

**STUDI PENGARUH UKURAN *PEBBLE BED* TERHADAP TERMAL  
HIDROLIK PADA *THORIUM MOLTEN SALT REACTOR SOLID FUEL*  
(TMSR-SF) MENGGUNAKAN COMSOL *MULTIPHYSICS***

(Skripsi)

Oleh

I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari

2017041017



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## ABSTRAK

### STUDI PENGARUH UKURAN *PEBBLE BED* TERHADAP TERMAL HIDROLIK PADA *THORIUM MOLTEN SALT REACTOR SOLID FUEL* (TMSR-SF) MENGGUNAKAN COMSOL *MULTIPHYSICS*

Oleh

I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari

Pengembangan reaktor *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) memerlukan pemahaman mendalam tentang karakteristik termal-hidrolik seperti suhu, kecepatan aliran, dan tekanan di dalam teras reaktor. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ukuran diameter *pebble bed* terhadap distribusi suhu dan tekanan, serta mengkaji pengaruh laju awal fluida terhadap kecepatan aliran fluida. Simulasi dilakukan menggunakan modul *Heat Transfer in Fluids* dan *Laminar Flow* pada aplikasi COMSOL *Multiphysics*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *pebble bed* 6 cm efektif dalam menyerap dan mendistribusikan panas, dengan peningkatan suhu tajam dari inlet hingga titik ke-4, sementara aliran fluida tetap stabil meskipun terjadi penurunan kecepatan dan tekanan. *Pebble bed* 9 cm menunjukkan peningkatan suhu yang stabil dari inlet ke outlet, dengan penurunan kecepatan fluida akibat hambatan dan tekanan yang turun konsisten, menghasilkan efisiensi yang baik. Pada *pebble bed* 12 cm, suhu meningkat dari 873,02 K di inlet menjadi 958,72 K sebelum sedikit turun di outlet. Namun, kecepatan fluida menurun drastis dari 0,06 m/s menjadi 0,01 m/s, dan tekanan turun signifikan, menandakan penurunan efisiensi perpindahan panas. Persentase perbedaan suhu tertinggi antara *pebble bed* 6 cm dan 9 cm adalah 0,7%, serta antara *pebble bed* 6 cm dan 12 cm sebesar 1,7%. Penurunan persentase tekanan terbesar untuk *pebble bed* 6 cm sebesar 1,6%, diikuti *pebble bed* 9 cm sebesar 1,4%, dan *pebble bed* 12 cm sebesar 1,5%. Penurunan persentase laju aliran fluida awal sebesar 0,09% antara *pebble bed* 6 cm dan 9 cm, serta 0,26% antara *pebble bed* 9 cm dan 12 cm. *Pebble bed* 6 cm terbukti paling efisien untuk menjaga efisiensi dan keselamatan operasi reaktor TMSR-SF.

Kata kunci : COMSOL *Multiphysics*, TMSR-SF, termal hidrolik, *pebble bed*, variasi diameter

## **ABSTRACT**

### ***STUDY OF PEBBLE BED SIZE EFFECTS ON THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS IN THORIUM MOLTEN SALT REACTOR SOLID FUEL (TMSR-SF) USING COMSOL MULTIPHYSICS***

**By**

**I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari**

*The development of nuclear energy, particularly in the Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel (TMSR-SF) requires a deep understanding of thermal-hydraulic characteristics, including temperature, flow velocity, and pressure within the reactor core. This research aims to analyze the influence of pebble bed diameter on temperature and pressure, as well as to examine the impact of initial fluid flow conditions on fluid velocity within the TMSR-SF reactor core. Simulations were conducted by the Heat Transfer in Fluids and Laminar Flow modules in the COMSOL Multiphysics application. The simulation results show that the highest temperature difference percentage between the 6 cm and 9 cm pebble beds is 0.7%, while between the 6 cm and 12 cm pebble beds, it is 1.7%. Percentage the highest pressure drop over time was observed in the 6 cm pebble bed at 1.6%, followed by the 9 cm pebble bed at 1.4%, and the 12 cm pebble bed at 1.5%. Additionally, the percentage difference off the initial fluid flow rate decreasing was recorded at 0.09% between the 6 cm and 9 cm pebble beds and 0.26% between the 9 cm and 12 cm pebble beds. The 6 cm pebble bed diameter provides more optimal thermal-hydraulic performance, particularly in terms of temperature stability and fluid flow consistency, which are crucial for the efficiency and safety of TMSR-SF reactor operation.*

*Key words: COMSOL Multiphysics, TMSR-SF, thermal hydraulics, pebble bed, diameter variations*

**STUDI PENGARUH UKURAN *PEBBLE BED* TERHADAP TERMAL  
HIDROLIK PADA *THORIUM MOLTEN SALT REACTOR SOLID FUEL*  
(TMSR-SF) MENGGUNAKAN COMSOL *MULTIPHYSICS***

**Oleh**

**I GUSTI AYU PUTU DWI EKASARI**

**Skripsi**

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

**Pada**

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



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## LEMBAR PENGESAHAN

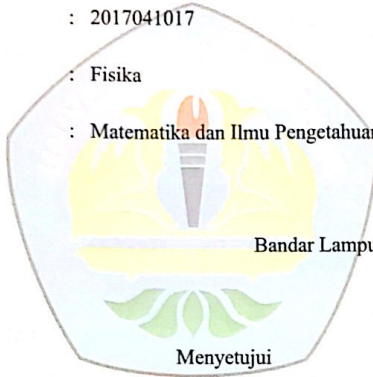
Judul Penelitian : Studi Pengaruh Ukuran *Pebble bed* Terhadap Termal Hidrolik Pada *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*

Nama Mahasiswa : I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari

NPM : 2017041017

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



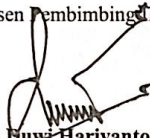
Bandar Lampung, 20 November 2024

Dosen Pembimbing I



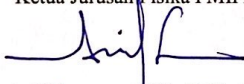
Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si  
NIP. 197512192000122003

Dosen Pembimbing II



Dr. Buwi Hariyanto, S.Si., M.Si  
NIP. 1994070820201267

Ketua Jurusan Fisika FMIPA



Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng  
NIP. 197109092000121001

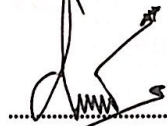
## MENGESAHKAN

### 1. Tim Penguji

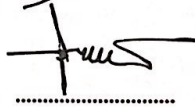
Ketua : **Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.**



Sekretaris : **Dr. Duwi Hariyanto, S.Si., M.Si.**



Penguji Bukan Pembimbing : **Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.**



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



**Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 20 November 2024

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang berjudul:

" **Studi Pengaruh Ukuran *Pebble bed* Terhadap Termal Hidrolik Pada *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel (TMSR-SF)* Menggunakan *COMSOL Multiphysics* " adalah hasil karya saya sendiri. Semua sumber data dan referensi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini telah disebutkan dengan benar sesuai dengan kaidah akademik. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini belum pernah diajukan sebelumnya untuk memperoleh gelar akademik di universitas atau institusi manapun. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya, dan saya bersedia menanggung segala akibat apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap pernyataan ini.**

Bandar Lampung, 20 November 2024



**I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari**  
NPM 2017041017

## RIWAYAT HIDUP



Penulis, I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari dilahirkan di Sukarame pada tanggal 14 Maret 2002. Penulis adalah anak pertama dari Tiga bersaudara, putri dari pasangan Gusti Putu Marjaya dan Suratih. Penulis memiliki ketertarikan khusus pada bidang nuklir dan energi terbarukan. Penulis memulai pendidikan di TK KEMALA pada tahun 2007 hingga 2008, kemudian melanjutkan ke SDN 2 WAY GALIH dari tahun 2008 hingga 2014. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMPN 9 BANDAR LAMPUNG dari tahun 2014 hingga 2017, dan pendidikan menengah atas di SMAN 5 BANDAR LAMPUNG dari tahun 2017 hingga 2020. Pada tahun 2020, penulis diterima di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi dalam dan luar kampus. Penulis terlibat dalam kegiatan MBKM di Sleman Yogyakarta menjadi system analys pada sebuah website psikolog. Penulis terlibat dalam kegiatan ilmiah sebagai peserta MBKM Penelitian Universitas Lampung pada tahun 2023 dengan topik mengenai **“Implementasi Energi Listrik Sel Galvanis Air Laut dengan Elektroda Tembaga Dilapisi Perak dan Zinc yang Dapat Diregenerasi sebagai Sumber Energi Terbarukan”**. Kemudian dalam tugas akhirnya penulis memilih untuk memperdalam ketertarikannya di bidang teknologi nuklir pada *Molten Salt Reactor* (MSR) sehingga pada akhirnya penulis mengambil penelitian mengenai **“Studi Pengaruh Ukuran *Pebble Bed* Terhadap Termal Hidrolik Pada *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*”**.



## **MOTTO**

"Tidak ada yang lebih murni dari pada pengetahuan. Pengetahuan itu benar-benar menjelaskan segala sesuatu sesuai dengan hukum."

(Bhagavad Gita 4.38)

"Segala sesuatu yang ada di dunia ini harus diperlakukan seolah-olah dikuasai oleh Tuhan. Dengan cara ini, kita akan mencapai pengetahuan yang lebih dalam dan benar."

(Isha Upanishad 1.1)

"Pengetahuan yang mendalam membuka pandangan kita. Dengan pengetahuan, kita dapat melihat dan memahami lebih banyak daripada sebelumnya."

Rig Veda 10.71.4

"Ilmu pengetahuan tidak hanya memberikan jawaban, tetapi juga pertanyaan yang lebih dalam."

(Richard Feynman)

"Penelitian adalah perjalanan ke dalam dunia yang belum dikenal, di mana setiap penemuan adalah peta baru."

(Gusti Ayu)

## **PERSEMBAHAN**

Dengan penuh rasa syukur, cinta, dan mengharapkan waranugraha Ida Sang  
Hyang Widhi Wasa

Karya ini saya persembahkan kepada :  
Orang tuaku tercinta

*Gusti Putu Marjaya & Suratih*

Atas segala doa, kasih sayang, dan dukungan yang tak pernah henti  
Saudaraku tercinta

*Gusti Ayu Made Artiwí & Gusti Nyoman Krisna*

yang selalu memberi semangat dan dukungan  
Keluarga Besar dan terkhusus teman-teman Angkatan 2020

*Jurusan Fisika FMIPA UNILA*

atas kebersamaan dan dukungan selama perkuliahan  
Serta Almamater Tercinta

*Universitas Lampung*

Tempat saya menimba ilmu dan mengembangkan diri

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan nikmat kesehatan, kelancaran dan berkat karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian yang berjudul “*Studi Pengaruh Ukuran Pebble Bed Terhadap Termal Hidrolik Pada Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel (TMSR-SF) Menggunakan COMSOL Multiphysics*” yang merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Energi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang membangun guna dalam penulisan berikutnya yang lebih baik. Semoga skripsi ini bermanfaat dan dapat menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 20 November 2024

Penulis,

I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari

NPM. 2017041017

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Sang Hyang Widhi Wasa, yang telah memberi kesehatan, nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Studi Pengaruh Ukuran *Pebble Bed* Terhadap Termal Hidrolik Pada *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*”** Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tuaku, Bapak Gusti Putu Marjaya dan Ibu Suratih yang selalu mendoakan, memberikan semangat, semua pengorbanan dan dukungan baik berupa materi maupun moral kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si sebagai Pembimbing utama yang telah banyak memberi bimbingan, motivasi, nasihat serta ilmunya dalam penyelesaian skripsi.
3. Bapak Dr. Duwi Hariyanto, S.Si., M.Si., sebagai Pembimbing Kedua yang telah memberikan saran, masukan arah dalam penulisan skripsi ini.
4. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., sebagai dosen penguji yang telah memberi masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini, sekaligus Pembimbing Akademik yang memberikan masukan-masukan serta nasehat selama masa studi di Jurusan Fisika.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M. Eng., sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Seluruh dosen Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan banyak ilmu selama menjadi mahasiswa di Universitas Lampung.

