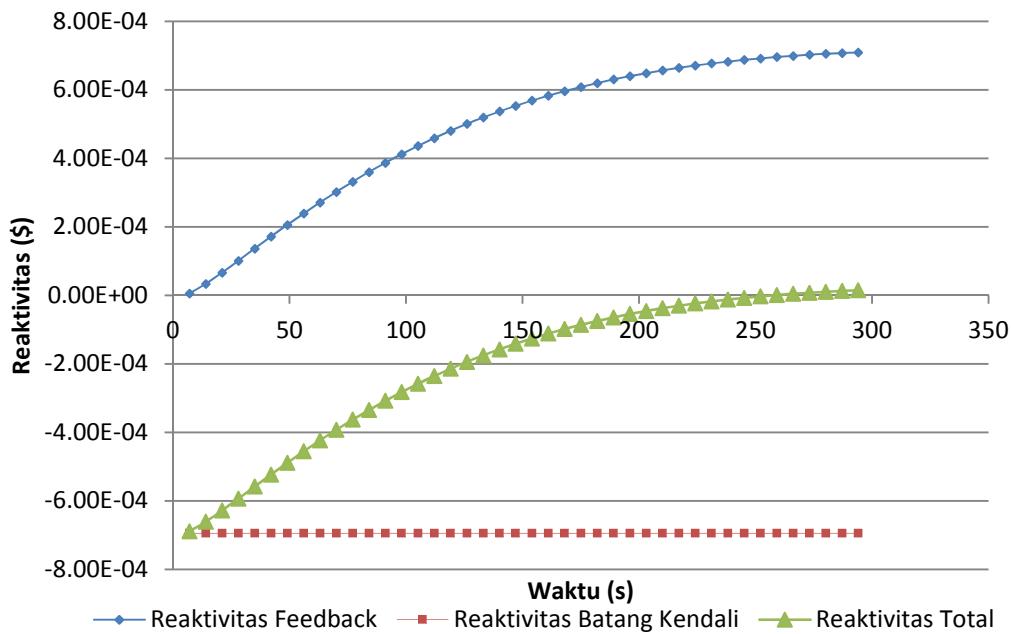


**Gambar 4.3** Kenaikan densitas rata-rata air pendingin akibat penyisipan batang kendali 5% secara step



**Gambar 4.4** Penurunan suhu bahan bakar akibat penyisipan batang kendali 5% secara step

Pada Reaktor Kartini terdapat reaktivitas *feedback*, reaktivitas batang kendali dan reaktivitas total Gambar 4.5 menunjukkan reaktivitas reaktor saat penyisipan batang kendali 5% secara step.

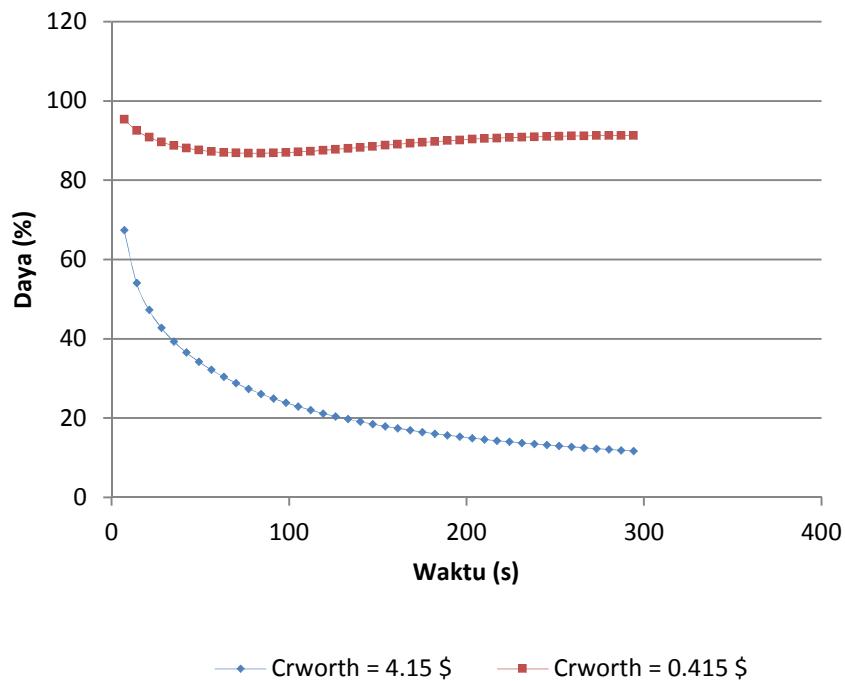


**Gambar 4.5** Reaktivitas reaktor saat penyisipan batang kendali 5% secara step

Reaktivitas batang kendali menunjukkan kemampuan menyerap neutron. Semakin besar reaktivitas batang kendali, semakin banyak neutron yang diserap. Gambar 4.6 menunjukkan reaktivitas batang kendali 4,15 \$ akan menghasilkan nilai daya lebih kecil dari reaktivitas batang kendali 0,415 \$ saat posisi batang kendali diturunkan 5%, yaitu dari 100% ke 95%.

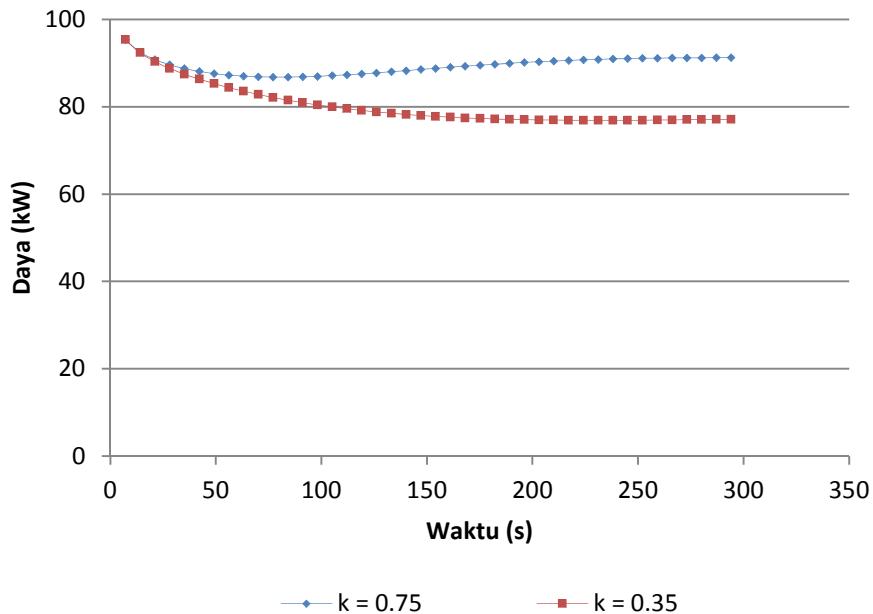
Saat posisi batang kendali diturunkan (5%), reaktivitas total reaktor akan menjadi negatif akibat penyisipan batang kendali tersebut, sehingga populasi neutron turun yang pada gilirannya daya reaktor juga turun. Namun demikian, reaktivitas feedback akibat perubahan densitas pendingin

dan suhu batang bahan bakar akan mengkompensasi penurunan reaktivitas tersebut.



