

**PENGARUH ALIRAN TURBULEN TERHADAP KINERJA
PERPINDAHAN PANAS PADA SIRKULASI ALAMI *THORIUM MOLTEN*
SALT REACTORS (TMSR) MENGGUNAKAN *COMSOL MULTIPHYSICS***

(Tesis)

Oleh

Dina Mauliyani Qoriah
2127041005



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

ABSTRAK

PENGARUH ALIRAN TURBULEN TERHADAP KINERJA PERPINDAHAN PANAS PADA SIRKULASI ALAMI *THORIUM MOLTEN SALT REACTORS* (TMSR) MENGGUNAKAN *COMSOL MULTIPHYSICS*

Oleh

DINA MAULIYANI QORIAH

Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh aliran turbulen terhadap proses perpindahan panas pada sistem sirkulasi alami *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR) yang dianalisis menggunakan perangkat lunak *COMSOL Multiphysics*. Penelitian bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran turbulen dalam sistem sirkulasi alami mencakup pengaruh suhu, laju aliran, tekanan, dan perbedaan utama antara aliran laminar dengan aliran turbulen pada TMSR. Simulasi menggunakan geometri *loop* sirkulasi alami (NCL) dengan ukuran $3\text{ m} \times 6\text{ m}$ dan diameter $0,2\text{ m}$ yang direpresentasikan dalam 2D dengan variasi pemanas vertikal dan pendingin vertikal serta garam bahan bakar $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$. Karakteristik aliran turbulen ditandai oleh pembentukan beragam vorteks yang menciptakan pencampuran fluida dengan lebih intensif, memungkinkan transfer energi panas lebih efektif antara fluida dan dinding, baik saat pemanasan maupun pendinginan. Kecepatan fluida pada aliran turbulen sebesar $0,0000143578\text{ m/s}$ setelah pemanas dan $0,00045758\text{ m/s}$ setelah pendingin. Sedangkan pada aliran laminar sebesar $0,008\text{ m/s}$ setelah pemanas dan $0,007\text{ m/s}$ setelah pendingin. Kecepatan fluida pada aliran turbulen jauh lebih rendah dari aliran laminar karena energi kinetik yang didistribusikan secara acak oleh vorteks mengurangi kecepatan fluida secara keseluruhan dan menyebabkan pengurangan kecepatan lokal di beberapa area. Tekanan pada aliran turbulen berada pada nilai $-1886,03\text{ Pa}$, sedangkan pada aliran laminar sebesar -9888 Pa . Perbedaan ini terjadi karena aliran turbulen memiliki sifat pencampuran yang intensif dan distribusi energi kinetik lebih merata, sehingga mengurangi gradien tekanan di sepanjang sistem.

Kata kunci : perpindahan panas, sirkulasi alami, turbulen, TMSR

ABSTRACT

EFFECT OF TURBULENT FLOW ON HEAT TRANSFER PERFORMANCE IN NATURAL CIRCULATION THORIUM MOLTEN SALT REACTORS (TMSR) USING COMSOL MULTIPHYSICS

By

DINA MAULIYANI QORIAH

The effect of turbulent flow on the heat transfer process in the Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) natural circulation system analyzed using COMSOL Multiphysics software has been conducted. The research aims to investigate the characteristics of turbulent flow in the natural circulation system including the effect of temperature, flow rate, pressure, and the main differences between laminar flow and turbulent flow in TMSR. The simulation used a natural circulation loop (NCL) geometry with a dimensions $3\text{ m} \times 6\text{ m}$ and diameter 0.2 m represented in 2D with vertical heating and vertical cooling variations and LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄ fuel salt. The characteristics of turbulent flow are characterized by the formation of various vortices that create more intensive fluid mixing, enabling more effective heat energy transfer between the fluid and the wall, both during heating and cooling. The fluid velocity in turbulent flow is 0.0000143578 m/s after heating and 0.00045758 m/s after cooling. While in laminar flow it is 0.008 m/s after heating and 0.007 m/s after cooling. The fluid velocity in turbulent flow is much lower than laminar flow because the kinetic energy distributed randomly by vortices reduces the overall fluid velocity and causes local velocity reduction in some areas. The pressure in turbulent flow is at a value of -1886.03 Pa , while in laminar flow it is -9888 Pa . This difference occurs because turbulent flow has intensive mixing properties and the distribution of kinetic energy is more even, thus reducing the pressure gradient along the system.

Keywords: heat transfer, natural circulation, turbulence, TMSR

**PENGARUH ALIRAN TURBULEN TERHADAP KINERJA
PERPINDAHAN PANAS PADA SIRKULASI ALAMI THORIUM MOLTEN
SALT REACTORS (TMSR) MENGGUNAKAN COMSOL MULTIPHYSICS**

Oleh

DINA MAULIYANI QORIAH

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER SAINS

Pada

**Program Studi Magister Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Tesis

**: PENGARUH ALIRAN TURBULEN
TERHADAP KINERJA PERPINDAHAN
PANAS PADA SIRKULASI ALAMI
THORIUM MOLTEN SALT REACTORS
(TMSR) MENGGUNAKAN COMSOL
MULTIPHYSICS**

Nama Mahasiswa

: Dina Mauliyani Qoriah

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2127041005

Program Studi

: Magister Fisika

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP 19751219 200012 2 003

Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.
NIP 19631228 198610 2 001

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Fisika

Ketua Program Studi Magister Fisika

Arif Surtano, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP 19710909 200012 1 001

Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP 19751219 200012 2 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

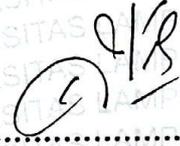
Ketua

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



Sekretaris

: **Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.**



Penguji

Bukan Pembimbing

: **1. Prof. Drs. Posman Manurung,
M.Si., Ph.D.**



2. Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dr. Eng. Heni Satria, S.Si., M.Si.

NIP 19711001 200501 1 002



3. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP 19640326 198902 1 001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : **26 Mei 2025**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis yang berjudul “Pengaruh Aliran Turbulen Terhadap Kinerja Perpindahan Panas pada Sirkulasi Alami *Thorium Molten Salt Reactors* (TMSR) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*” 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 yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar Pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa tesis ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 26 Mei 2025



J. Hawii
Dina Mauliyani Qoriah
NPM. 2127041005

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Dina Mauliyani Qoriah, lahir di Ambarawa, 10 Juli 1997. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Sumedi dan Ibu Mudalina. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 1 Ambarawa tahun 2009, SMP Negeri 1 Pringsewu tahun 2012, dan SMA Negeri 1 Ambarawa pada tahun 2015. Penulis melanjutkan pendidikan sarjana di prodi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung pada tahun 2015 – 2021. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di prodi Magister Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur beasiswa pada tahun 2021.

MOTTO

“Jangan buang waktu untuk mengejar kupu-kupu. Perbaiki kebunnya, dan kupu-kupu akan datang”

~ Mario Quintana ~

“Jika kamu menginginkan pelangi, kamu harus tahan dengan hujan”

~ Dolly Parton ~

PERSEMBAHAN

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

Kedua Orang Tuaku

Ayah Sumedi & Bunda Mudalina

Terima kasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesan putrinya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di Tingkat Universitas sebagai magister

Keluarga Besar & Teman-teman

Terima kasih atas segala dukungan yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam keadaan suka maupun duka

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Bismillaahirrahmaanirrahim,

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Pengaruh Aliran Turbulen Terhadap Kinerja Perpindahan Panas pada Sirkulasi Alami *Thorium Molten Salt Reactors* (TMSR) Menggunakan *COMSOL Multiphysics*” sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) di Program Studi Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Penulis menyadari dalam penulisan dan penyusunan tesis ini masih terdapat kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk menuju suatu yang lebih baik. Semoga tesis ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi kita semua.

Bandar Lampung, 26 Mei 2025

Penulis

SANWACANA

Alhamdulillah, penulis menyadari bahwa tesis ini dapat terselesaikan dengan baik berkat dorongan, bantuan dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada,

1. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku pembimbing pertama yang selalu membimbing dan mengarahkan dalam proses penyusunan tesis ini;
2. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. selaku pembimbing kedua yang telah memberikan saran dan masukan sehingga penulisan tesis ini menjadi lebih baik;
3. Bapak Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku pembahas pertama yang senantiasa memberikan bimbingan selama masa perkuliahan dan mengarahkan dalam proses penyusunan tesis ini;
4. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc. selaku pembahas kedua yang senantiasa mengarahkan dalam proses penyusunan tesis ini;
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung;
6. Bapak Drs. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung;
7. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung;
8. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.IPM, ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung;
9. Dosen, staff dan karyawan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam;
10. Ayah, Bunda, Kakak dan Adik yang telah memberikan dukungan doa semangat, motivasi dan kasih sayang kepada penulis;
11. Teman-teman Magister Fisika dan semua pihak yang selalu memberi semangat selama perkuliahan dan penyusunan tesis ini.

Semoga Allah SWT membalas dengan yang lebih baik dan menjadi pemberat amal di akhirat nanti, aamiin.

Bandar Lampung, 26 Mei 2025

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian	7
1.4. Manfaat Penelitian	7
1.5. Batasan Masalah.....	7

II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. <i>Thorium Molten Salt Reactors</i>	8
2.2. Aliran Non-Isotermal Turbulen.....	9
2.3. Dinamika Perpindahan Panas.....	15
2.4. CFD pada COMSOL <i>Multiphysics</i> 6.2	18
III. METODE PENELITIAN	
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	22
3.3. Algoritma Penyelesaian Kasus.....	22
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4. 1. Validasi Model Simulasi	32
4. 2. Simulasi Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar pada Kondisi Normal	34
V. SIMPULAN	
5. 1. Simpulan	49
5. 2. Saran.....	50

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3. 1. Alat dan bahan penelitian.....	22
Tabel 3. 2. Parameter reaktor TMSR	25
Tabel 3. 3. Dimensi dari <i>loop</i> sirkulasi alami	26
Table 3. 4. Parameter komposisi dan sifat termofisika pada LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄	28
Tabel 3. 5. Parameter <i>benchmarking</i> pada penelitian Wang, <i>et al.</i> , (2013).....	30
Tabel 4. 1. Input parameter <i>benchmarking</i> referensi dan simulasi	32

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1. Skematik TMSR.....	9
Gambar 2. 2. Komponen aliran massa pada arah sumbu-x.....	11
Gambar 2. 3. Komponen tensor tegangan pada kordinat cartesian.....	12
Gambar 2. 4. Parameter bilangan reynolds dan bentuk alirannya.....	14
Gambar 2. 5. Parameter bilangan Prandtl	15
Gambar 2. 6. Sirkulasi alami dalam <i>loop</i> tertutup	17
Gambar 2. 7. Alur kerja COMSOL <i>multiphysics</i> 6.2.....	20
Gambar 3. 1. Geometri <i>loop</i> sirkulasi alami	26
Gambar 3. 2. Letak titik-titik pengukuran <i>loop</i> sirkulasi alami	27
Gambar 3. 3. Penampang <i>meshing</i> , (a) <i>meshing</i> normal, (b) <i>meshing</i> diperbesar 2 kali	29
Gambar 3. 4. Diagram alir penelitian.....	31
Gambar 4. 1. Titik-titik pengukuran suhu pada model <i>benchmarking</i> Wang, <i>et al.</i> , (2013)	33
Gambar 4. 2. Suhu TS2 simulasi <i>benchmark</i> dengan daya pemanas 25 W	33
Gambar 4. 3. Suhu TS2 hasil eksperimen dengan daya 25W (Wang, <i>et al.</i> 2013).....	34
Gambar 4. 4. Penampakan aliran turbulen pada <i>loop</i> simulasi	36
Gambar 4. 5. Penampakan aliran turbulen di sekitar pendingin	36
Gambar 4. 6. Penampakan aliran turbulen di sekitar pemanas	37
Gambar 4. 7. Penampakan aliran turbulen di sekitar sudut lengan pemanas.....	38
Gambar 4. 8. Penampakan aliran turbulen pada pemanas	38
Gambar 4. 9. Perbandingan suhu di TS 1 pada kondisi laminar dengan turbulen.....	40