8. Para Tenaga Kependidikan Jurusan Fisika yang telah membantu memenuhi kebutuhan administrasi penulis.
9. Kedua Saudara, I Gusti Made Artiwi dan I Gusti Nyoman Krisna yang telah menghibur, memberikan semangat dan mendoakan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Teman-teman seperjuangan saya Rindiani Aprillia Cautesa dan Mutiara Maharani yang selalu ada disaat senang dan susah selama dibangku perkuliahan serta telah menjadi kawan diskusi yang baik.
11. Sahabat-sahabat saya Mayang Arista Widya, Arini, Cindy Anisya, yang telah menemani, memberikan semangat, selalu ada disaat senang maupun sedih, dan menjadi tempat bercerita keluh kesah kehidupan.
12. Saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dewa Nyoman Tri Permana, atas segala dukungan, kesabaran, dan pengertian yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah menjadi sumber semangat dan motivasi saya, serta selalu ada di setiap langkah perjalanan ini.
13. Seluruh mahasiswa/i Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung angkatan 2020, dan teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.
14. Teruntuk diri saya sendiri, terimakasih telah berjuang keras dan berusaha sejauh ini. Sudah mampu bertahan dan mengendalikan diri dari berbagai tekanan diluar keadaan dan tidak pernah memutuskan untuk menyerah sesulit apapun proses dalam penyusunan skripsi ini dengan menyelesaikan sebaik dan semaksimal mungkin.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa memberikan imbalan yang berlipat atas bantuan semua pihak dan semoga selalu dimudahkan langkah kita yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 20 November 2024

Penulis,

I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>ii</b>
<i>ABSTRACT</i> .....	<b>iii</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>MENGESAHKAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>viii</b>
<b>MOTTO</b> .....	<b>ix</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>x</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>xx</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN</b> .....	<b>xxii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	<b>1</b>
1.2 Rumusan Masalah.....	<b>5</b>

1.3	Tujuan .....	5
1.4	Manfaat Penelitian .....	5
1.5	Batasan Masalah .....	6
<b>II.</b>	<b>TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
2.1	Reaktor Nuklir .....	7
2.2	Reaktor Nuklir TMSR-SF.....	7
2.3	<i>Pebble Bed</i> .....	11
2.4	Termal Hidrolik TMSR-SF.....	13
2.4.1	Persamaan Dinamika Perpindahan Panas .....	14
2.4.2	Persamaan Kontinuitas.....	15
2.4.3	Persamaan Navier - Stokes.....	16
2.5	COMSOL <i>Multiphysics</i> .....	17
2.5.1	<i>Heat Transfer In Fluid</i> .....	18
2.5.2	<i>Laminar Flow</i> .....	19
<b>III.</b>	<b>METODE PENELITIAN</b> .....	<b>21</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	21
3.2	Alat dan Bahan.....	21
3.3	Prosedur Penelitian .....	21
3.3.1	Menentukan Hukum Fisika.....	21
3.3.2	Parameter.....	23
3.3.3	Geometri Reaktor dan <i>Pebble Bed</i> dalam 2 Dimensi.....	24
3.3.4	Syarat Batas.....	25
3.3.5	<i>Meshing</i> pada Geometri. ....	25
3.3.6	Perhitungan .....	26
3.3.7	Hasil .....	26
3.4	Diagram Alir .....	27

3.4.1	Diagram Alir Penelitian .....	27
3.4.2	Menghitung Persamaan Penelitian.....	27
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1	Hasil Pemodelan <i>Benchmarking</i> .....	29
4.2	Hasil Pemodelan pada <i>Pebble Bed</i> 6 cm .....	31
4.2.1	Hasil Distribusi Suhu pada <i>Pebble Bed</i> 6 cm .....	31
4.2.2	Hasil Distribusi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Peble Bed</i> 6 cm .....	33
4.2.3	Hasil Distribusi Tekanan pada <i>Peble Bed</i> 6 cm.....	35
4.3	Hasil Pemodelan pada <i>Pebble Bed</i> 9 cm .....	37
4.3.1	Hasil Distribusi Suhu pada <i>Pebble Bed</i> 9 cm .....	37
4.3.2	Hasil Distribusi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Peble Bed</i> 9 cm .....	40
4.3.3	Hasil Distribusi Tekanan pada <i>Peble Bed</i> 9 cm.....	42
4.4	Hasil Pemodelan pada <i>Pebble Bed</i> 12 cm .....	44
4.4.1	Hasil Distribusi Suhu pada <i>Pebble Bed</i> 12 cm .....	44
4.4.2	Hasil Distribusi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Peble Bed</i> 12 cm ...	46
4.4.3	Hasil Distribusi Tekanan pada <i>Peble Bed</i> 12 cm.....	48
4.5	Penentuan Ukuran <i>Pebble Bed</i> yang Efektif pada Reaktor TMSR-SF .....	50
V.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
5.1	Simpulan .....	51
5.2	Saran .....	52
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>
	LAMPIRAN.....	57



## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b> Skematik Reaktor TMSTR-SF (Dai, 2017).....	8
<b>Gambar 2.2</b> Skematik Teras Reaktor TMSR-SF (Yao, <i>et al.</i> , 2014).....	8
<b>Gambar 2.3</b> Tampak Atas dan Tampak Depan Teras Reaktor.....	9
<b>Gambar 2.4</b> Komponen TMSR-SF Pendingin FLiBe, Grafit, dan Lapisan <i>Pebble</i> (Liu, <i>et al.</i> , 2020).....	12
<b>Gambar 2.5</b> Susunan <i>Pebble</i> Pada Teras Reaktor (Yao, <i>et al.</i> , 2014).....	13
<b>Gambar 2.6</b> Ilustrasi Aliran Laminar Fluida (Jacson, 2013).....	20
<b>Gambar 3.1</b> Geometri Teras Reaktor dan <i>Pebble bed</i> .....	24
<b>Gambar 3.2</b> <i>Meshing</i> .....	26
<b>Gambar 3.3</b> Diagram Alir Pemodelan Simulasi COMSOL <i>Multiphysics</i> .....	27
<b>Gambar 3.4</b> Diagram Alir Perhitungan pada COMSOL <i>Multiphysic</i> .....	28
<b>Gambar 4.1</b> Grafik Distribusi Suhu pada <i>Pebble bed</i> 6 cm .....	32
<b>Gambar 4.2</b> Tampilan Distribusi Suhu <i>Pebble bed</i> 6 cm pada 12 Detik.....	32
<b>Gambar 4.3</b> Grafik Distribusi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Pebble bed</i> 6 cm .	34
<b>Gambar 4.4</b> Tampilan Distribusi Kecepatan Aliran Fluida <i>Pebble bed</i> 6 cm pada 12 Detik .....	34
<b>Gambar 4.5</b> Grafik Distribusi Tekanan pada <i>Pebble bed</i> 6 cm .....	36
<b>Gambar 4.6</b> Tampilan Distribusi Tekanan <i>Pebble bed</i> 6 cm pada 12 Detik.....	36
<b>Gambar 4.7</b> Grafik Distribusi Suhu pada <i>Pebble bed</i> 9 cm .....	39

<b>Gambar 4.8</b> Tampilan Distribusi Suhu <i>Pebble bed</i> 9 pada 12 Detik .....	39
<b>Gambar 4.9</b> Grafik Distribusi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Pebble bed</i> 9 cm ..	42
<b>Gambar 4.10</b> Tampilan Distribusi Kecepatan Aliran Fluida <i>Pebble bed</i> 9 cm pada 12 Detik .....	42
<b>Gambar 4.11</b> Grafik Distribusi Tekanan pada <i>Pebble bed</i> 9 cm .....	44
<b>Gambar 4.12</b> Tampilan Distribusi Tekanan <i>Pebble bed</i> 9 cm pada 12 Detik ....	44
<b>Gambar 4.13</b> Grafik Distribusi Suhu pada <i>Pebble bed</i> 12 cm .....	46
<b>Gambar 4.14</b> Tampilan Distribusi Suhu <i>Pebble bed</i> 6 cm pada 12 Detik.....	46
<b>Gambar 4.15</b> Grafik Distribusi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Pebble bed</i> 12 cm.....	48
<b>Gambar 4.16</b> Tampilan Distribusi Kecepatan Aliran Fluida <i>Pebble bed</i> 12 cm pada 12 Detik .....	48
<b>Gambar 4.17</b> Grafik Distribusi Tekanan pada <i>Pebble bed</i> 12 cm .....	50
<b>Gambar 4.18</b> Tampilan Distribusi Tekanan <i>Pebble bed</i> 12 cm pada 12 Detik....	50

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
<b>Tabel 2.1</b> Parameter desain TMSR-SF (Dai, 2017).....	10
<b>Table 2.2</b> Parameter pendingin FLiBe dan moderator grafit (Yao, <i>et al.</i> , 2014)...	11
<b>Tabel 2.3</b> Parameter <i>pebble bed</i> (Taylor, <i>et al.</i> , 2002).....	12
<b>Tabel 3.1</b> Dimensi pada teras reaktor <i>pebble bed</i> , dan pendingin.....	23
<b>Tabel 3.2</b> Termofisika pendingin dan <i>pebble bed</i> .....	25
<b>Tabel 3.3</b> Ukuran dari teras reaktor dan <i>pebble bed</i> .....	25
<b>Tabel 3.4</b> Syarat batas.....	26
<b>Tabel 4.1</b> Masukan parameter desain TMSR-SF penelitian (Yao, <i>et al.</i> , 2014)...	30
<b>Tabel 4.2</b> Masukan parameter LiF-BeF <sub>2</sub> (66.7-33.3).....	30
<b>Table 4.3</b> Masukan kondisi batas .....	30
<b>Tabel 4.4</b> Perbandingan hasil <i>benchmarking</i> dan enelitian.....	31

## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan
$\rho$	Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_0$	Densitas pada suhu referensi $T_0$ ( $\text{kg/m}^3$ )
$C_\rho$	Kapasitas panas jenis ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )
$T$	Suhu ( $\text{K}$ )
$T_0$	Suhu referensi ( $\text{K}$ )
$\beta$	Koefisien ekspansi volumetrik ( $1/\text{K}$ )
$u$	Kecepatan aliran dalam arah x ( $\text{m/s}$ )
$v$	Kecepatan aliran dalam arah y ( $\text{m/s}$ )
$t$	Waktu ( $\text{s}$ )
$p$	Tekanan ( $\text{Pa}$ )
$\mu$	Viskositas ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
$g$	Percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )
$k$	Konduktivitas termal ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )
$q$	Fluks panas ( $\text{W/m}^2$ )
$d_z$	Ketebalan lapisan dalam arah z ( $\text{m}$ )
$Q$	Sumber panas ( $\text{W}$ )
$q_0$	Fluks panas tambahan ( $\text{W/m}^2$ )
$Re$	Bilangan Reynolds
$D$	Diameter karakteristik ( $\text{m}$ )
$\nabla$	Operator gradien
$\nabla \cdot$	Operator divergensi
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Laju perubahan suhu terhadap waktu
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Laju perubahan suhu terhadap posisi x
$\frac{\partial T}{\partial y}$	Laju perubahan suhu terhadap posisi y
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$	Laju perubahan kedua suhu terhadap posisi x
$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$	Laju perubahan kedua suhu terhadap posisi y
$\frac{\partial u}{\partial t}$	Laju perubahan kecepatan $u$ terhadap waktu

<b>Simbol</b>	<b>Keterangan</b>
$\frac{\partial u}{\partial x}$	Laju perubahan kecepatan $u$ terhadap posisis x
$\frac{\partial u}{\partial y}$	Laju perubahan kecepatan $u$ terhadap posisis y
$\frac{\partial v}{\partial x}$	Laju perubahan kecepatan $v$ terhadap posisis x
$\frac{\partial v}{\partial y}$	Laju perubahan kecepatan $v$ terhadap posisis y
$\frac{\partial p}{\partial x}$	Laju perubahan tekanan terhadap posisis x
$\frac{\partial p}{\partial y}$	Laju perubahan tekanan terhadap posisis y
$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$	Laju perubahan kedua kecepatan $u$ terhadap posisi x
$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$	Laju perubahan kedua kecepatan $u$ terhadap posisi y

## DAFTAR SINGKATAN

<b>Singkatan</b>	<b>Keterangan</b>	<b>Muncul Pertama pada Halaman</b>
PLTN	Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	1
BNN	Bahan Bakar Nabati	1
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i>	2
GFR	<i>Gas-cooled Fast Recktor</i>	2
LFR	<i>Lead-cooled Fast Reactor</i>	2
SCWR	<i>Supercritical Water-cooled Reactor</i>	2
SFR	<i>Sodium-cooled Fast Reactor</i>	2
VHTR	<i>Very High Temperature Reactor</i>	2
TMSR-SF	<i>Thorium Salt Reactor Solid Fuel</i>	2
TMSR-LF	<i>Thorium Salt Reactor Liquid Fuel</i>	2
TRISO	<i>Tristructural Isotropic</i>	3
PDE	<i>Differential Equation</i>	17
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>	17
PC	<i>Personal Computer</i>	21

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi menjadi salah satu aspek penting bagi kehidupan manusia dari zaman ke zaman. Konsumsi energi secara global masih menggunakan bahan energi fosil. Bahan energi fosil akan habis jika digunakan secara terus menerus. Energi fosil merupakan energi yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti gas, minyak bumi dan batu bara. Penggunaan bahan energi fosil menyebabkan kenaikan emisi sehingga iklim menjadi tidak stabil serta adanya peningkatan suhu bumi dan permukaan air laut. Indonesia memiliki beragam sumber energi selain fosil seperti sumber energi terbarukan (*renewable energy*) seperti panas bumi, biomasa, air, bayu, surya, biogas, sampah kota dan bahan bakar nabati (BBN) (Pertamina, 2020).