**Gambar 4.6** Pengaruh reaktivitas batang kendali terhadap penurunan daya akibat penurunan posisi batang kendali 5% secara step

Penurunan populasi neutron menyebabkan kenaikan densitas pendingin dan menurunkan suhu bahan bakar (Gambar 4.3 dan 4.4). Kenaikan densitas pendingin dan penurunan suhu bahan bakar akan memberikan reaktivitas positif. Akibatnya, daya reaktor akan berada pada kondisi *steady*. Pada gambar 4.7 berikut menunjukkan Pengaruh pengalih koefisien reaktivitas *feedback* terhadap daya saat posisi batang kendali diturunkan 5% secara step.



**Gambar 4.7** Pengaruh koefisien reaktivitas feedback terhadap daya saat posisi batang kendali diturunkan 5% secara step

Gambar 4.7 merupakan pengaruh pengali koefisien reaktivitas *feedback* terhadap daya saat posisi batang kendali diturunkan 5% secara step yang digambarkan dalam bentuk grafik yang melihatkan semakin besar niali pengali koefisen reaktivitas *feedback* nya maka daya semakin naik karena reaktivitas *feedback* mengkompensasi reaktivitas negatif.

#### 4.1 Hasil Penelitian

##### 4.1.1. Validasi kode operasi reaktor kartini daya terhadap posisi batang kendali

Validasi dilakukan dengan membangkitkan data yang dilakukan dengan cara *running* program fortran yang mengembangkan kode operasi reaktor kartini. Gambar 4.8 yang menunjukkan tampilan *running* program.

```

PARAMETER OPERASI
Time <s> : 5.90400026593823
Density <kg/m3> : 989.788764438875
FuelTemperature <C> : 135.936949973163
keff : 0.984945101762096
Populasi neutron : 0.127343495290710
Reaktivitas : -1.528501254635437E-002 0.000000000000000E+000
Power<kW> : 19.1578231244727
Pressure <bar> : 1.613250000000000
ControlRodPosition : 38.9999985694885

Coolant Temperature:
Lower Plenum : 30.00000000000000
Core <L,M,U> : 30.0753202034480          45.2564384495571
60.3369933228567
Upper Plenum : 60.3369933228567          31.7392865506183

Flow rate <kg/s> : 0.799999238495950

```

**Gambar 4.8** Tampilan *Running Program*

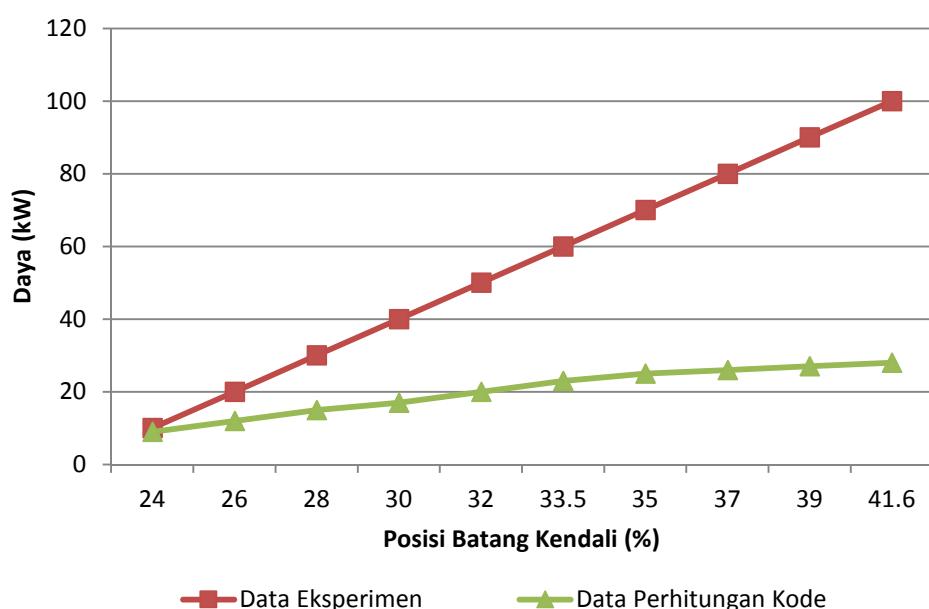
Sesuai Gambar 4.8 dalam tampilan running program terdapat parameter operasi seperti waktu operasi, densitas, suhu bahan bakar, populasi neutron, reaktivitas, dan daya.

Data yang pertama kali dibangkitkan adalah data pengaruh perubahan posisi batang kendali terhadap daya operasi reaktor. Tabel 4 .2 menunjukan data simulasi di reaktor Kartini dan data eksperimen.

Dari data tabel 4.2 dapat digambarkan dalam bentuk grafik yang kemudian dapat dilihat perbedaan antara data simulasi dan data eksperimen yang dibangkitkan dari kode. Gambar 4.9 menunjukan grafik daya terhadap perubahan posisi batang kendali.

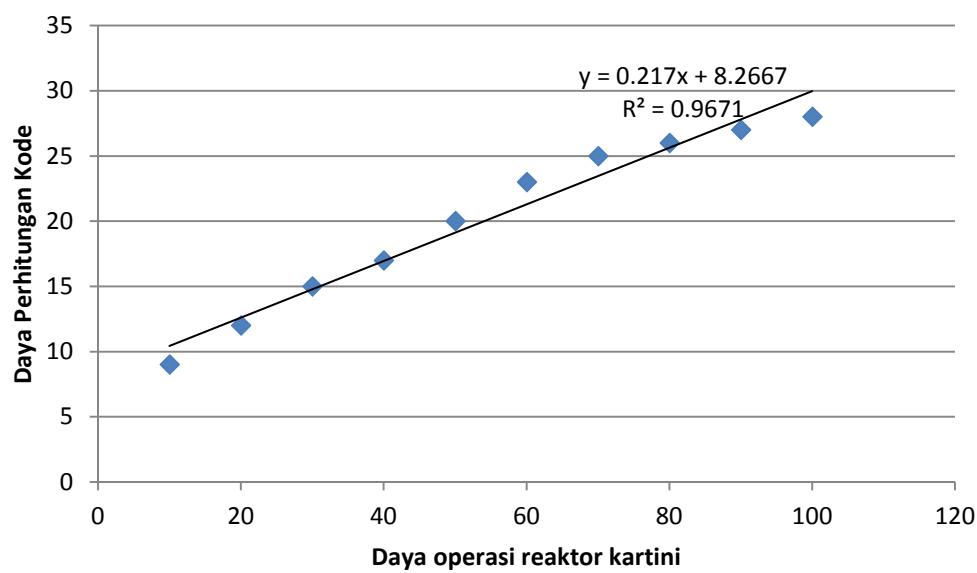
**Tabel 4. 2** Daya terhadap perubahan posisi batang kendali

Posisi batang kendali (%)	Data Eksperimen	Data Perhitungan Kode
	Daya (kW)	Daya (kW)
24	10	9
26	20	12
28	30	15
30	40	17
32	50	20
33.5	60	23
35	70	25
37	80	26
39	90	27
41.6	100	28

