

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS SIRKULASI ALAMI GARAM
BAHAN BAKAR *THORIUM MOLTEN SALT REACTOR* (TMSR) DALAM
OPERASI NORMAL DAN KECELAKAAN MENGGUNAKAN *COMSOL
MULTIPHYSICS***

(Skripsi)

Oleh

Rindiani Aprillia Cautesa

2017041053



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

ABSTRAK

ANALISIS PERPINDAHAN PANAS SIRKULASI ALAMI GARAM BAHAN BAKAR *THORIUM MOLTEN SALT REAKTOR* (TMSR) DALAM OPERASI NORMAL DAN KECELAKAAN MENGGUNAKAN COMSOL *MULTIPHYSICS*

Oleh

Rindiani Aprillia Cauntesa

Seperti halnya dengan tipe MSR lainnya, dua masalah keselamatan utama dari TMSR adalah pendinginan panas sisa dan pembekuan garam cair yang tentunya berhubungan langsung dengan sistem perpindahan panas pada reaktor nuklir. Sirkulasi alami menjadi sistem keselamatan pasif pada reaktor generasi keempat dan disebut-sebut efektif dalam menstabilkan suhu reaktor jika terjadi kecelakaan seperti gagalnya sistem pendingin utama reaktor. Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai perpindahan panas sirkulasi alami pada garam bahan bakar TMSR dalam operasi normal maupun kecelakaan LOHS melalui parameter suhu, kecepatan fluida, dan tekanan. Metode yang digunakan adalah simulasi CFD 2D pada geometri loop sirkulasi alami berukuran 2×4 m menggunakan COMSOL *Multiphysics*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dalam kondisi normal, sirkulasi alami mempertahankan distribusi suhu garam bahan bakar yang stabil dengan suhu tertinggi di dekat pemanas 892 K dan terendah di dekat pendingin 890 K, kecepatan aliran fluida konsisten sekitar 0,007 m/s, serta tekanan lebih rendah -9882 Pa di area atas loop dan tekanan lebih tinggi 99327 Pa di area bawah loop. Selama LOHS, suhu yang awalnya tidak stabil akhirnya menjadi seragam di 893 K, menunjukkan ketidakstabilan sistem. Kecepatan aliran fluida menurun masing-masing sebesar 0,002 m/s setelah pendingin dan 0,003 m/s setelah pemanas, sementara tekanan setelah pemanas meningkat -9822 Pa dan setelah pendingin menurun 99326 Pa. Meski sirkulasi alami tetap berfungsi, efisiensi sistem menurun akibat perubahan kondisi ekstrem, yang berdampak pada performa sirkulasi alami.

Kata kunci: perpindahan panas, sirkulasi alami, TMSR, LOHS, reaktor nuklir

ABSTRACT

ANALYSIS OF NATURAL CIRCULATION HEAT TRANSFER IN THORIUM MOLTEN SALT REACTOR (TMSR) FUEL SALT DURING NORMAL AND ACCIDENT OPERATIONS USING COMSOL MULTIPHYSICS

By

Rindiani Aprillia Cautesa

Two significant safety concerns associated with TMSR, as with other MSR, are residual heat cooling and molten salt freezing. These issues are intrinsically linked to the reactor's heat transfer system. Natural circulation, a passive safety feature inherent to fourth-generation reactors, is designed to stabilize reactor temperature in the event of an accident, such as a failure of the main cooling system. This research examines the heat transfer in TMSR fuel salt under both normal operation and Loss of Heat Sink (LOHS) accidents, with a particular focus on temperature, fluid velocity, and pressure. Two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted using COMSOL Multiphysics on a 2×4 m natural circulation loop. The results demonstrate that under normal operating conditions, the system maintain stable fuel salt temperature distribution, with the highest temperature close to the heater at 892 K and the lowest temperature close to the cooler at 890 K. The fluid velocity remains constant at 0.007 m/s, while pressure fluctuates between -9882 Pa (upper loop) and 99327 Pa (lower loop). During a loss of heat sink (LOHS) accident, the initially unstable temperature stabilizes at 893 K, indicating system instability. The fluid velocity decreases by 0.002 m/s after cooling and 0.003 m/s after heating, while the pressure increases by -9822 Pa after heating and decreases by 99326 Pa after cooling. Despite the persistence of natural circulation, its efficiency declines due to the extreme condition changes, affecting performance.

Keywords: heat transfer, natural circulation, TMSR, LOHS, nuclear reactor

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS SIRKULASI ALAMI GARAM
BAHAN BAKAR *THORIUM MOLTEN SALT REACTOR* (TMSR) DALAM
OPERASI NORMAL DAN KECELAKAAN MENGGUNAKAN COMSOL
MULTIPHYSICS**

Oleh

RINDIANI APRILLIA CAUNTESA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh 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
2024**

Judul Skripsi : Analisis Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR) dalam Operasi Normal dan Kecelakaan Menggunakan COMSOL *Multiphysics*

Nama Mahasiswa : Rindiani Aprillia Cautesa

Nomor Pokok Mahasiswa : 2017041053

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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 FMIPA

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

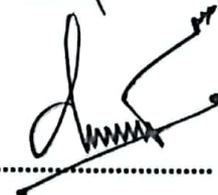
MENGESAHKAN

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:

"Analisis Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar *Thorium Molten Salt Reaktor* (TMSR) dalam Operasi Normal dan Kecelakaan 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



Rindiani Aprillia Cautesa
NPM. 2017041053

RIWAYAT HIDUP



Penulis, Rindiani Aprillia Cauntesa, dilahirkan di Gunungkidul pada tanggal 01 April 2000. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara, putri dari pasangan Sukirno dan Wastini. Penulis memulai pendidikan di TK ABA X TEJO pada tahun 2006 hingga 2007, kemudian melanjutkan ke SDN Pucanganom 2 dari tahun 2007 hingga 2013. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMPN 2 Ponjong dari tahun 2013 hingga 2016, dan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Rongkop dari tahun 2016 hingga 2019. Pada tahun 2020, penulis diterima di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi. Penulis bergabung dengan Himpunan Mahasiswa Fisika FMIPA UNILA pada tahun 2021 sebagai anggota Bidang Sains dan Teknologi yang bertanggung jawab terhadap program kerja Kelompok Belajar (KOPJAR). Selain itu, penulis juga menjadi anggota Bidang Akademik dan Riset di Rohani Islam (ROIS) FMIPA UNILA pada tahun yang sama, serta Anggota Seni Sastra di Tim Minat Bakat FMIPA UNILA pada tahun 2022. Selain itu, di luar kampus penulis juga terlibat dalam Komunitas Gunungkidul Menginspirasi dari tahun 2020 hingga 2023 sebagai anggota divisi Sosio Pendidikan. Penulis juga menjadi staff di Indonesia Nuclear Youth Society (INYS) sejak tahun 2024 hingga sekarang. Penulis juga memiliki berbagai pengalaman kerja, antara lain Praktik Kerja Lapangan di Kelompok Riset Human Factor, Instrumentasi, dan Kendali Reaktor Nuklir di Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, BRIN, Serpong, Tangerang Selatan, dari 3 Juli hingga 3 Agustus 2023.

Pada bulan September hingga November 2023, penulis bekerja sebagai *Freelance Writer* di International Association of Professional Writers and Editors (IAPWE). Selain itu, sejak 2023 hingga sekarang, penulis menjalankan usaha di Shopee dengan nama toko Dreamer.shop yang menjual Keripik Pisang Muli.

Penulis telah meraih berbagai penghargaan dan prestasi. Penulis menjadi peserta Pertukaran Mahasiswa Merdeka (PMM) tahun 2022 di Universitas Papua, Papua Barat, dan mengambil tiga program studi yaitu Fisika, Teknik Elektro, dan Teknik Geologi. Penulis juga telah menerbitkan sebuah buku berjudul "**Detik-Detik Menembus Awan**" yang diterbitkan oleh Eureka Media Aksara pada tahun 2022. Pada tahun berikutnya penulis menjadi *finalist* dalam *International Essay Competition Borneo Physics Fair 2023* dengan judul esai "***The Potential Applications of Heat Transfer from High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) in the Smelting Industry***". Selain itu, penulis menjadi peraih Insentif Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) 2023 kategori PKM GFT, dengan gagasan berjudul "***SMARTER: Sustainable Management Recycle Photovoltaic and Thermal Energy***" yang kemudian diterbitkan dua tahun kemudian dalam buku "**Bunga Rampai**".

Penulis juga 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 untuk tugas akhirnya penulis memilih untuk memperdalam ketertarikannya di bidang teknologi nuklir tipe *Molten Salt Reactor* (MSR) sehingga pada akhirnya penulis mengambil penelitian mengenai "**Analisis Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) dalam Operasi Normal dan Kecelakaan Menggunakan COMSOL Multiphysics**".

MOTTO

ꦱꦧꦫꦶꦏꦸꦲꦶꦁꦫꦤ꧀ꦩꦸꦠꦶꦏꦤꦶꦁꦭꦏꦸꦲ

(Sabar iku ingaran mustikaning laku)

ꦩꦶꦏꦸꦲꦸꦮꦸꦩꦺꦤꦸꦃꦶꦗꦺꦫꦺꦥ

(Mikul dhuwur mendhem jero)

ꦥꦸꦗꦸꦭꦶꦁꦲꦥꦫꦏꦸꦲꦶꦁꦏꦺꦫꦺꦥꦸꦗꦸꦭꦶꦁꦏꦺꦫꦺꦥ

(Punjul ing apapak, mrojol ing akerep)

“Selalu ingat 2:186, 2:216, 2:286, dan 65:3”

“Not everything that counts can be counted, and not everthing that can be counted counts - Albert Einstein

"Life is like a nuclear reaction, where the greatest power comes from the unseen. Sometimes, small changes within ourselves can create immense energy to transform our lives and the world around us." - Rindiani Aprillia Cauntesa

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur, cinta, dan mengharapkan ridho Allah SWT dan Syafaat Nabi Muhammad SAW

Karya ini saya persembahkan untuk Nenek dan Kakekku Tercinta

Adi Sularjo & Lagiyem

Yang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasi

Orang tuaku tercinta

Wastini & Sagimin

Sukirno & Srihartatik

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

Saudaraku tercinta

L-za Meilanda Syahputra

Yuhyi Faunzila

Titik Dhian Wulandari

Benny Febri Utomo

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 saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul "**Analisis Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar *Thorium Molten Salt Reaktor* (TMSR) dalam Operasi Normal dan Kecelakaan 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. Penelitian ini dilakukan untuk memberikan kontribusi dalam pemahaman tentang perpindahan panas dalam sistem reaktor garam cair dengan menggunakan metode simulasi menggunakan COMSOL *Multiphysics*.

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, saya terbuka untuk saran dan kritik yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat dan menjadi referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam perpindahan panas dan teknologi nuklir, serta menjadi langkah awal untuk penelitian lebih lanjut.

Akhir kata, semoga karya ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 20 November 2024
Penulis,

Rindiani Aprillia Cautesa
NPM. 2017041053

SANWACANA

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul "**Analisis Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar Thorium Molten Salt Reaktor (TMSR) dalam Operasi Normal dan Kecelakaan Menggunakan COMSOL Multiphysics.**"

Skripsi ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat dan rendah hati, saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si., sebagai Dosen Pembimbing I, yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan dorongan selama penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Duwi Hariyanto, S.Si., M.Si., sebagai Dosen Pembimbing II, yang telah membantu, memberikan arahan, bimbingan, dan saran untuk penulis dalam melakukan penelitian hingga penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi., S.Si., M.T., sebagai Dosen Pembahas, yang telah memberikan arahan, kritikan, saran, dan dukungannya selama penulis mengerjakan skripsi maupun saat menempuh perkuliahan.
4. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., sebagai Dekan FMIPA UNILA.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M. Eng., sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA UNILA.
6. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si., sebagai dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan arahan dan nasehatnya selama menjalani perkuliahan.
7. Bapak dan Ibu Dosen serta Staff Jurusan Fisika FMIPA UNILA yang telah banyak memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama masa perkuliahan.
8. ORNL, Shane Henderson yang telah mengizinkan penulis untuk bergabung dalam proyek NEAMS dan mengambil data sekunder penelitian.

9. Kakek dan Nenek Penulis, Kakek Adi Sularjo, Nenek LagiyeM, dan Mbah Santi, yang telah membesarkan penulis dengan penuh kasih sayang, senantiasa memberikan dukungan, dan semangat untuk penulis dari kecil sampai saat ini.
10. Orang Tua Penulis, Ibu Wastini - Bapak Sagimin, Bapak Sukirno - Ibu Srihartatik yang telah memberikan semangat, memanjatkan doa restu dan segala dukungannya.
11. Saudara Penulis, L-za Meilanda Syahputra, Yuhyi Faunzila, Titik Dhian Wulandari, dan Benny Febri Utomo yang telah memberikan semangat dan doa kepada penulis.
12. Keluarga di Lampung, Budhe Tumiyati, Pakdhe Mujino, Mas Alvian, dan Mas Alan, yang telah menerima dengan hangat penulis dan selalu memberi dukungan selama penulis tinggal di Lampung.
13. Partner skripsian penulis, I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari, Nuraini, dan Dina Mauliyani Qoriah yang telah menemani suka duka penulis menyelesaikan skripsi ini.
14. Teman terdekat penulis, Annisa Urbaningrum, Fitri Ayu Awaliah, dan Mutiara Maharani yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
15. Sahabat terbaik penulis, Triyani, Cyntia Rahmawati, Sonia Pratiwi Handayani, Sierra Hestri Salsabiela, dan Siti Maryam yang selalu memberikan semangat kepada penulis.
16. Alm. Pakdhe Didi Kempot, Mas Denny Caknan, Guyon Waton, Aftershine, EXO, dan NCT, atas karya-karyanya yang telah menemani penulis dalam menyelesaikan studi sampai skripsi.
17. Teman-teman KBK Fisika Energi, rekan-rekan seperjuangan Fisika 2020 FMIPA UNILA, dan teman-teman PMM 2 UNIPA, yang telah memberikan motivasi, bantuan, dan kebersamaan selama masa studi dan penyusunan skripsi.
18. Seluruh pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini.