Gambar 4.10. Perbandingan suhu di TS 2 pada kondisi laminar dengan turbulen.....	40
Gambar 4.11. Perbandingan suhu di TS 3 pada kondisi laminar dengan turbulen.....	41
Gambar 4.12. Perbandingan suhu di TS 4 pada kondisi laminar dengan turbulen.....	41
Gambar 4.13. Distribusi suhu dengan input daya pemanas 25 W	42
Gambar 4.14. Perbandingan kecepatan di U 1 pada kondisi laminar dengan turbulen.....	43
Gambar 4.15. Perbandingan kecepatan di U 2 pada kondisi laminar dengan turbulen.....	44
Gambar 4.16. Kecepatan aliran fluida pada input daya pemanas 25 W	44
Gambar 4.17. Perbandingan tekanan di P pada kondisi laminar dengan turbulen.....	45
Gambar 4.18. Distribusi tekanan pada input daya pemanas 25 W.....	46

I. PENDAHULUAN

1. 1. Latar Belakang

Energi merupakan komponen mendasar dari kehidupan modern yang menggerakkan rumah, bisnis, dan kemajuan teknologi. Energi digunakan dalam berbagai bentuk sepanjang hari, seperti listrik menggerakkan perangkat, sistem pemanas dan pendingin, maupun transportasi. Energi mendorong pertumbuhan dan inovasi, menjadikannya landasan pembangunan nasional. Meningkatnya permintaan energi telah menyebabkan tantangan lingkungan yang signifikan, termasuk perubahan iklim, polusi, dan kerusakan lingkungan lainnya. Konsumsi batubara, minyak, dan gas alam merupakan indikator paling signifikan dalam meningkatkan emisi CO₂ secara umum (Kartal, 2022). Krisis energi global ditandai dengan masalah kemiskinan energi, puncak produksi minyak, dan tantangan dalam menyeimbangkan keberlanjutan lingkungan, keandalan energi, serta keterjangkauan (Gajdzik, *et al.*, 2024). Berbagai upaya sedang dilakukan untuk beralih ke sumber energi rendah emisi dan lebih berkelanjutan seperti pengembangan energi nuklir (Malerba, *et al.*, 2022; Mustakimah, *et al.*, 2024).

Pengembangan energi nuklir adalah langkah penting untuk menghadapi tantangan meningkatnya permintaan energi global. Selain itu hal tersebut dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca, sehingga berkontribusi pada perlindungan lingkungan dan pengurangan pemanasan global. Energi nuklir memiliki tingkat efisiensi yang tinggi karena reaksi fisi inti atom dapat menghasilkan energi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar fosil seperti batu bara atau minyak bumi. Sejumlah kecil bahan bakar nuklir dapat menghasilkan daya yang besar dan memiliki potensi untuk memberikan pasokan listrik yang stabil dalam jumlah besar dengan emisi karbon yang sangat rendah (Sovacool, *et al.*, 2020; Fell, *et al.*, 2022).

Perkembangan industri nuklir komersial terus berkembang dengan reaktor generasi III dan III+ yang memiliki desain evolusioner yang mencakup peningkatan teknologi bahan bakar, efisiensi termal, dan konstruksi termodulasi. Inovasi lebih lanjut terlihat pada teknologi reaktor generasi IV, yang menawarkan peningkatan signifikan dibandingkan dengan teknologi nuklir saat ini dalam hal menutup siklus bahan bakar, minimalisasi limbah, peningkatan penggunaan sumber daya, keselamatan bawaan, keekonomian, ketahanan, dan keamanan proliferasi. Generasi IV yang sedang dalam pengembangan, bertujuan untuk menghadirkan reaktor dengan efisiensi tinggi dan limbah radioaktif yang lebih sedikit. Mengingat ketersediaan uranium saat ini dan persediaan bahan bakar bekas serta limbah radioaktif tingkat tinggi yang relatif kecil. Selain itu sistem generasi IV dapat menunjukkan tingkat keselamatan pasif yang tinggi dibandingkan sistem reaktor konvensional (NEA, 2021; Goldberg dan Rosner, 2011).

Pentingnya energi nuklir dalam konteks keberlanjutan dan tantangan yang dihadapi oleh sistem energi saat ini, termasuk pengelolaan limbah radioaktif dan keselamatannya membuat kita terus berpikir mengenai sistem reaktor nuklir yang tepat guna. Pada penelitian Kamei (2011; 2012), salah satu tantangan utama yang diteliti adalah pengelolaan limbah radioaktif. Ia mengusulkan pendekatan untuk mengurangi limbah tersebut dengan menggunakan thorium sebagai bahan bakar alternatif yang dapat menghasilkan limbah radioaktif lebih sedikit dibandingkan dengan uranium. Thorium dipilih karena memiliki sumber daya yang lebih melimpah dibandingkan dengan uranium. Berdasarkan penelitian, cadangan thorium di dunia diperkirakan mencapai sekitar 6,1 juta ton. Data tersebut menunjukkan bahwa cadangan thorium di bumi adalah sekitar tiga kali lipat dari cadangan uranium, yang menjadikannya sumber energi yang lebih berkelanjutan dalam jangka panjang (Jyothi, *et al.*, 2023). Meskipun cadangan thorium cukup besar, hanya sebagian kecil dari total cadangan yang diperkirakan dapat diekstraksi secara ekonomis. Penggunaan thorium dalam reaktor nuklir terutama reaktor garam cair berbasis thorium atau *thorium molten salt reactors* (TMSR) dapat memberikan sumber energi yang aman dan bersih. Teknologi ini dirancang untuk mengurangi risiko kecelakaan nuklir dan menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit dibandingkan dengan reaktor nuklir berbasis uranium. Thorium tidak menghasilkan

banyak isotop transuranik yang berbahaya, sehingga mengurangi masalah pengelolaan limbah radioaktif. Reaktor yang menggunakan thorium, seperti reaktor garam cair, memiliki fitur keamanan bawaan yang lebih baik. Selain itu, thorium tidak dapat digunakan langsung untuk senjata nuklir, sehingga meningkatkan resistensi proliferasi nuklir. Thorium dapat digunakan untuk menghasilkan uranium-²³³, yang merupakan isotop fissile yang dapat digunakan dalam reaktor nuklir. Proses ini memungkinkan efisiensi yang lebih tinggi dalam produksi energi (Emblemsvag, 2021).

Reaktor garam cair atau *molten salt reactors* (MSR) merupakan salah satu reaktor generasi IV yang sangat potensial untuk dikembangkan. MSR beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dibandingkan reaktor berpendingin air untuk efisiensi termodinamika yang lebih tinggi, namun tetap berada pada tekanan uap rendah (David, 2010). Kemampuannya untuk beroperasi pada tekanan mendekati atmosfer mengurangi tekanan mekanis yang dialami sistem, sehingga menyederhanakan aspek desain reaktor dan meningkatkan keselamatan (Poullikkas, 2013; Ding, *et al.*, 2020). MSR mempunyai potensi untuk dapat dibangun dan dioperasikan dengan biaya lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga batubara. Bahan bakar MSR bisa berbentuk padat, atau terlarut dalam cairan pendingin itu sendiri (Sabharwall, *et al.*, 2019). Garam diketahui jauh lebih efisien dalam menghilangkan panas pada inti, mengurangi kebutuhan pemompaan, pemipaan, dan mengurangi ukuran inti karena ukuran komponen ini berkurang (GIF, 2002; GIF, 2023).

Penelitian menggunakan reaktor garam cair sudah pernah dilakukan oleh Jeong, *et al.*, (2018). Penelitiannya berfokus pada karakteristik perpindahan panas konveksi alami yang terjadi ketika garam cair mengalami pembangkitan panas internal atau *internal heat generation* (IHG) dan fluks panas eksternal. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak CFD OpenFOAM untuk menganalisis aliran dan perpindahan panas dalam *loop* vertikal persegi panjang yang diisi dengan garam cair NaCl-KCl. Berbagai kondisi masukan panas dieksplorasi, termasuk fluks panas eksternal, *internal heat generation*, dan kombinasi keduanya. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi suhu, kecepatan aliran, dan profil lapisan batas termal. Dari penelitiannya menunjukkan bahwa fluks panas eksternal menghasilkan

gradien suhu yang tinggi di dekat dinding pemanas dengan lapisan batas termal yang tipis. IHG menunjukkan distribusi suhu yang lebih merata dan mempengaruhi aliran secara global, berbeda dengan fluks panas yang hanya mempengaruhi daerah lokal. Kecepatan aliran bervariasi tergantung pada rasio IHG terhadap total masukan panas. Ketika IHG mendominasi, kecepatan aliran meningkat, sedangkan kecepatan maksimum menurun. Profil kecepatan menunjukkan bahwa aliran massa didorong oleh IHG, sementara fluks panas menyebabkan kecepatan maksimum terjadi di dekat dinding. Penelitian ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan kondisi masukan panas dalam desain sistem garam cair. Ditemukan bahwa kondisi IHG memiliki dampak yang lebih signifikan pada perilaku aliran dan distribusi suhu dibandingkan dengan fluks panas eksternal. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pemahaman yang lebih baik tentang interaksi antara kondisi masukan panas dan sifat termofisika dari garam cair dapat meningkatkan efisiensi sistem pendinginan.

