

**SIMULASI PENGARUH KONFIGURASI POSISI TERAS  
TERHADAP TEMPERATUR BAHAN BAKAR PEBBLE (UO<sub>2</sub>)  
DI TERAS REAKTOR RGTT 200K DENGAN INLET 600 C**

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**ACHMAD FATICH AL QODRI**

**NIM. 10640031**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2014**

**SIMULASI PENGARUH KONFIGURASI POSISI TERAS TERHADAP  
TEMPERATUR BAHAN BAKAR PEBBLE (UO<sub>2</sub>)  
DI TERAS REAKTOR RGTT 200K DENGAN INLET 600 C**

**SKRIPSI**

**Diajukan kepada:**

**Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang  
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**ACHMAD FATICH ALQODRI  
NIM. 10640031**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2014**

## HALAMAN PERSETUJUAN

### SIMULASI PENGARUH KONFIGURASI POSISI TERAS TERHADAP TEMPERATUR BAHAN BAKAR PEBBLE (UO<sub>2</sub>) DI TERAS REAKTOR RGTT 200K DENGAN INLET 600 C

#### SKRIPSI

Oleh:

**ACHMAD FATICH AL QODRI**  
**NIM. 10640031**

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:  
Tanggal : November 2014

Pembimbing I	:	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Pembimbing II	:	<u>Umaiatus Syarifah, M.A</u> NIP. 19820925 200901 2 005	
Pembimbing III	:	<u>Drs. Sudarmono, M.Si</u> NIP. 19570617 198503 1003	

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Fisika

Erna Hastuti, M.Si  
NIP. 19811119 200801 2 009

## HALAMAN PENGESAHAN

### SIMULASI PENGARUH KONFIGURASI POSISI TERAS TERHADAP TEMPERATUR BAHAN BAKAR PEBBLE (UO<sub>2</sub>) DI TERAS REAKTOR RGTT 200K DENGAN INLET 600 C

#### SKRIPSI

Oleh:  
**ACHMAD FATICH AL QODRI**  
**NIM.10640031**

Telah Dipertahakan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan  
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)  
Tanggal: Desember 2014

Penguji Utama	:	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP.19650504 199003 1 003	
Ketua Penguji	:	<u>Irjan, M.Si</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Sekretaris Penguji	:	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Anggota Penguji	:	<u>Umayyatus Syarifah, M.A</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,  
Ketua Jurusan Fisika

Erna Hastuti, M.Si  
NIP. 19811119 200801 2 009



## MOTTO

*Allah tidak akan menguji suatu kaum kecuali ujian itu dapat dilaluinya*

(AYAT KURSI)

*Jangan hanya bermimpi... tapi buktikanlah dengan perbuatan*

*Jangan hanya berkhayal... sadarilah dunia itu tak kekal*

{ COGITO ERGO SUM }

## HALAMAN PERSEMBAHAN

*Ku Persembahkan Karya Ini:*

*Kedua orang tuaku yang telah menyayangiku hingga saat ini, ayah Fauzi, Ibu Fatmah, serta adik-adikku terkasih...*



## KATA PENGANTAR

*Assalamualaikum Wr. Wb*

Alhamdulillah puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya. Sholawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta pengikutnya. Atas Ridho Dan Kehendak Allah SWT Penulis Dapat Menyelesaikan Skripsi Yang Berjudul **Simulasi Pengaruh Konfigurasi Posisi Teras Terhadap Temperatur Bahan Bakar Pebble (UO<sub>2</sub>) Di Teras Reaktor RGTT 200K Dengan Inlet 600 C** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) di jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Selanjutnya penulis haturkan ucapan terima kasih seiring do'a dan harapan *jazakumullah ahsanal jaza'* kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini. Ucapan terima kasih ini penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. H. Mudjia Rahardjo, M.Si selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah banyak memberikan pengetahuan dan pengalaman yang berharga.
2. Dr. drh. Bayyinatul Muchtaromah, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Erna Hastuti, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang
4. Erika Rani, M.Si selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang telah banyak meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, bantuan serta pengarahan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
5. Umayyatus Syarifah, M.A selaku Dosen Pembimbing Agama, yang bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan pengarahan bidang integrasi Sains dan al-Qur'an.

6. Sudarmono, M.Si selaku Pembimbing Skripsi yang telah meluangkan waktu, memberikan bimbingan, bantuan serta pengarahan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan
7. Segenap Dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah bersedia mengamalkan ilmunya, membimbing dan memberikan pengarahan serta membantu selama proses perkuliahan.
8. Kedua orang tua Ayah Fauzi dan Bunda Fatmah dan semua keluarga yang telah memberikan dukungan, restu, serta selalu mendoakan disetiap langkah penulis.
9. Teman-teman dan para sahabat terimakasih atas kebersamaan dan persahabatan serta pengalaman selama ini
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Semoga skripsi ini bisa memberikan manfaat, tambahan ilmu dan dapat menjadi inspirasi kepada para pembaca *Amin Ya Rabbal Alamin*.

*Wassalamu'alaikum Wr. Wb.*

Malang, November 2014

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>MOTTO</b> .....	vi
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	vii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	viii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiv
<b>ABSTRAK</b> .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan .....	5
1.4 Manfaat .....	5
1.5 Batasan Masalah .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1 Reaksi dan Energi Inti .....	7
2.2 Reaktor Nuklir .....	12
2.3 Jenis-jenis PLTN .....	16
2.4 RGTT 200K .....	20
2.5 <i>Very Superior Old Programs</i> (VSOP) .....	28
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	42
3.1 Jenis Penelitian .....	42
3.2 Waktu Dan Tempat Penelitian .....	42
3.3 Alat Dan Bahan .....	42
3.3.1 Alat .....	42
3.3.2 Bahan .....	42
3.4 Langkah Penelitian .....	43
3.5 Diagram Alir .....	45
<b>BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN</b> .....	46
4.1 Data Hasil .....	46
4.1.1 Mendesain bentuk reaktor dan bahan bakar ke dalam VSOP 94 .....	46
4.1.2 Menentukan data masukan untuk RGTT 200K .....	48
4.1.3 Mensimulasikan dengan menggunakan VSOP94 .....	49
4.1.4 Menganalisis Hasil Simulasi .....	50
4.2 Pembahasan .....	66
4.3 Nuklir Dalam Tinjauan al Quran .....	76

<b>BAB V PENUTUP</b> .....	88
5.1 Kesimpulan.....	88
5.2 Saran.....	90

**DAFTAR PUSTAKA**  
**LAMPIRAN**



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peluruhan alami pada Uranium 235 .....	11
Gambar 2.2	Proses Peluruhan U-235 dalam reaktor Nuklir.....	12
Gambar 2.3	Evolusi generasi reaktor .....	20
Gambar 2.4	Desain Bahan Bakar RGTT.....	24
Gambar 2.5	Gambaran Bahan Bakar <i>Pebble Bed</i> .....	24
Gambar 2.6	Aliran Pendingin Helium.....	25
Gambar 2.7	Konseptual desain RGTT200K .....	27
Gambar 2.8	Main program VSOP'94.....	36
Gambar 2.9	Diagram Alir Perhitungan Program <i>VSOP-94</i> Untuk Distribusi Temperatur.....	41
Gambar 3.1	Diagram alir secara umum.....	45
Gambar 4.1	Pemodelan teras RGTT 200K .....	47
Gambar 4.2	Membuka program <i>VSOPUtility</i> .....	48
Gambar 4.3	Muka program <i>VSOPUtil_v23</i> .....	49
Gambar 4.4	Menjalankan program lewat command prompt.....	50
Gambar 4.5	Grafik hasil distribusi temperatur padatan pada 200 MW.....	51
Gambar 4.6	Grafik Distribusi Temperatur OPyC pada daya 200 MW .....	52
Gambar 4.7	Grafik Distribusi Temperatur SiC pada daya 200 MW .....	53
Gambar 4.8	Grafik Distribusi Temperatur IPyC pada daya 200 MW.....	54
Gambar 4.9	Grafik Distribusi Temperatur <i>Buffer</i> pada daya 200 MW .....	55
Gambar 4.10	Grafik Distribusi Temperatur <i>Kernel</i> pada daya 200 MW .....	56
Gambar 4.11	Spektrum aliran panas pada padatan berupa Grafit.....	57
Gambar 4.12	Spektrum aliran panas pada pendingin Helium.....	58
Gambar 4.13	Grafik distribusi aliran Helium terhadap arah radial.....	59
Gambar 4.14	Grafik Distribusi temperatur pendingin Helium.....	60
Gambar 4.15	Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar OPyC .....	61
Gambar 4.16	Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar SiC .....	62
Gambar 4.17	Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar IPyC .....	63
Gambar 4.18	Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar <i>Buffer</i> .....	64
Gambar 4.19	Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar inti ( <i>Kernel</i> ) .....	65

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Teknis Bahan Bakar Partikel Berlapis RGTT .....	23
Tabel 2.2 Status program VSOP'94.....	36



## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran I Data Masukan
- Lampiran II Deskripsi Langkah Percobaan
- Lampiran III Data Hasil Percobaan
- Lampiran IV Distribusi Temperatur Pendingin Reaktor (Helium)



## ABSTRAK

Al Qodri, Achmad Fatich. 2014. **Simulasi Pengaruh Konfigurasi Posisi Teras Terhadap Temperatur Bahan Bakar Pebble (UO<sub>2</sub>) Di Teras Reaktor RGTT 200K Dengan Inlet 600 C**. Tugas akhir/skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.  
Pembimbing : (I) Erika Rani, M.Si (II) Umayyatus Syarifah, MA.  
(III) Sudarmono, M.Si

---

---

**Kata Kunci :** Simulasi VSOP 94, RGTT 200K, Kondisi tunak, TRISO, bola Pebble, Teras reaktor.

Ketersediaan energi yang cukup menjadi salah satu faktor utama untuk mendukung kemajuan suatu negara. RGTT menjadi salah satu pertimbangan khusus karena memiliki efisiensi yang besar, keselamatan yang tinggi dan lebih ekonomis, sedangkan reaktor RGTT 200K masih memerlukan analisis yang lebih dalam. Salah satu analisis yang diperlukan adalah analisis temperatur teras dan bahan bakar di dalam teras reaktor pada kondisi tunak.

Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui nilai temperatur teras dan bahan bakar yang terdapat dalam teras reaktor RGTT 200K kondisi tunak serta nilai-nilai temperatur tertinggi dan terendah dalam teras, sehingga dapat dilakukan kajian selanjutnya untuk mencari pengaturan yang tepat pada reaktor.

Analisis dilakukan menggunakan program komputer *THERMIX* yang terdapat pada VSOP 94, yakni dengan cara membagi teras reaktor menjadi 50 komponen untuk mewakili posisi berbagai komposisi material yang berbeda selanjutnya dirancang suatu model bahan bakar TRISO pada *pebble* menjadi 5 daerah. Perhitungan ini dilakukan berdasarkan data masukkan parameter reaktor, spesifikasi teras, dan spesifikasi bahan bakar *pebble* serta data partikel berlapis TRISO RGTT200K. Hasilnya didapatkan distribusi temperatur yang terdapat pada teras dan 5 lapis TRISO pada *pebble* di dalam teras, dengan nilai tertinggi dan terendah teras adalah sebesar 971,9 C dan 741,9 C, sedangkan nilai tertinggi bahan bakar TRISO terletak pada lapisan bahan bakar inti UO<sub>2</sub> sebesar 1540,5 C dan nilai terendah pada OPyC sebesar 741,9 C. Hasil simulasi pada teras reaktor RGTT 200K yang berisi TRISO yang terbungkus dalam bola *pebble* dapat secara efektif menahan semua produk fisi nuklir, hal ini ditunjukkan dengan nilai temperatur yang masih di bawah temperatur 1600 C yang dipilih sebagai temperatur batas elemen bahan bakar yang diperbolehkan.

## ABSTRACT

Al Qodri, Achmad Fatich. 2014. **Simulation of Reactor Core Position Configuration Effect by Pebble Fuel Element Temperatur  $UO_2$  at RGTT 200K Reactor with 600 C Inlet.** Thesis. Physics Department, Science and Technology Faculty, State Islamic University of Maulana Malik Ibrahim Malang.  
Advisors : (I) Erika Rani, M.Si (II) Umaiatus Syarifah, MA.  
(III) Sudarmono, M.Si

---

---

**Keywords :** VSOP 94 simulation, RGTT 200K, Steady state, TRISO, Pebble bed, Reactor core.

The availability of sufficient energy becomes one of the main factor to support the progress of a country. RGTT is one of special consideration because it has great efficiency, high safety and more economical, but RGTT 200K reactor still requires deeper analysis. One of the necessary analysis is the analysis of reactor core temperatures and fuel in the reactor core at steady state.

This analysis aims to determine the value of reactor core temperatures and fuel in the steady conditions of reactor core RGTT 200K as well as the values of the highest and lowest temperatures in the core, so that further studies can be conducted to find the right setting on the reactor.

Analysis was performed using a computer program THERMIX in VSOP 94 by dividing the reactor core into 50 components to represent the position of the various compositions with different materials, then it is designed a model of fuel TRISO in pebble into 5 regions. This calculation is based on the input data reactor parameters, specifications reactor core and pebble fuel specifications and TRISO-coated particles of RGTT 200K data. The result are shown by temperature distribution of reactor core and 5 layers of the TRISO pebble on the reactor core. The highest and lowest values of reactor core is amounted to 971,9 C and 741,9 C, while the highest value of fuel TRISO lies in the core layer of  $UO_2$  fuel by 1540,5 C and the lowest lies in OPyC about 741,9 C. Simulation results of reactor core RGTT 200K containing the TRISO pebble bed can effectively resist all products of nuclear fission, as shown by the value of the temperature that still below the 1600 C temperature as the temperature of the fuel element boundaries are allowed.

## ملخص البحث

القدري، احمد فاتح. ٢٠١٤. التكوين محاكاة تأثير موقف درجة حرارة الوقود شرفة حصة في قلب المفاعل مدخل RGTT 200K مع ٦٠٠ درجة مئوية. المشروع النهائي\ بحث علمي. قسم الفيزياء كلية العلوم والتكنولوجيا جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج  
المشرف: (١) أريكا راني الماجستير (٢) امية الشريفة الماجستير (٣) سودرمونو الماجستير

الكلمات الرئيسية : VSOP 94 المحاكاة، RGTT 200K، حالة مستقرة، TRISO، سرير الحصى، المفاعل الأساسية.

توافر طاقة كافية يصبح واحدا من العوامل الرئيسية لدعم التقدم في بلد . RGTT هي واحدة من اهتمام خاص لأن لديه كفاءة كبيرة، وسلامة عالية وأكثر اقتصادا، ولكن مفاعل RGTT 200K لا يزال يتطلب تحليل أعمق. واحد من الضرورة التحليل هو تحليل درجات حرارة قلب المفاعل والوقود في قلب المفاعل في حالة مستقرة. ويهدف هذا التحليل إلى تحديد قيمة درجة حرارة قلب المفاعل والوقود في ظل ظروف ثابتة من قلب المفاعل RGTT 200K فضلا عن قيم أعلى وأدنى درجات الحرارة في النواة، بحيث يمكن إجراء المزيد من الدراسات التي أجريت لمعرفة الحق الإعداد على المفاعل.

تم إجراء التحليل باستخدام برنامج كمبيوتر THERMIX في VSOP 94 بقسمة قلب المفاعل إلى ٥٠ عناصر لتمثيل موقف تركيبية مختلفة مع مواد مختلفة، ثم أنها مصممة نموذجاً لل TRISO الوقود في حصة في ٥ مناطق. ويستند هذا الحساب على المعلمات مفاعل إدخال البيانات، المواصفات الأساسية مواصفات المفاعل والوقود حصة والجسيمات RGTT 200K TRISO المغلفة البيانات. وتظهر النتيجة على توزيع درجة حرارة قلب المفاعل و ٥ طبقات من حصة TRISO على جوهر. وبلغ أعلى وأدنى قيم قلب المفاعل إلى ٩٧١,٩ درجة مئوية و ٧٤١,٩ درجة مئوية، في حين أن أعلى قيمة لل TRISO الوقود تكمن في طبقة الأساسية من الوقود UO<sub>2</sub> التي كتبها ١٥٤٠,٥ مئوية وأدنى يكمن في OPyC حوالي ٧٤١,٩ درجة مئوية. نتائج المحاكاة من قلب المفاعل RGTT 200K تحتوي على السرير حصة TRISO يمكن أن تقاوم بشكل فعال جميع المنتجات من الانشطار النووي، كما يتضح من قيمة درجة الحرارة المسموح بها لا يزال تحت درجة حرارة ١٦٠٠ مئوية درجة الحرارة في حدود عنصر الوقود.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Di dalam al Quran telah disebutkan kata-kata matahari dengan menggunakan kata *syams* sebanyak 11 kali, sedangkan al Quran juga berbicara tentang matahari dan bulan sebanyak 20 kali. Kekhususan al Quran dalam matahari juga tercantum sehingga kata *syams* dijadikan sebagai salah satu nama surat dalam al Quran. Berikut beberapa ayat al Quran yang berkenaan dengan matahari antara lain dalam surat Fushilat [41]:37,

وَمِنْ آيَاتِهِ اللَّيْلُ وَالنَّهَارُ وَالشَّمْسُ وَالْقَمَرُ ۚ لَا تَسْجُدُوا لِلشَّمْسِ وَلَا لِلْقَمَرِ وَاسْجُدُوا لِلَّهِ  
الَّذِي خَلَقَهُنَّ ۚ إِنَّ كُنْتُمْ إِيَّاهُ تَعْبُدُونَ ﴿٣٧﴾

*“Dan diantara tanda-tanda kekuasaan-Nya ialah malam, siang, matahari dan bulan. Janganlah sembah matahari maupun bulan, tetapi sembahlah Allah yang menciptakannya, jika ialah yang kamu hendak sembah”.*(QS. Fushilat:37)

Dan Allah swt juga berfirman dalam surat Yunus [10]:5,

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسُ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ  
وَالْحِسَابَ ۚ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ ﴿٥﴾

*“Dia-lah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya dan ditetapkan-Nya manzilah-manzilah (tempat-tempat) bagi perjalanan bulan itu, supaya kamu mengetahui bilangan tahun dan perhitungan (waktu). Allah tidak menciptakan yang demikian itu melainkan dengan hak. Dia menjelaskan tanda-tanda (kebesaran-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui”.*(QS. Yunus:5)

Dari ayat al Quran di atas secara tersirat Allah swt memerintahkan untuk *mentadabburi* penciptaan Allah swt berupa malam, siang, matahari dan bulan.

Diantara ciptaan Allah swt, matahari memiliki posisi yang cukup istimewa. Hal

ini terlihat dari (pengulangan) penyebutan al Quran akan matahari. Allah swt menciptakan matahari dan menjadikannya bersinar yang tentunya terdapat suatu maksud yang sangat luar biasa pada perintah tersebut. Matahari termasuk bintang yang terdapat di tata surya pada gugusan Milky Way di galaksi Bima Sakti. Allah swt menjadikan matahari bersinar dengan kehendak-Nya, memiliki sinar yang terang, suhu yang sangat panas, dan proses yang cukup rumit yang belum pernah dipelajari di zaman Rasulullah saw. Saat ini, diketahui bahwa proses yang menyebabkan matahari dapat bersinar yang dalam terciptanya sinar tersebut terdapat proses inti yang disebut dengan reaksi nuklir.

Dalam fisika nuklir sebuah reaksi nuklir adalah sebuah proses dimana dua *nuklei* atau partikel nuklir bertabrakan. Untuk memproduksi hasil yang berbeda dari produk awal pada prinsipnya semua reaksi dapat melibatkan lebih dari dua partikel yang bertabrakan, tetapi kejadian ini sangat jarang. Bila partikel-partikel tersebut bertabrakan dan berpisah tanpa berubah (kecuali mungkin dalam level energi), proses ini disebut tabrakan dan bukan sebuah reaksi. Hasil berupa reaksi nuklir ini salah satunya adalah panas seperti halnya terjadi pada matahari. Panas yang berlebih ini dapat dimanfaatkan sebagai pemanas untuk menggerakkan turbin untuk pembangkit listrik. (anonymous, 2013)

Dalam pembukaan UUD 1945 diamanatkan bahwa negara wajib melindungi segenap bangsa Indonesia dan seluruh tumpah darah Indonesia, memajukan kesejahteraan umum, mencerdaskan kehidupan bangsa, dan ikut melaksanakan ketertiban dunia yang berdasarkan kemerdekaan, perdamaian abadi dan keadilan sosial. Sejalan dengan amanat ini maka pemerintah mencoba untuk

mengembangkan PLTN untuk mencukupi kebutuhan energi (khususnya) listrik sebagai salah satu cara mengemban amanat UUD 1945. Salah satu PLTN yang sedang dikembangkan adalah jenis RGTT. Rencana ini tertuang dalam Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2010 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2010-2014(1), telah ditetapkan bahwa salah satu keluaran kegiatan litbang nuklir dalam bidang energi adalah penyelesaian desain konseptual sistem konversi energi dan sistem keselamatan reaktor daya maju kogenerasi. Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2010 tersebut ditindak-lanjuti dengan rencana strategis BATAN 2010-2014 yang menegaskan bahwa keluaran pada tahun 2014 adalah diperolehnya desain konseptual reaktor riset inovatif, desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi serta evaluasi teknologi (Irianto, 2012)

RGTT merupakan salah satu energi pembangkit yang menggunakan bahan bakar nuklir. Reaktor ini dinilai memiliki nilai efisiensi yang cukup besar dibandingkan dengan jenis-jenis reaktor nuklir seperti reaktor air didih (*BWR*), reaktor air tekan (*PWR*) dan reaktor air berat (*HWR*). Selain itu, kelebihan dari reaktor ini antara lain memiliki nilai ekonomis paling murah dibandingkan lainnya (*BWR*, *PWR* dan *HWR*) serta tingkat keselamatan inheren yang tinggi dan bersih. Desain konseptual teras RGTT secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi termal total sistem energi nuklir serta dapat diandalkan sebagai salah satu solusi penurunan gas Karbondioksida global karena sebagai pembawa energi yang sangat efisien dan ramah lingkungan. Desain konseptual RGTT merupakan pengembangan desain konseptual reaktor kogenerasi dengan tingkat daya

menengah yang berpendingin gas Helium. Mekanisme pemuatan bahan bakar selama reaktor beroperasi berlangsung sebagai berikut: bahan bakar bola secara kontinu diambil dari bagian bawah tabung dengan laju pengambilan mencapai ribuan bola perhari, bola bahan bakar yang masih baik akan dimasukkan kembali ke dalam bejana reaktor dari bagian atas. Dengan demikian, seiring berlangsungnya operasi reaktor, posisi bola bahan bakar tidak statis tetapi bergerak secara perlahan dari atas bejana ke arah bawah bejana.

Dalam Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh M. Dhandang Purwadi tentang desain konseptual sistem reaktor daya maju kogenerasi berbasis RGTT dikatakan bahwa untuk desain konseptual sistem reaktor daya kogenerasi berbasis RGTT yang diberi nama RGTT 200K dengan distribusi peruntukan daya adalah, daya listrik 57,6 MW, daya termal untuk produksi hidrogen dan desalinasi 59,5 MW dan 81,9 MW. RGTT 200K dari hasil desain konseptual ini mempunyai efisiensi termal 29% dan faktor utilisasi energi 63,05%. (Purwadi, 2010)

Simulasi untuk RGTT 200K diperlukan untuk mempelajari fenomena fisis maupun kimiawi yang diakibatkan oleh reaktor ini. Dengan simulasi, ini dapat menjadi salah satu cara menanggulangi kemungkinan-kemungkinan terbesar yang timbul dari reaktor ini. Selain itu dengan adanya simulasi ini dan kajian lebih mendalam tentang RGTT 200K dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam perencanaan pembangunan RGTT yang secara langsung diawasi oleh IAEA.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Dari latar belakang yang telah dijelaskan maka rumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana konfigurasi posisi teras dan bahan bakar *Pebble* ( $UO_2$ ) yang terdapat pada reaktor RGTT 200K BATAN?
2. Berapa temperatur paling optimal pada bagian dalam teras yang dapat dihasilkan dalam reaktor RGTT 200K BATAN?
3. Bagaimana mensimulasikan kondisi dalam reaktor RGTT 200K BATAN dalam program VSOP 94?

### 1.3 Tujuan

1. Untuk mengetahui konfigurasi posisi teras dan bahan bakar *Pebble* ( $UO_2$ ) yang terdapat pada reaktor RGTT 200K melalui simulasi menggunakan program VSOP 94.
2. Untuk mengetahui titik-titik kritis temperatur sehingga dapat menjadi acuan keselamatan reaktor RGTT 200K.
3. Mengetahui hasil simulasi dengan menggunakan program VSOP 94.

### 1.4 Manfaat

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan baik sistem di dalamnya maupun hal-hal yang berkenaan dengan keselamatan reaktor, terlebih dapat menjadi suatu pertimbangan dalam membangun reaktor nuklir untuk jenis RGTT.

### 1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus pada jenis reaktor yang sedang dipelajari di Indonesia yaitu untuk reaktor nuklir jenis RGTT 200K dengan keluaran daya sebesar 200 MW dan besar temperatur *inlet* 600 C serta pada kondisi tunak

(*steady state*). Selain itu, program yang digunakan hanya akan terfokus menggunakan VSOP 94 yang berbasis bahasa Fortran.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Reaksi dan Energi Inti

Reaksi nuklir adalah sebuah proses dimana dua *nuklei* atau partikel nuklir bertabrakan. Untuk memproduksi hasil yang berbeda dari produk awal pada prinsipnya semua reaksi dapat melibatkan lebih dari dua partikel yang bertabrakan, tetapi kejadian ini sangat jarang. Bila partikel-partikel tersebut bertabrakan dan berpisah tanpa berubah (kecuali mungkin dalam level energi), proses ini disebut tabrakan dan bukan sebuah reaksi.

Reaksi nuklir pertama kali ditemukan oleh Otto Hanh dan Fritz Strasmann pada tahun 1938. Mereka melakukan penelitian di Institut Kaisar Wilhelm, Jerman dengan cara menembaki unsur Uranium-235 (U-235) dengan partikel neutron ( $n$ ) yang bergerak sangat lambat. Karena gerakannya yang sangat lambat inilah maka neutron ini disebut neutron termik. Dari hasil penembakan tersebut mereka mendapatkan bahwa:

1. Inti atom Uranium pecah menjadi inti-inti atom yang lebih kecil.
2. Dipancarkan dua hingga tiga buah partikel neutron baru yang bergerak cepat, sehingga neutron ini disebut neutron cepat.
3. Dilepaskan energi panas sebesar 200 Mega elektron Volt (MeV)

Inti dari suatu atom tersusun atas proton dengan massa  $1,67482 \times 10^{-27}$  Kg dan neutron dengan massa  $1,67252 \times 10^{-27}$  Kg. Dua jenis partikel penyusun inti ini disebut *nukleon*. Proton bermuatan listrik satu muatan elementer ( $1,6 \times 10^{-19}$  Coloumb). Karena neutron tidak bermuatan listrik, maka secara keseluruhan inti

atom bermuatan listrik positif. Muatan listrik positif dalam inti ini selalu diimbangi oleh muatan listrik negatif dari elektron pada kulit atom yang besarnya satu muatan elementer sama dengan muatan proton. Karena jumlah proton dalam inti dan jumlah elektron pada kulit atom selalu sama, maka dalam keadaan normal atom-atom tidak bermuatan listrik.

Ada dua macam reaksi nuklir yang hingga kini dikenal oleh manusia, yaitu:

1. **Reaksi fisi atau pembelahan inti.** Dalam reaksi fisi, inti atom pecah menjadi inti-inti lebih kecil. Reaksi nuklir jenis fisi ini dapat terjadi di dalam teras reaktor nuklir atau pada ledakan bom nuklir.
2. **Reaksi fusi atau penggabungan inti.** Dalam reaksi fusi, inti-inti atom bergabung menjadi satu membentuk inti atom yang lebih besar. Reaksi nuklir jenis fusi ini dapat terjadi pada matahari atau bintang-bintang di angkasa dan ledakan bom Hidrogen. Perlu diketahui, bahwa baik matahari maupun bintang mampu memancarkan energi terus-menerus karena di dalam matahari dan bintang tersebut terjadi reaksi fusi berupa penggabungan inti-inti atom hidrogen disertai dengan pelepasan energi yang luar biasa besarnya. Reaksi fusi merupakan satu-satunya sumber energi bagi matahari dan bintang-bintang.

Pada saat terjadi reaksi fisi maupun reaksi fusi selalu disertai dengan pelepasan sejumlah energi berupa panas. Meskipun dalam reaksi nuklir berlaku hukum kekekalan nomor massa, dimana jumlah nomor massa inti-inti sebelum dan sesudah reaksi nuklir selalu sama, namun total massa inti atom setelah reaksi

selalu lebih kecil dibandingkan total massa inti atom sebelum reaksi. Perbedaan massa inti sebelum dan setelah reaksi nuklir disebabkan oleh berubahnya sebagian massa inti menjadi energi. Oleh Albert Einstein, besarnya energi yang dilepaskan inti atom dirumuskan sebagai berikut:

$$E = m \cdot c^2 \quad (2.1)$$

Dengan :

E = Energi dalam joule (J)

M = Massa inti yang berubah menjadi energi (kg)

c = Kecepatan cahaya (300.000.000 m/s)

Inti atom ternyata menyimpan tenaga yang luar biasa besarnya. Berikut ini diberikan contoh perhitungan untuk mendapatkan gambaran tentang besarnya energi yang dilepaskan oleh reaksi nuklir. Semisal untuk satu gram Uranium, jika semua bahan ini melakukan reaksi nuklir, maka dari bahan sekecil ini akan dihasilkan energi yang luar biasa besarnya. Untuk mendapatkan gambaran tentang besarnya energi yang tersimpan dalam suatu inti atom ini bisa digambarkan sebagai berikut:

- Dalam satu gram U-235 terdapat  $25,6 \times 10^{20}$  atom U-235
- Karena setiap atom U-235 melakukan reaksi fisi melepaskan energi sebesar 200 MeV, maka untuk satu gram U-235 dapat melepaskan energi sebesar  $51,2 \times 10^{22}$  MeV.
- Jika energi tersebut dinyatakan dalam satuan joule, Maka energi yang dilepaskan tersebut sebesar:  $81,92 \times 10^9$  joule.

- Dengan menganggap hanya 30 persen dari energi yang dilepaskan pada proses fisi dapat diubah menjadi energi listrik, maka satu gram U-235 dapat menghasilkan energi listrik sebesar  $24,58 \times 10^9$  joule.
- Karena 1 joule = 1 watt detik, maka peralatan elektronik (misal pesawat televisi) dengan daya 100 watt dapat dipenuhi kebutuhan listriknya oleh satu gram U-235 selama  $24,58 \times 10^7$  detik atau selama 7,78 tahun terus menerus tanpa dimatikan.

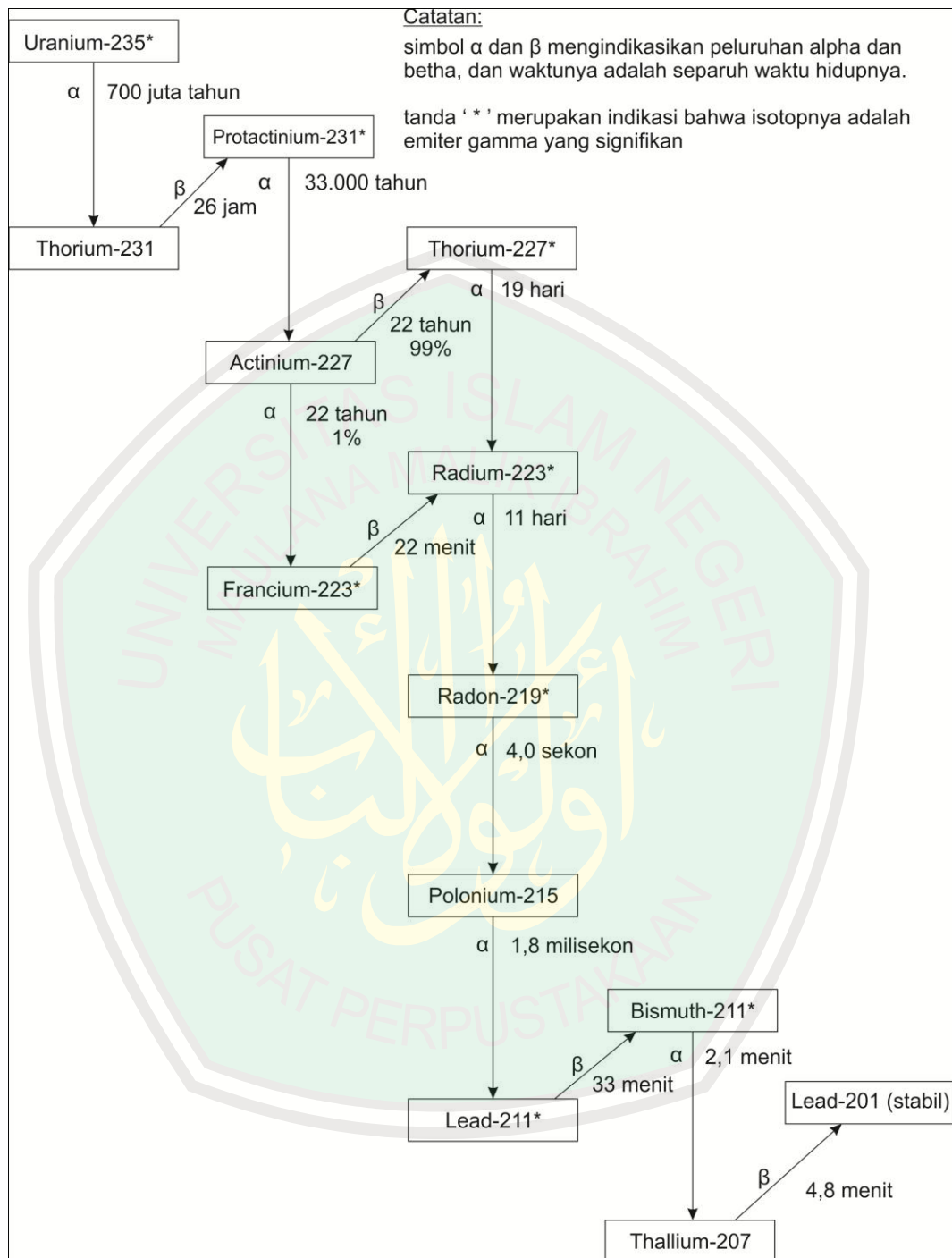
Secara garis besar reaksi fisi dapat dijelaskan sebagai berikut:



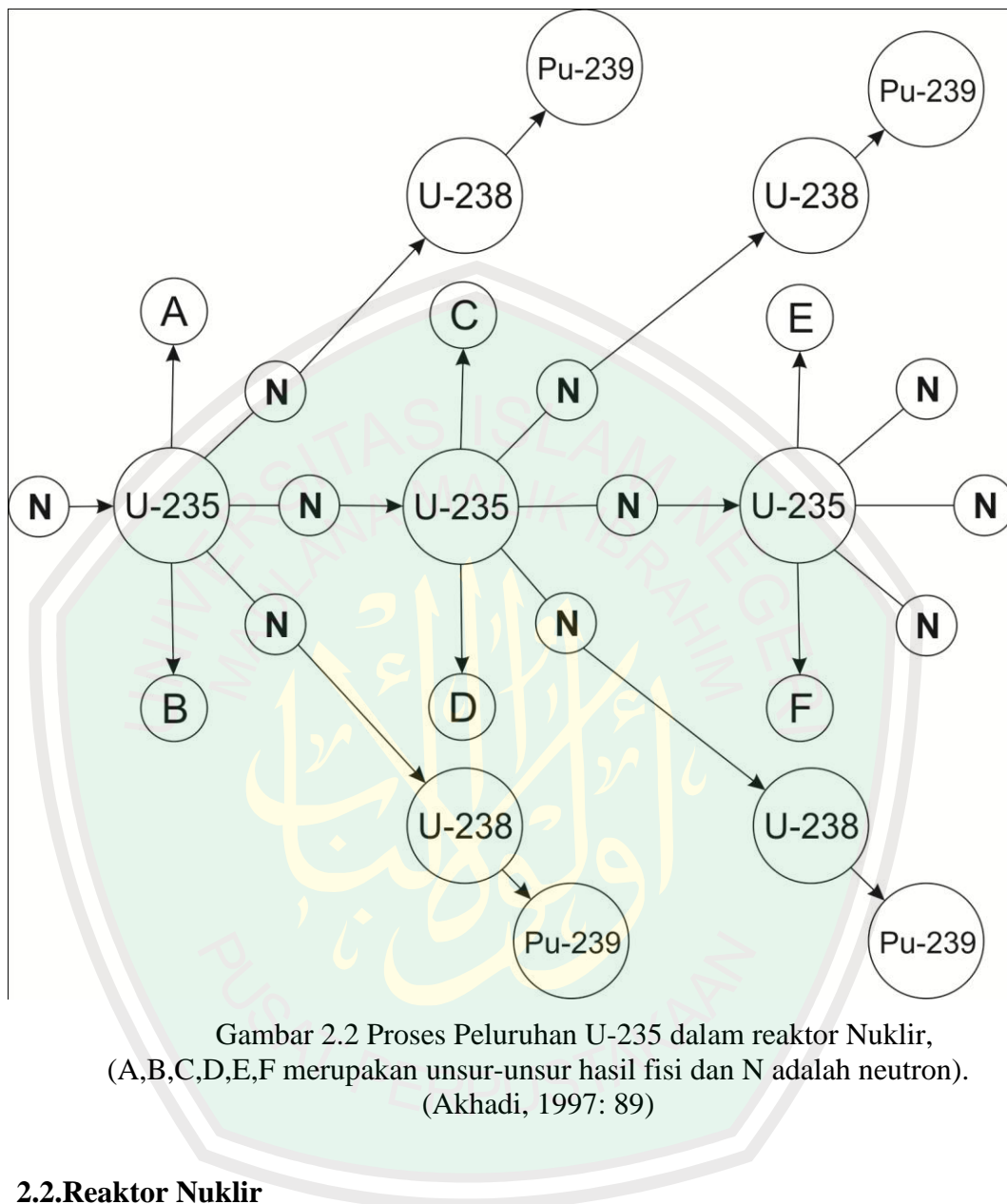
Notasi pada reaksi tersebut adalah:

- X = Atom sasaran yang merupakan unsur berat yang membelah sehingga sering disebut dengan bahan fisil, atau secara populer disebut dengan “bahan bakar”, karena dari reaksi inti tersebut akan dihasilkan energi (E).
- n = Neutron penembak yang semula hanya 1, setelah reaksi inti menjadi 2 atau 3 neutron baru.
- X<sub>1,2</sub> = Radionuklida (unsur radioaktif) baru yang merupakan hasil dari reaksi fisi.
- E = Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi atau secara umum disebut sebagai energi nuklir.

Berikut adalah gambaran peluruhan alami pada Uranium 235 yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Peluruhan alami pada Uranium 235 (Anonymous, 2014)



Gambar 2.2 Proses Peluruhan U-235 dalam reaktor Nuklir, (A,B,C,D,E,F merupakan unsur-unsur hasil fisi dan N adalah neutron). (Akhadi, 1997: 89)

## 2.2.Reaktor Nuklir

Dilihat dari sifat reaksi berantai yang terjadi, reaksi nuklir dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Reaksi nuklir terkendali, yaitu reaksi nuklir dimana jumlah atom yang melakukan reaksi dan jumlah panas yang dilepaskan dapat diatur atau dikendalikan sesuai kebutuhan. Reaksi nuklir terkendali ini hanya dapat terjadi di dalam teras reaktor nuklir.

2. Reaksi nuklir tak terkendali, yaitu reaksi nuklir dimana jumlah atom yang melakukan reaksi beserta panas yang dilepaskannya selalu meningkat. Reaksi jenis ini dapat ditemukan pada saat terjadinya ledakan bom nuklir untuk jenis reaksi fisi dan ledakan bom Hidrogen untuk jenis reaksi fusi. Reaksi nuklir yang terjadi sengaja tidak dikendalikan agar dilepaskan panas yang luar biasa besarnya, sehingga dihasilkan daya rusak yang besar pula.

Secara garis besar, komponen dalam reaktor nuklir jenis fisi dapat dibagi menjadi dua, yaitu komponen fisi dan komponen nonfisi. Satu-satunya komponen fisi adalah bahan bakar nuklir yang dapat melakukan reaksi fisi berantai dalam teras reaktor nuklir. Sedangkan komponen bukan fisi adalah komponen yang tidak dapat melakukan reaksi fisi, namun keberadaannya dalam teras reaktor nuklir sangat diperlukan untuk menunjang berlangsungnya reaksi nuklir berantai.

Komponen-komponen bukan fisi beserta fungsi masing-masing komponen tersebut adalah sebagai berikut:

1. Bahan Pendingin

Bahan pendingin digunakan untuk mengalirkan atau memindahkan panas hasil fisi dari dalam teras menuju ke luar teras reaktor. Bahan pendingin digunakan juga untuk mendinginkan komponen-komponen reaktor lainnya, sehingga reaktor tetap dapat beroperasi dengan aman. Ada beberapa jenis bahan pendingin yang digunakan dalam reaktor nuklir, seperti air ringan ( $H_2O$ ), air berat ( $D_2O$ ), gas Helium,  $CO_2$ , dan sebagainya. Air ringan merupakan bahan pendingin yang paling banyak digunakan oleh beberapa tipe reaktor yang beroperasi saat ini.

## 2. Bahan moderator dan pemantul

Proses fisi bahan bakar nuklir melepaskan neutron cepat dengan energi geraknya lebih besar dari 2 MeV, sedangkan neutron yang diperlukan untuk melakukan proses fisi berikutnya dalam reaktor jenis termal adalah neutron lambat dengan energi geraknya hanya 0,025 eV. Bahan moderator digunakan untuk memperlambat gerakan neutron cepat agar berubah menjadi neutron lambat, sehingga dapat digunakan untuk melangsungkan reaksi fisi berikutnya. Untuk jenis reaktor yang menggunakan pendingin air (baik air ringan ataupun air berat), bahan pendingin ini juga berperan sebagai moderator.