Bandar Lampung, 20 November 2024

Rindiani Aprillia Cautesa

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---------------------------------|----------------|
| ABSTRAK | i |
| <i>ABSTRACT</i> | ii |
| HALAMAN JUDUL | iii |
| LEMBAR PERSETUJUAN | iv |
| LEMBAR PENGESAHAN | v |
| LEMBAR PERNYATAAN | vi |
| RIWAYAT HIDUP | vii |
| MOTTO | ix |
| PERSEMBAHAN | x |
| KATA PENGANTAR | xi |
| SANWACANA | xii |
| DAFTAR ISI | xiv |
| DAFTAR GAMBAR | xvii |
| DAFTAR TABEL | xx |
| DAFTAR SIMBOL | xxi |
| DAFTAR SINGKATAN | xxiii |
| I. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 6 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 1.3 | Tujuan Penelitian..... | 6 |
| 1.4 | Manfaat Penelitian..... | 6 |
| 1.5 | Batasan Masalah..... | 7 |
| II. | TINJAUAN PUSTAKA | 8 |
| 2.1. | <i>Thorium Molten Salt Reactor Liquid Fuel (TMSR-LF)</i> | 8 |
| 2.2 | Aliran Non-Isotermal | 11 |
| 2.3 | Hukum Konservasi Massa..... | 14 |
| 2.3.1 | Persamaan Kontinuitas..... | 15 |
| 2.3.2 | Persamaan Navier-Stokes..... | 16 |
| 2.4 | Dinamika Perpindahan Panas | 17 |
| 2.5 | <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i> | 19 |
| III. | METODE PENELITIAN | 22 |
| 3.1 | Tempat dan Waktu Penelitian | 22 |
| 3.2 | Alat dan Bahan Penelitian | 22 |
| 3.3 | Algoritma Penyelesaian Kasus Perpindahan Panas Sirkulasi Alami..... | 23 |
| 3.3.1 | Pemilihan Studi Fisika <i>Non Isothermal Flow</i> | 23 |
| 3.3.2 | Memasukan Parameter | 24 |
| 3.3.3 | Pembuatan Geometri..... | 25 |
| 3.3.4 | Menentukan Titik-Titik Pengukuran | 26 |
| 3.3.5 | Pemilihan Material | 27 |
| 3.3.6 | Kondisi Batas (<i>Boundary</i>) dan Kondisi Awal (<i>Initial Value</i>)..... | 27 |
| 3.3.7 | Pembuatan <i>Meshing</i> | 27 |
| 3.3.8 | Perhitungan | 28 |
| 3.3.9 | Hasil | 29 |
| 3.3.10 | <i>Benchmarking Experiment</i> | 29 |
| 3.3.11 | Diagram Alir..... | 29 |

| | |
|--|-----------|
| IV. HASIL DAN PEMBAHASAN | 33 |
| 4.1 Validasi Model Simulasi dengan <i>Benchmarking</i> | 33 |
| 4.2 Simulasi Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar | 35 |
| 4.2.1 Perpindahan Sirkulasi Alami pada Kondisi Operasi Normal..... | 41 |
| 4.2.2 Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Kondisi Kecelakaan LOHS.... | 50 |
| V. SIMPULAN | 60 |
| 5.1 Simpulan..... | 60 |
| 5.2 Saran..... | 60 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 62 |
| LAMPIRAN..... | 66 |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|---|----------------|
| Gambar 2.1 Skematik TMSR-LF (Dai, 2017)..... | 9 |
| Gambar 2.2 Bagian TMSR-LF: (a) Konfigurasi radial, (b) geometri batang kendali, (c) penggabungan grafit, (d) skematik loop primer (Cui, <i>et al.</i> , 2020)..... | 10 |
| Gambar 2.3 Parameter Bilangan Reynolds dan Bentuk Alirannya | 12 |
| Gambar 2.4 Parameter Bilangan Prandtl..... | 13 |
| Gambar 2.5 Parameter Bilangan Grashof..... | 14 |
| Gambar 2.6 Komponen Aliran Massa dalam Arah Sumbu- <i>x</i> (Todreas & Kazimi, 1990a)..... | 15 |
| Gambar 2.7 Komponen tensor tegangan dalam Kordinat Cartesian | 16 |
| Gambar 2.8 Sirkulasi Alami dalam Loop Tertutup (Nuclear Power, 2022) | 18 |
| Gambar 2.9 Tampilan Program COMSOL <i>Multiphysics</i> versi 6.2..... | 20 |
| Gambar 3.1 Geometri Loop Sirkulasi Alami..... | 25 |
| Gambar 3.2 Letak Titik-Titik Pengukuran..... | 27 |
| Gambar 3.3 <i>Meshing</i> | 28 |
| Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan Simulasi COMSOL <i>Multiphysics</i> | 31 |
| Gambar 3.5 Diagram Perhitungan Program Simulasi COMSOL <i>Multiphysics</i> | 32 |
| Gambar 4.1 Titik-Titik Pengukuran Suhu pada Simulasi <i>Benchmark</i> | 33 |
| Gambar 4.2 Temperatur Simulasi <i>Benchmark</i> dengan Daya Pemanas 150 W.... | 34 |
| Gambar 4.3 Temperatur Hasil Eksperimen dengan Daya Pemanas 150 W (Hariyanto, <i>et al.</i> , 2021)..... | 34 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.4 Perbedaan Densitas Material: a) H ₂ O, b) LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄ | 36 |
| Gambar 4.5 Perbedaan Konduktivitas Termal: a) H ₂ O, b) LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄ ... | 36 |
| Gambar 4.6 Perbedaan Kapasitas Panas: a) H ₂ O, b) LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄ | 37 |
| Gambar 4.7 Perbedaan Dinamika Viskositas: a) H ₂ O, b) LiF-BeF ₂ -ThF ₄ - UF ₄ | 37 |
| Gambar 4.8 Perubahan Suhu TS1 Berdasarkan Perubahan Parameter Input..... | 38 |
| Gambar 4.9 Perubahan Suhu TS2 Berdasarkan Perubahan Parameter Input..... | 38 |
| Gambar 4.10 Perubahan Suhu TS3 Berdasarkan Perubahan Parameter Input..... | 39 |
| Gambar 4.11 Perubahan Suhu TS4 Berdasarkan Perubahan Parameter Input..... | 39 |
| Gambar 4.12 Letak Titik-Titik Pengukuran (Pengulangan Gambar 3.2)..... | 40 |
| Gambar 4.13 Distribusi Suhu dengan Input Daya Pemanas 150 W | 42 |
| Gambar 4.14 Perbandingan Suhu TS1 Berdasarkan Variasi Daya..... | 43 |
| Gambar 4.15 Perbandingan Suhu TS2 Berdasarkan Variasi Daya..... | 43 |
| Gambar 4.16 Perbandingan Suhu TS3 Berdasarkan Variasi Daya..... | 44 |
| Gambar 4.17 Perbandingan Suhu TS4 Berdasarkan Variasi Daya..... | 44 |
| Gambar 4.18 Kecepatan Aliran Fluida pada Input Daya Pemanas 150 W..... | 45 |
| Gambar 4.19 Perbedaan Kecepatan U1 Berdasarkan Variasi Daya..... | 46 |
| Gambar 4.20 Perbedaan Kecepatan U2 Berdasarkan Variasi Daya..... | 46 |
| Gambar 4.21 Perbedaan Tekanan P1 Berdasarkan Variasi Daya..... | 48 |
| Gambar 4.22 Perbedaan Tekanan P2 Berdasarkan Variasi Daya..... | 48 |
| Gambar 4.23 Distribusi Tekanan pada Input Daya Pemanas 150 W..... | 49 |
| Gambar 4.24 Perbandingan Suhu T _C Operasi Normal dengan LOHS..... | 50 |
| Gambar 4.25 Distribusi Suhu Ketika Kecelakaan LOHS | 51 |
| Gambar 4.26 Perbandingan Suhu TS1 Operasi Normal dengan LOHS..... | 52 |
| Gambar 4.27 Perbandingan Suhu TS2 Operasi Normal dengan LOHS..... | 53 |
| Gambar 4.28 Perbandingan Suhu TS3 Operasi Normal dengan LOHS..... | 53 |
| Gambar 4.29 Perbandingan Suhu TS4 Operasi Normal dengan LOHS..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.30 Kecepatan Aliran Fluida Ketika Kecelakaan LOHS | 55 |
| Gambar 4.31 Perbandingan Kecepatan U1 Operasi Normal dengan LOHS..... | 56 |
| Gambar 4.32 Perbandingan Kecepatan U2 Operasi Normal dengan LOHS..... | 56 |
| Gambar 4.33 Perbandingan Tekanan P1 Operasi Normal dengan LOHS..... | 58 |
| Gambar 4.34 Perbandingan Tekanan P2 Operasi Normal dengan LOHS..... | 58 |
| Gambar 4.35 Distribusi Tekanan Ketika Kecelakaan LOHS..... | 59 |

DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|---|----------------|
| Tabel 2.1 Fraksi neutron tunda dan konstanta peluruhan prekursor (Cui, <i>et al.</i> , 2020) | 10 |
| Tabel 2.2 Parameter desain TMSR-LF (Cui, <i>et al.</i> , 2020)..... | 10 |
| Tabel 2.3 Parameter komposisi dan sifat fisik pada loop primer, loop sekunder, dan grafit pada MSR (Cui, <i>et al.</i> , 2020) | 11 |
| Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian..... | 22 |
| Tabel 3.2 Parameter reaktor TMSR-LF..... | 25 |
| Tabel 3.3 Dimensi dari loop sirkulasi alami..... | 26 |
| Tabel 3.4 Parameter komposisi dan sifat termofisika pada LiF-BeF ₂ -UF ₄ -ThF ₄ (Cui, <i>et al.</i> , 2020)..... | 27 |
| Tabel 3.5 Parameter <i>benchmarking</i> | 29 |

DAFTAR SIMBOL

| Simbol | Keterangan | Muncul Pertama pada Halaman |
|--------------|--|--------------------------------|
| λ_i | : Konstanta peluruhan prekursor pada grup ke-i | 10 |
| β_i | : Fraksi neutron tunda pada grup ke-i | 10 |
| Re | : Bilangan reynolds | 11 |
| L | : Panjang (m) | 12 |
| ρ | : Densitas fluida (kg/m ³) | 12 |
| μ | : Viskositas dinamis fluida (N.s/m ²) | 12 |
| U | : Kecepatan bulk fluida (m/s) | 12 |
| Pr | : Bilangan Prandtl | 12 |
| h | : Koefisien perpindahan panas (W/m ² .K) | 13 |
| C_p | : Kapasitas panas khusus pada tekanan konstan (J/kg.K) | 13 |
| Nu | : Bilangan nusselt | 13 |
| α | : Difusivitas panas (m ² /s) | 13 |
| k | : Konduktivitas termal (W/mk) | 13 |
| g | : Percepatan gravitasi (m/s ²) | 14 |
| ρ_{ext} | : Densitas aliran bebas (kg/m ³) | 14 |
| ρ_s | : Densitas permukaan panas (kg/m ³) | 14 |
| Gr_L | : Bilangan grashof | 14 |
| \mathbf{u} | : Vektor kecepatan (m/s) | 15 |
| t | : Waktu (s) | 15 |
| σ | : Tegangan permukaan (N/m) | 16 |
| τ_{ij} | : Viskositas tensor tegangan (N/m ²) | 16 |
| A | : Luas permukaan (m ²) | 16 |
| T | : Suhu absolut (K) | 17 |

| Simbol | Keterangan | Muncul Pertama pada Halaman |
|-----------------|--|------------------------------------|
| \mathbf{K} | : Tensor tegangan kental (N/m ²) | 17 |
| \dot{q} | : Sumber panas (W/m ³) | 17 |
| \mathbf{F} | : Vektor gaya volume (N/m ³) | 19 |
| β | : Koefisien ekspansi termal | 19 |
| ρ_0 | : Bulk densitas fluida (kg/m ³) | 19 |
| ΔT | : Perbedaan suhu (K) | 19 |
| d_z | : Ketebalan domain pada arah keluar bidang (m) | 24 |
| p | : Tekanan (pa) | 24 |
| \mathbf{q} | : Fluks panas konduksi (W/m ²) | 24 |
| Q | : Sumber panas (W/m ³) | 24 |
| q_0 | : Fluks panas masuk (W/m ²) | 24 |
| Q_p | : Tekanan kerja (W/m ³) | 24 |
| Q_{vd} | : Disipasi viskositas (W/m ³) | 24 |
| \mathbf{I} | : Matriks identitas | 24 |
| $L_{1,2,3,4,5}$ | : Panjang lengan 1,2,3,4,5 (m) | 26 |
| L_H | : Panjang lengan <i>heater</i> (m) | 26 |
| L_C | : Panjang lengan <i>cooler</i> (m) | 26 |

DAFTAR SINGKATAN

| Singkatan | Keterangan | Muncul Pertama pada Halaman |
|-------------------------|--|--------------------------------|
| GIF | : <i>Generation IV Forum</i> | 1 |
| NPT | : <i>Non-Proliferation Treaty</i> | 1 |
| MSR | : <i>Molten Salt Reactor</i> | 1 |
| ARE | : <i>Aircraft Reactor Experiment</i> | 1 |
| ORNL | : <i>Oak Ridge National Laboratory</i> | 1 |
| MSRE | : <i>Molten Salt Reactor Experiment</i> | 2 |
| TMSR | : <i>Thorium Molten Salt Reactor</i> | 2 |
| TMSR-LF | : <i>Thorium Molten Salt Reactor Liquid Fuel</i> | 2 |
| TMSR-SF | : <i>Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel</i> | 2 |
| LWR | : <i>Light Water Reactor</i> | 2 |
| CAS | : <i>China Academy of Science</i> | 2 |
| SINAP | : <i>Shanghai Institute of Applied Physics</i> | 2 |
| SBO | : <i>Station Blackout</i> | 3 |
| CFD | : <i>Computational Fluid Dynamic</i> | 3 |
| IHG | : <i>Internal Heat Generation</i> | 4 |
| PRHRS | : <i>Passive Residual Heat Removal System</i> | 4 |
| LOHS | : <i>Loss Heat Sink</i> | 6 |
| NCL | : <i>Natural Circulation Loop</i> | 7 |
| DNP | : <i>Delay Neutron Precursor</i> | 9 |
| pcm | : <i>per cent mille</i> | 10 |
| VHVC | : <i>Vertical Heater Vertical Cooler</i> | 23 |
| NITF | : <i>Non-Isothermal Flow</i> | 23 |
| T _{mel} | : <i>Temperatur Melting</i> | 25 |
| T _{boil} | : <i>Temperatur Boiling</i> | 25 |
| T _{ref} | : <i>Temperatur Referensi</i> | 25 |
| T _S | : <i>Temperatur Sistem</i> | 25 |
| T _H | : <i>Temperatur Heater</i> | 25 |
| T _C | : <i>Temperatur Cooler</i> | 25 |
| P _{in} | : <i>Pressure inlet</i> | 25 |
| P _{w1,2,3,4,5} | : <i>Power 1,2,3,4,5</i> | 25 |
| TS _{1,2,3,4} | : <i>Temperatur Simulasi di titik 1,2,3,4</i> | 26 |
| P _{1,2} | : <i>Pressure di titik 1,2</i> | 26 |
| TC _{1,2,3,4} | : <i>Thermocouple 1,2,3,4</i> | 34 |

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi nuklir menjadi salah satu sumber energi yang paling diminati saat ini dikarenakan merupakan sumber energi yang besar dan bersih dibandingkan dengan energi *non-renewable* lainnya. Mengingat selain kebutuhan energi dunia yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, sektor energi juga menjadi pemasok dari tiga perempat emisi gas rumah kaca yang ada (IEA, 2021). Energi nuklir konvensional saat ini berasal dari reaksi fisi bahan radioaktif seperti Uranium-235 yang kadarnya hanya 0,7% di alam maka kemudian didesain reaktor modern yang memiliki fitur pembiakan Uranium-238 ataupun Thorium-232 (Suhaemi, 2018). Reaktor modern itu salah satunya *Molten Salt Reactor* (MSR) yang termasuk dari enam kandidat reaktor generasi IV yang dikembangkan oleh *the Generation IV Forum* (GIF) dengan kriteria aspek ekonomi, keselamatan, pengelolaan limbah yang baik serta tahan aturan *Non-Proliferation Treaty* (NPT) (Suhaemi, 2018; Zhang, *et al.*, 2018; Wulandari, *et al.*, 2019; Zuo, *et al.*, 2022).