**Gambar 4.9** Daya reaktor terhadap posisi batang kendali

Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh posisi batang kendali terhadap daya. Pada grafik yang ditunjukkan garis dengan tanda kotak merupakan data eksperimen yang didapat dari operasi reaktor Kartini sedangkan garis dengan

tanda segitiga merupakan data perhitungan kode. Pengaruh posisi batang kendali terhadap daya divalidasi terhadap data eksperimen reaktor Kartini dengan cara mengatur nilai reaktivitas batang kendali dan besarnya koefisien reaktivitas umpan balik. Namun demikian, nilai daya yang dibangkitkan belum sama dengan nilai daya eksperimen untuk perubahan posisi yang sama namun grafiknya sudah sesuai. Hal tersebut mungkin karena dalam kode hanya mempertimbangkan 1 *bundle* batang kendali, sementara Reaktor Kartini menggunakan 3 jenis batang kendali, yaitu batang kendali pengaman, batang kendali kompensasi dan batang kendali pengatur. Selain itu bisa dikarenakan dalam menaikkan daya hanya mengatur posisi batang kendali saja seharusnya memperhatikan posisi batang kendali kompensasi juga, pada saat pengambilan data di Reaktor Kartini posisi batang kendali kompensasi tetap 70 %.



**Gambar 4.10** Korelasi antara daya operasi reaktor kartini dengan daya perhitungan kode

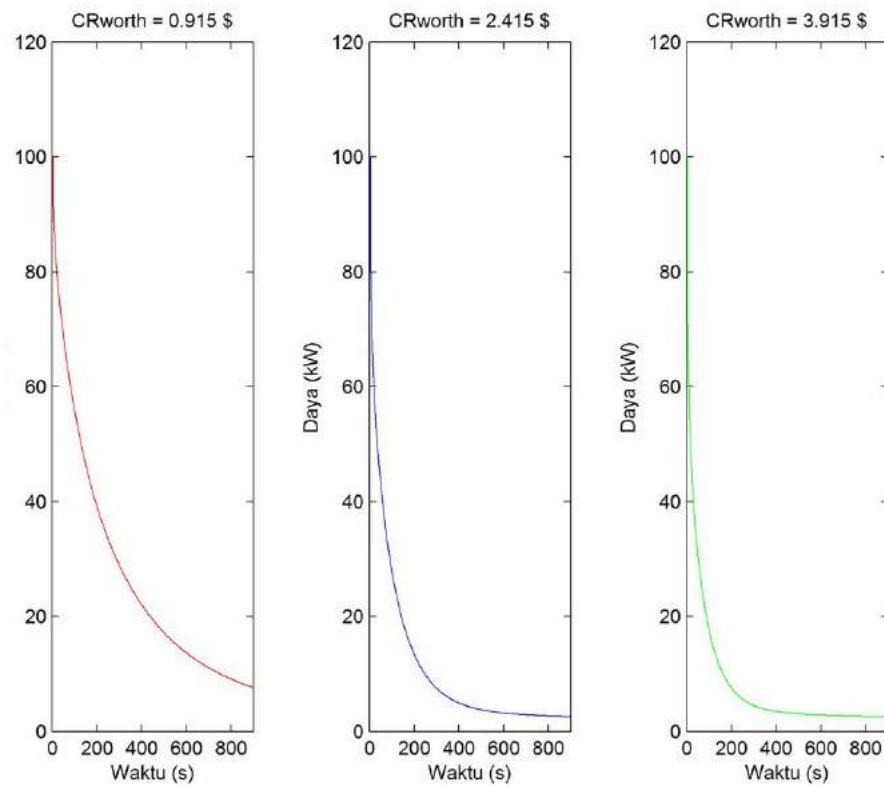
Gambar 4.10 menunjukkan bahwa hasil perhitungan daya menggunakan kode terhadap hasil eksperimen daya pada operasi reaktor kartini sudah menyerupai dengan koefisian  $R^2 = 0,967$ .

Pola grafik daya terhadap posisi batang kendali sudah sesuai tetapi besarnya masih berbeda hal ini membuktikan bahwa kenaikan daya reaktor kartini harus dilakukan oleh batang kendali kompensasi bukan oleh batang kendali pengatur saja. Sementara yang penulis lakukan menaikkan daya dengan batang kendali pengatur saja, dan pada saat pengambilan data di Reaktor Kartini batang kendali kompensasi tetap 70 %, hal ini dilakukan karena menyesuaikan dengan kode yang hanya mengasumsikan 1 batang kendali saja. Untuk meminimalisir perbedaan antara kedua data dapat diupayakan dengan mengoptimasi nilai CRworth dan k diharapkan dapat membuat data yang dibangkitkan dari kode sama dengan data simulasi dari reaktor kartini.

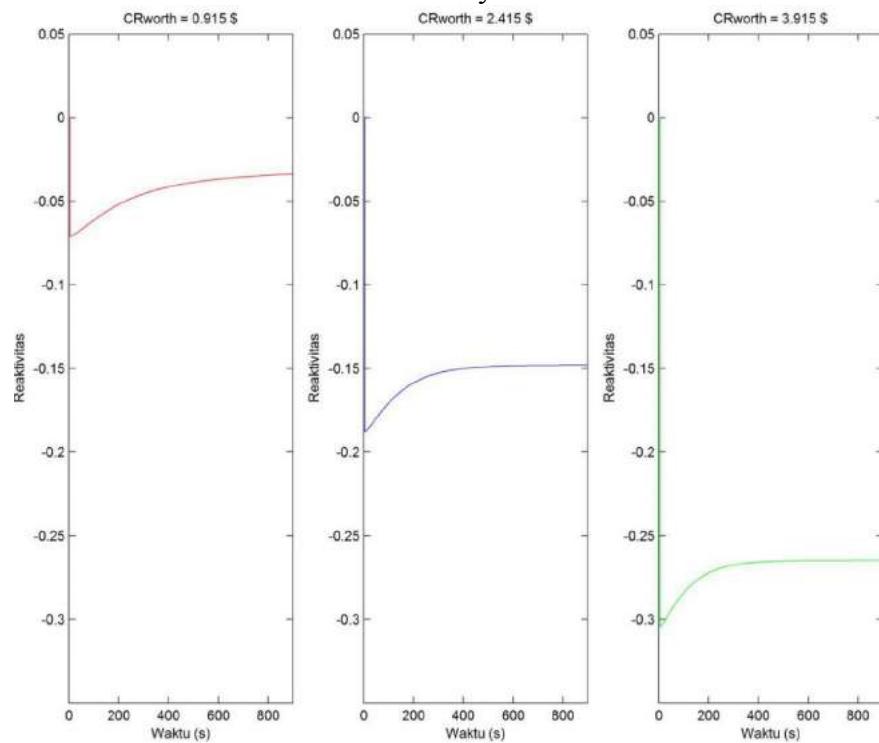
#### **4.1.2 Hasil variasi nilai CRworth**

Data yang dibangkitkan dari kode belum sama dengan data simulasi dari reaktor maka dari itu perlu dilakukan optimasi nilai CRworth pada kode operasi. Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh nilai CRworth pada daya. Semakin besar nilai CRworthnya maka dayanya akan semakin turun. Gambar 4.11 menunjukkan perubahan reaktivitas terhadap perubahan nilai CRworth.