Penelitian menggunakan garam cair dan bahan bakar berupa thorium telah dilakukan oleh (Chouhan, *et al.*, 2019). Ia melakukan analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dari sirkulasi alami garam cair dalam sebuah *loop* persegi panjang yang dirancang untuk digunakan dalam reaktor pemeliharaan garam cair India atau *Indian Molten Salt Breeder Reactor* (IMSBR). IMSBR merupakan jenis reaktor nuklir yang dirancang untuk menggunakan garam cair sebagai bahan bakar, pendingin, dan penutup. Reaktor ini bertujuan untuk memanfaatkan sumber daya thorium yang melimpah di India. Tujuan dari penelitian tersebut untuk mempelajari perilaku termal-hidrolik dari garam cair, khususnya $\text{LiF} + \text{ThF}_4$, yang diusulkan sebagai garam penutup untuk program IMSBR. Sebuah *loop* persegi panjang dirancang untuk studi sirkulasi alami. *Loop* ini terbuat dari pipa Hastelloy-N dan memiliki dimensi tinggi 400 mm dan lebar 300 mm. Garam yang digunakan adalah campuran LiF dan ThF_4 dengan komposisi 22,5–77,5 wt%, yang diusulkan sebagai garam penutup untuk program IMSBR. Simulasi CFD pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak *OpenFOAM*. Simulasi mempertimbangkan pengaturan pemanas vertikal dan pendingin vertikal untuk sirkulasi alami garam dalam domain komputasi. Penggunaan *meshing* hexahedral di semua empat kaki *loop* dan *meshing* tetrahedral di sudut-sudut untuk meningkatkan akurasi simulasi. Model laminar dipilih untuk kasus *steady state* dan *transient*, yang memungkinkan

analisis yang lebih mendalam tentang perilaku aliran dalam *loop* pada berbagai tingkat daya pemanas. Berbagai transien, seperti perubahan daya mendadak, pemadaman pemanas, dan *startup* sirkulasi alami, juga dianalisis. Hasil dari simulasi CFD dibandingkan dengan korelasi standar untuk aliran *steady state*. Penelitian menemukan bahwa hasil CFD cocok dengan hasil analitis dan korelasi yang ada, dengan kesesuaian sekitar $\pm 10\%$. Model CFD yang diusulkan dapat menangkap karakteristik termal-hidrolik dari garam penutup yang diusulkan untuk IMSBR.

Pada penelitian (Wang, *et al.*, 2013) dilakukan karakterisasi aliran dan transfer panas dalam *loop* sirkulasi alami yang merupakan mekanisme penting untuk menghilangkan panas dalam sistem keselamatan pasif di pembangkit listrik nuklir. Penelitian ini menggunakan model CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tiga dimensi yang kompresibel untuk mempertimbangkan variasi densitas terhadap suhu. Model ini dirancang untuk menangkap perilaku turbulen dengan menggunakan fungsi dinding standar dan model turbulensi $k-\epsilon$ rendah. Pemilihan perilaku turbulen didasarkan pada relevansi dengan kondisi operasional. Dalam banyak aplikasi industri, termasuk pembangkit listrik nuklir, aliran fluida sering kali berada dalam kondisi turbulen, terutama ketika ada perbedaan suhu yang signifikan. Aliran turbulen dapat terjadi ketika kecepatan aliran cukup tinggi atau ketika ada gradien suhu yang besar dan menyebabkan fluktuasi serta pencampuran yang lebih baik dalam fluida. Oleh karena itu, penting untuk memodelkan kondisi ini untuk mendapatkan hasil yang realistis. Aliran turbulen memiliki efek yang signifikan pada transfer panas. Dalam kondisi turbulen, ada peningkatan konveksi yang disebabkan oleh fluktuasi kecepatan dan suhu, sehingga mampu meningkatkan efisiensi transfer panas. Hal ini sangat penting dalam sistem sirkulasi alami, di mana penghilangan panas dari sistem harus efisien untuk menjaga keselamatan. Dalam simulasinya, kondisi batas termal ditetapkan dengan fluks panas konstan pada bagian pemanas dan suhu konstan 0°C pada pendingin. Kondisi adiabatik dan *non-slip* diterapkan pada dinding *loop*. Model CFD yang diusulkan divalidasi dengan eksperimen yang dilakukan oleh (Misale, *et al.*, 2007). Di mana pada penelitian tersebut menyelidiki perilaku transien suhu dan hubungan antara bilangan Reynolds dan bilangan Grashof, menunjukkan bahwa metodologi CFD

dapat diterapkan dalam analisis keselamatan reaktor nuklir dengan fitur keselamatan pasif. Penelitian (Wang, *et al.*, 2013) menunjukkan bahwa model CFD menghasilkan persamaan yang mirip dengan hasil simulasi sebelumnya. Sehingga model ini dapat digunakan untuk memprediksi perilaku aliran dalam kondisi tertentu dengan akurasi yang lebih baik. Pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik termal-hidrolik dari mekanisme sirkulasi alami dapat meningkatkan desain dan efisiensi sistem keselamatan pasif dalam pembangkit listrik nuklir.

Berdasarkan beberapa penelitian menunjukkan bahwa studi mengenai pengaruh aliran turbulen terhadap kinerja perpindahan panas dalam sirkulasi alami dapat dilakukan. Namun, penelitian mengenai perpindahan panas pada garam bahan bakar *lithium fluoride*, *beryllium fluoride*, *uranium tetrafluoride*, *thorium tetrafluoride* (LiF-BeF₂-UF₄-ThF₄) dalam TMSR sebelumnya hanya terbatas pada sistem aliran laminar, sementara aliran dalam aplikasi industri sesungguhnya bersifat turbulen. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada aliran turbulen dalam sistem sirkulasi alami garam bahan bakar yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* 6.2. Beberapa parameter yang dianalisis adalah pengaruh suhu, tekanan, dan laju aliran terhadap efisiensi perpindahan panas pada kondisi aliran turbulen di TMSR.

1. 2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik aliran turbulen mempengaruhi kinerja perpindahan panas dalam sistem sirkulasi alami pada TMSR ?
2. Bagaimana suhu, laju aliran, dan tekanan mempengaruhi efisiensi perpindahan panas dalam kondisi aliran turbulen pada TMSR ?
3. Apa perbedaan utama dalam kinerja perpindahan panas antara aliran laminar dengan aliran turbulen dalam sirkulasi alami pada TMSR ?

1. 3. Tujuan Penelitian

Beberapa tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui karakteristik aliran turbulen yang mempengaruhi kinerja perpindahan panas dalam sistem sirkulasi alami pada TMSR.
2. Mengetahui pengaruh suhu, laju aliran, dan tekanan terhadap efisiensi perpindahan panas dalam kondisi aliran turbulen pada TMSR.
3. Mengetahui perbedaan utama kinerja perpindahan panas antara aliran laminar dengan aliran turbulen dalam sirkulasi alami pada TMSR.

1. 4. Manfaat Penelitian

Berikut ini beberapa manfaat yang ingin dicapai dari penelitian ini.

1. Memberikan pengembangan model yang lebih akurat pada TMSR sehingga dapat membantu meningkatkan efisiensi dan keamanan reaktor nuklir.
2. memahami pengaruh suhu, laju aliran, dan tekanan, untuk mencapai efisiensi perpindahan panas yang optimal.
3. Memberikan pemahaman mendalam tentang mekanisme aliran untuk meningkatkan validasi dan pengembangan model reaktor berikutnya.

1. 5. Batasan Masalah

Penelitian ini berfokus pada beberapa hal sebagai berikut.

1. Menggunakan TMSR dalam keadaan aliran turbulen dan pengaruhnya terhadap kinerja perpindahan panas.
2. Karakteristik termal dan fisik dari bahan bakar garam pada *loop* primer, yang terdiri dari campuran $\text{LiF-BeF}_2\text{-UF}_4\text{-ThF}_4$.
3. Analisis perpindahan panas dalam sistem sirkulasi alami pada *loop* primer dari TMSR.
4. Geometri *loop* sirkulasi alami (NCL) yang diteliti berbentuk persegi panjang dengan ukuran 3×6 meter dan diameter 0,2 m.
5. Pengembangan model numerik dilakukan menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics* 6.2, dengan modul non-isotermal aliran turbulen.

II. TINJAUAN PUSTAKA

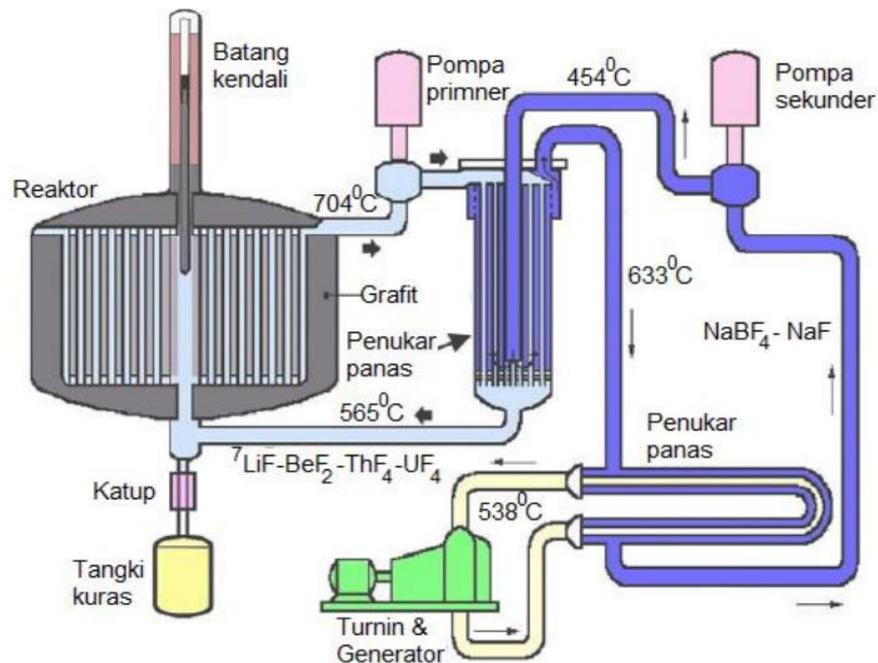
2.1. *Thorium Molten Salt Reactors*

Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) merupakan salah satu jenis reaktor garam cair berbahan bakar cair atau *molten salt reactor* (MSR). MSR adalah jenis reaktor nuklir yang menggunakan garam cair yang mengandung bahan fisil (seperti uranium atau thorium) sebagai bahan bakar dan sekaligus sebagai medium pendingin. Garam cair ini berfungsi menggantikan bahan bakar padat konvensional yang digunakan di kebanyakan reaktor saat ini. Konsep MSR mulai dikembangkan secara intensif pada tahun 1950-an sampai awal 1970-an di Oak Ridge National Laboratory (ORNL). MSR menggunakan garam cair sebagai bahan bakar reaktor dan media pendingin. Garam ini biasanya campuran fluorida yang mampu menahan suhu tinggi sekaligus stabil secara kimia. Penggunaan garam cair memungkinkan operasi pada suhu sangat tinggi ($>700\text{ }^{\circ}\text{C}$) namun dengan tekanan operasi rendah, sehingga meningkatkan efisiensi termal dan keamanan reaktor (David, 2010).

Reaktor TMSR 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 menggunakan bahan bakar berbasis fluorida yang bertindak sebagai bahan bakar dan pendingin di inti reaktor ($\text{LiF-BeF}_2\text{-UF}_4\text{-ThF}_4$). Desain reaktor TMSR 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).

Gambar 2.1 memperlihatkan skema dari TMSR. Pada *loop* primer, garam bahan bakar mengalir dari pleno bawah ke setiap saluran grafit, di mana garam ini menyerap panas yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir. Setelah dipanaskan, garam

bahan bakar tersebut bergerak melalui saluran grafit dan mentransfer panasnya ke garam pendingin sekunder melalui penukar panas primer. Proses ini menyebabkan energi panas berpindah dari garam bahan bakar ke pendingin sekunder, yang kemudian dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan uap dalam produksi listrik (Dai, 2017).



Gambar 2.1. Skematik TMSR (IAEA, 2023).