Namun energi terbarukan ini menghasilkan energi yang lebih sedikit dibandingkan bahan bakar fosil. Saat ini, produksi energi dari sumber energi terbarukan masih belum mencukupi untuk memenuhi kebutuhan pasokan listrik di Indonesia (Setyono & Kiono, 2021). Oleh karena itu, pemanfaatan energi nuklir sangat dibutuhkan. Nuklir menjadi pilihan karena merupakan sumber energi yang besar. Selama ini pemanfaatan nuklir di Indonesia baru sebatas riset dan pemanfaatan di bidang medis dan industri seperti, radiofarmaka, hidrologi, pengawetan makanan, pertanian, peternakan, dan sterilisasi. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang menggunakan tenaga nuklir untuk menghasilkan tenaga listrik yang cukup terjangkau, aman, dan andal, merupakan salah satu pemanfaatan teknologi nuklir yang saat ini sedang dikembangkan dan dimanfaatkan secara besar-besaran dalam

industri energi, tidak merusak lingkungan dengan cara apapun (Susiaty & Widiawaty, 2023). Setelah kejadian Fukushima, keselamatan reaktor menjadi sorotan utama. Hal ini, telah mendorong pengembangan MSR yang dilengkapi dengan sistem pipa keamanan ( *safety plug* ).

Sistem pipa keamanan pada reaktor tidak lagi tergantung pada pasokan listrik. Sebelumnya, kekurangan dalam sistem reaktor Fukushima adalah kurangnya sistem untuk merelokasi bahan bakar saat pasokan listrik terputus. Dalam skenario di mana listrik padam dan pendingin reaktor tidak lagi aktif, MSR memungkinkan bahan bakar untuk keluar dari tangki utama dan dialirkan ke dalam tangki pengaman. MSR memiliki karakteristik keamanan yang unik berkat sistem pipa keamanan, juga dikenal sebagai katup pembekuan (*freeze valve*), dan penggunaan garam cair sebagai bahan bakar. Saat suhu bahan bakar mencapai level kritis, bahan bakar MSR akan dialirkan ke dalam tangki pengaman melalui katup pembekuan yang akan meleleh sebagai respons terhadap keadaan kritis akibat kecelakaan reaktor. Tingkat keamanan MSR secara optimal, diperlukan pengembangan lebih lanjut pada desain reaktor tersebut (Fu, *et al.*, 2017). MSR adalah salah satu dari enam reaktor generasi IV yang dirancang untuk meningkatkan tingkat keselamatan, serta menggunakan bahan bakar yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ekonomis. Kelima reaktor lainnya adalah *Gas-cooled Fast Reaktor* (GFR), *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR), *Supercritical Water-cooled Reactor* (SCWR), *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR), dan *Very High Temperature Reactor* (VHTR) (Setyono & Kiono, 2021).

*Pebble bed* terbagi menjadi dua kategori yaitu berbasis uranium dan berbasis thorium. Saat ini, seluruh bahan bakar industri nuklir adalah uranium. Karena peningkatan pesat permintaan energi dan besarnya cadangan thorium di seluruh dunia, penggunaan bahan bakar berbasis thorium pun meningkat. Sistem tenaga nuklir TMSR telah dikembangkan untuk penggunaan bahan bakar berbasis thorium. Penggunaan bahan bakar berbasis thorium pun meningkat. Sistem tenaga nuklir TMSR telah dikembangkan untuk penggunaan bahan bakar berbasis thorium. Penerapan tenaga nuklir dan tenaga nuklir hibrid berbasis reaktor *Thorium Salt Reactor Liquid Fuel* (TMSR-LF) dan *Thorium Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF). TMSR-LF, yang bahan bakarnya larut dalam garam, dirancang untuk



pengguna tenaga nuklir berbasis thorium dengan pengisian bahan bakar *online* dan *control online/offline*. TMSR-SF, yang menggunakan *pebble bed* tipe TRISO, dioptimalkan untuk aplikasi tenaga nuklir hibrida suhu tinggi (Dai, 2017).

Reaktor garam cair thorium berbahan bakar padat TMSR-SF merupakan jenis reaktor yang memiliki kapasitas listrik sebenar 168 MWe serta menggunakan garam lebur pendingin berupa  $\text{LiF-BeF}_2$ . Reaktor ini menggunakan thorium sebagai bahan bakar utamanya, yang melimpah, lebih aman, dan ramah lingkungan dibandingkan *pebble bed* saat ini seperti uranium. TMSR-SF memiliki banyak keunggulan dibandingkan reaktor nuklir saat ini. Pertama, reaktor ini lebih efisien dalam menggunakan *pebble bed*. Karena reaktor ini menggunakan garam cair sebagai pendingin, reaktor ini mencapai suhu yang lebih tinggi dan menghasilkan lebih banyak energi dibandingkan reaktor konvensional. Selain itu, reaktor ini dapat menggunakan *pebble bed* yang tidak terpakai dari reaktor yang ada, sehingga mengurangi limbah nuklir. Karena reaktor ini menggunakan thorium sebagai bahan bakar utamanya, maka reaktor ini tidak menghasilkan limbah nuklir berbahaya dan memiliki umur yang lebih panjang dibandingkan reaktor saat ini (Wadjdi, *et al.*, 2021).

Bahan bakar TMSR-SF yaitu TRISO yang berbentuk seperti bola pejal. *Pebble bed* memegang peranan vital dalam industri nuklir dengan kontribusi yang signifikan. Desainnya yang intrinsik memberikan tingkat keselamatan yang tinggi dengan kemampuan untuk menyerap panas berlebih dan mencegah reaksi berantai yang tidak terkendali, secara substansial mengurangi risiko kecelakaan nuklir. Efisiensi termalnya yang unggul, memungkinkan transfer panas yang efisien antara bahan bakar dan fluida pendingin, meningkatkan pemanfaatan energi nuklir secara efektif. Sifat modularitasnya memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan daya reaktor sesuai kebutuhan, sambil mempermudah perawatan dan pengembangan sistem. Kontribusinya terhadap energi bersih sangat penting, menghasilkan energi listrik tanpa emisi gas rumah kaca dan polusi udara, serta berperan dalam penyediaan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan. Upaya berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan untuk meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan keandalan reaktor menegaskan komitmen pada teknologi ini. Oleh karena itu,

reaktor memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan industri nuklir dan penyediaan energi listrik yang aman, bersih, dan efisien (Xiong, *et al.*, 2017).

*Pebble bed* merupakan konfigurasi bahan bakar yang digunakan dalam reaktor *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF), yang terdiri dari bola-bola kecil bahan bakar yang disusun untuk memungkinkan aliran pendingin bergerak di antaranya. Konfigurasi ini meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan keamanan operasional reaktor. Ukuran *pebble* sangat berpengaruh pada karakteristik termal hidrolis reaktor. *Pebble* yang lebih kecil meningkatkan luas permukaan kontak dan perpindahan panas, namun dapat menyebabkan peningkatan penurunan tekanan dan potensi penyumbatan. Sebaliknya, *pebble* yang lebih besar mengurangi penurunan tekanan tetapi mungkin mengorbankan efisiensi perpindahan panas. Penelitian pengaruh ukuran *pebble bed* menggunakan simulasi COMSOL *Multiphysics* adalah langkah penting untuk memahami distribusi temperatur dan aliran fluida dalam reaktor. Dengan mensimulasikan berbagai ukuran *pebble*, dapat menganalisis distribusi temperatur, profil aliran fluida, serta koefisien perpindahan panas dan penurunan tekanan. Data ini akan membantu menentukan ukuran *pebble* yang optimal untuk efisiensi dan keselamatan maksimum (Xiong, *et al.*, 2017).

Pada penelitian sebelumnya yang membahas tentang pengaruh ukuran *pebble bed* lebih mengarah pada distribusi kekosongan ( *voidages* ) di teras reaktor. Hasilnya menunjukkan bahwa ukuran kerikil dan dimensi *pebble* dapat memengaruhi distribusi perpindahan panas dalam reaktor. Menganalisis efek dimensi dan ukuran terhadap distribusi memberikan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana karakteristik distribusi kekosongan dipengaruhi oleh faktor-faktor tersebut. Oleh karena itu, pemilihan ukuran diameter yang tepat dapat memengaruhi distribusi kekosongan dalam reaktor. Sedangkan penelitian mengenai pengaruh ukuran *pebble bed* terhadap termal hidrolis masih belum diteliti padahal ada kemungkinan mempengaruhi sistem keselamatan reaktor nuklir. Hal ini, karena mengingat bahwa dalam kasus reaktor nuklir studi termal hidrolis menjadi aspek yang sangat penting dan berkaitan langsung dengan sistem keselamatan reaktor.

Studi ini diharapkan dapat memberikan wawasan penting untuk meningkatkan efisiensi termal dan keselamatan operasional reaktor TMSR-SF. Dengan memahami pengaruh ukuran *pebble bed*, kita dapat mengoptimalkan desain reaktor, memastikan aliran pendingin yang optimal, dan mengurangi penurunan tekanan, yang pada akhirnya akan mendukung pengembangan energi nuklir yang lebih aman dan efisien. Maka dari itu, dilakukan penelitian tentang studi pengaruh ukuran *pebble bed* terhadap termal hidrolik pada TMSR-SF.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah berdasarkan latar belakang pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh ukuran diameter *pebble bed* terhadap termal hidrolik pada TMSR-SF ?
2. Bagaimana pengaruh laju kondisi awal fluida terhadap termal hidrolik pada TMSR-SF ?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah penelitian ini maka terdapat tujuan sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh ukuran diameter *pebble bed* terhadap termal hidrolik berupa suhu dan tekanan di teras reaktor pada TMSR-SF.
2. Menganalisis pengaruh laju kondisi awal fluida terhadap termal hidrolik berupa kecepatan aliran fluida di teras reaktor pada TMSR-SF.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah.

1. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
2. Mendukung pengembangan teknologi di bidang reaktor nuklir.
3. Memberikan pemahaman terhadap adanya potensi terjadinya kelebihan panas pada *pebble bed* dan tantangan keselamatan yang berkaitan dengan desain TMSR-SF.

### 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah.

1. Reaktor yang digunakan adalah TMSR-SF.
2. Bahan pendingin yang digunakan berupa garam lebur FLiBe.
3. Penekanan termal hidrolik pada *pebble bed* reaktor tipe TMSR-SF.
4. Studi termal hidrolik berdasarkan pengaruh ukuran *pebble bed*.
5. Geometri teras reaktor berbentuk persegi.
6. Aliran fluida berbentuk laminar.
7. Modul yang digunakan aliran laminar dan transfer panas dalam fluida.
8. Aplikasi yang digunakan yaitu COMSOL *Multiphysics* 6.2.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Reaktor Nuklir

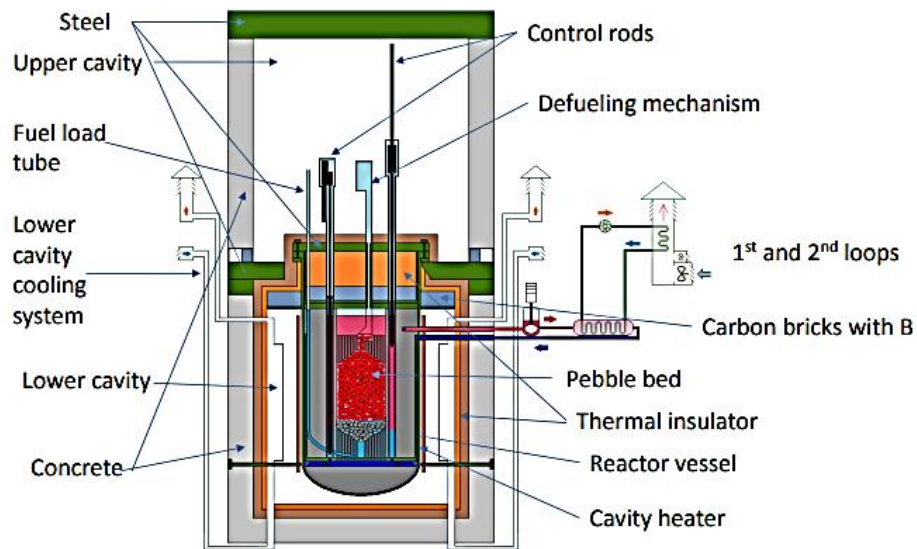
Reaktor nuklir terjadi berdasarkan proses reaksi pembelahan inti (fisi) secara berantai dan tak terkendali. Hal ini, berhubungan dengan perlunya analisis interaksi neutron dengan nuklida dan proses yang terjadi untuk mempertahankan reaksi berantai dengan cara yang stabil dan aman (IAEA, 2015). Reaksi berantai tersebut berasal dari peristiwa tumbukan antara neutron dengan nuklida di dalam reaksi nuklir menyebabkan terjadinya berbagai reaksi. Di mana *macroscopic cross section* reaksi atau penampang lintang makroskopik diperlukan untuk mengetahui kuantitas dari masing-masing reaksi. Penampang lintang makroskopik menjadi sangat penting untuk menentukan distribusi neutron dalam teras reaktor (Shafii, 2015).