Pada gambar 4.12 menunjukkan bahwa nilai CRworth juga sangat berpengaruh pada nilai reaktivitas. Semakin kecil nilai CRworth maka semakin besar nilai reaktivitasnya. Saat nilai CRworth 0,915 \$ lebih besar dibanding saat nilai CRworthnya 2,415 \$.



**Gambar 4.11 Daya variasi nilai  $CRworth$**

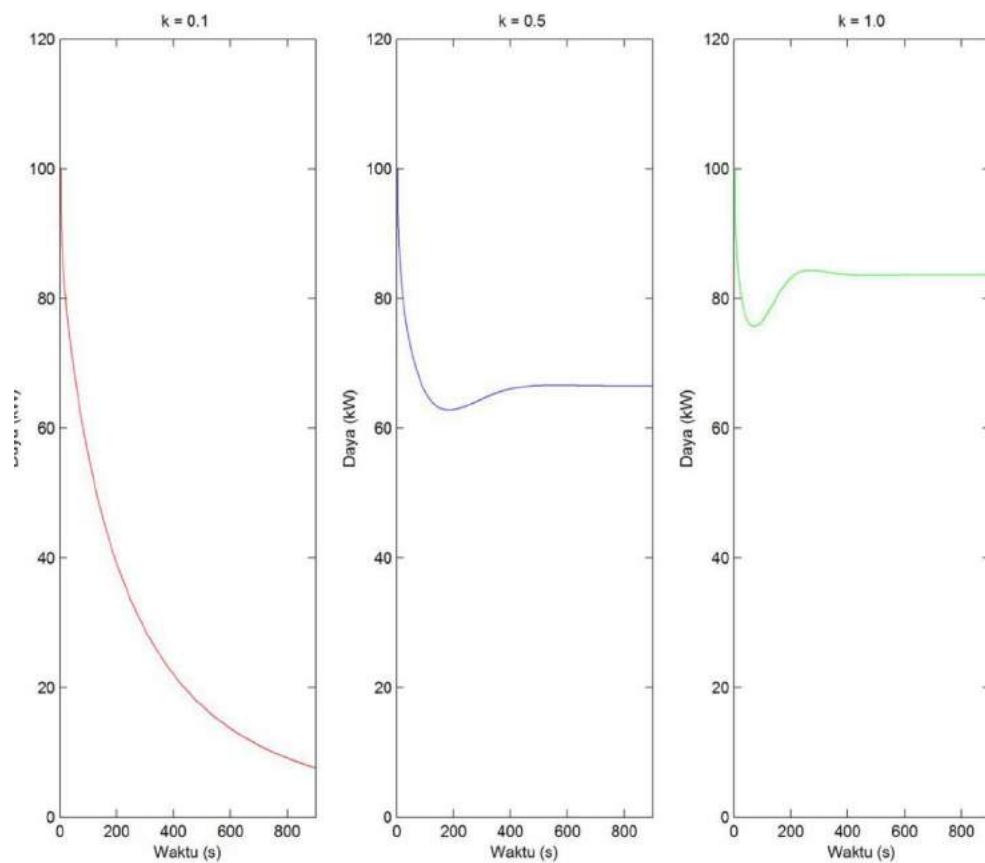


**Gambar 4.12 Reaktivitas variasi nilai  $CRworth$**

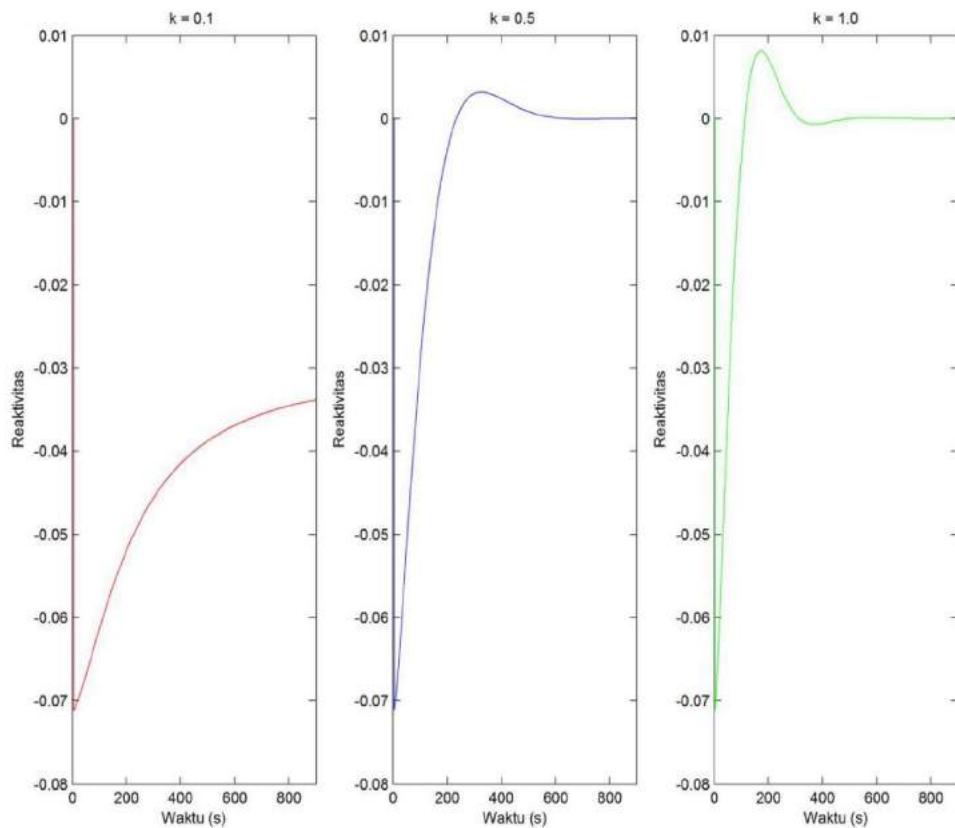
#### 4.1.3 Hasil variasi nilai k

Selain menvariasikan  $CRworth$  untuk mengoptimasi hasil data yang dibangkitkan dari kode perlu juga memvariasikan nilai k yang merupakan pengali koefisien reaktivitas.

Pada Gambar 4.13 menunjukkan nilai k berpengaruh terhadap nilai daya yang dibangkitkan kode semakin besar nilai k membuat nilai dayanya semakin besar hal tersebut ditunjukan pada saat nilai k sebesar 0,1 nilai dayanya lebih besar dibandingkan saat nilai k sebesar 0,5



**Gambar 4.13** Daya terhadap variasi nilai k



**Gambar 4. 14** Variasi reaktivitas terhadap perubahan nilai  $k$

Pada gambar 4.14 menunjukkan nilai  $k$  juga berpengaruh pada perubahan nilai reaktivitas. Pada hal ini semakin besar nilai  $k$  semakin besar pula nilai reaktivitasnya hal ini dapat dilihat pada gambar 4.14. untuk perubahan nilai dreff terhadap variasi nilai  $k$  dapat dilihat pada Gambar 4.15.

