

**STUDI KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PENDINGIN PADA TERAS  
REAKTOR *SMALL MODULAR REACTOR* (SMR) MENGGUNAKAN  
*COMSOL MULTIPHYSICS***

**(Skripsi)**

**Oleh**

**Nuraini  
2017041034**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2025**

**STUDI KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PENDINGIN PADA TERAS  
REAKTOR *SMALL MODULAR REACTOR* (SMR) MENGGUNAKAN  
*COMSOL MULTIPHYSICS***

**Oleh**

**Nuraini  
2017041034**

**Skripsi**

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

**Pada**

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



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2025**

## ABSTRAK

### STUDI KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PENDINGIN PADA TERAS REAKTOR *SMALL MODULAR REACTOR* (SMR) MENGGUNAKAN COMSOL *MULTIPHYSICS*

Oleh

NURAINI

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan *inlet* dan fluks panas terhadap karakteristik aliran fluida dalam teras reaktor *Small Modular Reactor* (SMR) menggunakan COMSOL *Multiphysics*. Penelitian ini difokuskan pada distribusi suhu, tekanan, dan kecepatan fluida pendingin untuk kondisi operasi normal. Metode yang digunakan adalah simulasi berbasis metode elemen hingga, dengan validasi model dilakukan melalui *benchmarking* terhadap hasil penelitian sebelumnya untuk memastikan keakuratan hasil simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan *inlet* menghasilkan distribusi suhu yang lebih homogen dan perpindahan panas yang lebih efektif, tetapi juga meningkatkan penurunan tekanan (*pressure drop*) dalam sistem. Pada kecepatan *inlet* yang lebih tinggi, distribusi aliran fluida cenderung lebih merata, dengan efek viskositas yang signifikan pada dinding saluran. Sementara itu, fluks panas yang lebih tinggi meningkatkan suhu maksimum di sekitar bahan bakar, yang memerlukan penyesuaian parameter operasi untuk menjaga keamanan termal. Simulasi menunjukkan bahwa suhu keluaran maksimum berada dalam rentang operasi normal untuk reaktor tipe air bertekanan (PWR), tetapi memerlukan perhatian khusus terhadap material sistem pendingin. Penelitian ini memberikan wawasan penting dalam optimasi desain sistem pendingin reaktor SMR. Dengan hasil ini, strategi operasional dan desain yang lebih efektif dapat dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan reaktor. Hasil ini juga menjadi acuan untuk pengembangan teknologi SMR, yang relevan dengan kebutuhan energi bersih dan berkelanjutan.

**Kata kunci:** COMSOL *Multiphysics*, fluks panas, karakteristik aliran fluida, kecepatan *inlet*, *Small Modular Reactor*

## **ABSTRACT**

### **STUDY OF COOLING FLUID FLOW CHARACTERISTICS AT THE SMALL MODULAR REACTOR (SMR) TERRACE USING COMSOL MULTIPHYSICS**

**By**

**NURAINI**

*This study aims to analyse the effect of inlet velocity variation and heat flux on fluid flow characteristics in the Small Modular Reactor (SMR) reactor core using COMSOL Multiphysics. This research is focused on the distribution of temperature, pressure, and cooling fluid velocity for normal operating conditions. The method was finite element method-based simulation, with model validation performed through benchmarking compare to previous research results to ensure the accuracy of the simulation results. The simulation results show that increasing the inlet velocity results in a more homogeneous temperature distribution and more effective heat transfer, but also increases the pressure drop in the system. At higher inlet velocities, the fluid flow distribution tends to be more even, with significant viscosity effects at the channel walls. Meanwhile, higher heat flux increases the maximum temperature around the fuel, which requires adjustment of operating parameters to maintain thermal safety. Simulations show that the maximum output temperature is within the normal operating range for a pressurised water-type reactor (PWR), but requires special attention to the cooling system materials. This research provides important insights into the design optimisation of SMR reactor cooling systems. With these results, more effective operational and design strategies can be developed to improve reactor efficiency and safety. These results also serve as a reference for the development of SMR technology, which is relevant to the need for clean and sustainable energy.*

**Keywords:** *COMSOL Multiphysics, fluid flow characteristics, heat flux, inlet velocity, Small Modular Reactor*

Judul Skripsi : Studi Karakteristik Aliran Fluida Pendingin  
Pada Teras Reaktor *Small Modular Reactor*  
(SMR) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*

Nama Mahasiswa : Nuraini

Nomor Pokok Mahasiswa : 2017041034

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Bandar Lampung, 31 Januari 2025



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

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

Pembimbing II

**Dr. Duwi Hariyanto, S.Si., M.Si**  
NIP. 1994070820201267

2. Ketua Jurusan Fisika

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

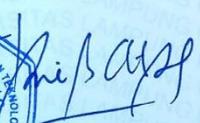
Ketua : Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si

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

Penguji Bukan Pembimbing : Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

  
Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si  
NIP. 197310012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 31 Januari 2025

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam skripsi tidak terdapat karya yang sama persis dengan yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 31 Januari 2025



Nuraini  
NPM. 2017041034

## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Deli Serdang, Sumatera Utara pada tanggal 16 Januari 2002 sebagai anak pertama dari empat bersaudara, dari Bapak Anhar dan Ibu Fauziah. Pendidikan yang sudah ditempuh oleh penulis diantaranya, menyelesaikan pendidikan dasar di TK Paud Camar Rugemuk pada tahun 2008, SDN 104256 Rugemuk pada tahun 2014, SMPN 1 Pantai Labu pada tahun 2017, dan SMAN 1 Pantai Labu pada tahun 2020. Untuk jenjang selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada tahun 2020.

Selama menempuh pendidikan, penulis menyelesaikan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di PT. Bukit Asam Pengusahaan Briket Unit Lampung di Natar, Lampung Selatan, dengan judul “Perbandingan Efisiensi Pembakaran Bahan Bakar Batubara dan Briket Batubara Pada Penggunaan Industri”. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi sebagai Anggota Bidang Sains dan Teknologi HIMAFI 2021, Anggota Biro Kesekretariatan Rumah Tangga Rois FMIPA Unila 2021, staff ahli Bidang Hubungan Luar BEM FMIPA Unila 2021, Staff Departemen Kesekretariatan Masjid Birohmah Unila serta anggota divisi elektronika di Tim Minat Bakat Robotik FMIPA UNILA pada tahun 2022. Penulis juga sebagai asisten praktikum mata kuliah fisika dasar II pada tahun 2023. Selain itu, penulis pernah menjadi tutor KOPJAR (Kelompok Belajar) pada tahun 2021.

Penulis juga mengikuti program Kampus Merdeka Kemdikbudristek yaitu Pertukaran Mahasiswa Merdeka batch 2 di Universitas Negeri Gorontalo pada tahun 2022, Studi Independen di PT Cadfem Simulation Technology Indonesia

dengan *Learning Track Engineering Simulation Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada tahun 2023, dan mengikuti kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) riset penelitian “Implementasi Energi Listrik Sel Galvanis Air Laut dengan Elektroda Tembaga Dilapisi Perak dan Zinc Yang dapat Diregenerasi Sebagai Sumber Energi Terbarukan” pada tahun 2023 di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung

## MOTTO

*“... And do not lose hope in the mercy of Allah. Indeed, no one despairs of relief from Allah except the disbelieving peopler”*

(QS.12:87)

*“You can't win if you don't fight”*

(Levi Ackerman)

“Ketika Allah mengambil sesuatu dari genggamannya, Dia tidak menghukummu. Dia hanya membuka tangannya untuk menerima sesuatu yang lebih baik”

(Ibnu Qayyim Al-Jauziyah)

*“If you can't fly then run, if you can't run then walk, if you can't walk then crawl, but whatever you do you have to keep moving forward”*

(Martin Luther King Jr.)

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT. Tuhan Yang Maha Kuasa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ **Studi Karakteristik Aliran Fluida Pendingin Pada Teras Reaktor *Small Modular Reactor* (SMR) Menggunakan COMSOL *Multiphysics***”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Skripsi ini merupakan sebuah karya yang saya tulis sejak Agustus 2024 dan diselesaikan pada Januari 2025. Skripsi ini adalah saksi bisu atas perjuangan yang berdarah-darah. Sebagai anak perempuan pertama, yang bahunya harus selalu sekuat baja, hatinya harus setegar karang, telinganya harus siap mendengar, kedua tangan harus siap menopang, sayapnya yang “patah sebelah” namun harus tetap kuat dan terbang, kesabarannya yang harus seluas samudera, “berdikari” seperti burung elang dan mempertaruhkan dirinya agar dimenangkan. Tentang sebuah “kemenangan” yang ingin dicapai dengan jalan yang abstrak untuk “dua orang” yang menjadi kekuatan dan alasan masih bertahan hingga sejauh ini.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih terdapat kesalahan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat saya harapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi sumbangsih bagi ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 31 Januari 2025  
Penulis

Nuraini

## PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, karya ini kupersembahkan kepada:

### **Kedua orangtuaku**

Ayah Anhar dan Mama Fauziah

Yang telah memberikan dukungan moril maupun materi serta doa yang tiada henti untuk kesuksesan puterinya.

## SANWACANA

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ **Studi Karakteristik Aliran Fluida Pendingin Teras Reaktor *Small Modular Reactor* (SMR) Menggunakan COMSOL *Multiphysics***” telah diselesaikan. Tidak lupa shalawat dan salam yang senantiasa dicurahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW yang menjadi suri tauladan kepada seluruh umatnya.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini, yaitu:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing I yang selalu memberikan bimbingan, motivasi, kritik serta saran dalam proses penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Dr. Duwi Hariyanto, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan ilmu dan bimbingannya dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si., selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran hingga masukan kepada penulis selama proses penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama masa perkuliahan.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si.,M.Si.,M.Eng., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.