Selama sirkulasi garam bahan bakar dalam loop primer, prekursor neutron tertunda atau *dependent neutron precursor* (DNP) yang dihasilkan dari reaksi fisi ikut terbawa melalui saluran grafit bersama dengan aliran garam. Sebagian DNP ini akan meluruh dan melepaskan neutron di dalam loop primer, sedangkan sebagian lainnya dapat kembali ke inti reaktor. Pergerakan DNP tersebut berperan dalam menjaga keseimbangan neutron dan mengendalikan reaktivitas reaktor (Cui, *et al.*, 2020).

2.2. Aliran Non-Isotermal Turbulen

Aliran non-isotermal adalah kondisi aliran fluida pada saat terjadi perbedaan suhu yang signifikan, sehingga menyebabkan variasi dalam sifat fisik fluida, seperti densitas dan viskositas. Dalam konteks mekanika fluida, aliran non-isotermal seringkali melibatkan interaksi antara aliran fluida dan transfer panas. Dalam aliran

non-isothermal, suhu fluida tidak konstan dan dapat berubah sepanjang aliran. Ini dapat disebabkan oleh pemanasan atau pendinginan fluida, atau oleh interaksi dengan permukaan yang memiliki suhu berbeda. Perubahan suhu dapat menyebabkan perubahan densitas fluida, yang mempengaruhi gaya gravitasi dan perilaku aliran. Fluida yang lebih panas biasanya memiliki densitas lebih rendah dan dapat menyebabkan aliran konveksi.

Aliran non-isothermal dapat dijelaskan terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan kontinuitas yang menyatakan kekekalan massa dalam dinamika fluida. Persamaan ini menggambarkan bahwa laju perubahan massa dalam volume kendali sama dengan selisih antara laju aliran massa yang masuk dan keluar dari volume kendali (Todreas dan Kazimi, 1990). Dalam kasus penelitian ini yang ditinjau dalam dua dimensi, persamaan kontinuitas dinyatakan dalam Persamaan (2.1). Selanjutnya, persamaan Navier-Stokes yang dimodifikasi untuk memasukkan efek termal digunakan untuk menggambarkan hukum konservasi momentum, sehingga menghasilkan model yang lebih lengkap (Batchelor, 1967).

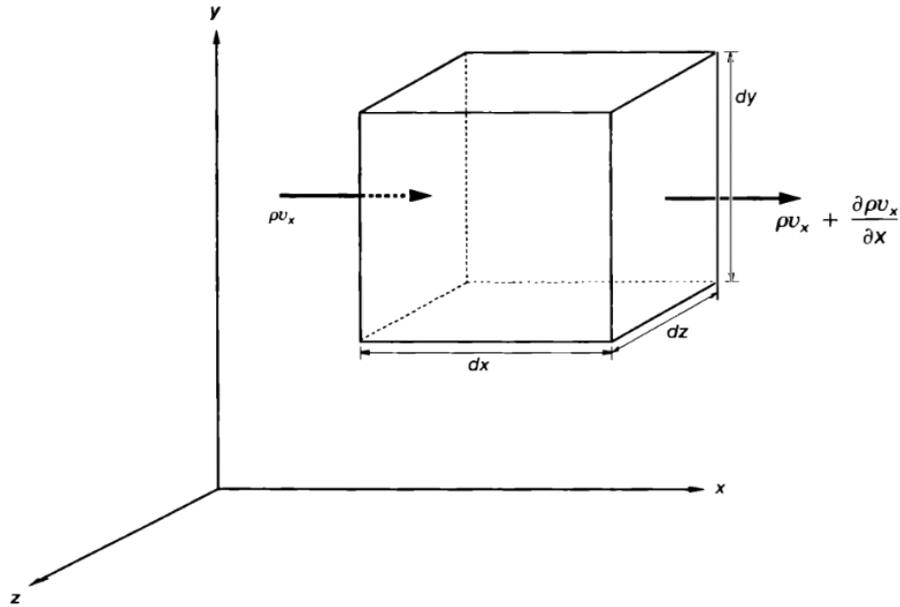
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) = 0 \quad (2.1)$$

Kemudian persamaan (2.1) dapat ditulis dalam persamaan aljabar vektor menjadi persamaan (2.2).

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

ρ adalah densitas fluida (kg/m^3), u_x dan u_y adalah komponen kecepatan fluida dalam arah x dan y, $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ adalah perubahan densitas seiring waktu, sedangkan $\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x)$ dan $\frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y)$ adalah turunan parsial dari fluks massa dalam arah x dan y.

Gambar 2.2 menunjukkan bagaimana aliran massa masuk dan keluar dari volume kendali yang ditinjau dalam arah sumbu-x.



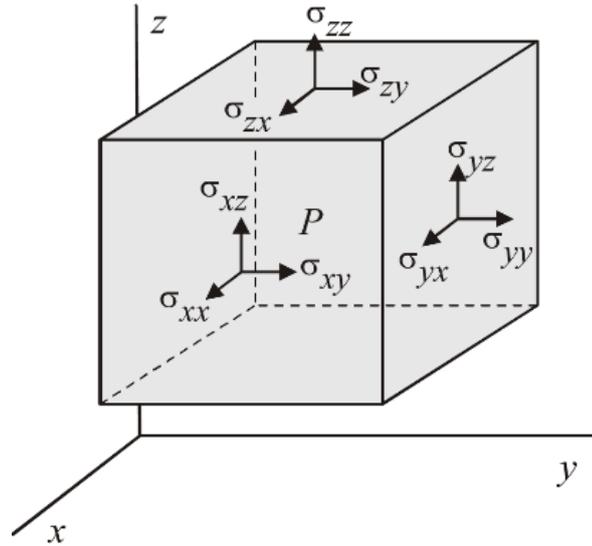
Gambar 2.2. Komponen aliran massa pada arah sumbu-x (Todreas dan Kazimi, 1990).

Persamaan Navier-Stokes adalah persamaan diferensial parsial yang mendeskripsikan perilaku aliran fluida. 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 dan Cimbala, 2014). Persamaan Navier-Stokes ditunjukkan pada persamaan (2.3).

$$\sum \mathbf{F} = \int_{CV} \rho \mathbf{g} dV + \int_{CS} \sigma_{ij} \cdot \mathbf{n} dA = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) dV + \int_{CS} (\rho \mathbf{V}) \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dA \quad (2.3)$$

Di mana $\sum \mathbf{F}$ merupakan jumlah gaya total yang bekerja pada volume kontrol. $\int_{CV} \rho \mathbf{g} dV$ adalah integral volume dari gaya tubuh (seperti gravitasi) yang bekerja pada fluida di dalam volume kontrol. $\int_{CS} \sigma_{ij} \cdot \mathbf{n} dA$ adalah integral permukaan yang menunjukkan gaya yang disebabkan oleh tegangan (seperti tekanan dan tegangan geser) pada permukaan volume kontrol. \mathbf{n} adalah vektor normal yang keluar dari permukaan kontrol. $\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) dV$ adalah integral volume yang menunjukkan perubahan momentum fluida seiring waktu dalam volume kontrol. $\int_{CS} (\rho \mathbf{V}) \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dA$ adalah integral permukaan yang menggambarkan fluks momentum yang keluar atau masuk melalui permukaan volume kontrol dengan \mathbf{V} merupakan kecepatan fluida.

Pada persamaan (2.3), σ_{ij} didefinisikan sebagai tensor tegangan dalam arah-j yang bekerja pada permukaan 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 2.3**.



Gambar 2.3. Komponen tensor tegangan pada koordinat cartesian.

Meninjau kasus 2D maka persamaan persamaan Navier-Stokes dapat ditulis terhadap sumbu-x (Persamaan (2.4)) dan terhadap sumbu-y (Persamaan (2.5)).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_x u_y) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho g_x \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_y u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \rho g_y \quad (2.5)$$

dengan

$$\tau_{xx} = 2\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \quad (2.6)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \quad (2.7)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (2.8)$$

Persamaan (2.4) menjelaskan perubahan momentum dalam arah x, sementara Persamaan (2.5) menjelaskan perubahan momentum dalam arah y. Persamaan (2.6)

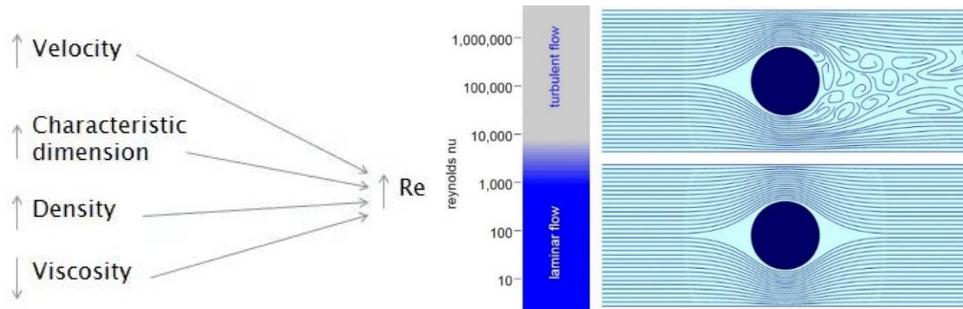
adalah tegangan normal viskositas dalam arah x dan perubahan kecepatan dalam arah x . Persamaan (2.7) adalah tegangan normal viskositas dalam arah y dan perubahan kecepatan dalam arah y . Persamaan (2.8) adalah tegangan geser viskositas yang melibatkan interaksi perubahan kecepatan dalam arah x dan y .

Terdapat dua macam aliran non-isotermal yaitu 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 (2.9).

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.9)$$

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

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. Aliran turbulen terjadi pada bilangan $Re > 4000$. Biasanya, diperlukan aliran dengan kecepatan lebih tinggi, tetapi juga bergantung pada ukuran objek (Nuclear Power, 2022). Aliran non-isotermal dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4. Parameter bilangan reynolds dan bentuk alirannya (Nuclear Power, 2022a).

Selain bilangan Reynolds terdapat juga bilangan Prandtl yang merupakan rasio difusivitas momentum (ν) terhadap difusivitas termal (α). Di mana,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.10)$$

$$\alpha = \frac{k}{c_p \cdot \rho} \quad (2.11)$$

sehingga bilangan Prandtl dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.12)$$

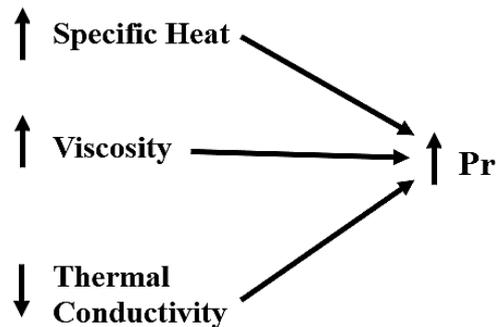
$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p \cdot \rho}{\rho \cdot k} \quad (2.13)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (2.14)$$

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 ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$), 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 ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$).

Difusivitas momentum, yang juga dikenal sebagai viskositas kinematik, menggambarkan kemampuan suatu fluida untuk menyebarkan momentum antar lapisan-lapisannya atau kepadatannya. Jika $Pr \gg 1$, maka difusivitas momentum lebih besar daripada difusivitas termal. Contohnya pada oli, viskositasnya tinggi

sehingga momentum disebarkan lebih cepat daripada panas. Jika $Pr \ll 1$, maka difusivitas termal lebih besar daripada difusivitas momentum. Contohnya pada gas ringan, panas menyebar lebih cepat dibandingkan momentum. Jika $Pr \approx 1$, maka difusivitas momentum dan termal sebanding, kondisi ini sering terjadi pada air pada suhu sekitar. Parameter yang mempengaruhi bilangan Prandtl dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5. Parameter bilangan prandtl (Nuclear Power, 2022b).