Bahan pemantul digunakan untuk memantulkan kembali neutron yang akan keluar, sehingga jumlah neutron yang hilang dapat diperkecil. Pada umumnya bahan yang baik untuk moderator, baik pula digunakan sebagai bahan pemantul neutron. Bahan pemantul ini biasanya hanya digunakan untuk reaktor penelitian karena reaktor ini memanfaatkan neutron untuk kegiatan penelitian.

## 3. Kelongsong bahan bakar

Fungsi utama dari bahan kelongsong ini adalah untuk mengungkung unsur-unsur hasil fisi sehingga unsur tersebut tidak akan terlarut dalam bahan pendingin yang keluar dari teras reaktor. Perlu diketahui, bahwa unsur-unsur hasil fisi ini bersifat radioaktif, sehingga mampu memancarkan radiasi yang berbahaya bagi manusia maupun lingkungan. Dengan memasukkan bahan bakar ke dalam kelongsong yang kuat maka keluarnya unsur-unsur radioaktif hasil fisi tersebut dapat dihindari, sehingga aman bagi manusia maupun lingkungan.

Bahan kelongsong umumnya terbuat dari Aluminium, Zirkonium, Berilium, Magnesium, Grafit, dan Baja tahan karat. Untuk memperbaiki sifat-sifat mekanik bahan kelongsong sehingga dapat diandalkan sebagai pengungku unsur-unsur hasil fisi, seringkali bahan-bahan ini dibuat dalam bentuk alias dengan menambahkan logam-logam tertentu, seperti Kromium, Nikel, Besi, dan lain-lain dalam jumlah tertentu. Penambahan Kromium dimaksudkan untuk mempertinggi ketahanan terhadap korosi karena Kromium dapat membentuk lapisan pelindung  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  yang menempel keras pada permukaan kelongsong. Lapisan tersebut melindungi kelongsong dari karat. Penambahan nikel dimaksudkan untuk mempertinggi keliatan (*ductile*) bahan kelongsong.

#### 4. Batang kendali

Batang kendali berfungsi menyerap sebagian neutron apabila terjadi pertumbuhan neutron yang berlebihan. Dengan cara ini, maka reaksi nuklir yang terjadi dalam teras reaktor tetap terkontrol. Dengan melakukan penyerapan kelebihan neutron dalam teras reaktor, maka jumlah bahan bakar yang melakukan reaksi nuklir dapat diatur, sehingga tidak dilepaskan panas secara berlebihan.

#### 5. Tangki reaktor

Tangki reaktor merupakan tempat atau wadah dari semua komponen reaktor. Tangki reaktor ini berbentuk tangki seperti yang biasa dikenal namun ukurannya sangat besar dan terbuat dari baja tahan karat. Pada bagian bawah tangki terpasang inti reaktor, yaitu tempat berlangsungnya reaksi fisi bahan bakar nuklir. Untuk meningkatkan keamanan operasi reaktor nuklir, tangki reaktor ini masih diperkuat oleh bangunan beton berat dengan ketebalan 1-2 meter.

## 6. Penahan radiasi

Setiap berlangsungnya reaksi nuklir selalu disertai dengan pancaran radiasi dan panas. Bahan penahan radiasi ini berfungsi untuk menahan radiasi dari dalam inti reaktor, sehingga para pekerja tetap terlindung dari bahaya radiasi ini. Radiasi dari dalam inti reaktor dapat berupa radiasi gama dan neutron. Dinding penyangga reaktor yang terbuat dari beton berat dengan ketebalan tertentu dapat berperan sebagai penahan radiasi gama, neutron sekaligus penahan panas dari dalam teras reaktor.

### 2.3. Jenis-jenis PLTN

Dewasa ini ada berbagai jenis PLTN yang beroperasi. Sebagian besar reaktor daya yang dioperasikan dalam PLTN tersebut adalah jenis LWR atau reaktor air ringan. Reaktor ini terdiri dari jenis PWR atau reaktor air tekan (52 persen) dan BWR atau Reaktor air didih (21,5 persen), sedangkan sisanya (26,5 persen) terdiri dari berbagai tipe. Berikut ini akan dibahas jenis-jenis PLTN yang saat ini beroperasi.

#### 1. Reaktor air didih (BWR, *Boiling Water Reactor*)

Reaktor Air didih merupakan reaktor yang menggunakan air sebagai pendingin sekaligus sebagai moderator. Pada reaktor tipe ini panas hasil fisi digunakan secara langsung untuk menguapkan air pendingin dan uap yang terbentuk digunakan untuk memutar turbin. Setelah melalui turbin, uap tersebut akan mengalami proses pendinginan sehingga berubah menjadi air yang langsung dialirkan ke teras reaktor untuk diuapkan lagi dan seterusnya. Sistem kerja dari

reaktor ini terlihat cukup sederhana. Dalam reaktor ini digunakan bahan bakar Uranium diperkaya dengan tingkat 3-4 persen dalam bentuk  $UO_2$ .

## 2. Reaktor air tekan (PWR, *Pressurized Water Reactor*)

Reaktor tipe ini juga menggunakan air sebagai pendingin sekaligus moderator. Bedanya dengan reaktor air didih adalah pada reaktor air tekan digunakan dua macam pendingin, yaitu air pendingin primer dan air pendingin sekunder.

Panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi digunakan untuk memanaskan air pendingin primer. Dalam sistem pendingin primer ini juga dilengkapi dengan alat pengontrol tekanan yang digunakan untuk mempertahankan tekanan pada sistem pendingin primer. Tekanan pada sistem pendingin primer dipertahankan pada harga 150 atmosfer untuk mempertahankan agar air pendingin primer ini tidak mendidih pada suhu kurang lebih 300 derajat Celcius. Pada tekanan udara normal, air akan mendidih dan menguap pada suhu 100 derajat Celcius.

Air pendingin primer selanjutnya dialirkan ke sistem pembangkit uap, sehingga terjadi pertukaran panas antara sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Perlu diketahui, bahwa antara pendingin primer dan pendingin sekunder hanya terjadi pertukaran panas saja tanpa terjadi pencampuran, karena antara pendingin primer dan pendingin sekunder dipisahkan oleh pipa. Pertukaran panas ini menyebabkan air pendingin sekunder mendidih dan menguap. Tekanan pada sistem pendingin sekunder dibuat sama dengan tekanan udara normal, sehingga air pendingin sekunder tersebut dapat mendidih

dan menguap pada suhu 100 derajat Celcius. Uap air yang terbentuk dalam sistem pembangkit uap selanjutnya digunakan untuk memutar turbin.

Dari reaktor ini terlihat, bahwa sistem kerja dari reaktor air tekan lebih rumit dibandingkan dengan sistem kerja reaktor air didih. Namun, jika dilihat dari sistem keselamatannya reaktor air tekan lebih aman dibandingkan dengan reaktor air didih. Pada reaktor air tekan perputaran air pendingin primernya benar-benar tertutup, sehingga jika ada kebocoran bahan radioaktif dari kelongsong bahan bakar, maka kebocoran tersebut tidak akan mengakibatkan terjadinya kontaminasi (pengotoran) radioaktif pada turbin. Sedangkan pada reaktor air didih, kebocoran bahan radioaktif yang terlarut dalam air pendingin dapat menyebabkan terjadinya kontaminasi pada turbin.

### 3. Reaktor air berat (HWR, *Heavy Water Reactor*)

Reaktor air berat merupakan jenis reaktor yang menggunakan air berat ( $D_2O$ ) sebagai moderator sekaligus pendingin. Karena penyerapan air berat terhadap neutron hasil fisi sangat kecil, maka dalam reaktor ini memungkinkan digunakannya Uranium alam. Reaktor jenis air berat yang paling terkenal adalah CANDU (*Canadian Deutrium Uranium Reactor*). Reaktor jenis ini pertama kali dikembangkan oleh Kanada.

Seperti halnya pada reaktor air tekan, reaktor CANDU juga memiliki sistem pendingin primer dan sekunder, pembangkit uap dan pengontrol tekanan untuk mempertahankan tekanan tinggi di dalam sistem pendingin primer agar tidak mendidih. Air berat dalam reaktor CANDU hanya digunakan sebagai sistem pendingin primer, sedangkan sistem pendingin sekundernya digunakan air biasa.

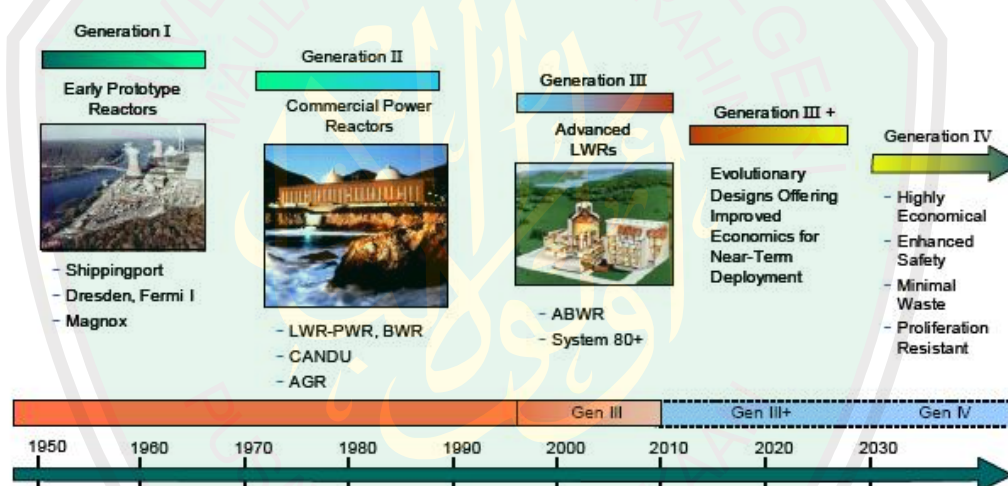
Reaktor jenis ini menggunakan bahan bakar dalam bentuk logam-logam Uranium atau paduannya yang dimasukkan ke dalam kelongsong paduan Magnesium, sehingga reaktor ini dijuluki *Magnox Reactor*. Termasuk dalam reaktor jenis ini adalah reaktor penelitian pertama di dunia yang dibangun ahli fisika Enrico Fermi di Universitas Chicago, Amerika Serikat. Reaktor Magnox menggunakan CO<sub>2</sub> sebagai pendingin, Grafit sebagai moderator dan Uranium alam sebagai bahan bakar. Reaktor ini dikembangkan dan banyak dioperasikan oleh Inggris.

#### 4. Reaktor Maju Berpendingin Gas (AGR, *Advanced Gas-Cooled Reactor*)

Reaktor jenis ini dibangun di Inggris dan dikembangkan serta merupakan penyempurnaan dari Reaktor Magnox. Dalam reaktor jenis AGR digunakan CO<sub>2</sub> sebagai pendingin, Grafit sebagai moderator dan Uranium sedikit diperkaya sebagai bahan bakarnya. Pengayaan sedikit pada bahan bakar Uranium dimaksudkan untuk memperoleh efisiensi termal, rapat daya, dan fraksi bahan bakar yang lebih tinggi. Batang bahan bakarnya dibungkus menggunakan kelongsong yang terbuat dari baja tahan karat.

Dalam generasinya reaktor pembangkit energi nuklir dapat dikelompokkan menjadi beberapa generasi. Reaktor generasi I adalah reaktor prototipe jenis pertama yang dibangun pada tahun 1950an hingga 1960an. Reaktor generasi kedua dibangun pada tahun 1970an dalam bentuk instalasi pembangkit daya komersial dan masih beroperasi hingga saat ini. Reaktor generasi III adalah reaktor yang dibangun pada tahun 1990an yang telah mengalami beberapa perbaikan desain yang memberikan nilai keselamatan dan

nilai ekonomi yang lebih baik. Reaktor generasi III lanjut adalah reaktor generasi III yang telah menerapkan beberapa pengembangan yang saat ini sedang dibangun di beberapa negara. Instalasi instalasi nuklir baru yang saat ini tengah dibangun dan yang direncanakan dibangun pada tahun 2030 dipilih berbasis reaktor jenis ini. Mulai tahun 2030 direncanakan pembangunan reaktor nuklir yang lebih inovatif berdasarkan hasil riset dan pengembangan yang lebih maju dari aspek sistem energi nuklir, yang disebut sebagai reaktor generasi IV.



Gambar 2.3 Evolusi generasi reaktor (Goldberg, 2011:4)

## 2.4.RGTT200K

HTGR (*High Temperatur Gas Reactor*) merupakan salah satu sistem pembangkit energi yang menggunakan bahan bakar nuklir. HTGR biasa disebut juga dengan nama RGTT (Reaktor Gas Temperatur Tinggi). Reaktor ini termasuk dalam reaktor generasi ke IV. Reaktor ini dinilai memiliki nilai efisiensi yang cukup besar dibandingkan dengan jenis-jenis reaktor nuklir lainnya. Selain itu

kelebihan dari reaktor ini antara lain memiliki nilai ekonomis paling murah dibandingkan lainnya serta tingkat keselamatan inheren yang tinggi dan bersih. Desain konseptual teras RGTT secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi termal total sistem energi nuklir serta dapat diandalkan sebagai salah satu solusi penurunan gas Karbondioksida global karena sebagai pembawa energi yang sangat efisien dan ramah lingkungan. Desain konseptual RGTT merupakan pengembangan desain konseptual reaktor kogenerasi dengan tingkat daya menengah yang berpendingin gas Helium. Mekanisme pemuatan bahan bakar selama reaktor beroperasi berlangsung sebagai berikut: bahan bakar bola secara kontinu diambil dari bagian bawah tabung dengan laju pengambilan mencapai ribuan bola perhari, bola bahan bakar yang masih baik akan dimasukkan kembali ke dalam bejana reaktor dari bagian atas. Dengan demikian, seiring berlangsungnya operasi reaktor, posisi bola bahan bakar tidak statis tetapi bergerak secara perlahan dari atas bejana ke arah bawah bejana.

Reaktor berpendingin gas temperatur tinggi RGTT 200K adalah reaktor yang sedang dikembangkan BATAN dalam bentuk konseptual desain dengan daya 200MWt. Reaktor ini akan dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik dan pemanfaatan panas untuk industri. RGTT 200K merupakan reaktor dengan moderator Grafit, berpendingin Helium. Untuk mengubah panas yang dibangkitkan oleh fisi nuklir menjadi energi listrik, digunakan siklus gas langsung atau tak-langsung dengan model siklus Brayton Helium. Kecelakaan reaktor Fukushima menjadikan reaktor gas temperatur tinggi seperti RGTT200K menarik untuk dipilih sebagai pembangkit energi, karena dipandang memiliki keselamatan

melekat akibat fitur material yang digunakan, pengungkungan bahan bakar dalam lapisan ganda, panas inersia moderator Grafit, efisiensi termal tinggi, serta siklus bahan bakar yang fleksibel dengan kemampuan untuk mencapai tingkat derajat bakar (*burn-up*) tinggi.

Partikel yang digunakan didesain dengan model bahan bakar berlapis dalam konseptual teras reaktor maju dengan daur bahan bakar Uranium-Thorium memiliki komposisi *kernel* ( $\text{UO}_2$ ) pada berbagai pengkayaan yang dilapisi oleh penyangga Karbon berpori (*Porous Carbon Buffer, C*), Pyro Karbon bagian dalam (*Inner Pyrolytic Carbon, IpyC*), Silikon Karbida ( $\text{SiC}$ ), dan Pyro Karbon bagian luar (*Outer Pyrolytic Carbon, OpyC*).

Spesifikasi teknis bahan bakar partikel berlapis  $\text{UO}_2$  untuk RGTT 200K ditunjukkan pada tabel 2.1. Setiap lapisan partikel TRISO memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar, salah satu diantaranya adalah mencegah kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metal dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Partikel berlapis tersebar dalam matrik Grafit dan terdistribusi secara acak dalam sel bahan bakar *Pebble*.

Dalam sebuah bahan bakar *Pebble* terdapat puluhan ribu partikel berlapis TRISO. Skematik bahan bakar partikel berlapis TRISO desain konseptual RGTT ditunjukkan pada gambar 2.4 .

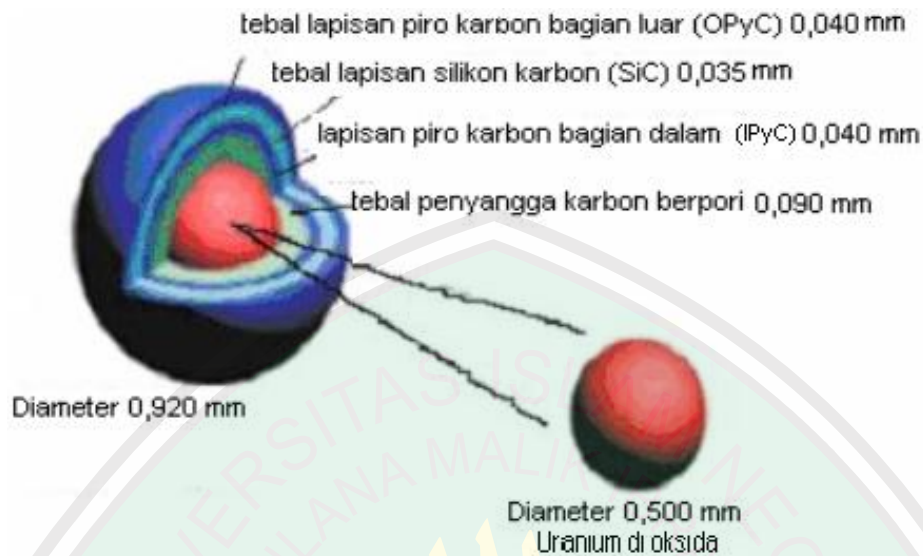
RGTT merupakan jenis reaktor *Pebble* (bola) berpendingin gas Helium. Salah satu jenis RGTT yang dipelajari di Indonesia adalah RGTT 200K, Temperatur rerata *inlet* gas Helium ke teras reaktor pada reaktor ini adalah 600 C sedangkan temperatur rerata *outlet*nya adalah 950 C. RGTT 200K mempunyai

diameter teras sebesar 3 m sedangkan tingginya 9,43 m. Reflektor terbuat dari Grafit yang terdistribusi pada bagian atas, bagian bawah dan bagian radial teras reaktor. Pengungkuang terluar reaktor terbuat dari *Brick Carbon*. Daya yang dihasilkan sebesar 200MWt.

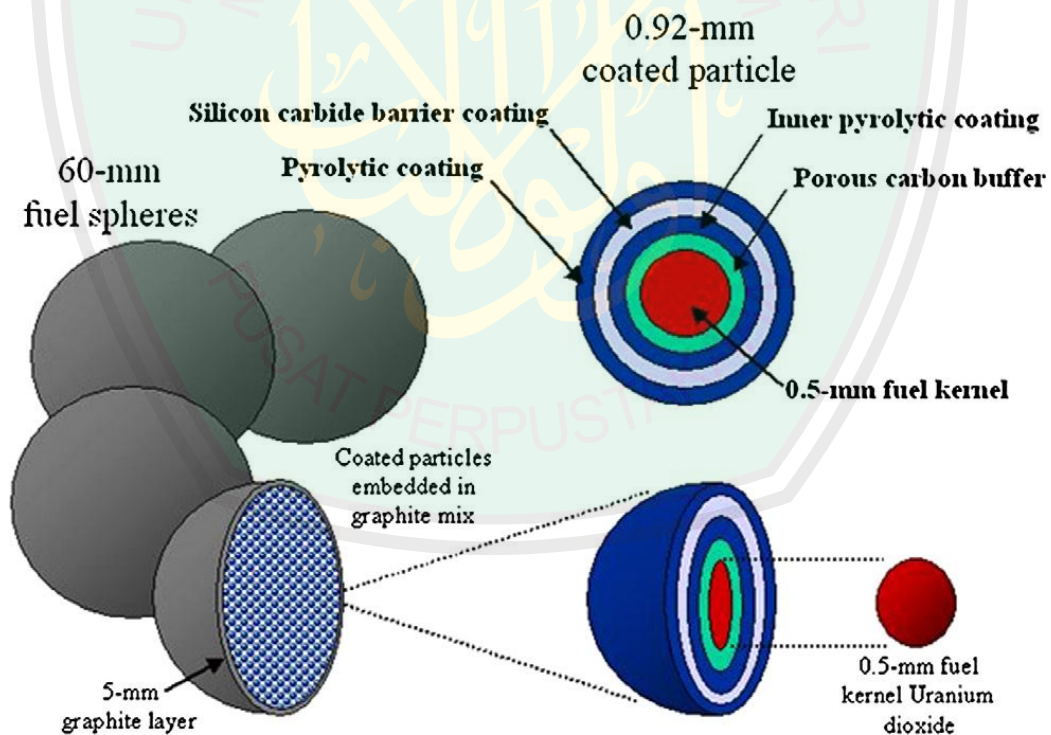
Tabel 2.1 Spesifikasi Teknis Bahan Bakar Partikel Berlapis RGTT (Fauzia, 2012)

<b>TIPE KERNEL</b>		<b>(UO<sub>2</sub>)</b>
Radius <i>Kernel</i> , cm	0,025	
<i>Enrichment</i> , % (U-235)	10	
Densitas <i>Kernel</i> , gr/cc	10,40	
<b>LAPISAN TRISO</b>		<b>Densitas (gr/cc)</b>
	Diameter dari dalam kernel ke luar (cm)/tebal (cm)	
Lapisan penyangga Karbon berpori ( <i>buffer</i> )	0,0345/0,0095	1,05
Lapisan dalam Pyro Karbon (IpyC)	0,0385/0,0040	1,90
Lapisan Silikon Karbida (SiC)	0,0420/0,0035	3,18
Lapisan luar Pyro Karbon (OpyC)	0,0460/0,0040	1,90
<b>PEBBLE BED</b>		
Diameter bola <i>Pebble</i> , cm	6,00	
Diameter zona aktif bahan bakar, cm	5,00	
Tebal matriks Grafit <i>outer shell</i> , cm	0,50	
Densitas matrik Grafit <i>outer shell</i> , gr/cc	1,75	

Teras RGTT 200K terisi dengan bola-bola bahan bakar yang berdiameter 3 cm. Sedangkan radius dalamnya adalah 2,5 cm. Jumlah bola-bola bahan bakar (*Pebble*) dalam teras RGTT 200K sekitar 360.000 bola. Pada setiap bola-bola *Pebble*, di dalam radius dalamnya terdapat partikel-partikel *TRISO* yang mengandung bahan bakar UO<sub>2</sub>.



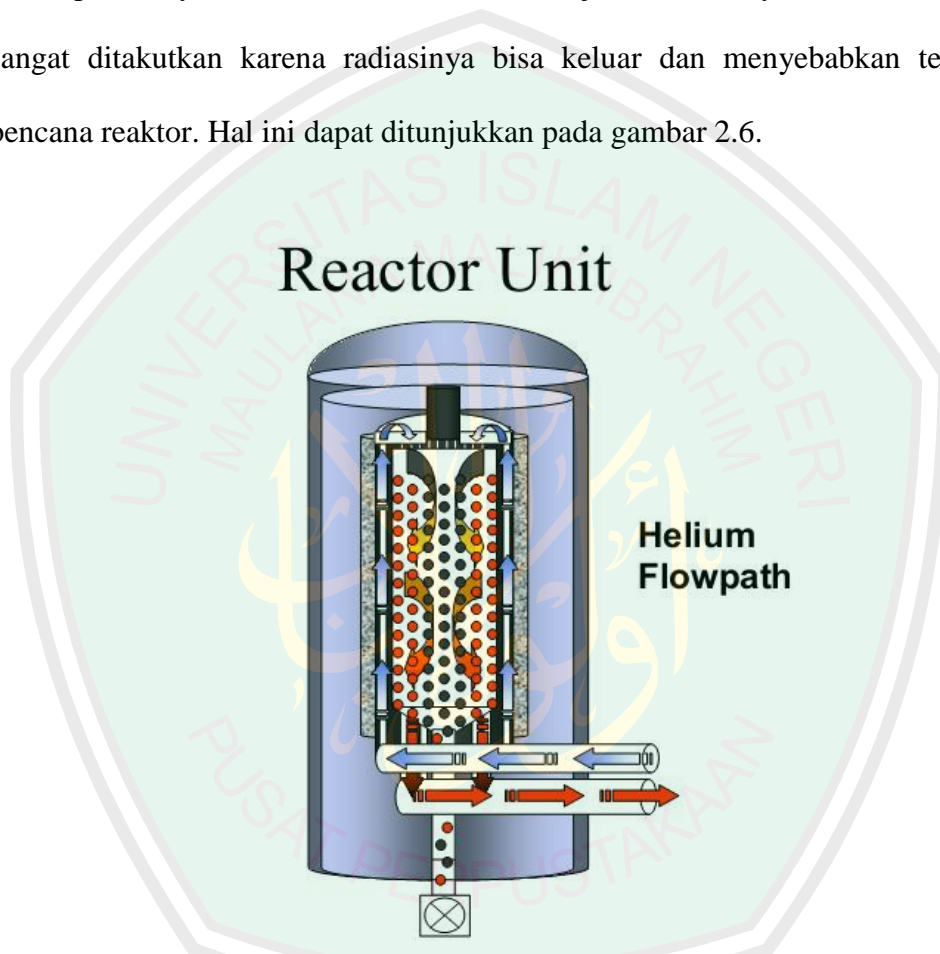
Gambar 2.4 Desain Bahan Bakar RGTT (Al-Qodri, 2013: 6)



Gambar 2.5 Gambaran Bahan Bakar *Pebble Bed* (Al-Qodri, 2013: 7)

Didalam *Pebble bed* terdapat 13.000 bola-bola *TRISO* yang disusun secara acak seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5. Sedangkan pada reaktor dimasukkan 360.000 *Pebble*. Setelah bola dimasukkan maka akan terdapat

pendingin reaktor berupa gas Helium agar terdapat sirkulasi perpindahan panas sehingga tidak melebihi panas yang diperbolehkan. Ketika panas yang diberikan melebihi, maka di dalam reaktor akan terjadi reaksi beruntun yang tak terkendali dan dapat menyebabkan reaktor ini bocor. Kejadian bocornya reaktor inilah yang sangat ditakutkan karena radiasinya bisa keluar dan menyebabkan terjadinya bencana reaktor. Hal ini dapat ditunjukkan pada gambar 2.6.



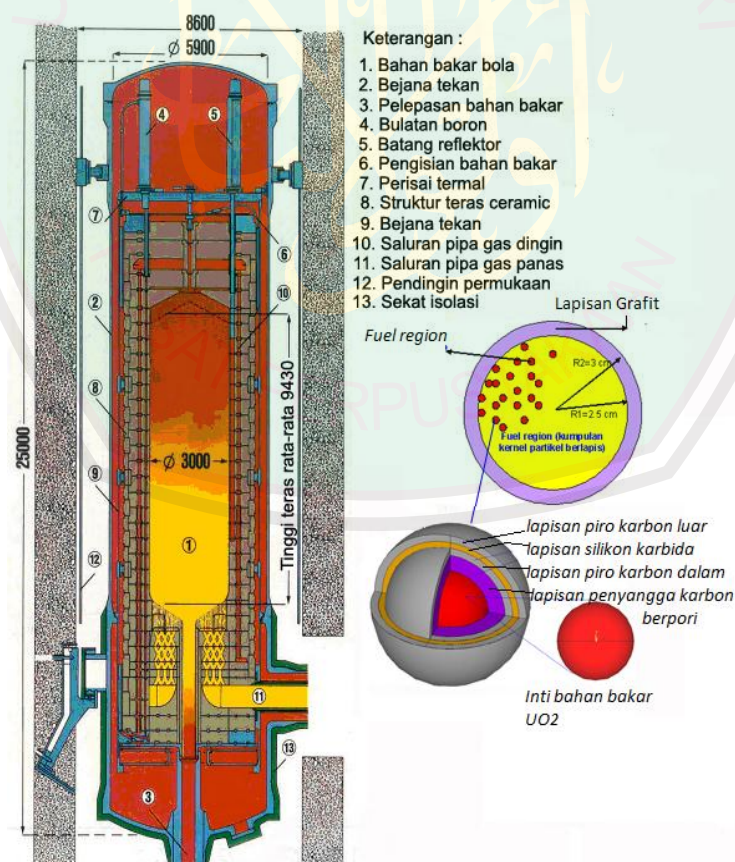
Gambar 2.6 Aliran Pendingin Helium (anonymous, 2013)

Gas Helium dialirkan dari atas reaktor dan di keluarkan melalui reaktor bagian bawah. Gas Helium ini masuk melalui celah-celah antar *Pebble* yang terdapat dalam reaktor, ketika reaktor ini berfungsi maka di dalamnya akan terjadi reaksi fisi yang menyebabkan panas. Panas ini dikendalikan dengan memberikan pendingin berupa gas Helium. Gas Helium yang masuk memiliki suhu tertentu biasa disebut dengan temperatur *inlet*, sedangkan suhu saat gas Helium keluar dari

reaktor disebut dengan temperatur *outlet*. Dari temperatur *outlet* inilah yang dimanfaatkan untuk beberapa hal seperti untuk pemanasan air untuk PLTN berbasis Kogenerasi, untuk desalinasi air laut, untuk produksi gas Hidrogen. Kogenerasi adalah proses dimana pendingin Helium akan memindahkan panas yang dibangkitkan reaksi fisi di dalam teras reaktor dari sistem primer ke pembangkit uap, untuk selanjutnya akan dimanfaatkan panasnya secara bertingkat sesuai derajat temperatur yang diperlukan. Setelah itu Helium tersebut akan dimasukkan ke dalam pendingin dan selanjutnya akan dialirkan kembali ke dalam reaktor. Siklus ini biasa disebut dengan siklus Brayton.

Siklus Brayton adalah siklus termodinamika mesin panas (*heat engine*) dengan medium kerja gas. Gas yang digunakan dapat berupa udara biasa, Karbondioksida ataupun Helium. Siklus *Brayton-Turbin gas* yang aktual mempunyai empat proses utama, yaitu proses kompresi adiabatik (*adiabatic compression*), pemanasan mendekati isobarik (*isobaric heat addition*), ekspansi adiabatik (*adiabatic expansion*) dan pembuangan panas mendekati isobarik (*isobaric heat rejection*). Proses kompresi dilakukan dengan kompresor gas, proses penambahan panas (pemanasan) dilakukan dengan pembakaran bahan bakar atau dalam SEN dilakukan dengan reaktor nuklir. Selanjutnya proses ekspansi untuk menghasilkan usaha dilakukan dengan turbin gas, dan proses pengambilan panas dilakukan dengan alat penukar kalor (*heat exchanger, HE*). Usaha atau daya yang dihasilkan oleh turbin digunakan untuk memutar kompresor dan generator listrik.

Dalam pembangkit uap panas akan diserap oleh sistem uap air umpan di dalam sistem sekunder dan uap yang dihasilkan dialirkan ke turbin. Proses fisi di dalam teras reaktor mampu memanaskan gas Helium hingga mencapai temperatur  $950^{\circ}\text{C}$  dengan efisiensi termal diharapkan mencapai 40%. Setelah terjadi pertukaran panas dengan sistem sekunder, temperatur gas Helium akan turun menjadi  $600^{\circ}\text{C}$ , selanjutnya gas Helium dipompakan lagi menuju teras reaktor. Sistem pendingin primer yang radioaktif dan sistem pendingin sekunder yang tidak radioaktif terpisah, konseptual desain reaktor dan bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Konseptual desain RGTT200K (Sudarmono, 2013:3)

## **2.5. Very Superior Old Programs (VSOP)**

VSOP (*Very Superior Old Program*) adalah suatu program komputer yang sangat terbukti dan terintegrasi bersama untuk melakukan simulasi numerik dari performa fisis reaktor nuklir. Program komputer ini dapat digunakan secara langsung pada semua tipe reaktor termal, termasuk reaktor yang ukurannya kecil ataupun menengah (SMR) yang sedang dikembangkan dalam bentuk modular atau penggunaan panas secara langsung. Selain itu program ini juga telah dikembangkan untuk reaktor suhu tinggi (*High Temperatur Reactor*) dengan menggunakan bahan bakar berbentuk bola yang diantaranya memiliki beberapa fitur dari reaktor tipe RGTT berupa *Pebble bed*.

Program VSOP pada awalnya merupakan program yang berasal dari program mafia-II yang dikembangkan oleh L. Massimo untuk keperluan analisis reaktor HWR. Kemudian ditambahkan oleh T. Babac, J. Darvas dan V. Maly untuk reaktor RGTT atau yang biasa disebut juga dengan RGTT. Setelah itu program ini mengalami perkembangan yang sangat pesat terlebih setelah adanya proyek RGTT- Dragon di Eropa yang dipelopori oleh U. Hansen dkk. Untuk mengembangkan aspek neutronik, manajemen bahan bakar, evaluasi aspek ekonomis yang sangat lengkap di tahun 1980an. Dari sini muncul beberapa keluaran VSOP yang saling melengkapi. Program VSOP versi pertama (1980) “VSOP- *Computer Code System For Reactor Physics and Fuel Cycles Simulation*, oleh E. Teuchert, U. Hansen dan K.A. Haas, di Kerndorschungsanlage Julich”. Setelah muncul program ini, pengembangan reaktor tipe modular oleh Interatom-siemens memberikan dorongan yang kuat untuk meningkatkan

kemampuan program VSOP yang terkait dengan pengendalian kecelakaan secara inheren dan kebutuhan akan perijinan. Dengan bantuan dan kontribusi dari ilmuwan dan para doktor dari berbagai pihak, Professor R. Shulten dan Professor K. Kugeler dari Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR) Jülich Jerman kemudian memberikan semangat dan stimulasi yang sangat kuat untuk mengembangkan program VSOP ini. Selanjutnya, dengan bantuan dari Central Institute of Applied Mathematics untuk mengoperasikannya dalam komputer IBM, sehingga VSOP versi kedua (VSOP'94) ini muncul pada April 1994 oleh ISR-KFA Forschungszentrum Jülich, Jerman. Kemudian VSOP dikembangkan lagi oleh H. J. Rutten, K.A. Haas, H. Brockmann, U. Ohlig, W. Scherer menjadi VSOP'97 dan menjadi program VSOP'99 untuk sistem operasi Windows dan Unix. Seiring berjalannya waktu pada tahun 2005 VSOP dikembangkan lagi oleh orang yang sama namun tanpa U. Ohlig dengan program baru berupa VSOP'99/05 yang masih menggunakan file data nuklir JEF-1 dan ENDF/B-V. Lalu terakhir pada tahun 2009 oleh H.J. Rutten, K.A. Haas, H. Brockmann, U. Ohlig, C. Pohl, W. Scherer dikembangkan menjadi program VSOP'99/09 yang kompatibel untuk Windows XP dan sudah menggunakan pustaka data nuklir terbaru yaitu ENDF/B-VII.

Kegunaan dari program ini adalah untuk mensimulasi riwayat kehidupan reaktor, mulai dari aspek neutronik, aspek termal hidraulika (*thermal flow*), manajemen atau siklus bahan bakar, aspek ekonomi siklus bahan bakar dan lain sebagainya, khususnya pada reaktor jenis RGTT. Selain digunakan pada RGTT

berpendingin gas, program ini juga secara luas telah digunakan untuk studi banding dari berbagai reaktor seperti LWR dan HWR.

Pada dasarnya untuk program VSOP'94 ini masih tetap menjaga fitur-fitur yang terdapat pada VSOP'80 dan lebih dikembangkan lagi serta dilengkapi dengan evaluasi yang lebih lengkap terhadap performa reaktor yang sejatinya sangat dibutuhkan untuk analisis desain dan analisis keselamatan reaktor. Program ini tersusun atas 12 modul perhitungan, serta 2 opsi paket program perhitungan pembakaran yaitu CITATION dan THERMIX. CITATION merupakan modul perhitungan yang berdasarkan teori difusi sebagai perhitungan fluks neutron didalam teras dalam bentuk geometri multidimensi, sedangkan modul THERMIX digunakan untuk perhitungan distribusi temperatur bahan bakar. Program ini disusun dari penggabungan aspek-aspek neutronik, fluida dinamik dan perpindahan panas, menggunakan persamaan numerik dengan prinsip-prinsip kesetimbangan energi. Korelasi perhitungan yang digunakan adalah korelasi perpindahan panas, korelasi desain, korelasi sifat-sifat fisis Helium, korelasi moderator dan korelasi laju alir pendingin.

Dalam VSOP-94 terdiri dari beberapa data yang sangat berhubungan satu sama lain dalam pendesainan suatu reaktor. DATA-2 merupakan program yang menyimpan data tentang desain dari elemen bahan bakar. Di dalamnya terdapat banyak hal seperti bentuk bahan bakar, jenis bahan bakar utama, desainnya, ketebalannya, dll. ZUT-DGL adalah program yang di dalamnya berisi tentang perhitungan resonansi integral yang nantinya berguna pada saat pengerjaan program VSOP. Untuk mendesain geometri dari reaktor digunakan program

bernama BIRGIT dan TRIGIT. Keduanya merupakan program yang sama, hanya saja untuk BIRGIT digunakan pada 2 dimensi sedangkan TRIGIT digunakan untuk 3 dimensi. VSOP merupakan program inti yang di dalamnya nanti akan dilakukan proses-proses dengan memanggil beberapa program yang dibutuhkan sehingga didapatkan hasil berupa data lain yang merupakan deskripsi tentang bagaimana kinerja dari reaktor termasuk suhunya. THERMIX/KONVEK merupakan program yang berisi tentang data-data thermal Hidraulik 2 dimensi. LIFE merupakan program yang berisi tentang *life history* bahan bakar untuk peluruhan evaluasi daya. PRIOR merupakan program yang berisi tentang *life history* bahan bakar dari seluruh generasi isotop. ATLAS merupakan program yang merupakan hasil dari perhitungan keseluruhan dan dibentukkan dalam model gambar 3 dimensi, merupakan hasil akhir dari VSOP.

Beberapa Fitur yang terdapat pada program VSOP'94 ini antara lain:

1. Perhitungan temperatur seluruh reaktor baik pada keadaan setimbang maupun transien dan juga umpan baliknya terhadap parameter neutroniknya.
2. Evaluasi panas peluruhan untuk *individual fuel batch (burn up- step)* di masing-masing lokasi sesuai dengan sejarah *burn up* dan *shuffling* bahan bakar sebelumnya.
3. Konduktivitas termal efektif dari *Pebble Bed* sebagai fungsi temperatur dan paparan fluks neutron cepat.
4. Penyimpanan data kehidupan reaktor untuk evaluasi eksternal yang dibutuhkan.

#### 5. Masukan-masukan program lebih sederhana.

Struktur program pada VSOP ini yaitu dengan melakukan perhitungan yang terdiri dari perhitungan tampang lintang data nuklir, desain elemen bahan bakar dan reaktor, evaluasi spektrum neutron, perhitungan secara difusi untuk geometri 2 dimensi atau 3 dimensi, perhitungan fraksi bakar, manajemen bahan bakar, kendali dan simulasi termal hidraulik pada kondisi tunak maupun tak tunak pada RGTT *Pebble bed*. Ada beberapa modul yang disediakan oleh program VSOP ini, namun sebelum menuju ke modul ada baiknya untuk memahami beberapa istilah yang sering digunakan dalam program VSOP diantaranya ada *batch*, Layer, zona spektrum. *Batch* merupakan satuan dasar yang digunakan dalam VSOP untuk menerangkan komposisi material reaktor, semisal untuk mengisi teras pertama kali maka reaktor harus dibagi menjadi beberapa bagian *batch*, bagian-bagian *batch* tersebut harus dimuati dengan material bahan bakar atau bagian luar dengan material *reflektor* dll., perhitungan dilakukan secara individu untuk setiap *batch*: perhitungan tersebut meliputi *burn up* bahan bakar, *shuffling* bahan bakar, evaluasi biaya, dan produk panas sisa dalam simulasi kecelakaan nuklida yang heterogen. Selanjutnya ada istilah Layer yang merupakan volume parsial sesungguhnya dari reaktor  $V(I)$  yang memberikan distribusi material (tampang lintangnya) untuk perhitungan fluks neutron 2D atau 3D. Zona spektrum merupakan gabungan dari beberapa *batch* dalam jumlah yang banyak, perhitungan spektrum didasarkan pada rata-rata densitas atom dari zona spektrum ini. Zona spektrum ini memberikan informasi tampang lintang kelompok energi untuk masing-masing *batch*.

Modul- modul yang disediakan dalam program VSOP ini diantaranya, modul Data-2 yang berfungsi untuk mendesain elemen bahan bakar. Di dalam modul ini dibagi beberapa bagian berupa card. Card D1-D4 digunakan untuk memberikan spesifikasi diantaranya nuklida yang digunakan dalam perhitungan, biaya fabrikasi dan proses daur ulang atau perlakuan pada limbah, perlakuan elemen bahan: homogen atau heterogen. Selanjutnya card D5-D16 digunakan untuk mendesain jenis dan varian bahan bakar yang diantaranya terdapat penentuan jenis dengan mengkarakterisasi desain dan data biaya, varian yang berisi variasi pengkayaan (*enrichment*), ukuran *kernel*, pelapisan, *Pebble*, Grafit matriks luar dll. Selanjutnya juga ada penentuan jenis bahan bakar yang di dalamnya disediakan dua pilihan bahan bakar yaitu model *Pebble bed* (bola) dan model silinder atau prisma. Ada juga penentuan fraksi *packing Pebble* dalam teras, identifikasi 9 bahan bahan bakar yang dapat dipilih dengan pilihan yang disediakan adalah  $UO_2$ , UC,  $UC_2$ ,  $UO_2-ThO_2$ , UC-ThC,  $UC_2-ThC_2$ , Pu-Ox-Cy, Pu- $O_2$ ,- $ThO_2$ , Pu- $O_2$ - $UO_2$  dengan bahan fisil : U-233 dan U-235. Untuk mendesain teras dan nuklida tambahan dapat diatur dalam card D17-D19 diantaranya untuk menentukan daya per elemen bahan bakar (bola/blok prisma), daya spesifikasi, densitas daya. Efisiensi termal, rasio tinggi/diameter teras, tebal reflektor, densitas Grafit reflektor, nuklida tambahan dapat pula ditentukan melalui card ini.

ZUT-DGL merupakan modul yang disediakan program VSOP untuk melakukan perhitungan integral resonansi. Di dalamnya dapat diatur beberapa data untuk parameter resonansi seperti input resonansi yang diberikan, temperatur

resonansi (K), batas atas dan batas bawah energi resonansi (eV), jumlah set data untuk pustaka data resonansi yang akan dihasilkan dalam kelompok GAM. Selain itu juga diberikan solusi perhitungan integral resonansi yaitu dengan menentukan geometri absorber, menentukan solusi hamburan oleh absorber: hamburan bawah pada absorber yang didasarkan pada fluks neutron terhitung, aproksimasi *narrow resonance* (NR), maupun perhitungan heterogenitas ganda dengan menentukan lapisan pada *kernel TRISO*.