7. Bapak/Ibu Dosen Jurusan Fisika atas segala ilmu yang telah diberikan selama penulis menjadi mahasiswa Universitas Lampung.
8. Para staf dan karyawan Jurusan Fisika yang telah membantu penulis memenuhi kebutuhan administrasi dan lainnya selama menjalani perkuliahan di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
9. Kedua orangtua, kakek, adik-adikku, dan seluruh keluargaku yang senantiasa memberikan semangat, dukungan, dan doa serta membantu dalam segala hal yang tak terhitung nilainya.
10. Untuk Akmal Gilang Rosadi, S.Kom terima kasih telah menemani penulis dari awal perkuliahan hingga saat ini, serta selalu mendukung dan selalu ada disaat duka maupun suka.
11. *Last but not least. I wanna thank me. I wanna thank me for believing in me. I wanna thank me for doing all this hard work. I wanna thank me for having no days off. I wanna thank me for never quitting.*

Proses dalam penyusunan skripsi ini tentunya terdapat banyak kekurangan dikarenakan keterbatasan pengetahuan serta pengalaman. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat dan keberkahan bagi perkembangan ilmu pengetahuan terutama bagi seluruh civitas jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 31 Januari 2025  
Penulis

Nuraini  
NPM. 2017041034

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>i</b>
<b>MENGESAHKAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	Error! Bookmark not defined.
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>vi</b>
<b>MOTTO</b> .....	<b>viii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>x</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>2</b>
1.1 Latar Belakang .....	2
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
2.1 Penelitian Terkait .....	7
2.2 <i>Small Modular Reactor</i> .....	7
2.3 <i>Pressurized Water Reactor</i> .....	14
2.4 Perpindahan Panas dan Aliran Fluida .....	17
2.5 <i>COMSOL Multiphysics</i> .....	21
<b>III. METODE PENELITIAN</b> .....	<b>24</b>
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	24

3.2 Alat Penelitian.....	24
3.3 Prosedur Penelitian.....	25
3.3.1 Studi Literatur .....	25
3.3.2 Pembuatan Model Geometri .....	25
3.3.3 Pengaturan Parameter dan Persamaan Numerik .....	26
3.3.4 Pembuatan <i>Mesh</i> .....	27
3.3.5 Perhitungan .....	28
3.3.6 Hasil.....	28
3.3.7 Simulasi <i>Benchmarking</i> .....	29
3.4 Diagram Alir .....	30
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>29</b>
4.1 Validasi Model dengan <i>Benchmarking</i> .....	29
4.2 Variasi Kecepatan .....	36
4.3 Variasi Fluks Panas .....	46
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>47</b>
5.1 Simpulan .....	47
5.2 Saran.....	47
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>50</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>54</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Representasi dari Reaktor Modular Kecil .....	12
<b>Gambar 2.2</b> Pemodelan Pada Reaktor SMR Sub Buluh Susunan Segi Enam .....	14
<b>Gambar 2.3</b> Tata Letak Wadah Reaktor IP-200 .....	15
<b>Gambar 2.4</b> Skema Reaktor PWR .....	16
<b>Gambar 2.5</b> COMSOL <i>Multiphysics</i> .....	22
<b>Gambar 3.1</b> Teras Reaktor dilihat dari Sumbu z .....	25
<b>Gambar 3.2</b> Teras Reaktor dilihat dari Sumbu x .....	26
<b>Gambar 3.3</b> Meshing .....	28
<b>Gambar 3.2</b> <i>Diagram Alir</i> .....	30
<b>Gambar 4.1</b> Model Simulasi Anwar <i>et al.</i> , (2013) .....	31
<b>Gambar 4.2</b> Model Simulasi <i>Benchmark</i> .....	31
<b>Gambar 4.3</b> Grafik Temperatur Air Variasi Fluks Panas di Sub Buluh pada Perpindahan Panas Konveksi dengan Kecepatan Air Masuk 1 m/s .....	32
<b>Gambar 4.4</b> Grafik Temperatur Variasi Fluks Panas dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 1 m/s .....	32
<b>Gambar 4.5</b> Grafik Temperatur Air Variasi Fluks Panas Di Sub Buluh Pada Perpindahan Panas Konveksi Dengan Kecepatan Air Masuk 5 m/s .....	33
<b>Gambar 4.6</b> Grafik Temperatur Variasi Fluks Panas dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 5 m/s.....	33
<b>Gambar 4.7</b> Konduktivitas Termal Fluida .....	36
<b>Gambar 4.8</b> Densitas Fluida .....	37
<b>Gambar 4.9</b> Viskositas Dinamik Fluida .....	37
<b>Gambar 4.10</b> Kapasitas Panas Fluida .....	38
<b>Gambar 4.11</b> Perbandingan Kecepatan <i>Outlet</i> Berdasarkan Variasi Fluks Panas dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 2 m/s .....	39
<b>Gambar 4.12</b> Perbandingan Kecepatan <i>Outlet</i> Berdasarkan Variasi Fluks Panas dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 4 m/s .....	39

<b>Gambar 4.13</b> Perbandingan Kecepatan <i>Outlet</i> Berdasarkan Variasi Fluks Panas dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 6 m/s .....	40
<b>Gambar 4.14</b> Perbandingan Kecepatan <i>Outlet</i> Berdasarkan Variasi Fluks Panas dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 8 m/s .....	40
<b>Gambar 4.15</b> Kontur Aliran Fluida .....	41
<b>Gambar 4.16</b> Perbandingan Tekanan dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 2 m/s Berdasarkan Variasi Fluks Panas .....	42
<b>Gambar 4.17</b> Perbandingan Tekanan dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 4 m/s Berdasarkan Variasi Fluks Panas .....	43
<b>Gambar 4.18</b> Perbandingan Tekanan dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 6 m/s Berdasarkan Variasi Fluks Panas .....	43
<b>Gambar 4.19</b> Perbandingan Tekanan dengan Kecepatan <i>Inlet</i> 8 m/s Berdasarkan Variasi Fluks Panas .....	44
<b>Gambar 4.20</b> Kontur Tekanan Aliran Fluida.....	44
<b>Gambar 4.21</b> Grafik Temperatur Fluks Panas pada Kecepatan <i>Inlet</i> 2 m/s .....	46
<b>Gambar 4.22</b> Grafik Temperatur Fluks Panas pada Kecepatan <i>Inlet</i> 4 m/s .....	46
<b>Gambar 4.23</b> Grafik Temperatur Fluks Panas pada Kecepatan <i>Inlet</i> 6 m/s .....	47
<b>Gambar 4.24</b> Grafik Temperatur Fluks Panas pada Kecepatan <i>Inlet</i> 8 m/s .....	47

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Parameter Utama Reaktor .....	15
<b>Tabel 3.1</b> Jadwal Pelaksanaan Penelitian .....	24
<b>Tabel 3.2</b> Nilai Parameter.....	26
<b>Tabel 3.3</b> Nilai Parameter <i>Benchmarking</i> .....	28

# I. PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi nuklir telah mengalami evolusi signifikan dalam beberapa dekade terakhir, dengan fokus yang semakin besar pada inovasi desain reaktor yang lebih aman, efisien, dan fleksibel. Salah satu inovasi yang menjanjikan dalam industri nuklir adalah pengembangan *Small Modular Reactor* (SMR). SMR merupakan reaktor nuklir dengan kapasitas lebih kecil, umumnya di bawah 300 MWe, yang dirancang dengan konsep modular untuk memungkinkan fabrikasi di pabrik dan pengiriman ke lokasi pembangunan. Konsep ini menawarkan berbagai keuntungan, termasuk waktu konstruksi yang lebih singkat, biaya modal yang lebih rendah, dan fleksibilitas dalam penempatan dan skalabilitas (Ingersoll, 2016).

Di antara berbagai jenis SMR yang sedang dikembangkan, *Pressurized Water Reactor* (PWR) tetap menjadi salah satu desain yang paling populer dan matang secara teknologi. PWR memanfaatkan pengalaman operasional yang luas dari reaktor PWR skala besar, sambil mengintegrasikan fitur keselamatan pasif dan desain yang lebih kompak (Reyes & Lorenzini, 2010). Salah satu aspek krusial dalam desain dan operasi PWR adalah sistem pendingin reaktor, yang memainkan peran vital dalam menjaga keselamatan dan kinerja reaktor.

Karakteristik aliran fluida pendingin pada teras reaktor SMR memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi termal, keselamatan, dan kinerja keseluruhan reaktor. Pemahaman mendalam tentang perilaku aliran fluida ini sangat penting untuk optimalisasi desain, peningkatan keselamatan, dan efisiensi operasional reaktor (Todreas & Kazimi, 2021). Faktor-faktor seperti distribusi suhu, profil

kecepatan, dan pola aliran dalam teras reaktor secara langsung mempengaruhi perpindahan panas dari bahan bakar ke pendingin, yang pada gilirannya berdampak pada margin keselamatan dan *output* daya reaktor.

Dalam konteks PWR, pendingin primer bersirkulasi pada tekanan tinggi untuk mencegah pendidihan massal. Pendingin ini mengalir melalui teras reaktor, mengambil panas dari elemen bahan bakar, dan mentransfernya ke generator uap atau penukar panas lainnya. Karakteristik aliran pendingin ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk geometri teras, konfigurasi bahan bakar, kondisi *inlet*, dan properti termodinamika fluida.

Salah satu aspek penting yang memerlukan investigasi mendalam adalah pengaruh kecepatan *inlet* terhadap karakteristik aliran fluida pendingin. Kondisi *inlet*, seperti kecepatan aliran, suhu, dan distribusi aliran, dapat memiliki dampak signifikan pada pola aliran dalam teras reaktor, distribusi suhu, dan efisiensi perpindahan panas. Pemahaman tentang bagaimana kecepatan *inlet* ini mempengaruhi dinamika aliran fluida sangat penting untuk optimalisasi desain sistem pendingin dan strategi operasional reaktor.

Selain itu, jenis dan konfigurasi bahan bakar juga memainkan peran krusial dalam karakteristik aliran fluida pendingin. Berbagai jenis bahan bakar nuklir, seperti  $\text{UO}_2$  atau bahan bakar berbasis thorium, memiliki karakteristik termal dan nuklir yang berbeda, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi distribusi panas dan dinamika aliran dalam teras reaktor. Analisis tentang bagaimana pengaruh panas bahan bakar ini mempengaruhi aliran pendingin sangat penting untuk pengembangan desain SMR yang optimal dan strategi manajemen bahan bakar yang efektif.

Kompleksitas fenomena yang terjadi dalam teras reaktor SMR, yang melibatkan interaksi antara neutronik, termal-hidrolik, dan mekanika struktur, membuat analisis eksperimental menjadi sangat menantang dan mahal. Oleh karena itu, penggunaan metode komputasional seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah menjadi alat yang sangat berharga dalam analisis dan desain reaktor nuklir. Di antara berbagai perangkat lunak CFD yang tersedia, COMSOL *Multiphysics*

muncul sebagai alat yang *powerful* dan fleksibel untuk simulasi fenomena multifisika yang kompleks dalam reaktor nuklir.

COMSOL *Multiphysics* menawarkan kemampuan untuk mengintegrasikan berbagai fenomena fisika, termasuk aliran fluida, perpindahan panas, dan reaksi nuklir, dalam satu model simulasi. Fitur ini sangat relevan untuk analisis komprehensif karakteristik aliran fluida pendingin dalam teras SMR, di mana interaksi antara berbagai fenomena fisika sangat signifikan. Dengan menggunakan COMSOL *Multiphysics*, peneliti dapat melakukan studi parametrik yang ekstensif, menganalisis skenario "*what-if*", dan mengoptimalkan desain dengan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode eksperimental tradisional.