Seperti halnya pada Gambar 4.14 yang menunjukkan perubahan nilai reaktivitas yang semakin besar terhadap bertambahnya nilai  $k$  gambar 4.15 juga menunjukkan hal yang sama yaitu semakin besar nilai  $k$  nilai dreff nya juga semakin besar hal ini menunjukan bahwa nilai  $k$  mempengaruhi nilai dreff.

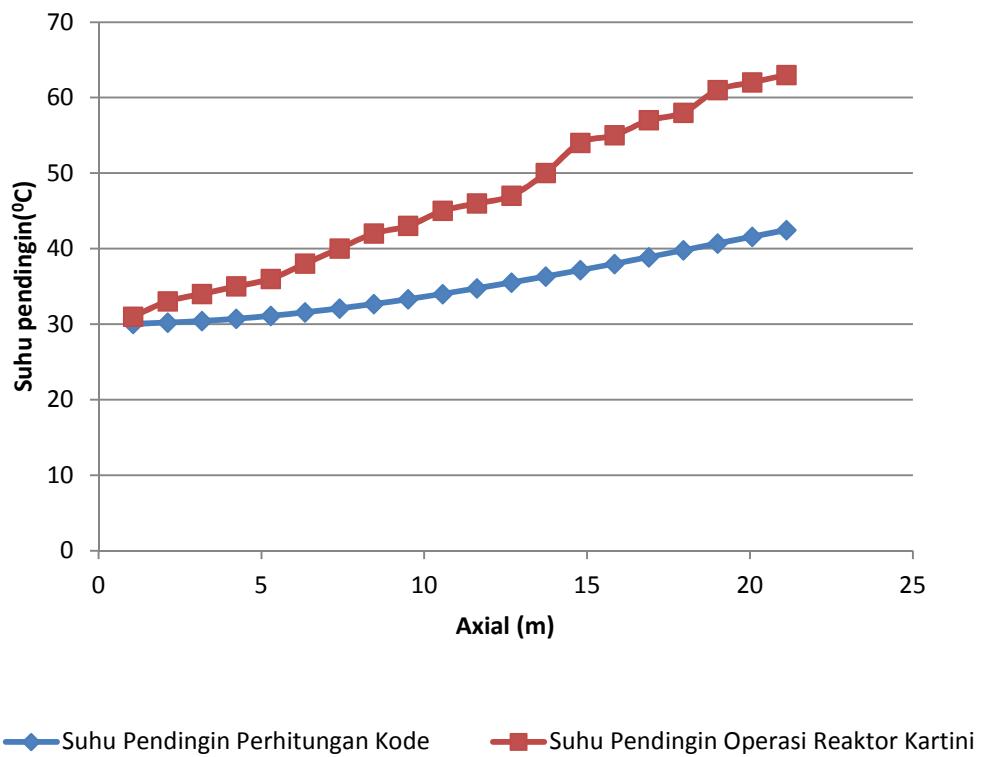
#### 4.1.4 Hasil Validasi Suhu Pendingin

Data yang kedua dibangkitkan adalah data suhu pendingin pada reaktor kartini dengan data suhu pendingin yang dibangkitkan dari kode, yang kemudian akan dibandingkan dengan data suhu pendingin yang didapatkan dari operasi reaktor Kartini secara eksperimen. Tabel 4.3 menunjukkan data suhu pendingin hasil perhitungan menggunakan kode ketika daya 100 kw dengan data suhu pendingin operasi reaktor kartini.

**Tabel 4. 3** Data Suhu Pendingin ( $^{\circ}\text{C}$ ) pada posisi axial (m)

Axial (cm)	Suhu Pendingin Perhitungan kode ( $^{\circ}\text{C}$ )	Suhu Pendingin Operasi Reaktor Kartini ( $^{\circ}\text{C}$ )
1.0556	30.0588	31
2.1112	30.1963	33
3.1668	30.4177	34
4.2224	30.7182	35
5.278	31.097	36
6.3336	31.5562	38
7.3892	32.0821	40
8.4448	32.6693	42
9.5004	33.3132	43
10.556	34.0084	45
11.6116	34.7495	46
12.6672	35.5311	47
13.7228	36.3306	50
14.7784	37.1499	54
15.834	37.9932	55
16.8896	38.8782	57
17.9452	39.7821	58
19.0008	40.6902	61
20.0564	41.5749	62
21.112	42.4571	63

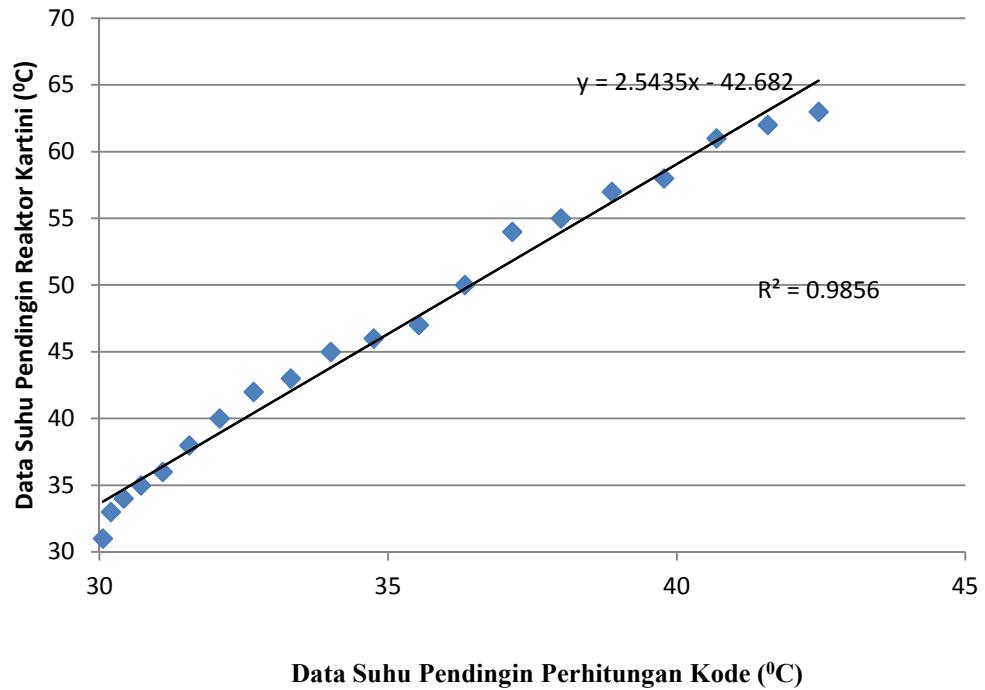
Dari data pada Tabel 4.3 dapat digambarkan dalam bentuk grafik seperti Gambar 4.15.