Molten Salt Reactor (MSR) merupakan reaktor yang menggunakan garam fluoride sebagai pendinginnya dan satu-satunya jenis reaktor yang memiliki dua varian desain utama berbahan bakar cair (*liquid fuel*) dan berbahan bakar padat (*solid fuel*) (Sabharwall, *et al.*, 2019). Bahan bakar cair pada MSR terdiri dari campuran homogen elemen fissil seperti UF₄, PuF₃, dan atau elemen fertil ThF₄ pada reaktor berbahan bakar thorium, aktinida, dan *fluoride-based coolant salt* (Serp, *et al.*, 2014). MSR dapat beroperasi hingga temperatur 700°C hingga 750°C dan tekanan beroperasi mendekati tekanan atmosfer. Penelitian mengenai MSR berawal pada tahun 1950 dengan *Aircraft Reactor Experiment* (ARE) yang dilakukan oleh Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (Abram, 2002). Pada tahun 1960 ORNL

melakukan penelitian pertama dengan *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) dan berhasil mencapai kekritisannya lima tahun kemudian serta terkonfirmasi kelayakannya (Wang, *et al.*, 2013). Dibandingkan dengan tipe reaktor lainnya MSR memiliki reaktivitas negatif yang lebih kuat, dalam operasinya tidak membutuhkan tambahan bahan pembakar, memiliki efisiensi yang tinggi, dan stabilitas kimia yang baik (Ding, *et al.*, 2019). MSR memiliki kapasitas panas volumetrik yang tinggi, fluida perpindahan panas dengan titik didih tinggi, tekanan uap rendah, dan sistem keselamatan yang baik (Jeong, *et al.*, 2018).

Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) merupakan salah satu jenis MSR berbahan bakar thorium. Karena diketahui bahwa thorium menjadi bahan bakar nuklir alternatif yang ketersediannya tiga kali lebih banyak dibandingkan uranium alam, hal ini tentunya jika dapat dimanfaatkan memiliki banyak keuntungan. Dalam penelitian sebelumnya penggunaan bahan bakar thorium pada *Light Water Reactor* (LWR) menunjukkan karakteristik neutron yang lebih unggul daripada bahan bakar uranium dan plutonium, sehingga berpeluang untuk memiliki efisiensi lebih besar (Takaki, *et al.*, 2007). Proyek TMSR memiliki harapan sebagai perwujudan pemanfaatan thorium dan produksi hidrogen yang efektif dalam jangka waktu 20 sampai 30 tahun kedepan. Penelitian dan pengembangan TMSR dimulai pada tahun 2011 oleh China Academy of Science (CAS) yang kemudian proyek ini diserahkan kepada Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP). TMSR terbagi menjadi dua yakni TMSR *liquid fuel* (TMSR-LF) berkapasitas 2 MWt dan TMSR *solid fuel* (TMSR-SF) berkapasitas 10 MWt (Yamaguchi, *et al.*, 2017; Zhuang & Cao, 2018). Seperti halnya dengan tipe MSR lainnya, dua masalah keselamatan utama dari TMSR adalah pendinginan panas sisa dan pembekuan garam cair.

Pendinginan panas sisa maupun pembekuan garam cair berkaitan erat dengan studi termal-hidrolik khususnya proses perpindahan panas dalam reaktor. Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses pertukaran energi termal antara sistem fisis yang disebabkan oleh adanya perbedaan suhu. Dalam konteks reaktor nuklir, analisis mengenai perpindahan panas menjadi aspek yang sangat krusial dikarenakan berhubungan langsung dengan efisiensi reaktor, keandalan material, pengoptimalan

bahan bakar, desain sistem pendingin, dan keselamatan operasional reaktor nuklir. Pada operasi normal, panas residu biasanya diatur dengan aliran pendingin melalui sistem pompa (*forced circulation*). Namun, insiden Fukushima Dai'ichi pada bulan Maret 2011, yang disebabkan oleh *station blackout* (SBO) akibat terendahnya genset darurat setelah terjadinya tsunami di Jepang, menyoroti pentingnya kesiapan sistem pendingin dalam menghadapi situasi darurat (Jin, *et al.*, 2023). Kejadian ini mengakibatkan kegagalan sistem pendinginan panas residu yang bergantung pada pasokan listrik. Dampak yang signifikan dari kegagalan tersebut adalah melelehnya teras bahan bakar di tiga dari enam reaktor dan terjadinya kebocoran gas radioaktif (Xia, *et al.*, 2014). Kemudian dari insiden ini reaktor generasi baru di desain dengan fitur keselamatan pasif untuk mencegah kecelakaan yang sama terulang kembali.

TMSR-LF sebagai reaktor generasi IV sudah didesain dengan fitur keselamatan pasif yang mampu bekerja dalam keadaan darurat seperti halnya jika terjadi SBO. Pembuangan panas sisa pasif (*passive residual heat removal system*) yang sudah dirancang untuk memberikan pendinginan yang cukup untuk mencegah peningkatan suhu pada teras reaktor selama keadaan darurat, dan sistem pasif untuk membuang garam bahan bakar ke tangki pembuangan, yang akan langsung mematikan reaktor (Dai, 2017). Di antara berbagai metode pendinginan pasif, sirkulasi alami (*natural circulation*) adalah prinsip yang dapat diandalkan karena bisa dikendalikan oleh perbedaan suhu dan gaya gravitasi (Jeong, *et al.*, 2018). Dengan memanfaatkan perkembangan teknologi, keandalan dari sistem keselamatan pasif ini telah didemostrasikan melalui pendekatan komputasi dan diuji melalui eksperimen sebelum benar-benar diterapkan pada reaktor. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem keselamatan pasif ini telah bekerja dengan baik serta minim risiko kegagalannya.

Penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Jeong, *et al.*, (2018) telah memberikan kontribusi signifikan dalam pemahaman perpindahan panas sirkulasi alami pada MSR. Dalam penelitiannya, Jeong, *et al.*, (2018) menggunakan simulasi *computational fluid dynamic* (CFD) melalui *software* OpenFOAM dan studi kasusnya menekankan pada karakteristik perpindahan panas konveksi alami garam

cair dengan *internal heat generation* (IHG) dan menemukan bahwa kondisi pemasukan panas, seperti fluks panas eksternal yang menciptakan gradien suhu tinggi, IHG yang menghasilkan pola suhu merata, dan kondisi pemasukan panas gabungan yang sangat tergantung pada jumlah panas, memiliki dampak signifikan pada perpindahan panas konveksi alami dalam garam cair, hal inipun menekankan pentingnya mempertimbangkan karakteristik unik garam cair dan kondisi pemasukan panas saat merancang sistem garam cair. Kemudian eksperimen tentang studi karakteristik aliran pada penukar panas bidal (*thimble heat exchanger*) yang diaplikasikan pada sistem pembuangan panas sisa pasif atau *passive residual heat removal system* (PRHRS) yang bekerja pada MSR 2 MW dilakukan oleh Ding, *et al.*, (2019). Parameter utama yang diukur untuk mengevaluasi mekanisme kinerja aliran dan penurunan tekanan gesekan untuk aliran tunggal dan dua fase. Hasilnya korelasi tradisional lebih jauh dibandingkan data eksperimental penukar panas bidal dalam sistem. Selain itu, teramati juga bahwa osilasi periodik dapat terjadi selama proses operasi pada tekanan dan suhu relatif rendah. Korelasi yang divalidasi memberikan referensi yang berlaku dan efektif untuk operasi aktual dan analisis keselamatan PRHRS.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Tao, *et al.*, (2021) memperdalam analisis perpindahan panas konveksi alami dengan fokus pada PRHRS pada MSR menggunakan eksperimen pada tangki air dengan *sleder tube bundle*. Hasil penelitian Tao, *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa karakteristik perpindahan panas kondensor memiliki dampak signifikan pada distribusi suhu dan stratifikasi termal dalam tangki air pada sistem PRHRS MSR, dengan proses perpindahan panas konveksi alami melibatkan tiga tahap dan perlunya pertimbangan menyeluruh terhadap efek *tube bundle*, serta menyajikan korelasi baru yang relevan untuk tahap tunggal sebagai acuan dalam desain dan operasi sistem MSR. Nurhasanah, tahun 2022 melakukan analisis termal-hidrolik pada PRHRS MSR menggunakan FLUENT. Penelitiannya secara garis besar mensimulasikan bidal pendingin bayonet dari MSRE yang dirancang oleh ORNL yang digunakan untuk membuang panas sisa pasif dari teras reaktor. Dalam serangkaian pengujiannya, karakteristik utama mencakup dua loop sirkulasi alami dan bidal pendingin dengan penghalang

dua, dengan penemuan bahwa perpindahan panas ke sistem bidal pendingin bayonet terjadi, sedangkan perpindahan panas radiasi antara bidal dan tabung bayonet berperan signifikan, sementara penambahan diameter atau lebar penambah uap mempengaruhi sirkulasi alami dan laju alir massa, sementara distribusi suhu pada output steam riser tetap stabil antara 30°C sampai 40°C karena debit air yang cepat melalui *feed tube* dengan diameter yang sangat kecil, sehingga fase air tidak berubah.

Penelitian juga dilakukan oleh Wulandari, *et al.*, (2021), menyentuh karakteristik dasar dalam konteks perpindahan panas sirkulasi alami untuk sodium cair. Dalam penelitiannya, Wulandari, *et al.*, (2021) menggunakan model $1,5 \times 2$ (m) pada simulasi CFD dengan *software* COMSOL *Multiphysics* dan menemukan bahwa simulasi sirkulasi alami sodium cair dengan metode elemen hingga (*finite element method*) mengindikasikan kenaikan daya pemanasan dalam kondisi transien tetap dalam batas aman, dengan kesimpulan bahwa sistem tetap stabil dan hanya mengalami peningkatan suhu yang sesuai selama kondisi tunak maupun dalam kondisi transien. Pemahaman mendalam terhadap dinamika perpindahan panas melalui perspektif Wulandari, *et al.*, (2021) dapat memberikan wawasan tambahan yang relevan untuk pengembangan MSR.

Penelitian pada TMSR-LF berkapasitas 2 MW juga telah dilakukan untuk menganalisis dinamika reaktor dalam kondisi tunak maupun kondisi transien. Penelitian tersebut dilakukan oleh Cui, *et al.*, (2020) dengan mengabungkan teori *multi-group* dengan model *multi-channel* paralel menggunakan kode dinamika spasial internal TMSR-2D yang dikembangkan oleh SINAP. Studi ini menyelidiki distribusi medan aliran, suhu, fluks neutron, dan fraksi neutron tunda efektif, yang kemudian mengungkapkan bahwa dinamika aliran sangat penting dalam pengendalian reaktivitas. Namun dari penelitian Cui, *et al.*, (2020) maupun penelitian terdahulu yang membahas mengenai dinamika perpindahan panas belum ada yang melakukan penelitian khusus sirkulasi alami pada reaktor MSR berbahan bakar cair khususnya TMSR-LF. Padahal studi terhadap pembuangan sisa panas pasif termasuk hal yang penting seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Berdasarkan hal tersebut, pada penelitian ini akan di lakukan analisis terhadap perpindahan panas sirkulasi alami garam bahan bakar ($\text{LiF-BeF}_2\text{-UF}_4\text{-ThF}_4$) pada TMSR-LF menggunakan COMSOL *Multiphysics* untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas baik dari dinamika suhu, tekanan, dan kecepatan aliran fluidanya dalam keadaan sistem beroperasi normal maupun saat terjadi kecelakaan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah yang ada dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik perpindahan panas secara sirkulasi alami pada TMSR-LF selama operasi normal?
2. Bagaimana dinamika suhu, tekanan, dan kecepatan aliran dalam reaktor saat mengalami kecelakaan kehilangan pendingin atau *loss of heat sink accident* (LOHS)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini sebagai berikut.

1. Memahami dan menganalisis karakteristik perpindahan panas secara sirkulasi alami pada TMSR-LF ketika beroperasi normal.
2. Menganalisis dinamika suhu, tekanan, dan kecepatan aliran pada reaktor selama terjadinya LOHS.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dengan adanya penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian ini akan memberikan pemahaman mendalam mengenai mekanisme perpindahan panas dalam sirkulasi alami TMSR-LF, terutama saat terjadi LOHS.
2. Dengan memahami bagaimana perpindahan panas berperilaku selama kecelakaan, penelitian ini dapat memberikan kontribusi pada peningkatan keandalan sistem keamanan reaktor.

3. Penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi energi nuklir, khususnya dalam konteks reaktor garam lebur berbahan bakar cair.

1.5 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penelitian ini maka batasan masalahnya sebagai berikut.

1. Studi fokus pada TMSR-LF, reaktor eksperimental milik SINAP Cina.
2. Karakteristik termal dan fisik garam bahan bakar pada loop primer (LiF-BeF₂-UF₄-ThF₄).
3. Penekanan pada analisis perpindahan panas dalam konteks sirkulasi alami pada loop primer.
4. Kecelakaan yang dipertimbangkan adalah kecelakaan kehilangan pendingin (LOHS).
5. Geometri loop sirkulasi alami (*natural circulation loop* (NCL)) berbentuk persegi panjang dengan ukuran 2×4 m.
6. Modul yang digunakan non-isotermal dan alirannya dianggap laminar.
7. Pengembangan model numerik dilakukan dengan *software* COMSOL *Multiphysics* 6.2.

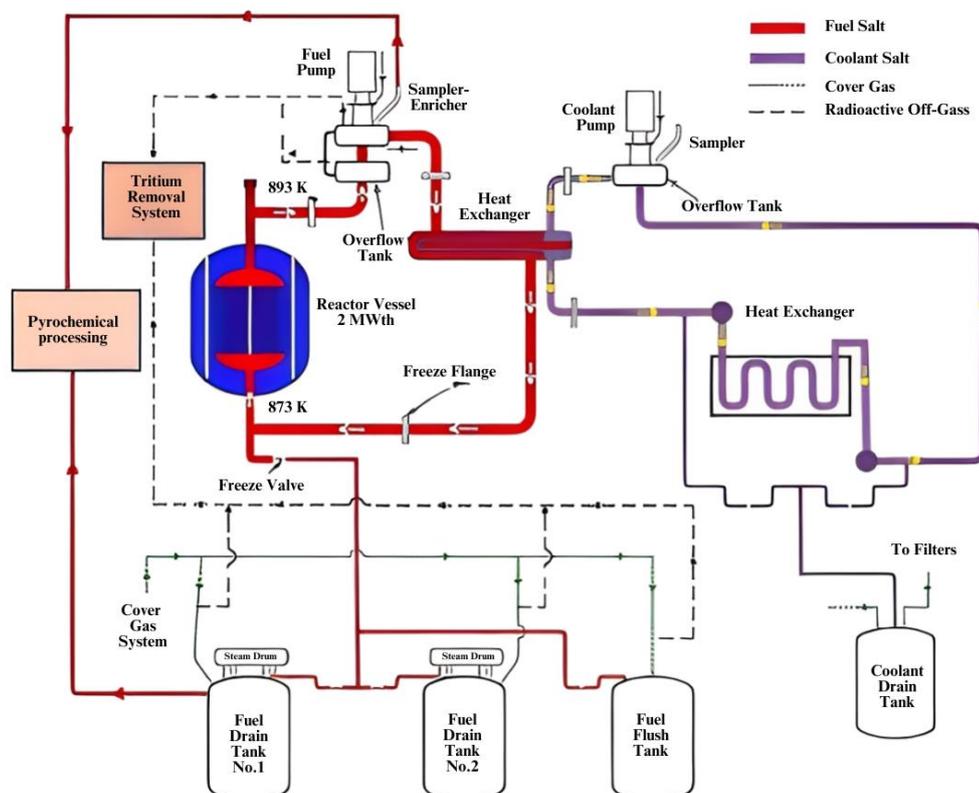
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Thorium Molten Salt Reactor Liquid Fuel (TMSR-LF)*

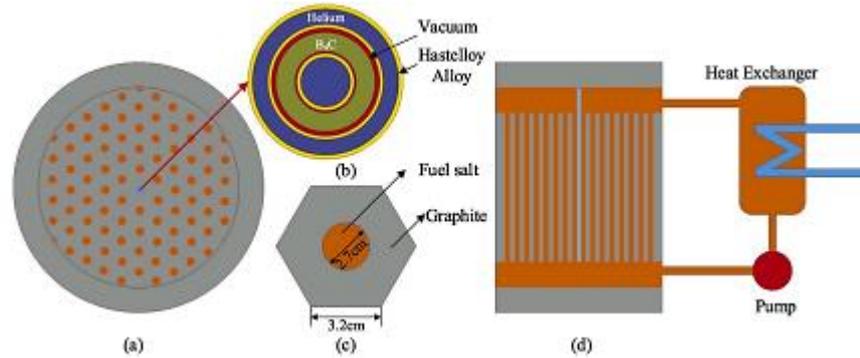
Thorium adalah bahan bakar yang melimpah di alam dan memiliki potensi untuk mendukung siklus bahan bakar yang berkelanjutan. Penggunaan thorium dalam bentuk garam lebur (cair) dalam reaktor nuklir memiliki beberapa kelebihan salah satunya peningkatan sifat perpindahan panas bahan bakar cair, karena bahan bakar garam secara efisien dapat membawa panas keluar dari inti reaktor, sehingga meningkatkan efisiensi termal. Selain itu, MSR dengan bahan bakar cair secara inheren lebih aman karena mekanisme pendinginan pasif dan kemampuan untuk beroperasi pada tekanan rendah, sehingga mengurangi risiko kecelakaan dan kebocoran.

Thorium Molten Salt Reactor Liquid Fuel (TMSR-LF) merupakan salah satu jenis reaktor garam cair berbahan bakar cair dengan daya sebesar 2 MWth. Proyek TMSR-LF diusulkan sebagai bagian dari proyek “Sistem Energi Nuklir *Thorium Molten Salt Reactor (TMSR)*” oleh China Academy of Science (CAS) untuk memanfaatkan thorium secara efektif. Reaktor TMSR-LF dikembangkan oleh Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP) dan merupakan langkah signifikan dalam proyek TMSR, yang bertujuan untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi teknologi reaktor garam cair. Pada TMSR-LF menggunakan bahan bakar berbasis fluorida yang bertindak sebagai bahan bakar dan pendingin di inti reaktor (LiF-BeF₂-UF₄-ThF₄). Desain reaktor TMSR-LF menyertakan grafit sebagai moderator dan memiliki konfigurasi unik di mana garam bahan bakar mengalir melalui saluran grafit di inti dan loop primer (Zhang, *et al.*, 2018; Cui, *et al.*, 2020).

Pada loop primer, garam bahan bakar mengalir ke setiap saluran grafit dari pleno bawah, tempat garam tersebut menyerap panas nuklir yang dihasilkan oleh reaksi fisi. Garam bahan bakar yang dipanaskan kemudian bergerak melalui saluran grafit, memindahkan panas ke garam pendingin sekunder melalui penukar panas primer. Proses pertukaran panas ini memungkinkan terjadinya transfer energi panas dari bahan bakar garam ke pendingin sekunder, yang kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan uap untuk produksi listrik (Dai, 2017). Saat garam bahan bakar bersirkulasi melalui loop primer, prekursor neutron tertunda (DNP) yang dihasilkan oleh reaksi fisi melayang melalui saluran grafit bersama dengan garam bahan bakar. Beberapa dari DNP ini mungkin meluruh dan melepaskan neutron di loop primer, sementara yang lain mungkin masuk kembali ke inti. Pergerakan DNP ini berkontribusi terhadap keseimbangan neutron secara keseluruhan dan pengendalian reaktivitas di dalam reaktor (Cui, *et al.*, 2020). Pada **Gambar 2.1.** merupakan gambar skematik dari TMSR-LF sedangkan pada **Gambar 2.2.** menunjukkan konfigurasi radial, geometri batang kendali (*control rod*), penggabungan grafit, dan diagram skematik loop primer.



Gambar 2.1. Skematik TMSR-LF (Dai, 2017)



Gambar 2.2. Bagian TMSR-LF: (a) Konfigurasi radial, (b) geometri batang kendali, (c) penggabungan grafit, (d) skematik loop primer (Cui, *et al.*, 2020)

Kemudian pada **Tabel 2.1.** menunjukkan fraksi neutron tunda pada grup ke- i (β_i) yang terukur dalam pcm dan konstanta peluruhan prekursor pada grup ke- i (λ_i) per waktu, sedangkan pada **Tabel 2.2.** hingga **Tabel 2.3.** menunjukkan parameter-parameter yang ada di TMSR-LF, data tersebut akan digunakan dalam penelitian.

Table 2.1. Fraksi neutron tunda dan konstanta peluruhan prekursor (Cui, *et al.*, 2020).

| Grup | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| λ_i/s^{-1} | 0,013 | 0,032 | 0,116 | 0,311 | 1,400 | 3,870 |
| β_i/pcm | 23,7 | 122,7 | 117,1 | 262,7 | 107,9 | 45,1 |

Table 2.2. Parameter desain TMSR-LF (Cui, *et al.*, 2020).

| Parameter | Nilai |
|---|---------|
| Daya inti (MWth) | 2 |
| Densitas daya (MW/m ³) | 7,54 |
| Temperatur <i>inlet</i> (K) | 873 |
| Temperatur <i>outlet</i> (K) | 893 |
| Laju aliran volume <i>inlet</i> (m ³ /s) | 0,02 |
| Tekanan aliran <i>inlet</i> (Pa) | 100.000 |
| Jari-jari inti aktif (m) | 0,55 |
| Tinggi inti aktif (m) | 1,1 |
| Jumlah perakitan | 333 |
| Ketebalan reflektor radial (m) | 0,4 |
| Ketebalan reflektor aksial (m) | 0,4 |
| Tinggi ruang atas (m) | 0,0709 |
| Tinggi ruang bawah (m) | 0,189 |
| Volume garam cair di inti reaktor (m ³) | 0,419 |
| Volume garam cair di ruang atas dan bawah (m ³) | 0,235 |
| Waktu sirkulasi bahan bakar dalam loop primer (s) | 55,25 |
| Koefisien umpan balik termal garam bahan bakar (pcm/K) | -5,89 |
| Koefisien umpan balik termal grafit (pcm/K) | -1,21 |

Table 2.3. Parameter komposisi dan sifat fisik pada loop primer, loop sekunder, dan grafit pada MSR (Cui, *et al.*, 2020).

| Parameter | Korelasi/nilai |
|---|-------------------------------|
| Komposisi garam bahan bakar (mol%) | |
| LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄ | 68%-28%-0,1%-3,9% |
| Komposisi garam pendingin (mol%) | |
| LiF-NaF-KF | 46,5%-11,5%-42% |
| Pengayaan ²³⁵ U | 16,2% |
| Kapasitas panas spesifik garam bahan bakar (J/kg.K) | 1431,6+0,2902T(K) |
| Massa jenis garam bahan bakar (kg/ m ³) | 3297,84-0,615832T(K) |
| Koefisien viskositas garam bahan bakar (Pa.s) | 0,0094 |
| Konduktivitas termal garam bahan bakar (W/m.K) | 0,3918+5,0E-4T(K) |
| Titik didih garam bahan bakar (K) | 1676 |
| Massa jenis grafit (kg/ m ³) | 1860 |
| Kapasitas panas spesifik grafit (J/kg.K) | 1709 |
| Konduktivitas termal grafit (W/m.K) | 90 |
| Suhu grafit yang diizinkan (K) | 1125 |
| Koefisien gesekan garam bahan bakar | |
| $Re \leq 3000$ | $f = 64/Re$ |
| $Re > 3000$ | $f = 0,3164/Re^{0,25}$ |
| Nomor Nusselt garam bahan bakar | |
| $Re \leq 3000$ | $Nu = 1,62(RePrL/H)^{0,33}$ |
| $Re > 3000$ | $Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,33}$ |

2.2 Aliran Non-Isotermal

Aliran non-isotermal merujuk pada pergerakan fluida di mana suhu tidak konstan. Jenis aliran ini melibatkan perubahan suhu yang memengaruhi sifat-sifat materi dari fluida, seperti densitas, dan viskositas, yang mengakibatkan pengaruh signifikan pada medan aliran. Interaksi antara aliran fluida dan transfer panas adalah kejadian umum dalam berbagai aplikasi seperti penukar panas, reaktor kimia, dan proses pendinginan. Bentuk dari aliran non-isotermal ada dua yakni laminar dan turbulen. Aliran laminar ditandai dengan jalur partikel fluida yang halus dan teratur. Aliran laminar disebut juga dengan aliran *streamline* atau aliran viskositas. Jenis aliran ini biasanya terjadi pada kecepatan rendah, dan fluida cenderung mengalir tanpa pencampuran lateral. Sedangkan aliran turbulen ditandai dengan pergerakan partikel-partikel fluida yang tidak beraturan. Aliran turbulen cenderung terjadi pada kecepatan lebih tinggi, viskositas rendah. Aliran fluida tidak mengalir dalam lapisan

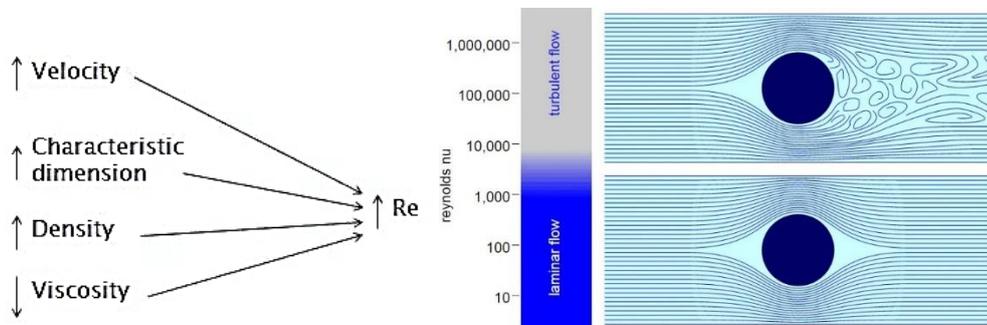
sejajar, pencampuran lateral sangat tinggi, dan terjadi gangguan antar lapisan. Turbulensi juga ditandai dengan resirkulasi, pusaran, dan keacakan.

Parameter yang tepat untuk memperkirakan kondisi aliran akan laminar atau turbulen dapat menggunakan bilangan Reynolds yang merupakan rasio gaya inersia terhadap gaya viskositas. Persamaan bilangan Reynolds ditunjukkan pada persamaan (2.1).