Penelitian tentang karakteristik aliran fluida pendingin pada teras reaktor SMR menggunakan COMSOL *Multiphysics* memiliki potensi untuk memberikan kontribusi signifikan dalam beberapa aspek. Pertama, studi ini dapat meningkatkan pemahaman kita tentang dinamika aliran dalam geometri teras yang kompak, yang khas untuk SMR. Informasi ini sangat berharga untuk pengembangan desain teras yang lebih efisien dan aman. Kedua, analisis pengaruh kecepatan *inlet* dapat memberikan wawasan penting untuk optimalisasi sistem pendingin dan strategi operasional reaktor, yang dapat meningkatkan kinerja dan keselamatan SMR. Ketiga, investigasi tentang pengaruh panas bahan bakar terhadap karakteristik aliran dapat membantu dalam pengembangan strategi manajemen bahan bakar yang lebih efektif dan desain teras yang lebih fleksibel.

Lebih lanjut, hasil dari penelitian ini dapat memiliki implikasi yang lebih luas dalam konteks pengembangan teknologi SMR secara keseluruhan. Dengan meningkatnya minat global terhadap SMR sebagai solusi potensial untuk kebutuhan energi masa depan, pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik aliran fluida pendingin dapat berkontribusi pada peningkatan desain, keselamatan, dan efisiensi reaktor. Hal ini pada gilirannya dapat mempercepat adopsi teknologi SMR dan mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Mengingat kompleksitas dan signifikansi topik ini, penelitian skripsi tentang "Studi Karakteristik Aliran Fluida Pendingin Pada Teras Reaktor *Small Modular Reactor*

(SMR) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*" dengan fokus pada analisis pengaruh kecepatan *inlet* dan panas bahan bakar terhadap karakteristik aliran fluida pada reaktor PWR, memiliki potensi untuk memberikan kontribusi yang berharga dalam pengembangan teknologi SMR. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memperkaya pemahaman kita tentang dinamika aliran dalam teras SMR, mendukung optimalisasi desain reaktor, dan pada akhirnya berkontribusi pada pengembangan teknologi nuklir yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dengan latar belakang di atas, masalah penelitian ini dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan *inlet* terhadap karakteristik aliran fluida, seperti distribusi kecepatan, profil tekanan, dan distribusi temperatur pada kondisi operasi normal pada teras reaktor SMR menggunakan COMSOL *Multiphysics*?
2. Bagaimana pengaruh variasi panas bahan bakar terhadap karakteristik aliran fluida pada teras reaktor SMR?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berikut ini adalah tujuan dari penelitian ini.

1. Menganalisis pengaruh variasi kecepatan *inlet* terhadap karakteristik aliran fluida, seperti distribusi kecepatan, profil tekanan, dan distribusi temperatur pada teras reaktor SMR dalam kondisi operasi normal menggunakan simulasi COMSOL *Multiphysics*.
2. Menganalisis pengaruh variasi panas bahan bakar terhadap karakteristik aliran fluida pada teras reaktor SMR.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan yang terkait dengan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian difokuskan pada karakteristik aliran fluida pendingin di dalam teras reaktor SMR.
2. Model reaktor yang digunakan adalah tipe SMR generik, bukan desain spesifik dari produsen tertentu.

3. Simulasi dilakukan menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics* dengan modul *heat transfer* dan *turbulent flow*.
4. Parameter yang dikaji terbatas pada distribusi kecepatan, tekanan, dan suhu fluida pendingin.
5. Kondisi operasi reaktor diasumsikan dalam keadaan tunak (*steady state*).
6. Efek radiasi dan reaksi nuklir tidak dimodelkan secara rinci dalam simulasi.
7. Geometri teras reaktor disederhanakan untuk memungkinkan simulasi yang efisien.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Berikut adalah manfaat dari penelitian ini.

1. Memberikan pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik aliran fluida pendingin dalam teras reaktor SMR.
2. Membantu dalam optimalisasi desain sistem pendingin reaktor SMR untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan.
3. Menyediakan data referensi untuk perbandingan dengan hasil eksperimen atau simulasi lainnya.
4. Berkontribusi pada pengembangan metodologi simulasi numerik untuk analisis termal-hidrolik reaktor nuklir.
5. Mendukung upaya penelitian dan pengembangan teknologi SMR di Indonesia.
6. Meningkatkan kemampuan dalam penggunaan *software* COMSOL *Multiphysics* untuk aplikasi di bidang nuklir.
7. Menjadi dasar untuk penelitian lanjutan terkait aspek keselamatan dan kinerja reaktor SMR.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terkait

Untuk mendukung penelitian tugas akhir ini, perlu dilakukan penelitian literatur. Ini akan membantu peneliti menemukan landasan teori dan referensi yang relevan dengan penelitian. Teori dan referensi diambil dari buku, jurnal, kertas, dan sumber lainnya yang berkaitan dengan penelitian karakteristik aliran fluida pada teras reaktor SMR menggunakan COMSOL *Multiphysics*. Selain itu, semua sumber yang mendukung penelitian juga digunakan.

Tujuan penelitian ini, "Simulasi Karakteristik Aliran dan Suhu Fluida Pendingin ( $H_2O$ ) pada Teras Reaktor Nuklir SMR (*Small Modular Reactor*)", adalah untuk mengetahui profil aliran fluida dan pola distribusi suhu fluida pendingin, atau air, dalam reaktor *Small Modular Reactor* (SMR) dengan susunan bahan bakar berbentuk heksagonal seperti pada **Gambar 2.2**. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memprediksi kondisi operasi reaktor, baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi kecelakaan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CFD seperti GAMBIT dan FLUENT pada teras reaktor SMR untuk mensimulasikan aliran dan suhu fluida pendingin. Penelitian ini menemukan bahwa semakin tinggi aliran fluida, semakin tinggi pula suhunya; semakin jauh dari permukaan pemanas, suhu fluida akan lebih rendah karena panas berpindah dari suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah. Semakin banyak fluks panas yang diberikan ke dinding pemanas, semakin tinggi pula suhu fluida dan dinding pemanas. (Anwar *et al.*, 2013).

## 2.2 *Small Modular Reactor*

Reaktor nuklir *Small Modular Reactor* (SMR) merupakan inovasi dalam teknologi nuklir yang menawarkan berbagai potensi manfaat. Dari segi ekonomi, SMR dapat mengatasi kendala biaya tinggi dan keterlambatan konstruksi yang umumnya terjadi pada pembangunan reaktor nuklir konvensional berukuran besar. Teknologi ini juga menawarkan solusi untuk pengelolaan limbah nuklir melalui kemampuannya mengolah kembali bahan bakar bekas. Dalam aspek keamanan, desain SMR modern dilengkapi dengan fitur keselamatan yang melekat dan sistem pengaman pasif, sehingga dapat meminimalkan risiko kecelakaan. Dari perspektif lingkungan, SMR berpotensi berkontribusi dalam upaya mengatasi perubahan iklim karena menghasilkan listrik dengan emisi karbon yang rendah. Sementara dari sisi sosial, teknologi ini dapat membantu mewujudkan pemerataan akses energi, terutama bagi masyarakat di daerah terpencil atau komunitas dengan keterbatasan sumber daya. Beberapa varian SMR bahkan mampu menyediakan layanan tambahan seperti desalinasi air laut. Ditambah dengan fitur *breeding* (pemiakan) yang dimiliki beberapa tipe SMR, teknologi ini dapat menjamin keberlanjutan pasokan bahan bakar nuklir. Dengan berbagai potensi manfaat tersebut, SMR dapat mendukung tiga pilar pembangunan berkelanjutan: ekonomi, lingkungan, dan sosial.

*Small Modular Reactor* (SMR) merupakan inovasi terkini dalam teknologi reaktor nuklir yang menawarkan solusi menjanjikan untuk kebutuhan energi masa depan. SMR dirancang dengan kapasitas lebih kecil dibandingkan reaktor nuklir konvensional, umumnya menghasilkan daya listrik kurang dari 300 MWe per modul. Konsep ini menggabungkan berbagai keunggulan seperti modularitas, skalabilitas, keselamatan pasif, fleksibilitas penempatan, dan berbagai manfaat lainnya yang menjadikan SMR sebagai opsi menarik dalam pengembangan energi nuklir.

### 1. Modularitas

Salah satu karakteristik utama SMR adalah modularitasnya. Konsep ini mengacu pada desain reaktor yang terdiri dari modul-modul terpisah yang dapat diproduksi

secara massal di fasilitas manufaktur terpusat, kemudian dikirim dan dirakit di lokasi pembangkit. Modularitas memiliki beberapa keuntungan, antara lain:

- a. Standarisasi: Produksi massal modul-modul reaktor memungkinkan standarisasi yang lebih baik, meningkatkan kualitas dan konsistensi komponen.
- b. Pengurangan biaya: Produksi skala besar dapat menurunkan biaya per unit melalui ekonomi skala dan pembelajaran.
- c. Waktu konstruksi lebih singkat: Perakitan modul di lokasi dapat mengurangi waktu konstruksi secara signifikan dibandingkan dengan pembangunan reaktor konvensional.
- d. Fleksibilitas dalam kapasitas: Operator dapat menambah atau mengurangi modul sesuai kebutuhan, memberikan fleksibilitas dalam manajemen kapasitas pembangkit.

Menurut laporan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA), modularitas SMR dapat mengurangi waktu konstruksi hingga 50% dibandingkan dengan reaktor konvensional skala besar (IAEA, 2018).

## 2. Skalabilitas

Skalabilitas SMR mengacu pada kemampuan untuk menyesuaikan kapasitas pembangkit dengan menambah atau mengurangi jumlah modul reaktor. Ini memberikan fleksibilitas yang signifikan dalam perencanaan dan pengembangan proyek nuklir. Keunggulan skalabilitas meliputi beberapa aspek berikut.

- a. Penyesuaian dengan permintaan: Operator dapat menyesuaikan kapasitas pembangkit dengan pertumbuhan permintaan energi secara bertahap.
- b. Pengurangan risiko finansial: Investasi awal yang lebih rendah dan kemampuan untuk menambah kapasitas secara bertahap mengurangi risiko finansial proyek.
- c. Integrasi dengan sumber energi terbarukan: Skalabilitas memungkinkan SMR untuk lebih mudah diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan yang bersifat intermiten.
- d. Optimalisasi jaringan listrik: Kemampuan untuk menyesuaikan *output* dengan kebutuhan jaringan meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan secara keseluruhan.

Menurut penelitian oleh *Oak Ridge National Laboratory* menunjukkan bahwa skalabilitas SMR dapat mengurangi biaya modal awal hingga 40% dibandingkan dengan pembangkit nuklir konvensional (Ingersoll *et al.*, 2014).