Hubungan antara bilangan Reynolds dengan bilangan Prandtl yaitu bilangan Nusselt yang dapat ditulis sebagai Persamaan (2.15).

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = f(Re_L, Pr) \quad (2.15)$$

Koefisien perpindahan panas konveksi (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.

2.3. Dinamika Perpindahan Panas

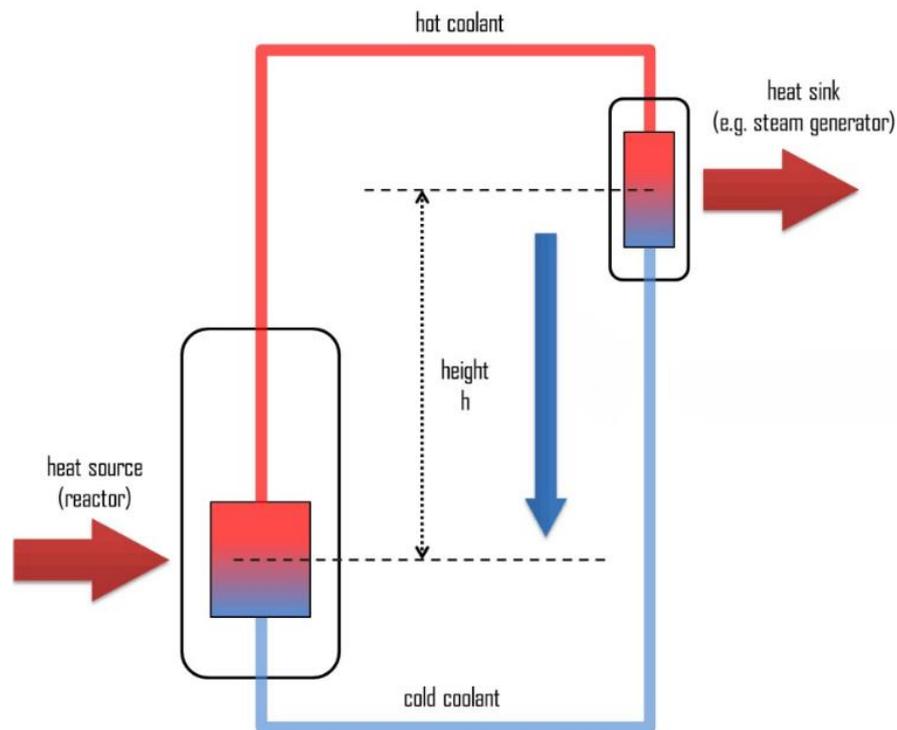
Dinamika perpindahan panas merupakan bidang studi yang fokus pada pemahaman dan analisis perubahan suhu serta distribusi energi dalam suatu sistem. Bidang ini mencakup bagaimana suhu berubah seiring waktu, interaksi antar material, serta faktor-faktor yang memengaruhi perpindahan panas, seperti bentuk geometris, sifat termal material, dan kondisi batas. Proses perpindahan panas terjadi melalui mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi, di mana energi berpindah dari satu

medium ke medium lainnya (Moran, *et al.*, 2003; Halliday, *et al.*, 2010). Persamaan dinamika perpindahan panas fluida pada kasus dua dimensi (2D) dapat dituliskan sebagai Persamaan (2.16).

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{q} \quad (2.16)$$

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 (J/kg·K), ρ adalah densitas (kg/m³), 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/m³), dan k adalah konduktivitas panas fluida (W/m.K).

Penelitian ini menganalisis perilaku perpindahan panas pada sirkulasi alami garam bahan bakar di *loop* primer. Sirkulasi alami adalah aliran fluida dalam sistem perpipaan atau wadah terbuka yang terjadi akibat perubahan densitas karena perbedaan suhu. Proses ini tidak memerlukan perangkat mekanis seperti pompa untuk menjaga alirannya. Dalam pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), sirkulasi alami dikenal juga sebagai konveksi alami. Pada perpindahan panas konveksi alami dari permukaan dinding vertikal ke cairan di sekitarnya, variabel yang terlibat berbeda secara signifikan dibandingkan dengan sirkulasi paksa. Kecepatan tidak lagi menjadi variabel utama karena bergantung pada efek perpindahan energi. 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. Skema sistem pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6. Sirkulasi alami dalam *loop* tertutup (Nuclear Power, 2022).

Analisis sirkulasi alami melibatkan variabel baru, yaitu aliran fluida yang dihitung berdasarkan gaya apung yang dihasilkan oleh perbedaan densitas akibat transfer energi. Gaya apung muncul karena adanya perbedaan densitas pada fluida. Fluida yang lebih panas densitasnya lebih rendah sehingga akan terangkat naik, sedangkan fluida yang lebih dingin densitasnya lebih tinggi sehingga akan turun (Welty, *et al.*, 2008). Gaya apung (F) per unit volume diberikan pada Persamaan (2.17).

$$F = (\rho_0 - \rho)g \quad (2.17)$$

Menggunakan pendekatan Boussinesq perubahan densitas fluida akibat perubahan suhu dituliskan sebagai Persamaan (2.18).

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad (2.18)$$

ρ adalah densitas di dalam lapisan yang dipanaskan. ρ_0 adalah densitas referensi fluida. β adalah koefisien ekspansi termal volumetrik yang menyatakan seberapa besar densitas fluida berubah dengan perubahan suhu. ΔT merupakan perbedaan suhu antara cairan yang dipanaskan dan nilai densitas referensi. Sedangkan g adalah percepatan gravitasi (Todreas dan Kazimi, 1990; Masterson, 2020).

Dengan menyubstitusikan Persamaan (2.18) ke Persamaan (2.17) maka diperoleh persamaan gaya apung seperti pada Persamaan (2.19).

$$F = \rho_0 \beta g \Delta T \quad (2.19)$$

Koefisien ekspansi termal (β) menunjukkan sensitivitas densitas fluida terhadap perubahan suhu. Nilai β yang lebih besar menunjukkan bahwa fluida tersebut memiliki perubahan densitas yang signifikan saat terjadi perubahan suhu. Besarnya nilai β dapat diperoleh melalui Persamaan (2.20).

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{(\rho - \rho_0)}{(T - T_0)} \right] \quad (2.20)$$

Proses konveksi alami ini sering digunakan dalam sistem pemanasan dan pendinginan, serta berbagai aplikasi teknik lainnya.

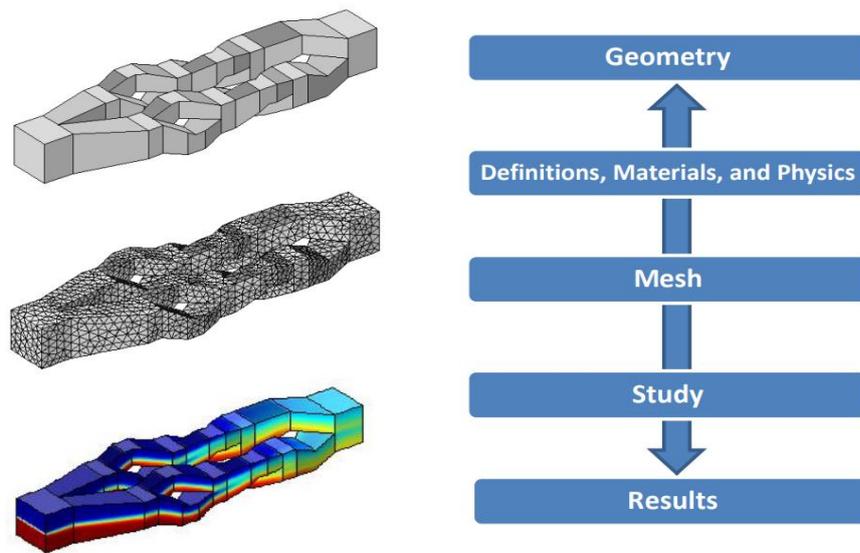
2.4. CFD pada COMSOL *Multiphysics* 6.2

Dalam dunia mekanika fluida, alat yang sangat diperlukan adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Salah satu dari banyak aspek aliran fluida yang membuatnya sangat sulit untuk dimodelkan adalah sifat yang melekat pada fluida untuk menunjukkan perilaku turbulensi; perilaku cairan yang sangat tidak teratur dan difusi yang sangat sulit untuk disimulasikan. CFD adalah suatu metode numerik yang digunakan untuk menganalisis dan memodelkan aliran fluida serta fenomena terkait, seperti perpindahan panas dan reaksi kimia. CFD memanfaatkan kekuatan komputer untuk menyelesaikan persamaan yang menggambarkan perilaku fluida, yang sering kali sangat kompleks dan sulit untuk dianalisis secara analitik. CFD didasarkan pada persamaan dasar yang dikenal sebagai persamaan Navier-Stokes, yang merupakan sekumpulan persamaan diferensial parsial non-linear yang menggambarkan gerakan fluida. Persamaan ini mencakup hukum kekekalan massa, momentum, dan energi. Dalam banyak kasus, solusi analitik untuk persamaan ini tidak dapat diperoleh, sehingga pendekatan numerik menjadi satu-satunya cara untuk mendapatkan hasil yang sesuai (Sayma, 2009; Chouhan, *et al.*, 2019).

Proses CFD umumnya melibatkan beberapa langkah utama. Pertama, *pre-processing*, pada tahap ini geometri dari sistem yang akan dianalisis dibuat dan dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang disebut *mesh*. *Mesh* ini dapat terdiri dari jutaan elemen, tergantung pada kompleksitas geometri dan tingkat resolusi yang diinginkan. Kedua, *solving*, setelah *mesh* dibuat, persamaan yang relevan (seperti persamaan Navier-Stokes) diselesaikan untuk setiap elemen *mesh*. Ini melibatkan perhitungan fluks massa, momentum, dan energi yang masuk maupun keluar dari setiap elemen. Ketiga, *post-processing*, hasil dari simulasi kemudian dianalisis dan divisualisasikan. Ini dapat mencakup pembuatan grafik, kontur, dan animasi untuk memahami perilaku aliran fluida dan fenomena terkait (Anderson, 1995).

COMSOL *Multiphysics* adalah perangkat lunak simulasi yang digunakan untuk analisis dan pemodelan yang melibatkan beberapa fenomena fisika secara bersamaan. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk melakukan simulasi dalam berbagai bidang, termasuk mekanika, elektromagnetika, termodinamika, dan akustik, dengan mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu dalam satu *platform*. Perangkat lunak ini menawarkan berbagai modul yang dirancang untuk aplikasi spesifik, seperti *CFD module* untuk simulasi aliran fluida dan interaksi dengan fenomena fisik lainnya. *Heat transfer module* untuk analisis perpindahan panas dalam berbagai sistem. *Structural mechanics module* untuk analisis mekanika struktur dan deformasi. *Electromagnetic module* untuk simulasi medan elektromagnetik.