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.1)$$

Densitas fluida diwakili oleh ρ dan terukur dalam kilogram per meter kubik (kg/m^3), μ adalah viskositas dinamis fluida dalam Newton per meter kuadrat detik (N.s/m^2), U adalah kecepatan bulk fluida dalam meter per detik (m/s), dan L merupakan panjang karakteristik aliran dalam meter (m).

Ketika gaya viskositas dominan (aliran lambat, Re rendah) cukup untuk menjaga semua partikel fluida tetap sejajar, maka alirannya laminar. Ketika gaya inersia mendominasi gaya viskositas (ketika fluida mengalir lebih cepat dan Re lebih besar), maka alirannya bersifat turbulen (Nuclear Power, 2022). Hal ini dapat terlihat pada **Gambar 2.3**.

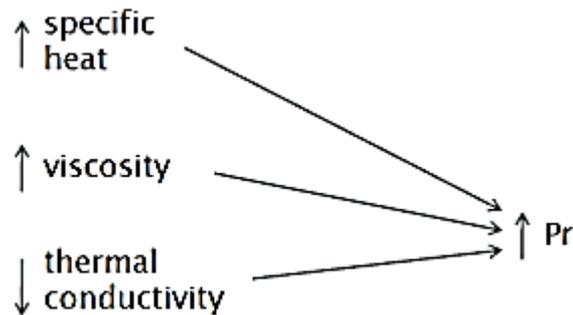


Gambar 2.3 Parameter Bilangan Reynolds dan Bentuk Alirannya (Nuclear Power, 2022)

Selain bilangan Reynolds terdapat juga bilangan Prandtl yang merupakan rasio difusivitas momentum terhadap difusivitas termal. Nilai dari bilangan Prandtl yang terbesar $Pr \gg 1$ dan yang terkecil $Pr \ll 1$. Difusivitas momentum, atau biasa disebut dengan viskositas kinematik, menunjukkan ketahanan material terhadap aliran geser dalam kaitannya dengan kepadatan. Artinya bilangan Prandtl dapat dituliskan sebagai persamaan (2.2).

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/(C_p/\rho)} = \frac{\mu \cdot \rho}{k} \quad (2.2)$$

Densitas fluida ρ terukur dalam satuan kilogram per meter kubik (kg/m^3), μ adalah viskositas dinamis fluida dalam satuan Newton per meter kuadrat detik ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$), α adalah difusivitas panas dalam satuan meter persegi per detik (m^2/s), k adalah konduktivitas termal dalam satuan Watt per meter Kelvin (W/mK), dan C_p merupakan spesifik kapasitas panas pada tekanan konstan dalam satuan Joule per kilogram Kelvin ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$). Parameter yang mempengaruhi bilangan Prandtl dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Parameter Bilangan Prandtl (Nuclear Power, 2022)

Hubungan antara bilangan Reynolds dengan bilangan Prandtl yaitu bilangan Nusselt yang dapat ditulis sebagai persamaan (2.3).

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = f(Re_L, Pr) \quad (2.3)$$

Koefisien perpindahan panas h terukur dalam satuan kilogram per meter kubik (kg/m^3), L adalah panjang karakteristik aliran dalam satuan meter (m), k adalah konduktivitas panas fluida dalam satuan Watt per meter Kelvin (W/mK), Re_L adalah bilangan Reynolds yang dihitung dengan panjang karakteristik L , dan Pr adalah bilangan Prandtl.

Sesuai dengan **Tabel 2.3** aliran laminar dengan nilai $Re \leq 3000$ maka persamaan bilangan Nusselt ditunjukkan pada persamaan (2.4).

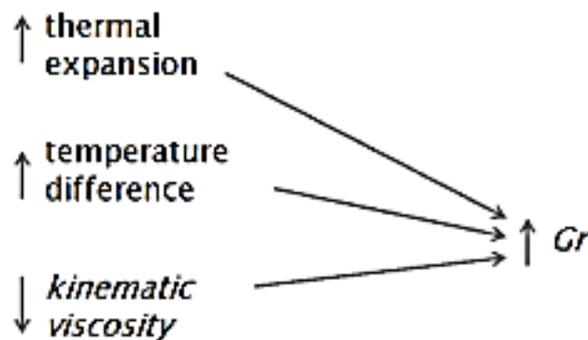
$$Nu = 1,62(RePrL/H)^{0,33} \quad (2.4)$$

Bilangan Nusselt ini menggambarkan rasio energi panas yang dikonveksikan ke fluida dengan energi panas yang dialirkan di dalam fluida.

Kemudian perbandingan antara gaya apung terhadap gaya viskositas yang bekerja pada fluida pada batas kecepatan didefinisikan sebagai bilangan Grashof. Persamaannya bilangan Grashof diberikan sebagai persamaan (2.5).

$$Gr_L = \frac{g\rho(\rho_{ext}-\rho_s)L^3}{\mu^2} \quad (2.5)$$

Pada persamaan ini, ρ mewakili densitas fluida dalam satuan kilogram per meter kubik (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi dalam satuan meter per detik kuadrat (m/s^2), ρ_{ext} merupakan densitas aliran bebas dalam satuan kilogram per meter kubik (kg/m^3), ρ_s adalah densitas permukaan panas dalam satuan kilogram per meter kubik (kg/m^3), L adalah skala panjang dalam satuan meter (m), dan μ adalah viskositas dinamis fluida dalam satuan Newton per meter kuadrat detik (N.s/m^2). Parameter yang dapat mempengaruhi nilai bilangan Grashof ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Parameter Bilangan Grashof (Nuclear Power, 2022)

2.3 Hukum Konservasi Massa

Hukum konservasi massa menetapkan bahwa massa tidak dapat diciptakan atau dimusnakan. Dinyatakan bahwa massa suatu benda atau sekumpulan benda tidak pernah berubah seiring berjalannya waktu, tidak peduli bagaimana bagian-bagian penyusunnya mengatur ulang dirinya.

2.3.1 Persamaan Kontinuitas

Kekekalan massa dalam dinamika fluida secara matematis diekspresikan oleh persamaan kontinuitas yang menyatakan bahwa laju perubahan massa di dalam volume kendali sama dengan semua laju aliran massa yang masuk ke dalam volume kendali dikurangi semua laju aliran massa yang keluar dari volume kendali (Todreas & Kazimi, 1990a). Pada kasus tiga dimensi persamaannya seperti persamaan (2.6).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} (dxdydz) &= \rho u_x (dydz) - \left[\rho u_x + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_x) dx \right] (dydz) + \rho u_y (dxdz) \\ &\quad - \left[\rho u_y + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u_y) dy \right] (dxdz) + \rho u_z (dxdy) \\ &\quad - \left[\rho u_z + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) dz \right] (dxdy) \end{aligned} \quad (2.6)$$

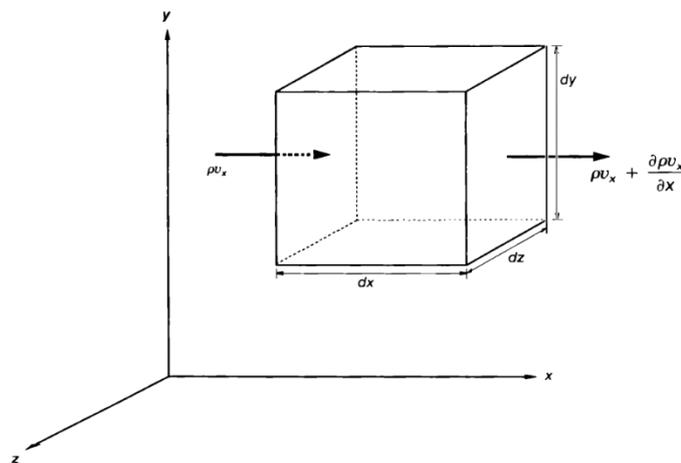
Sedangkan terkhusus dalam penelitian ini, kasus yang ditinjau merupakan dua dimensi maka persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai persamaan (2.7).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u_y) = 0 \quad (2.7)$$

Kemudian persamaan (2.7) dapat ditulis dalam persamaan aljabar vektor menjadi persamaan (2.8)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.8)$$

ρ adalah densitas fluida (kg/m^3), \mathbf{u} adalah vektor kecepatan (m/s), dan t adalah waktu (s). **Gambar 2.6** menunjukkan bagaimana aliran massa masuk dan keluar dari volume kendali yang ditinjau dalam arah sumbu- x .



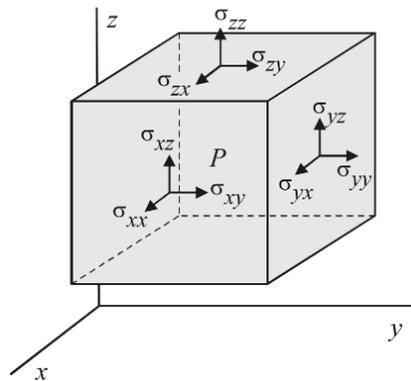
Gambar 2.6 Komponen aliran massa dalam arah sumbu- x (Todreas & Kazimi, 1990a)

2.3.2 Persamaan Navier-Stokes

Persamaan Navier-Stokes adalah persamaan diferensial parsial yang mendeskripsikan perilaku aliran fluida. Ini menggabungkan hukum konservasi massa (yang diwakili oleh persamaan kontinuitas) dengan hukum konservasi momentum untuk mendapatkan persamaan yang lebih lengkap (Batchelor, 1967; Hariyanto, *et al.*, 2021). Jumlah semua gaya eksternal yang bekerja pada volume kendali sama dengan laju aliran bersih momentum linier keluar dari permukaan kendali melalui aliran massa ditambah laju perubahan momentum linier dalam volume kendali (Cengel & M.Cimbala, 2014). Persamaannya ditunjukkan pada persamaan (2.9).

$$\Sigma \mathbf{F} = \int_{CV} \rho \mathbf{g} dV + \int_{CS} \sigma_{ij} \cdot \mathbf{n} dA = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) dV + \int_{CS} (\rho \mathbf{V}) \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dA \quad (2.9)$$

Pada persamaan di atas σ_{ij} didefinisikan sebagai tegangan (gaya per satuan luas) dalam arah- j yang bekerja pada permukaan yang normalnya dalam arah- i . Sebagai contoh σ_{xy} didefinisikan sebagai positif untuk tegangan yang menunjuk ke arah y pada permukaan normal yang berada di arah- x seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7** di bawah ini.



Gambar 2.7 Komponen tensor tegangan dalam koordinat Cartesian

Meninjau kasus 2D maka persamaan persamaan navier-stokes dapat ditulis terhadap sumbu- x (persamaan (2.10)) dan terhadap sumbu- y (persamaan (2.11)).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_x^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u_x u_y) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho g_x \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_y u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u_y^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \rho g_y \quad (2.11)$$

di mana

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \\ \tau_{yy} &= 2\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)\end{aligned}$$

Pada persamaan (2.10) sampai persamaan (2.11), ρ merupakan densitas (kg/m^3), T adalah suhu absolut (K), \mathbf{u} adalah vektor kecepatan (m/s), \mathbf{K} adalah tensor tegangan kental, t adalah waktu (s), μ adalah viskositas dinamis sedangkan τ_{ij} adalah viskositas tensor tegangan, p adalah tekanan (Pa), g_x dan g_y adalah percepatan gravitasi (m/s^2).

2.4 Dinamika Perpindahan Panas

Dinamika perpindahan panas (*heat transfer dynamics*) adalah bidang penelitian yang berkaitan dengan pemahaman dan analisis perubahan suhu serta distribusi energi dalam suatu sistem. Dinamika perpindahan panas mencakup pemahaman tentang bagaimana suhu berubah seiring waktu, interaksi antar material, serta faktor-faktor yang memengaruhi transfer panas, seperti karakteristik geometris, sifat termal material, dan kondisi batas. (Moran, *et al.*, 2003). Proses ini melibatkan transfer panas dari suatu medium ke medium lainnya, yang dapat terjadi melalui konduksi, konveksi, dan radiasi (Halliday, *et al.*, 2010).

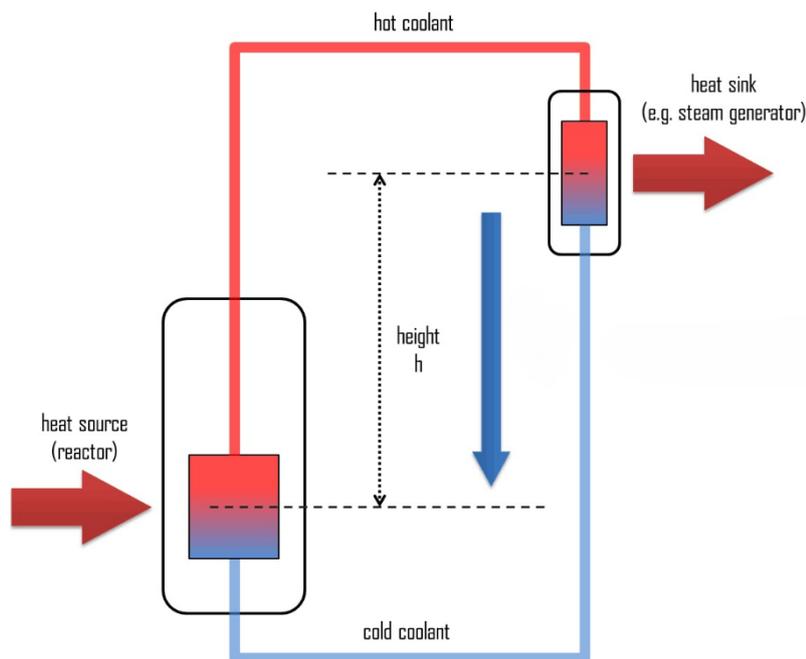
Persamaan dari dinamika perpindahan panas fluida pada kasus dua dimensi (2D) dapat dituliskan sebagai persamaan (2.12).