**Gambar 4.15** Suhu Pendingin pada arah axial

Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa karakteristik kedua grafik tersebut relatif sama hanya saja angkanya belum realtif sama namun mendekati. Jadi suhu pendingin yang dibangkitkan dari kode sudah mendekatai data eksperimen dari reaktor Kartini.

Gambar 4.16 menunjukkan bahwa hasil perhitungan suhu menggunakan kode terhadap hasil eksperimen suhu pada reaktor kartini sudah menyerupai dengan koefisian  $R^2= 0,985$ .



**Gambar 4.16** Korelasi antara suhu pendingin kode dan suhu pendingin reaktor kartini

Pengembangan kode operasi reaktor kartini ini menghasilkan data yang dapat dimasukkan ke dalam *database* IRL yang kemudian data dapat dikirim ke pengguna yang berada di jarak jauh.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Kode operasi reaktor kartini sudah dibuat dan data daya, fluks neutron, reaktivitas batang kendali. Pembangkitan data pada kode tersebut telah sesuai dengan teori bahwa penurunan batang kendali akan menurunkan daya akibat penyisipan reaktivitas negatif yang dapat dihasilkan dari simulasi. Namun demikian, reaktivitas umpan balik akan mengkompensasi reaktivitas negatif tersebut sehingga daya stabil pada nilai tertentu. Data tersebut dapat dimasukkan ke dalam *database* IRL yang akan dikirim kepada pengguna jarak jauh.
2. Telah dilakukan simulasi nilai daya terhadap posisi batang kendali dengan kode yang sudah dibuat.
3. Korelasi antara daya dari perhitungan kode dan daya dari operasi reaktor kartini menyerupai yaitu dengan koefisien  $R^2 = 0,967$ . Kemudian suhu pendingin dari perhitungan kode dan suhu pendingin dari operasi reaktor kartini korelasinya juga sudah menyerupai dengan koefisien  $R^2 = 0,985$ .

## 5.2 Saran

1. Pengembangan kode ini untuk kedepannya sangat diperlukan
2. Kode dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan 3 jenis batang kendali, yaitu batang kendali pengaman, kompensasi dan pengatur, sama dengan yang ada di reaktor Kartini.
3. Validasi sebaiknya dilakukan juga untuk data-data operasi yang lain, seperti distribusi suhu pendingin, dan nilai reaktivitas.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abimanyu Adi., Syarip.,S, Elisabeth., Wagirin.,GunawanDjati., Marsudi.(2016). *The Development of Kartini Reactor Data Acquisition System to Support Nuclear Training Centre (NTC)*.National Nuclear Energy Agency, Center for Science and Technology Accelerator.Yogyakarta.
- Ainur Rosyidi., Sagino.(2014).Eksperimen Awal Aliran Sirkulasi Alamiah Pada Simulasi Sistem Keselamatan Pasif. Sigma Epsilon, ISSN 0853-9103.Vol 18 No 2. Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN
- Eko Prasetya Budiana., Zainal Arifin., Fajar Rohim Suryono.(2011). Simulasi Numerik Perpindahan Panas Aliran Udara Ventilasi 2 Dimensi Dengan Metode Beda Hingga.Jurnal Mekanika.Vol 9 No 2.Jurusian Teknik Mesin –Universitas Sebelas Maret.Solo
- Ikejiri,S., Ishiwatari,Y., Oka,Y.(2010).Safety Analysis Of A Supercritical Pressure Water Cooled Fast Reactor Under Supercritical Pressure. Nuclear Engineering and Design. Vol 240, pages 1218-1228. The University of Tokyo. Japan
- Ishiwatari,Y., Oka,Y., Koshizuka,S., Yamaji,A., Liu,J. (2005). Safety of Super LWR, (I) Safety System Design. Nuclear Science and Technology, Vol. 42, No. 11. The University of Tokyo. Japan
- Jumari., S Nurhidayat., Abimanyu Adi., Mursiti.(2012). *Pembuatan Rangkaian Trip dan Perioda kanal Daya Logaritmik Analog untuk SIK Reaktor Kartini*.Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolahan Perangkat Nuklir. Buku II(2012)361-366 (261-262).Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN.Yogyakarta
- Liang Liu , Tao Zhou , Yu Li , Juan Chen , Muhammad Zeeshan Ali, Zejun Xiao.(2015).SCWR transient safety analysis code SCAC-CSR1000. Progress in Nuclear Energy 83 (2015) 318-325.North China Electric Power University Nuclear Thermal Safety and Standardization Research Institute, Beijing 102206, China Beijing Passive Technology Key Laboratory, Beijing 102206, Chinac China Nuclear Power Institute Nuclear Reactor System Design Technology Laboratory, Chengdu 610041, China
- Muhammad Septyawan.(2016).Revitalisasi Sistem Akuisisi Data Reaktor Kartini Untuk Menunjang NTC dan IRL.Usulan Penelitian Tugas Akhir . Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir- BATAN. Yogyakarta
- Puradwi, Triwulan, Elisabeth, Gede, Widarto, Tegas, Eko, Edi, Prajitno, Umar, Tri, Marsudi. (2012). Laporan Analisis Keselamatan. Pusat Sains dan Teknologi Akselerator. Yogyakarta
- Sinta Uri El Hakim.(2016).Rancang Bangun Simulator Operasi Reaktor Kartini Menggunakan PLC Siemen S7. Usulan Penelitian Tugas Akhir. Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir BATAN.Yogyakarta

- Syarip. 2001. *Kinetika dan Pengendalian Reaktor Nuklir*. Yogyakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional
- Syarip, Puradwi Ismu Wahyono, Tegas Sutondo.(2015) .*Evaluation On The Utilization of Kartini Research Reactor*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir (2015) 323-327 (325-327).Center for Accelerator Science and Technology (CAST), National Nuclear Energy Agency (BATAN). Yogyakarta
- Suhaemi, T., DJ, Djen. Djen., K, Itjue., S, Johny., Setyono. 2003. *Evaluasi Keselamatan Reaktor Kartini Ditinjau dari Desain Sistem Instrumentasi*.Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir VIII, 49-60(49).Pusat Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir-BATAN.Serpong
- Sutanto , Yoshiaki Oka.(2015). *Accidents and transients analyses of a super fast reactor with singleflow pass core*. Nuclear Engineering and Design 273 (2014) 165–174. Cooperative Major in Nuclear Energy, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Okubo, Shinjuku-ku,Tokyo 169-8555, Japan.
- Y. Oka, S. Koshizuka, Y. Ishiwatari, A. Yamaji and T. T. Yi.2003. *Super Light Water Reactor and Super fast Reactor*. London : Springer
- Y. Oka, S. Koshizuka, Y. Ishiwatari, A. Yamaji,,2010 Super light water reactors and super fast reactors, Springer

## **Lampiran 1**

### **Parameter Desain Reaktor**

---

Tipe Reaktor	: TRIGA Mark II
Daya reaktor maksimum	: 250 kW (termal)
Tujuan	: Penelitian fisika reaktor, analisis aktivasi, pendidikan dan pelatihan.
Lokasi	: Babarsari, Yogyakarta.
Pemilik dan operator	: Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Yogyakarta.
Pembangun	: Pusat Penelitian GAMA.
Desain	: General Atomic Division, General Dynamics Corporation
Status, konstruksi dan operasi	: - mulai dibangun : April 1975 - reaktor kritis : Januari 1979 - operasi daya penuh : Maret 1979.