Pada modul ketiga dapat ditentukan Desain Reaktor 2 dimensi yang diatur dalam modul BIRGIT. Di dalam program BIRGIT ini dapat ditentukan jumlah data yang digunakan dalam program VSOP'94 ini diantaranya VSOP, CITATION dan THERMIX. Dalam penentuan geometri dapat dipilih jenis geometri apa yang akan digunakan seperti tata letak pada CITATION baik berupa tinggi, radius maupun mesh dan ketebalannya.

Pada modul selanjutnya ada TRIGIT yang merupakan pengembangan dari BIRGIT. TRIGIT merupakan modul yang disediakan oleh VSOP'94 untuk mendesain geometri reaktor dalam 3 dimensi. Di dalamnya tidak jauh berbeda dengan yang ada dalam BIRGIT, hanya saja ditambahkan dengan kajian untuk arah sumbu z.

VSOP merupakan modul kelima yang disediakan untuk menentukan jenis reaktor dan siklus bahan bakar. Modul ini tidak bisa berdiri sendiri karena masih terdapat hubungan dengan modul-modul yang lain dalam proses pengerjaannya. Program inilah yang sejatinya sering digunakan untuk menghitung termal hidrauliknya suatu reaktor. Di dalamnya dapat ditentukan jumlah *batch*,

perhitungan *burn up* seperti kesetimbangan neutron global maupun rinci, lama langkah waktu diantara perhitungan difusi, menentukan daya termal dari reaktor, dll. Perhitungan spektrum, *self shielding factor*, tampang lintang termal rata-rata, fluks neutron kelompok halus juga dapat diatur di dalam modul ini. Perhitungan termal hidraulik dengan bantuan masukan data THERMIX/KONVEK, data dari GAM serta program bantu *THERMALIZATION* juga dibutuhkan guna mendukung simulasi ini.

Modul *LIFE* merupakan modul untuk menentukan sejarah hidup dari bahan bakar. Modul *LIFE* juga digunakan untuk evaluasi daya peluruhan, yang membutuhkan masukan berupa pengaturan dimensi: jumlah kotak penyimpanan (*storage box*) jumlah *batch* VSOP, jumlah siklus *burn up*, jumlah step waktu dalam siklus *burn up*, jumlah elemen bahan bakar yang melewati teras.

Modul selanjutnya adalah *PRIOR*. *PRIOR* merupakan program untuk menentukan sejarah hidup bahan bakar. Hampir sama dengan modul *LIFE*, namun modul *PRIOR* ini digunakan untuk generasi seluruh isotop yang dihasilkan dari Origen.

Selanjutnya ada modul *ATLAS*. Modul *ATLAS* merupakan modul yang digunakan untuk menggambarkan hasil VSOP berupa peta 3 dimensi. Di dalamnya terdapat perintah untuk menampilkan data yang diberikan untuk setiap bidang atau menampilkan data masing-masing untuk setiap bidang secara berurutan. Modul *ATLAS* ini juga dapat menampilkan informasi umum semua bidang, informasi *batch*, densitas atom, berat material, fluks termal *batch*, dan informasi daya tiap elemen bahan bakar.



### 2.5.1. PERHITUNGAN PERPINDAHAN PANAS DALAM VSOP

Reaktor nuklir pada dasarnya mampu menghasilkan daya yang diinginkan selama panas yang dihasilkan dapat dipindahkan dari teras. Perhitungan dilakukan menggunakan program THERMIX. Program ini diturunkan berdasarkan hukum kesetimbangan massa, tenaga dan momentum linier. Persamaan kesetimbangan massa gas pendingin kuasi-statik menghasilkan vektor aliran massa  $G = \rho_G \vec{v}$  pada siklus perhitungan, yang dinyatakan dengan:

$$\nabla \rho_G \vec{v} = q \quad (2.3)$$

dengan

$$\rho_G = \text{Densitas gas pendingin (kg.m}^{-3}\text{)}$$

$$\vec{v} = \text{Kecepatan (m.detik}^{-1}\text{)}$$

Konservasi momentum kuasi-statik menghasilkan vektor tekanan  $p$  pada siklus perhitungan, dinyatakan dengan:

$$\nabla p - \rho_G \vec{g} + \vec{R} = 0 \quad (2.4)$$

dengan:

$$p = \text{Tekanan statik (kg. m}^{-1}\text{s}^{-2}\text{)}$$

$$\vec{g} = \text{Percepatan gravitasi (m.detik}^{-2}\text{)}$$

$$\vec{R} = \text{Penurunan tekanan (kg. m}^{-1}\text{s}^{-2}\text{)}$$

Persamaan (2.4) memberikan kesetimbangan gradien tekanan, gaya hidrostatis gravitasi, dan penurunan tekanan persatuan volume. Selanjutnya, penurunan tekanan akibat friksi diberikan pada persamaan 2.5.

$$\vec{R} = \psi \frac{H}{d} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{1}{2\rho_G} \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \quad (2.5)$$

$d$  = Diameter *Pebble* (m)

$\dot{m}$  = Laju alir massa fluida ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )

$\varepsilon$  = Porositas bed

$H$  = Tinggi teras (m)

$A$  = Luas tampang lintang ( $\text{m}^2$ )

$\rho_G$  = Densitas fluida ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\psi$  = Koefisien penurunan tekanan untuk aliran melalui *Pebble bed*

$d$  = Diameter *Pebble* bahan bakar (m)

Evaluasi Persamaan (2.3) dan (2.4) dilakukan dalam subrutin STROEM.

Hukum kekekalan energi pada representasi kuasi-statik menghasilkan vektor temperatur gas  $T_G$ :

$$\nabla \lambda_G \nabla T_G - \nabla (\rho_G \vec{v} c_p T_G) + \alpha A_p (T - T_G) = 0 \quad (2.6)$$

dengan

$c_p$  = Kapasitas panas spesifik gas ( $\text{J.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$ )

$\lambda_G$  = Konduktivitas termal efektif gas akibat dispersi ( $\text{W.m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$T$  = Temperatur padatan, misal permukaan elemen bakar ( $^\circ\text{C}$ )

$\alpha$  = Koefisien transfer panas antara padatan dan gas ( $\text{W. m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$A_p$  = Luas permukaan zona *Pebble* ( $\text{m}^2$ )

$T_G$  = Temperatur fluida gas Helium pendingin ( $^\circ\text{C}$ )

Koefisien transfer panas konveksi diberikan oleh Persamaan:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda_g}{d} \quad (2.7)$$

Dimana  $Nu$  adalah bilangan Nusselt,  $\lambda_g$  adalah konduktivitas termal gas ( $\text{W.m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) dan  $d$  adalah diameter *Pebble* bahan bakar.

Persamaan (2.6) dievaluasi pada subrutin GASTEM. Pada persamaan (2.6) suku pertama memberikan transfer panas pada gas melalui konduksi termal. Suku kedua merupakan transfer panas sesuai aliran massa gas. Suku ketiga adalah sumber panas atau penyerap panas (*heat sink*) akibat transisi panas antara gas dan elemen bakar. Untuk vektor temperatur tertentu  $T$  dari *solid material*, status kuasi-statik gas diturunkan oleh subrutin KONVEK, dimana perhitungan ini mengandung suatu prosedur iterasi antara subrutin STROEM dan GASTEM. Hukum kekekalan energi pada *solid material* dievaluasi pada representasi dinamis, yang menghasilkan vektor temperatur  $T$ , yaitu:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \nabla\lambda_{eff}\nabla T + \alpha(T_G - T) + Q \quad (2.8)$$

dengan

$T$  =  $T(\vec{r}, t)$  temperatur padatan, misal permukaan elemen bakar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\rho$  = Densitas *solid material*, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c$  = Panas spesifik ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )

$\lambda_{eff}$  = Konduktivitas termal efektif ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

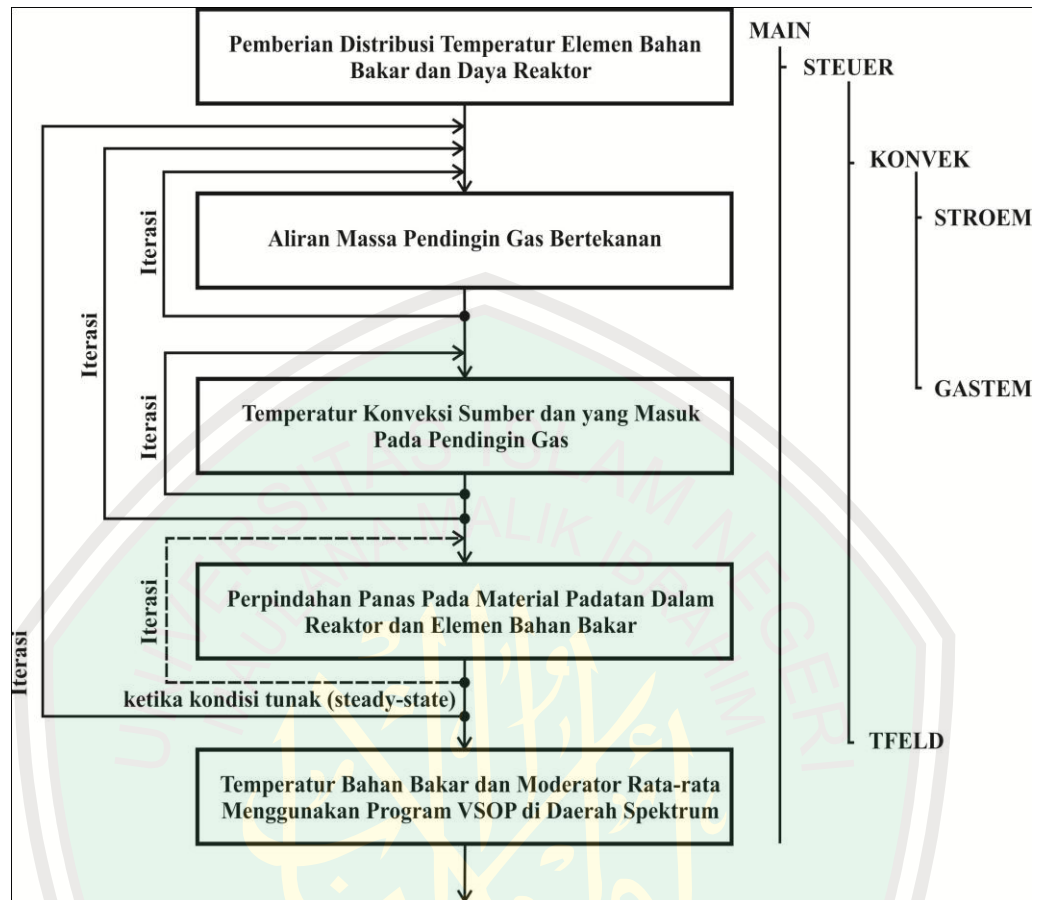
$Q$  =  $Q(\vec{r}, t)$  sumber panas nuklir (joule)

Pada bagian dalam elemen bakar, distribusi temperatur  $T_F$  juga diberikan oleh hukum kekekalan energi yang dinyatakan sebagai fungsi waktu:

$$\frac{\partial(\rho c T_F)}{\partial t} = \nabla \lambda \nabla T_F + Q \quad (2.9)$$

Dimana  $c$  dan  $\lambda$  adalah bergantung pada temperatur lokal  $T_F$ . Pada permukaan elemen bakar, temperatur  $T_F$  sama dengan  $T$  dari Persamaan (2.6) pada posisi di dalam reaktor.

Persamaan (2.8) dan (2.9) diselesaikan dalam subrutin TFELD pada kondisi tunak, terdapat suatu prosedur iterasi antara subrutin TFELD dan KONVEK, yang menghasilkan suatu solusi yang konsisten untuk temperatur *solid material* dan gas.



Gambar 2.9 Diagram Alir Perhitungan Program VSOP-94 Untuk Distribusi Temperatur

## **BAB III METODE PENELITIAN**

### **3.1. Jenis Penelitian**

Jenis penelitian yang digunakan adalah eksperimental yang berupa simulasi eksperimental seperti jenis-jenis reaktor yang telah ada sebelumnya, namun dengan beberapa variabel yang sedikit berbeda sesuai dengan kebutuhan jenis reaktor RGTT 200K.

### **3.2. Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli-September 2014 yang bertempat di laboratorium Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang dan juga PTRKN BATAN Serpong.

### **3.3. Alat dan Bahan**

#### **3.3.1 Alat**

1. Komputer Laptop spesifikasi RAM 2 GB, Processor Core 2 duo.
2. VSOP 94 berbasis WINDOWS 7.
3. VSOP utility.
4. Command Prompt.
5. Sigma Plot 12.0
6. Microsoft Excel

#### **3.3.2 Bahan**

1. Data RGTT 200K BATAN.

### 3.4. Langkah-langkah Penelitian

Langkah Penelitian untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

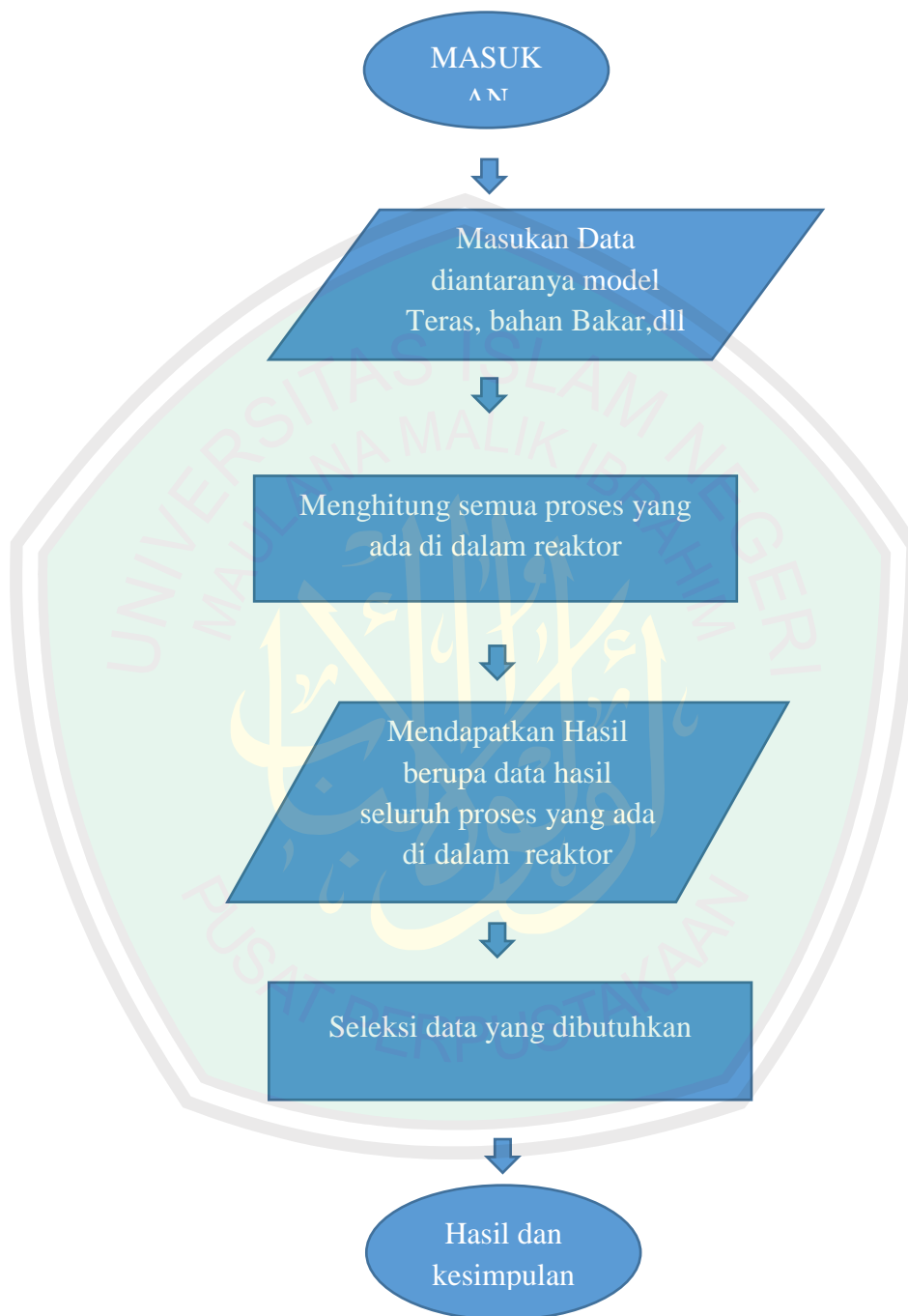
1. Menggambarkan bentuk reaktor dan bahan bakar ke dalam program vsop 94.
  - Membuka VSOP *utility*
  - Menentukan desain reaktor dan bahan bakar melalui modul Data2
2. Mengumpulkan data masukan untuk RGTT 200K
3. Menentukan data masukan untuk RGTT 200K
  - Menentukan nilai daya
  - Menentukan Rapat daya
  - Menentukan Jumlah batang kendali
  - Menentukan Jumlah sistem penyerap bola bahan bakar
  - Menentukan Diameter bejana tekan
  - Menentukan Ketinggian bejana tekan
  - Menentukan Tekanan
  - Menentukan Pengkayaan bahan bakar
  - Menentukan Fraksi bakar
  - Menentukan Data material matriks bahan bakar
  - Menentukan temperatur *inlet* masukan bahan bakar
4. Mensimulasikan menggunakan VSOP 94
  - Membuka *command prompt* yang ada di komputer dengan sistem operasi windows 7.

- Membuka file yang terdapat aplikasi vsop'94 melalui *command prompt* dengan perintah run
- Menentukan nama hasil simulasi dan diekspor ke dalam file berekstensi “ \*.out “

#### 5. Menganalisis hasil simulasi

- Membuka hasil simulasi dengan menggunakan notepad pada file hasil simulasi yang telah dilakukan
- Memilih data hasil yang sesuai hanya untuk temperatur bahan bakar dan juga temperatur di teras
- Menganalisa hasil dengan memasukkan data ke dalam *Microsoft Excel* dan *Sigma Plot*
- Menganalisa hasil melalui grafik yang dihasilkan dari data-data hasil

### 3.5. Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir secara umum

## **BAB IV DATA HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **4.1. DATA HASIL**

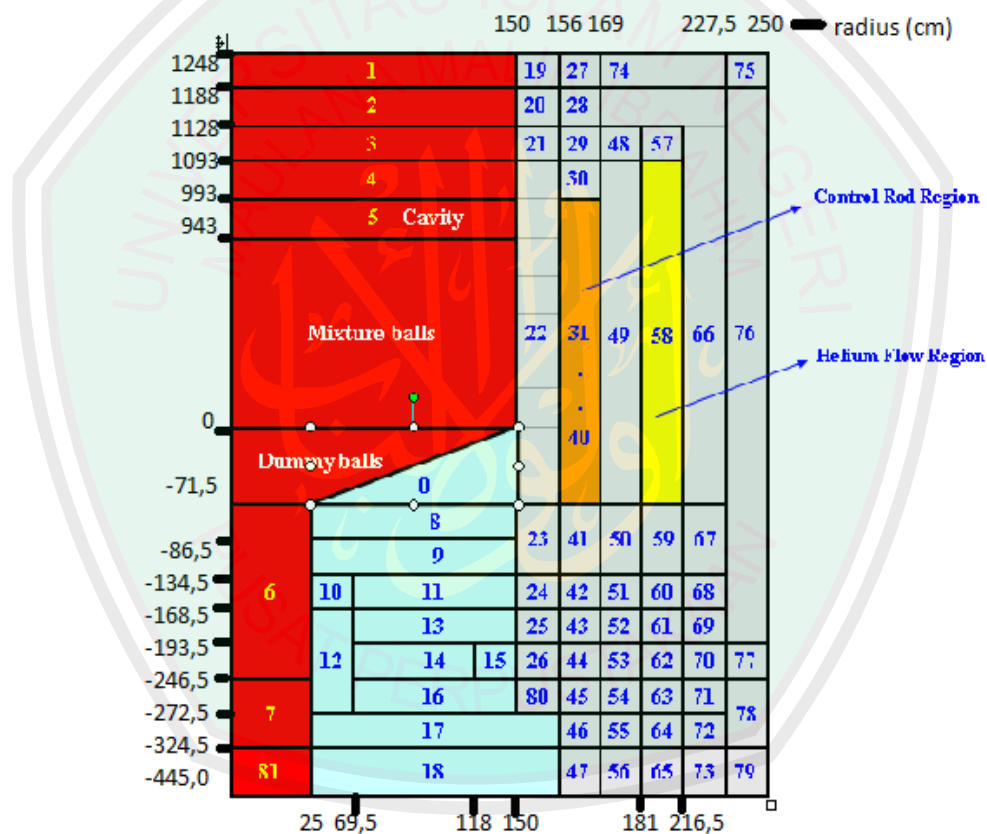
Penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan semua data tentang RGTT200K. Data ini didapatkan dari beberapa jurnal yang telah dikeluarkan dari BATAN serta berasal dari beberapa sumber lainnya. Selanjutnya setelah semua data yang dibutuhkan terkumpul maka disiapkan beberapa program yang akan digunakan seperti VSOP94, *VSOP Utility*, *Microsoft Excel* serta *Sigma Plot*. Semua program ini akan dijalankan pada komputer laptop dengan spesifikasi Processor Core 2 Duo 2GHz, Ram 2 Gb, sistem Operasi windows 7 32 bytes. Dengan menggunakan komputer berspesifikasi ini maka dapat dilakukan semua proses simulasi.

#### **4.1.1. Mendesain bentuk reaktor dan bahan bakar ke dalam VSOP 94**

Sebelum menggambar ke dalam program VSOP 94 maka dibuatlah desain dasar dengan menggunakan program seperti *Corel Draw*, *Ms. Excel*, atau dengan menggunakan *software* pengolah gambar. Setelah desain ditentukan maka dapat dilakukan proses perancangan reaktor dan bahan bakar ini ke dalam VSOP 94. Rancangan desain reaktor RGTT200K ditunjukkan pada gambar 4.1.

Sisi *inlet* adalah bagian atas teras, yang dimulai dengan zona rongga (*cavity*), sebelum masuk ke zona teras reaktor (titik 0), sedangkan sisi *outlet* berada di posisi bawah. Di dalam program *THERMIX*, pada gambar tersebut konfigurasi teras RGTT200K dibagi menjadi sejumlah zona. Dalam perancangan reaktor dibagi beberapa zona, yaitu zona radial (R) dibagi menjadi 25 nodal,

sedangkan ke arah aksial (z) dibagi menjadi 42 nodal. Di sisi *outlet* terletak corong tempat keluaran bahan bakar yang telah habis masa pakainya. Program komputer ini mempertimbangkan aspek-aspek neutronik, dinamika fluida dan perpindahan panas. Program komputer *THERMIX* dapat dimodelkan untuk menganalisis zona-zona teras dengan masing-masing tingkat daya dan juga aliran pendingin yang berbeda.

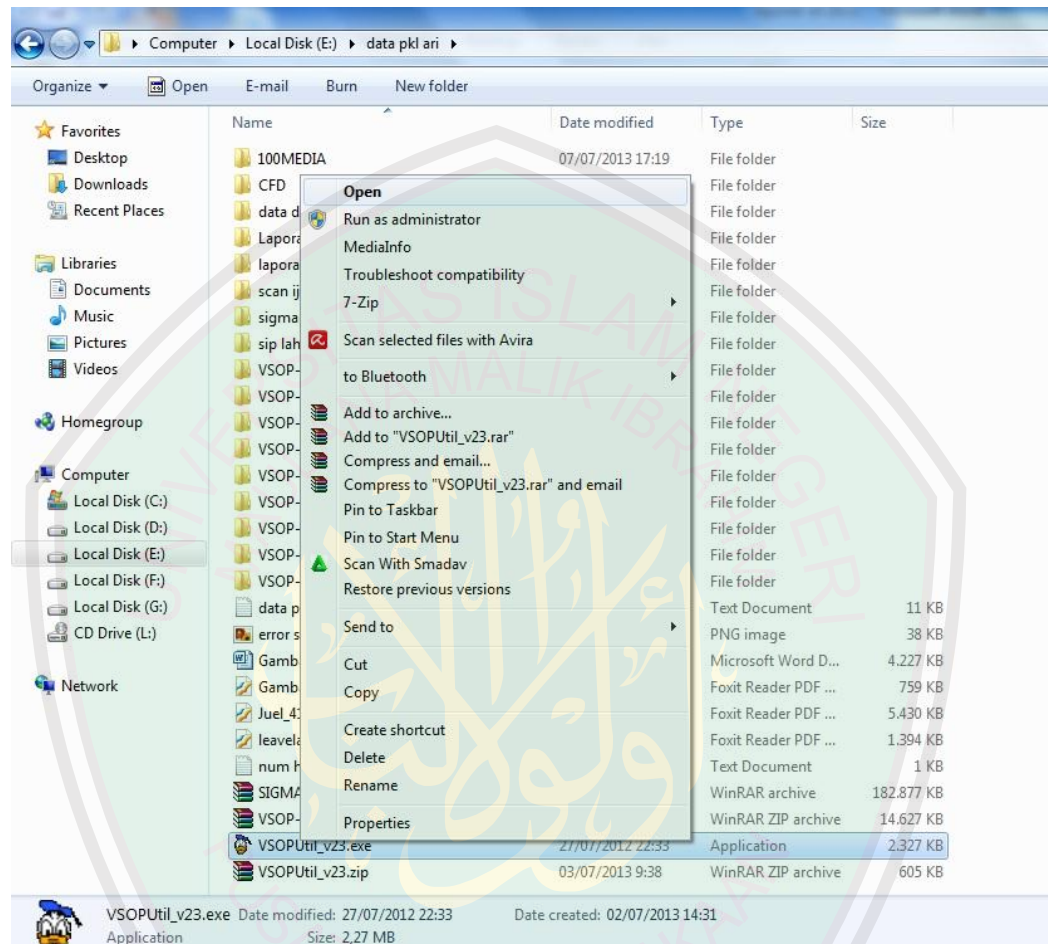


Gambar 4.1. Pemodelan teras RGTT200K

Sedangkan untuk desain bahan bakar secara keseluruhan dapat ditunjukkan pada gambar 2.4 dan 2.5.

Setelah desain reaktor dirancang, maka untuk menentukan nilai secara detail rancangan reaktor ini dapat digunakan program bantu dengan membuka

program *VSOP utility*. Data reaktor dan Bahan Bakar ini di atur dalam modul *VSOP DATA2, TRIGIT, dan BIRGIT*.



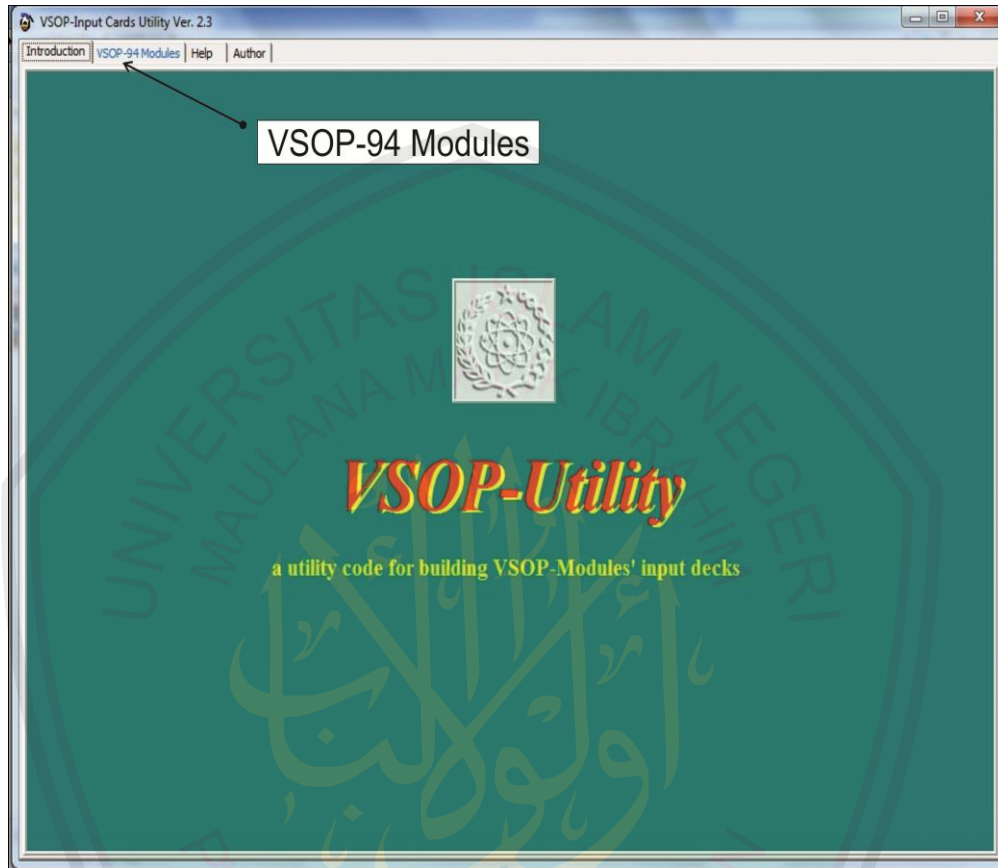
Gambar 4.2. Membuka program *VSOPUtility*

*VSOP Utility* dibuka dengan cara memilih perintah *open* pada *VSOPUtil\_v23.exe*, dengan begitu *VSOP Utility* akan terbuka dan selanjutnya dapat dilakukan proses *input* data.

#### 4.1.2. Menentukan data masukan untuk **RGTT200K**

Untuk memasukkan data-data yang dibutuhkan maka dapat dilakukan dengan cara memilih menu yang terdapat pada program *VSOP Utility*. Di

dalamnya terdapat beberapa pilihan untuk menentukan jenis modul yang dibutuhkan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3,



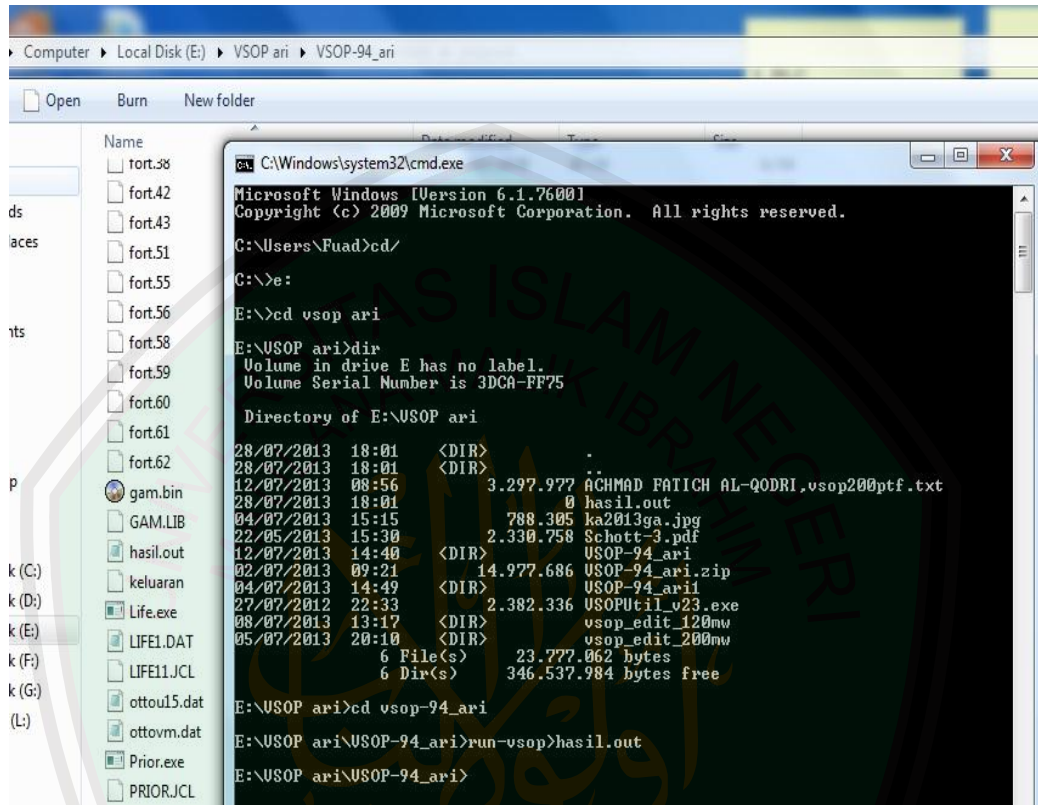
Gambar 4.3. Muka program *VSOPUtil\_v23*

Jenis data masukan yang dibutuhkan telah dilampirkan pada lampiran I.

#### 4.1.3. Mensimulasikan dengan menggunakan VSOP94

Setelah semua data telah dimasukkan dan disimpan dalam beberapa file masukan maka untuk memanggil seluruh program ini dapat dilakukan dengan menggunakan *command prompt*. Cara membukanya dapat dilakukan dengan memilih program *Command prompt* atau ketik *cmd* pada menu *run* di *windows*. Setelah program *command prompt* terbuka maka selanjutnya dapat dilakukan

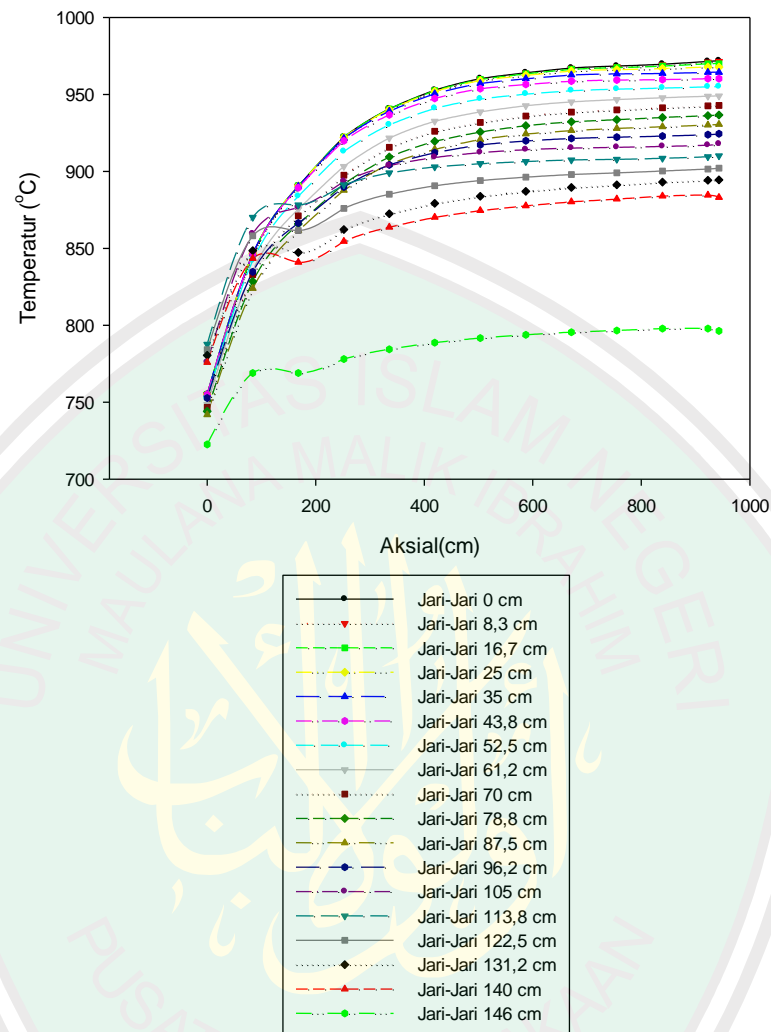
pemanggilan terhadap program yang dibutuhkan yaitu program *vsop.exe* melalui perintah `run-vsop>nama file hasil.out` seperti ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4. Menjalankan program lewat *command prompt*

#### 4.1.4. Menganalisis Hasil Simulasi

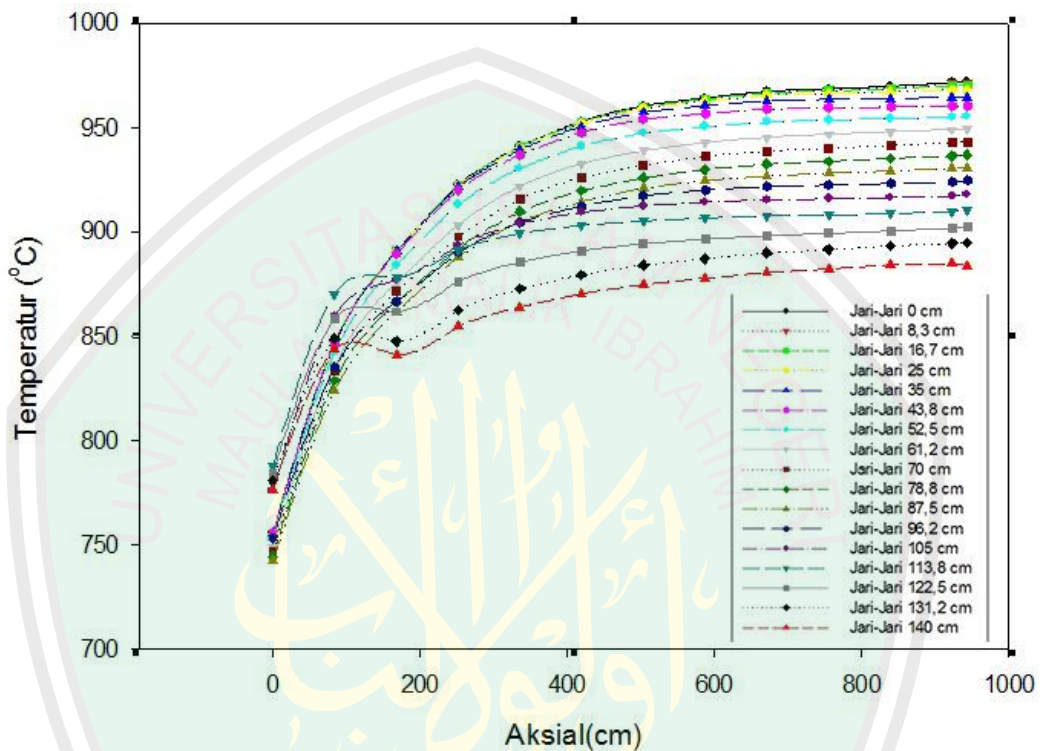
Setelah proses simulasi dilakukan, maka didapatkanlah data hasil berformat akhir “.out”. Hasil ini tidak serta merta dapat diproses secara langsung melainkan dilakukan terlebih dahulu seleksi beberapa data hasil yang dibutuhkan. Selanjutnya dilakukan analisis data dengan menggunakan program *Microsoft Excel* dan *Sigma Plot* sehingga didapatkan data hasil yang dilampirkan dalam lampiran III. Berikut hasil simulasi dalam bentuk grafik,



Gambar 4.5 Grafik hasil distribusi temperatur padatan pada 200 MW

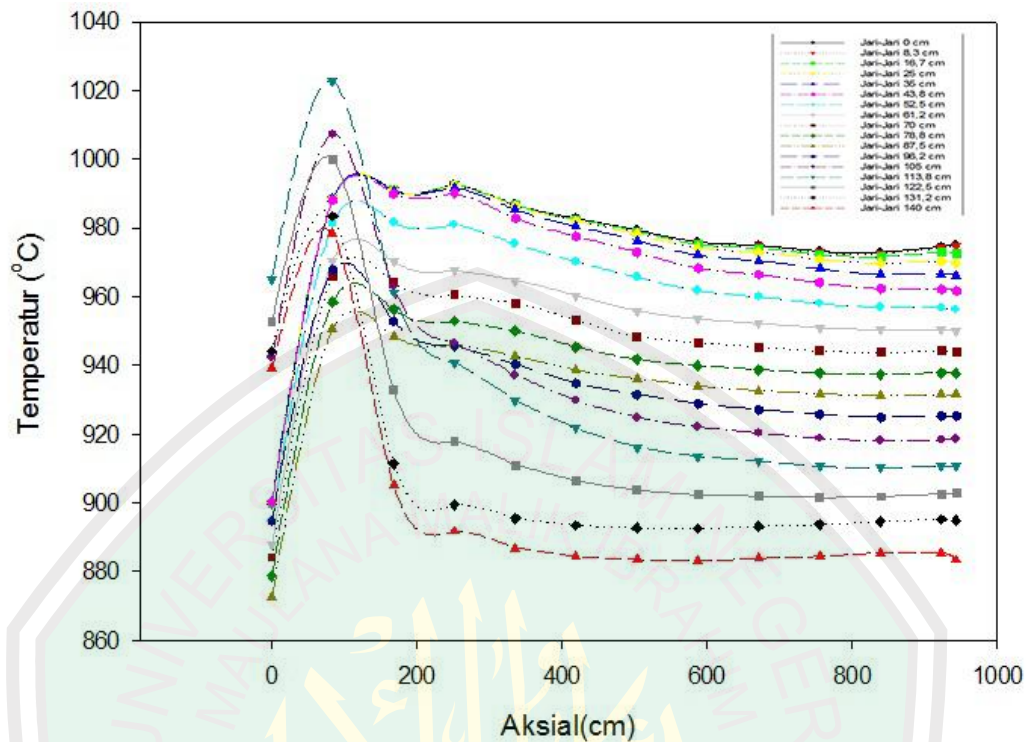
Gambar 4.5 ini merupakan hasil distribusi temperatur dalam padatan pada saat kondisi tunak (*Steady State*). Temperatur padatan merupakan temperatur yang terdapat pada *Pebble bed* terluar dengan arah aksial merupakan hubungan suhu terhadap perubahan ketinggian teras. Dari grafik ini dapat diketahui bahwa nilai temperatur bergantung pada arah aksial dan radial bahan bakar di dalam teras.