### 3. Keselamatan Pasif

Keselamatan pasif merupakan fitur kunci dalam desain SMR. Sistem ini mengandalkan hukum alam seperti gravitasi, konveksi alami, dan perbedaan tekanan untuk menjalankan fungsi keselamatan, tanpa memerlukan intervensi aktif operator atau sistem elektrikal. Komponen keselamatan pasif SMR meliputi:

- a. Sistem pendinginan pasif: Menggunakan sirkulasi alami untuk menghilangkan panas sisa tanpa memerlukan pompa atau daya listrik.
- b. Desain tahan gempa: Struktur kompak dan bawah tanah meningkatkan ketahanan terhadap gempa bumi.
- c. Sistem shutdown otomatis: Mekanisme yang secara otomatis menghentikan reaksi nuklir dalam kondisi abnormal.
- d. Containment pasif: Desain yang mencegah pelepasan zat radioaktif ke lingkungan tanpa memerlukan sistem aktif.

Menurut analisis oleh U.S. *Nuclear Regulatory Commission*, fitur keselamatan pasif SMR dapat mengurangi probabilitas kecelakaan parah hingga 1000 kali lipat dibandingkan dengan reaktor generasi II (U.S. NRC, 2020).

### 4. Fleksibilitas Penempatan

SMR menawarkan fleksibilitas yang lebih besar dalam hal penempatan dibandingkan dengan reaktor konvensional skala besar. Ini membuka peluang untuk menempatkan pembangkit nuklir di lokasi yang sebelumnya tidak memungkinkan. Fleksibilitas penempatan memiliki beberapa kelebihan, antara lain:

- a. Lokasi terpencil: SMR dapat ditempatkan di daerah terpencil atau pulau yang memiliki keterbatasan infrastruktur listrik.
- b. Penggantian pembangkit fosil: SMR dapat menggantikan pembangkit listrik tenaga batubara yang sudah tua, memanfaatkan infrastruktur yang ada.
- c. Aplikasi industri: Dapat ditempatkan dekat dengan fasilitas industri untuk menyediakan listrik dan panas proses.

- d. Desalinasi: SMR dapat diintegrasikan dengan fasilitas desalinasi air laut di daerah kekurangan air tawar.

Studi oleh *World Nuclear Association* menunjukkan bahwa fleksibilitas penempatan SMR dapat memperluas potensi pasar energi nuklir hingga 50% (World Nuclear Association, 2021).

## 5. Keunggulan Tambahan

Selain keempat aspek utama di atas, SMR memiliki beberapa keunggulan tambahan yang membuatnya menarik sebagai solusi energi masa depan:

- a. Efisiensi bahan bakar: Beberapa desain SMR menggunakan bahan bakar dengan pengayaan lebih tinggi dan siklus bahan bakar yang lebih panjang, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar.
- b. Pengurangan limbah nuklir: Desain SMR yang lebih efisien dapat mengurangi volume limbah nuklir yang dihasilkan per unit energi.
- c. Ketahanan proliferasi: Desain terintegrasi dan siklus bahan bakar yang lebih panjang meningkatkan ketahanan terhadap proliferasi nuklir.
- d. Potensi untuk aplikasi non-listrik: SMR dapat digunakan untuk produksi hidrogen, desalinasi air laut, dan aplikasi panas proses industri.
- e. Pengurangan emisi karbon: Sebagai sumber energi rendah karbon, SMR dapat berkontribusi signifikan dalam upaya mitigasi perubahan iklim.
- f. Peningkatan keandalan jaringan: Ukuran yang lebih kecil dan fleksibilitas operasional memungkinkan SMR untuk lebih mudah diintegrasikan ke dalam jaringan listrik dan mendukung stabilitas sistem.

Menurut laporan dari *International Energy Agency* (IEA), penerapan luas SMR dapat mengurangi emisi karbon global sebesar 1,5 gigaton per tahun pada tahun 2050 (IEA, 2019).

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, pengembangan dan penerapan SMR masih menghadapi beberapa tantangan:

- a. Regulasi: Kerangka regulasi yang ada perlu disesuaikan untuk mengakomodasi teknologi SMR yang baru.
- b. Ekonomi: Meskipun biaya modal awal lebih rendah, SMR masih perlu membuktikan keunggulannya ekonominya dalam jangka panjang.

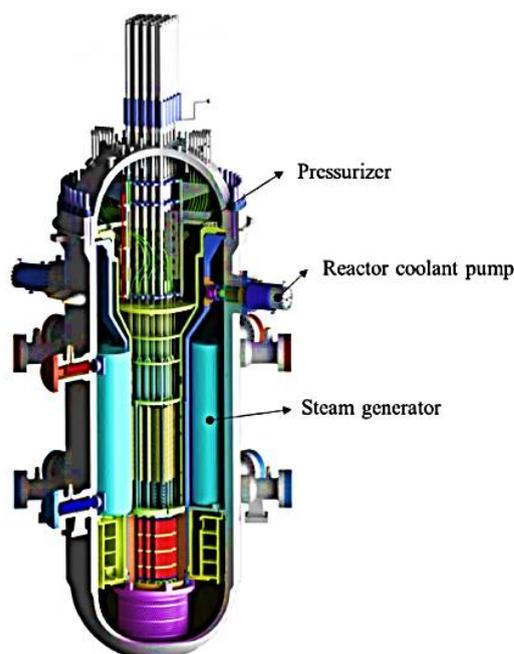
- c. Penerimaan publik: Edukasi dan keterlibatan masyarakat diperlukan untuk meningkatkan penerimaan teknologi nuklir.
- d. Infrastruktur: Pengembangan rantai pasokan dan infrastruktur pendukung untuk teknologi SMR masih diperlukan.

Namun, prospek SMR tetap menjanjikan. Banyak negara dan perusahaan telah berinvestasi dalam pengembangan teknologi ini. Amerika Serikat, Rusia, China, dan beberapa negara lain telah memulai proyek demonstrasi SMR. *International Atomic Energy Agency (IAEA)* memproyeksikan bahwa SMR akan memainkan peran signifikan dalam campuran energi global pada dekade mendatang, dengan potensi kapasitas terpasang mencapai 300 GWe pada tahun 2040 (IAEA, 2021). *Small Modular Reactor (SMR)* menawarkan pendekatan inovatif dalam pengembangan energi nuklir yang dapat mengatasi banyak tantangan yang dihadapi oleh reaktor konvensional skala besar. Modularitas, skalabilitas, keselamatan pasif, dan fleksibilitas penempatan merupakan keunggulan utama yang menjadikan SMR sebagai opsi menarik untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan.

Meskipun masih menghadapi tantangan dalam hal regulasi, ekonomi, dan penerimaan publik, SMR memiliki potensi besar untuk berkontribusi pada transisi energi global menuju sistem yang lebih bersih, aman, dan berkelanjutan. Dengan dukungan berkelanjutan dari pemerintah, industri, dan komunitas penelitian, SMR dapat menjadi komponen penting dalam strategi mitigasi perubahan iklim dan keamanan energi di masa depan.

Fitur paling menonjol dari SMR adalah bahwa semua komponen utama seperti *pressurizer*, generator uap, dan pompa pendingin reaktor dipasang di dalam wadah tekanan reaktor (Ingersoll, 2009) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1** Desain integral dari SMR memungkinkan untuk meningkatkan keselamatan reaktor nuklir dengan menghilangkan kemungkinan terjadinya kecelakaan serius seperti kecelakaan kehilangan pendingin. Untuk memaksimalkan area pertukaran panas dalam ruang yang terbatas, generator uap tipe heliks sekali jalan banyak diadopsi untuk optimasi desain SMR (Lee *et al.*, 2009). Namun, ini memerlukan desain dan

proses pembuatan yang lebih rumit dibandingkan dengan reaktor air bertekanan konvensional dengan tabung tipe U-bending.



**Gambar 2.1** Representasi dari Reaktor Modular Kecil (Ahn *et al.*, 2020)

Gambar diatas menunjukkan bagian dalam reaktor nuklir SMR tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR), yang banyak digunakan dalam pembangkit listrik tenaga nuklir.

1. *Pressurizer*: Ini adalah alat yang memastikan air di dalam reaktor tetap berada di bawah tekanan tinggi. Hal ini penting supaya air tetap dalam bentuk cair meskipun suhunya sangat tinggi, mencegahnya dari mendidih.
2. *Reactor Coolant Pump*: Ini adalah pompa yang berfungsi untuk mengalirkan air pendingin melalui inti reaktor. Air ini menyerap panas dari reaksi nuklir dan kemudian membawa panas tersebut ke *steam generator*. Pompa ini memastikan air terus mengalir dengan baik untuk menjaga reaktor tetap dingin.
3. *Steam Generator*: Bagian ini mengubah air menjadi uap. Air panas dari inti reaktor mengalir melalui pipa-pipa dalam *steam generator*, memanaskan air di sekitarnya hingga berubah menjadi uap. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin yang menghasilkan listrik.

Secara sederhana, gambar ini menunjukkan bagaimana reaktor PWR bekerja air di dalam inti reaktor dijaga tetap dalam kondisi bertekanan tinggi untuk mencegah

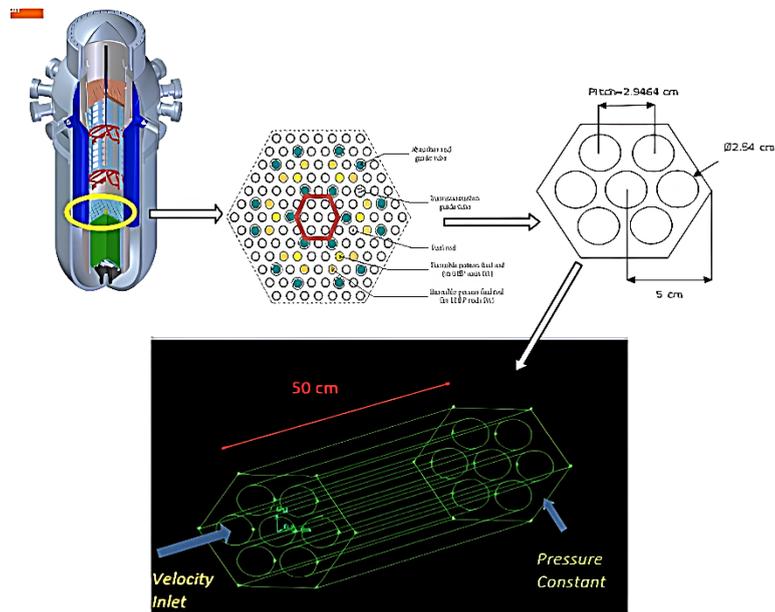
mendidih, sementara panas yang dihasilkan digunakan untuk membuat uap yang akhirnya menghasilkan listrik.