Terkendali adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan sesuai dengan kebutuhan energi. Reaktor nuklir memiliki prinsip kerja hampir sama dengan pembangkit listrik konvensional lainnya. Letak perbedaan utamanya terdapat pada sumber energi dan jenis bahan bakar yang digunakan (Arias, *et al.*, 2020). Pada sumber energi pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran bahan bakar fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi dengan menggunakan *pebble bed* (Novalinda, *et al.*, 2018)

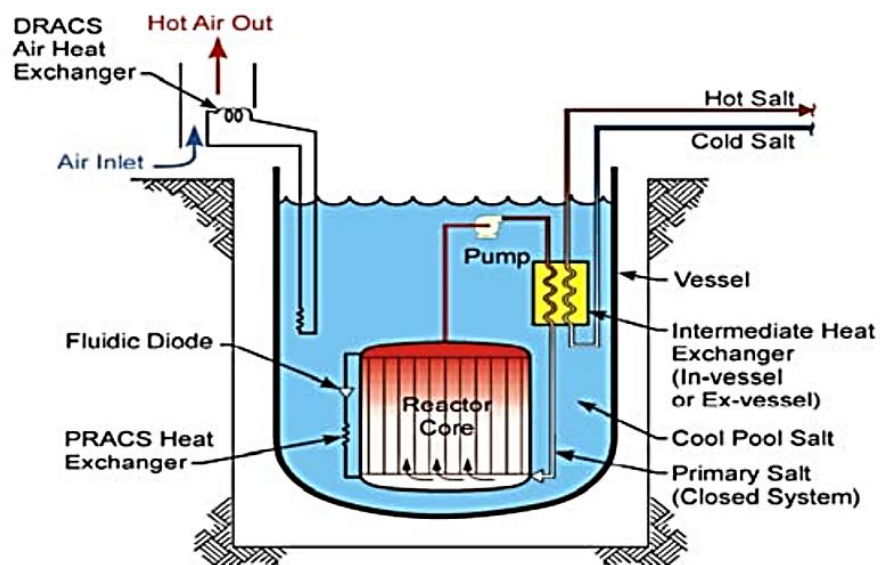
### 2.2 Reaktor Nuklir TMSR-SF

TMSR-SF (*Thorium Molten Salt Reaktor with Solid Fuel*) adalah jenis reaktor nuklir yang menggunakan thorium sebagai bahan bakar utamanya. Reaktor ini

memiliki desain yang unik karena menggunakan kombinasi garam terlarut dan bahan bakar padat. Garam terlarut digunakan sebagai medium pendingin dan bahan bakar, sementara bahan bakar padat digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan keamanan reaktor. Analisis *neutronic* dan termal hidrolis dilakukan untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang parameter fisika inti, distribusi kepadatan daya, serta karakteristik termal hidrolis dari reaktor TMSR-SF (Dwijayanto, 2018).

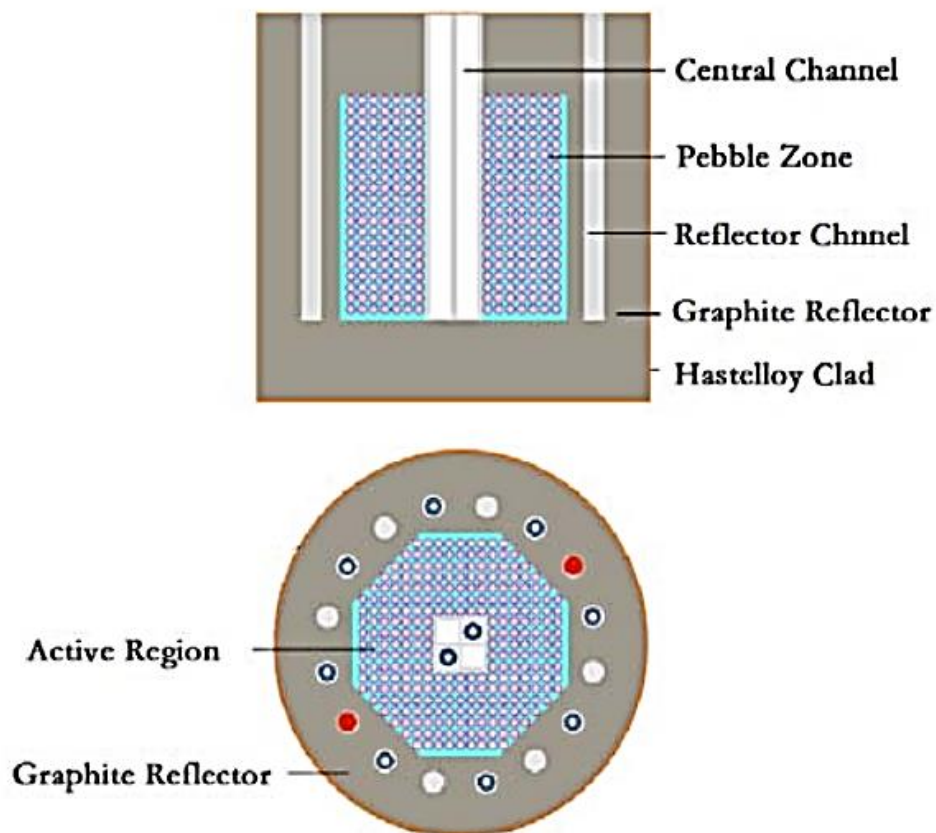


**Gambar 2.1** Skematik Reaktor TMSTR-SF (Dai, 2017)



**Gambar 2.2** Skematik Teras Reaktor TMSR-SF (Yao, *et al.*, 2014)

Salah satu keunggulan terbesar yang dimiliki oleh teknologi TMSR-SF adalah tingkat efisiensi energinya yang luar biasa tinggi. Penggunaan thorium sebagai bahan bakar membawa potensi besar karena sumber daya thorium yang lebih melimpah di alam dibandingkan dengan uranium. Keunggulan ini memungkinkan thorium dimanfaatkan secara lebih optimal dalam reaktor ini, menghasilkan jumlah limbah radioaktif yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan reaktor nuklir konvensional yang bergantung pada uranium. Tidak hanya itu, aspek keberlanjutan juga menjadi daya tarik utama dari TMSR-SF (Aufiero, 2017).



**Gambar 2.3** Tampak Atas dan Tampak Depan Teras Reaktor

Kemampuannya untuk menggunakan thorium yang melimpah dan dapat diambil dari sumber alam yang lebih berlimpah memberikan jaminan bahwa reaktor ini menawarkan potensi untuk menyediakan energi nuklir yang lebih berkelanjutan. Selain itu, TMSR-SF juga dapat membakar limbah nuklir dari reaktor nuklir konvensional, membantu mengatasi masalah limbah radioaktif yang dihasilkan

oleh industri nuklir. Penting juga untuk mencatat bahwa keamanan merupakan fokus utama dalam desain TMSR-SF. Sistem keselamatan pasif yang dimiliki oleh reaktor ini memungkinkan reaktor untuk memadamkan dirinya sendiri dalam situasi darurat tanpa perlu campur tangan manusia (Ge, *et al.*, 2016).

**Tabel 2.1** Parameter desain TMSR-SF (Dai, 2017).

Parameter	Nilai
Kapasitas listrik (MWe)	168
Kapasitas termal (MWT)	395
Teras reaktor	1,43 m x 1,43 m
Diameter <i>pebble bed</i>	0,06 m
Temperatur masuk/ keluar pada loop primer	600/700 °C
Garam loop primer	FLiBe
Garam loop sekunder	FNaBe
Moderator	Grafit
Bahan structural	<i>stainless steel</i>
Ukuran bejana utama (D × H) (m)	3,8 × 12
Penghapusan sisa panas	Sistem penghapusan panas residu pasif
Sistem Generator	Siklus Brayton udara terbuka dan siklas Rankine

Tingkat keamanan operasional reaktor ditingkatkan secara signifikan, dan risiko terjadinya kecelakaan nuklir dapat diminimalkan. Konsep penggunaan thorium sebagai bahan bakar dan garam lebur sebagai medium pendingin membuka potensi yang menarik dalam menghadapi tantangan energi nuklir di masa depan. Dengan fokus yang kuat pada keberlanjutan, efisiensi, dan keselamatan, TMSR-SF menjanjikan solusi inovatif dan berkelanjutan dalam memenuhi kebutuhan energi dunia yang terus berkembang (Dewita, *et al.*, 2018).

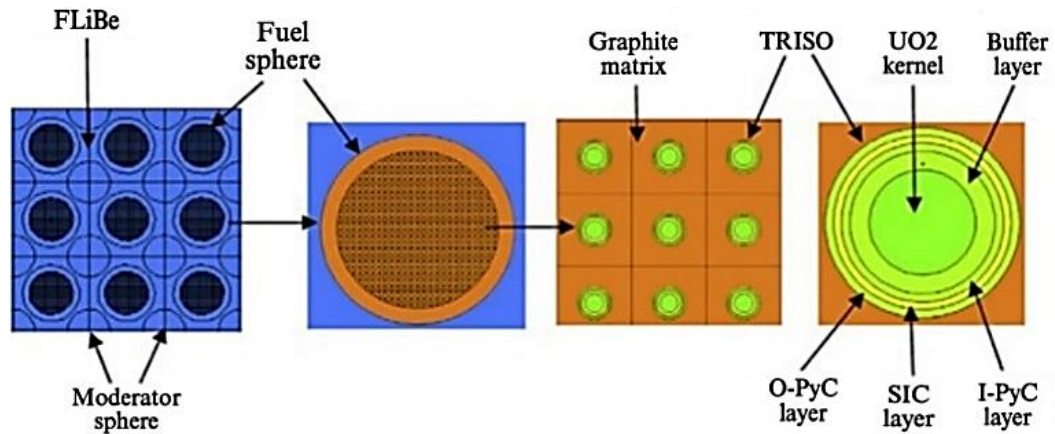


**Table 2.2** Parameter pendingin FLiBe dan moderator grafit (Yao, *et al.*, 2014).

Parameter	Nilai
Garam Pendingin	FLiBe
Masa Jenis (kg/cm <sup>3</sup> )	1950
Viskositas (Pas)	$1,164 \times 10^4$
Konduktivitas Termal(W/m.K)	0,0005
Kapasitas panas (j/kg K)	2380
Moderator	Grafit
Titik lebur	733,15
Masa Jenis (kg/cm <sup>3</sup> )	1840
Kapasitas Panas (j/kg K)	1760
Konduktivitas Termal(W/m.K)	31,2

### 2.3 *Pebble Bed*

*Pebble bed*, mengacu pada struktur dalam reaktor nuklir yang terdiri dari sejumlah bola yang dipasang secara acak. Umumnya berbentuk bola, berisi ribuan partikel bahan bakar *Tristructural Isotropic* (TRISO) di dalamnya. Sistem berbasis *pebble bed*, aliran pendingin seperti gas helium atau garam fluoride mengalir melalui struktur pori yang terbentuk oleh batu-batu bakar. Fungsi aliran ini adalah untuk mendinginkan bahan bakar dan menyerap panas dari reaksi nuklir di dalamnya. Desain reaktor memungkinkan pengisian bahan bakar secara langsung, yang dapat meningkatkan ketersediaan dan efisiensi termal dari pembangkit listrik tenaga nuklir. Aliran pendingin dalam desain mengalir melalui struktur pori yang dibentuk oleh batu-batu bakar, berperan dalam mendinginkan bahan bakar dan menyerap panas dari reaksi nuklir yang terjadi di dalamnya (Zou, *et al.*, 2022). Setiap *pebble bed*, biasanya terdiri dari inti bahan bakar fisil, seperti uranium dioksida, yang dilapisi oleh lapisan pelindung berupa grafit.