Selain temperatur padatan juga dihasilkan grafik temperatur terhadap tiap lapisan bahan bakar yang ditunjukkan pada gambar 4.6 sampai dengan gambar 4.10



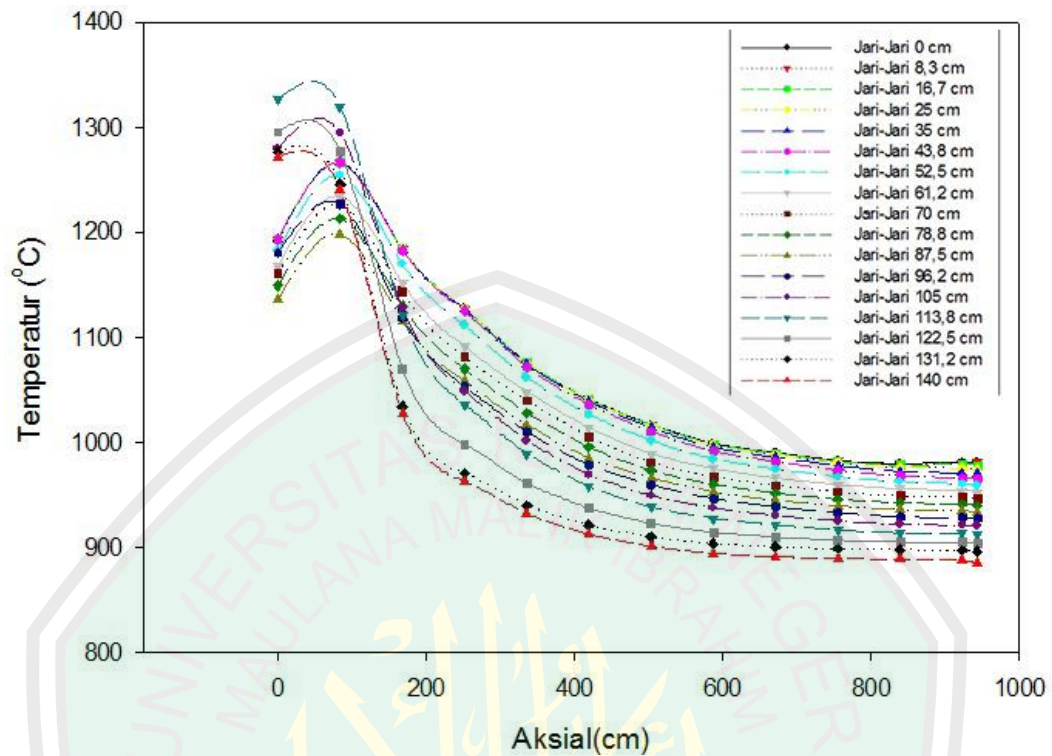
Gambar 4.6 Grafik Distribusi Temperatur OPyC pada daya 200 MW

OPyC merupakan lapisan terluar yang terdapat pada partikel TRISO, lapisan ini melakukan interaksi dengan lapisan OPyC lainnya yang terdapat pada bola *Pebble bed*. Arah Aksial merupakan ketinggian teras sedangkan arah y merupakan temperatur yang terdapat dalam bahan OPyC. Pada OPyC ini terjadi beberapa proses perpindahan panas yaitu proses perpindahan panas secara konduksi dengan OPyC lainnya yang terdapat pada *Pebble bed*, selain itu terjadi pula perpindahan panas secara Konduksi dan radiasi baik antara TRISO satu dengan lainnya maupun antara TRISO dengan dinding moderator Grafit.



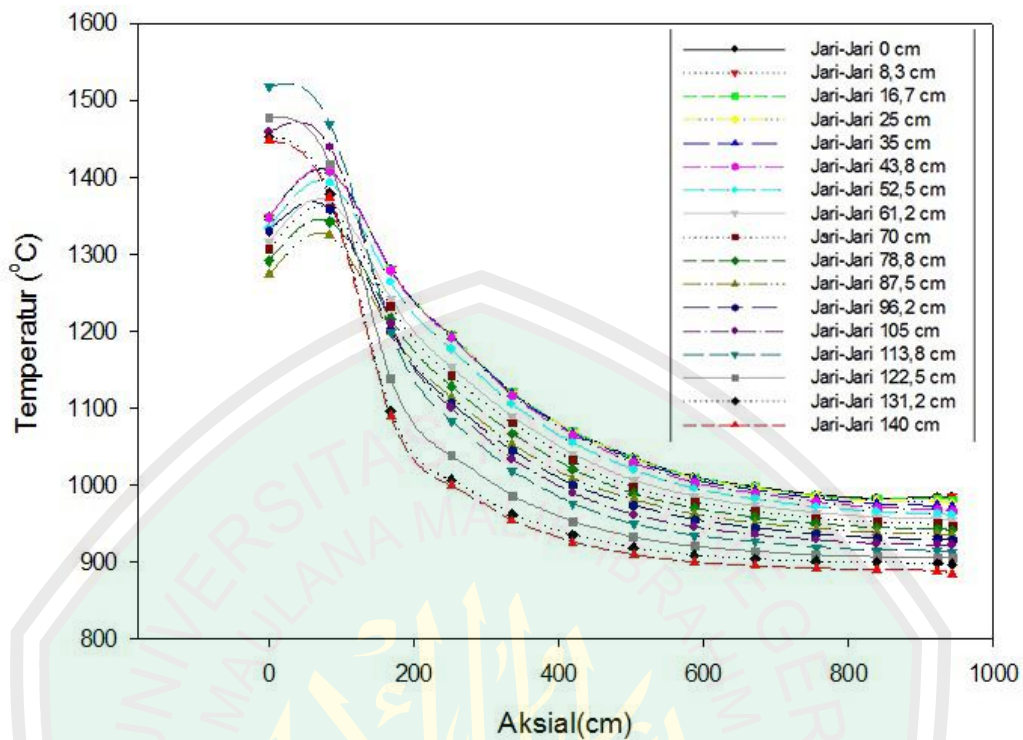
Gambar 4.7 Grafik Distribusi Temperatur SiC pada daya 200 MW

Grafik ini merupakan grafik distribusi temperature pada lapisan SiC yang merupakan lapisan terluar kedua TRISO. Dengan nilai aksial berupa ketinggian teras dan arah y berupa temperatur. Dapat diketahui bahwa nilai temperatur sangat dipengaruhi oleh arah radial dan aksial pada teras. Tiap bentuk dan warna pada gambar 4.7 Memiliki arti bahwa dengan satu bentuk tertentu mengartikan arah radial yang terdapat pada teras reaktor.



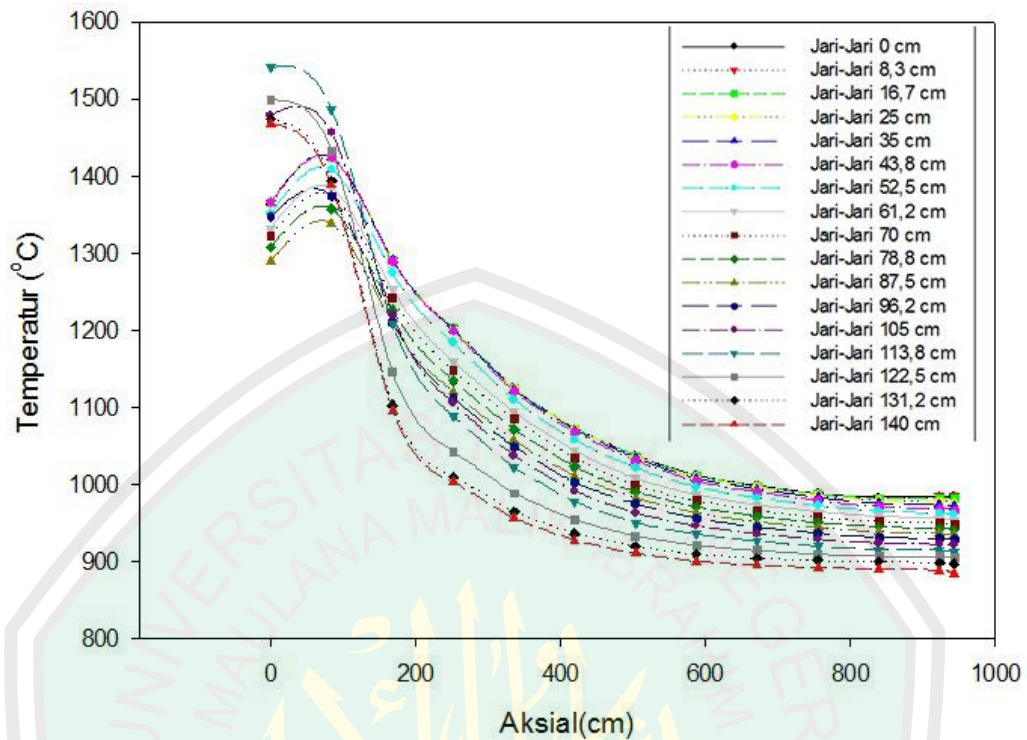
Gambar 4.8 Grafik Distribusi Temperatur IPyC pada daya 200 MW

Grafik ini merupakan distribusi temperatur IPyC yang merupakan lapisan terluar ketiga pada TRISO. Nilai tertinggi berada pada arah aksial yang cukup dekat dengan *inlet*, sedangkan nilai terendah pada arah radial masih terdapat pada jari-jari terluar atau pada jarak 140 cm.



Gambar 4.9 Grafik Distribusi Temperatur *Buffer* pada daya 200 MW

Grafik ini merupakan grafik distribusi temperature pada lapisan *Buffer* yang merupakan lapisan kedua TRISO. Dengan nilai aksial berupa ketinggian teras dan arah y berupa temperatur. Dapat diketahui bahwa nilai temperatur sangat dipengaruhi oleh arah radial dan aksial pada teras. Tiap bentuk dan warna pada gambar 4.9 Memiliki arti bahwa dengan satu bentuk tertentu mengartikan arah radial yang terdapat pada teras reaktor. Aliran panas yang ditunjukkan pada grafik ini tidak memiliki perbedaan jauh dengan yang dihasilkan pada distribusi temperatur pada IPyC, yaitu nilai temperatur tertinggi berada pada ketinggian awal dekat dengan *inlet* dan temperature terendah radial masih terjadi pada jarak 140 cm dari titik tengah.



Gambar 4.10 Grafik Distribusi Temperatur *Kernel* pada daya 200 MW

Grafik ini merupakan distribusi temperatur pada bahan bakar inti (*Kernel*) dengan bahan bakar inti berupa  $\text{UO}_2$  yang merupakan lapisan terdalam pada TRISO. Arah aksial merupakan ketinggian teras sedangkan pada arah-y merupakan temperatur. Nilai temperatur tertinggi berada pada area dekat *inlet* masukan, sedangkan pada sisi radial nilai terendah terjadi pada jari-jari 140 cm.



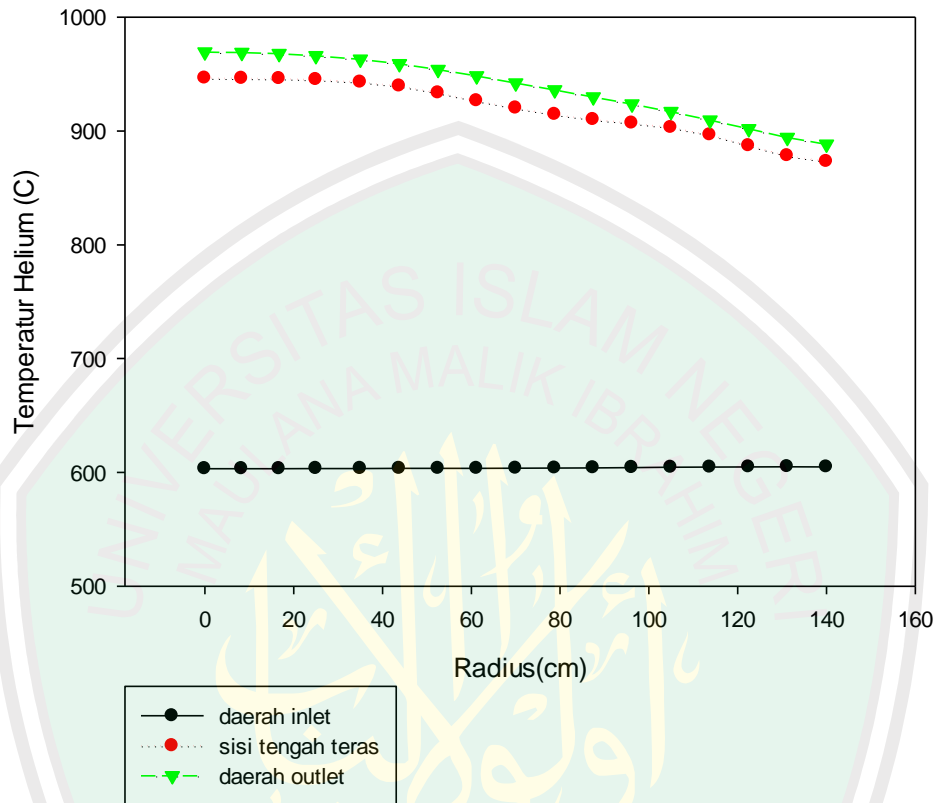
Gambar 4.11 Spektrum aliran panas pada padatan berupa Grafit

Warna dalam gambar 4.11 ini menunjukkan indikator temperatur dengan perubahan temperatur mulai dari merah ke arah hijau. Warna merah dalam spektrum ini menunjukkan nilai sekitar 1000 C. Sisi paling atas berwarna keunguan merupakan indikator posisi terhadap arah radial, sedangkan warna di sisi kiri merupakan kedalaman teras. Gambar ini diambil dengan separuh dari diameter dengan nilai nol merupakan titik tengah dari teras dalam arah radial, sedangkan arah kebawah menggambarkan kondisi temperatur dalam kedalaman tertentu didalam teras hingga di dekat *outlet*.



Gambar 4.12 Spektrum aliran panas pada pendingin Helium

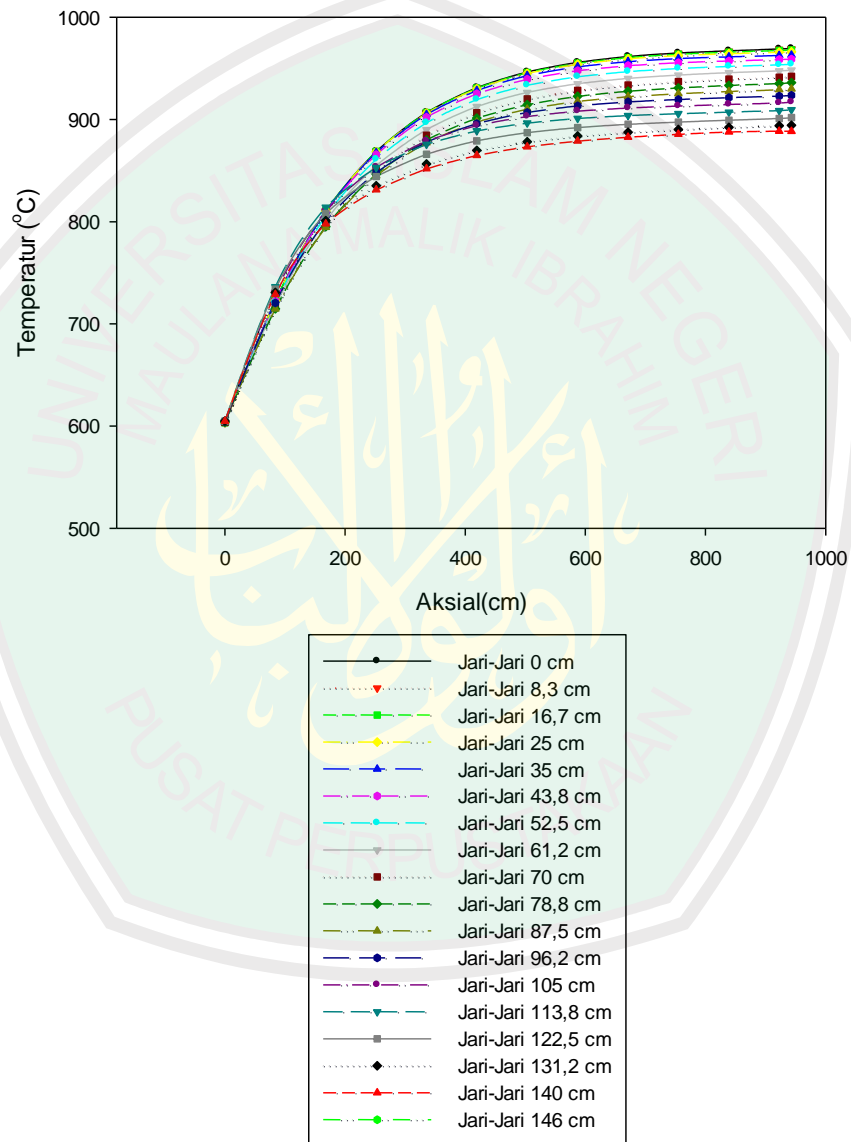
Warna dalam gambar 4.12 ini menunjukkan indikator temperatur dengan perubahan temperatur mulai dari merah ke arah hijau yang terdapat pada pendingin Helium di dalam teras. Warna merah dalam spektrum ini menunjukkan nilai sekitar 1000 C. Sisi paling atas berwarna keunguan merupakan indikator posisi terhadap arah radial, sedangkan warna di sisi kiri merupakan kedalaman teras. Gambar ini diambil dengan separuh dari diameter dengan nilai nol merupakan titik tengah dari teras dalam arah radial, sedangkan arah kebawah menggambarkan kondisi temperatur dalam kedalaman tertentu didalam teras hingga di dekat *outlet*.



Gambar 4.13 Grafik distribusi aliran Helium terhadap arah radial

Gambar 4.13 ini menunjukkan grafik distribusi aliran Helium yang terdapat pada teras terhadap arah radial. Jika diperhatikan lebih jauh ternyata terjadi perbedaan temperatur pada tiap bagian teras. Warna hitam menunjukkan distribusi temperatur pada daerah *inlet*. Selanjutnya diperlihatkan nilai distribusi temperatur pada daerah tengah teras. Nilai distribusi temperatur Helium pada bagian tengah teras (dengan warna merah) menunjukkan nilai yang sudah mencapai temperatur sekitar 900 C. Selanjutnya pada bagian *outlet* yang ditunjukkan dengan warna hijau memperlihatkan temperatur yang semakin tinggi.

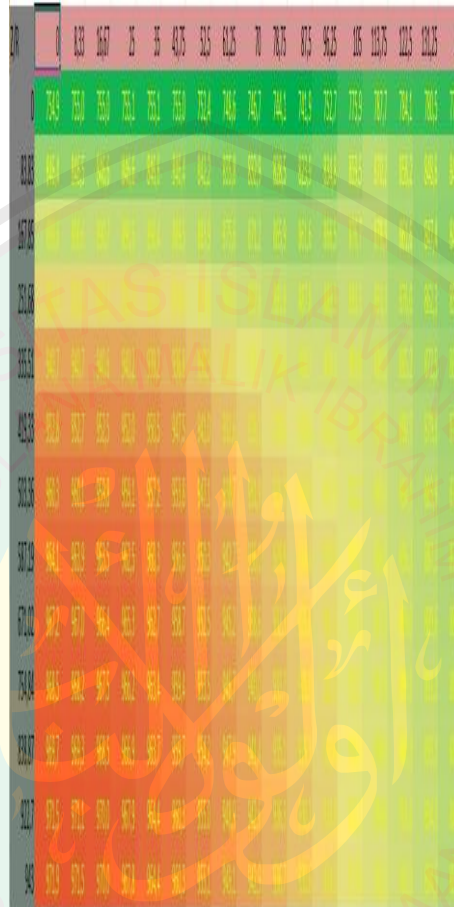
Pada arah radial menunjukkan distribusi temperatur yang relatif sama karena arah aliran Helium memang dialirkan menuju arah bagian *outlet* teras.



4.14 Grafik Distribusi temperatur pendingin Helium

Gambar 4.14 ini merupakan grafik distribusi temperatur pendingin helium secara keseluruhan yang terdapat di dalam teras reaktor. Aliran ini secara aksial

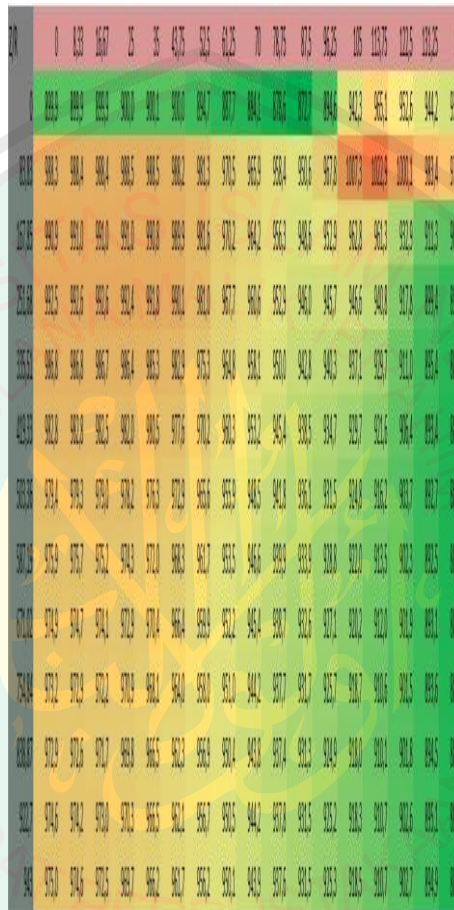
merupakan ketinggian teras, sedangkan pada arah-y merupakan temperatur dari pendingin Helium.



Gambar 4.15 Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar OPyC

Warna dalam gambar 4.15 ini menunjukkan nilai temperatur yang terjadi pada lapisan OPyC dengan perubahan temperatur mulai dari merah ke arah hijau. Warna merah dalam spektrum ini menunjukkan nilai sekitar 1000 C. Sisi paling atas berwarna keunguan merupakan indikator posisi terhadap arah radial, sedangkan warna di sisi kiri merupakan kedalaman teras. Gambar ini diambil dengan separuh dari diameter dengan nilai nol merupakan titik tengah dari teras

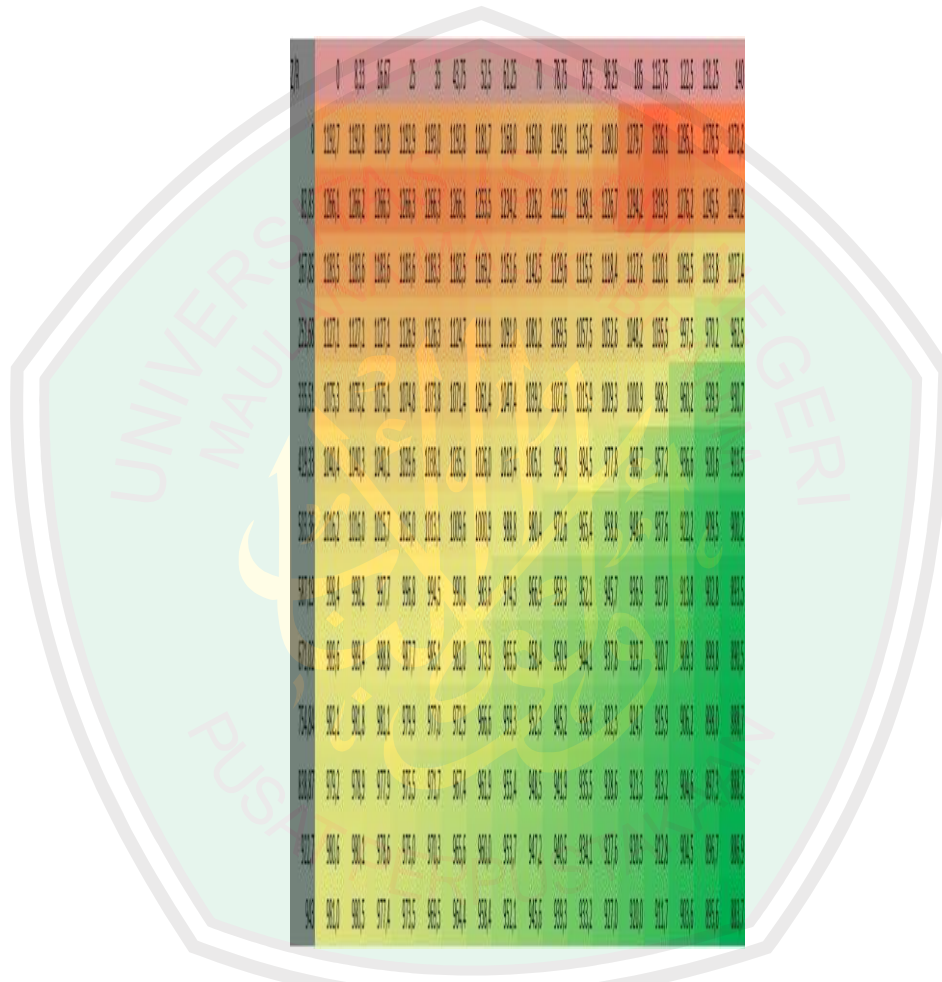
dalam arah radial, sedangkan arah kebawah menggambarkan kondisi temperatur dalam kedalaman tertentu didalam teras hingga di dekat *outlet*.



Gambar 4.16 Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar SiC

Dalam gambar 4.16 ini terdapat indikator temperatur dengan perubahan temperatur mulai dari merah ke arah hijau yang terdapat pada lapisan bahan bakar berupa SiC yang berada di dalam teras. Warna merah dalam spektrum ini menunjukkan nilai sekitar 1600 C, namun merah yang dimaksud adalah merah darah. Sisi paling atas berwarna keunguan merupakan indikator posisi terhadap arah radial, sedangkan warna di sisi kiri merupakan kedalaman teras. Gambar ini

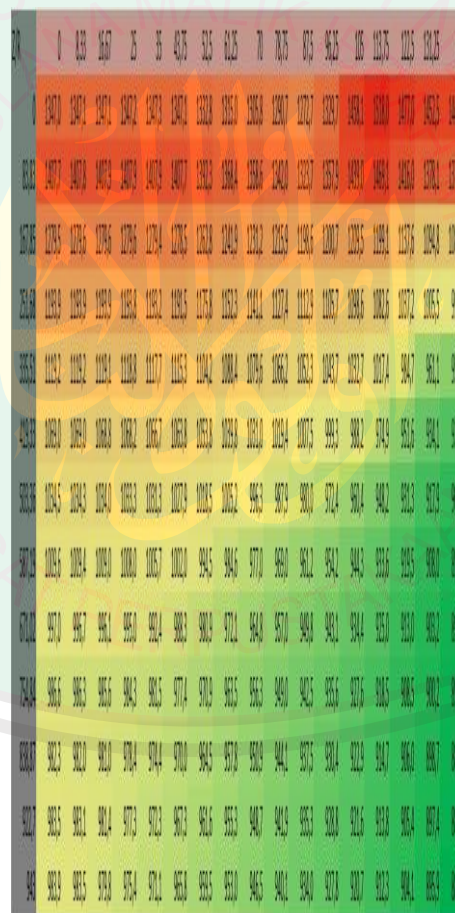
diambil dengan separuh dari diameter dengan nilai nol merupakan titik tengah dari teras dalam arah radial, sedangkan arah kebawah menggambarkan kondisi temperatur dalam kedalaman tertentu didalam teras hingga di dekat *outlet*.



Gambar 4.17 Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar IPyC

Gambar 4.17 ini memiliki warna yang menunjukkan indikator temperatur dengan perubahan temperatur mulai dari merah ke arah hijau yang terdapat pada lapisan bahan bakar (IpyC) di dalam teras. Warna merah dalam spektrum ini menunjukkan nilai sekitar 1600 C, namun nilai temperatur tertinggi yang berwarna merah di dalam gambar ini bukanlah temperatur dengan nilai 1600 C,

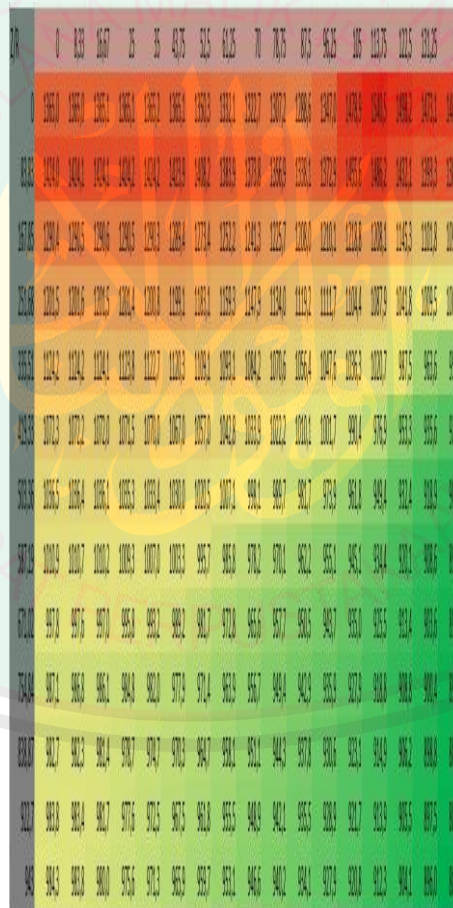
melainkan sekitar 1500 C Sisi paling atas berwarna keunguan merupakan indikator posisi terhadap arah radial, sedangkan warna di sisi kiri merupakan kedalaman teras. Gambar ini diambil dengan separuh dari diameter dengan nilai nol merupakan titik tengah dari teras dalam arah radial, sedangkan arah kebawah menggambarkan kondisi temperatur dalam kedalaman tertentu didalam teras hingga di dekat *outlet*.



Gambar 4.18 Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar *Buffer*

Warna dalam gambar 4.18 ini menunjukkan indikator temperatur yang terdapat pada lapisan bahan bakar buffer dengan perubahan temperatur mulai dari

merah ke arah hijau. Warna merah dalam spektrum ini menunjukkan nilai sekitar 1600 C. Sisi paling atas berwarna keunguan merupakan indikator posisi terhadap arah radial, sedangkan warna di sisi kiri merupakan kedalaman teras. Gambar ini diambil dengan separuh dari diameter dengan nilai nol merupakan titik tengah dari teras dalam arah radial, sedangkan arah kebawah menggambarkan kondisi temperatur dalam kedalaman tertentu didalam teras hingga di dekat *outlet*.



Gambar 4.19 Spektrum aliran panas pada lapisan bahan bakar inti (*Kernel*)

Warna dalam gambar 4.19 ini menunjukkan indikator temperatur yang terdapat pada lapisan bahan bakar *Kernel* dengan perubahan temperatur mulai dari

merah ke arah hijau. Warna merah dalam spektrum ini menunjukkan nilai sekitar 1600 C. Sisi paling atas berwarna keunguan merupakan indikator posisi terhadap arah radial, sedangkan warna di sisi kiri merupakan kedalaman teras. Gambar ini diambil dengan separuh dari diameter dengan nilai nol merupakan titik tengah dari teras dalam arah radial, sedangkan arah kebawah menggambarkan kondisi temperatur dalam kedalaman tertentu didalam teras hingga di dekat *outlet*.

#### 4.2.PEMBAHASAN

Reaktor RGTT 200K merupakan reaktor dengan daya konseptual maju berdaya 200MW dengan sistem kogenerasi. Reaktor ini memiliki temperatur keluaran yang sangat tinggi sehingga dapat dimanfaatkan untuk banyak hal, seperti untuk memproduksi Hidrogen, insenerasi air laut, untuk pembangkit ,dll. Dengan nilai temperatur yang sangat tinggi inilah yang menyebabkan perlunya kajian yang sangat mendalam agar tetap dalam kondisi yang aman.

Untuk mengetahui temperatur bahan bakar dan teras yang terdapat pada RGTT 200K, maka dilakukan analisis karakteristik temperatur dalam kondisi tunak, kondisi ini adalah kondisi saat suatu reaktor berjalan dengan normal. Analisis akan terbatas hanya pada temperatur yang terdapat didalam teras reaktor RGTT 200K. Analisis dilakukan di area dalam teras dengan memperhatikan aspek arah aksial dan radial. Perhitungan yang dilakukan ini berdasarkan pada puncak daya dengan densitas daya maksimum sebesar 3 MWt/m<sup>3</sup>. Pemodelan yang serupa pernah dilakukan pada reaktor HTR-PM yang berada di Jerman. Berdasarkan Hasil Reaktor HTR-PM ini didapatkan beberapa kesimpulan untuk temperatur bahan bakar *Pebble*. Dari reaktor HTR-PM ditunjukkan bahwa bahan

bakar *Pebble* yang mengandung partikel TRISO mengalami kegagalan uji pemanasan pada temperatur sebesar 1600 C. Penelitian yang terjadi pada PBMR Afrika Selatan justru menunjukkan bahwa kegagalan uji pemanasan untuk bahan bakar terjadi pada temperatur sebesar 1472 C dan 1485 C. Pada penelitian untuk RGTT 200K dipilih temperatur bahan bakar *Pebble* maksimum terjadi pada 1600 C, yang ini berarti ketika dalam penelitian untuk RGTT 200K terjadi melebihi 1600 C akan terjadi kegagalan pada reaktor. Hal ini dilakukan agar integrasi bahan bakar tetap terjaga dan tidak melepaskan radioisotop nuklida Cs-137 yang membahayakan bagi tubuh manusia. Untuk program komputer yang digunakan adalah program *THERMIX* dengan sifat material seperti viskositas, densitas, kapasitas panas, konduktivitas panas bahan bakar *Pebble* diintegrasikan ke dalam program.

Perancangan geometri pada RGTT 200K telah dilakukan dengan pendekatan dan pemikiran logis. Dengan diasumsikan bahwa Bola absorber dimasukkan kedalam teras reaktor, dan pada posisi  $z=0$  terletak di daerah pendingin Helium masuk. Selanjutnya untuk titik  $z=587,2$  cm terletak di daerah pendingin Helium antara sisi masuk dan keluar teras, sedangkan pada titik  $z=943$  terletak di daerah pendingin keluar dari teras. Hal ini berbeda dengan yang digambarkan pada gambar 4.1, karena pada gambar 4.1 titik nol justru berada di dekat *outlet*. Perbedaan yang terjadi ini hanyalah masalah desain visual yang berbeda dalam penafsiran program VSOP, namun arti sebenarnya tetaplah seperti yang dipahami dalam hasil simulasi dengan titik 0cm adalah titik *inlet*. Hasil penelitian ini dikaji dalam arah radial dan aksial menunjukkan bahwa distribusi

temperaturnya konsisten dengan nilai temperatur yang meningkat sebagai fungsi jarak aksial, hal ini dapat ditunjukkan pada grafik gambar 4.5. Dari grafik distribusi temperatur yang diperoleh, terlihat bahwa nilai temperatur dalam teras mengalami peningkatan sebagai fungsi jarak aksial dan terdapat perbedaan yang teramati baik pada bagian pendingin Helium masuk, tengah dan keluar teras. Untuk daerah pendingin masuk teras ( $z=0$  cm;  $r=0$  cm), tengah ( $z=0$ ;  $r=78,8$  cm) dan pinggir teras ( $z=0$ cm;  $r=146$ cm), masing-masing sebesar 754,9 C; 744,1 C; dan 722,6 C. Untuk di titik ( $z = 943$  cm;  $r = 113,8$  cm) dan titik ( $z = 943$  cm;  $r = 122,5$  cm), diperoleh nilai temperatur masing-masing yaitu sebesar 910,2 C dan 902,2 C. Selanjutnya di daerah pendingin Helium antara masuk dan keluar teras, besarnya temperatur di pusat ( $z=587,2$  cm;  $r=0$  cm), tengah ( $z=587,2$  cm;  $r=78,8$  cm) dan pinggir teras ( $z=587,2$ cm,  $r=146$  cm), diperoleh masing-masing sebesar 964,1 C; 929,8 C dan 793,8 C. Untuk di titik ( $z = 587,2$ cm ;  $r = 113,8$  cm) dan titik ( $z = 587,2$ cm,  $r = 122,5$  cm), diperoleh nilai temperatur masing-masing yaitu sebesar 906,5 C dan 896,3 C. Nilai tertinggi ditunjukkan pada titik aksial 943 cm yang terletak di dekat Helium akan keluar dari teras dan dengan arah radial 0cm dari titik pusat.

Hasil distribusi temperatur padatan Grafit di dalam teras reaktor sangat dipengaruhi oleh banyak hal baik proses di dalam teras maupun di luar teras. Di dalam teras terjadi perpindahan panas secara konduksi antara *Pebble* dengan *Pebble* secara langsung dan juga antara *Pebble* dengan dinding secara langsung. Nilai dekat dengan dinding teras cenderung lebih rendah dikarenakan di sekeliling dari teras telah dipasang beberapa moderator sehingga selain mengurangi jumlah

neutron juga terjadi aliran panas dari *Pebble* ke dinding dengan diketahui bahwa dinding memiliki temperatur yang lebih rendah. Temperatur tertinggi di dalam teras terjadi di daerah dekat pintu keluar Helium ini terjadi karena Aliran dari pendingin Helium yang terus menerus memaksa untuk terjadinya aliran panas ke arah bawah menuju *outlet* dan tidak memberi kesempatan besar untuk Helium naik kembali ke pintu masuk Helium. Selain itu, terjadi pula perpindahan panas radiasi dan konveksi. Aliran panas radiasi terjadi antara *Pebble* dengan *Pebble* yang terletak berjauhan dan tidak dipengaruhi oleh aliran pendingin, sedangkan aliran panas konveksi terjadi antara *Pebble* dengan *Pebble* ataupun *Pebble* dengan dinding yang terletak berjauhan dengan dipengaruhi oleh aliran panas yang dibawa oleh pendingin. Distribusi temperatur yang terdapat pada padatan berupa grafit yang ditunjukkan pada gambar 4.5 dapat di gambarkan ulang seperti yang terdapat pada gambar 4.11

Spektrum pada gambar 4.11 yang diambil merupakan gambaran dari grafik yang terdapat pada gambar 4.5 dengan digambarkan berupa separuh dari lebar teras. Titik temperatur panas digambarkan melalui perubahan spektrum merah ke hijau. Warna merah menunjukkan area yang memiliki panas tertinggi dengan maksimumnya berada pada suhu 1000 C. Perbedaan temperatur yang terdapat pada padatan diakibatkan oleh aliran paksa pendingin Helium yang dimasukkan melalui *inlet* dan dikeluarkan melalui *outlet*. Hal ini dapat ditunjukkan melalui persamaan yang terdapat pada persamaan 2.8. Dari persamaan ini dapat diketahui bahwa temperatur padatan grafit sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti densitas material padatan, panas spesifik,

konduktivitas termal efektif, dan juga sumber panas nuklir. Dengan mengasumsikan bahwa densitas material padatan akan konstan dan panas spesifik konstan maka distribusi temperatur padatan akan sangat dipengaruhi oleh nilai konduktivitas termal efektif dan sumber panas nuklir.

Nilai dari sumber panas nuklir mengalami penurunan sesuai dengan arah ketinggiannya, semakin jauh dari *inlet* maka temperatur nuklir semakin rendah. Hal ini dapat ditunjukkan dalam gambar 4.10. Dari hasil yang ditunjukkan oleh gambar 4.10, terjadinya perbedaan temperatur solid material sangat dipengaruhi oleh konduktivitas termal efektif. Konduktivitas termal sangat dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya koefisien transfer panas yang terjadi antara padatan dan juga gas, luas permukaan zona *Pebble* serta temperatur fluida gas Helium. Distribusi temperatur fluida gas Helium dapat ditunjukkan melalui gambar 4.14.

Dengan masukan *inlet* Helium sebesar 600 C yang masuk ke dalam teras, di dalam teras yang berisi penuh oleh bola *Pebble* maka Helium mengalir melalui celah celah yang terjadi diantara *Pebble* dan juga dinding. Aliran fluida ini membawa panas dari atas ke arah bawah menuju *outlet* dikarenakan adanya tekanan yang ditimbulkan saat Helium masuk sehingga gas Helium tertekan ke arah bawah. Aliran Helium selanjutnya mengalir melewati celah-celah diantara *Pebble* serta mengalami perpindahan panas antara *Pebble* dengan Helium sehingga memiliki panas yang beragam. Semakin mendekati sisi *outlet* akan menyebabkan terjadinya penumpukan panas yang dibawa oleh Helium. Inilah salah satu yang menyebabkan terjadinya distribusi panas padatan tertinggi berada

di area dekat dengan *outlet*. Distribusi temperatur yang terdapat pada aliran gas Helium dapat di tunjukkan pada gambar 4.12 dan gambar 4.13.

Hasil analisis distribusi temperatur yang terjadi pada bahan bakar dibagi menjadi 5 analisis dengan berdasarkan lapisan bahan bakar TRISO. Sebuah partikel TRISO terdiri dari *Kernel* bahan bakar bola (seperti Oksida Uranium) dikelilingi oleh empat lapisan konsentris: (1) lapisan penyangga Karbon berpori (*Buffer*) untuk mengakomodasi gas fisi-produk, yang membatasi kontak pada lapisan luar, (2) sebuah Karbon Pirolitik interior lapisan (IPyC), (3) lapisan Silikon Karbida (SiC), dan (4) lapisan luar Karbon Pirolitik (OPyC). Lapisan Pirolitik menyusut dan merambat sebagai pengaruh iradiasi, sebagian mengimbangi tekanan dari produk fisi dalam interior serta membantu mengandung gas fisi. Silikon Karbida bertindak sebagai mekanisme penahanan untuk produk logam fisi. Lapisan ini memberikan struktur penahanan di inti untuk produk bahan bakar dan fisi radioaktif.

Hasil analisis temperatur bahan bakar TRISO pada bagian OPyC sebagai fungsi aksial di berbagai radius dalam teras RGTT 200K kondisi tunak ditunjukkan pada grafik gambar 4.6. Dari grafik distribusi temperatur OPyC ini terlihat bahwa nilai temperatur yang diperoleh mengalami peningkatan sebagai fungsi jarak aksial dan terdapat perbedaan temperatur yang teramati dengan baik di dalam teras. Untuk daerah pendingin Helium keluar teras, besarnya temperatur di pusat ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 0 \text{ cm}$ ), tengah ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 78,8 \text{ cm}$ ) dan pinggir ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 140 \text{ cm}$ ) teras, masing-masing sebesar  $971,9 \text{ C}$ ,  $936,7 \text{ C}$  dan  $883,1 \text{ C}$ . Untuk titik ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 131,2 \text{ cm}$ ) dan ( $z = 587,2 \text{ cm}$ ,  $r = 131,2 \text{ cm}$ ) diperoleh

nilai temperatur masing-masing sebesar 894,5 C dan 887,1 C. Selanjutnya di daerah pendingin Helium antara sisi masuk dan keluar teras, temperatur di pusat ( $z = 587,2\text{cm}$ ;  $r = 0\text{ cm}$ ), di tengah ( $z = 587,2\text{cm}$ ;  $r = 78,8\text{ cm}$ ) dan di pinggir ( $z = 587,2\text{ cm}$ ;  $r = 140\text{ cm}$ ) teras, masing-masing sebesar 964,1 C, 929,8 C dan 877,7C. Untuk lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada gambar 4.15.