Pada penelitian ini, desain teras SMR yang digunakan berbentuk 3 dimensi dengan sub buluh 7 batang silinder. Pada **Gambar 2.2** merupakan bagian dari presentasi terkait penelitian dalam konteks desain reaktor nuklir jenis reaktor air bertekanan (PWR). Berikut penjelasan mengenai elemen-elemen yang ditampilkan dalam **Gambar 2.2**:

1. Reaktor atau Tabung Utama (Kiri Atas): Bagian ini menunjukkan tabung besar yang merepresentasikan reaktor atau sistem utama. Ada penandaan lingkaran (warna kuning) yang menyoroti lokasi atau bagian tertentu dari sistem, merupakan area kritis untuk analisis aliran atau distribusi panas.
2. Penampang Silang (Tengah): Diagram heksagonal ini menunjukkan pola distribusi elemen di dalam tabung, seperti batang bahan bakar, termokopel, dan elemen lainnya. Pola heksagonal biasanya digunakan dalam desain reaktor untuk efisiensi ruang dan transfer panas. Batang bahan bakar ditandai dalam diagram, serta jarak antar elemen (*pitch*), yaitu 2,9464 cm, yang menunjukkan kerapatan elemen di dalam sistem. Diameter elemen adalah 2,54 cm, dan pengaturan ini penting untuk memastikan keseragaman aliran dan transfer panas.
3. Model Geometri (Kanan Bawah): Bagian ini menggambarkan model geometri 3D dari elemen-elemen tersebut untuk simulasi. Panjang model adalah 50 cm, dengan *inlet* kecepatan (*velocity inlet*) di satu sisi dan tekanan konstan (*pressure constant*) di sisi lainnya. Konfigurasi ini kemungkinan besar digunakan untuk simulasi numerik menggunakan perangkat lunak seperti COMSOL atau CFD lainnya untuk menganalisis aliran fluida dan transfer panas dalam sistem.

Secara keseluruhan, gambar ini memberikan ilustrasi mengenai struktur dan konfigurasi inti reaktor nuklir, terutama pada bagian bahan bakar dan distribusinya. Ini relevan untuk analisis dan penelitian yang bertujuan untuk memahami performa reaktor, efisiensi penggunaan bahan bakar, atau keselamatan operasional. Penelitian lebih lanjut mungkin melibatkan simulasi, eksperimen, atau pengukuran terhadap

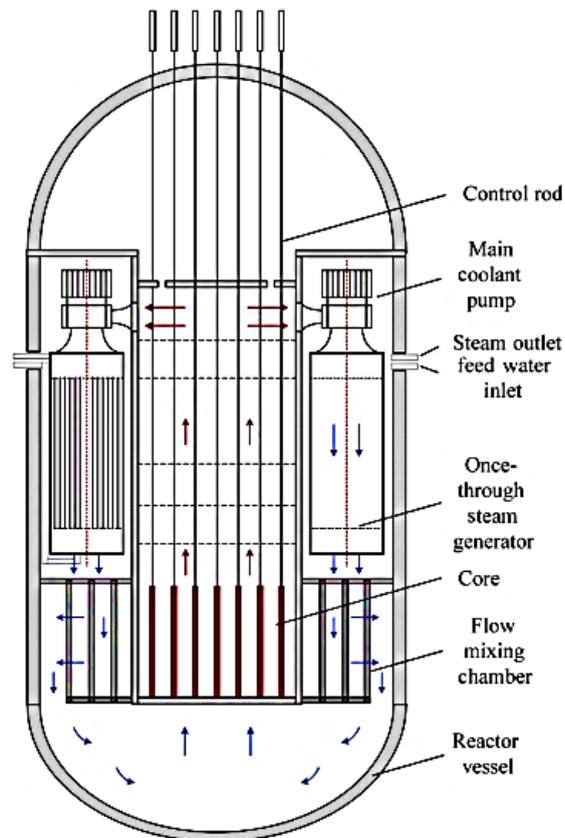
distribusi fluks neutron, distribusi panas, dan parameter lain yang mempengaruhi kinerja reaktor.



**Gambar 2.2** Pemodelan Pada Reaktor SMR Sub Buluh Susunan Segi Enam

### 2.3 Pressurized Water Reactor

Sebuah reaktor air bertekanan kecil yang canggih, Integral PWR-200 (IP200), telah dirancang di Universitas Teknik Harbin (Sun *et al.*, 2017). Penggunaan utamanya adalah untuk menghasilkan listrik di pembangkit listrik tenaga nuklir terapung untuk menyediakan energi bagi kota-kota pesisir dan pulau-pulau terpencil yang jauh dari daratan. Konfigurasi integral diadopsi untuk IP200, yang dapat memanfaatkan struktur yang sederhana, ringan, penghapusan pipa berdiameter besar, dan, dengan demikian, penghapusan kecelakaan kehilangan pendingin besar. Semua komponen, termasuk 12 generator uap sekali jalan (OTSG), empat pompa pendingin utama, dan inti, terletak di dalam wadah reaktor, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. 12 generator uap tersebut ditempatkan secara merata di antara wilayah masuk generator uap dan plenum bawah. 12 generator uap menyerap energi panas 220 MW dalam pendingin. Dengan energi panas, air di dalam tabung OTSG menjadi uap super panas. Parameter utama reaktor tercantum dalam **Tabel 2.1**.



**Gambar 2.3** Tata Letak Wadah Reaktor IP-200.(Sun *et al.*, 2017)

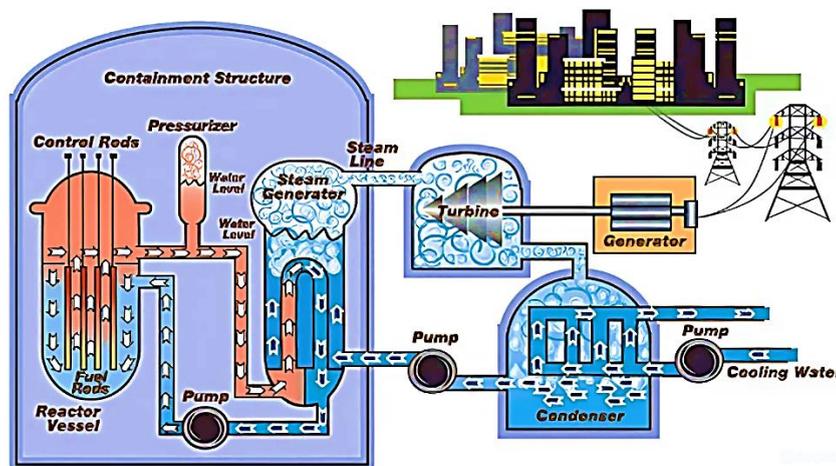
**Tabel 2.1** Parameter Utama Reaktor (Sun *et al.*, 2017)

Tipe Reaktor	IPWR
Energi Termal	220 MW
Tekanan Sirkuit Primer	15,5 Mpa
Tinggi Inti	1,5 m
<i>Cold leg temperature</i>	284,9 °C
<i>Hot leg temperature</i>	323,9 °C
Laju Aliran Massa Pendingin	1000,4 kg/s
Tekanan Uap	3,0 Mpa
Total Laju Aliran Uap	90,0 kg/s

Banyak penelitian telah dilakukan terkait sistem IP200 dalam beberapa tahun terakhir, dengan fokus utama pada analisis sistem, strategi operasi, dan mekanisme sirkulasi alami. Sun *et al.*, (2017) mengusulkan strategi operasi *kelompok Once-Through Steam Generator (OTSG)*, yaitu dalam kondisi daya rendah, beberapa OTSG dimatikan sementara yang lainnya tetap beroperasi. Strategi ini bertujuan untuk mencegah ketidakstabilan aliran. Dalam kondisi tersebut, pendingin yang mengalir melalui OTSG yang beroperasi akan didinginkan oleh air umpan, sedangkan suhu pendingin yang mengalir melalui OTSG yang dimatikan tetap

konstan. Konsekuensinya, saat OTSG dioperasikan secara kelompok, terjadi perbedaan suhu pendingin di saluran keluar masing-masing OTSG. Jika pendingin tidak tercampur secara merata ketika mengalir melalui saluran turun, hal ini dapat menyebabkan distribusi kecepatan aliran dan suhu pendingin yang tidak seragam pada *inlet* inti. Ketidakteraturan ini berpotensi memengaruhi distribusi daya di dalam inti reaktor, yang pada gilirannya dapat memengaruhi keselamatan operasional reaktor secara keseluruhan.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah salah satu teknologi pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari reaksi fisi nuklir untuk menghasilkan listrik. Proses ini melibatkan serangkaian tahapan yang terintegrasi secara sistematis, mulai dari pembangkitan panas di reaktor hingga distribusi listrik ke jaringan. Diagram berikut menggambarkan alur kerja PLTN secara rinci, yang meliputi konversi energi nuklir menjadi energi listrik melalui beberapa komponen utama. Berikut penjelasan setiap tahapan pada diagram tersebut.



**Gambar 2.4** Skema Reaktor PWR (Kelas Teknisi, 2022)

Prinsip kerja PLTN adalah menggunakan reaksi fisi nuklir untuk menghasilkan panas. Panas ini digunakan untuk memanaskan air menjadi uap, yang kemudian memutar turbin untuk menghasilkan listrik. Berikut penjelasan terkait skema reaktor PWR pada **Gambar 2.4**.

- a. *Reactor Vessel* merupakan tempat berlangsungnya reaksi fisi nuklir, di mana bahan bakar (*fuel rods*) memancarkan panas. Panas ini digunakan untuk memanaskan air menjadi uap. *Control Rods* (Batang Kendali) digunakan untuk mengatur reaksi nuklir dengan menyerap neutron. Posisi batang kendali menentukan kecepatan reaksi fisi. *Pressurizer* mengatur tekanan di dalam reaktor agar air tetap dalam fase cair meskipun suhunya sangat tinggi.
- b. *Steam Generator* bekerja sebagai panas dari reaktor dipindahkan ke air dalam steam generator melalui pipa-pipa panas, menghasilkan uap bertekanan tinggi. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin.
- c. *Turbine* menghasilkan uap bertekanan tinggi dari steam generator digunakan untuk memutar turbin. Turbin mengubah energi kinetik dari uap menjadi energi mekanik.
- d. Generator mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik yang kemudian disalurkan ke jaringan listrik (*power grid*) untuk digunakan oleh masyarakat.
- e. *Condenser* memastikan uap yang telah melewati turbin didinginkan dan diubah kembali menjadi air menggunakan air pendingin. Air ini kemudian dikembalikan ke steam generator untuk memulai siklus kembali.
- f. *Cooling System* air pendingin dari lingkungan luar (biasanya dari sungai, laut, atau menara pendingin) digunakan untuk menyerap panas dari uap di kondensor.
- g. *Containment Structure* merupakan lapisan pelindung yang mengelilingi reaktor nuklir untuk mencegah pelepasan radiasi ke lingkungan dalam keadaan darurat.
- h. Jaringan Listrik adalah listrik yang dihasilkan oleh generator disalurkan melalui jaringan listrik untuk memenuhi kebutuhan energi di berbagai lokasi.