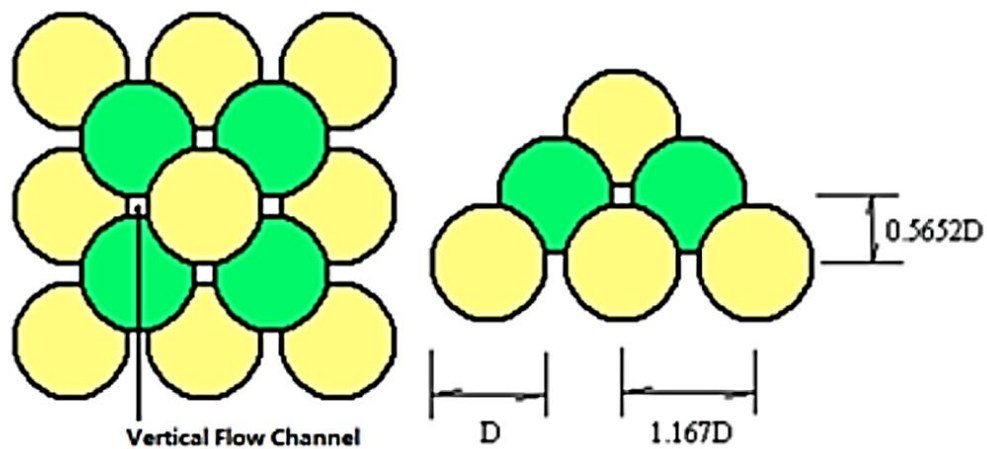
**Gambar 2.4** Komponen TMSR-SF Pendingin FLiBe, Grafit, dan Lapisan *Pebble* (Liu, *et al.*, 2020).

**Tabel 2.3** Parameter *pebble bed* (Taylor, *et al.*, 2002).

Parameter	Nilai
Diameter <i>pebble bed</i>	6,0 cm
Diameter bahan bakar	5,0 cm
U memuat per <i>pebble bed</i>	7,0 g
Pengayaan Th-232	17,0 wt %
Kandungan boron yang setara dalam bahan bakar	4 ppm
Kepadatan grafit	1,73 g/cm <sup>3</sup>
Kandungan boron yang setara dalam grafit	3 ppm
Faktor pengepakan TRISO	7,27%
<i>Karnel pebble</i>	
Radius <i>karnel</i>	0,25 mm
Kepadatan Th-232	10,4 g/cm <sup>3</sup>
Grafit	
Bahan lapis dimulai dari <i>karnel</i>	Buffer/iPyC/SiC/oPyC
Ketebalan lapisan (mm)	0,095/0,040/0,035/0,040
Kepadatan Lapisan (g/cm <sup>3</sup> )	1,10/1,90/3,18/1,90

Lapisan pelindung ini tidak hanya berfungsi untuk mendukung struktur, tetapi juga untuk mengontrol reaksi nuklir yang terjadi di dalamnya. Dengan diameter sekitar beberapa sentimeter, *pebble* ini dirancang khusus untuk memiliki sifat-sifat termal

yang stabil serta kemampuan transfer panas yang optimal. Dalam konteks ini akan bergerak secara terus-menerus melalui inti reaktor. Saat melewati inti, akan mengalami reaksi fisi yang menghasilkan panas. Panas yang dihasilkan ini kemudian ditransfer ke media pendingin, seperti gas helium atau fluida pendingin lainnya, yang berfungsi sebagai pengangkut panas dari inti reaktor. Media pendingin ini membawa panas keluar dari inti reaktor untuk kemudian dimanfaatkan dalam menghasilkan uap yang akan digunakan untuk pembangkit listrik (Hu, *et al.*, 2020).



**Gambar 2.5** Susunan *Pebble* pada Teras Reaktor (Yao, *et al.*, 2014)

#### 2.4 Termal Hidrolik TMSR-SF

Analisis termal hidrolik pada Reaktor *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR) adalah sebuah teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi bagaimana suhu, tekanan, dan aliran didistribusikan dalam reaktor nuklir yang menggunakan prinsip fisika dan termodinamika (Liu, *et al.*, 2016). Proses analisis ini memanfaatkan metode numerik seperti LU Faktorisasi dan Runge Kutta untuk menghitung parameter seperti aliran fluida yang bersifat laminar atau turbulen, serta konduktivitas termal (Zohuri & Patrick, 2015). Sistem hidrolik termal, di sisi lain, memanfaatkan fluida untuk mengontrol suhu dan tekanan dengan dasar pada perubahan konduktivitas termal dalam berbagai keadaan fluida seperti cairan, uap, atau gas. Analisis termal hidrolik reaktor bertujuan untuk memahami bagaimana distribusi suhu dan transfer panas terjadi dalam reaktor, serta dampaknya terhadap tekanan dan integritas bahan yang

digunakan. Untuk melakukan analisis ini, diperlukan pemodelan matematis yang kompleks dan sering kali diperlukan penggunaan perangkat lunak simulasi untuk memprediksi perilaku reaktor dalam berbagai situasi operasional dan dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* (Anggraini, *et al.*, 2018).

#### 2.4.1 Persamaan Dinamika Perpindahan Panas

Operasi reaktor nuklir, perpindahan panas memegang peranan penting dan rumit. Ini melibatkan tiga proses utama: konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi melibatkan transfer panas langsung melalui molekul-molekul, konveksi melibatkan gerakan fluida panas, dan radiasi melibatkan pancaran gelombang elektromagnetik. Reaktor nuklir, menjaga suhu yang sesuai krusial untuk mengelola reaksi nuklir. Panas yang dihasilkan dari reaksi ini digunakan untuk menghasilkan uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Jumlah neutron yang menyebabkan reaksi fisi pada *pebble bed* juga mempengaruhi jumlah panas yang dihasilkan (Jacson, 2013). Persamaan dinamika perpindahan panas dapat tuliskan pada persamaan (2.1).

$$d_z \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 \quad (2.1)$$

Berikut speksifik persamaan (2.1)  $\rho$  adalah massa jenis fluida,  $C_p$  adalah kapasitas panas spesifik fluida,  $T$  adalah suhu fluida,  $t$  adalah waktu,  $\nabla$  adalah operator gradien, dan  $\mathbf{q}$  adalah laju panas yang masuk ke dalam sistem,  $d_z$  adalah ketebalan domain di luar bidang,  $\mathbf{u}$  adalah vektor,  $q_0$  adalah fluks panas ke dalam,  $Q$  adalah sumber panas (Ge, *et al.*, 2016).

Analisis dinamika perpindahan panas pada reaktor nuklir, faktor-faktor seperti luas permukaan kontak, perbedaan suhu awal, dan konduktivitas panas diperhitungkan. Beberapa faktor eksternal, seperti penggunaan alat penukar panas, dapat memengaruhi perpindahan panas. Secara keseluruhan, dinamika perpindahan panas dalam reaktor nuklir mempelajari laju dan proses perpindahan panas antar material karena perbedaan suhu. Ini memiliki implikasi luas dalam berbagai aplikasi, termasuk pengolahan makanan, pengolahan air, dan desain perpindahan panas yang efektif (Santoso & Darmawan, 2017).

### 2.4.2 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas pada fenomena termal hidrolis dapat dirumuskan sebagai ekspresi umum dari hukum kekekalan energi, yang berlaku untuk semua jenis aliran dan fluida, serta berbagai kondisi aliran. Persamaan kontinuitas adalah salah satu persamaan dasar dalam mekanika fluida yang mendeskripsikan prinsip kekekalan massa dalam sistem fluida. Prinsip ini menyatakan bahwa massa fluida dalam suatu sistem tertutup tidak diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya dapat mengalir keluar atau masuk ke dalam sistem. Dengan kata lain, jumlah massa dalam sistem harus tetap konstan seiring waktu. Oleh karena itu, prinsip hukum kontinuitas dapat ditunjukkan pada persamaan (2.2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.2)$$

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$  merupakan laju perubahan massa yang menggambarkan kerapatan massa dalam suatu volume berubah seiring waktu. Misalnya, jika terjadi reaksi kimia atau perubahan fisik dalam sistem, kerapatan massa dalam suatu volume dapat berubah.  $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u})$  dikatakan sebagai aliran masuk dan aliran keluar, Bagian ini mewakili jumlah masuk dan keluar dari massa dalam suatu volume akibat aliran fluida. Operator divergensi ( $\nabla$ ) menghitung laju aliran massa ke luar dari suatu volume. Jika hasilnya positif, itu menunjukkan bahwa massa sedang masuk ke dalam volume, dan jika negatif, itu menunjukkan bahwa massa sedang keluar dari volume. Persamaan kontinuitas menyatakan bahwa jumlah laju perubahan massa dalam suatu volume ( $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ ) dan jumlah aliran masuk dan keluar ( $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u})$ ) harus sama dengan nol. Ini menunjukkan bahwa jumlah total massa dalam volume tersebut adalah tetap konstan tidak bergantung pada waktu, diasumsikan juga bahwa aliran yang ditunjukkan pada persamaan (2.2) merupakan aliran tak berotasi (*Irrotational Flow*). Massa fluida harus tetap terjaga dalam seluruh domain simulasi, konversi massa digunakan untuk memastikan aliran fluida yang melewati *pebble bed* akurat dengan mempertimbangkan perubahan densitas fluida dan kecepatan fluida (Yusibani, *et al.*, 2021).

### 2.4.3 Persamaan Navier - Stokes

Persamaan Navier-Stokes adalah seperangkat persamaan diferensial parsial yang menggambarkan perilaku aliran fluida. Persamaan ini dinamai dari ilmuwan Prancis Claude-Louis Navier dan George Gabriel Stokes yang mengembangkannya pada abad ke-19. Persamaan Navier-Stokes memadukan hukum kekekalan massa (persamaan kontinuitas) dan hukum kekekalan momentum (persamaan gerak) untuk fluida. Persamaan Navier-Stokes adalah kumpulan persamaan diferensial parsial non-linier yang mendasar dalam mekanika fluida. Persamaan ini menggambarkan bagaimana fluida mengalir dengan mempertimbangkan prinsip kekekalan massa dan momentum dalam sistem fluida. Dengan kata lain, persamaan ini menghubungkan percepatan partikel fluida dengan gaya-gaya yang memengaruhinya, termasuk gaya inersia yang terkait dengan perubahan kecepatan dan gaya viskositas yang terkait dengan gesekan internal dalam fluida. Dalam pemodelan aliran fluida, persamaan Navier-Stokes digunakan untuk meramalkan pola aliran, distribusi kecepatan, dan tekanan dalam suatu sistem fluida (Susanto & Basuki, 2019). Persamaan umum Navier-Stokes untuk aliran fluida dapat dituliskan dalam bentuk persamaan momentum ditunjukkan pada persamaan (2.3)

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \left[ \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (2.3)$$

Dimana  $\rho$  adalah masa jenis fluida,  $\mathbf{u}$  adalah vektor kecepatan fluida,  $t$  adalah waktu,  $p$  adalah tekanan fluida,  $\mu$  adalah viskositas dinamis fluida,  $\nabla$  adalah operator gradien,  $\mathbf{I}$  matriks identitas, , dan  $\mathbf{F}$  adalah gaya luar yang bekerja pada fluida. Persamaan ini merupakan representasi umum dari persamaan Navier-Stokes untuk aliran fluida dalam tiga dimensi. Suku pertama pada sisi kiri persamaan mewakili percepatan fluida (perubahan kecepatan terhadap waktu dan perubahan kecepatan konvektif), suku kedua mewakili gradien tekanan yang bertanggung jawab untuk menggerakkan fluida dari daerah tekanan tinggi ke rendah, suku ketiga mewakili gaya viskos yang menghambat aliran fluida, dan suku terakhir mewakili gaya luar yang bekerja pada fluida seperti gaya gravitasi atau gaya elektromagnetik (Xiong, *et al.*, 2017).

Pada persamaan (2.3) diuraikan secara numerik menggunakan metode seperti metode beda hingga, elemen hingga, atau volume hingga, dapat menghasilkan

solusi numerik yang menggambarkan perilaku aliran fluida dalam berbagai kondisi, mulai dari aliran laminar yang teratur hingga aliran turbulen yang kompleks. Melalui pemodelan berdasarkan persamaan Navier-Stokes, dapat memahami fenomena kompleks dalam aliran fluida seperti laminar, turbulensi, pembentukan *vorteks*, interaksi antara aliran fluida dengan benda padat, dan banyak lagi. Dengan demikian, persamaan Navier-Stokes memberikan dasar matematis yang kokoh untuk memahami, menganalisis, dan meramalkan berbagai aspek dari aliran fluida dalam berbagai situasi dan aplikasi teknis maupun ilmiah (Srigutomo & Hapsoro, 2013).