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{q} \quad (2.12)$$

Pada persamaan (2.12) suku $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ mempresentasikan perubahan energi internal setiap waktu. Suku $\rho C_p \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)$ mempresentasikan transport panas akibat pergerakan fluida dalam arah sumbu x dan y . Suku $k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$ mewakili

perpindahan panas karena konduksi panas dalam arah sumbu x dan y . Sedangkan suku \dot{q} memperhitungkan setiap pembangkit panas internal yang ada di fluida. C_p adalah spesifik kapasitas panas pada tekanan konstan ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$), ρ adalah densitas (kg/m^3), T adalah suhu absolut (K), u_x dan u_y adalah kecepatan sumbu x dan y (m/s), t adalah waktu (s), \dot{q} adalah sumber panas (W/m^3), dan k adalah konduktivitas panas fluida ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

Karena penelitian ini akan terfokus pada sirkulasi alami garam bahan bakar di loop primer maka sebagai gambaran sistemnya seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Sirkulasi Alami dalam Loop Tertutup (Nuclear Power, 2022)

Sirkulasi alami adalah sirkulasi fluida di dalam sistem perpipaan atau kolam terbuka akibat perubahan densitas yang disebabkan oleh perbedaan suhu. Sirkulasi alami tidak memerlukan alat mekanis seperti pompa misalnya dalam menjaga alirannya. Pada pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) proses sirkulasi alami juga disebut sebagai proses konveksi alami. Kasus perpindahan panas konveksi alami dari dinding bidang vertikal ke cairan yang berdekatan, variabel akan berbeda secara signifikan dari yang telah digunakan dalam kasus sebelumnya (*forced circulation*). Kecepatan tidak lagi termasuk dalam kelompok variabel, karena merupakan hasil

dari efek yang terkait dengan transfer energi. Variabel baru yang akan dimasukkan dalam analisis adalah akuntansi aliran fluida. Variabel ini dapat ditemukan dengan mempertimbangkan hubungan gaya apung dengan perbedaan densitas karena pertukaran energi (Welty, *et al.*, 2008). Koefisien ekspansi termal β diberikan oleh sebagai persamaan (2.13).

$$\beta = -(1/\rho)[(\rho - \rho_0)/(T - T_0)] \quad (2.13)$$

Menggunakan pendekatan Boussinesq perubahan densitas fluida akibat perubahan suhu dituliskan sebagai persamaan (2.14).

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad (2.14)$$

ρ_0 adalah bulk densitas fluida, ρ adalah densitas di dalam lapisan yang dipanaskan, dan $\Delta T = (T - T_0)$, merupakan perbedaan suhu antara cairan yang dipanaskan dan nilai bulk (Todreas & Kazimi, 1990b; Masterson, 2020). Gaya angkat (F) per unit volume diberikan pada persamaan (2.15)

$$F = (\rho_0 - \rho)g \quad (2.15)$$

$$F = \rho_0\beta g\Delta T \quad (2.16)$$

Konveksi alami digunakan jika gerakan dan pencampuran ini disebabkan oleh variasi densitas akibat perbedaan suhu di dalam fluida. Biasanya massa jenisnya berkurang karena kenaikan suhu menyebabkan fluida naik. Proses konveksi alami ini sering digunakan dalam sistem pemanasan dan pendinginan, serta berbagai aplikasi teknik lainnya.

2.5 *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan cabang ilmu mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan komputasi untuk memprediksi aliran fluida dan fenomena terkait seperti perpindahan panas dan massa, perubahan fasa, dan reaksi kimia (Date, 2005). Dalam bukunya, Coker (2001) mendefinisikan CFD sebagai sebuah simulasi berbasis komputasi tentang analisis sistem yang berupa aliran fluida, perpindahan energi, reaksi kimia maupun pembakaran. CFD merupakan bentuk analisis yang memberikan wawasan tentang pemecahan masalah

yang kompleks dan memungkinkan uji efek aliran fluida pada desain tanpa harus melakukan eksperimen dunia nyata. Dengan otomatisasi prinsip-prinsip matematika seperti Persamaan Diferensial Parsial dan persamaan Navier-Stokes, CFD membantu mensimulasikan aspek-aspek seperti aerodinamika, perpindahan panas, dan aliran turbulen pada model 3D. **Gambar 2.9** menunjukkan tampilan awal program COMSOL *Multiphysics* versi 6.2 yang merupakan salah satu *software* CFD.



Gambar 2.9 Tampilan Program COMSOL *Multiphysics* versi 6.2

Proses analisis CFD melibatkan tiga tahap utama, yaitu pra-pemrosesan (*pre-processing*), pemrosesan (*processing*), dan pasca-pemrosesan (*post-processing*). *Pre-processor* melibatkan langkah-langkah seperti menentukan geometri sistem yang akan disimulasikan, menentukan grid, mengidentifikasi fenomena fisik dan kimia di dalam sistem, menetapkan sifat fisik dan kimia fluida untuk simulasi, dan menentukan kondisi batas yang sesuai. Elemen kedua, yaitu solver, melibatkan tiga metode numerik dalam CFD, yaitu metode *finite difference*, metode elemen hingga, dan metode spektral. Langkah-langkah perhitungan melibatkan pendekatan terhadap aliran yang tidak diketahui secara sederhana, pemotongan diskritisasi menjadi beberapa elemen dengan persamaan aljabar, dan solusi dari persamaan tersebut. Elemen ketiga, *post-processor*, digunakan untuk mengevaluasi berbagai solusi yang telah dihasilkan pada tahap solver. Solusi ini dapat berupa gambar vektor, gambar permukaan 2D, atau 3D. Penggunaan CFD yang efektif terjadi

ketika pengguna memahami fenomena fisik dan kimia pada model tersebut. Diperlukan teknik pemodelan yang baik untuk membuat asumsi-asumsi sehingga kompleksitas masalah dapat disederhanakan. Pengetahuan tentang algoritma solusi numeris juga diperlukan, termasuk konsep matematika seperti konvergensi, konsistensi, dan stabilitas.

COMSOL *Multiphysics* dapat menganalisis berbagai aplikasi fisika dan teknik, terutama yang melibatkan fenomena multifisika. COMSOL dapat dioperasikan pada bermacam sistem operasi seperti Windows, Macintos, ataupun Linux. COMSOL *Multiphysics* mampu menangani permasalahan persamaan diferensial parsial ganda. Pertimbangan yang mendasar dari penggunaan COMSOL dalam penelitian ini. Pertama, COMSOL dikembangkan sebagai program yang ramah pengguna, seperti memudahkan dalam memasukkan model, parameter koefisien, kondisi batas, kondisi awal, dan hubungannya dengan fenomena multifisika lainnya. Kedua, COMSOL didasarkan pada platform MATLAB, sehingga seluruh kegunaan pemrograman yang diperlukan untuk menyusun model dengan tingkat kesulitan tinggi tersedia. Ketiga, dasar program ini dibangun berdasarkan gambar geometri dan fenomena yang terjadi pada model tersebut.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian bersifat dapat dilakukan di manapun karena menggunakan data sekunder dan berbasis komputasi. Sedangkan rentang waktu penelitian ini dilakukan dari bulan Maret 2024 sampai dengan Agustus 2024, sebagaimana yang telah tertera pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1. Jadwal Kegiatan Penelitian.

| No. | Kegiatan | Bulan Ke- | | | | | |
|-----|---------------------------|-----------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. | Studi Literatur | ■ | | | | | |
| 2. | Pengambilan Data Sekunder | ■ | ■ | | | | |
| 3. | Pembuatan Simulasi | | | ■ | ■ | ■ | |
| 4. | Analisis Hasil | | | ■ | ■ | ■ | |
| 5. | Laporan Akhir | | | | | ■ | ■ |

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

1. Laptop Acer Aspire 3 A314-32

Spesifikasi:

- Prosesor: Intel Celeron *Quad Core Processor* N4120
- Memori: 4GB DDR4
- Penyimpanan: 256 GB SSD
- Sistem Operasi: Windows 11 (64 Bit)

Deskripsi:

Laptop Acer Aspire 3 A314-32 digunakan sebagai platform komputasi untuk menjalankan perangkat lunak simulasi, termasuk COMSOL *Multiphysics* 6.2. Dengan spesifikasi yang mencakup *prosesor quad core* dan penyimpanan SSD serta sistem operasi Windows 11 yang baru, laptop ini mampu menangani perhitungan numerik yang diperlukan dalam analisis simulasi.

2. *Software COMSOL Multiphysics 6.2*

Deskripsi:

COMSOL *Multiphysics* 6.2 adalah perangkat lunak simulasi multifisika yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis berbagai fenomena fisika dan proses dalam berbagai bidang ilmu, termasuk mekanika fluida, transfer panas, elektromagnetisme, dan lainnya. Versi 6.2 dari perangkat lunak ini menyediakan alat yang diperbarui dan fungsionalitas yang ditingkatkan untuk memfasilitasi penelitian dan pengembangan di berbagai bidang rekayasa dan ilmu pengetahuan. Dalam penelitian ini, COMSOL *Multiphysics* 6.2 digunakan untuk melakukan simulasi perpindahan panas pada sirkulasi alami garam bahan bakar (LiF-BeF₂-UF₄-ThF₄) dalam reaktor nuklir, memungkinkan analisis distribusi suhu, tekanan, dan kecepatan aliran fluida dalam operasi normal dan kecelakaan (LOHS).

3.3 Algoritma Penyelesaian Kasus Perpindahan Panas Sirkulasi Alami

Penyelesaian kasus penelitian tentang perpindahan panas sirkulasi alami yang dimodelkan dalam simulasi COMSOL *Multiphysics* melalui serangkaian tahapan sebagai berikut:

3.3.1 Pemilihan Studi Fisika *Non Isothermal Flow*

Simulasi loop sirkulasi alami satu fase dimodelkan dalam bentuk 2D dengan variasi pemanas vertikal dan pendingin vertikal (VHVC). Sistem sirkulasi alami garam bahan bakar (LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄) dimodelkan menggunakan studi fisika aliran non-isothermal (NITF) dengan aliran laminar dan kompresibilitas lemah untuk menggambarkan aliran sirkulasi alami. Studi pemecahan yang digunakan adalah studi ketergantungan terhadap waktu (*time dependent*). Studi NITF dipilih karena

memuat tiga persamaan penting untuk menyelesaikan masalah perpindahan panas sirkulasi alami: persamaan kontinuitas, persamaan Navier-Stokes, dan persamaan dinamika perpindahan panas. Persamaan-persamaan ini dalam *software* COMSOL *Multiphysics* dituliskan sebagai:

Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.1)$$

Persamaan kontinuitas pada persamaan (3.1) menggambarkan bagaimana perubahan densitas massa di suatu titik tetap merupakan hasil dari perubahan vektor kecepatan massa.

Persamaan Navier-Stokes

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \quad (3.2)$$

Persamaan Navier-Stokes pada persamaan (3.2) menyatakan bahwa perubahan momentum partikel-partikel fluida ditentukan oleh gaya viskositas internal dan gaya tekanan eksternal yang bekerja pada fluida. Persamaan ini menjelaskan keseimbangan gaya-gaya yang mempengaruhi fluida.

Persamaan Dinamika Perpindahan Panas

$$d_z \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{vd} \quad (3.3)$$

Persamaan dinamika perpindahan panas pada persamaan (3.3) menggambarkan bahwa laju perubahan energi panas sebanding dengan laju transfer energi melalui konduksi dan laju pembentukan energi panas.

3.3.2 Memasukan Parameter

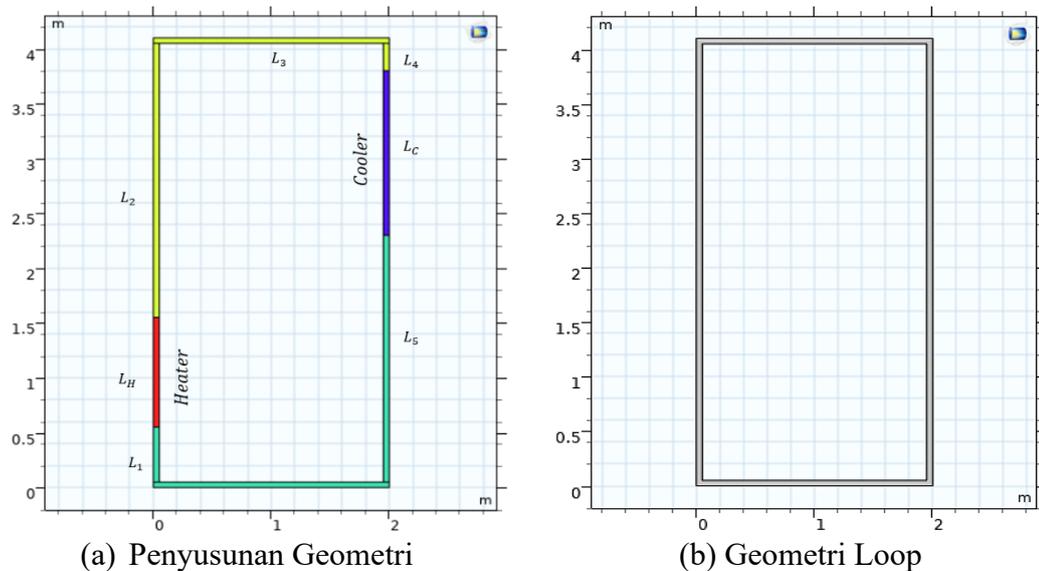
Parameter pada reaktor TMSR seperti pada **Tabel 3.2** akan digunakan untuk penelitian, yang kemudian dimasukkan pada *parameter interface* program CFD COMSOL *Multiphysics*. Parameter ini merupakan data sekunder yang diambil dari studi literatur.

Tabel 3.2 Parameter reaktor TMSR-LF.

| Parameter | Nilai | Referensi |
|--|------------------------|-----------------------------------|
| Titik lebur garam bahan bakar (T_{mel}) | 753 K | (Rosenthal, <i>et al.</i> , 1968) |
| Titik didih garam bahan bakar (T_{boil}) | 1676 K | (Cui, <i>et al.</i> , 2020) |
| Suhu referensi (T_{ref}) | 773 K | $T_{mel}+20$ K |
| Suhu sistem (T_S) | 873 K | (Cui, <i>et al.</i> , 2020) |
| Suhu Pemanas (T_H) | 893 K | |
| Suhu pendingin (T_C) | 887 K | |
| Tekanan inlet (P_{in}) | 10^5 Pa | (Cui, <i>et al.</i> , 2020) |
| Percepatan gravitasi (g) | $9,8$ m/s ² | |
| Input daya pemanas 1 (Pw1) | 150,1 W | |
| Input daya pemanas 2 (Pw2) | 250,1 W | |
| Input daya pemanas 3 (Pw3) | 350,1 W | |
| Input daya pemanas 4 (Pw4) | 450,1 W | |
| Input daya pemanas 5 (Pw5) | 550,1 W | |

3.3.3 Pembuatan Geometri

Membuat geometri, yaitu geometri loop primer yang nantinya sebagai loop sirkulasi alami (NCL). Geometri dibuat dalam 2D yang tersusun atas persegi panjang berbagai ukuran (**Gambar 3.1 (a)**). Dimensi ukurannya dapat dilihat pada **Tabel 3.3**. Lengan dingin (*cold leg*) ditandai dengan warna tosca, lengan panas (*hot leg*) warna kuning, pemanas (*heater*) merah, pendingin (*cooler*) biru tua. Kemudian bagian-bagian tersebut disatukan menjadi persegi panjang ukuran 2×4 (m) (**Gambar 3.1 (b)**).