Hasil ini sebenarnya tidaklah jauh berbeda dengan hasil yang terjadi pada temperatur teras, ini dikarenakan letak dari OPyC berada di posisi paling luar dari TRISO dan di dalam *Pebble* pun hanya dibatasi oleh grafit. Ini menyebabkan temperatur dari *Pebble* merupakan rata-rata dari nilai OPyC dan grafit inilah yang akan secara langsung berinteraksi panas dengan pendingin Helium.

Hasil analisis temperatur bahan bakat TRISO pada bagian SiC sebagai fungsi aksial di berbagai radius dalam teras RGTT 200K kondisi tunak ditunjukkan pada grafik gambar 4.7. Dari grafik distribusi temperatur SiC ini terlihat bahwa nilai temperatur yang diperoleh mengalami peningkatan sebagai fungsi jarak aksial dan terdapat perbedaan temperatur yang teramati dengan baik di dalam teras. Untuk daerah pendingin Helium keluar teras, besarnya temperatur di pusat ( $z = 943\text{ cm}$ ;  $r = 0\text{ cm}$ ), tengah ( $z = 943\text{ cm}$ ;  $r = 78,8\text{ cm}$ ) dan pinggir ( $z = 943\text{ cm}$ ;  $r = 140\text{ cm}$ ) teras, masing-masing sebesar 975 C, 937,6 C dan 883,3 C. Untuk titik ( $z = 943\text{ cm}$ ;  $r = 131,2\text{ cm}$ ) dan ( $z = 587,2\text{ cm}$ ,  $r = 131,2\text{ cm}$ ) diperoleh nilai temperatur masing-masing sebesar 894,9 C dan 892,5 C. Selanjutnya di daerah pendingin Helium antara sisi masuk dan keluar teras, temperatur di pusat ( $z = 587,2\text{cm}$ ;  $r = 0\text{ cm}$ ), di tengah ( $z = 587,2\text{cm}$ ;  $r = 78,8\text{ cm}$ ) dan di pinggir ( $z =$

587,2 cm;  $r = 140$  cm) teras, masing-masing sebesar 975,9 C, 939,9 C dan 883,1C. Untuk lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada gambar 4.16.

Hasil untuk SiC ini mulai menunjukkan perbedaan dengan hasil untuk OPyC, karena pada peningkatan temperatur tidak terjadi hanya sesuai arah aksial. Hal ini dikarenakan terjadi transfer panas dari IPyC tidak terpengaruh oleh aliran panas luar. Yang terjadi adalah murni dari hasil panas reaksi nuklir yang terjadi pada inti.

Hasil analisis temperatur bahan bakar TRISO pada bagian IPyC sebagai fungsi aksial di berbagai radius dalam teras RGTT 200K kondisi tunak ditunjukkan pada grafik gambar 4.8. Dari grafik distribusi temperatur IPyC ini terlihat bahwa nilai temperatur yang diperoleh mengalami peningkatan sebagai fungsi jarak aksial dan terdapat perbedaan temperatur yang teramati dengan baik di dalam teras. Untuk daerah pendingin Helium keluar teras, besarnya temperatur di pusat ( $z = 943$  cm;  $r = 0$  cm), tengah ( $z = 943$  cm;  $r = 78,8$  cm) dan pinggir ( $z = 943$  cm;  $r = 140$  cm) teras, masing-masing sebesar 981 C, 939,9 C dan 883,7 C. Untuk titik ( $z = 943$  cm;  $r = 131,2$  cm) dan ( $z = 587,2$  cm,  $r = 131,2$  cm) diperoleh nilai temperatur masing-masing sebesar 895,6 C dan 902,8 C. Selanjutnya di daerah pendingin Helium antara sisi masuk dan keluar teras, temperatur di pusat ( $z = 587,2$ cm;  $r = 0$  cm), di tengah ( $z = 587,2$ cm;  $r = 78,8$  cm) dan di pinggir ( $z = 587,2$  cm;  $r = 140$  cm) teras, masing-masing sebesar 998,4 C, 959,3 C dan 893,5C. Untuk lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada gambar 4.17.

Pada IPyC temperatur peningkatan juga terjadi tidak berbanding lurus dengan peningkatan nilai aksial. Ini disebabkan karena pada lapisan IPyC

dipengaruhi hanya karena reaksi inti yang terjadi akibat penembakan neutron pada inti  $UO_2$ . Ketika semakin tinggi nilai aksial (mendekati *outlet*) maka temperatur *Pebble* dan pendingin Helium di dalam teras reaktor semakin tinggi akibat dari aliran Helium yang menuju ke arah bawah hingga keluar ke sisi *outlet*, sedangkan temperatur IPyC justru memiliki temperatur yang menunjukkan kecenderungan semakin rendah dikarenakan tidak adanya terpengaruh dari aliran pendingin Helium.

Hasil analisis temperatur bahan bakat TRISO pada bagian *Buffer* sebagai fungsi aksial di berbagai radius dalam teras RGTT 200K kondisi tunak ditunjukkan pada grafik gambar 4.9. Dari grafik distribusi temperatur *Buffer* ini terlihat bahwa nilai temperatur yang diperoleh mengalami peningkatan sebagai fungsi jarak aksial dan terdapat perbedaan temperatur yang teramati dengan baik di dalam teras. Untuk daerah pendingin Helium keluar teras, besarnya temperatur di pusat ( $z = 943$  cm;  $r = 0$  cm), tengah ( $z = 943$  cm;  $r = 78,8$  cm) dan pinggir ( $z = 943$  cm;  $r = 140$  cm) teras, masing-masing sebesar 983,9 C, 940,1 C dan 883,9 C. Untuk titik ( $z = 943$  cm;  $r = 131,2$  cm) dan ( $z = 587,2$  cm,  $r = 131,2$  cm) diperoleh nilai temperatur masing-masing sebesar 895,9 C dan 908 C. Selanjutnya di daerah pendingin Helium antara sisi masuk dan keluar teras, temperatur di pusat ( $z = 587,2$ cm;  $r = 0$  cm), di tengah ( $z = 587,2$ cm;  $r = 78,8$  cm) dan di pinggir ( $z = 587,2$  cm;  $r = 140$  cm) teras, masing-masing sebesar 1009,6 C, 969 C dan 898,7 C. Untuk lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada gambar 4.18.

Sama Halnya dengan yang terjadi pada *Buffer* ini, temperatur menunjukkan hasil yang mirip dengan grafik yang ditunjukkan oleh IPyC karena

semakin dekat dengan inti maka temperatur lapisan akan lebih didominasi oleh hasil panas dari reaksi inti. Dengan begitu reaksi yang terjadi pada inti adalah murni reaksi inti dan tidak terpengaruh oleh kondisi luar. Selain itu fungsi dari *Buffer* juga sebagai penyangga agar inti tetap berbentuk dan berada dalam lapisan TRISO dengan baik.

Hasil analisis temperatur bahan bakar TRISO pada bagian *Kernel* sebagai fungsi aksial di berbagai radius dalam teras RGTT 200K kondisi tunak ditunjukkan pada grafik gambar 4.10. Dari grafik distribusi temperatur *Kernel* ini terlihat bahwa nilai temperatur yang diperoleh mengalami peningkatan sebagai fungsi jarak aksial dan terdapat perbedaan temperatur yang teramati dengan baik di dalam teras. Untuk daerah pendingin Helium keluar teras, besarnya temperatur di pusat ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 0 \text{ cm}$ ), tengah ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 78,8 \text{ cm}$ ) dan pinggir ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 140 \text{ cm}$ ) teras, masing-masing sebesar  $984,3 \text{ C}$ ,  $940,2 \text{ C}$  dan  $883,9 \text{ C}$ . Untuk titik ( $z = 943 \text{ cm}$ ;  $r = 131,2 \text{ cm}$ ) dan ( $z = 587,2 \text{ cm}$ ,  $r = 131,2 \text{ cm}$ ) diperoleh nilai temperatur masing-masing sebesar  $896 \text{ C}$  dan  $908,6 \text{ C}$ . Selanjutnya di daerah pendingin Helium antara sisi masuk dan keluar teras, temperatur di pusat ( $z = 587,2 \text{ cm}$ ;  $r = 0 \text{ cm}$ ), di tengah ( $z = 587,2 \text{ cm}$ ;  $r = 78,8 \text{ cm}$ ) dan di pinggir ( $z = 587,2 \text{ cm}$ ;  $r = 140 \text{ cm}$ ) teras, masing-masing sebesar  $1010,9 \text{ C}$ ,  $970,1 \text{ C}$  dan  $899,3 \text{ C}$ . Untuk lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada gambar 4.19.

Pada setiap Lapisan dari TRISO memperlihatkan distribusi temperatur yang berbeda. Temperatur yang berbeda diakibatkan oleh distribusi panas pada TRISO yang berasal dari reaksi fisi akan mengalir melalui beberapa lapisan-lapisannya. Lapisan yang berbeda serta arah menjauhi sumber panas dari bahan

bakar *Kernel* menyebabkan distribusinya juga mengalami perubahan. Pada elemen bahan bakar ini, distribusi temperatur diberikan oleh hukum kekekalan energi yang dinyatakan dalam fungsi waktu. Perhitungan distribusi ini ditunjukkan melalui persamaan 2.9. dan persamaan 2.6. Dan dengan menggunakan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa distribusi panas yang terjadi pada lapisan bahan bakar dipengaruhi oleh nilai panas spesifik, densitas material lapisan, konduktivitas termal efektif dan sumber panas hasil reaksi fisi nuklir. Nilai panas spesifik dan juga konduktivitas termal bergantung pada temperatur lokal yang artinya temperatur dari aliran pendingin Helium diabaikan. Hal ini terjadi karena bahan bakar TRISO terbungkus oleh bola *Pebble*, sehingga aliran pendingin Helium tidak melewati celah-celah yang terdapat pada bahan bakar TRISO.

#### 4.3. NUKLIR DALAM TINJAUAN AL QURAN

Di dalam al Quran telah disebutkan kata-kata matahari dengan menggunakan kata *syams* sebanyak 11 kali, sedangkan al Quran juga berbicara tentang Matahari dan bulan secara bersamaan sebanyak 20 kali. Keistimewaan matahari juga terlihat dari dijadikannya sebagai salah satu nama surat dalam al Quran. Berikut beberapa ayat al Quran yang berkenaan dengan matahari dalam surat Yunus[10]:5,

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ

وَالْحِسَابَ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ ﴿٥﴾

“Dia-lah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya dan ditetapkan-Nya manzilah-manzilah (tempat-tempat) bagi perjalanan bulan itu,

*supaya kamu mengetahui bilangan tahun dan perhitungan (waktu). Allah tidak menciptakan yang demikian itu melainkan dengan haq (kebenaran). Dia menjelaskan tanda-tanda (kebesaran-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui.”(QS. Yunus[10]:5)*

Ayat 5 dalam surat Yunus merupakan ayat yang menjelaskan besarnya kuasa Allah swt dalam mencipta, menguasai dan mengatur alam raya. Melalui ayat ini Allah swt menegaskan bahwa *Dia-lah yang menjadikan matahari bersinar (dliya’)* dan *bulan bercahaya (nur)* serta *ditetapkannya manzilah-manzilah* (jalur-jalur edar) yang merupakan tempat peredaran dari bulan dan matahari, *supaya mereka mengetahui bilangan tahun dan perhitungan (waktu)*. Seperti yang telah diketahui bahwa periode bulan dalam mengelilingi (revolusi terhadap) bumi adalah selama 1 bulan atau sekitar 30 hari, sedangkan periode bumi mengelilingi (revolusi terhadap) matahari adalah selama 1 tahun atau sekitar 365,25 hari. Dengan sangat bijak Allah swt memberikan petunjuk kepada manusia agar mereka mengetahui bilangan waktu untuk dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya.

Kata *dliya’* (ضياء) diartikan dengan bersinar. Di dalam kitab *Lisan al Araby* kata *dliya’* diartikan sebagai cahaya yang sangat terang. Ada penggunaan kata yang berbeda dalam menjelaskan cahaya yaitu kata *dliya’* ini biasa digunakan untuk cahaya yang menghasilkan cahaya sendiri, sedangkan untuk cahaya yang dihasilkan dari pantulan, biasa digunakan kata *nur*. Dalam Tafsir al Misbah disebutkan bahwa salah seorang penulis tafsir tentang ayat-ayat kauniyah yaitu Hanafi Ahmad mengatakan bahwa al Quran menggunakan kata-kata *dliya’* dalam berbagai bentuknya untuk benda-benda yang cahayanya bersumber dari dirinya sendiri. Al Quran misalnya menggunakan kata tersebut pada api dalam surat al

Baqarah [1]:17, kilat dalam surat al Baqarah[1]: 20, dan juga untuk minyak Zaitun dalam surat an Nur[24]:5. Selain pendapat tersebut, dikemukakan pula pendapat asy Sya'rowi yang dikutip dalam tafsir al Misbah bahwa ayat ini menamai sinar matahari dengan kata *dliya'* karena cahayanya menghasilkan panas atau kehangatan, sedangkan kata *nur* berarti cahaya yang tidak terlalu besar dan juga tidak menghasilkan panas atau kehangatan. Dari dua pendapat ini dapat disimpulkan bahwa *dliya'* diartikan sebagai suatu cahaya yang bersumber dari dirinya sendiri dan terdapat proses di dalam pembentukannya seperti hasil emisi berupa energi panas dan gas, sedangkan kata *nur* digunakan untuk cahaya hasil pantulan. Ada hal unik lainnya yakni kata *dliya'* selain berarti tunggal juga berarti jamak sehingga dapat pula sinar ini dipahami sebagai satu sinar maupun banyak sinar.

Seperti yang telah diketahui bahwa matahari merupakan bintang yang terdekat dari bumi. Jarak bumi dengan matahari adalah 8 menit 19 detik cahaya atau sekitar  $1,496 \times 10^8$  Km. Bentuk dari matahari nyaris bulat dan terdiri dari plasma panas bercampur medan magnet, dengan diameternya sekitar 1.392.684 Km atau kira-kira 109 kali diameter bumi. Massa dari matahari sekitar  $2 \times 10^{30}$  Kg atau sekitar 330.000 kali massa bumi dengan terdiri dari kira-kira 73% Hidrogen, 24% Helium dan sisanya 3 % berupa Oksigen, Karbon, Besi, Neon, Nitrogen, Silikon, Mgnesium dan Belerang (dengan data diambil pada tahun 1979).

Dengan bentuk yang berupa plasma dan medan magnet, matahari menghasilkan energi yang sangat besar. Energi matahari yang dihasilkan antara lain energi panas dari proses termonuklir yang terdapat dalam pada matahari, sinar

yang dapat menerangi sampai ke bumi merupakan hasil dari proses termonuklir pada matahari (perlu dipahami bahwa sinar yang dimaksudkan untuk matahari secara ilmiah bukan hanya sinar tampak saja, melainkan juga berupa sinar- sinar lain seperti sinar x, sinar ultraviolet dan banyak lagi sinar lainnya), energi tarikan berupa gaya gravitasi yang menyebabkan bumi dan beberapa planet yang berada di dekatnya melakukan revolusi terhadap matahari, dan banyak lagi energi lainnya. Dari beberapa energi yang terjadi maupun yang dihasilkan, jelas dapat dipahami bahwa matahari pantas disebut sebagai *dliya'* karena syarat *dliya'* telah terpenuhi.

Energi yang dihasilkan oleh matahari hingga sampai di bumi dimanfaatkan oleh manusia. Potensi dari energi matahari masih sangatlah besar mengingat energi dari matahari bersifat terus menerus hingga bahan bakar dari matahari habis atau terjadinya ledakan supernova. Energi matahari berupa energi panas telah banyak sekali dimanfaatkan oleh manusia seperti untuk menjemur pakaian, hasil pertanian dan lain-lain. Sinar yang sampai ke bumi dengan melewati ozon ( $O_3$ ) menyebabkan beberapa sinar yang berbahaya dapat tersaring sehingga memiliki banyak sekali manfaat seperti vitamin untuk tulang dan kulit, untuk fotosintesis tumbuhan. Sinar matahari juga dapat menghasilkan listrik seperti yang telah ditemukan baru-baru ini, sinar ditangkap oleh suatu perangkat pengubah sinar menjadi energi listrik. Selain yang telah disebutkan, masih banyak sekali pengaruh keberadaan matahari terhadap bumi lainnya seperti terjadinya siang dan malam, perubahan iklim dan cuaca, terjadinya angin, dan sebagainya.

Selain kata *dliya'* al Quran juga memiliki kata lain untuk mensifati matahari yaitu dengan menggunakan kata *sirojun* ( سراج ) seperti yang tercantum dalam surat Nuh[71]:16,

وَجَعَلَ الْقَمَرَ فِيهِنَّ نُورًا وَجَعَلَ الشَّمْسَ سِرَاجًا ﴿١٦﴾

“Dan Allah menciptakan padanya bulan sebagai cahaya dan menjadikan matahari sebagai pelita?”(QS. Nuh[71]:16)

Dengan ayat sebelumnya yang menjelaskan tentang penciptaan 7 langit berlapis-lapis (bertingkat) selanjutnya Allah swt berfirman dalam surat Nuh bahwa *Dia yang telah menjadikan padanya bulan sebagai nur dan menjadikan matahari sebagai pelita*. Sekali lagi al Quran menggunakan kata *nur* untuk mensifati bulan sedangkan untuk matahari digunakan kata *sirojun*.

Kata *fihinna* ( فِيهِنَّ ) berbentuk jamak. Bentuk ini merujuk kembali pada ayat sebelumnya yaitu pada kata ( سبع سموات ) yakni berarti 7 langit yang juga berbentuk jamak. Secara harfiah, hal ini berarti Allah swt menjadikan bulan bercahaya pada ketujuh lapisan (tingkatan) langit. Banyak terjadi penafsiran yang berbeda dari para ulama, disebutkan di dalam tafsir al Misbah bahwa dalam surat Nuh[71]:16 akan lebih baik jika dipahami bahwa ketujuh langit atau alam raya ini atau sekian banyak bulan di alam raya, masing-masing memantulkan cahaya yang diperolehnya dari bintang-bintang atau planet-planet lain mengingat bahwa berdasarkan penelitian astronomis disebutkan bahwa hampir tiap planet di tiap-tiap sistem tata surya memiliki satelit alam yang dalam hal ini memiliki fungsi yang sama dengan bulan, bahkan bulan juga merupakan satelit. Sedangkan menurut Agus Mustofa disebutkan bahwa 7 langit dapat memiliki beberapa pemahaman, yang pertama berarti 7 langit yang sebenarnya yakni langit diartikan

memiliki lapisan-lapisan yang berjumlah 7 lapisan dengan asumsi bahwa 7 lapisan tersebut seperti lapisan pada roti lapis dengan tiap lapisan memiliki luasan tersendiri. Pemahaman yang kedua adalah dengan menganggap bahwa 7 langit adalah 7 dimensi langit yang berarti bahwa langit dipisahkan oleh dimensi, semakin tinggi dimensinya maka akan dapat melihat dimensi yang terdapat dibawahnya seperti seseorang yang berada dalam dimensi 1 tidak akan dapat melihat seseorang yang berada di dimensi 2 dan seterusnya, namun berbeda dengan yang berada di dimensi 7 akan dapat melihat semua dimensi dibawahnya (1,2,3,4,5,6,7). Pemahaman ketiga adalah 7 langit merupakan lapisan dalam atmosfer yang berjumlah 7 tingkat, karena dalam surat Nuh[71]:16 dikatakan bahwa cahaya yang berhubungan dengan matahari dan bulan tidak lain hanya berada diantara bumi yakni atmosfer.

( وجعل الشمس سراجا ) yang berarti *Dia menjadikan matahari sebagai pelita.*

Kata *sirojun* dapat diartikan sebagai lampu yang terang yang digunakan untuk menerangi di malam hari. Sebagai contoh dalam suatu cerita dikatakan bahwa ( عمر سراج اهل الجنة ) yang artinya "*Umar adalah lampunya ahli surga*". Beberapa ulama mengatakan bahwa 40 orang yang sempurna dengan iman (yang kesemuanya ahli surga) dan sahabat Umar bagaikan lampu diantara mereka karena mereka berpegang teguh dengan keislaman sahabat Umar dan mereka menampakkan pada manusia, mereka menampakkan keislamannya setelah mereka berbisik dengan ketakutan seperti juga halnya sinar lampu yang menunjukkan pada orang yang berjalan.

*Siroj* adalah matahari, disebutkan bahwa (وداعيا إلى الله بإذنه و سراجا منيرا) yang artinya “*dan menyeru kepada allah dengan izin-Nya beserta lampu yang amat terang*”. sesungguhnya lampu yang di maksud hanya sesuatu yang digunakan untuk menerangi atau seperti matahari dalam hal sinar dan penerangan, petunjuk adalah lampu bagi orang mukmin dalam penyerupaannya. Sehingga dapat dikatakan bahwa sebenarnya antara kata *dliya*’ dan *sirojun* tidak memiliki perbedaan yang mencolok, yakni sinar yang berasal dari diri sendiri.

Ayat-ayat al Quran sebenarnya memberikan keterangan dan penjelasan yang tepat pada sasaran serta memiliki arti yang sangat dalam. Ilmu yang terdapat di dalam al Quran adakalanya bersifat eksplisit (mudah dipahami secara langsung) dan adakalanya bersifat implisit (tidak dapat dipahami secara langsung) yakni diperlukan perenungan yang mendalam. Allah swt berfirman dalam surat Ibrahim [14]:52 dan surat Shaad[38]:29,

هَذَا بَلَّغٌ لِلنَّاسِ وَلِيُنذَرُوا بِهِ ۖ وَلِيَعْلَمُوا أَنَّمَا هُوَ إِلَهُهُ وَاحِدٌ ۚ وَلِيَذَّكَّرَ أُولُو الْأَلْبَابِ ﴿٥٢﴾

“(Al Quran) ini adalah penjelasan yang sempurna bagi manusia, dan supaya mereka diberi peringatan dengan-Nya, dan supaya mereka mengetahui bahwasanya Dia adalah Tuhan yang Maha Esa dan agar orang-orang yang berakal mengambil pelajaran.”(QS. Ibrahim[14]:52)

كِتَابٌ أَنْزَلْنَاهُ إِلَيْكَ مُبْرَكٌ لِيَدَّبَّرُوا آيَاتِهِ ۖ وَلِيَتَذَكَّرَ أُولُو الْأَلْبَابِ ﴿٢٩﴾

“Ini adalah sebuah kitab yang Kami turunkan kepadamu penuh dengan berkah supaya mereka memperhatikan ayat-ayatnya dan supaya mendapat pelajaran orang-orang yang mempunyai fikiran.”(QS. Shaad[38]:29)

Berdasarkan kedua ayat ini, menggunakan akal pikiran di dalam memahami isi kandungan al Quran sangatlah penting. Ketika suatu ayat kauniyah masih belum mampu dipahami sedangkan suatu kejadian alam terjadi sehingga memunculkan makna sementara untuk memahaminya, maka dapatlah itu diartikan

sejalan dengan hasilnya asalkan tidak bersifat memaksa dan menyebabkan semakin berimannya seseorang. Seperti apa yang pernah diceritakan oleh Prof. Abdus Salam yang merupakan seorang muslim fisikawan yang menemukan teori medan elektro lemah terpadu (*unified electroweak field theory*), dikatakan bahwa asal usul penemuannya yakni diilhami dari ayat-ayat al Quran, Dia memahami bahwa semua hal itu berasal dari satu yakni *Laailaahailallah*. Karena berasal dari yang satu, maka gaya di alam mulanya juga merupakan satu gaya terpadu sebelum akhirnya terurai saat energi alam semesta mengalami penurunan.

Dalam al Quran tidak terdapat kata khusus yang menjelaskan tentang nuklir, namun jika diperluas maka apa yang terjadi di dalam matahari sangatlah unik. matahari dapat bersinar dengan sangat terangnya dan memiliki panas yang dapat membakar semua benda yang berada di dekatnya. Allah swt berfirman dalam surat Yunus[10]:101,

قُلْ أَنْظَرُوا مَاذَا فِي السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَمَا تُغْنِي الْآيَاتُ وَالنُّذُرُ عَنْ قَوْمٍ لَا يُؤْمِنُونَ ﴿١٠١﴾

*“Katakanlah: Perhatikanlah apa yang ada di langit dan di bumi. tidaklah bermanfaat tanda kekuasaan Allah dan Rasul-rasul yang memberi peringatan bagi orang-orang yang tidak beriman”.(QS.Yunus[10]:101)*

Dengan memperhatikan perbedaan matahari yang bersinar dan bulan yang bercahaya tentulah memunculkan pertanyaan besar dalam benak, kenapa matahari bersinar (*dliya’* atau *siroj*)?

Seseorang muslim dan mukmin dituntut untuk memperhatikan apa yang terdapat di sekitarnya, baik yang terdapat di langit maupun apa yang ada di bumi. Hal ini diperintahkan Allah swt agar mereka dapat mempertebal keimanan dengan memahami segala kekuasaan Allah swt. Dengan menggunakan akal, maka

pertanyaan kenapa matahari bersinar dapat dipelajari lebih lanjut. Menurut penelitian yang telah dilakukan maka sinar matahari didapatkan dari hasil reaksi yang disebut dengan reaksi termonuklir. Masih banyak lagi hasil yang diakibatkan oleh reaksi ini dalam proses matahari, seperti terbentuknya badai matahari, spot dan sebagainya, ini merupakan sesuatu yang sangatlah luar biasa. Allah swt berfirman dalam surat an Naba[78]:13,

وَجَعَلْنَا سِرَاجًا وَهَّاجًا ﴿١٣﴾

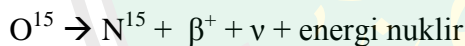
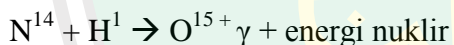
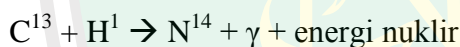
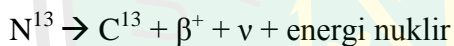
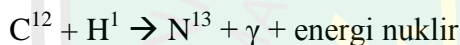
“Dan Kami jadikan pelita yang Amat terang (matahari)” (QS. An Naba[78]:13)

Jika dipahami secara mendalam maka pelita yang amat terang akan dihasilkan dari energi yang sangatlah besar. Besarnya energi ini bukanlah energi yang terjadi di bumi, dan hal yang paling mungkin terjadi adalah reaksi nuklir.

Reaksi nuklir yang terjadi dalam matahari dianggap yang paling tepat karena melihat komponen penyusun dari matahari mengindikasikan terjadinya reaksi inti berupa reaksi nuklir fusi. Reaksi ini menghasilkan energi yang sangat besar. Hingga saat ini belum ada reaksi lain (yang telah dipelajari manusia) yang melebihi reaksi nuklir, reaksi ini sangat cocok jika terjadi di matahari karena memiliki waktu paruh yang lama. Anggapan ini telah mematahkan prediksi yang dikemukakan oleh Helmholtz. Menurut Helmholtz energi matahari berasal dari peristiwa kontraksi dan pengerutan yang disebabkan oleh perubahan gravitasi matahari. Berdasarkan teori ini volume gas yang terkompresi karena kontraksi dan pengerutan akan melepaskan energi, dengan begitu maka volume gas yang terdapat pada matahari akan semakin kecil. Berdasarkan teori ini maka matahari

akan dapat memancarkan energinya selama kurang lebih 20 juta- 25 juta tahun sejak pertama kali kontraksi.

Reaksi nuklir adalah prediksi yang paling diterima oleh ilmuwan saat ini, karena paling tidak matahari telah berumur 5 milyar tahun. Reaksi yang terjadi adalah reaksi nuklir fusi yaitu penggabungan gas Hidrogen menjadi gas Helium, reaksi fusi rantai proton, dan reaksi fusi rantai Karbon-Nitrogen. Semua reaksi ini menghasilkan energi yang amat sangat tinggi, akan tetapi reaksi fusi rantai Karbon-Nitrogen memiliki energi yang paling tinggi diantara 3 reaksi fusi lainnya. Berikut bentuk reaksinya



Dari semua penjelasan tentang matahari, dapat dipahami bahwa reaksi termonuklir sebenarnya telah tersirat dalam al Quran dengan bahasa ”*Pelita yang amat terang* (سراجا وهاجا)”. Karena untuk menggambarkan begitu hebatnya sinar atau panas yang ada di matahari hanya dapat dijelaskan dengan reaksi termonuklir.

Mengenai peristiwa nuklir ini maka sebenarnya manusia telah memanfaatkan hasil dari reaksi nuklir, namun sampai saat ini masih sebatas reaksi nuklir fisi. Reaksi nuklir fisi dihasilkan dari unsur-unsur yang termasuk dalam unsur radioaktif seperti Uranium, Plutonium, dan lain sebagainya. Meski ini

dianggap sebagai reaksi yang sangat berbahaya, ternyata dengan memberikan sistem dan lingkungan yang tepat akan membuat reaksi nuklir ini dapat dijinakkan. Terbukti dengan telah dibangunnya banyak reaktor nuklir yang sampai saat ini masih beroperasi. Dengan menerapkan sistem keamanan dan keselamatan berlapis maka reaksi ini dapat bermanfaat dalam menyediakan energi yang dibutuhkan oleh manusia modern salah satunya adalah listrik.

Perlu kajian yang mendalam untuk perencanaan dalam membangun suatu reaktor, salah satunya adalah dengan melakukan simulasi. Setelah kajian teoritik yang terjadi dalam reaktor dan sistem pendukungnya maka simulasi akan mempermudah peneliti untuk memahami faktor yang telah cukup dan faktor yang masih kurang serta perlu ditingkatkan. Dengan melakukan semua simulasi dari reaktor ini akan memperhemat biaya karena tidak perlu melakukan penelitian yang berskala besar. Dengan memanfaatkan banyaknya data yang telah didapatkan dari penelitian sebelumnya maka simulasi telah dianggap menjadi pendekatan yang sangat baik yang tentunya didukung dengan banyak hal pendukung hasil yang baik.

Sungguh matahari dan segala proses di dalamnya merupakan kajian yang membuka mata agar dapat menjadi lebih dekat kepada sang pencipta. Bukankah Allah swt telah bersumpah dengan menggunakan matahari seperti yang terdapat dalam surat as Syams[91]:1-9,

وَالشَّمْسِ وَضُحَاهَا ﴿١﴾ وَالْقَمَرِ إِذَا تَلَّهَا ﴿٢﴾ وَالنَّهَارِ إِذَا جَلَّهَا ﴿٣﴾ وَاللَّيْلِ إِذَا يَغْشَاهَا ﴿٤﴾  
وَالسَّمَاءِ وَمَا بَنَاهَا ﴿٥﴾ وَالْأَرْضِ وَمَا طَحَاهَا ﴿٦﴾ وَنَفْسٍ وَمَا سَوَّاهَا ﴿٧﴾ فَأَلْهَمَهَا فُجُورَهَا  
وَتَقْوَاهَا ﴿٨﴾ قَدْ أَفْلَحَ مَنْ زَكَّاهَا ﴿٩﴾

“(1.) Demi matahari dan cahayanya di pagi hari, (2.) Dan bulan apabila mengiringinya, (3.) Dan siang apabila menampakkannya, (4.) Dan malam apabila menutupinya, (5.) Dan langit serta pembinaannya, (6.) Dan bumi serta penghamparannya, (7.) Dan jiwa serta penyempurnaannya (ciptaan), (8.) Maka Allah mengilhamkan kepada jiwa itu (jalan) kefasikan dan ketakwaannya, (9.) Sesungguhnya beruntunglah orang yang mensucikan jiwa itu” (QS. as Syams[91]:1-9).

Dikatakan bahwa dengan mempelajari segala proses pada matahari maka sungguh beruntunglah orang yang mensucikan jiwa yakni orang yang merenungkan ciptaan Allah swt sehingga meningkatlah ketakwaan seseorang. Bukankah Allah swt telah menciptakan segala sesuatu dengan tidak ada yang sia-sia, seperti firman Allah swt dalam surat Ali Imran[3]:190-191,

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَأَخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي الْأَلْبَابِ ﴿١٩٠﴾ الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَمًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَذَا بَطْلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ ﴿١٩١﴾

“(190.) Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal, (191.) (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata): "Ya Tuhan Kami, Tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha suci Engkau, Maka peliharalah Kami dari siksa neraka.” (QS. Ali Imran[3]:190-191)

Sungguh Allah swt menciptakan segala sesuatu ini pasti memiliki suatu manfaat.

Maha Benar Allah swt dengan segala firman-Nya.

## **BAB V PENUTUP**

### **5.1. KESIMPULAN**

Konfigurasi posisi teras dan bahan bakar *pebble*  $UO_2$  telah ditentukan sedemikian rupa dengan tinggi teras 943 cm dan jari-jari teras (dengan model tabung) sebesar 150 cm. Posisi bahan bakar di dalam teras digunakan acak dengan asumsi bahwa ketika bola-bola *pebble* dimasukkan secara acak dengan jumlah bola 360 ribu dan dengan geometri bahan bakar (diameter 6 cm) menempati posisi secara rapi dan sejajar dalam reaktor. Dengan perhitungan suatu reaktor melalui simulasi menggunakan VSOP 94 maka dilakukan suatu *meshing* sebagai titik uji temperatur teras. titik-titik ini berada pada daerah aksial 0 cm; 83,8 cm; 16,7 cm; 251,7 cm; 335,5 cm; 419,3 cm; 503,4 cm; 587,2 cm; 671 cm; 754,8 cm; 838,9 cm; 922,7 cm; 943 cm dan untuk arah radial 0 cm; 8,3 cm; 16,7 cm; 25 cm; 35 cm; 43,8 cm; 52,5 cm; 61,2 cm; 70 cm; 78,8 cm; 87,5 cm; 96,2 cm; 105 cm; 113,8 cm; 122,5 cm; 131,2 cm; 140 cm; 146 cm. Titik-titik ini di uji untuk mewakili beberapa temperatur disekitarnya yang tidak berada tepat pada titik uji.

Dari beberapa titik uji ini selanjutnya dilakukan perhitungan yang cukup rumit melalui program VSOP 94, yaitu dengan merancang ulang bentuk desain reaktor RGTT 200K. Rancangan yang dilakukan dengan membentuk desain reaktor ke dalam VSOP 94, baik desain geometri teras, lapisan teras, bahan bakar beserta lapisan-lapisannya. Seluruh detail rancangan ini sangatlah penting dalam simulasi ini karena mewakili bentuk sebenarnya sehingga dapat dilanjutkan dengan

menempatkan beberapa kondisi dalam reaktor seperti nilai tekanan, temperatur inlet, kecepatan aliran helium dan sebagainya.

Hasil dari simulasi ini menunjukkan beberapa poin penting diantaranya temperatur terendah didalam teras dan bahan bakar. Nilai temperatur tertinggi yang berada dalam teras terletak pada ( $z=943$  cm;  $r=0$  cm) dengan temperatur sebesar 971,9 C, sedangkan temperatur terendah terletak pada ( $z=0$ ;  $r= 87,5$ ) dengan temperatur sebesar 741,9 C. OpyC memiliki temperatur tertinggi sebesar 971,9 C pada posisi ( $z=943$ ;  $r=0$  cm) dan temperatur terendahnya berada pada ( $z=0$ ;  $r= 87,5$ ) dengan besar temperaturnya sebesar 741,9 C. SiC memiliki temperatur tertinggi sebesar 1022,9 C pada posisi ( $z= 83,8$ cm;  $r=113,8$  cm) dan temperatur terendahnya berada pada ( $z=0$ ;  $r= 87,5$ ) dengan besar temperaturnya sebesar 872,7 C. IpyC memiliki temperatur tertinggi sebesar 1326,1 C pada posisi ( $z=0$ cm;  $r=113,8$  cm) dan temperatur terendahnya berada pada ( $z=943$  cm;  $r= 140$  cm) dengan besar temperaturnya sebesar 883,7 C. *Buffer* memiliki temperatur tertinggi sebesar 1518 C pada posisi ( $z=0$  cm;  $r=113,8$  cm) dan temperatur terendahnya berada pada ( $z=943$ ;  $r= 140$ ) dengan besar temperaturnya sebesar 883,9. *kernel* memiliki temperatur tertinggi sebesar 1540,5 C pada posisi ( $z=0$  cm;  $r=113,8$  cm) dan temperatur terendahnya berada pada ( $z=943$ ;  $r= 140$ ) dengan besar temperaturnya sebesar 883,9. Hasil temperatur ini masih bersifat aman karena nilai temperaturnya masih dibawah dari temperatur aman, yakni sebesar 1600 C. Dengan begitu nilai output dari simulasi ini dapat digunakan untuk sistem yang memanfaatkan panas menjadi suatu pembangkit daya ataupun untuk pemurnian air laut.

## 5.2. SARAN

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mengkondisikan saat terjadi kasus pendingin reaktor mati atau ketika suatu kondisi sehingga reaktor tiba-tiba mati (baik disengaja maupun ketika tidak disengaja) mengingat faktor keselamatan dari suatu reaktor tidak hanya terjadi hanya saat normal.



## DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, Mukhlis. 1997. *Pengantar Teknologi Nuklir*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Al-Qodri, A.F. 2013. *Pengaruh Perubahan Konfigurasi Teras Terhadap Temperatur Bahan Bakar di Teras Reaktor HTGR*. Laporan PKL tidak diterbitkan. Malang: UIN Maulana Malik Ibrahim.
- Al-Qodri, A.F. dan Sudarmono. 2013. *Studi Model Aliran Fluida dan Perpindahan Panas Pada PBMR*. Prosiding Seminar Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir: 22-32.
- BAPPENAS. 2010. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2010 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2010-2014*. Jakarta: BAPPENAS.
- Boer, B. dan Ougouag, A.M. 2011. *Final report on utilization of TRU TRISO fuel as applied to HTR systems part I Pebble bed reactors*. Idaho falls, America: INL-EXT-11-21436.
- Buthels, H. Buscher, R. Petron, K. dkk. 1983. *Experimental Investigation of Thermo-hydraulics in HTR-Spherical Granular Assembly in Comparison With The Code THERMIX*. Amerika: Annual Meeting of Nuclear Technology 83.
- Cleveland, J.C. dan Greene, S.R. 1986. *Application of THERMIX-KONVEK Code to Accident Analysis of Modular Pebble Bed High Temperature Reactors (HTRs)*. Amerika: ORNL/TM-9905.
- El Naggat, Zaghoul R. 2010. *Selekta Dari Tafsir Ayat-Ayat Kosmos Dalam Dalam Al Quran Jilid 1*. Cairo-Mesir: Shorouk International Bookshop.
- El Naggat, Zaghoul R. 2010. *Selekta Dari Tafsir Ayat-Ayat Kosmos Dalam Dalam Al Quran Jilid 2*. Cairo-Mesir: Shorouk International Bookshop.
- Fauzia, Rispa. 2012. *Penggunaan Program VSOP Untuk Mengitung Distribusi Temperatur Reaktor Temperatur Tinggi (HTGR)*. Tugas akhir tidak diterbitkan. Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah.
- Goldberg, Stephen M. dan Rosner, Robert. 2010. *Nuclear Reactor Generation To Generation*. Cambridge-Amerika: American Academy of Art and Sains.
- Hossain, K. Buck, M. Bernnat, W. Lohnert, G. 2008. *TH3D, A Three-Dimensional Thermal Hydraulic Tool, for Design and Safety Analysis of HTRs, In 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*. Washington DC-USA: IAEA-TECDOC-978.

- IAEA-TECDO-1198. 2001. *Current Status and Future Development of Modular High Temperature Gas Cooled Reactor Technology*. Vienna-Austria: IAEA.
- Ibnu Mandzur, Muhammad Ali. 1311. *Lisan al Araby Jilid 1*. Bairut-Lebanon: Darul Kitab al Ilmiah.
- Ibnu Mandzur, Muhammad Ali. 1311. *Lisan al Araby Jilid 2*. Bairut-Lebanon: Darul Kitab al Ilmiah.
- Irianto, Ign. Djoko. 2012. *Analisis Termodinamika Untuk Optimasi Sistem Konversi Energi RGTT200K*. Prosiding Seminar Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir: 22-32.
- Purwadi, M. Dhandhang. 2010. *Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT*. Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir: 14-22.
- Purwadi, M. Dhandhang. 2011. *Analisis dan Optimasi Desain Sistem Reaktor Gas Temperatur Tinggi RGTT200K dan RGTT200KT*. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, Vol. 14 No.1: 1-14.
- Purwanto, Agus. 2008. *Ayat-Ayat Semesta Sisi Al Quran Yang Terlupakan*. Bandung: Mizan.
- Strydom, C. 2004. *Tinte Uncertainty Analysis of The Maximum Fuel Temperature During a DLOFC Event for The 400 MW Pebble Bed Modular Reactor*. Proceedings of ICAPP0 41 Juni 2004.
- Sudarmono. 2014. *Analisis Perpindahan Panas Solid Material RGTT 200K*. Jurnal teknologi bahan nuklir: 43-53.
- Syihab, Muhammad Quraish. 2002. *Tafsir Al Misbah Pesan, Kesan Dan Keserasian Al Quran Volume 6*. Jakarta: Lentera Hati.
- Syihab, Muhammad Quraish. 2002. *Tafsir Al Misbah Pesan, Kesan Dan Keserasian Al Quran Volume 11*. Jakarta: Lentera Hati.
- Syihab, Muhammad Quraish. 2002. *Tafsir Al Misbah Pesan, Kesan Dan Keserasian Al Quran Volume 12*. Jakarta: Lentera Hati.
- Syihab, Muhammad Quraish. 2002. *Tafsir Al Misbah Pesan, Kesan Dan Keserasian Al Quran Volume 14*. Jakarta: Lentera Hati.
- Syihab, Muhammad Quraish. 2002. *Tafsir Al Misbah Pesan, Kesan Dan Keserasian Al Quran Volume 15*. Jakarta: Lentera Hati.
- Teuchert, E. dkk. 1994. *V.S.O.P. ('94) Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation Input Manual and Comments*. Jerman: Forschungszentrum Julich GmbH.