COMSOL menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial (PDE) yang menggambarkan aliran fluida. Solusi aliran diasumsikan sebagai kombinasi fungsi basis, yang memungkinkan analisis yang akurat dalam berbagai kondisi. Terdapat dua jenis aliran fluida yang dapat diselesaikan menggunakan aplikasi ini yaitu laminar dan turbulen. Laminar adalah jenis aliran yang teratur dan terprediksi, biasanya terjadi pada kecepatan rendah. Turbulen adalah aliran yang tidak teratur dan kompleks, serta memerlukan pendekatan khusus seperti RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) dan LES (*Large Eddy Simulation*) untuk analisis .



Gambar 2.7. Alur kerja COMSOL *Multiphysics* 6.2.

Perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* 6.2 memproses simulasi dengan beberapa tahapan berikut.

2.1.1. *Geometry*

Pertama, mendefinisikan geometri model. Ini melibatkan pembuatan bentuk fisik dari sistem yang akan disimulasikan, seperti saluran, reaktor, atau komponen lainnya. Pengguna dapat menggambar geometri secara langsung dalam COMSOL.

2.1.2. *Definition, Materials, and Physics*

Kedua, menentukan parameter fisik yang relevan. Ini termasuk mendefinisikan material yang digunakan dalam model (seperti sifat termal, mekanik, atau elektrik), serta menetapkan persamaan fisik yang akan diterapkan (seperti aliran fluida, perpindahan panas, atau reaksi kimia).

2.1.3. *Mesh*

Mesh adalah pembagian geometri menjadi elemen-elemen kecil yang memungkinkan perangkat lunak untuk melakukan perhitungan numerik. Kualitas *mesh* mempengaruhi akurasi hasil simulasi. *Mesh* yang lebih halus memberikan hasil lebih akurat tetapi memerlukan lebih banyak waktu komputasi.

2.1.4. *Study*

Pada tahap ini, pengguna menentukan jenis analisis yang akan dilakukan, seperti analisis statis, dinamis, atau transien. Pengguna juga dapat mengatur parameter studi, seperti waktu simulasi dan kondisi batas. Ini adalah langkah di mana pengguna mempersiapkan simulasi untuk dijalankan.

2.1.5. *Results*

Setelah simulasi selesai, pengguna dapat menganalisis hasilnya. COMSOL *Multiphysics* menyediakan berbagai alat untuk visualisasi dan analisis hasil, termasuk grafik, kontur, dan plot vektor. Pengguna dapat mengevaluasi kinerja sistem, mengidentifikasi masalah, dan mengoptimalkan desain berdasarkan hasil simulasi.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Juli sampai Oktober 2024 di Laboratorium Fisika Dasar dan Komputasi Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1. Alat dan bahan penelitian.

No.	Alat dan Bahan	Gambar	Fungsi
1.	Laptop Lenovo <i>ThinkPad X1 Yoga, Intel Core i5-7300U, RAM 8GB, SSD 56GB.</i>		Sebagai <i>platform</i> komputasi untuk menjalankan perangkat lunak simulasi.
2.	Perangkat Lunak COMSOL <i>Multiphysics 6.2</i>		Sebagai perangkat lunak permodelan dan analisis simulasi perpindahan panas sirkulasi alami dalam kondisi aliran turbulen pada TMSR.

3.3. Algoritma Penyelesaian Kasus

Berikut ini adalah tahapan-tahapan dalam melakukan penelitian perpindahan panas sirkulasi alami yang disimulasikan menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics 6.2*.

3.3.1. Pemilihan Studi Fisika *Non Isothermal Flow*

Pada penelitian ini model simulasi sirkulasi alami satu fase direpresentasikan dalam bentuk 2D dengan variasi pemanas vertikal dan pendingin vertikal (VHVC). Sistem sirkulasi alami menggunakan garam bahan bakar LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄, kemudian dikaji menggunakan pendekatan fisika aliran non-isotermal (NITF) dan jenis aliran yang turbulen. Penelitian ini menggunakan metode *time dependent* dan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* dengan tiga persamaan utama untuk menyelesaikan masalah perpindahan panas pada sirkulasi alami.

Persamaan Kontinuitas

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

Persamaan (3.1) adalah persamaan kontinuitas dalam bentuk konservatif, yang merupakan salah satu persamaan dasar dalam mekanika fluida. Fungsi dari persamaan ini adalah untuk menjelaskan konservasi massa dalam aliran fluida. $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ menunjukkan perubahan densitas ρ (massa jenis fluida) terhadap waktu t . $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u})$ menunjukkan divergensi dari fluks massa $\rho \mathbf{u}$, di mana \mathbf{u} adalah vektor kecepatan fluida. Persamaan ini menyatakan bahwa laju perubahan densitas massa dalam suatu volume kontrol ditambah fluks massa yang keluar dari volume kontrol tersebut harus sama dengan nol. Ini berarti tidak ada penciptaan atau penghancuran massa dalam sistem yang sedang dipertimbangkan, sehingga massa dalam sistem tersebut tetap konstan, atau dengan kata lain massa totalnya terkonservasi.

Persamaan Navier-Stokes

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

$$\mathbf{K} = (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{I} \quad (3.3)$$

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (3.4)$$

dengan

$$\epsilon = \epsilon p \quad (3.5)$$

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.6)$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3.7)$$

Persamaan (3.2) merupakan persamaan Navier-Stokes dalam mekanika fluida. Persamaan ini mendeskripsikan bagaimana momentum dalam fluida berubah karena efek dari gaya-gaya yang bekerja pada fluida tersebut. $\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ adalah turunan parsial dari vektor kecepatan \mathbf{u} terhadap waktu t , dikalikan dengan densitas fluida ρ . Ini mewakili perubahan momentum per satuan volume karena perubahan kecepatan seiring waktu (komponen percepatan tidak stabil). $\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$ adalah komponen adveksi atau konveksi yang menggambarkan perubahan momentum karena aliran fluida itu sendiri. Ini adalah bagian non-linear dari persamaan yang menunjukkan bagaimana kecepatan di satu titik dipengaruhi oleh aliran di titik-titik sekitarnya. $\nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]$ adalah divergensi tensor tegangan. Bagian ini terdiri dari $-p\mathbf{I}$ atau tekanan dalam fluida yang bekerja secara isotropik. \mathbf{K} atau tensor tegangan viskos, yang meliputi efek viskositas fluida yang menahan deformasi dan menyebabkan disipasi energi melalui gesekan internal. \mathbf{F} adalah gaya luar yang bekerja pada fluida, seperti gaya elektromagnetik atau gaya lain yang mungkin ada dalam sistem. $\rho \mathbf{g}$ adalah gaya gravitasi yang bekerja pada fluida, di mana \mathbf{g} adalah percepatan gravitasi. Secara keseluruhan, persamaan Navier-Stokes ini menggambarkan konservasi momentum dalam aliran fluida, dengan mempertimbangkan efek tekanan, viskositas, gaya luar, dan gravitasi.

Persamaan Dinamika Perpindahan Panas

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{vd} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T \quad (3.9)$$

$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ adalah laju perubahan energi internal per satuan volume. $d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$ adalah laju transfer energi karena konveksi. $\nabla \cdot \mathbf{q}$ adalah laju transfer energi melalui difusi termal. $d_z Q$, q_0 , $d_z Q_p$, dan $d_z Q_{vd}$ adalah sumber-sumber energi lainnya seperti sumber panas volumetrik, sumber konvektif, sumber radiasi, atau disipasi viskos. Persamaan dinamika perpindahan panas pada Persamaan (3.8) menggambarkan bahwa laju perubahan energi panas sebanding dengan laju perpindahan energi melalui konduksi dan laju pembentukan energi panas. Di mana Persamaan (3.9) merupakan persamaan untuk konduksi panas yang menunjukkan bahwa vektor fluks panas (\mathbf{q}) berbanding lurus dan berlawanan arah dengan gradien suhu (∇T), dengan $d_z k$ sebagai koefisien konduktivitas termal. Artinya, panas mengalir dari daerah dengan suhu tinggi ke suhu yang lebih rendah.

3.3.2. Memasukan Parameter

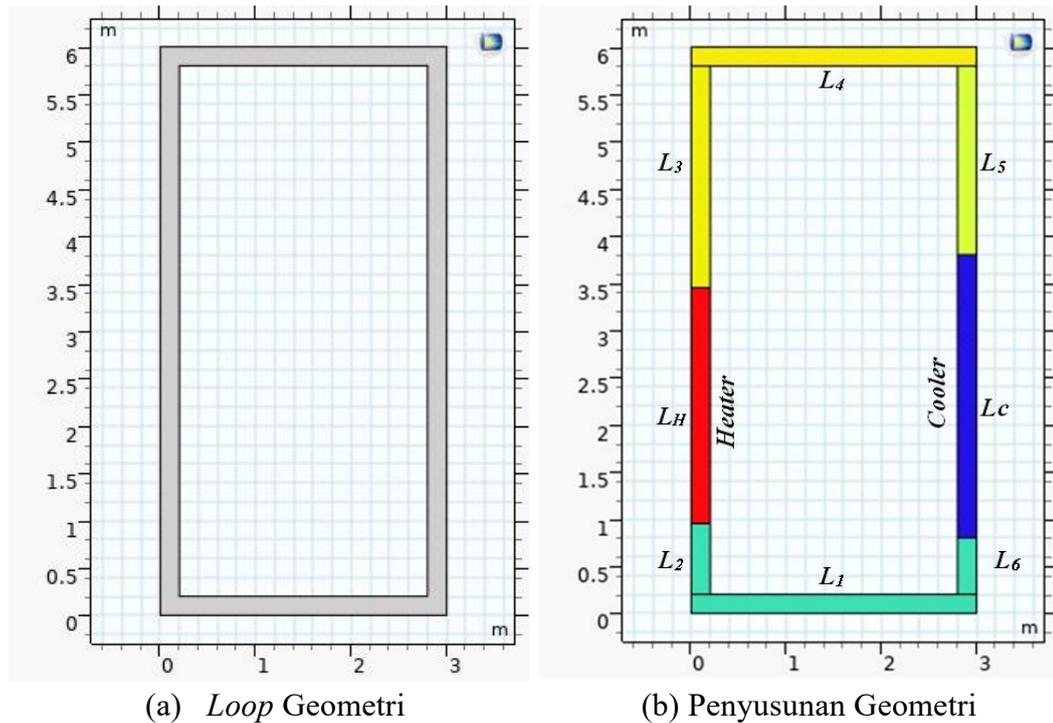
Parameter dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.2**. Parameter ini merupakan data sekunder yang diambil dari studi literatur yang kemudian dimasukkan pada *parameter interface* program CFD COMSOL *Multiphysics*.

Tabel 3.2. Parameter reaktor TMSR.

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	
Kecepatan volume <i>inlet</i> (V_in)	0,02 m ³ /s	(Cui, <i>et al.</i> , 2020)
Luas penampang x (A_x)	0,6 m ²	
Luas penampang y (A_y)	1,2 m ²	
Kecepatan aliran <i>inlet</i> di x (\mathbf{u}_x)	0,03 m/s	
Kecepatan aliran <i>inlet</i> di y (\mathbf{u}_y)	0,02 m/s	
Tekanan <i>inlet</i> (P_in)	10 ⁵ Pa	
Percepatan gravitasi (\mathbf{g})	9,8 m/s ²	(Cui, <i>et al.</i> , 2020)
Daya <i>input</i> pemanas 1 (Pw1)	150,1 W	

3.3.3. Pembuatan Geometri

Geometri yang digunakan pada penelitian ini adalah geometri *loop* primer yang nantinya sebagai *loop* sirkulasi alami (NCL). Pada **Gambar 3.1.(a)** menunjukkan *loop* geometri dari *loop* sirkulasi alami, sedangkan **Gambar 3.1.(b)** menunjukkan penyusunan geometrinya.