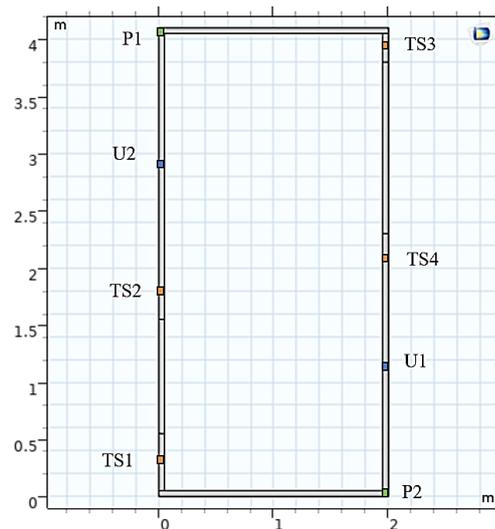
**Gambar 3.1** Geometri Loop Sirkulasi Alami

Tabel 3.3 Dimensi dari Loop Sirkulasi Alami.

| Parameter | Nilai (m) |
|-----------|-----------|
| L_1 | 0,5 |
| L_H | 1,00 |
| L_2 | 2,5 |
| L_3 | 2,00 |
| L_4 | 0,25 |
| L_C | 1,50 |
| L_5 | 2,25 |
| Diameter | 0,05 |

3.3.4 Menentukan Titik-Titik Pengukuran

Simulasi dengan *software* COMSOL *Multiphysics* bertujuan untuk menampilkan distribusi temperatur, kecepatan aliran, dan tekanan fluida dalam loop sirkulasi alami. Oleh karena itu, titik-titik pengukuran untuk besaran-besaran fisika tersebut ditentukan dan didefinisikan pada loop sirkulasi alami. Lokasi titik-titik pengukuran temperatur (T), kecepatan aliran (U), dan tekanan (P) ditunjukkan seperti pada **Gambar 3.2**. Titik pengukuran temperatur (T) di tempatkan 10 cm sebelum pemanas (TS1), sesudah pemanas (TS2), sebelum pendingin (TS3) dan sesudah pendingin (TS4). titik pengukuran kecepatan aliran (U) di tempatkan 1,1 m setelah pendingin (U1) dan setelah pemanas (U2), sedangkan untuk titik pengukuran tekanan di tempatkan pada sudut kiri atas P1 (setelah pemanas) dan sudut kanan bawah P2 (setelah pendingin) loop sirkulasi alami.

**Gambar 3.2** Letak Titik-Titik Pengukuran

3.3.5 Pemilihan Material

Material yang digunakan berupa garam lebur 68 LiF - 28 BeF₂ - 0,1 ThF₄ - 3,9 UF₄ (*liquid*) [mol%]. Namun karena material tersebut tidak tersedia pada *libraries* COMSOL *Multiphysics* maka pada *material interface* dipilih *blank material* dan kemudian diisikan sifat-sifat termofisika dari garam seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3.4**. Kemudian dengan fungsi *piecewise* digunakan untuk menetapkan nilai yang berbeda di berbagai interval dari sifat material tersebut. Interval-interval ini tidak saling tumpang tindih dan tidak ada celah, sehingga kontinuitas dan keakuratan model tetap terjaga.

Tabel 3.4 Parameter komposisi dan sifat termofisika pada LiF - BeF₂ - ThF₄ - UF₄ (Cui, *et al.*, 2020).

| Parameter | Nilai |
|--|----------------------|
| Komposisi LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄ (mol%) | 68%-28%-0,1%-3,9% |
| Kapasitas panas spesifik garam bahan bakar (J/kg.K) | 1431,6+0,2902T(K) |
| Massa jenis garam bahan bakar (kg/ m ³) | 3297,84-0,615832T(K) |
| Koefisien viskositas garam bahan bakar (Pa.s) | 0,0094 |
| Konduktivitas termal garam bahan bakar (W/m.K) | 0,3918+5,0E-4T(K) |

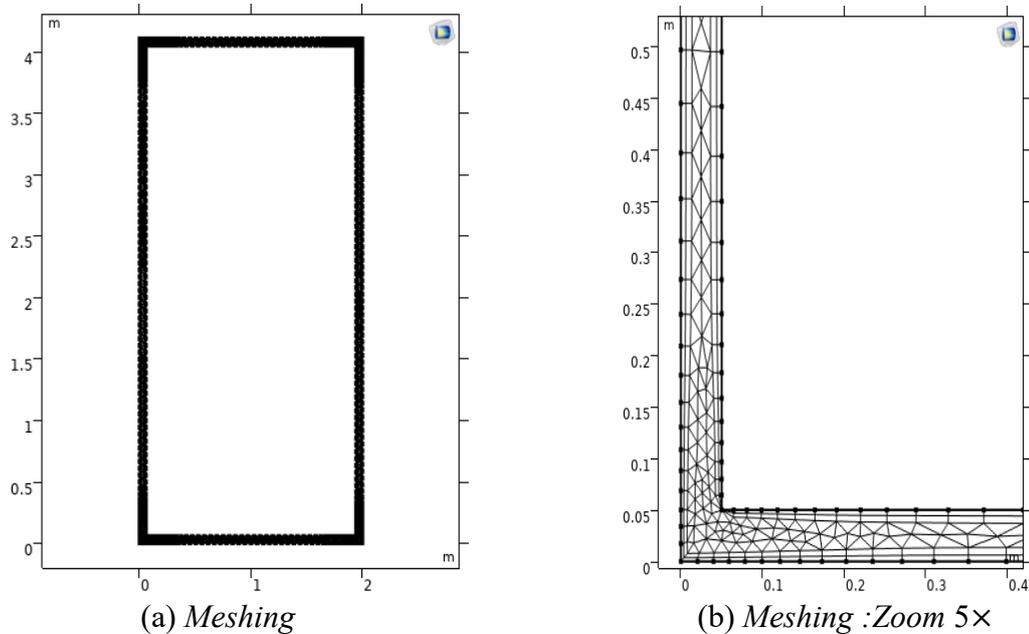
3.3.6 Kondisi Batas (*Boundary*) dan Kondisi Awal (*Initial Value*)

Kondisi batas yang digunakan dalam penelitian ini adalah kondisi batas tipe Dirichlet sehingga variabel terikatnya (suhu) telah ditentukan. Penentuan batasan model bertujuan untuk menyederhanakan pemodelan dengan memasukkan asumsi-asumsi yang telah ditetapkan sebelumnya, yaitu persamaan-persamaan kontinuitas, persamaan navier-stokes, dan persamaan dinamika perpindahan panas dalam kondisi operasi normal maupun saat terjadi kecelakaan LOHS. Skema normal akan digunakan untuk memperoleh kecepatan aliran fluida pada kondisi normal. Kemudian hasil ini akan digunakan untuk memodelkan skema LOHS. Hal tersebut karena pemodelan akan mensimulasikan keadaan fluidanya yang berupa dinamika suhu, tekanan, dan kecepatan aliran.

3.3.7 Pembuatan *Meshing*

Meshing atau pembentukan *mesh* memisahkan permukaan atau volume geometri menjadi beberapa elemen. Variabel yang diperlukan dihitung di seluruh elemen ini

menggunakan persamaan diferensial parsial. Selama *meshing*, permukaan 2D direpresentasikan menggunakan kumpulan segitiga dan kuadrilateral. Ukuran *meshing* yang lebih kecil memberikan hasil yang lebih akurat, tetapi juga memperpanjang waktu proses simulasi. Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan ukuran *meshing fine*. Hal ini ditunjukkan seperti pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Meshing

3.3.8 Perhitungan

Metode penyelesaian yang digunakan oleh *solver* pada COMSOL umumnya secara *interpreter* sehingga yang diselesaikan secara baris perbaris secara berurutan. Penyelesaian dilakukan dengan looping dan bergantung terhadap waktu yang telah ditetapkan hingga program berhenti saat kriteria konvergensi telah tercapai, di mana hasil output persamaan sebelumnya menjadi dasar pada input persamaan selanjutnya.

Pada penelitian ini dilakukan dua *study step*. *Step* pertama dalam waktu 5000 s hanya menyelesaikan modul *heat transfer in fluid* untuk mendapatkan model reaktor dalam keadaan *startup*. Kemudian *step* kedua dilakukan dari waktu 5000 s sampai 7000 s dengan menyelesaikan modul NITF untuk mencapai keadaan kritis. Sehingga pertama kali yang diselesaikan adalah persamaan kontinuitas, kemudian persamaan navier-stokes, dan yang terakhir persamaan dinamika perpindahan panas.

3.3.9 Hasil

Sesuai dengan tujuan utama dari dilakukannya penelitian ini yaitu, untuk mengetahui perpindahan panas garam bahan bakar (LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄) pada sistem sirkulasi di loop primer reaktor tipe TMSR-LF yang kemudian hasil simulasi berupa dinamika suhu, tekanan, dan kecepatan aliran, baik dalam operasi normal maupun kecelakaan dengan *software* COMSOL *Multiphysics*.

3.3.10 Benchmarking Experiment

Eksperimen *Benchmark* merupakan alat penting yang digunakan untuk memvalidasi metode numerik dan model komputasi. Pada penelitian ini digunakan perbandingan dari eksperimen yang dilakukan oleh Hariyanto, *et al.*, (2021) mengenai simulasi efek loop geometri pada sistem sirkulasi alami reaktor nuklir tingkat lanjut. 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 3.5**.

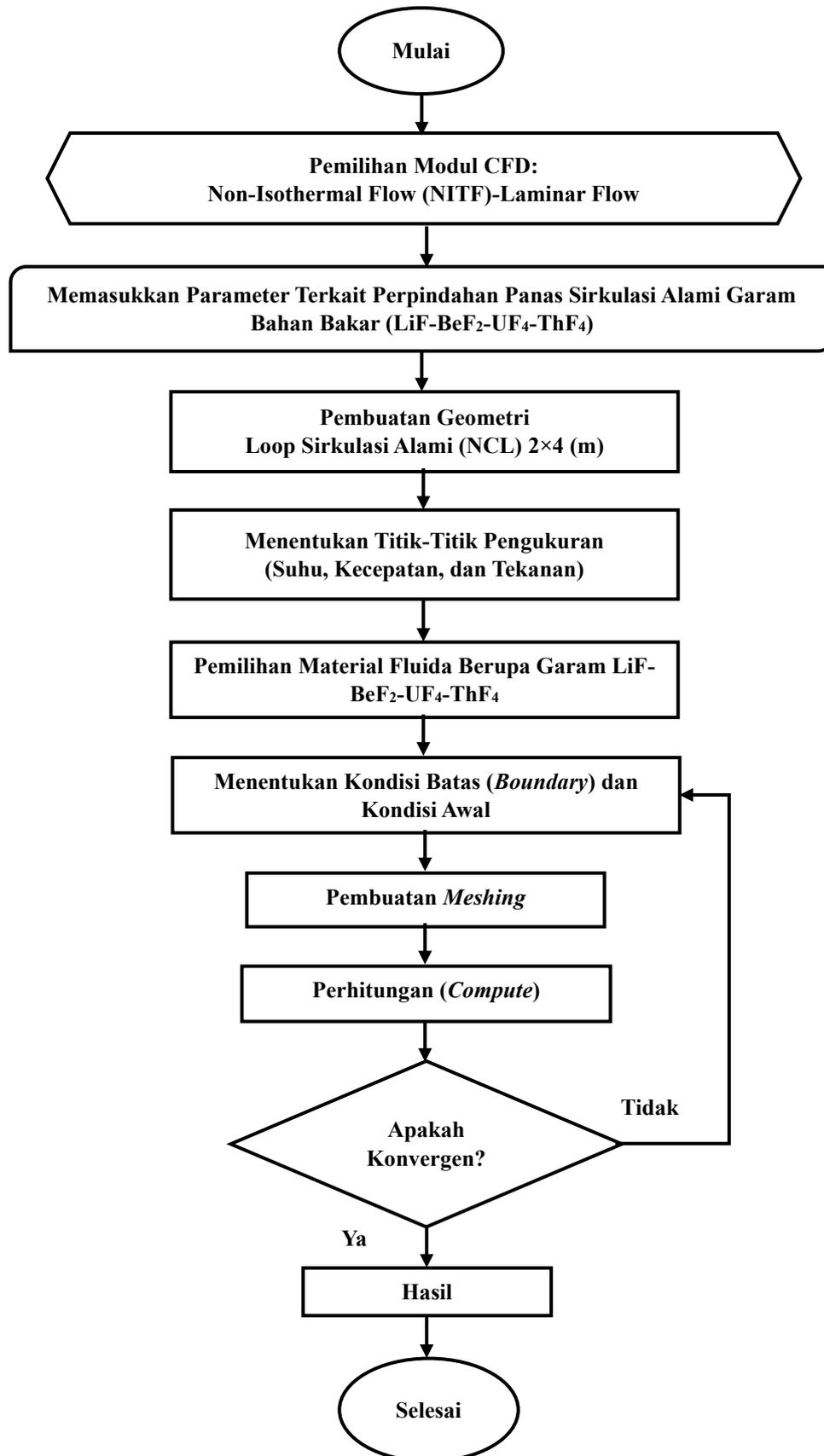
Tabel 3.5 Parameter *Benchmarking*.

| Parameter input | Nilai |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Material | H ₂ O [<i>liquid</i>] |
| Kecepatan (u) | 0 m/s |
| Tekanan (P) | 1 atm |
| Suhu Sistem (T _S) | 28 °C |
| Suhu Pemanas (T _H) | 47,25 °C |
| Suhu Pendingin (T _C) | 42,25 °C |
| Percepatan gravitasi (g) | 9,8 m/s |
| Input daya (Pw) | 150,1 W |