Terry, Willam K. dkk. 2006. *Evaluation of HTR-10 Reactor as a Benchmark For Physics Code Qa. Physor: ANS topical meeting on reactors physics.*

Wardana, Wisnu Arya. 2004. *Al Quran Dan Energi Nuklir.* Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Yanhua, Zhenga. dkk. 2011. *Thermal Hydraulic Analysis of a Pebble-Bed Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor with ATTICA3D and THERMIX Codes.* Nuclear Engineering and Design.

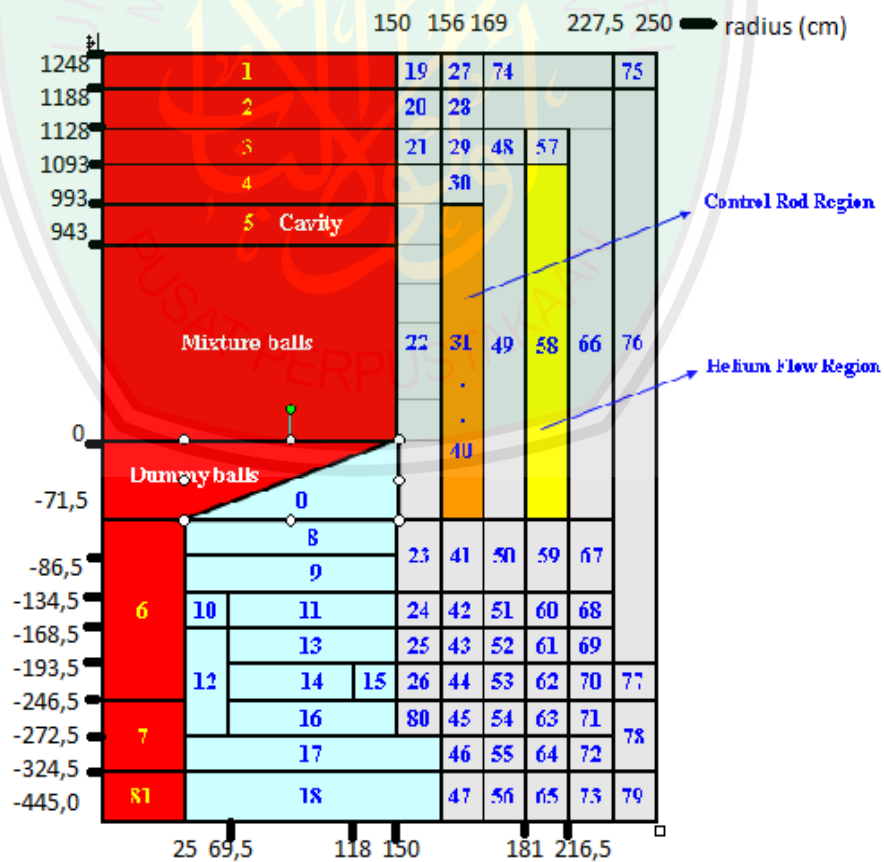
[https://www.wikipedia.org/wiki/reaksi\\_nuklir](https://www.wikipedia.org/wiki/reaksi_nuklir) (diunduh pada tanggal 5 Agustus 2013).

<https://www.yennykhairina.files.wordpress.com> (diunduh pada tanggal 8 Agustus 2014).



## LAMPIRAN I DATA MASUKAN

Pemodelan teras RGTT 200K ditunjukkan pada gambar L.1 sedangkan penjelasan gambar pada Tabel L.1. Sisi inlet adalah bagian atas teras, yang dimulai dengan zona kavitasi, sebelum masuk ke zona teras reaktor (titik 0), sedangkan sisi *outlet* berada di posisi bawah. Di dalam program Thermix, pada gambar tersebut konfigurasi teras RGTT 200K dibagi menjadi sejumlah *zona*. Dalam pemodelan *zona* radial (R) dibagi menjadi 25 nodal, sedangkan ke arah aksial (z) dibagi menjadi 42 nodal. Di sisi *outlet* terletak corong tempat keluaran bahan bakar yang telah habis masa pakainya. Program komputer ini mempertimbangkan aspek-aspek neutronik, dinamik fluida dan perpindahan panas. Program komputer Thermix dapat dimodelkan untuk menganalisis zona-zona teras dengan masing-masing tingkat daya dan juga aliran pendingin yang berbeda.



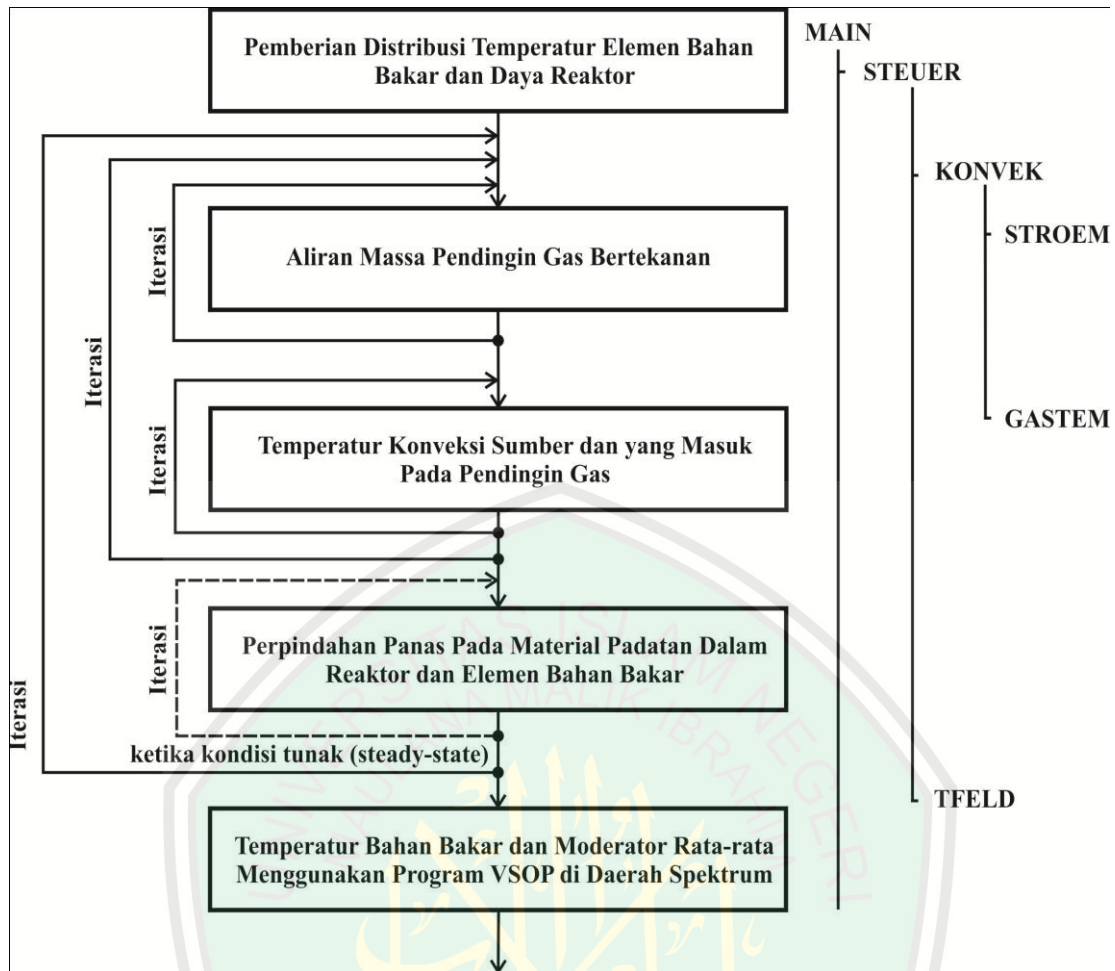
Gambar L.1 Pemodelan teras RGTT 200K

Desain reaktor dibagi menjadi 81 bagian, dengan bagian-bagian yang ditunjukkan dalam tabel L.1,

Tabel L.1. Struktur teras

No.	Nama Material
0	: Reflektor bagian <i>outlet</i>
1,17,19,55, 72,74,75,76, 77,78, 79	: Campuran karbon dan boron
2	: Reflektor grafit bagian <i>inlet</i>
3	: <i>Chamber</i> pendingin helium
4	: Reflektor <i>inlet</i>
5	: Ruang kosong bagian <i>inlet</i> teras
6,7	: Bola-bola <i>dummy</i> grafit
8 s/d 16	: Struktur reflektor bagian <i>outlet</i> dengan densitas berbeda-beda
18, 56 65, 73	: <i>Bricks</i> karbon
20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30-40,41, 42,43,44,45, 46,47,48, 49,50,51, 52,53,54, 57,66,67,68, 69,70,71,80,82,	: Struktur reflektor grafit
58,59,60, 61,62,63	: aliran pendingin helium

Pada masing-masing zona, kearah radial dapat direpresentasikan zona elemen bakar dan zona pendingin, sedangkan ke arah aksial dapat direpresentasikan rapat daya. Program komputer Thermix menggunakan persamaan numerik dengan prinsip-prinsip kesetimbangan energi. Korelasi-korelasi yang digunakan adalah korelasi perpindahan panas, korelasi desain, korelasi sifat-sifat fisis helium, korelasi moderator dan korelasi laju alir pendingin. Perhitungan transfer panas keseluruhan disintesis dari kopling persamaan fisis differensial yang mewakili hukum kekekalan. Persamaan tersebut diselesaikan masing-masing dan sintesisnya dibuat dengan iterasi superposisi. Alur perhitungan program Thermix dijelaskan pada diagram alir pada gambar L.2,



Gambar L.2 Diagram Alir Program Thermix

Input data perhitungan yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel L.2, L.3, L.4 dan L.5.

Tabel L.2 Data input geometri bahan bakar TRISO

No.	Jenis material	Nilai
1	Material kernel	= $(^{235}\text{U})$
2	Densitas $\text{UO}_2$	= $10,40 \text{ g/cm}^3$
3	Diameter kernel	= $500 \mu\text{m}$
4	Ketebalan material coating dari dalam	= $90 / 40 / 35 / 35 \mu\text{m}$
5	Densitas material coating dari dalam	= $0,9 / 1,85 / 3,2 / 1,85 \text{ g/cc}$
6	Material matrik bahan bakar	= Grafit
7	Material coating dari dalam	= <i>Buffer/IpyC/SiC/OpyC</i>

Tabel L.3 Data input geometri bahan bakar *pebble*

No.	Geometri	Nilai
1	Diameter luar bahan bakar bola	= $60 \text{ mm}$
2	Diameter dalam bahan bakar bola	= $50 \text{ mm}$

3	<i>Fuel loading, g/sphere</i>	=	6,15 mm
4	Pengkayaan	=	10 %
5	Tebal grafit lapisan luar	=	0,5 cm

Tabel L.4 Data input geometri teras

No.	Parameter	Nilai
1	Ketinggian teras	= 943 cm
2	Diameter matrik bahan bakar	= 5 cm
3	Diameter teras	= 300 cm
4	Densitas grafit	= 1,70 g/cm <sup>3</sup>

Tabel L.5. Data input termal

No.	Parameter	Nilai
1	Laju alir	= 120 kg/detik
2	Temperatur gas <i>inlet</i>	= 600 °C
3	Daya termal	= 200 MWt

Untuk menganalisis perpindahan panas *solid material* di dalam dan di luar teras RGTT 200K, dipilih beberapa titik pengamatan yang disajikan seperti di tunjukkan dalam Tabel L.6. Pada perhitungan ini material teras dipandang sebagai *solid material*. Posisi material di teras dipandang sebagai lapisan dengan jejari tertentu.

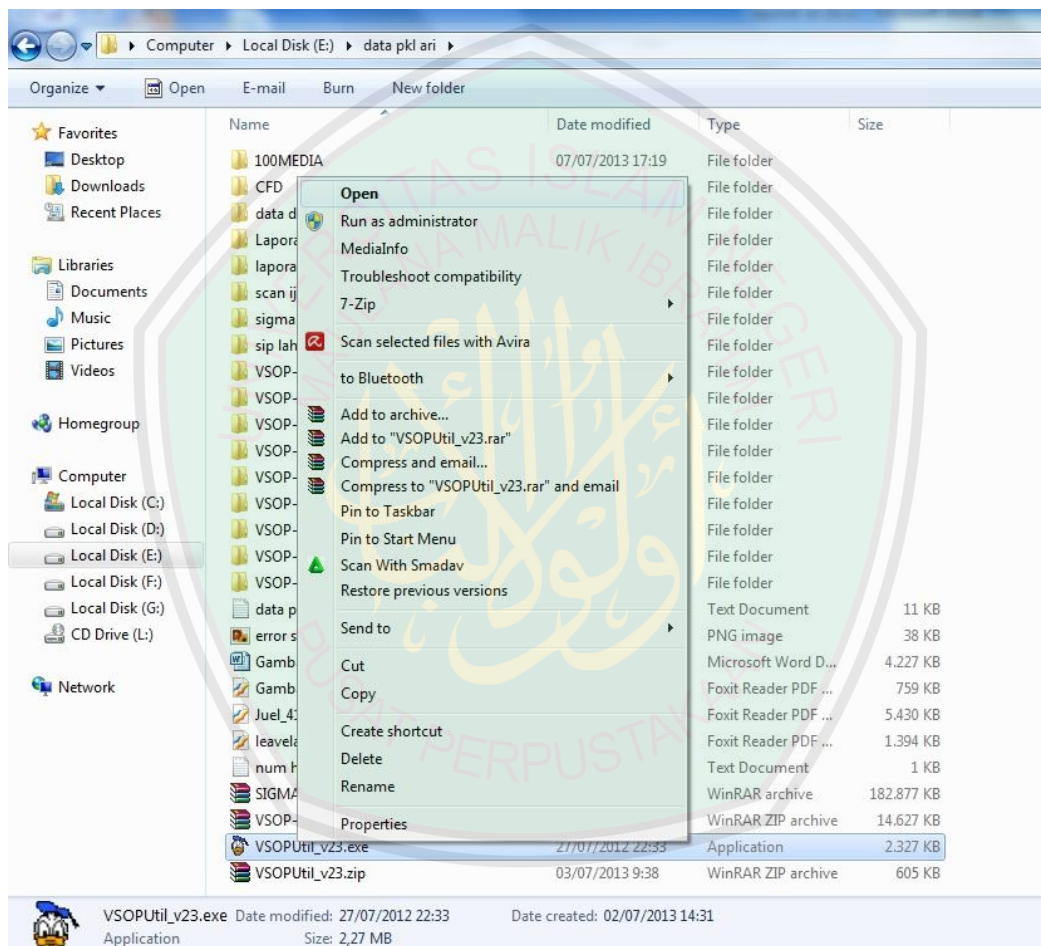
Tabel 6. Titik pengamatan *output*

Posisi	Titik pengamatan
Radial	: Solid material berupa bahan bakar pada R=0 cm (tengah) hingga R=146 cm; sedangkan solid material di luar teras dari R=152 cm hingga R=468 cm.
Aksial	: 0 cm hingga 943 cm
Zona	: 5 lapisan <i>zona</i> kelongsong Z=1 hingga Z=5 Z=1; lapisan O-Pyc Z=2; lapisan SiC Z=3; lapisan Ipc Z=4; lapisan <i>buffer</i> Z=5; kernel UO <sub>2</sub>

## LAMPIRAN II DESKRIPSI LANGKAH PERCOBAAN

Berikut ini langkah Percobaan yang dilakukan:

1. Mengumpulkan data-data desain *RGTT*
2. Memasukkan data kedalam program *VSOP* diantaranya dengan menggunakan program *VSOPUtil\_v23*. Caranya yaitu dengan membuka program *VSOPUtil\_v23*, seperti di bawah ini



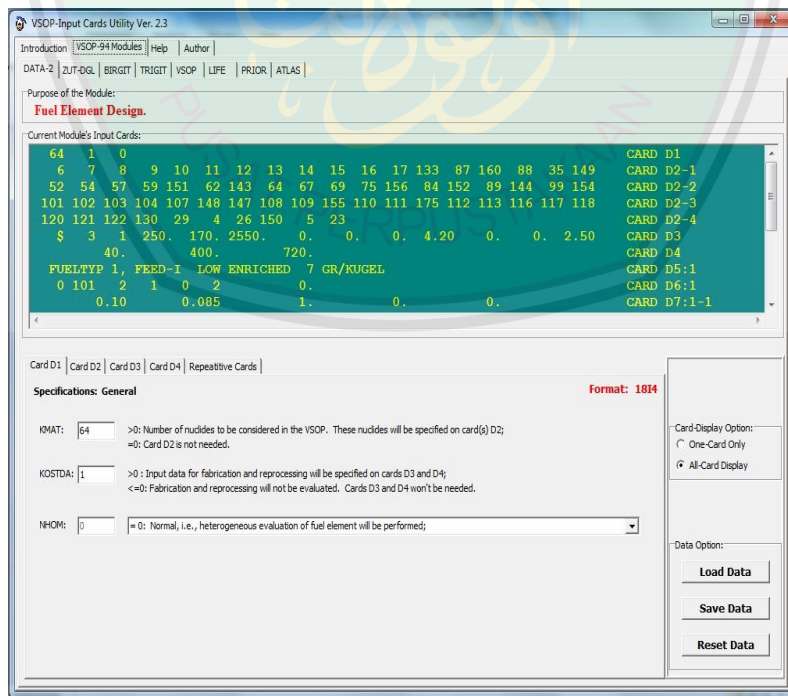
Gambar L.3 Membuka program *VSOPUtil\_v23*

Selanjutnya akan muncul gambar program seperti yang ditunjukkan pada gambar L.4



Gambar L.4 Muka program *VSOPUtil\_v23*

Pilih menu VSOP-94 Modules maka akan muncul seperti pada gambar L.5 lalu pilih sub menu dan klik button load data. Setelah itu pilih folder dimana tempat menyimpan data program VSOP.

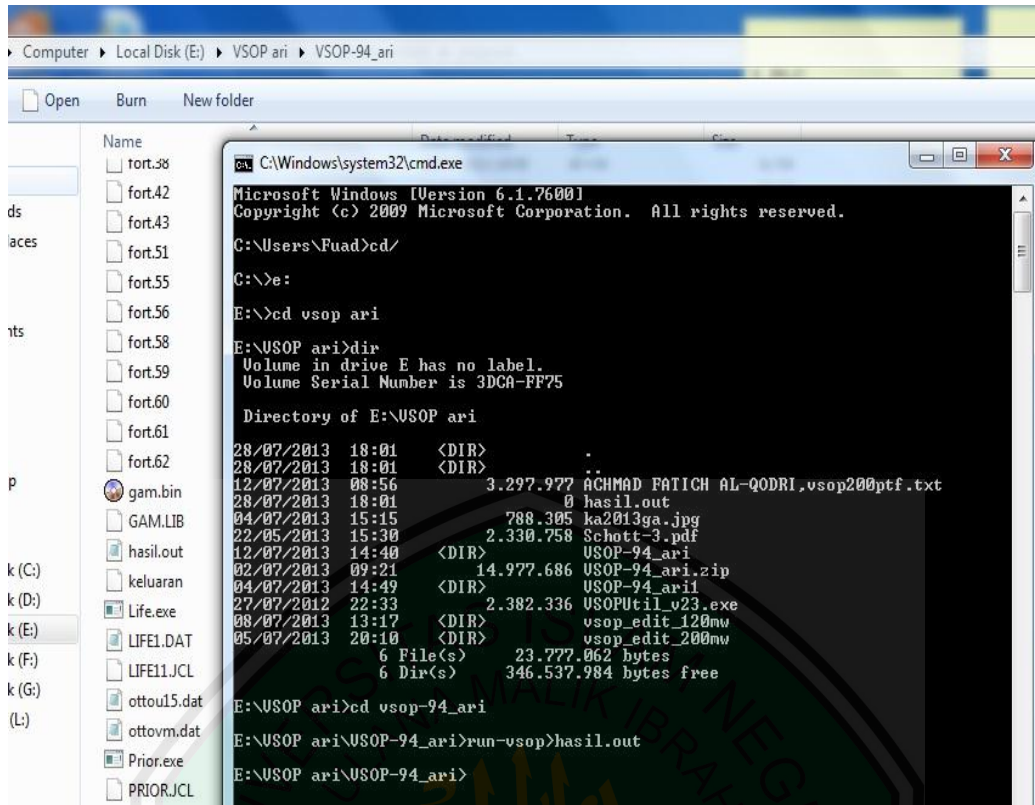


Gambar L.5 Tampilan *VSOP-94 modules*

Data dimasukkan dalam hal ini perlu dimasukkan kedalam beberapa file VSOP diantaranya yaitu VSOP1.DAT, VSOP2.DAT, VSOP3.DAT, VSOP4.DAT, VSOP5.DAT, VSOP6.DAT. Beberapa data yang dimasukkan dalam VSOP antara lain: pada VSOP1 terdapat pada card 15>Power> diisi dengan nilai daya yang diinginkan dalam rancangan desain RGTT, pada VSOP2 tidak dilakukan perubahan sama sekali, pada VSOP3 dimasukkan data pada card KX3>2>STZUK> 30 diganti menjadi 120 (ini merupakan nilai sumber aliran massa kg/second) lalu KX3>2>TEVLOR> 600 C (ini merupakan nilai temperatur inlet reaktor, untuk RGTT 200K nilai inlet sebesar 600 C) lalu untuk TX16>diubah nilai-nilainya menjadi range 600-950 sehingga dilakukan konversi suhu hal ini dilakukan pula didalam VSOP6, pada VSOP4 tidak dilakukan perubahan kecuali untuk title saja, pada VSOP5 juga sama halnya pada VSOP4, pada VSOP6 dilakukan perubahan seperti pada VSOP3 lalu dimasukkan juga nilai daya saat mulai berjalan sesuai dengan daya yang diinginkan dengan cara memasukkannya kedalam card R11>QVOLL. Selain data VSOP tidak dilakukan lagi perubahan lain kecuali jika desainnya diubah secara menyeluruh.

Ada beberapa cara memasukkan data tersebut diantaranya menggunakan program notepad dengan cara membuka VSOP.dat dengan notepad lalu di ubah secara manual, hanya saja ini dapat dilakukan jika telah benar-benar memahami masukan data yang dimaksudkan. Selain itu dapat juga dengan menggunakan command prompt yang memasukkannya juga harus benar-benar paham masukannya.

3. Menjalankan program sehingga muncul nilai akhir dari program dengan cara membuka *command prompt* selanjutnya ketikkan
4. Cd/ (hal ini untuk menutup dan pindah ke drive lain tempat menyimpan file VSOP) selanjutnya untuk menuju file hanya ketikkan drive: semisal folder e maka ketikkan E: selanjutnya menuju folder tempat file dengan mengetikkan cd<spasi>nama folder setelah itu untuk menjalankan program maka dengan cara mengetikkan run-VSOP>nama\_keluaran\_tanpa\_spasi\_(.out) tunggu beberapa saat maka akan dilakukan pengerjaan program, selanjutnya setelah selesai silahkan buka file di tempat folder program VSOP-94 dengan nama yang sama seperti diketikkan dalam program (.out). untuk lebih jelasnya dapat dilihat di gambar 3.6



Gambar L.6 Menjalankan program lewat *command prompt*

5. Selanjutnya data hasil di analisis menggunakan program SigmaPlot dan Microsoft Excel

**LAMPIRAN III  
DATA HASIL PERCOBAAN**

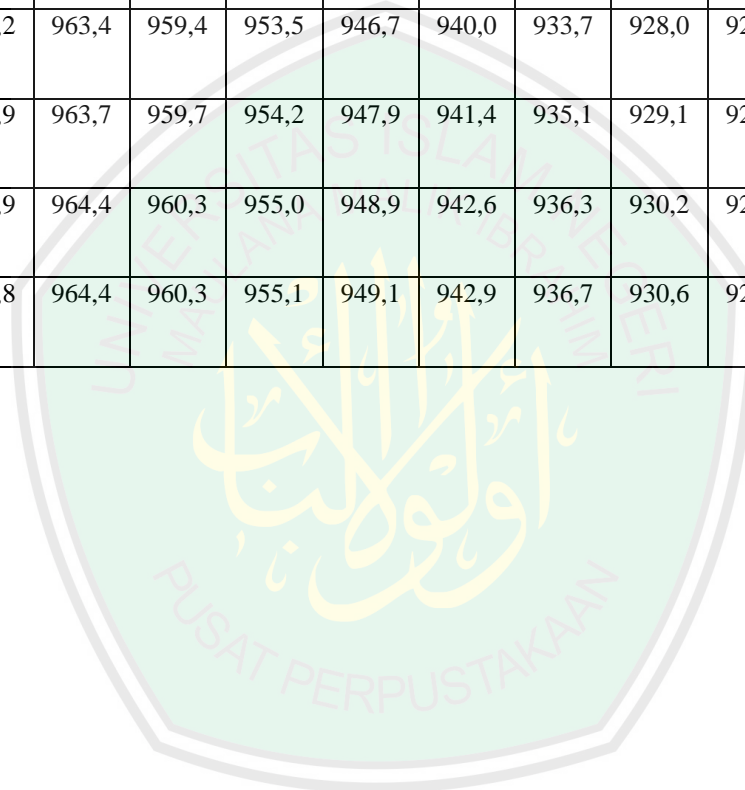
**DATA HASIL PERCOBAAN I**

**1. Temperatures of Solid Matter In Steady State**

**Data hasil simulasi reaktor daya 200 MW**

		Jari-Jari (cm)																	
		0,0	8,3	16,7	25,0	35,0	43,8	52,5	61,2	70,0	78,8	87,5	96,2	105,0	113,8	122,5	131,2	140,0	146,0
<b>Ketinggian (cm)</b>	0,0	754,9	755,0	755,0	755,1	755,1	755,0	752,4	748,6	746,7	744,1	741,9	752,7	775,9	787,7	784,1	780,5	775,8	722,6
	83,8	846,4	846,5	846,6	846,6	846,6	846,4	842,2	835,8	832,9	828,5	823,9	834,8	859,5	870,2	858,2	848,6	843,5	769,0
	167,9	890,6	890,6	890,7	890,6	890,4	889,5	883,9	875,6	871,2	865,9	861,6	866,5	876,7	878,3	861,6	847,4	841,0	769,0
	251,7	922,3	922,3	922,3	922,1	921,5	919,9	913,0	903,3	897,6	891,9	887,8	889,9	893,5	891,3	876,0	862,3	854,6	778,0
	335,5	940,7	940,7	940,6	940,2	939,2	936,8	930,3	921,7	915,7	909,4	904,7	904,3	903,8	899,1	885,2	872,5	863,8	784,4
	419,3	952,8	952,7	952,5	952,0	950,5	947,5	941,0	932,6	926,1	919,6	914,4	912,2	909,2	903,0	890,7	879,3	870,2	788,7
	503,4	960,3	960,1	959,8	959,1	957,2	953,8	947,1	938,7	931,9	925,7	920,8	917,3	912,3	905,1	894,1	883,9	874,6	791,7

587,2	964,1	963,9	963,5	962,5	960,3	956,6	950,3	942,7	936,0	929,8	924,4	919,9	914,2	906,5	896,3	887,1	877,7	793,8
671,0	967,2	967,0	966,4	965,3	962,7	958,7	952,5	945,2	938,6	932,3	926,6	921,5	915,2	907,5	898,0	889,6	880,3	795,5
754,8	968,5	968,2	967,5	966,2	963,4	959,4	953,5	946,7	940,0	933,7	928,0	922,3	915,7	907,9	899,1	891,3	882,1	796,6
838,9	969,7	969,3	968,5	966,9	963,7	959,7	954,2	947,9	941,4	935,1	929,1	923,0	916,3	908,6	900,3	893,1	884,0	797,8
922,7	971,5	971,1	970,0	967,9	964,4	960,3	955,0	948,9	942,6	936,3	930,2	923,9	917,1	909,6	901,6	894,3	884,6	797,8
943,0	971,9	971,5	970,0	967,8	964,4	960,3	955,1	949,1	942,9	936,7	930,6	924,5	917,8	910,2	902,2	894,5	883,1	796,3



## 2. Temperatures of Fuel Element (Eksternal Boundary Of Shell) In Steady State

		Lapisan Triso	Ketinggian(cm)												
			0,0	83,8	167,9	251,7	335,5	419,3	503,4	587,2	671,0	754,8	838,9	922,7	943,0
Jari-jari(cm)	0,00	Z,1	754,9	846,4	890,6	922,3	940,7	952,8	960,3	964,1	967,2	968,5	969,7	971,5	971,9
	0,00	Z,2	899,9	988,3	990,9	992,5	986,8	982,8	979,4	975,9	974,9	973,2	972,9	974,6	975,0
	0,00	Z,3	1192,7	1266,1	1183,5	1127,1	1075,3	1040,4	1016,2	998,4	989,6	982,1	979,2	980,6	981,0
	0,00	Z,4	1347,0	1407,7	1279,5	1193,9	1119,2	1069,0	1034,5	1009,6	997,0	986,6	982,3	983,5	983,9
	0,00	Z,5	1365,0	1424,0	1290,4	1201,5	1124,2	1072,3	1036,5	1010,9	997,8	987,1	982,7	983,8	984,3
	8,33	Z,1	755,0	846,5	890,6	922,3	940,7	952,7	960,1	963,9	967,0	968,2	969,3	971,1	971,5
	8,33	Z,2	899,9	988,4	991,0	992,6	986,8	982,8	979,3	975,7	974,7	972,9	972,6	974,2	974,6
	8,33	Z,3	1192,8	1266,2	1183,6	1127,1	1075,2	1040,3	1016,0	998,2	989,4	981,8	978,9	980,1	980,5
	8,33	Z,4	1347,1	1407,8	1279,6	1193,9	1119,2	1069,0	1034,3	1009,4	996,7	986,3	982,0	983,1	983,5
	8,33	Z,5	1365,0	1424,1	1290,5	1201,6	1124,2	1072,2	1036,4	1010,7	997,6	986,8	982,3	983,4	983,8
	16,67	Z,1	755,0	846,6	890,7	922,3	940,6	952,5	959,8	963,5	966,4	967,5	968,5	970,0	970,0

<b>16,67</b>	<b>Z,2</b>	899,9	988,4	991,0	992,6	986,7	982,5	979,0	975,2	974,1	972,2	971,7	973,0	972,5
<b>16,67</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,3	1183,6	1127,1	1075,1	1040,1	1015,7	997,7	988,8	981,1	977,9	978,6	977,4
<b>16,67</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,9	1279,6	1193,9	1119,1	1068,8	1034,0	1009,0	996,1	985,6	981,0	981,4	979,8
<b>16,67</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1424,1	1290,6	1201,5	1124,1	1072,0	1036,1	1010,2	997,0	986,1	981,4	981,7	980,0
<b>25,00</b>	<b>Z,1</b>	755,1	846,6	890,6	922,1	940,2	952,0	959,1	962,5	965,3	966,2	966,9	967,9	967,8
<b>25,00</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,5	991,0	992,4	986,4	982,0	978,2	974,3	972,9	970,9	969,8	970,3	969,7
<b>25,00</b>	<b>Z,3</b>	1192,9	1266,3	1183,6	1126,9	1074,8	1039,6	1015,0	996,8	987,7	979,9	975,5	975,0	973,5
<b>25,00</b>	<b>Z,4</b>	1347,2	1407,9	1279,6	1193,8	1118,8	1068,2	1033,3	1008,0	995,0	984,3	978,4	977,3	975,4
<b>25,00</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1424,2	1290,5	1201,4	1123,8	1071,5	1035,3	1009,3	995,8	984,8	978,7	977,6	975,6
<b>35,00</b>	<b>Z,1</b>	755,1	846,6	890,4	921,5	939,2	950,5	957,2	960,3	962,7	963,4	963,7	964,4	964,4
<b>35,00</b>	<b>Z,2</b>	900,1	988,5	990,8	991,8	985,3	980,5	976,3	972,0	970,4	968,1	966,5	966,5	966,2
<b>35,00</b>	<b>Z,3</b>	1193,0	1266,3	1183,3	1126,3	1073,8	1038,1	1013,1	994,5	985,1	977,0	971,7	970,3	969,5
<b>35,00</b>	<b>Z,4</b>	1347,3	1407,9	1279,4	1193,2	1117,7	1066,7	1031,3	1005,7	992,4	981,5	974,4	972,3	971,1
<b>35,00</b>	<b>Z,5</b>	1365,2	1424,2	1290,3	1200,8	1122,7	1070,0	1033,4	1007,0	993,2	982,0	974,7	972,5	971,3
<b>43,75</b>	<b>Z,1</b>	755,0	846,4	889,5	919,9	936,8	947,5	953,8	956,6	958,7	959,4	959,7	960,3	960,3

<b>43,75</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,2	989,9	990,1	982,9	977,6	972,9	968,3	966,4	964,0	962,3	962,1	961,7
<b>43,75</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,1	1182,5	1124,7	1071,4	1035,1	1009,6	990,8	981,0	972,9	967,4	965,6	964,4
<b>43,75</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,7	1278,5	1191,5	1115,3	1063,8	1027,9	1002,0	988,3	977,4	970,0	967,3	965,8
<b>43,75</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1423,9	1289,4	1199,1	1120,3	1067,0	1030,0	1003,3	989,2	977,9	970,3	967,5	965,9
<b>52,50</b>	<b>Z,1</b>	752,4	842,2	883,9	913,0	930,3	941,0	947,1	950,3	952,5	953,5	954,2	955,0	955,1
<b>52,50</b>	<b>Z,2</b>	894,7	981,3	981,6	981,0	975,3	970,2	965,6	961,7	959,9	958,0	956,9	956,7	956,2
<b>52,50</b>	<b>Z,3</b>	1181,7	1253,5	1169,2	1111,1	1061,4	1026,0	1000,9	983,6	973,9	966,6	961,9	960,0	958,4
<b>52,50</b>	<b>Z,4</b>	1332,8	1392,3	1262,8	1175,8	1104,2	1053,8	1018,5	994,5	980,9	970,9	964,5	961,6	959,5
<b>52,50</b>	<b>Z,5</b>	1350,3	1408,2	1273,4	1183,1	1109,1	1057,0	1020,5	995,7	981,7	971,4	964,7	961,8	959,7
<b>61,25</b>	<b>Z,1</b>	748,6	835,8	875,6	903,3	921,7	932,6	938,7	942,7	945,2	946,7	947,9	948,9	949,1
<b>61,25</b>	<b>Z,2</b>	887,7	970,5	970,2	967,7	964,8	960,3	955,9	953,5	952,2	951,0	950,4	950,5	950,1
<b>61,25</b>	<b>Z,3</b>	1168,0	1234,2	1151,6	1091,0	1047,4	1013,4	988,8	974,3	965,5	959,3	955,4	953,7	952,1
<b>61,25</b>	<b>Z,4</b>	1315,0	1368,4	1241,9	1152,3	1088,4	1039,8	1005,2	984,6	972,1	963,5	957,8	955,3	953,0
<b>61,25</b>	<b>Z,5</b>	1332,1	1383,9	1252,2	1159,3	1093,1	1042,8	1007,1	985,8	972,8	963,9	958,1	955,5	953,1
<b>70,00</b>	<b>Z,1</b>	746,7	832,9	871,2	897,6	915,7	926,1	931,9	936,0	938,6	940,0	941,4	942,6	942,9

<b>70,00</b>	<b>Z,2</b>	884,1	965,9	964,2	960,6	958,1	953,2	948,5	946,6	945,4	944,2	943,8	944,2	943,9
<b>70,00</b>	<b>Z,3</b>	1160,8	1226,2	1142,5	1081,2	1039,2	1005,1	980,4	966,9	958,4	952,3	948,5	947,2	945,6
<b>70,00</b>	<b>Z,4</b>	1305,8	1358,6	1231,2	1141,1	1079,6	1031,0	996,3	977,0	964,8	956,3	950,9	948,7	946,5
<b>70,00</b>	<b>Z,5</b>	1322,7	1373,8	1241,3	1147,9	1084,2	1033,9	998,1	978,2	965,6	956,7	951,1	948,9	946,6
<b>78,75</b>	<b>Z,1</b>	744,1	828,5	865,9	891,9	909,4	919,6	925,7	929,8	932,3	933,7	935,1	936,3	936,7
<b>78,75</b>	<b>Z,2</b>	878,6	958,4	956,3	952,9	950,0	945,4	941,8	939,9	938,7	937,7	937,4	937,8	937,6
<b>78,75</b>	<b>Z,3</b>	1149,1	1212,7	1129,6	1069,5	1027,6	994,8	972,6	959,3	950,9	945,2	941,9	940,5	939,3
<b>78,75</b>	<b>Z,4</b>	1290,7	1342,0	1215,9	1127,4	1066,2	1019,4	987,9	969,0	957,0	949,0	944,1	941,9	940,1
<b>78,75</b>	<b>Z,5</b>	1307,2	1356,9	1225,7	1134,0	1070,6	1022,2	989,7	970,1	957,7	949,4	944,3	942,1	940,2
<b>87,50</b>	<b>Z,1</b>	741,9	823,9	861,6	887,8	904,7	914,4	920,8	924,4	926,6	928,0	929,1	930,2	930,6
<b>87,50</b>	<b>Z,2</b>	872,7	950,6	948,6	946,0	942,8	938,5	936,1	933,9	932,6	931,7	931,3	931,5	931,5
<b>87,50</b>	<b>Z,3</b>	1135,4	1198,1	1115,5	1057,5	1015,9	984,5	965,4	952,1	944,1	938,9	935,5	934,1	933,2
<b>87,50</b>	<b>Z,4</b>	1272,7	1323,7	1198,6	1112,9	1052,3	1007,5	980,0	961,2	949,8	942,5	937,5	935,3	934,0
<b>87,50</b>	<b>Z,5</b>	1288,6	1338,1	1208,0	1119,2	1056,4	1010,1	981,7	962,2	950,5	942,9	937,8	935,5	934,1
<b>96,25</b>	<b>Z,1</b>	752,7	834,8	866,5	889,9	904,3	912,2	917,3	919,9	921,5	922,3	923,0	923,9	924,5

<b>96,25</b>	<b>Z,2</b>	894,6	967,8	952,9	945,7	940,3	934,7	931,5	928,8	927,1	925,7	924,9	925,2	925,3
<b>96,25</b>	<b>Z,3</b>	1180,0	1226,7	1118,4	1052,6	1009,3	977,8	958,8	945,7	937,8	932,3	928,6	927,6	927,0
<b>96,25</b>	<b>Z,4</b>	1329,7	1357,9	1200,7	1105,7	1043,7	999,3	972,4	954,2	943,1	935,6	930,4	928,8	927,8
<b>96,25</b>	<b>Z,5</b>	1347,0	1372,9	1210,1	1111,7	1047,6	1001,7	973,9	955,1	943,7	935,9	930,6	928,9	927,9
<b>105,00</b>	<b>Z,1</b>	775,9	859,5	876,7	893,5	903,8	909,2	912,3	914,2	915,2	915,7	916,3	917,1	917,8
<b>105,00</b>	<b>Z,2</b>	942,3	1007,3	962,8	946,6	937,1	929,7	924,8	922,0	920,2	918,7	918,0	918,3	918,5
<b>105,00</b>	<b>Z,3</b>	1279,7	1294,2	1127,6	1048,2	1000,9	968,7	948,6	936,9	929,7	924,7	921,3	920,5	920,0
<b>105,00</b>	<b>Z,4</b>	1458,1	1439,0	1209,5	1098,6	1032,7	988,2	960,4	944,3	934,4	927,6	922,9	921,6	920,7
<b>105,00</b>	<b>Z,5</b>	1478,9	1455,6	1218,8	1104,4	1036,3	990,4	961,8	945,1	935,0	927,9	923,1	921,7	920,8
<b>113,75</b>	<b>Z,1</b>	787,7	870,2	878,3	891,3	899,1	903,0	905,1	906,5	907,5	907,9	908,6	909,6	910,2
<b>113,75</b>	<b>Z,2</b>	965,1	1022,9	961,3	940,8	929,7	921,6	916,2	913,5	912,0	910,6	910,1	910,7	910,7
<b>113,75</b>	<b>Z,3</b>	1326,1	1319,3	1120,1	1035,5	988,2	957,2	937,6	927,0	920,7	915,9	913,2	912,8	911,7
<b>113,75</b>	<b>Z,4</b>	1518,0	1469,1	1199,1	1082,6	1017,4	974,9	948,2	933,6	925,0	918,5	914,7	913,8	912,3
<b>113,75</b>	<b>Z,5</b>	1540,5	1486,2	1208,1	1087,9	1020,7	976,9	949,4	934,4	925,5	918,8	914,9	913,9	912,3
<b>122,50</b>	<b>Z,1</b>	784,1	858,2	861,6	876,0	885,2	890,7	894,1	896,3	898,0	899,1	900,3	901,6	902,2

	<b>122,50</b>	<b>Z,2</b>	952,6	1000,1	932,9	917,8	911,0	906,4	903,7	902,3	901,9	901,5	901,8	902,6	902,7
	<b>122,50</b>	<b>Z,3</b>	1295,1	1276,2	1069,5	997,5	960,2	936,6	922,2	913,8	909,3	906,2	904,6	904,5	903,6
	<b>122,50</b>	<b>Z,4</b>	1477,0	1416,0	1137,6	1037,2	984,7	951,6	931,3	919,5	913,0	908,5	906,0	905,4	904,1
	<b>122,50</b>	<b>Z,5</b>	1498,2	1432,1	1145,3	1041,8	987,5	953,3	932,4	920,1	913,4	908,8	906,2	905,5	904,1
	<b>131,25</b>	<b>Z,1</b>	780,5	848,6	847,4	862,3	872,5	879,3	883,9	887,1	889,6	891,3	893,1	894,3	894,5
	<b>131,25</b>	<b>Z,2</b>	944,2	983,4	911,3	899,4	895,4	893,4	892,7	892,5	893,1	893,6	894,5	895,1	894,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,3</b>	1276,5	1245,5	1033,8	970,2	939,3	920,6	909,5	902,8	899,8	898,0	897,3	896,7	895,6
	<b>131,25</b>	<b>Z,4</b>	1452,5	1378,1	1094,8	1005,5	961,1	934,1	917,9	908,0	903,2	900,2	898,7	897,4	895,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,5</b>	1473,1	1393,3	1101,8	1009,5	963,6	935,6	918,9	908,6	903,6	900,4	898,8	897,5	896,0
	<b>140,00</b>	<b>Z,1</b>	775,8	843,5	841,0	854,6	863,8	870,2	874,6	877,7	880,3	882,1	884,0	884,6	883,1
	<b>140,00</b>	<b>Z,2</b>	939,3	978,2	905,0	891,7	886,8	884,3	883,4	883,1	883,8	884,4	885,4	885,4	883,3
	<b>140,00</b>	<b>Z,3</b>	1271,2	1240,2	1027,4	962,5	930,7	911,5	900,2	893,5	890,5	888,7	888,2	886,9	883,7
	<b>140,00</b>	<b>Z,4</b>	1447,0	1372,7	1088,4	997,8	952,6	925,0	908,6	898,7	893,9	890,9	889,6	887,6	883,9
	<b>140,00</b>	<b>Z,5</b>	1467,5	1387,9	1095,4	1001,8	955,0	926,5	909,6	899,3	894,3	891,2	889,8	887,7	883,9