## **2.4 Perpindahan Panas dan Aliran Fluida**

Pemahaman yang mendalam tentang aliran fluida dalam teras reaktor nuklir sangat penting untuk desain, operasi, dan keselamatan reaktor. Aliran fluida ini melibatkan beberapa konsep dasar termodinamika dan mekanika fluida yang kompleks.

### 1. Persamaan Konservasi Massa, Momentum, dan Energi

Aliran fluida dalam teras reaktor diatur oleh tiga persamaan konservasi fundamental:

a. Konservasi Massa:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.1)$$

b. Konservasi Momentum:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F + \rho g \quad (2.2)$$

c. Konservasi Energi:

$$C_p u \cdot \Delta T + \Delta \cdot q = Q + q_0 + Q_p + Q_{vd} \quad (2.3)$$

Di mana  $\rho$  adalah densitas,  $p$  adalah tekanan,  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $q$  adalah fluks panas, dan  $Q$  adalah sumber panas (Todreas & Kazimi, 2011). Persamaan-persamaan ini membentuk dasar untuk analisis termodinamika dan perpindahan panas dalam teras reaktor. Mereka menggambarkan bagaimana massa, momentum, dan energi dikonservasi dalam aliran fluida pendingin.

### 2. Aliran Turbulen dan Laminar

Aliran dalam teras reaktor biasanya bersifat turbulen karena kecepatan aliran yang tinggi dan geometri yang kompleks. Aliran turbulen ditandai oleh fluktuasi acak dan pencampuran yang intens, yang meningkatkan perpindahan panas dan momentum. Bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) digunakan untuk mengkarakterisasi aliran:

$$Re = \rho v L / D \quad (2.4)$$

Di mana  $D$  adalah diameter hidrolis dan  $\nu$  adalah viskositas dinamik. Untuk aliran dalam pipa, transisi dari laminar ke turbulen umumnya terjadi pada  $Re > 2300$ . Dalam reaktor nuklir, aliran turbulen sangat diinginkan karena meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Namun, ini juga meningkatkan penurunan tekanan dan dapat menyebabkan getaran mekanis.

### 3. Perpindahan Panas Konveksi, Konduksi, dan Radiasi

Perpindahan panas dalam teras reaktor melibatkan tiga mekanisme:

a. Konveksi: Dominan dalam perpindahan panas dari bahan bakar ke pendingin.

Dinyatakan dengan hukum Newton tentang pendinginan:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

Di mana  $h$  adalah koefisien perpindahan panas konveksi,  $T_s$  adalah suhu permukaan, dan  $T_\infty$  adalah suhu bulk fluida.

b. Konduksi: Penting dalam perpindahan panas melalui bahan bakar dan kelongsong. Diatur oleh hukum Fourier:

$$q'' = -k\nabla T \quad (2.6)$$

Di mana  $k$  adalah konduktivitas termal.

c. Radiasi: Menjadi signifikan pada suhu tinggi atau dalam kondisi kecelakaan. Dinyatakan dengan hukum Stefan-Boltzmann:

$$q'' = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.7)$$

Di mana  $\varepsilon$  adalah emisivitas dan  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzmann.

Pemahaman tentang aliran fluida dalam teras reaktor melibatkan integrasi berbagai konsep dasar termodinamika dan mekanika fluida. Persamaan konservasi memberikan kerangka teoritis, sementara konsep seperti turbulensi, mekanisme perpindahan panas, dan parameter seperti koefisien perpindahan panas dan faktor gesekan memungkinkan analisis praktis.

Kemajuan dalam komputasi dinamika fluida (CFD) dan teknik eksperimental terus meningkatkan pemahaman kita tentang aliran fluida kompleks dalam teras reaktor. Ini memungkinkan desain reaktor yang lebih efisien dan aman, serta pengembangan konsep reaktor generasi lanjut. Perpindahan panas umumnya ditemui dalam sistem rekayasa dan aspek kehidupan lainnya, dan kita tidak perlu membahas terlalu jauh untuk melihat beberapa bidang penerapan perpindahan panas. Contoh laju aliran dalam reaktor. Ini adalah contoh ilustratif, dan datanya tidak mewakili desain reaktor apa pun.

Pengetahuan mendalam tentang mekanisme perpindahan panas juga penting bagi insinyur reaktor dan juga semua insinyur lainnya. Pembangkit listrik tenaga nuklir terlihat seperti pembangkit listrik tenaga panas standar dengan satu pengecualian. Sumber panas pada pembangkit listrik tenaga nuklir adalah reaktor nuklir. Seperti yang biasa terjadi di semua pembangkit listrik tenaga panas konvensional, panas digunakan untuk menghasilkan uap yang menggerakkan turbin uap yang terhubung

ke generator yang menghasilkan listrik. Namun pada pembangkit listrik tenaga nuklir, reaktor menghasilkan panas dalam jumlah besar dalam volume kecil. Kepadatan pembangkitan energi yang sangat besar sehingga menuntut sistem perpindahan panasnya. Oleh karena itu kita harus memulai dengan pembangkitan panas reaktor dan pembuangannya dari reaktor.

Agar reaktor dapat beroperasi dalam kondisi tunak, semua panas yang dilepaskan dalam sistem harus dihilangkan secepat panas yang dihasilkan. Hal ini dicapai dengan melewati cairan pendingin atau gas melalui inti dan melalui daerah lain di mana panas dihasilkan. Perpindahan panas harus sama atau lebih besar dari laju pembangkitan panas atau panas berlebih, dan kemungkinan kerusakan pada bahan bakar dapat terjadi. Sifat dan pengoperasian sistem pendingin ini merupakan beberapa pertimbangan terpenting dalam merancang reaktor nuklir.

Perlu dicatat bahwa dari sudut pandang nuklir, secara teoritis tidak ada batas atas daya termal reaktor, yang dapat dicapai oleh reaktor kritis mana pun yang memiliki reaktivitas berlebih yang cukup untuk mengatasi umpan balik suhu negatifnya. Terdapat proporsionalitas berbanding lurus antara fluks neutron dan daya termal pada setiap reaktor nuklir. Istilah daya termal biasanya digunakan karena berarti laju produksi panas di teras reaktor akibat fisi bahan bakar. Selain itu, untuk jangka waktu yang singkat, reaktor kritis tidak perlu memiliki reaktivitas berlebih yang tinggi seperti dalam kasus reaktivitas cepat.

Singkatnya, hampir semua reaktor dapat melampaui kemampuan pembuangan panas dari sistem pendinginnya. Di luar titik ini, bahan bakar akan memanaskan dan mencapai suhu yang sangat tinggi. Situasi ini harus dihindari oleh operator reaktor dan sistem keselamatan reaktor. Pembangkitan panas keseimbangan laju pembuangan panas harus dijaga untuk mencegah suhu yang dapat merusak bahan bakar atau material struktural lainnya. Dalam teknik reaktor, hidrolika termal reaktor nuklir menggambarkan upaya yang melibatkan penggabungan perpindahan panas dan dinamika fluida untuk mencapai laju pembuangan panas yang diinginkan dari teras dalam kondisi operasi normal dan kecelakaan.

## 2.5 COMSOL *Multiphysics*

COMSOL *Multiphysics* adalah perangkat lunak simulasi berbasis metode elemen hingga yang sangat kuat dan fleksibel untuk berbagai fenomena fisik. Dalam konteks reaktor nuklir, COMSOL menjadi alat yang semakin penting untuk analisis dan desain yang kompleks. COMSOL memiliki beberapa keunggulan dalam Simulasi Reaktor Nuklir meliputi:

### 1. Fleksibilitas;

COMSOL memungkinkan pengguna untuk menentukan persamaan diferensial parsial kustom, memungkinkan implementasi model fisik yang sangat spesifik untuk reaktor nuklir.

### 2. Antarmuka Grafis;

Antarmuka grafis COMSOL yang intuitif memudahkan pembuatan geometri kompleks dan pengaturan kondisi batas.

### 3. *Meshing* Adaptif;

COMSOL menyediakan alat *meshing* adaptif yang canggih, penting untuk menangani geometri kompleks dalam teras reaktor.

### 4. *Solvers* yang Kuat;

COMSOL menawarkan berbagai solver numerik yang kuat untuk menangani sistem persamaan yang besar dan kaku yang sering muncul dalam simulasi reaktor.

### 5. Pasca-pemrosesan;

COMSOL menyediakan alat visualisasi dan analisis data yang canggih untuk interpretasi hasil yang mudah.

COMSOL *Multiphysics* menawarkan *platform* yang kuat dan fleksibel untuk simulasi reaktor nuklir. Kemampuannya untuk mengintegrasikan berbagai fenomena fisik membuatnya sangat cocok untuk analisis kompleks yang diperlukan dalam desain dan analisis keselamatan reaktor nuklir modern. Meskipun ada tantangan dalam penggunaannya, COMSOL terus menjadi alat yang semakin penting dalam industri nuklir, mendorong inovasi dalam desain reaktor dan meningkatkan pemahaman kita tentang perilaku sistem reaktor yang kompleks.



**Gambar 2.5** COMSOL *Multiphysics* (COMSOL, 2022)

Untuk menggunakan perangkat ini, Anda tidak perlu memiliki keahlian matematika atau analisis numerik yang mendalam. Dengan menghitung jumlah fisik seperti properti material, beban, kendala, sumber, dan fluks, dan membandingkannya dengan persamaan matematika dasarnya, model dapat digunakan untuk membangunnya. Dalam komputasi, Anda dapat menerapkan variabel, lambang, atau angka ke titik, batas, tepi, dan bidang padat secara mandiri. Perangkat PDE yang menggambarkan seluruh model dibuat oleh COMSOL. Anda dapat mengakses kekuatan multifisika COMSOL sebagai produk yang berdiri sendiri melalui antarmuka pengguna grafis yang fleksibel atau melalui pemrograman dengan bahasa tulisan COMSOL atau MATLAB. Di mode aplikasi ini, Anda dapat melakukan berbagai jenis analisis, seperti:

1. Analisis *stationary* dan *time dependent*
2. Analisis yang menggabungkan linier dan non-linier
3. Analisis frekuensi eigen dan pengendalian

COMSOL *Multiphysics* menggunakan metode elemen hingga untuk memecahkan persamaan diferensial. Metode ini bekerja dengan jaringan adaptif dan menggunakan berbagai pemecah numerik untuk mengontrol kesalahan. Model berbagai fenomena rekayasa dan ilmiah dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan diferensial. Dengan demikian, COMSOL *Multiphysics* dapat digunakan dalam berbagai bidang aplikasi, termasuk mekanika kuantum, dinamika fluida, perambatan gelombang, dan reaksi kimia. Untuk berbagai aplikasi nyata, sistem PDE multifisika harus dihubungkan secara bersamaan. Sebagai contoh, efek pemanasan resesif dimasukkan ke dalam model konduktor yang membawa arus, dan hambatan listrik pada konduktor sering bervariasi tergantung pada suhu. Dengan konfigurasi dasar, COMSOL *Multiphysics* memiliki kemampuan

pemodelan dan analisis untuk berbagai bidang aplikasi. Modul pilihan selalu tersedia untuk bidang aplikasi tertentu. Modul khusus aplikasi ini menyederhanakan pembuatan dan analisis model dengan menggunakan metode terminologi dan metode penyelesaian khusus untuk ilmu tertentu. Modul C/DC, modul akustik, modul teknik kimia, modul ilmu bumi, modul perpindahan panas, modul MEMS, modul RF, dan modul mekanis struktural adalah semua modul yang tersedia di COMSOL.