---

**Lampiran 2**  
**Spesifikasi elemen bakar standar TRIGA tipe 104**

---

- panjang total	: 73,04 - 75,39 cm
- panjang aktif	: 38,0 cm
- panjang grafit	: 6,5 – 9,5 cm
- diameter luar kelongsong	: 37 mm
- diameter luar bahan bakar	: 35,60 mm
- Tebal cakram racun dapat bakar (Mo)	: 0,127 cm
- berat kandungan U-235	: 38 gram (avg)
- material kelongsong	: SS-304
- tebal kelongsong	: 0,50 mm
- gap bahan bakar kelongsong	: 0,2 mm
- titik leleh kelongsong	: 1453 OC
- densitas UzrH	: 5,64 gr/cc
- komposisi zirkonium hidrida	: 1: 1,65
- densitas Mo	: 10,2 gr/cc

---

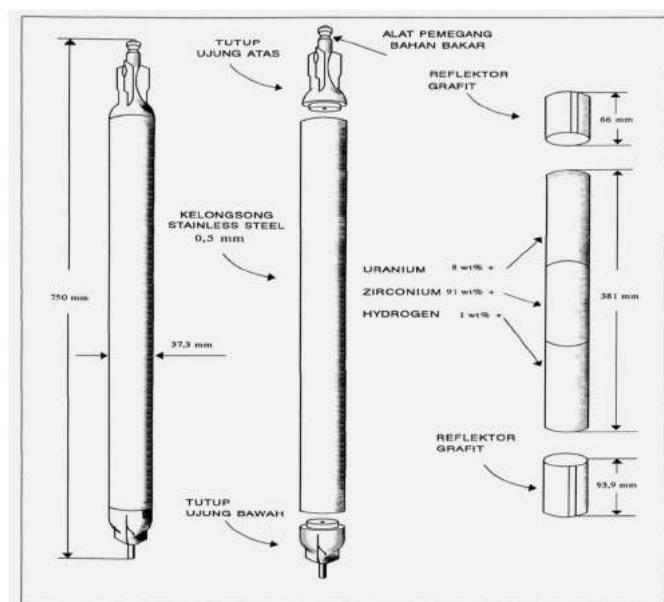
### Lampiran 3

#### Spesifikasi elemen bakar standar TRIGA tipe 204 ( IFE)

---

-panjang total	: 76,20 cm
- panjang aktif UZrH	: 38,0 cm
- panjang grafit	: 6,5 – 8,69 cm
- diameter luar	: 37,00 mm
- diameter luar bahan bakar	: 35,6 mm
- Tebal cakram racun dapat bakar (Mo)	: 0,127 cm
- berat kandungan U-235	: 38 gram (avg)
- material kelongsong	: SS-304
- tebal kelongsong	: 0,50 mm
- gap bahan bakar kelongsong	: 0,2 mm
- titik leleh kelongsong	: 1453 OC
- densitas U Zr H	: 5,64 gr/cc
- komposisi zirkonium hidrida	: 1: 1,65
- densitas Mo	: 10,2 gr/cc
- thermokopel	: chromel-alumel
- Jumlah thermokopel	: 3 pasang berjarak 2,56 cm satu dengan lainnya terletak pada tengah poros bahan bakar
-panjang total	: 76,20 cm