Gambar 3.1. Geometri *loop* sirkulasi alami.

Tabel 3.3. Dimensi dari *loop* sirkulasi alami.

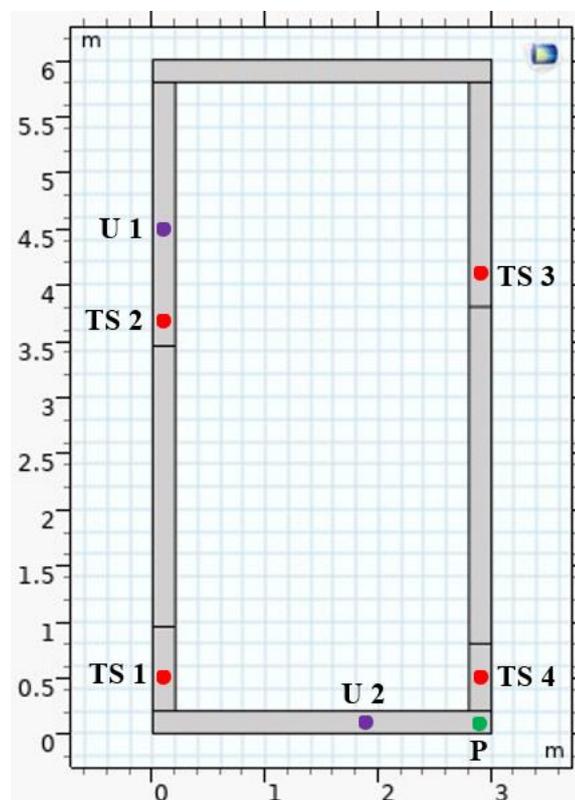
Parameter	Nilai (m)
L_1	3
L_2	0,75
L_H	2,5
L_3	2,35
L_4	3
L_5	2
L_C	3
L_6	0,6
Diameter	0,2

Dimensi ukuran dari penyusunan geometri ini dapat dilihat pada **Tabel 3.3**. Lengan dingin (*cold leg*) ditandai dengan warna hijau, lengan panas (*hot leg*) ditandai

dengan warna kuning, pemanas (*heater*) ditandai dengan warna merah, pendingin (*cooler*) ditandai dengan warna biru tua. Kemudian bagian-bagian tersebut disatukan menjadi persegi panjang ukuran 3 m × 5 m (**Gambar 3.1 (a)**).

3.3.4. Titik-Titik Pengukuran

Penelitian ini disimulasikan menggunakan COMSOL *Multiphysics* untuk memvisualisasikan distribusi suhu, kecepatan aliran, dan tekanan fluida dalam *loop* sirkulasi alami. Oleh karena itu, lokasi pengukuran untuk masing-masing besaran fisika tersebut telah ditentukan dan didefinisikan pada *loop* sirkulasi alami. Posisi titik pengukuran suhu (T), kecepatan aliran (U), dan tekanan (P) digambarkan seperti pada **Gambar 3.2**. Titik pengukuran suhu (T) ditempatkan 25 cm sebelum pemanas (TS 1), setelah pemanas (TS 2), sebelum pendingin (TS 3), dan setelah pendingin (TS 4). Titik pengukuran kecepatan aliran (U) ditempatkan 1m setelah pemanas (U 1) dan setelah pendingin (U 2), sedangkan titik pengukuran tekanan (P) ditempatkan pada sudut kanan bawah setelah pendingin dalam *loop* sirkulasi alami.



Gambar 3.2. Letak titik-titik pengukuran *loop* sirkulasi alami.

3.3.5. Pemilihan Material

Pada penelitian ini material yang digunakan berupa garam lebur 68 LiF- 28 BeF₂ - 0,1 ThF₄- 3,9 UF₄ (*liquid*) [mol%]. *Librarie* material tersebut ditambahkan secara manual kedalam *software* COMSOL *Multiphysics* beserta sifat-sifat termofisika dari garam seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3.4**. Kemudian menetapkan nilai yang berbeda di berbagai interval dari sifat material tersebut menggunakan fungsi *piecewise*. 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	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)

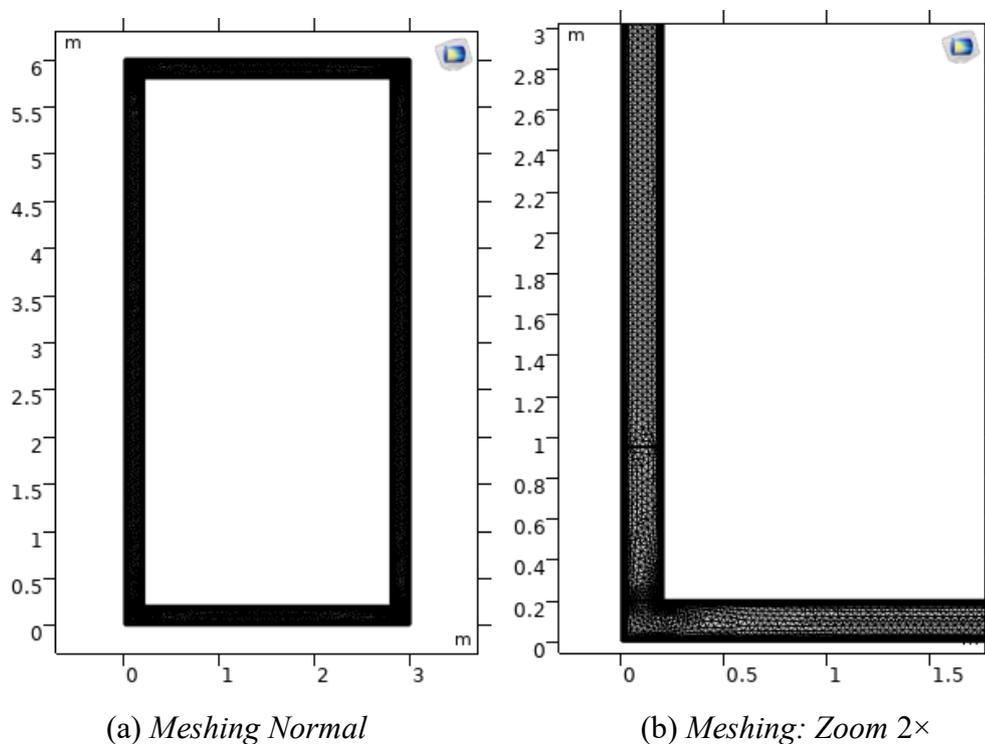
3.3.6. Kondisi Batas (*Boundary*) dan Kondisi Awal (*Initial Value*)

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.

3.3.7. Pembentukan *Mesh*

Pembentukan *mesh* memisahkan permukaan atau volume geometri menjadi beberapa elemen. Variabel yang diperlukan dihitung di seluruh elemen menggunakan persamaan diferensial parsial. Selama *meshing*, permukaan 2D direpresentasikan menggunakan kumpulan segitiga dan kuadrilateral. Ukuran

meshing yang lebih kecil memberikan hasil yang lebih akurat dan memperpanjang waktu proses simulasi. Pembuatan *mesh* ini dapat dilihat pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3. Penampang *meshing*, (a) *meshing* normal, (b) *meshing* diperbesar 2 kali.

3.3.8. Perhitungan

Metode penyelesaian yang digunakan pada COMSOL adalah secara *interpreter*. Sehingga penyelesaiannya secara baris perbaris dan berurutan dengan *looping* bergantung 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 10000 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

Hasil yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah mengetahui perpindahan panas garam bahan bakar (LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄) pada sistem sirkulasi di *loop* primer reaktor tipe TMSR. Kemudian hasil simulasinya berupa dinamika suhu, tekanan, dan kecepatan aliran dalam operasi normal dengan *software* COMSOL *Multiphysics* 6.2.

3.3.10. Benchmarking Experiment

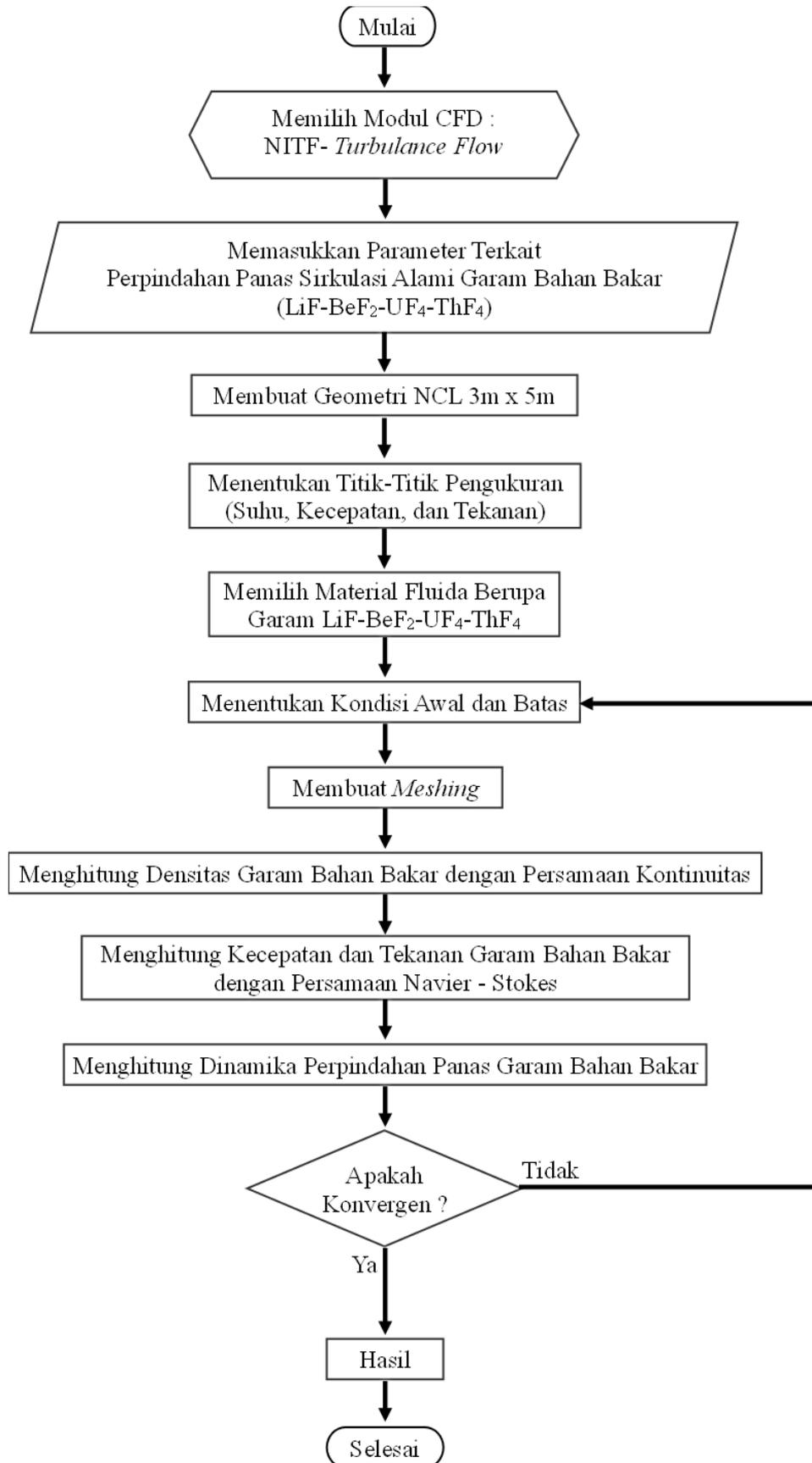
Eksperimen *Benchmark* merupakan alat penting yang digunakan untuk memvalidasi metode numerik dan model komputasi. Pada penelitian ini digunakan perbandingan dari eksperimen yang dilakukan oleh Wang, *et al.*, (2013) mengenai karakteristik aliran turbulen dan perpindahan panas dalam *loop* sirkulasi alami. Data parameter yang digunakan dalam simulasi ini ditunjukkan pada **Tabel 3.5**.