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Penelitian berlangsung dari September hingga November 2024. Penelitian ini terdiri dari berbagai langkah, mulai dari studi literatur sampai analisis hasil dan pembuatan laporan akhir. Jadwal pelaksanaan kegiatan digambarkan dalam **Tabel 3.1**.

**Tabel 3.1** Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Kegiatan	Jadwal Pelaksanaan (Bulan ke-)		
		1	2	3
1	Studi literatur dan pembuatan proposal penelitian	■		
2	Pembuatan model geometri dan pengaturan parameter serta kondisi batas	■		
3	Menentukan persamaan numerik dan pengaturan <i>mesh</i>		■	
4	Mensimulasikan aliran		■	
5	Analisis hasil dan pembuatan laporan akhir			■

#### 3.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. *Personal Computer* (PC) dengan spesifikasi intel celeron dan ram 8 GB.
2. *Software COMSOL Multiphysics* yang digunakan untuk memecahkan permasalahan fisika.

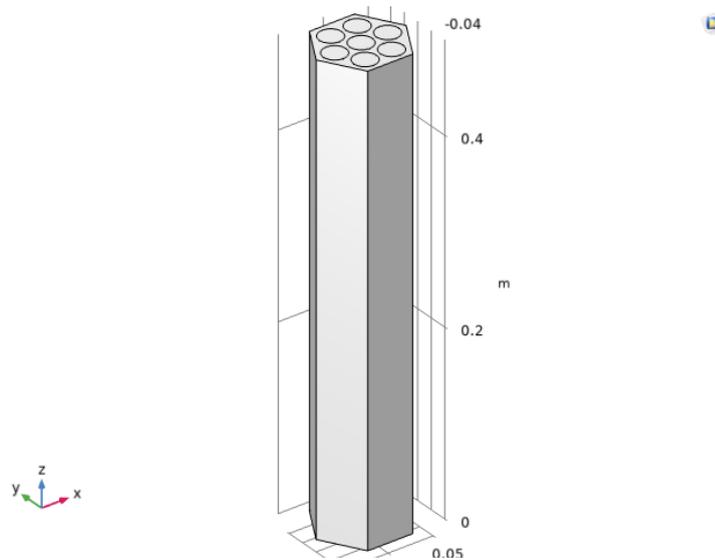
### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Studi Literatur

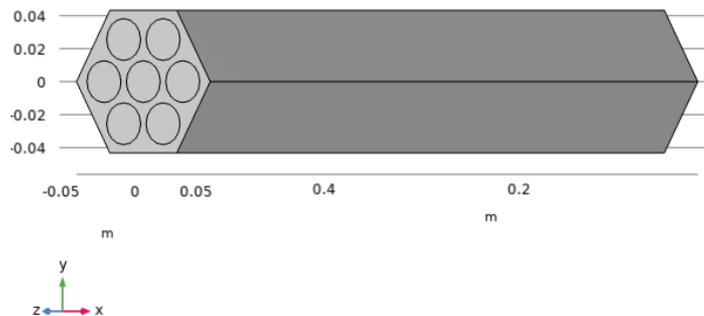
Mempelajari dasar-dasar penggunaan COMSOL *Multiphysics* dengan modul *heat transfer* dan juga melakukan studi literatur tentang teras reaktor SMR, transfer panas dan COMSOL *Multiphysics*.

#### 3.3.2 Pembuatan Model Geometri

Model ini mensimulasikan masalah pengaruh kecepatan *inlet* dan panas bahan bakar terhadap karakteristik aliran fluida, seperti distribusi kecepatan, profil tekanan, dan distribusi temperatur pada teras reaktor SMR menggunakan COMSOL *Multiphysics* yang melibatkan aliran fluida ( $H_2O$ ) non-isotermal melalui teras reaktor SMR dalam geometri heksagonal yang disederhanakan yang digunakan dalam teras SMR. **Gambar 3.1** menunjukkan geometri sampel dan kondisi batas untuk masalah yang diselidiki.



**Gambar 3.1** Teras Reaktor dilihat dari Sumbu z



**Gambar 3.2** Teras Reaktor dilihat dari Sumbu x

### 3.3.3 Pengaturan Parameter dan Persamaan Numerik

Untuk pemodelan aliran fluida dengan pengaruh kecepatan *inlet* dan panas bahan bakar pada teras reaktor SMR menggunakan COMSOL *Multiphysics*, parameter dan persamaan numerik yang mengatur proses ini adalah:

**Tabel 3.2** Nilai Parameter

<i>Type boundary</i>	Parameter	Nilai
Lubang masukan: <i>velocity inlet</i>	Kecepatan air masuk Temperatur	2;4;6;8 m/s 300 K
Lubang keluaran	<i>Gauge pressure</i> <i>Backflow temperature</i>	0 Pa 300 K
Silinder pemanas	Fluks panas	500;5000;15000;25000;35000 W/m <sup>2</sup>

#### 1. Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa):

Menurut persamaan kontinuitas, laju perubahan massa dalam suatu volume atur ditambah laju aliran massa *netto* keluar dari volume atur harus sama dengan nol. Persamaan 3.1 berikut menunjukkan persamaan kontinuitas untuk aliran fluida tunak (*steady-state*) dan tak mampu mampat (*incompressible*).

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3.1)$$

di mana  $u$  adalah vektor kecepatan fluida.

#### 2. Persamaan Momentum (*Navier-Stokes*):

Persamaan *Navier-Stokes* merupakan persamaan fundamental yang menggambarkan prinsip kekekalan momentum untuk aliran fluida. Persamaan ini

diturunkan dari hukum kedua Newton, yang menyatakan bahwa hasil gaya yang bekerja pada elemen fluida sama dengan perubahan momentumnya. Persamaan *Navier-Stokes* untuk aliran tunak dan tak mampu mampat ditunjukkan pada persamaan 3.2 sebagai berikut.

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F + \rho g \quad (3.2)$$

di mana  $\rho$  adalah densitas fluida,  $p$  adalah tekanan,  $\mu$  adalah viskositas dinamik, dan  $g$  adalah percepatan gravitasi.

### 3. Persamaan Energi (Hukum Kekekalan Energi):

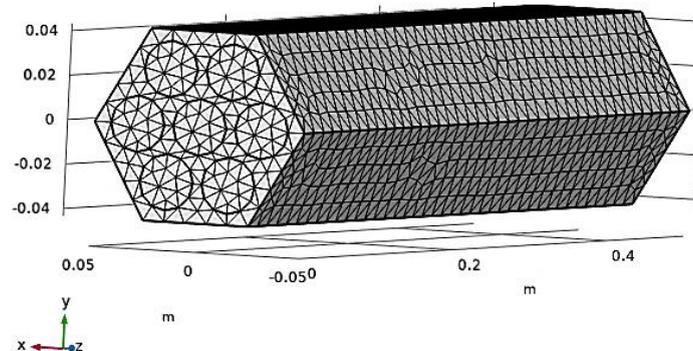
Persamaan energi menyatakan bahwa laju perubahan energi dalam suatu volume atur ditambah dengan laju aliran energi *netto* yang meninggalkan volume atur harus sama dengan laju pemanasan dalam volume atur. Untuk aliran fluida tunak dan tak mampu mampat, persamaan energi dapat dilihat pada persamaan 3.3 dibawah ini.

$$\rho C_p u \cdot \Delta T + \Delta \cdot q = Q + q_0 + Q_p + Q_{vd} \quad (3.3)$$

di mana  $C_p$  adalah kapasitas panas spesifik,  $T$  adalah temperatur, dan  $k$  konduktivitas termal.

#### 3.3.4 Pembuatan *Mesh*

*Meshing* adalah proses di mana geometri secara keseluruhan dibagi menjadi bagian-bagian kecil yang akan digunakan sebagai permukaan kontrol atau volume selama proses perhitungan. Setelah itu, tiap-tiap elemen ini akan digunakan sebagai input untuk elemen di sebelahnya. Ini akan dilakukan berulang kali hingga domain selesai. Selama proses *meshing*, elemen yang akan dipilih disesuaikan dengan bentuk geometri dan persyaratan. COMSOL *Multiphysics* adalah aplikasi *meshing* yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil *meshing* dari geometri teras reaktor SMR dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



**Gambar 3.3** *Meshing (COMSOL Multiphysics)*

### 3.3.5 Perhitungan

Perhitungan dalam penelitian ini melibatkan penerapan persamaan kontinuitas, momentum (*Navier-Stokes*), dan energi dalam perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* untuk mensimulasikan karakteristik aliran fluida pendingin pada teras reaktor SMR. Dengan kecepatan *inlet* fluida bervariasi (2, 4, 6, 8 m/s) dan fluks panas yang beragam (500, 5000, 15000, 25000, 35000 W/m<sup>2</sup>), simulasi dilakukan untuk memetakan distribusi suhu, tekanan, dan kecepatan aliran fluida dalam kondisi operasi normal. Parameter masukan meliputi tekanan keluaran (0 Pa) dan temperatur fluida awal (300 K). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan *inlet* menghasilkan distribusi suhu yang lebih homogen dan perpindahan panas konvektif yang lebih efektif, sementara fluks panas tinggi cenderung meningkatkan suhu maksimum di sekitar bahan bakar. Validasi hasil simulasi dengan penelitian sebelumnya, seperti Anwar *et al.*, (2013), menunjukkan *error* kurang dari 5%, yang menegaskan keakuratan model dan metode yang digunakan. Data ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut dalam desain sistem pendingin SMR yang efisien dan aman.

### 3.3.6 Hasil

Sesuai dengan tujuan utama dari dilakukannya penelitian ini yaitu, untuk mengetahui pengaruh kecepatan *inlet* dan panas bahan bakar pada teras reaktor

SMR yang kemudian hasil simulasi berupa dinamika suhu, tekanan, dan kecepatan aliran dalam operasi normal dengan *software* COMSOL *Multiphysics*.