---



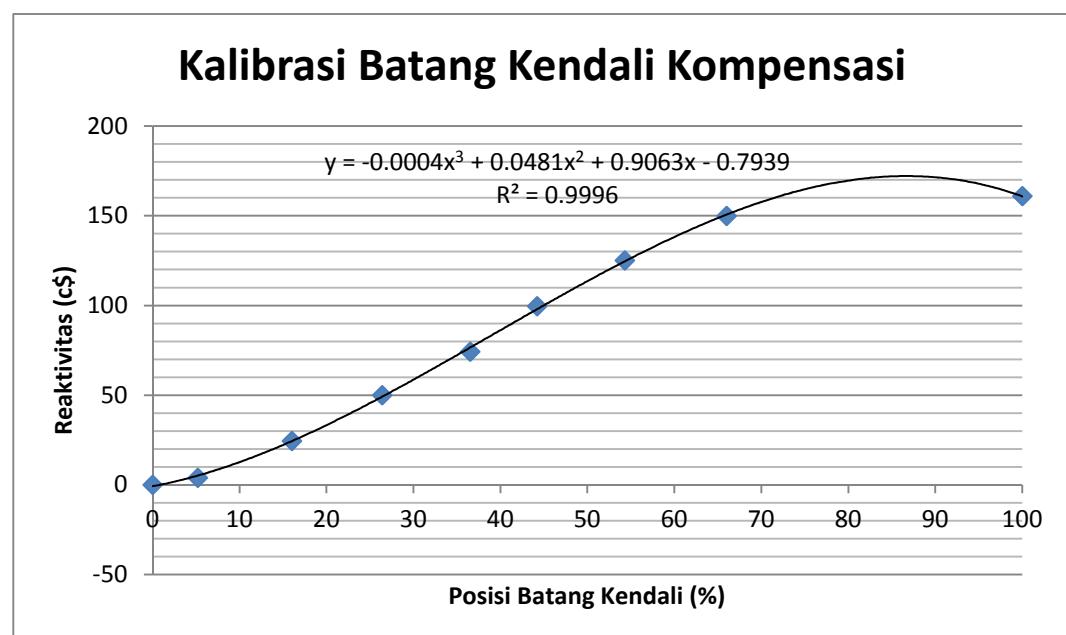
Gambar Elemen Bahan Bakar UZrH

## Lampiran 4

### Tabel Kalibrasi Batang Kendali

Tabel 1. Kalibrasi Batang Kendali Kompensasi

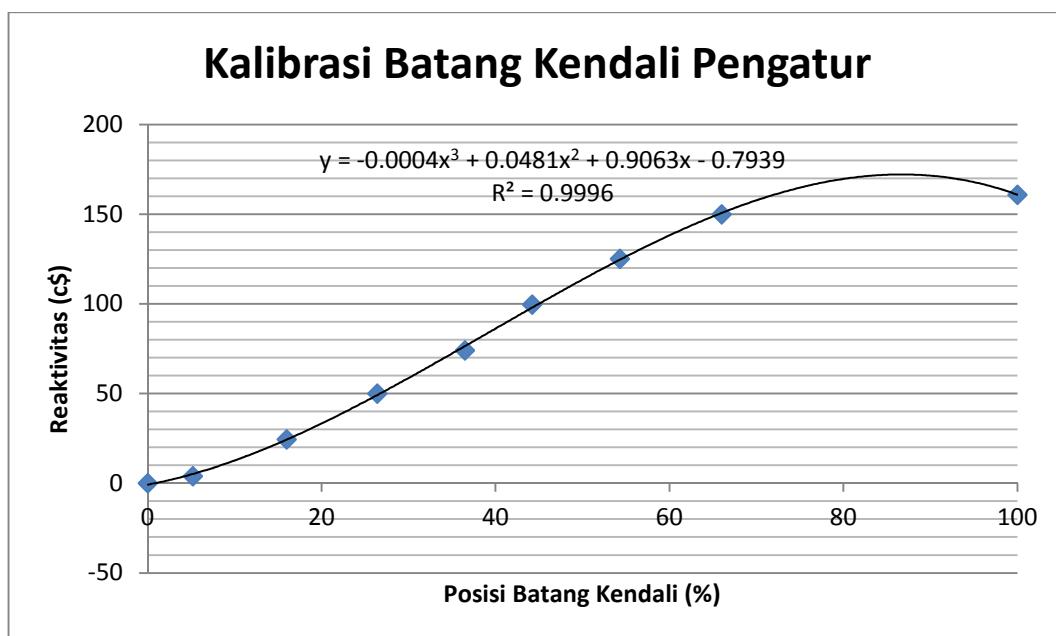
Posisi (%)	Reaktivitas (c\$)	drho/dh (c\$/%)	sigma rho (c\$)
0	0		0
39.5	55		53,958,333
44.3	25.9		48,823,529
49.4	24.9	4,68	
54.4	23.4		43,571,429
60	24.4		37,384,615
66.5	24.3	2,8	
74.5	22.4	0,627451	
100	16		-2,163



Gambar 1. Grafik kalibrasi batang kendali kompensasi

Tabel 2. Kalibrasi batang kendali

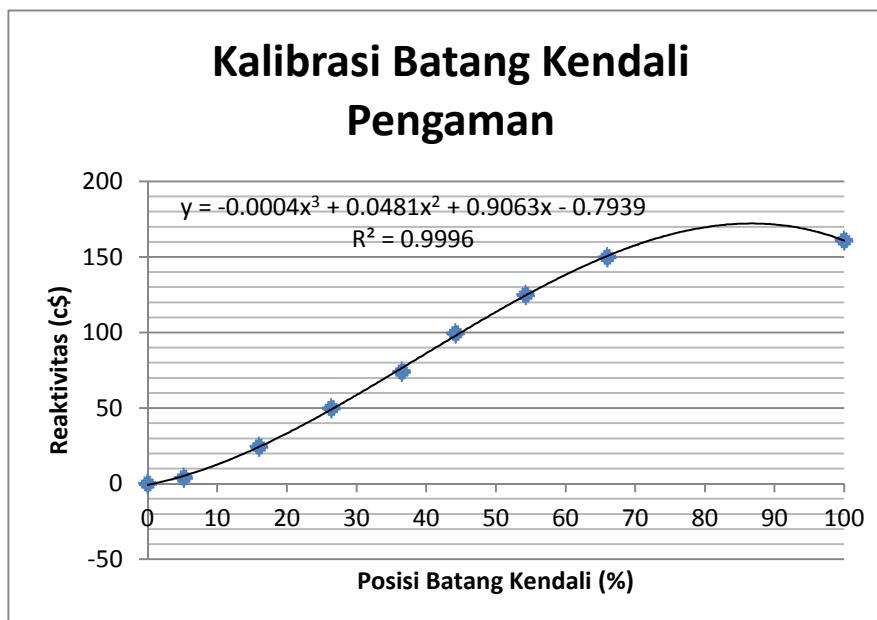
Posisi (%)	Reaktivitas (c\$)	drho/dh (c\$/%)	sigma rho (c\$)
0	0	0	0
5.2	4	0,7692308	4
16	20,5	18,981,481	24,5
26,4	25,5	24,519,231	50
36,5	24,2	23,960,396	74,2
44,2	25,4	32,987,013	99,6
54,3	25,5	25,247,525	125,1
66	24,8	21,196,581	149,9
100	11	0,3235294	160,9



Gambar 2. Grafik kalibrasi batang kendali pengatur

Tabel 3. kalibrasi batang kendali pengaman

Posisi (%)	Reaktivitas (c\$)	drho/dh (c\$/%)	sigma rho (c\$)
0	0	0	0
36.5	60	5,08	60
41.5	25,4	47,083,333	85.4
46.3	22,6	44,468,085	108
51	20,9	38,166,667	128.9
57	22,9	36,571,429	151.8
64	25,6	26,410,256	177.4
71.8	20,6	0,3865248	198
100	10,9	-2,089	208.9



Gambar 3. Kalibrasi Batang Pengaman

	Reakt.(c\$)	Reakt.(\$)
Total	586,100	5,861
Core excess (reak.lebih)	156,900	1,569
Shutdown margin	220,300	2,203
stuck rod	216,3	2,163

## Lampiran 5

### Nuclear Calculation Code

```

C      -----> Konversi populasi netron ke power
      PW_F = nn
      DO I = 1, 35
      dPW_Di(I) = Li(I)*(Ai(I)*(PW_F+PW_D)-
      PW_Di(I))*dtt
      PW_Di(I) = PW_Di(I) + dPW_Di(I)
      ENDDO
      PW_D = 0.0
      DO I = 1, 35
      PW_D = PW_D + PW_Di(I)
      ENDDO
      PW_D=PW_D
      do 130 i=1,6
      c(i)=c(i)+(b(i)*b0*nn/vv-l(i)*c(i))*dtt
      ! calculating concentration of precursor
      130      continue
      110  continue
      write(272,500)time,rr,nn,s,qm
      write(273,500)time,PW_F,PW_D,PW_F0,PW_D0

      qm = qmax*(PW_F+PW_D)
      PowerF = PW_F
      ! Power fuel ?
      PowerD = PW_D
      ! Power decay?
      PowerTotal = PowerF + PowerD
      p01 = PW_D

      PW_F0 = PW_F
      PW_D0 = PW_D
      dtt=dtt0

```

## Lampiran 6

### Spesifikasi Reaktor SCWR

Spesifikasi	Besaran
Tipe kisi	21×21 kisi persegi
<i>Pitch</i> perangkat (mm)	285,0
Ketebalan perangkat (mm)	3,0
Sisi perangkat (mm)	283,0
Celah antar-perangkat	2,0
Tabung air	
Jumlah per perangkat	25
Panjang sisi tabung air (mm)	39,6
Ketebalan dinding air (mm)	0,4
Pin bahan bakar	
Jumlah per perangkat	216
Diameter luar pin bahan bakar (mm)	12,192
Tipe kelongsong	Si-duplex
Ketebalan lapisan SiC monolitik (mm)	1,016
Densitas lapisan SiC monolitik (g/cm <sup>3</sup> )	3,1
Ketebalan lapisan SiC berpori	0,4064
Densitas lapisan berpori	2,7
Pelet bahan bakar	
Diameter luar (mm)	9,1872
Tebal celah dingin (μm)	80,0
Komposisi bahan bakar	UO <sub>2</sub>
Panjang bahan bakar aktif (m)	4,27
Densitas bahan bakar (g/cm <sup>3</sup> )	10,4215
Pengkayaan U-235	5,0%