## 2.5 COMSOL *Multiphysics*

COMSOL *Multiphysics* adalah alat interaktif yang efektif untuk memodelkan dan menyelesaikan berbagai masalah ilmiah dan rekayasa yang didasarkan pada *Partial Differential Equation* (PDE). Menggunakan perangkat lunak ini, dapat dengan mudah mengubah model konvensional untuk satu jenis ilmu fisika menjadi model multifisika yang menangani fenomena fisika secara simultan. Tidak diperlukan pengetahuan yang mendalam tentang matematika atau analisis numerik untuk menjalankan perangkat ini. COMSOL *Multiphysics* menyediakan model fisika yang sudah ada dan memungkinkan pengguna untuk membangun model dengan menentukan berbagai parameter fisik seperti properti material, beban, kendala, sumber, dan fluks. Pengguna dapat langsung menerapkan variabel, simbol, atau angka ke dalam komputasi pada bidang padat, batas, tepi, dan titik secara bebas. *Software* ini secara otomatis menyusun persamaan diferensial parsial yang mewakili model secara keseluruhan. Dapat di akses Comsol *Multiphysics* melalui antarmuka pengguna grafis yang fleksibel atau dengan menggunakan bahasa pemrograman seperti COMSOL atau MATLAB (Taylor, *et al.*, 2002).

Kasus *Computational Fluid Dynamic* (CFD) menggunakan perhitungan numerik dan komputer untuk memodelkan dan menganalisis aliran fluida serta fenomena terkait. Dalam CFD, sistem fisik yang dipelajari dibagi menjadi grid yang terstruktur, dan persamaan fisika dasar seperti persamaan Navier-Stokes dimodifikasi menjadi bentuk diskret. Solusi numerik kemudian diperoleh dengan memecahkan

persamaan ini menggunakan komputer, memberikan gambaran tentang perilaku aliran fluida dalam domain yang diteliti. Aplikasi CFD sangat luas, termasuk dalam desain pesawat, kendaraan, dan turbin angin, serta dalam pemodelan proses pembakaran dan desain peralatan industri. Penggunaan CFD memungkinkan insinyur untuk menguji desain, memprediksi kinerja, dan mengidentifikasi masalah potensial tanpa perlu melakukan uji coba fisik yang mahal dan memakan waktu. Ada 3 metode yang digunakan untuk menyelesaikan kasus CFD yaitu elemen hingga, *finite difference*, dan *spectral*. Pada COMSOL *Multiphysics* menggunakan metode elemen hingga, Salah satu kelebihan menggunakan metode elemen hingga adalah kemampuannya memberikan fleksibilitas yang besar dalam pemilihan cara membagi domain (diskritisasi), baik dalam pemilihan elemen untuk membagi ruang maupun dalam pemilihan fungsi dasarnya. Pada penelitian ini ada 2 modul yang akan digunakan yaitu *laminar flow* dan *heat transfer in fluid* (Xiong, *et al.*, 2017).

### **2.5.1 Heat Transfer In Fluid**

Transfer panas dalam fluida (*Heat Transfer in Fluid*) merupakan fenomena penting dalam berbagai aplikasi teknik dan industri. Proses ini melibatkan perpindahan energi termal dari suatu area dengan suhu tinggi ke area dengan suhu lebih rendah melalui medium fluida. Pada konteks ini, fluida dapat berupa gas atau cairan, dan transfer panas dapat terjadi melalui berbagai mekanisme, termasuk konduksi, konveksi, dan radiasi (Yamoah, *et al.*, 2012).

Pertama, konduksi terjadi ketika energi panas berpindah dari partikel ke partikel dalam fluida, menyebabkan kenaikan suhu secara bertahap. Proses ini penting terutama dalam fluida yang diam atau dekat dengan permukaan padat di mana kontak langsung antara partikel-fluida dan permukaan padat terjadi. Kedua, konveksi terjadi ketika energi panas dipindahkan melalui pergerakan massa fluida. Konveksi dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu konveksi paksa dan konveksi alami. Konveksi paksa terjadi ketika aliran fluida diinduksi oleh tekanan eksternal, seperti pompa, sementara konveksi alami terjadi karena perbedaan kepadatan yang dihasilkan oleh perbedaan suhu. Kedua jenis konveksi ini memiliki peran penting dalam pendinginan dan pemanasan berbagai sistem, termasuk penukar panas dan



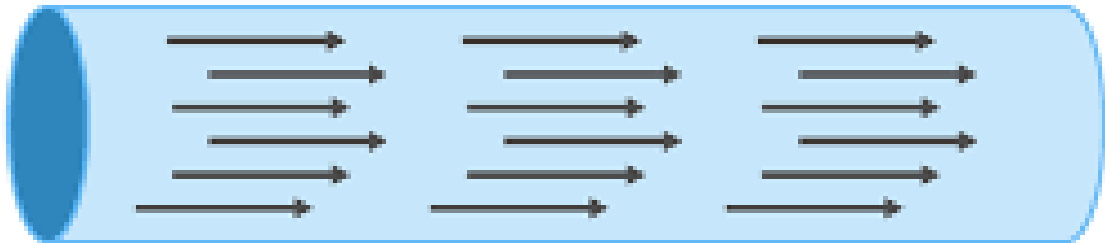
sistem HVAC. Terakhir, radiasi adalah proses di mana energi panas dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik oleh permukaan yang memiliki suhu yang berbeda. Radiasi panas dapat terjadi bahkan di ruang hampa udara dan berperan penting dalam proses pemanasan dan pendinginan, serta dalam perancangan sistem termal yang kompleks seperti oven industri dan kaca mobil (Taylor, *et al.*, 2002).

Dalam penelitian ini, digunakan perpindahan panas melalui konveksi dan konduksi dalam fluida. Konveksi terjadi karena aliran fluida di sekitar *pebble bed* dalam reaktor TMSR-SF, yang mengakibatkan transfer panas dari *pebble bed* ke fluida sekitarnya. Konduksi juga terjadi di dalam *pebble bed*, di mana panas ditransfer dari satu *pebble* ke *pebble* lainnya melalui kontak langsung antara partikel dalam *bed*. Oleh karena itu, pemodelan dan analisis dalam penelitian ini kemungkinan akan memusatkan pada kedua mekanisme ini untuk memahami pengaruh ukuran *pebble bed* terhadap termal hidrolis dalam reaktor. Studi transfer panas dalam fluida memerlukan pemahaman yang mendalam tentang perilaku fluida dan interaksi antara fluida dengan lingkungannya. Pemodelan dan simulasi komputer, seperti yang dilakukan dengan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*, menjadi alat penting dalam memahami dan menganalisis fenomena ini, membantu dalam desain sistem yang efisien secara termal dan berkinerja tinggi (Pavlidis & Lathouwers, 2013).

### **2.5.2 Laminar Flow**

Aliran laminar adalah jenis aliran fluida di mana partikel fluida mengalir dalam lapisan paralel yang teratur tanpa adanya pencampuran antar lapisan. Dalam aliran laminar, partikel fluida mengikuti lintasan yang teratur dan terprediksi, sehingga tidak terjadi turbulensi yang signifikan. Karakteristik aliran laminar meliputi pola aliran yang teratur, kecepatan aliran konstan, dan tidak adanya turbulensi. Aliran laminar sering terjadi pada aliran fluida dengan kecepatan rendah, viskositas tinggi, dan dimensi geometri yang kecil. Contoh aplikasi aliran laminar meliputi aliran dalam pipa yang halus, aliran darah dalam pembuluh darah kecil, dan aliran dalam mikrofluida. Penting untuk memahami jenis aliran ini karena aliran laminar

memiliki karakteristik yang berbeda dengan aliran turbulen, yang dapat mempengaruhi transfer panas, perpindahan massa, dan performa sistem fluida secara keseluruhan (Eliyanto & Hernadi, 2019).



**Gambar 2.6** Ilustrasi Aliran Laminar Fluida (Jacson, 2013).

Aliran laminar dikatakan sebagai jenis aliran fluida di mana partikel-fluida bergerak dalam pola yang teratur dan terorganisir. Aliran ini, partikel-fluida mengikuti jalur yang halus dan paralel dengan arah aliran secara umum, tanpa adanya turbulensi atau pencampuran yang signifikan antara lapisan-lapisan fluida. Pola aliran yang teratur ini menghasilkan lapisan-lapisan fluida yang terpisah dan bersifat laminar. Gradien kecepatan dalam aliran laminar cenderung halus dan teratur, dan aliran ini terjadi pada bilangan Reynolds pada gaya inersia terhadap gaya viskositas. Persamaan bilangan Reynolds ditunjukkan pada persamaan (2.4).

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Densitas fluida dinyatakan dengan  $\rho$  dan diukur dalam satuan kilogram per meter kubik ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu$  mewakili viskositas dinamis fluida dengan satuan Newton per meter kuadrat detik ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ),  $U$  adalah kecepatan rata-rata fluida yang diukur dalam meter per detik ( $\text{m/s}$ ), dan  $L$  adalah panjang karakteristik aliran yang diukur dalam meter (m). Bilangan Reynolds yang rendah, di mana gaya inersia relatif kecil dibandingkan dengan gaya viskositas. Meskipun aliran laminar lebih mudah diprediksi matematis, ia memiliki aplikasi yang terbatas dalam proses yang memerlukan pencampuran energik atau pertukaran panas yang cepat karena laju perpindahan massa dan panas yang rendah dalam aliran ini (Jacson, 2013).

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari 2024 sampai Juli 2024 di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung dan dapat dilakukan di manapun karena menggunakan data sekunder serta berbasis komputasi.

#### 3.2 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan alat dan bahan sebagai berikut :

1. *Personal Computer* (PC) atau Laptop.
2. *Software COMSOL Multiphysics 6.2.*

#### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan menggunakan beberapa tahapan yaitu :

##### 3.3.1 Menentukan Hukum Fisika.

Dalam menentukan hukum fisika yang akan digunakan pada penelitian dengan judul “Studi Pengaruh Ukuran *Pebble bed* Terhadap Termal Hidrolik Pada *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) Menggunakan COMSOL *Multiphysics* “. Ada beberapa hukum fisika yang akan digunakan yaitu modul modul *heat transfer in fluid* menggunakan persamaan perpindahan panas serta ketergantungan dengan waktu (*time dependent*) , serta *laminar flow* menggunakan persamaan kontinuitas dan navier-stokes. Pada penelitian ini ditinjau kasus 2 dimensi yaitu *xy* persamaan yang berkaitan dengan fenomena termal hidrolik pada

TMSR-SF diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* dapat dituliskan pada persamaan (3.1), (3.2), dan (3.3).

### Persamaan Dinamika Perpindahan Panas

$$\rho C_{\rho} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \Phi \quad (3.1)$$

Pada persamaan (3.1) menggambarkan perpindahan energi panas dari grafit,  $\Phi$  merupakan sumber panas berupa grafit yang menjadi lapisan terluar pada *Pebble bed* serta  $\mathbf{u}$  dan  $v$  merupakan kecepatan *pebble bed* pada sumbu xy, karena *pebble bed* tetap diposisi maka kecepatannya 0 m/s.

$$\rho C_{\rho} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

Pada persamaan (3.2) menggambarkan perpindahan energi panas di fluida yang bergerak dalam 2 dimensi, fluida pada penelitian ini menggunakan FLiBe serta  $\mathbf{u}$  dan  $v$  merupakan kecepatan fluida pada sumbu xy sebesar 0,01m/s.

### Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

Persamaan kontinuitas 2 dimensi dapat ditunjukkan pada persamaan (3.2). Persamaan ini diasumsikan bahwa alirannya mengarah ke weakly incompressible dan densitasnya adalah konstan. Aliran fluida yang dipengaruhi oleh variasi densitas kecil, densitas yang berubah terhadap waktu terutama yang disebabkan oleh perbedaan suhu, dihitung menggunakan persamaan boussinesq seperti ditunjukkan pada persamaan (3.3).

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3.3)$$

### Persamaan Navier – Stokes

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

Pada persamaan (3.4) merupakan persamaan Navier- Stokes pada 2 dimensi dikarenakan pada sumbu x tidak terdapat gaya eksternal maka sama dengan 0.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial v}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho \mathbf{g} \quad (3.5)$$

Pada persamaan (3.5) merupakan persamaan Navier-Stokes 2 dimensi dikarenakan pada sumbu  $y$  dipengaruhi oleh gaya gravitasi sehingga terdapat daya eksternal yang dituliskan dengan  $\rho \mathbf{g}$ .