Keterangan:

- Z1= Lapisan bahan bakar terluar pertama (OpyC)
- Z2= Lapisan bahan bakar terluar kedua (SiC)
- Z3= Lapisan bahan bakar terluar ketiga (IpyC)
- Z4= Lapisan bahan bakar terluar keempat (buffer)
- Z5= Lapisan bahan bakar terluar kelima (kernel)



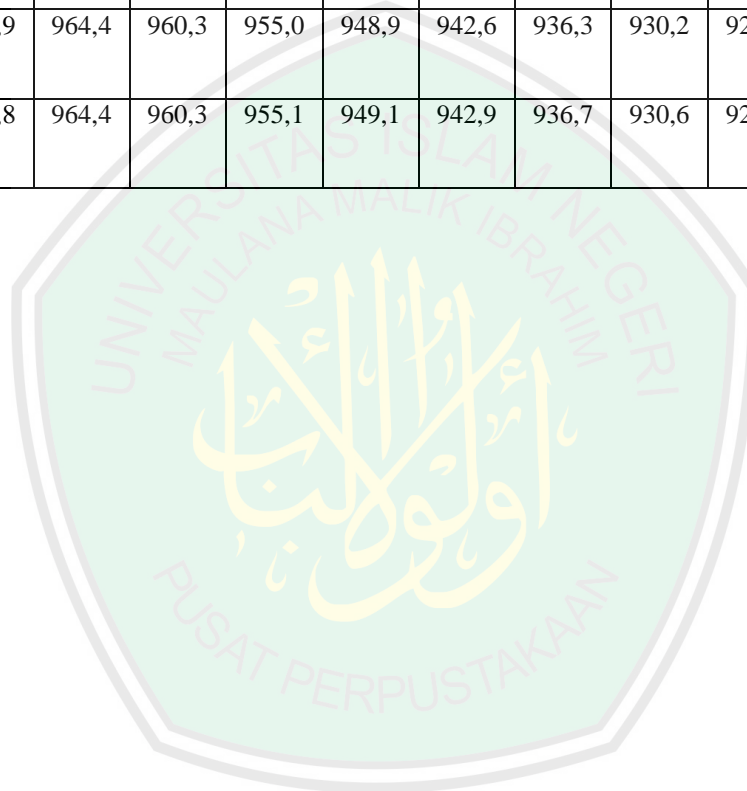
## DATA HASIL PERCOBAAN II

### 1. Temperatures of Solid Matter In Steady State

Data hasil simulasi reaktor daya 200 MW

		Jari-Jari (cm)																	
		0,0	8,3	16,7	25,0	35,0	43,8	52,5	61,2	70,0	78,8	87,5	96,2	105,0	113,8	122,5	131,2	140,0	146,0
Ketinggian(cm)	0,0	754,9	755,0	755,0	755,1	755,1	755,0	752,4	748,6	746,7	744,1	741,9	752,7	775,9	787,7	784,1	780,5	775,8	722,6
	83,8	846,4	846,5	846,6	846,6	846,6	846,4	842,2	835,8	832,9	828,5	823,9	834,8	859,5	870,2	858,2	848,6	843,5	769,0
	167,9	890,6	890,6	890,7	890,6	890,4	889,5	883,9	875,6	871,2	865,9	861,6	866,5	876,7	878,3	861,6	847,4	841,0	769,0
	251,7	922,3	922,3	922,3	922,1	921,5	919,9	913,0	903,3	897,6	891,9	887,8	889,9	893,5	891,3	876,0	862,3	854,6	778,0
	335,5	940,7	940,7	940,6	940,2	939,2	936,8	930,3	921,7	915,7	909,4	904,7	904,3	903,8	899,1	885,2	872,5	863,8	784,4
	419,3	952,8	952,7	952,5	952,0	950,5	947,5	941,0	932,6	926,1	919,6	914,4	912,2	909,2	903,0	890,7	879,3	870,2	788,7
	503,4	960,3	960,1	959,8	959,1	957,2	953,8	947,1	938,7	931,9	925,7	920,8	917,3	912,3	905,1	894,1	883,9	874,6	791,7
	587,2	964,1	963,9	963,5	962,5	960,3	956,6	950,3	942,7	936,0	929,8	924,4	919,9	914,2	906,5	896,3	887,1	877,7	793,8
	671,0	967,2	967,0	966,4	965,3	962,7	958,7	952,5	945,2	938,6	932,3	926,6	921,5	915,2	907,5	898,0	889,6	880,3	795,5

	754,8	968,5	968,2	967,5	966,2	963,4	959,4	953,5	946,7	940,0	933,7	928,0	922,3	915,7	907,9	899,1	891,3	882,1	796,6
	838,9	969,7	969,3	968,5	966,9	963,7	959,7	954,2	947,9	941,4	935,1	929,1	923,0	916,3	908,6	900,3	893,1	884,0	797,8
	922,7	971,5	971,1	970,0	967,9	964,4	960,3	955,0	948,9	942,6	936,3	930,2	923,9	917,1	909,6	901,6	894,3	884,6	797,8
	943,0	971,9	971,5	970,0	967,8	964,4	960,3	955,1	949,1	942,9	936,7	930,6	924,5	917,8	910,2	902,2	894,5	883,1	796,3



## 2. Temperatures of Fuel Element (Eksternal Boundary Of Shell) In Steady State

		Lapisan Triso	Ketinggian(cm)												
			0,0	83,8	167,9	251,7	335,5	419,3	503,4	587,2	671,0	754,8	838,9	922,7	943,0
Jari-jari(cm)	0,00	Z,1	754,9	846,4	890,6	922,3	940,7	952,8	960,3	964,1	967,2	968,5	969,7	971,5	971,9
	0,00	Z,2	899,9	988,3	990,9	992,5	986,8	982,8	979,4	975,9	974,9	973,2	972,9	974,6	975,0
	0,00	Z,3	1192,7	1266,1	1183,5	1127,1	1075,3	1040,4	1016,2	998,4	989,6	982,1	979,2	980,6	981,0
	0,00	Z,4	1347,0	1407,7	1279,5	1193,9	1119,2	1069,0	1034,5	1009,6	997,0	986,6	982,3	983,5	983,9
	0,00	Z,5	1365,0	1424,0	1290,4	1201,5	1124,2	1072,3	1036,5	1010,9	997,8	987,1	982,7	983,8	984,3
	8,33	Z,1	755,0	846,5	890,6	922,3	940,7	952,7	960,1	963,9	967,0	968,2	969,3	971,1	971,5
	8,33	Z,2	899,9	988,4	991,0	992,6	986,8	982,8	979,3	975,7	974,7	972,9	972,6	974,2	974,6
	8,33	Z,3	1192,8	1266,2	1183,6	1127,1	1075,2	1040,3	1016,0	998,2	989,4	981,8	978,9	980,1	980,5
	8,33	Z,4	1347,1	1407,8	1279,6	1193,9	1119,2	1069,0	1034,3	1009,4	996,7	986,3	982,0	983,1	983,5
	8,33	Z,5	1365,0	1424,1	1290,5	1201,6	1124,2	1072,2	1036,4	1010,7	997,6	986,8	982,3	983,4	983,8
	16,67	Z,1	755,0	846,6	890,7	922,3	940,6	952,5	959,8	963,5	966,4	967,5	968,5	970,0	970,0

<b>16,67</b>	<b>Z,2</b>	899,9	988,4	991,0	992,6	986,7	982,5	979,0	975,2	974,1	972,2	971,7	973,0	972,5
<b>16,67</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,3	1183,6	1127,1	1075,1	1040,1	1015,7	997,7	988,8	981,1	977,9	978,6	977,4
<b>16,67</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,9	1279,6	1193,9	1119,1	1068,8	1034,0	1009,0	996,1	985,6	981,0	981,4	979,8
<b>16,67</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1424,1	1290,6	1201,5	1124,1	1072,0	1036,1	1010,2	997,0	986,1	981,4	981,7	980,0
<b>25,00</b>	<b>Z,1</b>	755,1	846,6	890,6	922,1	940,2	952,0	959,1	962,5	965,3	966,2	966,9	967,9	967,8
<b>25,00</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,5	991,0	992,4	986,4	982,0	978,2	974,3	972,9	970,9	969,8	970,3	969,7
<b>25,00</b>	<b>Z,3</b>	1192,9	1266,3	1183,6	1126,9	1074,8	1039,6	1015,0	996,8	987,7	979,9	975,5	975,0	973,5
<b>25,00</b>	<b>Z,4</b>	1347,2	1407,9	1279,6	1193,8	1118,8	1068,2	1033,3	1008,0	995,0	984,3	978,4	977,3	975,4
<b>25,00</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1424,2	1290,5	1201,4	1123,8	1071,5	1035,3	1009,3	995,8	984,8	978,7	977,6	975,6
<b>35,00</b>	<b>Z,1</b>	755,1	846,6	890,4	921,5	939,2	950,5	957,2	960,3	962,7	963,4	963,7	964,4	964,4
<b>35,00</b>	<b>Z,2</b>	900,1	988,5	990,8	991,8	985,3	980,5	976,3	972,0	970,4	968,1	966,5	966,5	966,2
<b>35,00</b>	<b>Z,3</b>	1193,0	1266,3	1183,3	1126,3	1073,8	1038,1	1013,1	994,5	985,1	977,0	971,7	970,3	969,5
<b>35,00</b>	<b>Z,4</b>	1347,3	1407,9	1279,4	1193,2	1117,7	1066,7	1031,3	1005,7	992,4	981,5	974,4	972,3	971,1
<b>35,00</b>	<b>Z,5</b>	1365,2	1424,2	1290,3	1200,8	1122,7	1070,0	1033,4	1007,0	993,2	982,0	974,7	972,5	971,3
<b>43,75</b>	<b>Z,1</b>	755,0	846,4	889,5	919,9	936,8	947,5	953,8	956,6	958,7	959,4	959,7	960,3	960,3

<b>43,75</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,2	989,9	990,1	982,9	977,6	972,9	968,3	966,4	964,0	962,3	962,1	961,7
<b>43,75</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,1	1182,5	1124,7	1071,4	1035,1	1009,6	990,8	981,0	972,9	967,4	965,6	964,4
<b>43,75</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,7	1278,5	1191,5	1115,3	1063,8	1027,9	1002,0	988,3	977,4	970,0	967,3	965,8
<b>43,75</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1423,9	1289,4	1199,1	1120,3	1067,0	1030,0	1003,3	989,2	977,9	970,3	967,5	965,9
<b>52,50</b>	<b>Z,1</b>	752,4	842,2	883,9	913,0	930,3	941,0	947,1	950,3	952,5	953,5	954,2	955,0	955,1
<b>52,50</b>	<b>Z,2</b>	894,7	981,3	981,6	981,0	975,3	970,2	965,6	961,7	959,9	958,0	956,9	956,7	956,2
<b>52,50</b>	<b>Z,3</b>	1181,7	1253,5	1169,2	1111,1	1061,4	1026,0	1000,9	983,6	973,9	966,6	961,9	960,0	958,4
<b>52,50</b>	<b>Z,4</b>	1332,8	1392,3	1262,8	1175,8	1104,2	1053,8	1018,5	994,5	980,9	970,9	964,5	961,6	959,5
<b>52,50</b>	<b>Z,5</b>	1350,3	1408,2	1273,4	1183,1	1109,1	1057,0	1020,5	995,7	981,7	971,4	964,7	961,8	959,7
<b>61,25</b>	<b>Z,1</b>	748,6	835,8	875,6	903,3	921,7	932,6	938,7	942,7	945,2	946,7	947,9	948,9	949,1
<b>61,25</b>	<b>Z,2</b>	887,7	970,5	970,2	967,7	964,8	960,3	955,9	953,5	952,2	951,0	950,4	950,5	950,1
<b>61,25</b>	<b>Z,3</b>	1168,0	1234,2	1151,6	1091,0	1047,4	1013,4	988,8	974,3	965,5	959,3	955,4	953,7	952,1
<b>61,25</b>	<b>Z,4</b>	1315,0	1368,4	1241,9	1152,3	1088,4	1039,8	1005,2	984,6	972,1	963,5	957,8	955,3	953,0
<b>61,25</b>	<b>Z,5</b>	1332,1	1383,9	1252,2	1159,3	1093,1	1042,8	1007,1	985,8	972,8	963,9	958,1	955,5	953,1
<b>70,00</b>	<b>Z,1</b>	746,7	832,9	871,2	897,6	915,7	926,1	931,9	936,0	938,6	940,0	941,4	942,6	942,9

<b>70,00</b>	<b>Z,2</b>	884,1	965,9	964,2	960,6	958,1	953,2	948,5	946,6	945,4	944,2	943,8	944,2	943,9
<b>70,00</b>	<b>Z,3</b>	1160,8	1226,2	1142,5	1081,2	1039,2	1005,1	980,4	966,9	958,4	952,3	948,5	947,2	945,6
<b>70,00</b>	<b>Z,4</b>	1305,8	1358,6	1231,2	1141,1	1079,6	1031,0	996,3	977,0	964,8	956,3	950,9	948,7	946,5
<b>70,00</b>	<b>Z,5</b>	1322,7	1373,8	1241,3	1147,9	1084,2	1033,9	998,1	978,2	965,6	956,7	951,1	948,9	946,6
<b>78,75</b>	<b>Z,1</b>	744,1	828,5	865,9	891,9	909,4	919,6	925,7	929,8	932,3	933,7	935,1	936,3	936,7
<b>78,75</b>	<b>Z,2</b>	878,6	958,4	956,3	952,9	950,0	945,4	941,8	939,9	938,7	937,7	937,4	937,8	937,6
<b>78,75</b>	<b>Z,3</b>	1149,1	1212,7	1129,6	1069,5	1027,6	994,8	972,6	959,3	950,9	945,2	941,9	940,5	939,3
<b>78,75</b>	<b>Z,4</b>	1290,7	1342,0	1215,9	1127,4	1066,2	1019,4	987,9	969,0	957,0	949,0	944,1	941,9	940,1
<b>78,75</b>	<b>Z,5</b>	1307,2	1356,9	1225,7	1134,0	1070,6	1022,2	989,7	970,1	957,7	949,4	944,3	942,1	940,2
<b>87,50</b>	<b>Z,1</b>	741,9	823,9	861,6	887,8	904,7	914,4	920,8	924,4	926,6	928,0	929,1	930,2	930,6
<b>87,50</b>	<b>Z,2</b>	872,7	950,6	948,6	946,0	942,8	938,5	936,1	933,9	932,6	931,7	931,3	931,5	931,5
<b>87,50</b>	<b>Z,3</b>	1135,4	1198,1	1115,5	1057,5	1015,9	984,5	965,4	952,1	944,1	938,9	935,5	934,1	933,2
<b>87,50</b>	<b>Z,4</b>	1272,7	1323,7	1198,6	1112,9	1052,3	1007,5	980,0	961,2	949,8	942,5	937,5	935,3	934,0
<b>87,50</b>	<b>Z,5</b>	1288,6	1338,1	1208,0	1119,2	1056,4	1010,1	981,7	962,2	950,5	942,9	937,8	935,5	934,1
<b>96,25</b>	<b>Z,1</b>	752,7	834,8	866,5	889,9	904,3	912,2	917,3	919,9	921,5	922,3	923,0	923,9	924,5

<b>96,25</b>	<b>Z,2</b>	894,6	967,8	952,9	945,7	940,3	934,7	931,5	928,8	927,1	925,7	924,9	925,2	925,3
<b>96,25</b>	<b>Z,3</b>	1180,0	1226,7	1118,4	1052,6	1009,3	977,8	958,8	945,7	937,8	932,3	928,6	927,6	927,0
<b>96,25</b>	<b>Z,4</b>	1329,7	1357,9	1200,7	1105,7	1043,7	999,3	972,4	954,2	943,1	935,6	930,4	928,8	927,8
<b>96,25</b>	<b>Z,5</b>	1347,0	1372,9	1210,1	1111,7	1047,6	1001,7	973,9	955,1	943,7	935,9	930,6	928,9	927,9
<b>105,00</b>	<b>Z,1</b>	775,9	859,5	876,7	893,5	903,8	909,2	912,3	914,2	915,2	915,7	916,3	917,1	917,8
<b>105,00</b>	<b>Z,2</b>	942,3	1007,3	962,8	946,6	937,1	929,7	924,8	922,0	920,2	918,7	918,0	918,3	918,5
<b>105,00</b>	<b>Z,3</b>	1279,7	1294,2	1127,6	1048,2	1000,9	968,7	948,6	936,9	929,7	924,7	921,3	920,5	920,0
<b>105,00</b>	<b>Z,4</b>	1458,1	1439,0	1209,5	1098,6	1032,7	988,2	960,4	944,3	934,4	927,6	922,9	921,6	920,7
<b>105,00</b>	<b>Z,5</b>	1478,9	1455,6	1218,8	1104,4	1036,3	990,4	961,8	945,1	935,0	927,9	923,1	921,7	920,8
<b>113,75</b>	<b>Z,1</b>	787,7	870,2	878,3	891,3	899,1	903,0	905,1	906,5	907,5	907,9	908,6	909,6	910,2
<b>113,75</b>	<b>Z,2</b>	965,1	1022,9	961,3	940,8	929,7	921,6	916,2	913,5	912,0	910,6	910,1	910,7	910,7
<b>113,75</b>	<b>Z,3</b>	1326,1	1319,3	1120,1	1035,5	988,2	957,2	937,6	927,0	920,7	915,9	913,2	912,8	911,7
<b>113,75</b>	<b>Z,4</b>	1518,0	1469,1	1199,1	1082,6	1017,4	974,9	948,2	933,6	925,0	918,5	914,7	913,8	912,3
<b>113,75</b>	<b>Z,5</b>	1540,5	1486,2	1208,1	1087,9	1020,7	976,9	949,4	934,4	925,5	918,8	914,9	913,9	912,3
<b>122,50</b>	<b>Z,1</b>	784,1	858,2	861,6	876,0	885,2	890,7	894,1	896,3	898,0	899,1	900,3	901,6	902,2

	<b>122,50</b>	<b>Z,2</b>	952,6	1000,1	932,9	917,8	911,0	906,4	903,7	902,3	901,9	901,5	901,8	902,6	902,7
	<b>122,50</b>	<b>Z,3</b>	1295,1	1276,2	1069,5	997,5	960,2	936,6	922,2	913,8	909,3	906,2	904,6	904,5	903,6
	<b>122,50</b>	<b>Z,4</b>	1477,0	1416,0	1137,6	1037,2	984,7	951,6	931,3	919,5	913,0	908,5	906,0	905,4	904,1
	<b>122,50</b>	<b>Z,5</b>	1498,2	1432,1	1145,3	1041,8	987,5	953,3	932,4	920,1	913,4	908,8	906,2	905,5	904,1
	<b>131,25</b>	<b>Z,1</b>	780,5	848,6	847,4	862,3	872,5	879,3	883,9	887,1	889,6	891,3	893,1	894,3	894,5
	<b>131,25</b>	<b>Z,2</b>	944,2	983,4	911,3	899,4	895,4	893,4	892,7	892,5	893,1	893,6	894,5	895,1	894,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,3</b>	1276,5	1245,5	1033,8	970,2	939,3	920,6	909,5	902,8	899,8	898,0	897,3	896,7	895,6
	<b>131,25</b>	<b>Z,4</b>	1452,5	1378,1	1094,8	1005,5	961,1	934,1	917,9	908,0	903,2	900,2	898,7	897,4	895,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,5</b>	1473,1	1393,3	1101,8	1009,5	963,6	935,6	918,9	908,6	903,6	900,4	898,8	897,5	896,0
	<b>140,00</b>	<b>Z,1</b>	775,8	843,5	841,0	854,6	863,8	870,2	874,6	877,7	880,3	882,1	884,0	884,6	883,1
	<b>140,00</b>	<b>Z,2</b>	939,3	978,2	905,0	891,7	886,8	884,3	883,4	883,1	883,8	884,4	885,4	885,4	883,3
	<b>140,00</b>	<b>Z,3</b>	1271,2	1240,2	1027,4	962,5	930,7	911,5	900,2	893,5	890,5	888,7	888,2	886,9	883,7
	<b>140,00</b>	<b>Z,4</b>	1447,0	1372,7	1088,4	997,8	952,6	925,0	908,6	898,7	893,9	890,9	889,6	887,6	883,9
	<b>140,00</b>	<b>Z,5</b>	1467,5	1387,9	1095,4	1001,8	955,0	926,5	909,6	899,3	894,3	891,2	889,8	887,7	883,9

Keterangan:

- Z1= Lapisan bahan bakar terluar pertama (OpyC)
- Z2= Lapisan bahan bakar terluar kedua (SiC)
- Z3= Lapisan bahan bakar terluar ketiga (IpyC)
- Z4= Lapisan bahan bakar terluar keempat (buffer)
- Z5= Lapisan bahan bakar terluar kelima (kernel)



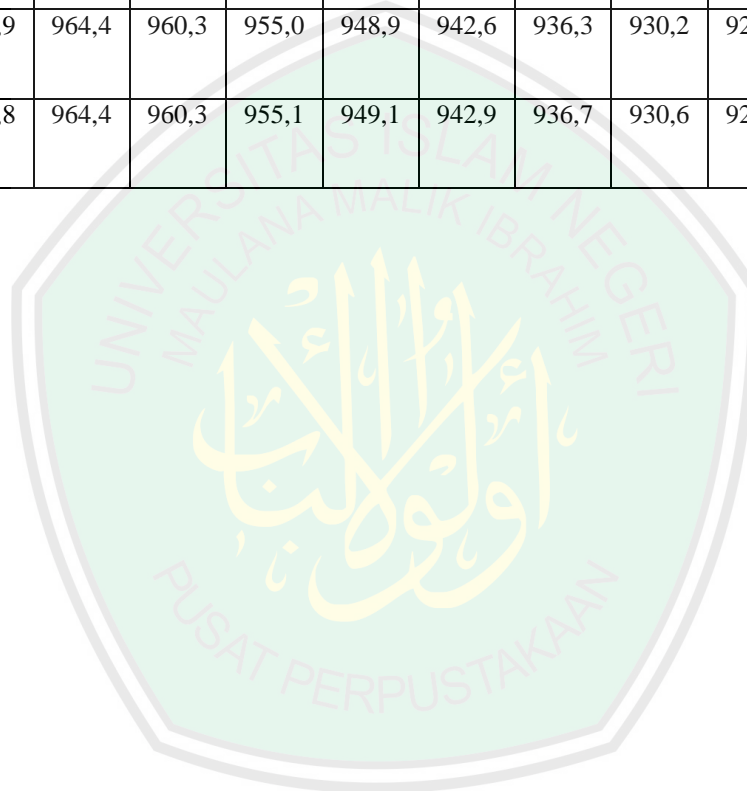
### DATA HASIL PERCOBAAN III

#### 1. Temperatures of Solid Matter In Steady State

Data hasil simulasi reaktor daya 200 MW

		Jari-Jari (cm)																	
		0,0	8,3	16,7	25,0	35,0	43,8	52,5	61,2	70,0	78,8	87,5	96,2	105,0	113,8	122,5	131,2	140,0	146,0
Ketinggian(cm)	0,0	754,9	755,0	755,0	755,1	755,1	755,0	752,4	748,6	746,7	744,1	741,9	752,7	775,9	787,7	784,1	780,5	775,8	722,6
	83,8	846,4	846,5	846,6	846,6	846,6	846,4	842,2	835,8	832,9	828,5	823,9	834,8	859,5	870,2	858,2	848,6	843,5	769,0
	167,9	890,6	890,6	890,7	890,6	890,4	889,5	883,9	875,6	871,2	865,9	861,6	866,5	876,7	878,3	861,6	847,4	841,0	769,0
	251,7	922,3	922,3	922,3	922,1	921,5	919,9	913,0	903,3	897,6	891,9	887,8	889,9	893,5	891,3	876,0	862,3	854,6	778,0
	335,5	940,7	940,7	940,6	940,2	939,2	936,8	930,3	921,7	915,7	909,4	904,7	904,3	903,8	899,1	885,2	872,5	863,8	784,4
	419,3	952,8	952,7	952,5	952,0	950,5	947,5	941,0	932,6	926,1	919,6	914,4	912,2	909,2	903,0	890,7	879,3	870,2	788,7
	503,4	960,3	960,1	959,8	959,1	957,2	953,8	947,1	938,7	931,9	925,7	920,8	917,3	912,3	905,1	894,1	883,9	874,6	791,7
	587,2	964,1	963,9	963,5	962,5	960,3	956,6	950,3	942,7	936,0	929,8	924,4	919,9	914,2	906,5	896,3	887,1	877,7	793,8
	671,0	967,2	967,0	966,4	965,3	962,7	958,7	952,5	945,2	938,6	932,3	926,6	921,5	915,2	907,5	898,0	889,6	880,3	795,5

	754,8	968,5	968,2	967,5	966,2	963,4	959,4	953,5	946,7	940,0	933,7	928,0	922,3	915,7	907,9	899,1	891,3	882,1	796,6
	838,9	969,7	969,3	968,5	966,9	963,7	959,7	954,2	947,9	941,4	935,1	929,1	923,0	916,3	908,6	900,3	893,1	884,0	797,8
	922,7	971,5	971,1	970,0	967,9	964,4	960,3	955,0	948,9	942,6	936,3	930,2	923,9	917,1	909,6	901,6	894,3	884,6	797,8
	943,0	971,9	971,5	970,0	967,8	964,4	960,3	955,1	949,1	942,9	936,7	930,6	924,5	917,8	910,2	902,2	894,5	883,1	796,3



## 2. Temperatures of Fuel Element (Eksternal Boundary Of Shell) In Steady State

		Lapisan Triso	Ketinggian(cm)												
			0,0	83,8	167,9	251,7	335,5	419,3	503,4	587,2	671,0	754,8	838,9	922,7	943,0
Jari-jari(cm)	0,00	Z,1	754,9	846,4	890,6	922,3	940,7	952,8	960,3	964,1	967,2	968,5	969,7	971,5	971,9
	0,00	Z,2	899,9	988,3	990,9	992,5	986,8	982,8	979,4	975,9	974,9	973,2	972,9	974,6	975,0
	0,00	Z,3	1192,7	1266,1	1183,5	1127,1	1075,3	1040,4	1016,2	998,4	989,6	982,1	979,2	980,6	981,0
	0,00	Z,4	1347,0	1407,7	1279,5	1193,9	1119,2	1069,0	1034,5	1009,6	997,0	986,6	982,3	983,5	983,9
	0,00	Z,5	1365,0	1424,0	1290,4	1201,5	1124,2	1072,3	1036,5	1010,9	997,8	987,1	982,7	983,8	984,3
	8,33	Z,1	755,0	846,5	890,6	922,3	940,7	952,7	960,1	963,9	967,0	968,2	969,3	971,1	971,5
	8,33	Z,2	899,9	988,4	991,0	992,6	986,8	982,8	979,3	975,7	974,7	972,9	972,6	974,2	974,6
	8,33	Z,3	1192,8	1266,2	1183,6	1127,1	1075,2	1040,3	1016,0	998,2	989,4	981,8	978,9	980,1	980,5
	8,33	Z,4	1347,1	1407,8	1279,6	1193,9	1119,2	1069,0	1034,3	1009,4	996,7	986,3	982,0	983,1	983,5
	8,33	Z,5	1365,0	1424,1	1290,5	1201,6	1124,2	1072,2	1036,4	1010,7	997,6	986,8	982,3	983,4	983,8
	16,67	Z,1	755,0	846,6	890,7	922,3	940,6	952,5	959,8	963,5	966,4	967,5	968,5	970,0	970,0

	16,67	Z,2	899,9	988,4	991,0	992,6	986,7	982,5	979,0	975,2	974,1	972,2	971,7	973,0	972,5
	16,67	Z,3	1192,8	1266,3	1183,6	1127,1	1075,1	1040,1	1015,7	997,7	988,8	981,1	977,9	978,6	977,4
	16,67	Z,4	1347,1	1407,9	1279,6	1193,9	1119,1	1068,8	1034,0	1009,0	996,1	985,6	981,0	981,4	979,8
	16,67	Z,5	1365,1	1424,1	1290,6	1201,5	1124,1	1072,0	1036,1	1010,2	997,0	986,1	981,4	981,7	980,0
	25,00	Z,1	755,1	846,6	890,6	922,1	940,2	952,0	959,1	962,5	965,3	966,2	966,9	967,9	967,8
	25,00	Z,2	900,0	988,5	991,0	992,4	986,4	982,0	978,2	974,3	972,9	970,9	969,8	970,3	969,7
	25,00	Z,3	1192,9	1266,3	1183,6	1126,9	1074,8	1039,6	1015,0	996,8	987,7	979,9	975,5	975,0	973,5
	25,00	Z,4	1347,2	1407,9	1279,6	1193,8	1118,8	1068,2	1033,3	1008,0	995,0	984,3	978,4	977,3	975,4
	25,00	Z,5	1365,1	1424,2	1290,5	1201,4	1123,8	1071,5	1035,3	1009,3	995,8	984,8	978,7	977,6	975,6
	35,00	Z,1	755,1	846,6	890,4	921,5	939,2	950,5	957,2	960,3	962,7	963,4	963,7	964,4	964,4
	35,00	Z,2	900,1	988,5	990,8	991,8	985,3	980,5	976,3	972,0	970,4	968,1	966,5	966,5	966,2
	35,00	Z,3	1193,0	1266,3	1183,3	1126,3	1073,8	1038,1	1013,1	994,5	985,1	977,0	971,7	970,3	969,5
	35,00	Z,4	1347,3	1407,9	1279,4	1193,2	1117,7	1066,7	1031,3	1005,7	992,4	981,5	974,4	972,3	971,1
	35,00	Z,5	1365,2	1424,2	1290,3	1200,8	1122,7	1070,0	1033,4	1007,0	993,2	982,0	974,7	972,5	971,3
	43,75	Z,1	755,0	846,4	889,5	919,9	936,8	947,5	953,8	956,6	958,7	959,4	959,7	960,3	960,3

<b>43,75</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,2	989,9	990,1	982,9	977,6	972,9	968,3	966,4	964,0	962,3	962,1	961,7
<b>43,75</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,1	1182,5	1124,7	1071,4	1035,1	1009,6	990,8	981,0	972,9	967,4	965,6	964,4
<b>43,75</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,7	1278,5	1191,5	1115,3	1063,8	1027,9	1002,0	988,3	977,4	970,0	967,3	965,8
<b>43,75</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1423,9	1289,4	1199,1	1120,3	1067,0	1030,0	1003,3	989,2	977,9	970,3	967,5	965,9
<b>52,50</b>	<b>Z,1</b>	752,4	842,2	883,9	913,0	930,3	941,0	947,1	950,3	952,5	953,5	954,2	955,0	955,1
<b>52,50</b>	<b>Z,2</b>	894,7	981,3	981,6	981,0	975,3	970,2	965,6	961,7	959,9	958,0	956,9	956,7	956,2
<b>52,50</b>	<b>Z,3</b>	1181,7	1253,5	1169,2	1111,1	1061,4	1026,0	1000,9	983,6	973,9	966,6	961,9	960,0	958,4
<b>52,50</b>	<b>Z,4</b>	1332,8	1392,3	1262,8	1175,8	1104,2	1053,8	1018,5	994,5	980,9	970,9	964,5	961,6	959,5
<b>52,50</b>	<b>Z,5</b>	1350,3	1408,2	1273,4	1183,1	1109,1	1057,0	1020,5	995,7	981,7	971,4	964,7	961,8	959,7
<b>61,25</b>	<b>Z,1</b>	748,6	835,8	875,6	903,3	921,7	932,6	938,7	942,7	945,2	946,7	947,9	948,9	949,1
<b>61,25</b>	<b>Z,2</b>	887,7	970,5	970,2	967,7	964,8	960,3	955,9	953,5	952,2	951,0	950,4	950,5	950,1
<b>61,25</b>	<b>Z,3</b>	1168,0	1234,2	1151,6	1091,0	1047,4	1013,4	988,8	974,3	965,5	959,3	955,4	953,7	952,1
<b>61,25</b>	<b>Z,4</b>	1315,0	1368,4	1241,9	1152,3	1088,4	1039,8	1005,2	984,6	972,1	963,5	957,8	955,3	953,0
<b>61,25</b>	<b>Z,5</b>	1332,1	1383,9	1252,2	1159,3	1093,1	1042,8	1007,1	985,8	972,8	963,9	958,1	955,5	953,1
<b>70,00</b>	<b>Z,1</b>	746,7	832,9	871,2	897,6	915,7	926,1	931,9	936,0	938,6	940,0	941,4	942,6	942,9

<b>70,00</b>	<b>Z,2</b>	884,1	965,9	964,2	960,6	958,1	953,2	948,5	946,6	945,4	944,2	943,8	944,2	943,9
<b>70,00</b>	<b>Z,3</b>	1160,8	1226,2	1142,5	1081,2	1039,2	1005,1	980,4	966,9	958,4	952,3	948,5	947,2	945,6
<b>70,00</b>	<b>Z,4</b>	1305,8	1358,6	1231,2	1141,1	1079,6	1031,0	996,3	977,0	964,8	956,3	950,9	948,7	946,5
<b>70,00</b>	<b>Z,5</b>	1322,7	1373,8	1241,3	1147,9	1084,2	1033,9	998,1	978,2	965,6	956,7	951,1	948,9	946,6
<b>78,75</b>	<b>Z,1</b>	744,1	828,5	865,9	891,9	909,4	919,6	925,7	929,8	932,3	933,7	935,1	936,3	936,7
<b>78,75</b>	<b>Z,2</b>	878,6	958,4	956,3	952,9	950,0	945,4	941,8	939,9	938,7	937,7	937,4	937,8	937,6
<b>78,75</b>	<b>Z,3</b>	1149,1	1212,7	1129,6	1069,5	1027,6	994,8	972,6	959,3	950,9	945,2	941,9	940,5	939,3
<b>78,75</b>	<b>Z,4</b>	1290,7	1342,0	1215,9	1127,4	1066,2	1019,4	987,9	969,0	957,0	949,0	944,1	941,9	940,1
<b>78,75</b>	<b>Z,5</b>	1307,2	1356,9	1225,7	1134,0	1070,6	1022,2	989,7	970,1	957,7	949,4	944,3	942,1	940,2
<b>87,50</b>	<b>Z,1</b>	741,9	823,9	861,6	887,8	904,7	914,4	920,8	924,4	926,6	928,0	929,1	930,2	930,6
<b>87,50</b>	<b>Z,2</b>	872,7	950,6	948,6	946,0	942,8	938,5	936,1	933,9	932,6	931,7	931,3	931,5	931,5
<b>87,50</b>	<b>Z,3</b>	1135,4	1198,1	1115,5	1057,5	1015,9	984,5	965,4	952,1	944,1	938,9	935,5	934,1	933,2
<b>87,50</b>	<b>Z,4</b>	1272,7	1323,7	1198,6	1112,9	1052,3	1007,5	980,0	961,2	949,8	942,5	937,5	935,3	934,0
<b>87,50</b>	<b>Z,5</b>	1288,6	1338,1	1208,0	1119,2	1056,4	1010,1	981,7	962,2	950,5	942,9	937,8	935,5	934,1
<b>96,25</b>	<b>Z,1</b>	752,7	834,8	866,5	889,9	904,3	912,2	917,3	919,9	921,5	922,3	923,0	923,9	924,5

<b>96,25</b>	<b>Z,2</b>	894,6	967,8	952,9	945,7	940,3	934,7	931,5	928,8	927,1	925,7	924,9	925,2	925,3
<b>96,25</b>	<b>Z,3</b>	1180,0	1226,7	1118,4	1052,6	1009,3	977,8	958,8	945,7	937,8	932,3	928,6	927,6	927,0
<b>96,25</b>	<b>Z,4</b>	1329,7	1357,9	1200,7	1105,7	1043,7	999,3	972,4	954,2	943,1	935,6	930,4	928,8	927,8
<b>96,25</b>	<b>Z,5</b>	1347,0	1372,9	1210,1	1111,7	1047,6	1001,7	973,9	955,1	943,7	935,9	930,6	928,9	927,9
<b>105,00</b>	<b>Z,1</b>	775,9	859,5	876,7	893,5	903,8	909,2	912,3	914,2	915,2	915,7	916,3	917,1	917,8
<b>105,00</b>	<b>Z,2</b>	942,3	1007,3	962,8	946,6	937,1	929,7	924,8	922,0	920,2	918,7	918,0	918,3	918,5
<b>105,00</b>	<b>Z,3</b>	1279,7	1294,2	1127,6	1048,2	1000,9	968,7	948,6	936,9	929,7	924,7	921,3	920,5	920,0
<b>105,00</b>	<b>Z,4</b>	1458,1	1439,0	1209,5	1098,6	1032,7	988,2	960,4	944,3	934,4	927,6	922,9	921,6	920,7
<b>105,00</b>	<b>Z,5</b>	1478,9	1455,6	1218,8	1104,4	1036,3	990,4	961,8	945,1	935,0	927,9	923,1	921,7	920,8
<b>113,75</b>	<b>Z,1</b>	787,7	870,2	878,3	891,3	899,1	903,0	905,1	906,5	907,5	907,9	908,6	909,6	910,2
<b>113,75</b>	<b>Z,2</b>	965,1	1022,9	961,3	940,8	929,7	921,6	916,2	913,5	912,0	910,6	910,1	910,7	910,7
<b>113,75</b>	<b>Z,3</b>	1326,1	1319,3	1120,1	1035,5	988,2	957,2	937,6	927,0	920,7	915,9	913,2	912,8	911,7
<b>113,75</b>	<b>Z,4</b>	1518,0	1469,1	1199,1	1082,6	1017,4	974,9	948,2	933,6	925,0	918,5	914,7	913,8	912,3
<b>113,75</b>	<b>Z,5</b>	1540,5	1486,2	1208,1	1087,9	1020,7	976,9	949,4	934,4	925,5	918,8	914,9	913,9	912,3
<b>122,50</b>	<b>Z,1</b>	784,1	858,2	861,6	876,0	885,2	890,7	894,1	896,3	898,0	899,1	900,3	901,6	902,2

	<b>122,50</b>	<b>Z,2</b>	952,6	1000,1	932,9	917,8	911,0	906,4	903,7	902,3	901,9	901,5	901,8	902,6	902,7
	<b>122,50</b>	<b>Z,3</b>	1295,1	1276,2	1069,5	997,5	960,2	936,6	922,2	913,8	909,3	906,2	904,6	904,5	903,6
	<b>122,50</b>	<b>Z,4</b>	1477,0	1416,0	1137,6	1037,2	984,7	951,6	931,3	919,5	913,0	908,5	906,0	905,4	904,1
	<b>122,50</b>	<b>Z,5</b>	1498,2	1432,1	1145,3	1041,8	987,5	953,3	932,4	920,1	913,4	908,8	906,2	905,5	904,1
	<b>131,25</b>	<b>Z,1</b>	780,5	848,6	847,4	862,3	872,5	879,3	883,9	887,1	889,6	891,3	893,1	894,3	894,5
	<b>131,25</b>	<b>Z,2</b>	944,2	983,4	911,3	899,4	895,4	893,4	892,7	892,5	893,1	893,6	894,5	895,1	894,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,3</b>	1276,5	1245,5	1033,8	970,2	939,3	920,6	909,5	902,8	899,8	898,0	897,3	896,7	895,6
	<b>131,25</b>	<b>Z,4</b>	1452,5	1378,1	1094,8	1005,5	961,1	934,1	917,9	908,0	903,2	900,2	898,7	897,4	895,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,5</b>	1473,1	1393,3	1101,8	1009,5	963,6	935,6	918,9	908,6	903,6	900,4	898,8	897,5	896,0
	<b>140,00</b>	<b>Z,1</b>	775,8	843,5	841,0	854,6	863,8	870,2	874,6	877,7	880,3	882,1	884,0	884,6	883,1
	<b>140,00</b>	<b>Z,2</b>	939,3	978,2	905,0	891,7	886,8	884,3	883,4	883,1	883,8	884,4	885,4	885,4	883,3
	<b>140,00</b>	<b>Z,3</b>	1271,2	1240,2	1027,4	962,5	930,7	911,5	900,2	893,5	890,5	888,7	888,2	886,9	883,7
	<b>140,00</b>	<b>Z,4</b>	1447,0	1372,7	1088,4	997,8	952,6	925,0	908,6	898,7	893,9	890,9	889,6	887,6	883,9
	<b>140,00</b>	<b>Z,5</b>	1467,5	1387,9	1095,4	1001,8	955,0	926,5	909,6	899,3	894,3	891,2	889,8	887,7	883,9

Keterangan:

- Z1= Lapisan bahan bakar terluar pertama (OpyC)
- Z2= Lapisan bahan bakar terluar kedua (SiC)
- Z3= Lapisan bahan bakar terluar ketiga (IpyC)
- Z4= Lapisan bahan bakar terluar keempat (buffer)
- Z5= Lapisan bahan bakar terluar kelima (kernel)