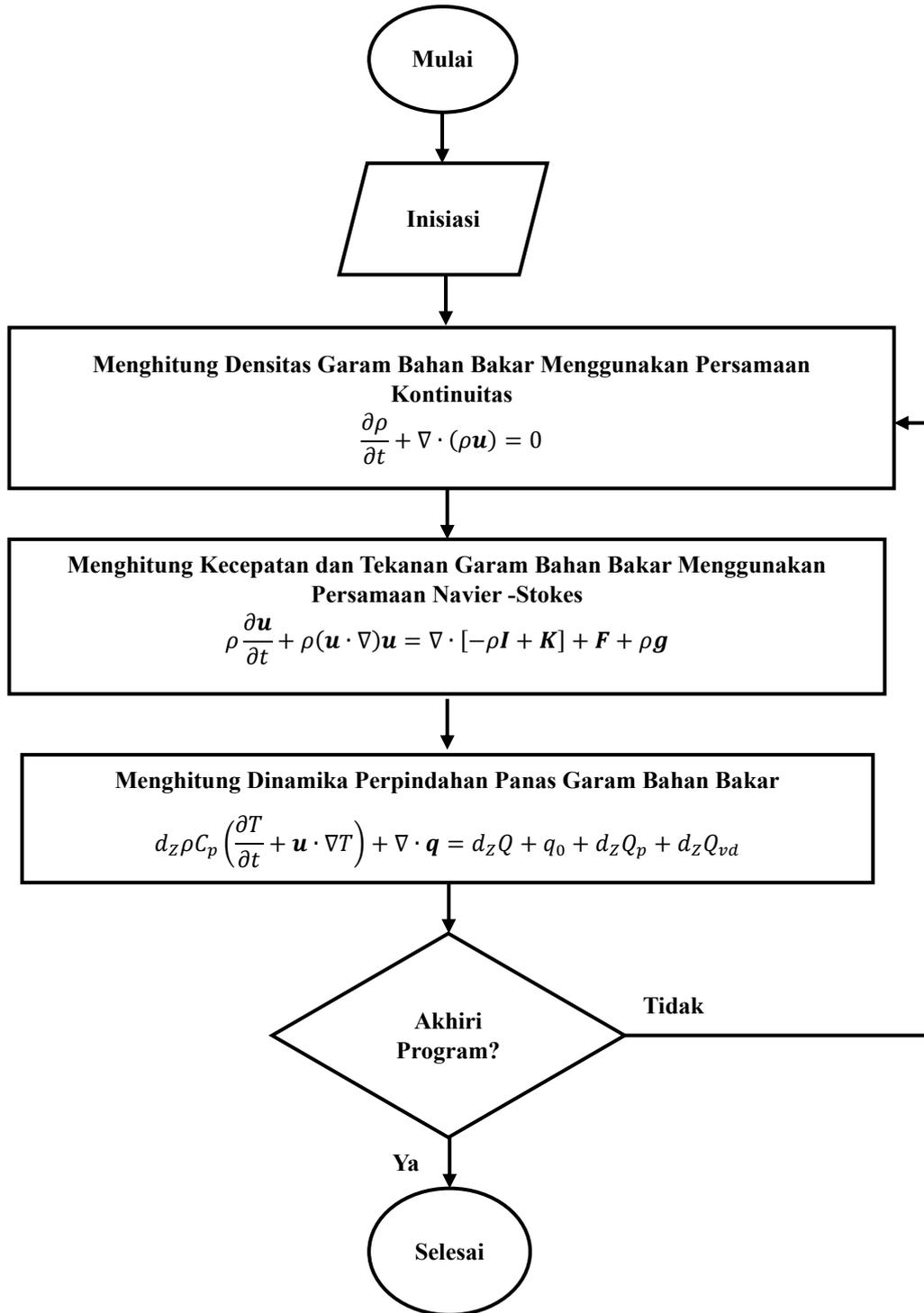
3.3.11 Diagram Alir

Diagram alir algoritma penyelesaian kasus perpindahan sirkulasi alami garam bahan bakar *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR) menggunakan COMSOL *Multiphysics* ditunjukkan pada **Gambar 3.4**. sedangkan pada **Gambar 3.5** menunjukkan bagaimana perhitungan program simulasi COMSOL *Multiphysics* menyelesaikan kasus yaitu dimulai dari modul laminar berupa penyelesaian persamaan kontinuitas yang kemudian mendapatkan perubahan densitas terhadap

waktu yang digunakan untuk mencari kecepatan aliran dan tekanan menggunakan persamaan navier-stokes dan yang terakhir ke modul *heat transfer in fluid* berupa persamaan dinamika perpindahan panas seperti yang telah dijelaskan pada point **3.3.1** bahwa laju perubahan energi panas sebanding dengan laju transfer energi melalui konduksi dan laju pembentukan energi panas.



Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan Simulasi COMSOL *Multiphysics*



Gambar 3.5 Diagram Perhitungan Program Simulasi COMSOL *Multiphysics*

V. SIMPULAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, dapat diambil beberapa kesimpulan berikut.

1. Penelitian ini menunjukkan bahwa pada kondisi operasi normal, suhu tertinggi di sekitar pemanas mencapai 892 K, sedangkan suhu terendah di sekitar pendingin adalah 890 K. Selama kondisi LOHS, suhu sistem menjadi seragam di sekitar 893 K, menunjukkan stabilisasi suhu meskipun terjadi kecelakaan.
2. Kecepatan aliran fluida stabil di sekitar 0,007 m/s pada kondisi normal, menunjukkan sirkulasi alami yang efektif. Selama LOHS, kecepatan aliran menurun sebesar 0,002 m/s setelah pendingin dan 0,003 m/s setelah pemanas, yang menandakan penurunan efisiensi.
3. Tekanan pada kondisi normal menunjukkan gradien stabil dari -9882 Pa hingga 99327 Pa. Saat LOHS, tekanan meningkat menjadi -9822 Pa setelah pemanas dan menurun menjadi 99326 Pa setelah pendingin, menandakan perubahan distribusi tekanan akibat kecelakaan.
4. Sirkulasi alami tetap berfungsi selama LOHS, namun efisiensinya menurun. Meskipun suhu tetap dalam batas aman, diperlukan strategi tambahan untuk memastikan keselamatan reaktor dalam jangka panjang selama kondisi kecelakaan.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah memodifikasi model dengan memasukkan aliran turbulen dan analisis multifase. Pendekatan ini akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang dinamika perpindahan panas dan perilaku fluida, serta mengungkap detail yang lebih mendalam mengenai

karakteristik perpindahan panas dan aliran fluida pada TMSR-LF. Integrasi aliran turbulen dan analisis multifase diharapkan dapat memperkaya pemahaman tentang interaksi kompleks dalam sistem, serta meningkatkan akurasi data yang diperoleh.

DAFTAR PUSTAKA

- Abram, T., 2002. *A Technology Roadmap for Generation-IV Nuclear Energy Systems*, United States: United States Department of Energy.
- Batchelor, G., 1967. *An Introduction To Fluid Dynamics*. New York: Cambridge University Press.
- Cengel, Y. A. & M.Cimbala, J., 2014. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. 3 ed. New York: MC Graw Hill.
- Coker, A. K., 2001. *Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design*. 2nd ed. Texas: Gulf Professional Publishing.
- Cui, Y., Cui, L., Xia, S.P., Chen, J.G. & Cai, X.Z., 2020. Dynamic Analysis for a 2 MW Liquid-Fueled Molten Salt Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, Volume 126, No.1, pp. 103381(1-13).
- Dai, Z., 2017. Thorium Molten Salt Reactor Nuclear Energy System (TMSR). In: *Molten Salt Reactors and Thorium Energy*. s.l.:Woodhead Publishing Series in Energy, No, 17, pp. 531-540.
- Date, A. W., 2005. *Introduction to Computational Fluida Dynamics*. New York: Cambridge University Press.
- Ding, T., Meng, Z., Chen, K., Fan, G. & Yan, C., 2020. Experimental Study on Flow Characteristic of Thimble Heat Exchanger Applied to Passive Residual Heat Removal System of Molten Salt Reactor. *Applied Thermal Engineering*, Volume 165, No. 87, pp. 114619(1-19).
- Durbin, P. A. & Medic, G., 2007. *Fluid Dynamics with a Computational Perspective*. Cambrige: Cambrige University.
- Ghurri, A., 2014. *Dasar-Dasar Mekanika Fluida*. Denpasar: Universitas Udayana.
- Giancoli, D. C., 2014. *FISIKA: Prinsip dan Aplikasi*. 7 ed. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Gong, W., Wang, X., Huang, C., Wang, X. & Fu, Y., 2024. Layout Optimization for The High-Temperature Nuclear Loop with Movable Equipment Based on TMSR-LF1. *Annals of Nuclear Energy*, Volume 199, No. 16, pp.110362 (1-19).

- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J., 2010. *Fisika Dasar, Edisi Ketujuh Jilid 1*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Hariyanto, D., Permana, S. & Suprijadi, 2021. Experimental and Simulation Approach of The Loop Geometry Effect on The Natural Circulation System of The Advanced Nuclear Reactor. *International Journal of Energy Research*, Volume 45, No.8, pp. 11892-11903.
- IEA, 2021. *Net Zero by 2050 A Roadmap for The Global Energy Sector*, Prancis: International Energy Agency.
- Jeong, Y. S., Seo, S. B. & Bang, I. C., 2018. Natural Convection Heat Transfer Characteristics of Molten Salt with Internal Heat Generation. *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 129, No. 15, pp. 181-192.
- Jin, I. J., Lim, D. Y. & Bang, I. C., 2023. Deep-learning-based System-scale Diagnosis of a Nuclear Power Plant with Multiple Infrared Cameras. *Nuclear Engineering and Technology*, Volume 55, No.2, pp. 493-505.
- Masterson, R. E., 2020. *Nuclear Reactor Thermal Hydraulics An Introduction to Nuclear Heat Transfer and Fluid Flow*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Munson, B. R. & DeWitt, D. P., 2003. *Introduction to Thermal System Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons, Inc..
- Nuclear Power, 2022. *Nuclear Engineering*. [Online]
Available at: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/>
[Accessed 6 Maret 2024].
- Nurhasanah, S., 2022. Analisis Termalhidrolik Sistem Pembuangan Panas Residu Pasif pada Molten Salt Reactor Menggunakan FLUENT. In: *TESIS*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Rosenthal, M. W., Briggs, R. B. & Kasten, P. R., 1968. *Molten-Salt Reactor Program Semiannual Progress Report For Period Ending August 31*, Oak Ridge: ORNL.
- Sabharwall, P., Aufiero, M. & Fratoni, M., 2019. Heat Transfer and Computational Fluid Dynamics for Molten Salt Reactor Technologies. Dalam: *Advances of Computational Fluid Dynamics in Nuclear Reactor Design and Safety Assesment*. Cambridge: Woodhead Publishing, No.11, pp. 809-839.
- Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpéch, S., Feynberg, O., Ghetta, V., Heuer, D., Holcomb, D., Ignatiev, V., Kloosterman, J.L. & Luzzi, L., 2014. The Molten Salt Reactor (MSR) in Generation IV: Overview and Perspectives. *Progress in Nuclear Energy*, Volume 77, No.7, pp. 309-319.

- Sugiyono, 2019. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung:Alfabeta.
- Suhaemi, T., 2018. Prospek Desain Reaktor Berbahan Bakar Cair Molten Salt Reactor. *Seminar Nasional Teknoka*, Volume 3, No.1, pp. 64-69.
- Takaki., N., Permana., S. & Sekimoto, H., 2007. *Feasibility of Water Cooled Thorium Breeder Reactor Based on LWR Technology*. Boise, Idaho, USA, Proceedings of GLOBAL 2007 conference on advanced nuclear fuel cycles and systems.
- Tao, D., Guang-liang, Y., Guang-ming, F., Chun-Ping, T., Zhao-Ming, M., Kal-lun, C., Chang-Qi, Y. & Hong-li, C., 2021. Heat Transfer Evaluation of Natural Convection Outside the Condenser in Passive Residual Heat Removal System of Molten Salt Reactor. *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 28, No. 273, pp. 101611(1- 11).
- Todreas, N. E. & Kazimi, M. S., 1990a. *Nuclear System I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. London: Hemisphere Publishing Corporation.
- Todreas, N. E. & Kazimi, M. S., 1990b. *Nuclear System II: Elements of Thermal Hydraulic Design*. London: Hemisphere Publishing Corporation.
- Wang, C., Zhang, D., Qiu, S., Tian, W., Wu, Y. & Su, G., 2013. Study on the characteristics of the sodium heat pipe in passive residual heat removal system of molten salt reactor. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 265, No. 69, pp.691-700.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E. & Rorrer, G. L., 2008. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Wulandari, R., Permana, S. & Suprijadi, 2019. *Studi Awal Karakteristik Transfer Panas pada Sistem Sirkulasi Alami untuk Molten Salt Reaktor (MSR) Menggunakan Metode COMSOL Multhyphysics*. s.l.:Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains (SNIPS 2019).
- Wulandari, R., Permana, S. & Suprijadi, 2021. Basic Analysics on Heat Transfer Phenomena in Natural Circulation for Liquid Sodium. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 2072, No.1, pp. 1-9.
- Xia, G., Peng, M. & Du, X., 2014. Calculation Analysis on the Natural Circulation of a Passive Residual Heat Removal System for IPWR. *Annals of Nuclear Energy*, Volume 72, No. 23, pp. 189-197.
- Yamaguchi, C. H., Stefani, G. L. & Santos, T. A., 2017. *A General Overview of Generation IV Molten Salt Reactor (MSR) and The Use of Thorium as Fuel*. Belo Horizonte, International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2017).

- Zhang, D., Liu, L., Liu, M., Xu, R., Gong, C., Zhang, J., Wang, C., Qiu, S. & Su, G., 2018. Review of Conceptual Design and Fundamental Research of Molten Salt Reactors in China. *International Journal of Energy Research*, Volume 42, No. 5, pp. 1834-1848.
- Zhuang, K. & Cao, L., 2018. A Study of The Impact of Mixed Mode of Fuel Salt in Plenum on Steady-State Performance of Channel-Type Molten Salt Reactor. *Annals of Nuclear Energy*, Volume 122, No 22, pp. 207-216.
- Zuo, X.D., Cheng, M.S., Dai, Y.Q., Yu, K.C. & Dai, Z.M., 2022. Flow Field Effect of Delayed Neutron Precursors in Liquid-Fueled Molten Salt Reactors. *Nuclear Science and Techniques*, Volume 33, No. 8, pp. 96(1-17).