Pada persamaan (3.4) dan (3.5) berkaitan langsung dengan persamaan (3.6), yang menggambarkan keseimbangan gaya inersia dan gaya viskos dalam fluida. Bilangan Reynold ditentukan oleh rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos, ditunjukkan pada persamaan (3.6).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.6)$$

Pada persamaan (3.4) dan (3.5), bilangan Reynold menunjukkan apakah aliran didominasi oleh gaya viskos (laminar) atau gaya inersia (turbulen). Jika bilangan Reynold rendah, gaya viskos lebih dominan, menghasilkan aliran yang teratur. Sebaliknya, bilangan Reynold tinggi menunjukkan dominasi gaya inersia, yang dapat menyebabkan aliran menjadi turbulen.

### 3.3.2 Parameter

Adapun parameter yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut.

**Tabel 3.1** Dimensi pada teras reaktor dan *pebble bed*.

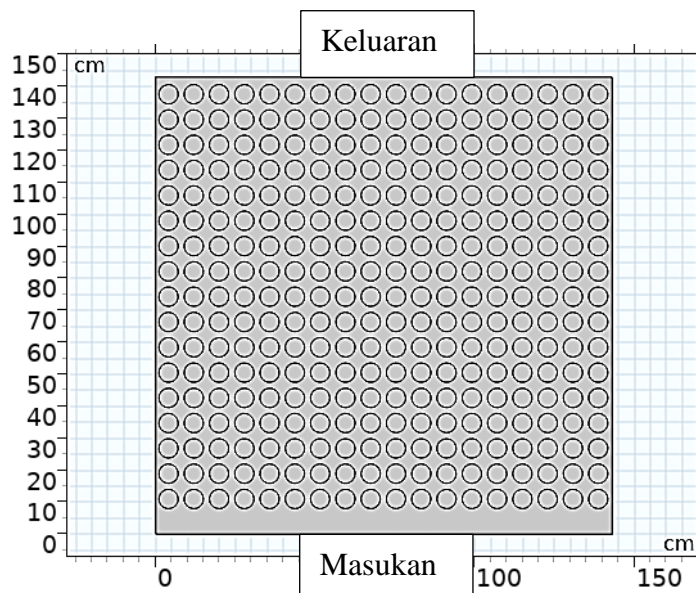
Parameter	Nilai	Unit
Tinggi teras reaktor	1,43	m
Lebar teras reaktor	1,43	m
Diameter <i>pebble bed</i>	0,06;0,09;0,12	m
Daya <i>pebble bed</i>	20	MW
Pendingin	33,3% LiF -66,7% BeF <sub>2</sub>	

**Tabel 3.2** Termofisika teras reaktor dan *pebble bed*.

Parameter	Nilai	Unit
Sumber panas	$3,18 \times 10^7$	W/m <sup>3</sup>
Suhu keluar ( <i>outlet</i> )	700	°C
Masa jenis pendingin	1950	Kg/m <sup>3</sup>
Konduktivitas <i>pebble</i>	1	W/mK
Masa jenis <i>pebble</i>	11,7	Kg/m <sup>3</sup>
Kapasitas panas <i>pebble</i>	5195	J/(kg·K)
Konduktivitas pendingin	1,1	W/mK

### 3.3.3 Geometri Reaktor dan *Pebble Bed* dalam 2 Dimensi

Pada penelitian yang berjudul “Studi Pengaruh Ukuran *Pebble bed* Terhadap Termal Hidrolik Pada *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*” sebagai mana telah disesuaikan bagian dari TMSR-SF yang dipelajari dengan asumsi 2 dimensi teras reaktor berbentuk persegi panjang dengan ukuran  $1,43 \times 1,43$  (m) dan *pebble bed* diasumsikan berbentuk lingkaran dengan diameter 0,06 m; 0,09 m; 0,12 m. Seperti **Gambar 3.1**.

**Gambar 3.1** Geometri Teras Reaktor dan *Pebble bed*

**Tabel 3.3** Ukuran dari teras reaktor dan *pebble bed*.

Parameter	Nilai (m)
Panjang teras reaktor	1,43
Lebar teras reaktor	1,43
Diameter <i>pebble bed</i> 1	0,06
Diameter <i>pebble bed</i> 2	0,09
Diameter <i>pebble bed</i> 3	0,12

### 3.3.4 Syarat Batas

Dalam penelitian ini syarat batas yang digunakan sebagai berikut.

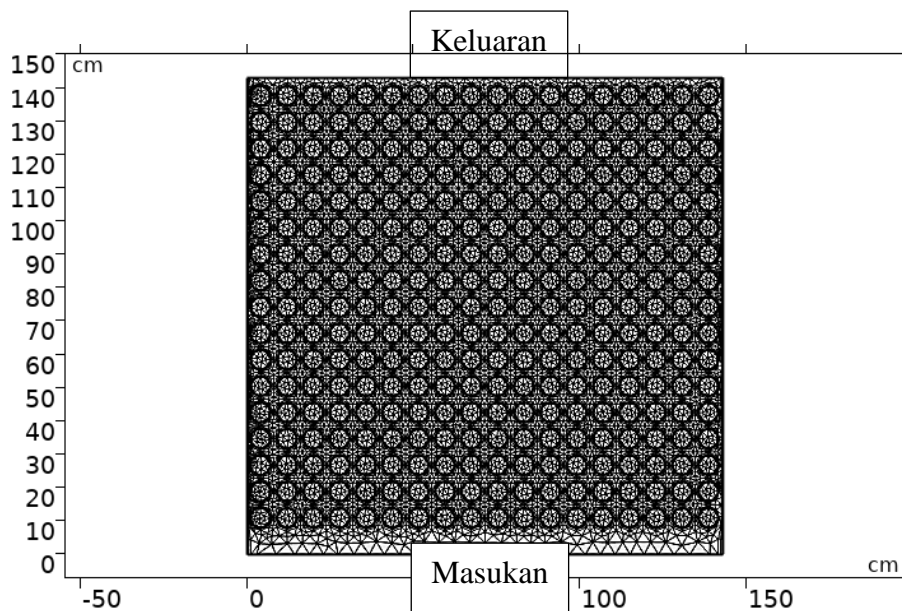
**Tabel 3.4** Syarat batas.

Parameter	Nilai
Suhu masukan	600 °C
Suhu keluaran	700 °C
Tekanan atmosfer	$1 \times 10^5$ Pa
Sumber panas	$3,18 \times 10^7$ W/m <sup>3</sup>
Kecepatan masuk	0,0952 m/s

### 3.3.5 Meshing pada Geometri.

Dalam penelitian ini *meshing* digunakan sebagai penentu komponen yang menghantarkan panas dan komponen yang menjadi pendingin dan permukaan 2 dimensi direpresentasikan menggunakan kumpulan segitiga dan kuadrilateral. Secara umum, dalam konteks mekanika fluida atau termal hidrolik, perubahan ukuran yang lebih kecil dari geometri *meshing* dapat menimbulkan berbagai dampak tergantung pada situasi spesifiknya. Meskipun *meshing* biasanya memiliki kekuatan yang baik, dimensi yang lebih kecil dapat mengurangi ketahanannya terhadap beban mekanis. Namun, hal ini dapat diimbangi oleh peningkatan kemampuan konduktivitas termal yang menguntungkan dalam aplikasi transfer panas seperti penukar panas atau komponen pendingin. Namun, perubahan dimensi juga dapat memengaruhi karakteristik aliran fluida, meningkatkan risiko korosi atau oksidasi, dan memperhitungkan biaya produksi yang lebih tinggi karena

kompleksitas manufaktur yang diperlukan. Oleh karena itu, ketika memilih ukuran geometri *meshing*, penting untuk mempertimbangkan persyaratan kinerja, keandalan. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



**Gambar 3.2** *Meshing*

### 3.3.6 Perhitungan

Pada penelitian ini menggunakan metode penyelesaian pada COMSOL umumnya secara simultan, dan simulasi perbedaan pada diameter geometri *pebble bed* berbentuk lingkaran dua dimensi, hal yang akan dilakukan yaitu membuat program kemudian dimasukkan pada bagian *solver script* sehingga persamaan dapat diselesaikan secara bertahap dimulai dari kontinuitas, navier-stokes, dan transfer panas pada kasus termal hidrolis di perbedaan ukuran *pebble bed* mendapatkan hasil yang konvergensi, di mana hasil *output* persamaan sebelumnya menjadi dasar pada *input* persamaan selanjutnya.

### 3.3.7 Hasil

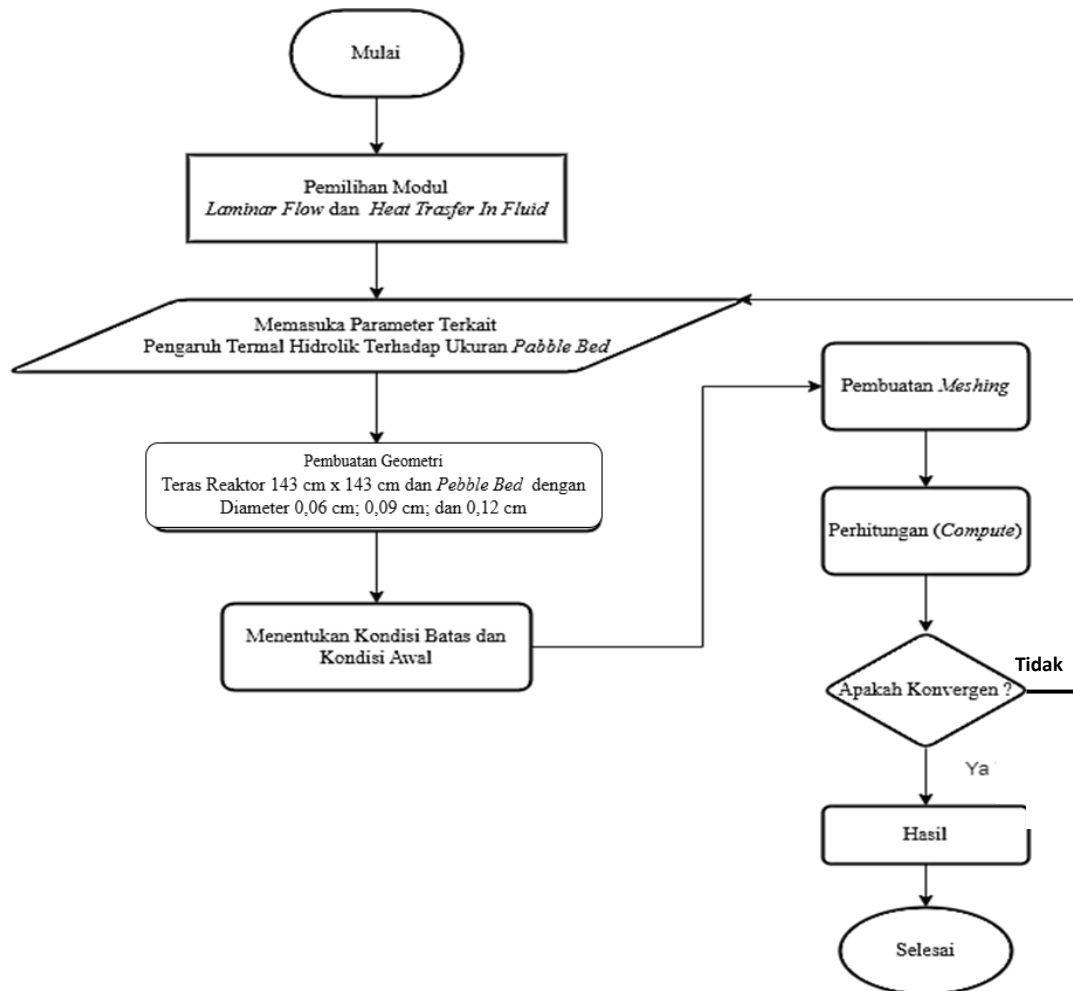
Seperti yang ditulis pada bab satu mengenai tujuan apa saja yang akan menjadi hasil pada penelitian ini meliputi sebuah data *output* berupa tekanan, suhu, dan kecepatan aliran pada hasil variasi ukuran *pebble bed*. Hasil yang didapat akan dibandingkan dengan hasil yang di kerjakan oleh (Yao, *et al.*, 2014).