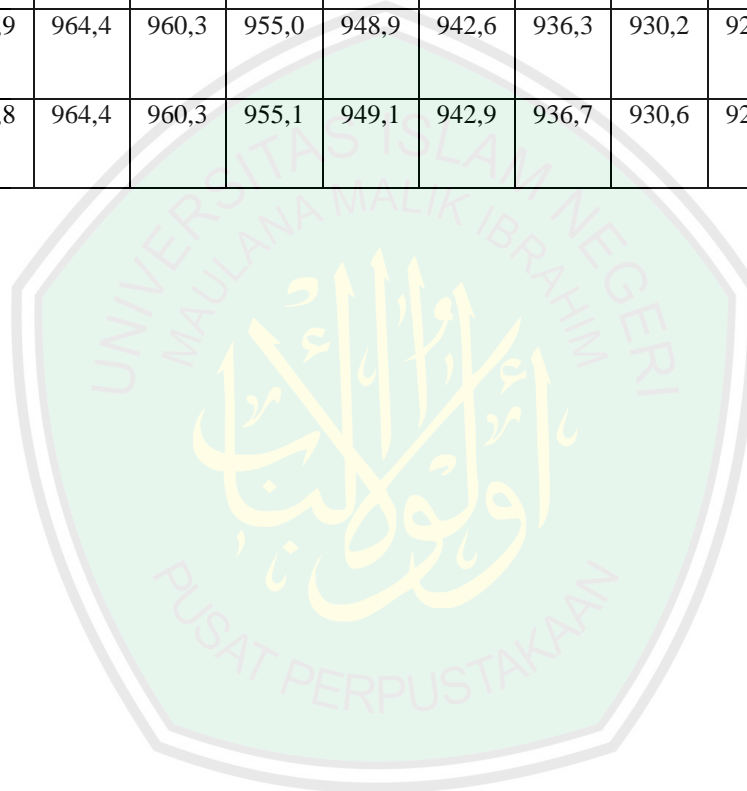
## DATA HASIL PERCOBAAN IV

### 1. Temperatures of Solid Matter In Steady State

Data hasil simulasi reaktor daya 200 MW

		Jari-Jari (cm)																	
		0,0	8,3	16,7	25,0	35,0	43,8	52,5	61,2	70,0	78,8	87,5	96,2	105,0	113,8	122,5	131,2	140,0	146,0
Ketinggian(cm)	0,0	754,9	755,0	755,0	755,1	755,1	755,0	752,4	748,6	746,7	744,1	741,9	752,7	775,9	787,7	784,1	780,5	775,8	722,6
	83,8	846,4	846,5	846,6	846,6	846,6	846,4	842,2	835,8	832,9	828,5	823,9	834,8	859,5	870,2	858,2	848,6	843,5	769,0
	167,9	890,6	890,6	890,7	890,6	890,4	889,5	883,9	875,6	871,2	865,9	861,6	866,5	876,7	878,3	861,6	847,4	841,0	769,0
	251,7	922,3	922,3	922,3	922,1	921,5	919,9	913,0	903,3	897,6	891,9	887,8	889,9	893,5	891,3	876,0	862,3	854,6	778,0
	335,5	940,7	940,7	940,6	940,2	939,2	936,8	930,3	921,7	915,7	909,4	904,7	904,3	903,8	899,1	885,2	872,5	863,8	784,4
	419,3	952,8	952,7	952,5	952,0	950,5	947,5	941,0	932,6	926,1	919,6	914,4	912,2	909,2	903,0	890,7	879,3	870,2	788,7
	503,4	960,3	960,1	959,8	959,1	957,2	953,8	947,1	938,7	931,9	925,7	920,8	917,3	912,3	905,1	894,1	883,9	874,6	791,7
	587,2	964,1	963,9	963,5	962,5	960,3	956,6	950,3	942,7	936,0	929,8	924,4	919,9	914,2	906,5	896,3	887,1	877,7	793,8
	671,0	967,2	967,0	966,4	965,3	962,7	958,7	952,5	945,2	938,6	932,3	926,6	921,5	915,2	907,5	898,0	889,6	880,3	795,5

	754,8	968,5	968,2	967,5	966,2	963,4	959,4	953,5	946,7	940,0	933,7	928,0	922,3	915,7	907,9	899,1	891,3	882,1	796,6
	838,9	969,7	969,3	968,5	966,9	963,7	959,7	954,2	947,9	941,4	935,1	929,1	923,0	916,3	908,6	900,3	893,1	884,0	797,8
	922,7	971,5	971,1	970,0	967,9	964,4	960,3	955,0	948,9	942,6	936,3	930,2	923,9	917,1	909,6	901,6	894,3	884,6	797,8
	943,0	971,9	971,5	970,0	967,8	964,4	960,3	955,1	949,1	942,9	936,7	930,6	924,5	917,8	910,2	902,2	894,5	883,1	796,3



## 2. Temperatures of Fuel Element (Eksternal Boundary Of Shell) In Steady State

		Lapisan Triso	Ketinggian(cm)												
			0,0	83,8	167,9	251,7	335,5	419,3	503,4	587,2	671,0	754,8	838,9	922,7	943,0
Jari-jari(cm)	0,00	Z,1	754,9	846,4	890,6	922,3	940,7	952,8	960,3	964,1	967,2	968,5	969,7	971,5	971,9
	0,00	Z,2	899,9	988,3	990,9	992,5	986,8	982,8	979,4	975,9	974,9	973,2	972,9	974,6	975,0
	0,00	Z,3	1192,7	1266,1	1183,5	1127,1	1075,3	1040,4	1016,2	998,4	989,6	982,1	979,2	980,6	981,0
	0,00	Z,4	1347,0	1407,7	1279,5	1193,9	1119,2	1069,0	1034,5	1009,6	997,0	986,6	982,3	983,5	983,9
	0,00	Z,5	1365,0	1424,0	1290,4	1201,5	1124,2	1072,3	1036,5	1010,9	997,8	987,1	982,7	983,8	984,3
	8,33	Z,1	755,0	846,5	890,6	922,3	940,7	952,7	960,1	963,9	967,0	968,2	969,3	971,1	971,5
	8,33	Z,2	899,9	988,4	991,0	992,6	986,8	982,8	979,3	975,7	974,7	972,9	972,6	974,2	974,6
	8,33	Z,3	1192,8	1266,2	1183,6	1127,1	1075,2	1040,3	1016,0	998,2	989,4	981,8	978,9	980,1	980,5
	8,33	Z,4	1347,1	1407,8	1279,6	1193,9	1119,2	1069,0	1034,3	1009,4	996,7	986,3	982,0	983,1	983,5
	8,33	Z,5	1365,0	1424,1	1290,5	1201,6	1124,2	1072,2	1036,4	1010,7	997,6	986,8	982,3	983,4	983,8
	16,67	Z,1	755,0	846,6	890,7	922,3	940,6	952,5	959,8	963,5	966,4	967,5	968,5	970,0	970,0

	16,67	Z,2	899,9	988,4	991,0	992,6	986,7	982,5	979,0	975,2	974,1	972,2	971,7	973,0	972,5
	16,67	Z,3	1192,8	1266,3	1183,6	1127,1	1075,1	1040,1	1015,7	997,7	988,8	981,1	977,9	978,6	977,4
	16,67	Z,4	1347,1	1407,9	1279,6	1193,9	1119,1	1068,8	1034,0	1009,0	996,1	985,6	981,0	981,4	979,8
	16,67	Z,5	1365,1	1424,1	1290,6	1201,5	1124,1	1072,0	1036,1	1010,2	997,0	986,1	981,4	981,7	980,0
	25,00	Z,1	755,1	846,6	890,6	922,1	940,2	952,0	959,1	962,5	965,3	966,2	966,9	967,9	967,8
	25,00	Z,2	900,0	988,5	991,0	992,4	986,4	982,0	978,2	974,3	972,9	970,9	969,8	970,3	969,7
	25,00	Z,3	1192,9	1266,3	1183,6	1126,9	1074,8	1039,6	1015,0	996,8	987,7	979,9	975,5	975,0	973,5
	25,00	Z,4	1347,2	1407,9	1279,6	1193,8	1118,8	1068,2	1033,3	1008,0	995,0	984,3	978,4	977,3	975,4
	25,00	Z,5	1365,1	1424,2	1290,5	1201,4	1123,8	1071,5	1035,3	1009,3	995,8	984,8	978,7	977,6	975,6
	35,00	Z,1	755,1	846,6	890,4	921,5	939,2	950,5	957,2	960,3	962,7	963,4	963,7	964,4	964,4
	35,00	Z,2	900,1	988,5	990,8	991,8	985,3	980,5	976,3	972,0	970,4	968,1	966,5	966,5	966,2
	35,00	Z,3	1193,0	1266,3	1183,3	1126,3	1073,8	1038,1	1013,1	994,5	985,1	977,0	971,7	970,3	969,5
	35,00	Z,4	1347,3	1407,9	1279,4	1193,2	1117,7	1066,7	1031,3	1005,7	992,4	981,5	974,4	972,3	971,1
	35,00	Z,5	1365,2	1424,2	1290,3	1200,8	1122,7	1070,0	1033,4	1007,0	993,2	982,0	974,7	972,5	971,3
	43,75	Z,1	755,0	846,4	889,5	919,9	936,8	947,5	953,8	956,6	958,7	959,4	959,7	960,3	960,3

<b>43,75</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,2	989,9	990,1	982,9	977,6	972,9	968,3	966,4	964,0	962,3	962,1	961,7
<b>43,75</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,1	1182,5	1124,7	1071,4	1035,1	1009,6	990,8	981,0	972,9	967,4	965,6	964,4
<b>43,75</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,7	1278,5	1191,5	1115,3	1063,8	1027,9	1002,0	988,3	977,4	970,0	967,3	965,8
<b>43,75</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1423,9	1289,4	1199,1	1120,3	1067,0	1030,0	1003,3	989,2	977,9	970,3	967,5	965,9
<b>52,50</b>	<b>Z,1</b>	752,4	842,2	883,9	913,0	930,3	941,0	947,1	950,3	952,5	953,5	954,2	955,0	955,1
<b>52,50</b>	<b>Z,2</b>	894,7	981,3	981,6	981,0	975,3	970,2	965,6	961,7	959,9	958,0	956,9	956,7	956,2
<b>52,50</b>	<b>Z,3</b>	1181,7	1253,5	1169,2	1111,1	1061,4	1026,0	1000,9	983,6	973,9	966,6	961,9	960,0	958,4
<b>52,50</b>	<b>Z,4</b>	1332,8	1392,3	1262,8	1175,8	1104,2	1053,8	1018,5	994,5	980,9	970,9	964,5	961,6	959,5
<b>52,50</b>	<b>Z,5</b>	1350,3	1408,2	1273,4	1183,1	1109,1	1057,0	1020,5	995,7	981,7	971,4	964,7	961,8	959,7
<b>61,25</b>	<b>Z,1</b>	748,6	835,8	875,6	903,3	921,7	932,6	938,7	942,7	945,2	946,7	947,9	948,9	949,1
<b>61,25</b>	<b>Z,2</b>	887,7	970,5	970,2	967,7	964,8	960,3	955,9	953,5	952,2	951,0	950,4	950,5	950,1
<b>61,25</b>	<b>Z,3</b>	1168,0	1234,2	1151,6	1091,0	1047,4	1013,4	988,8	974,3	965,5	959,3	955,4	953,7	952,1
<b>61,25</b>	<b>Z,4</b>	1315,0	1368,4	1241,9	1152,3	1088,4	1039,8	1005,2	984,6	972,1	963,5	957,8	955,3	953,0
<b>61,25</b>	<b>Z,5</b>	1332,1	1383,9	1252,2	1159,3	1093,1	1042,8	1007,1	985,8	972,8	963,9	958,1	955,5	953,1
<b>70,00</b>	<b>Z,1</b>	746,7	832,9	871,2	897,6	915,7	926,1	931,9	936,0	938,6	940,0	941,4	942,6	942,9

<b>70,00</b>	<b>Z,2</b>	884,1	965,9	964,2	960,6	958,1	953,2	948,5	946,6	945,4	944,2	943,8	944,2	943,9
<b>70,00</b>	<b>Z,3</b>	1160,8	1226,2	1142,5	1081,2	1039,2	1005,1	980,4	966,9	958,4	952,3	948,5	947,2	945,6
<b>70,00</b>	<b>Z,4</b>	1305,8	1358,6	1231,2	1141,1	1079,6	1031,0	996,3	977,0	964,8	956,3	950,9	948,7	946,5
<b>70,00</b>	<b>Z,5</b>	1322,7	1373,8	1241,3	1147,9	1084,2	1033,9	998,1	978,2	965,6	956,7	951,1	948,9	946,6
<b>78,75</b>	<b>Z,1</b>	744,1	828,5	865,9	891,9	909,4	919,6	925,7	929,8	932,3	933,7	935,1	936,3	936,7
<b>78,75</b>	<b>Z,2</b>	878,6	958,4	956,3	952,9	950,0	945,4	941,8	939,9	938,7	937,7	937,4	937,8	937,6
<b>78,75</b>	<b>Z,3</b>	1149,1	1212,7	1129,6	1069,5	1027,6	994,8	972,6	959,3	950,9	945,2	941,9	940,5	939,3
<b>78,75</b>	<b>Z,4</b>	1290,7	1342,0	1215,9	1127,4	1066,2	1019,4	987,9	969,0	957,0	949,0	944,1	941,9	940,1
<b>78,75</b>	<b>Z,5</b>	1307,2	1356,9	1225,7	1134,0	1070,6	1022,2	989,7	970,1	957,7	949,4	944,3	942,1	940,2
<b>87,50</b>	<b>Z,1</b>	741,9	823,9	861,6	887,8	904,7	914,4	920,8	924,4	926,6	928,0	929,1	930,2	930,6
<b>87,50</b>	<b>Z,2</b>	872,7	950,6	948,6	946,0	942,8	938,5	936,1	933,9	932,6	931,7	931,3	931,5	931,5
<b>87,50</b>	<b>Z,3</b>	1135,4	1198,1	1115,5	1057,5	1015,9	984,5	965,4	952,1	944,1	938,9	935,5	934,1	933,2
<b>87,50</b>	<b>Z,4</b>	1272,7	1323,7	1198,6	1112,9	1052,3	1007,5	980,0	961,2	949,8	942,5	937,5	935,3	934,0
<b>87,50</b>	<b>Z,5</b>	1288,6	1338,1	1208,0	1119,2	1056,4	1010,1	981,7	962,2	950,5	942,9	937,8	935,5	934,1
<b>96,25</b>	<b>Z,1</b>	752,7	834,8	866,5	889,9	904,3	912,2	917,3	919,9	921,5	922,3	923,0	923,9	924,5

<b>96,25</b>	<b>Z,2</b>	894,6	967,8	952,9	945,7	940,3	934,7	931,5	928,8	927,1	925,7	924,9	925,2	925,3
<b>96,25</b>	<b>Z,3</b>	1180,0	1226,7	1118,4	1052,6	1009,3	977,8	958,8	945,7	937,8	932,3	928,6	927,6	927,0
<b>96,25</b>	<b>Z,4</b>	1329,7	1357,9	1200,7	1105,7	1043,7	999,3	972,4	954,2	943,1	935,6	930,4	928,8	927,8
<b>96,25</b>	<b>Z,5</b>	1347,0	1372,9	1210,1	1111,7	1047,6	1001,7	973,9	955,1	943,7	935,9	930,6	928,9	927,9
<b>105,00</b>	<b>Z,1</b>	775,9	859,5	876,7	893,5	903,8	909,2	912,3	914,2	915,2	915,7	916,3	917,1	917,8
<b>105,00</b>	<b>Z,2</b>	942,3	1007,3	962,8	946,6	937,1	929,7	924,8	922,0	920,2	918,7	918,0	918,3	918,5
<b>105,00</b>	<b>Z,3</b>	1279,7	1294,2	1127,6	1048,2	1000,9	968,7	948,6	936,9	929,7	924,7	921,3	920,5	920,0
<b>105,00</b>	<b>Z,4</b>	1458,1	1439,0	1209,5	1098,6	1032,7	988,2	960,4	944,3	934,4	927,6	922,9	921,6	920,7
<b>105,00</b>	<b>Z,5</b>	1478,9	1455,6	1218,8	1104,4	1036,3	990,4	961,8	945,1	935,0	927,9	923,1	921,7	920,8
<b>113,75</b>	<b>Z,1</b>	787,7	870,2	878,3	891,3	899,1	903,0	905,1	906,5	907,5	907,9	908,6	909,6	910,2
<b>113,75</b>	<b>Z,2</b>	965,1	1022,9	961,3	940,8	929,7	921,6	916,2	913,5	912,0	910,6	910,1	910,7	910,7
<b>113,75</b>	<b>Z,3</b>	1326,1	1319,3	1120,1	1035,5	988,2	957,2	937,6	927,0	920,7	915,9	913,2	912,8	911,7
<b>113,75</b>	<b>Z,4</b>	1518,0	1469,1	1199,1	1082,6	1017,4	974,9	948,2	933,6	925,0	918,5	914,7	913,8	912,3
<b>113,75</b>	<b>Z,5</b>	1540,5	1486,2	1208,1	1087,9	1020,7	976,9	949,4	934,4	925,5	918,8	914,9	913,9	912,3
<b>122,50</b>	<b>Z,1</b>	784,1	858,2	861,6	876,0	885,2	890,7	894,1	896,3	898,0	899,1	900,3	901,6	902,2

	<b>122,50</b>	<b>Z,2</b>	952,6	1000,1	932,9	917,8	911,0	906,4	903,7	902,3	901,9	901,5	901,8	902,6	902,7
	<b>122,50</b>	<b>Z,3</b>	1295,1	1276,2	1069,5	997,5	960,2	936,6	922,2	913,8	909,3	906,2	904,6	904,5	903,6
	<b>122,50</b>	<b>Z,4</b>	1477,0	1416,0	1137,6	1037,2	984,7	951,6	931,3	919,5	913,0	908,5	906,0	905,4	904,1
	<b>122,50</b>	<b>Z,5</b>	1498,2	1432,1	1145,3	1041,8	987,5	953,3	932,4	920,1	913,4	908,8	906,2	905,5	904,1
	<b>131,25</b>	<b>Z,1</b>	780,5	848,6	847,4	862,3	872,5	879,3	883,9	887,1	889,6	891,3	893,1	894,3	894,5
	<b>131,25</b>	<b>Z,2</b>	944,2	983,4	911,3	899,4	895,4	893,4	892,7	892,5	893,1	893,6	894,5	895,1	894,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,3</b>	1276,5	1245,5	1033,8	970,2	939,3	920,6	909,5	902,8	899,8	898,0	897,3	896,7	895,6
	<b>131,25</b>	<b>Z,4</b>	1452,5	1378,1	1094,8	1005,5	961,1	934,1	917,9	908,0	903,2	900,2	898,7	897,4	895,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,5</b>	1473,1	1393,3	1101,8	1009,5	963,6	935,6	918,9	908,6	903,6	900,4	898,8	897,5	896,0
	<b>140,00</b>	<b>Z,1</b>	775,8	843,5	841,0	854,6	863,8	870,2	874,6	877,7	880,3	882,1	884,0	884,6	883,1
	<b>140,00</b>	<b>Z,2</b>	939,3	978,2	905,0	891,7	886,8	884,3	883,4	883,1	883,8	884,4	885,4	885,4	883,3
	<b>140,00</b>	<b>Z,3</b>	1271,2	1240,2	1027,4	962,5	930,7	911,5	900,2	893,5	890,5	888,7	888,2	886,9	883,7
	<b>140,00</b>	<b>Z,4</b>	1447,0	1372,7	1088,4	997,8	952,6	925,0	908,6	898,7	893,9	890,9	889,6	887,6	883,9
	<b>140,00</b>	<b>Z,5</b>	1467,5	1387,9	1095,4	1001,8	955,0	926,5	909,6	899,3	894,3	891,2	889,8	887,7	883,9

Keterangan:

- Z1= Lapisan bahan bakar terluar pertama (OpyC)
- Z2= Lapisan bahan bakar terluar kedua (SiC)
- Z3= Lapisan bahan bakar terluar ketiga (IpyC)
- Z4= Lapisan bahan bakar terluar keempat (buffer)
- Z5= Lapisan bahan bakar terluar kelima (kernel)



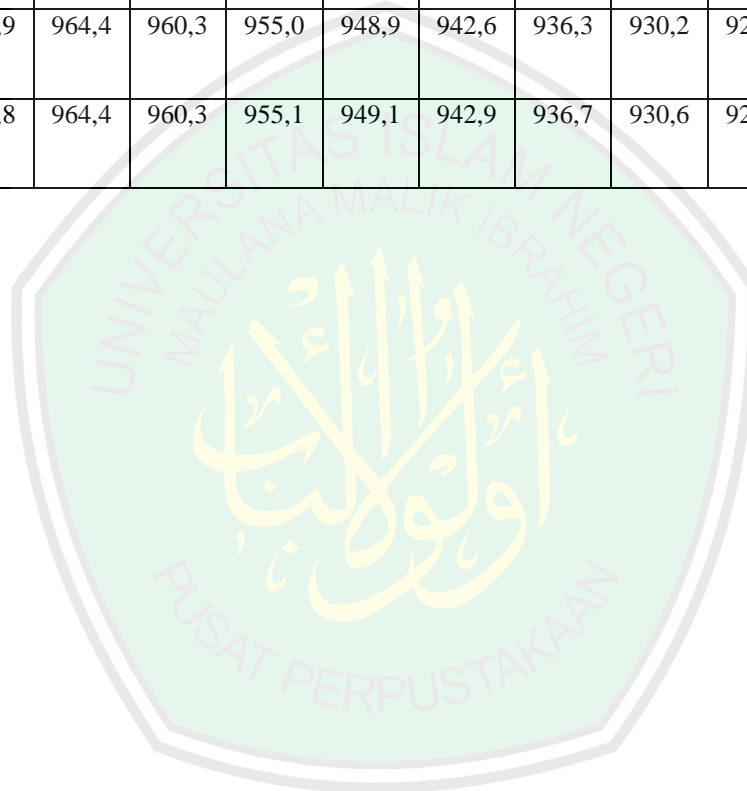
## DATA HASIL PERCOBAAN V

### 1. Temperatures of Solid Matter In Steady State

Data hasil simulasi reaktor daya 200 MW

		Jari-Jari (cm)																	
		0,0	8,3	16,7	25,0	35,0	43,8	52,5	61,2	70,0	78,8	87,5	96,2	105,0	113,8	122,5	131,2	140,0	146,0
Ketinggian(cm)	0,0	754,9	755,0	755,0	755,1	755,1	755,0	752,4	748,6	746,7	744,1	741,9	752,7	775,9	787,7	784,1	780,5	775,8	722,6
	83,8	846,4	846,5	846,6	846,6	846,6	846,4	842,2	835,8	832,9	828,5	823,9	834,8	859,5	870,2	858,2	848,6	843,5	769,0
	167,9	890,6	890,6	890,7	890,6	890,4	889,5	883,9	875,6	871,2	865,9	861,6	866,5	876,7	878,3	861,6	847,4	841,0	769,0
	251,7	922,3	922,3	922,3	922,1	921,5	919,9	913,0	903,3	897,6	891,9	887,8	889,9	893,5	891,3	876,0	862,3	854,6	778,0
	335,5	940,7	940,7	940,6	940,2	939,2	936,8	930,3	921,7	915,7	909,4	904,7	904,3	903,8	899,1	885,2	872,5	863,8	784,4
	419,3	952,8	952,7	952,5	952,0	950,5	947,5	941,0	932,6	926,1	919,6	914,4	912,2	909,2	903,0	890,7	879,3	870,2	788,7
	503,4	960,3	960,1	959,8	959,1	957,2	953,8	947,1	938,7	931,9	925,7	920,8	917,3	912,3	905,1	894,1	883,9	874,6	791,7
	587,2	964,1	963,9	963,5	962,5	960,3	956,6	950,3	942,7	936,0	929,8	924,4	919,9	914,2	906,5	896,3	887,1	877,7	793,8
	671,0	967,2	967,0	966,4	965,3	962,7	958,7	952,5	945,2	938,6	932,3	926,6	921,5	915,2	907,5	898,0	889,6	880,3	795,5

	754,8	968,5	968,2	967,5	966,2	963,4	959,4	953,5	946,7	940,0	933,7	928,0	922,3	915,7	907,9	899,1	891,3	882,1	796,6
	838,9	969,7	969,3	968,5	966,9	963,7	959,7	954,2	947,9	941,4	935,1	929,1	923,0	916,3	908,6	900,3	893,1	884,0	797,8
	922,7	971,5	971,1	970,0	967,9	964,4	960,3	955,0	948,9	942,6	936,3	930,2	923,9	917,1	909,6	901,6	894,3	884,6	797,8
	943,0	971,9	971,5	970,0	967,8	964,4	960,3	955,1	949,1	942,9	936,7	930,6	924,5	917,8	910,2	902,2	894,5	883,1	796,3



## 2. Temperatures of Fuel Element (Eksternal Boundary Of Shell) In Steady State

		Lapisan Triso	Ketinggian(cm)												
			0,0	83,8	167,9	251,7	335,5	419,3	503,4	587,2	671,0	754,8	838,9	922,7	943,0
Jari-jari(cm)	0,00	Z,1	754,9	846,4	890,6	922,3	940,7	952,8	960,3	964,1	967,2	968,5	969,7	971,5	971,9
	0,00	Z,2	899,9	988,3	990,9	992,5	986,8	982,8	979,4	975,9	974,9	973,2	972,9	974,6	975,0
	0,00	Z,3	1192,7	1266,1	1183,5	1127,1	1075,3	1040,4	1016,2	998,4	989,6	982,1	979,2	980,6	981,0
	0,00	Z,4	1347,0	1407,7	1279,5	1193,9	1119,2	1069,0	1034,5	1009,6	997,0	986,6	982,3	983,5	983,9
	0,00	Z,5	1365,0	1424,0	1290,4	1201,5	1124,2	1072,3	1036,5	1010,9	997,8	987,1	982,7	983,8	984,3
	8,33	Z,1	755,0	846,5	890,6	922,3	940,7	952,7	960,1	963,9	967,0	968,2	969,3	971,1	971,5
	8,33	Z,2	899,9	988,4	991,0	992,6	986,8	982,8	979,3	975,7	974,7	972,9	972,6	974,2	974,6
	8,33	Z,3	1192,8	1266,2	1183,6	1127,1	1075,2	1040,3	1016,0	998,2	989,4	981,8	978,9	980,1	980,5
	8,33	Z,4	1347,1	1407,8	1279,6	1193,9	1119,2	1069,0	1034,3	1009,4	996,7	986,3	982,0	983,1	983,5
	8,33	Z,5	1365,0	1424,1	1290,5	1201,6	1124,2	1072,2	1036,4	1010,7	997,6	986,8	982,3	983,4	983,8
	16,67	Z,1	755,0	846,6	890,7	922,3	940,6	952,5	959,8	963,5	966,4	967,5	968,5	970,0	970,0

<b>16,67</b>	<b>Z,2</b>	899,9	988,4	991,0	992,6	986,7	982,5	979,0	975,2	974,1	972,2	971,7	973,0	972,5
<b>16,67</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,3	1183,6	1127,1	1075,1	1040,1	1015,7	997,7	988,8	981,1	977,9	978,6	977,4
<b>16,67</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,9	1279,6	1193,9	1119,1	1068,8	1034,0	1009,0	996,1	985,6	981,0	981,4	979,8
<b>16,67</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1424,1	1290,6	1201,5	1124,1	1072,0	1036,1	1010,2	997,0	986,1	981,4	981,7	980,0
<b>25,00</b>	<b>Z,1</b>	755,1	846,6	890,6	922,1	940,2	952,0	959,1	962,5	965,3	966,2	966,9	967,9	967,8
<b>25,00</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,5	991,0	992,4	986,4	982,0	978,2	974,3	972,9	970,9	969,8	970,3	969,7
<b>25,00</b>	<b>Z,3</b>	1192,9	1266,3	1183,6	1126,9	1074,8	1039,6	1015,0	996,8	987,7	979,9	975,5	975,0	973,5
<b>25,00</b>	<b>Z,4</b>	1347,2	1407,9	1279,6	1193,8	1118,8	1068,2	1033,3	1008,0	995,0	984,3	978,4	977,3	975,4
<b>25,00</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1424,2	1290,5	1201,4	1123,8	1071,5	1035,3	1009,3	995,8	984,8	978,7	977,6	975,6
<b>35,00</b>	<b>Z,1</b>	755,1	846,6	890,4	921,5	939,2	950,5	957,2	960,3	962,7	963,4	963,7	964,4	964,4
<b>35,00</b>	<b>Z,2</b>	900,1	988,5	990,8	991,8	985,3	980,5	976,3	972,0	970,4	968,1	966,5	966,5	966,2
<b>35,00</b>	<b>Z,3</b>	1193,0	1266,3	1183,3	1126,3	1073,8	1038,1	1013,1	994,5	985,1	977,0	971,7	970,3	969,5
<b>35,00</b>	<b>Z,4</b>	1347,3	1407,9	1279,4	1193,2	1117,7	1066,7	1031,3	1005,7	992,4	981,5	974,4	972,3	971,1
<b>35,00</b>	<b>Z,5</b>	1365,2	1424,2	1290,3	1200,8	1122,7	1070,0	1033,4	1007,0	993,2	982,0	974,7	972,5	971,3
<b>43,75</b>	<b>Z,1</b>	755,0	846,4	889,5	919,9	936,8	947,5	953,8	956,6	958,7	959,4	959,7	960,3	960,3

<b>43,75</b>	<b>Z,2</b>	900,0	988,2	989,9	990,1	982,9	977,6	972,9	968,3	966,4	964,0	962,3	962,1	961,7
<b>43,75</b>	<b>Z,3</b>	1192,8	1266,1	1182,5	1124,7	1071,4	1035,1	1009,6	990,8	981,0	972,9	967,4	965,6	964,4
<b>43,75</b>	<b>Z,4</b>	1347,1	1407,7	1278,5	1191,5	1115,3	1063,8	1027,9	1002,0	988,3	977,4	970,0	967,3	965,8
<b>43,75</b>	<b>Z,5</b>	1365,1	1423,9	1289,4	1199,1	1120,3	1067,0	1030,0	1003,3	989,2	977,9	970,3	967,5	965,9
<b>52,50</b>	<b>Z,1</b>	752,4	842,2	883,9	913,0	930,3	941,0	947,1	950,3	952,5	953,5	954,2	955,0	955,1
<b>52,50</b>	<b>Z,2</b>	894,7	981,3	981,6	981,0	975,3	970,2	965,6	961,7	959,9	958,0	956,9	956,7	956,2
<b>52,50</b>	<b>Z,3</b>	1181,7	1253,5	1169,2	1111,1	1061,4	1026,0	1000,9	983,6	973,9	966,6	961,9	960,0	958,4
<b>52,50</b>	<b>Z,4</b>	1332,8	1392,3	1262,8	1175,8	1104,2	1053,8	1018,5	994,5	980,9	970,9	964,5	961,6	959,5
<b>52,50</b>	<b>Z,5</b>	1350,3	1408,2	1273,4	1183,1	1109,1	1057,0	1020,5	995,7	981,7	971,4	964,7	961,8	959,7
<b>61,25</b>	<b>Z,1</b>	748,6	835,8	875,6	903,3	921,7	932,6	938,7	942,7	945,2	946,7	947,9	948,9	949,1
<b>61,25</b>	<b>Z,2</b>	887,7	970,5	970,2	967,7	964,8	960,3	955,9	953,5	952,2	951,0	950,4	950,5	950,1
<b>61,25</b>	<b>Z,3</b>	1168,0	1234,2	1151,6	1091,0	1047,4	1013,4	988,8	974,3	965,5	959,3	955,4	953,7	952,1
<b>61,25</b>	<b>Z,4</b>	1315,0	1368,4	1241,9	1152,3	1088,4	1039,8	1005,2	984,6	972,1	963,5	957,8	955,3	953,0
<b>61,25</b>	<b>Z,5</b>	1332,1	1383,9	1252,2	1159,3	1093,1	1042,8	1007,1	985,8	972,8	963,9	958,1	955,5	953,1
<b>70,00</b>	<b>Z,1</b>	746,7	832,9	871,2	897,6	915,7	926,1	931,9	936,0	938,6	940,0	941,4	942,6	942,9

<b>70,00</b>	<b>Z,2</b>	884,1	965,9	964,2	960,6	958,1	953,2	948,5	946,6	945,4	944,2	943,8	944,2	943,9
<b>70,00</b>	<b>Z,3</b>	1160,8	1226,2	1142,5	1081,2	1039,2	1005,1	980,4	966,9	958,4	952,3	948,5	947,2	945,6
<b>70,00</b>	<b>Z,4</b>	1305,8	1358,6	1231,2	1141,1	1079,6	1031,0	996,3	977,0	964,8	956,3	950,9	948,7	946,5
<b>70,00</b>	<b>Z,5</b>	1322,7	1373,8	1241,3	1147,9	1084,2	1033,9	998,1	978,2	965,6	956,7	951,1	948,9	946,6
<b>78,75</b>	<b>Z,1</b>	744,1	828,5	865,9	891,9	909,4	919,6	925,7	929,8	932,3	933,7	935,1	936,3	936,7
<b>78,75</b>	<b>Z,2</b>	878,6	958,4	956,3	952,9	950,0	945,4	941,8	939,9	938,7	937,7	937,4	937,8	937,6
<b>78,75</b>	<b>Z,3</b>	1149,1	1212,7	1129,6	1069,5	1027,6	994,8	972,6	959,3	950,9	945,2	941,9	940,5	939,3
<b>78,75</b>	<b>Z,4</b>	1290,7	1342,0	1215,9	1127,4	1066,2	1019,4	987,9	969,0	957,0	949,0	944,1	941,9	940,1
<b>78,75</b>	<b>Z,5</b>	1307,2	1356,9	1225,7	1134,0	1070,6	1022,2	989,7	970,1	957,7	949,4	944,3	942,1	940,2
<b>87,50</b>	<b>Z,1</b>	741,9	823,9	861,6	887,8	904,7	914,4	920,8	924,4	926,6	928,0	929,1	930,2	930,6
<b>87,50</b>	<b>Z,2</b>	872,7	950,6	948,6	946,0	942,8	938,5	936,1	933,9	932,6	931,7	931,3	931,5	931,5
<b>87,50</b>	<b>Z,3</b>	1135,4	1198,1	1115,5	1057,5	1015,9	984,5	965,4	952,1	944,1	938,9	935,5	934,1	933,2
<b>87,50</b>	<b>Z,4</b>	1272,7	1323,7	1198,6	1112,9	1052,3	1007,5	980,0	961,2	949,8	942,5	937,5	935,3	934,0
<b>87,50</b>	<b>Z,5</b>	1288,6	1338,1	1208,0	1119,2	1056,4	1010,1	981,7	962,2	950,5	942,9	937,8	935,5	934,1
<b>96,25</b>	<b>Z,1</b>	752,7	834,8	866,5	889,9	904,3	912,2	917,3	919,9	921,5	922,3	923,0	923,9	924,5

<b>96,25</b>	<b>Z,2</b>	894,6	967,8	952,9	945,7	940,3	934,7	931,5	928,8	927,1	925,7	924,9	925,2	925,3
<b>96,25</b>	<b>Z,3</b>	1180,0	1226,7	1118,4	1052,6	1009,3	977,8	958,8	945,7	937,8	932,3	928,6	927,6	927,0
<b>96,25</b>	<b>Z,4</b>	1329,7	1357,9	1200,7	1105,7	1043,7	999,3	972,4	954,2	943,1	935,6	930,4	928,8	927,8
<b>96,25</b>	<b>Z,5</b>	1347,0	1372,9	1210,1	1111,7	1047,6	1001,7	973,9	955,1	943,7	935,9	930,6	928,9	927,9
<b>105,00</b>	<b>Z,1</b>	775,9	859,5	876,7	893,5	903,8	909,2	912,3	914,2	915,2	915,7	916,3	917,1	917,8
<b>105,00</b>	<b>Z,2</b>	942,3	1007,3	962,8	946,6	937,1	929,7	924,8	922,0	920,2	918,7	918,0	918,3	918,5
<b>105,00</b>	<b>Z,3</b>	1279,7	1294,2	1127,6	1048,2	1000,9	968,7	948,6	936,9	929,7	924,7	921,3	920,5	920,0
<b>105,00</b>	<b>Z,4</b>	1458,1	1439,0	1209,5	1098,6	1032,7	988,2	960,4	944,3	934,4	927,6	922,9	921,6	920,7
<b>105,00</b>	<b>Z,5</b>	1478,9	1455,6	1218,8	1104,4	1036,3	990,4	961,8	945,1	935,0	927,9	923,1	921,7	920,8
<b>113,75</b>	<b>Z,1</b>	787,7	870,2	878,3	891,3	899,1	903,0	905,1	906,5	907,5	907,9	908,6	909,6	910,2
<b>113,75</b>	<b>Z,2</b>	965,1	1022,9	961,3	940,8	929,7	921,6	916,2	913,5	912,0	910,6	910,1	910,7	910,7
<b>113,75</b>	<b>Z,3</b>	1326,1	1319,3	1120,1	1035,5	988,2	957,2	937,6	927,0	920,7	915,9	913,2	912,8	911,7
<b>113,75</b>	<b>Z,4</b>	1518,0	1469,1	1199,1	1082,6	1017,4	974,9	948,2	933,6	925,0	918,5	914,7	913,8	912,3
<b>113,75</b>	<b>Z,5</b>	1540,5	1486,2	1208,1	1087,9	1020,7	976,9	949,4	934,4	925,5	918,8	914,9	913,9	912,3
<b>122,50</b>	<b>Z,1</b>	784,1	858,2	861,6	876,0	885,2	890,7	894,1	896,3	898,0	899,1	900,3	901,6	902,2

	<b>122,50</b>	<b>Z,2</b>	952,6	1000,1	932,9	917,8	911,0	906,4	903,7	902,3	901,9	901,5	901,8	902,6	902,7
	<b>122,50</b>	<b>Z,3</b>	1295,1	1276,2	1069,5	997,5	960,2	936,6	922,2	913,8	909,3	906,2	904,6	904,5	903,6
	<b>122,50</b>	<b>Z,4</b>	1477,0	1416,0	1137,6	1037,2	984,7	951,6	931,3	919,5	913,0	908,5	906,0	905,4	904,1
	<b>122,50</b>	<b>Z,5</b>	1498,2	1432,1	1145,3	1041,8	987,5	953,3	932,4	920,1	913,4	908,8	906,2	905,5	904,1
	<b>131,25</b>	<b>Z,1</b>	780,5	848,6	847,4	862,3	872,5	879,3	883,9	887,1	889,6	891,3	893,1	894,3	894,5
	<b>131,25</b>	<b>Z,2</b>	944,2	983,4	911,3	899,4	895,4	893,4	892,7	892,5	893,1	893,6	894,5	895,1	894,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,3</b>	1276,5	1245,5	1033,8	970,2	939,3	920,6	909,5	902,8	899,8	898,0	897,3	896,7	895,6
	<b>131,25</b>	<b>Z,4</b>	1452,5	1378,1	1094,8	1005,5	961,1	934,1	917,9	908,0	903,2	900,2	898,7	897,4	895,9
	<b>131,25</b>	<b>Z,5</b>	1473,1	1393,3	1101,8	1009,5	963,6	935,6	918,9	908,6	903,6	900,4	898,8	897,5	896,0
	<b>140,00</b>	<b>Z,1</b>	775,8	843,5	841,0	854,6	863,8	870,2	874,6	877,7	880,3	882,1	884,0	884,6	883,1
	<b>140,00</b>	<b>Z,2</b>	939,3	978,2	905,0	891,7	886,8	884,3	883,4	883,1	883,8	884,4	885,4	885,4	883,3
	<b>140,00</b>	<b>Z,3</b>	1271,2	1240,2	1027,4	962,5	930,7	911,5	900,2	893,5	890,5	888,7	888,2	886,9	883,7
	<b>140,00</b>	<b>Z,4</b>	1447,0	1372,7	1088,4	997,8	952,6	925,0	908,6	898,7	893,9	890,9	889,6	887,6	883,9
	<b>140,00</b>	<b>Z,5</b>	1467,5	1387,9	1095,4	1001,8	955,0	926,5	909,6	899,3	894,3	891,2	889,8	887,7	883,9

Keterangan:

- Z1= Lapisan bahan bakar terluar pertama (OpyC)
- Z2= Lapisan bahan bakar terluar kedua (SiC)
- Z3= Lapisan bahan bakar terluar ketiga (IpyC)
- Z4= Lapisan bahan bakar terluar keempat (buffer)
- Z5= Lapisan bahan bakar terluar kelima (kernel)



**LAMPIRAN IV**  
**DISTRIBUSI TEMPERATUR PENDINGIN REAKTOR (HELIUM)**

		Jari-Jari (cm)																
		0,0	8,3	16,7	25,0	35,0	43,8	52,5	61,2	70,0	78,8	87,5	96,2	105,0	113,8	122,5	131,2	140,0
Ketinggian(cm)	0,0	603,18	603,22	603,27	603,32	603,4	603,49	603,55	603,58	603,63	603,74	603,94	604,23	604,51	604,69	604,79	604,88	604,81
	83,8	722,64	722,72	722,79	722,82	722,75	722,29	720,48	718	716,33	714,76	714,62	720,55	730,98	736,4	734,1	730,84	728,96
	167,9	810,6	810,66	810,68	810,61	810,24	809,05	805,69	801,23	798,04	795,25	794,57	800,53	810,46	814,18	807,96	801,08	797,96
	251,7	868,83	868,85	868,79	868,56	867,76	865,76	861,04	854,98	850,41	846,6	845	848,27	853,34	853,09	844,31	835,3	831,22
	335,5	906,92	906,88	906,72	906,3	905,02	902,33	896,91	890,13	884,67	880,03	877,34	877,96	878,96	875,71	866,04	856,49	851,85
	419,3	931,17	931,07	930,79	930,16	928,45	925,26	919,59	912,67	906,69	901,39	897,64	896,09	894,17	888,94	879,18	869,83	864,93
	503,4	946,54	946,37	945,98	945,13	943,02	939,46	933,6	926,56	920,23	914,59	910,15	906,99	903,05	896,6	887,16	878,35	873,41
	587,2	955,9	955,66	955,14	954,09	951,65	947,82	941,96	935,01	928,55	922,74	917,8	913,49	908,27	901,14	892,1	883,87	878,99
	671,0	961,65	961,34	960,7	959,47	956,75	952,74	946,97	940,24	933,79	927,8	922,43	917,34	911,37	903,95	895,32	887,6	882,83
	754,8	965,12	964,75	964,01	962,63	959,71	955,63	949,99	943,5	937,08	930,98	925,29	919,66	913,24	905,73	897,5	890,25	885,59
	838,9	967,2	966,78	965,95	964,42	961,38	957,35	952,01	945,84	939,54	933,39	927,46	921,44	914,78	907,28	899,37	892,44	887,84
	922,7	969,05	968,58	967,62	965,88	962,68	958,69	953,55	947,62	941,42	935,25	929,19	923	916,26	908,81	901,02	893,97	888,62
	943,0	969,49	969	967,98	966,2	963,04	959,13	954,13	948,35	942,24	936,09	930	923,78	917,09	909,64	901,94	894,36	888,42