### 3.3.7 Simulasi *Benchmarking*

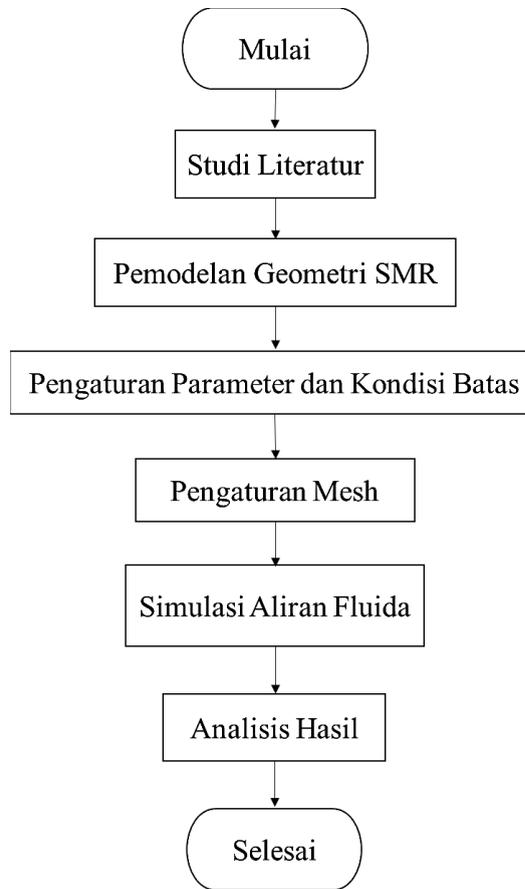
Simulasi *Benchmark* merupakan alat penting yang digunakan untuk memvalidasi metode numerik dan model komputasi. Pada penelitian ini digunakan perbandingan dari penelitian yang dilakukan oleh Anwar *et al.*, (2013) mengenai simulasi karakteristik aliran dan suhu fluida pendingin ( $H_2O$ ) pada teras reaktor nuklir *Small Modular Reactor* (SMR). Batas toleransi kesalahan (*error*) dinyatakan dalam persentase. Pada penelitian ini dipilih batas kesalahan 5% yang artinya memiliki tingkat akurasi 95% (Sugiyono, 2019). Data parameter yang digunakan dalam simulasi ini ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

**Tabel 3.3** Nilai Parameter *Benchmarking*

<i>Tipe boundary</i>	Parameter	Nilai
Lubang masukan: <i>velocity inlet</i>	Kecepatan air masuk Temperatur	1;2;3;4;5 m/s 300 K
Lubang keluaran	<i>Gauge pressure</i> <i>Backflow temperature</i>	0 Pa 300 K
Silinder pemanas	Fluks panas	100;500;1000;5000;10000;15000; 20000 W/m <sup>2</sup>

### 3.4 Diagram Alir

Berikut adalah diagram alir dari penelitian ini:



**Gambar 3.4** Diagram Alir

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa kecepatan *inlet* memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik aliran fluida. Pada setiap variasi kecepatan *inlet* (2, 4, 6, dan 8 m/s), terjadi pola penurunan kecepatan yang konsisten hingga mencapai kondisi *steady*. Kecepatan yang lebih tinggi menghasilkan distribusi panas yang lebih merata dalam sistem, dengan kecepatan maksimum terjadi pada bagian tengah saluran dan kecepatan minimum berada di dekat dinding saluran akibat efek viskositas. Selain itu, peningkatan kecepatan *inlet* juga menyebabkan *pressure drop* yang lebih besar, dimana tekanan *steady* bervariasi dari  $1 \times 10^5$  Pa untuk kecepatan *inlet* 2 m/s hingga mencapai  $1.5 \times 10^6$  Pa untuk kecepatan *inlet* 8 m/s.
2. Analisis menunjukkan bahwa fluks panas memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik aliran fluida. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa semakin tinggi fluks panas yang diberikan, kecepatan aliran initial cenderung mengalami peningkatan. Pada variasi fluks panas antara 500-5000 W/m<sup>2</sup>, kenaikan temperatur fluida tidak menunjukkan perubahan yang terlalu signifikan, namun peningkatan fluks panas menyebabkan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang lebih besar karena densitas fluida menurun seiring dengan kenaikan temperatur. Dalam kondisi operasi, suhu masukan 300 K menghasilkan suhu keluaran 480 K dengan kenaikan sebesar 180 K, yang masih berada dalam rentang operasi normal untuk reaktor nuklir tipe air bertekanan (PWR).

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan untuk melakukan pengembangan lebih lanjut dengan fokus pada beberapa aspek utama: penelitian dengan variasi parameter yang lebih luas dan integrasi analisis neutronik-termal-hidrolik untuk meningkatkan akurasi, pengembangan sistem monitoring *real-time* untuk pengawasan parameter operasi, serta optimasi desain saluran fluida dan pemilihan material yang tepat untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Pengembangan protokol keselamatan yang komprehensif juga diperlukan untuk menjamin operasi reaktor SMR yang aman dan efisien.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahn, K., Lee, K. H., Lee, J. S., Won, C., & Yoon, J. (2020). Analytic springback prediction in cylindrical tube bending for helical tube steam generator. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(9), 2100–2106.
- Cacuci, D. G. (2010). Handbook of Nuclear Engineering: *Vol. 1: Nuclear Engineering Fundamentals*. Springer Science & Business Media.
- Chauliac, C., Aragonés, J. M., Bestion, D., Cacuci, D. G., Crouzet, N., Weiss, F. P., & Zimmermann, M. A. (2011). NURESIM - A European simulation platform for nuclear reactor safety: Multi-scale and multi-physics calculations, sensitivity and uncertainty analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 241(9), 3416–3426.
- Chen, Y., & Ma, W. (2020). Uncertainty quantification for TRACE simulation of FIX-II No. 5052 test. *Annals of Nuclear Energy*, 143.
- COMSOL. (2021). COMSOL Multiphysics Reference Manual, version 5.6. COMSOL AB
- D'Auria, F., Camargo, C., & Mazzantini, O. (2012). The Best Estimate Plus Uncertainty (BEPU) approach in licensing of current nuclear reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 248, 317-328.
- Demazière, C. (2013). Modelling of Nuclear Reactor Multi-physics: From Local Balance Equations to Macroscopic Models in Neutronics and Thermal-Hydraulics. *Academic Press*.
- Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear reactor analysis*. John Wiley & Sons.
- Genglei, X., Minjun, P., & Xue, D. (2014). Analysis of load-following characteristics for an integrated pressurized water reactor. *International journal of energy research*, 38(3), 380-390.
- Groeneveld, D. C., Shan, J. Q., Vasić, A. Z., Leung, L. K. H., Durmayaz, A., Yang, J., ... & Tanase, A. (2007). The 2006 CHF look-up table. *Nuclear engineering and design*, 237(15-17), 1909-1922.

- Ha, T. W., Yun, B. J., & Jeong, J. J. (2020). Improvement of the subcooled boiling model for thermal-hydraulic system codes. *Nuclear Engineering and Design*, 364.
- Hegazy, Y. H., & Podowski, M. Z. (2013). Coupled neutronics/thermal-hydraulics analysis of nuclear reactor core behavior. *Nuclear Science and Engineering*, 175(2), 182-193.
- Ingersoll, D. T. (2009). Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in nuclear energy*, 51(4-5), 589-603.
- Ingersoll, D. T., Houghton, Z. J., Bromm, R., & Desportes, C. (2014). NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination*, 340, 84-93.
- IAEA. (2018). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2020). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. International Atomic Energy Agency
- IAEA. (2021). *Design safety considerations for small modular reactors* (IAEA Safety Standards Series No. SSG-52).
- International Atomic Energy Agency. (2021). *Design safety considerations for small modular reactors* (IAEA Safety Standards Series No. SSG-52). IAEA.
- Ishii, M., & Hibiki, T. (2010). *Thermo-fluid dynamics of two-phase flow*. Springer Science & Business Media.
- Jaeger, M., Müller, U., Kenning, D. B., & Stephan, P. (2013). High-performance computing and numerical modeling. In *VDI Heat Atlas* (pp. 27-36). Springer.
- Kelas Teknisi, 2022. Pembangkit listrik tenaga nuklir. [Online]  
Available at: <https://www.kelasteknisi.com/2022/06/pembangkit-listrik-tenaga-nuklir-pltn.html>  
Accessed [22 Januari 2024]
- Kessides, I. N., & Kuznetsov, V. (2012). Small modular reactors for enhancing energy security in developing countries. *Sustainability*, 4(8), 1806-1832.
- Kothandaraman, C. P. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New Age International.
- Kolev, N. I. (2015). *Multiphase flow dynamics 5: nuclear thermal hydraulics*. Springer.

- Liu, Z., & Fan, J. (2014). Technology readiness assessment of Small Modular Reactor (SMR) designs. In *Progress in Nuclear Energy* (Vol. 70, pp. 20–28).
- Lee, S. W., Kim, S. H., & Chung, Y. J. (2009). Development and steady state level experimental validation of TASS/SMR core heat transfer model for the integral reactor SMART. *Annals of Nuclear Energy*, 36(8), 1039–1048.
- Narcisi, V., Ciurluini, C., Giannetti, F., & Caruso, G. (2021). Thermal-hydraulic transient analysis of the FFTF LOFWOS Test #13. *Nuclear Engineering and Design*, 383.
- Ramadhan, A. I., Setiawan, I., & Satryo, M. I. (2013). SIMULASI KARAKTERISTIK ALIRAN DAN SUHU FLUIDA PENDINGIN (H<sub>2</sub>O) PADA TERAS REAKTOR NUKLIR SMR (SMALL MODULAR REACTOR). *ROTASI*, 15(4), 33-40.
- Reyes Jr, J. N., & Lorenzini, P. (2010). NuScale Power: A modular, scalable approach to commercial nuclear power. *Nuclear news*, 53(7), 97.
- Roache, P. J. (2009). *Fundamentals of Verification and Validation*. Hermosa Publishers.
- Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpech, S., Feynberg, O., Ghetta, V., ... & Zhimin, D. (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives. *Progress in Nuclear Energy*, 77, 308-319.
- Smith, B. L., & Wu, H. (2019). Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications—Revision. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(1), 76-88.
- Sugiyono, S. (2019). Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D (pp. 1–444). *Alfabeta Bandung*.
- Sun, L., Peng, M., Xia, G., Lv, X., & Li, R. (2017). Numerical study on coolant flow distribution at the core inlet for an integral pressurized water reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(1), 71-81.
- Todreas, N. E., & Kazimi, M. S. (2021). *Nuclear systems volume I: Thermal hydraulic fundamentals*. CRC press.
- Todreas, N. (2021). Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: an introduction. In *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors* (pp. 3-27). Woodhead Publishing.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2020). Safety analysis report for passive modular reactor design. NRC Technical Report.

World Nuclear Association. (2021). Flexibility of deployment of small modular reactors. World Nuclear Association Report.

Zhan, M., Yang, H., Huang, L., & Gu, R. (2006). Springback analysis of numerical control bending of thin-walled tube using numerical-analytic method. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3), 197-201.