### 3.4 Diagram Alir

#### 3.4.1 Diagram Alir Penelitian

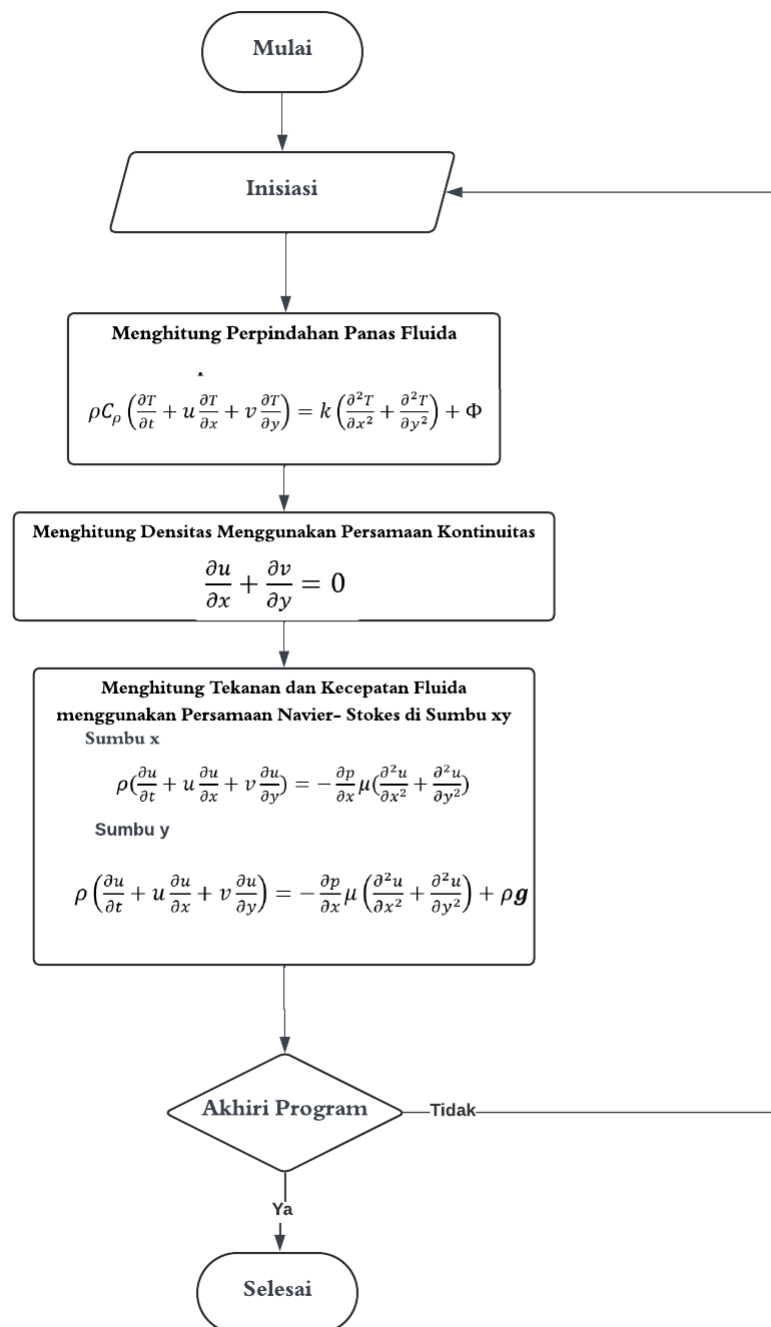
Diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.3** berikut.



**Gambar 3.3** Diagram Alir Pemodelan Simulasi COMSOL *Multiphysics*

#### 3.4.2 Menghitung Persamaan Penelitian

Adapun persamaan yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada **Gambar 3.4** berikut.



**Gambar 3.4** Diagram Alir Perhitungan pada COMSOL *Multiphysic*

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. *Benchmarking* yang telah dilakukan dengan membandingkan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya bisa diakui kebenarannya dan bisa digunakan sebagai acuan penelitian ini karena memiliki nilai galat 0,3%.
2. *Pebble bed* berukuran 6 cm pada reaktor TMSR-SF efektif dalam menyerap dan mendistribusikan panas. Suhu meningkat tajam dari *inlet* hingga titik 4, sementara aliran fluida tetap stabil meskipun terjadi penurunan kecepatan dan tekanan. *Pebble bed* 6 cm terbukti efisien dalam perpindahan panas tanpa menimbulkan resistensi aliran yang signifikan, sehingga cocok untuk menjaga efisiensi dan keselamatan reaktor.
3. *Pebble bed* 9 cm efektif dalam mentransfer panas dengan suhu meningkat secara stabil dari *inlet* ke *outlet*. Kecepatan aliran fluida menurun karena hambatan, namun meningkat menjelang *outlet*, dan tekanan turun konsisten sepanjang *pebble*. Sistem ini menunjukkan efisiensi dan stabilitas yang baik untuk reaktor TMSR-SF.
4. *Pebble bed* 12 cm, suhu meningkat dari 873,02 K di *inlet* menjadi 958,72 K di puncak sebelum turun sedikit menjadi 954,54 K di *outlet*. Kecepatan fluida menurun drastis dari 0,06 m/s menjadi 0,01 m/s, dan tekanan turun tajam dari -405,37 Pa menjadi -31521,06 Pa. Efisiensi perpindahan panas menurun akibat peningkatan hambatan aliran fluida.
5. Persentase perbedaan suhu tertinggi pada pengambilan data *pebble* 6 cm dan 9 cm yaitu 0,7% , sementara pada *pebble* 6 cm dan 12 cm yaitu 1,7%.
6. Persentase penurunan tekanan seiring dengan waktu tertinggi pada *pebble* 6 cm, 9 cm, dan 12 cm berturut – turut adalah 1,6% ; 1,4%; 1,5%.

7. Persentase perbedaan penurunan laju awal aliran fluida pada *pebble* 6 cm dan *pebble* 9 cm yaitu 0,09% , sementara *pebble* 9 cm dan *pebble* 12 cm yaitu 0,26%.

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat:

1. Melanjutkan penelitian ini menggunakan variasi material *pebble bed* terhadap karakteristik termal hidrolik dalam reaktor TMSR-SF.
2. Menggunakan jenis reaktor yang berbeda seperti HTGR, PB-AHTR, dan lainnya.
3. Melakukan fokus pada pengembangan model simulasi yang lebih dinamis untuk menggambarkan respons reaktor terhadap kondisi *transien*, seperti saat *start-up*, *shutdown*, dan variasi operasional lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, A. A., Yulianti, Y. & Manurung, P., 2018. En: *Analisis Termal-hidrolik Reaktor Cepat Berpendingin Gas (Gas Cooled Fast Reactor) Menggunakan Metode Runge Kutta*. Lampung: Universitas Lampung, pp. 5-9.
- Arias, P. F., Vergara, D. & Orosa, J. A., 2020. A Global Review of PWR Nuclear Power Plants. *Applied Sciences*, Volume 13, pp. 1-3.
- Aufiero, M., 2017. Beryllium as a Neutron Moderator in Molten Salt Reactors. *nuclear*, Volume 23, pp. 43-46.
- Dai, Z., 2017. *Reaktor Garam Cair dan Energi Thorium*. 2nd ed. Shanghai Cina: Institut Fisika Terapan Shanghai.
- Dai, Z., 2017. *Thorium molten salt reactor nuclear energy system (TMSR)*. 13 ed. Shanghai: SINAP.
- Dewita, E., Sembiring, T. M. & Sunarko, 2018. *Assessment of TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) safety system*. Yogyakarta, Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN)-BATAN.
- Dwijayanto, R. A. P., 2018. *Analisis Netronik Teras One Fluid-Molten Salt Reactor (OF-MSR) Berbasis Bahan Bakar  $LiF-U238F4-U235F4-ThF4$* . En: Yogyakarta: Universitas Gajah Mada, pp. 2-6.
- Eliyanto, J. & Hernadi, J., 2019. Pemodelan Persamaan Navier-Stokes untuk Aliran Fluida Tidak Termampatkan. *Jurnal Ilmiah Matematika*, Volume 6, pp. 22-39.

- Fu, Y., Sun, Q., Zhou, C. & Zou, Y., 2017. *A review of TRISO fuel performance models*. Shanghai, Elsevier, pp. 1-6.
- Ge, J., Wang, C., Xiao, Y., Tian, W., Qiu, S., Su, G.H., Zhang, D., 2016. Thermal-Hydraulic Analysis Of a Fluoride-Salt-Cooled-Pebble-bed Reactor With CFD Methodology. *Progress in Nuclear Energy*, Volume 3, pp. 83-96.
- Hu, G., O'Grady, Zou, L. & Hu, R., 2020. Development of a Reference Model for Molten-Salt-Cooled Pebble-Bed Reactor Using SAM. *Nuclear Science and Engineering Division*, Volume 2. No.31, pp. 6-4
- IAEA, 2015. *Nuclear forensics in support of investigations*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Jacson, J., 2013. Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 10, pp. 17-21.
- Liu, L., Zhang, D., Lu, Q., Wang, K., Qiu, S., 2016. Preliminary neutronic and thermal-hydraulic analysis of a 2 MW Thorium-based Molten Salt Reactor with Solid Fuel. *Progress In Nuclear Energy*, Volume 86, pp. 1-10.
- Liu, Y., Li, W., Yan, R., Zou, Y., Yu, S., Zhou, B., Cai, X., 2020. Effect of FLiBe thermal neutron scattering on reactivity of molten salt reactor. *Web Konferensi EPJ239*, Volume 23, pp. 1-3.
- Novalinda, S., Ariani, M., Monado, F. & Su'ud, Z., 2018. Neutronic Design Of Plutonium Uranium Fuel-Based Gas - Cooled Fast Reactor. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, Volume 14. No.2, pp. 92-92.
- Pavlidis, D. & Lathouwers, D., 2013. Fluid flow and heat transfer investigation of pebble bed reactors using mesh-adaptive LES. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 6, pp. 161-167.
- Pertamina, 2020. *Pertamina Energy Outlook 2020*. 2nd ed. Jakarta: Pertamina Energy Institute.

- Santoso, B. & Darmawan, D. A., 2017. Analisis Dinamika Fluida Pada Modifikasi Reaktor Gasifikasi Tipe Updraft. *Seminar Nasional AVoER IX 2017*, Volume 4. No.9, pp. 1-9.
- Setyono, A. E. & Kiono, B. F. T., 2021. Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, Volume 2, pp. 154-162.
- Shafii, M. A., 2015. Perhitungan Penampang Lintang Mikroskopik dalam Sel *Pebble bed*. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Volume 16 .No.1, pp. 23-27.
- Srigutomo, W. & Hapsoro, C. A., 2013. Pemodelan Aliran Fluida 2-D Pada Kasus Aliran Permukaan Menggunakan Metode *Beda Hingga*. *Jurnal Matematika & Sains*, Volume 18, pp. 81-91.
- Susanto, F. & Basuki, I., 2019. Aliran Fluida Laminer Pada Pipa Non Horizontal. *Journal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering (JEECAE)*, Volume 4. No.2, pp. 301 - 303.
- Susiati, H. & Widiawaty, M. A., 2023. *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia (Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission)*. Malang: Unisma Press.
- Taylor, J. B., Yavuzkur, D. S. & Baratta, D. A. J., 2002. Modeling of the Fluid Flow and Heat Transfer an a *Pebble bed* Modular Reactor Core With a Computational Fluid Dynamics Code. *Nuclear Engineering*, Volume 3. No.6, pp. 2-6.
- Wadjdi, A. F., Permana, S. & Misrianto, E., 2021. Tinjauan Sistematis:Reaktor Garam Cair Thorium 2016-2020. *Penelitian Ilmiah & Teknologi*, Volume 5, pp. 137-141.
- Wu, H. Gui, N. Yang, X. Tu, J. Jiang, S, 2020. Parameter analisis and wall effect of radiative heat transfer for CFD-DEM simulation in nuclear packed *pebble bed*. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, Volume 5. No.2, pp. 20-28.

- Xiong, Y. Liang, G. Nan, G. Xingtuan, Y. Jiyuan, T. Shengyao, J., 2017. Effect of *pebble* size and *bed* dimension on the distribution of voidages in *pebble* on the distribution of voidages in *pebble*. *Special Issue on Simulation and Modelling in Nuclear Engineering*, Volume 2, pp. 99-109.
- Yamoah, M., Akaho, E., Ayensu, N. G. & A samoah, M., 2012. Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer Model for the *Pebble bed* High Temperature Gas Cooled Reactor. *Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Volume 4, pp. 1659 - 1663.
- Yusibani, E., Nisa, H. & Rajibussalim, 2021. Simulasi Pengaruh Radius Channel Garam dan Temperatur Terhadap Distribusi Temperatur Pada Teras Molten Salt Breeder Reactor. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Volume 23.No.2, pp. 81-88.
- Yao, y otros, 2014. *Thermal Hydraulic Studies of a Fluoride Salt Cooled High Temperature Test Reactor with Different CFD Methods*. Prague, Czech Republic, ICONE22.
- Zohuri, B. & Patrick, M., 2015. *Thermodynamics In Nuclear Power Plant Systems*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Zou, L., Hu, G., O'Grady, D. & Hu, R., 2022. Explicit Modeling of *Pebble* Temperature in the Porous-Media Model for *Pebble-Bed* Reactors. *Science Direct*, Volume 146.No.27, pp. 1-32.