Tabel 3.5 Parameter *benchmarking* pada penelitian Wang, *et al.*, (2013).

Parameter	Nilai
Material	H ₂ O
Kecepatan Awal	0,03 m/s
Suhu Awal	300 K
Suhu Pemanas	345 K
Suhu Pendingin	320 K
Daya <i>Input</i>	25 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**.



Gambar 3.4. Diagram alir penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5. 1. SIMPULAN

Simpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Karakteristik aliran turbulen pada sistem sirkulasi alami TMSR kondisi normal ditandai oleh pembentukan beragam vorteks yang menciptakan pencampuran fluida dengan lebih intensif, memungkinkan transfer energi panas lebih efektif antara fluida dan dinding, baik saat pemanasan maupun pendinginan. Aliran turbulen juga menghasilkan distribusi suhu yang lebih seragam di seluruh fluida, sehingga berkontribusi pada stabilitas operasional sistem.
2. Pada kondisi aliran turbulen dengan waktu pengujian 4500s diperoleh suhu *steady-state* untuk fluida lebih rendah dibandingkan dengan aliran laminar baik di TS1, TS2, TS3, maupun TS4. Hal ini menunjukkan aliran turbulen lebih efisien dalam mendistribusikan panas yang berkontribusi pada efisiensi perpindahan panas secara lebih merata.
3. Kecepatan fluida pada aliran turbulen sebesar 0,0000143578 m/s setelah pemanas dan 0,00045758 m/s setelah pendingin. Sedangkan pada aliran laminar sebesar 0,008 m/s setelah pemanas dan 0,007 m/s setelah pendingin. Kecepatan fluida pada aliran turbulen lebih rendah dari laminar karena energi kinetik yang didistribusikan secara acak oleh vorteks mengurangi kecepatan fluida secara keseluruhan dan menyebabkan pengurangan kecepatan lokal di beberapa area.
4. Pengukuran di titik P menunjukkan bahwa pada aliran turbulen tekanannya lebih kecil dari pada aliran laminar. Tekanan pada aliran turbulen berada pada nilai $-1886,03$ Pa, sedangkan pada aliran laminar sebesar -9888 Pa. Perbedaan ini terjadi karena aliran turbulen memiliki sifat pencampuran yang intensif dan distribusi energi kinetik lebih merata, sehingga mengurangi gradien tekanan di sepanjang sistem.

5. 2. SARAN

Saran untuk penelitian mendatang adalah melakukan modifikasi model dengan mempertimbangkan aliran turbulen dalam kondisi LOHS serta analisis multifase. Langkah ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih menyeluruh mengenai dinamika perpindahan panas dan perilaku fluida, sekaligus menggali informasi yang lebih mendalam tentang karakteristik aliran dan perpindahan panas pada TMSR. Integrasi aliran turbulen dan analisis multifase juga berpotensi meningkatkan pemahaman terhadap interaksi kompleks dalam sistem dan meningkatkan akurasi hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J. D., 1995. *Computational Fluid Dynamics The Basics With Applications*. Mechanical Engineering ed. USA: McGraw-Hill.
- Batchelor, G., 1967. *An Introduction To Fluid Dynamics*. New York: Cambridge University Press.
- Cauntesa, R. A., 2024. Analisis Perpindahan Panas Sirkulasi Alami Garam Bahan Bakar (LiF-BeF₂ -UF₄ -ThF₄) Menggunakan COMSOL Multiphysics. *SKRIPSI*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M., 2014. *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications, Third Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Chouhan, R., Borgohain, A., Shrivastava, A. K. and Maheshwari, N. K., 2019. *CFD Analysis Of Molten Fluoride Salt Natural Circulation In A Rectangular Loop*. Springer Singapore, Thorium—Energy for the Future: Select Papers from ThEC15.
- Cui, Y., Cui, L., Xia, S. P., Chen, J. G., and Cai, X. Z., 2020. Dynamic Analysis for a 2 MW Liquid-Fueled Molten Salt Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 1(17), pp. 531-540.
- Dai, Z., 2017. Thorium Molten Salt Reactor Nuclear Energy System (TMSR). In: *Molten Salt Reactors and Thorium Energy*. Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 531-540.
- David, L., 2010. Molten Salt Reactors: A New Beginning for An Old Idea. *Nuclear Engineering and Design*, 260(6), pp. 1644-1656.
- Ding, T., Meng, Z., Chen, K., Fan, G., and 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*, 165(87), pp. 1-19.
- Emblemsvag, J., 2021. Safe, Clean, Proliferation Resistant and Cost-Effective Thorium Based Molten Salt Reactors for Sustainable Development. *International Journal of Sustainable Energy*, 41(6), pp. 514-537.

- Fell, H., Gilbert, A., Jenkins, J. D. and Mildenerger, M., 2022. Nuclear Power And Renewable Energy Are Both Associated With National Decarbonization. *Nature Energy*, 7(1), pp. 25-29.
- Gajdzik, B., Wolniak, R., Nagaj, R., Zuromskaite, N. B., and Grebski, W. W., 2024. The Influence Of The Global Energy Crisis On Energy Efficiency: A Comprehensive Analysis. *Energies*, 17(4), pp. 947-996.
- GIF, 2002. *A Technology Roadmap For Generation IV Nuclear Energy Systems*, Cambridge: Woodhead Publishing.
- GIF, 2023. *Annual Report 2023*, Cambridge: Wonder Publishing.
- Goldberg, S. M. & Rosner, R., 2011. *Nuclear Reactors : Generation to Generation*. Chicago: American Academy of Arts and Sciences.
- Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J., 2010. *Fisika Dasar, Edisi Ketujuh Jilid 1*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Hariyanto, D., Permana, S. and 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*, 45(8), pp. 11892-11903.
- IAEA, 2023. *Status of Molten Salt Reactor Technology*, Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Jeong, Y. S., Seo, S. B. and Bang, I. C., 2018. Natural Convection Heat Transfer Characteristics of Molten Salt with Internal Heat Generation. *International Journal of Thermal Sciences*, 55(2), pp. 493-505.
- Jyothi, R. K., Melo, L. G. T. C. D., Santos, R. M. and Yoon., H. S., 2023. An Overview of Thorium as a Prospective Natural Resource for Future Energy. *Frontiers in Energy Research*, 11(1132611).
- Kamei, T., 2012. Recent Research of Thorium Molten Salt Reactor from a Sustainability Viewpoint. *Sustainability*, 4(10), pp. 2399-2418.
- Kamei, T. and Hakami., S., 2011. Evaluation of Implementation of Thorium Fuel Cycle with LWR and MSR. *Progress in Nuclear Energy*, 53(7), pp. 820-824.
- Kartal, M. T., 2022. The Role Of Consumption Of Energy, Fossil Sources, Nuclear Energy, And Renewable Energy On Environmental Degradation In Top-Five Carbon Producing Countries. *Renewable Energy*, 184(3), pp. 871-880.
- Malerba, L., Al Mazouzi, A., Bertolus, M., Cologna, M., Efsing, P., Jianu, A., Tarantino, M., 2022. Materials for Sustainable Nuclear Energy : A European Strategic Research and Innovation Agenda for All Reactor Generations. *Energies*, 15(5), p. 1845.

- Masterson, R. E., 2020. *Nuclear Reactor Thermal Hydraulics An Introduction to Nuclear Heat Transfer and Fluid Flow*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Misale, M., Garibaldi, P., Passos, J. C. and Bitencourt, G. G., 2007. Experiments In A Single Phase Natural Circulation Mini Loop. *Exp. Therm. Fluid Sci*, 31(8), pp. 1111-1120.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Munson, B. R. and DeWitt, D. P., 2003. *Introduction to Thermal System Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons, Inc..
- Mustakimah, M., Zakuan, N. D., Hassan, T. N. A., Lock, S. S. M., and Mohd Shariff, A., 2024. Global Development And Readiness Of Nuclear Fusion Technology As The Alternative Source For Clean Energy Supply. *Sustainability*, 16(10), pp. 4089-4123.
- NEA, 2021. *Advanced Nuclear Reactor Systems Advanced Nuclear Reactor Systems*, Paris: OECD Publishing.
- Nuclear Power, 2022. *Nuclear Engineering*. [Online] Available at: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/> [Accessed 2 September 2024].
- Nuclear Power, 2022. *Nuclear Engineering*. [Online] Available at: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/> [Accessed 6 Maret 2024].
- Poullikkas, A., 2013. An Overview of Future Sustainable Nuclear Power Reactors. *International Journal of Energy and Environment*, 4(5), pp. 743-776.
- Rosenthal, M. W., Briggs, R. B. and Kasten., P. R., 1968. *Molten Salt Reactor Program Semiannual Progress Report For Period Ending August 31*. Oak Ridge: ORNL.
- Sabharwall, P., Aufiero, M. and Fratoni, M., 2019. Heat Transfer and Computational Fluid Dynamics for Molten Salt Reactor Technologies.. In: *Advances of Computational Fluid Dynamics in Nuclear Reactor Design and Safety Assesment*. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 809-839.
- Sayma, A., 2009. *Computational Fluid Dynamics*. Canada: Ventus Publishing.
- Sovacool, B. K., Schmid, P., Stirling, A., Walter, G., and MacKerron, G., 2020. Differences In Carbon Emissions Reduction Between Countries Pursuing Renewable Electricity Versus Nuclear Power. *Nature Energy*, 5(11), pp. 928-935.
- Todreas, N. E. and Kazimi, M. S., 1990. *Nuclear System I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. London: Hemisphere Publishing Corporation.

- Todreas, N. E. and Kazimi, M. S., 1990. *Nuclear System II: Elements of Thermal Hydraulic Design*. London: Hemisphere Publishing Corporation.
- Wang, J. Y., Chuang, T. J. and Ferng, d. Y. M., 2013. CFD Investigating Flow And Heat Transfer Characteristics In A Natural Circulation Loop. *Annals of Nuclear Energy*, 58(3), pp. 65-71.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E. and Rorrer, G. L., 2008. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer 5 ed.* New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Zhang, D., Liu, L., Liu, M., Xu, R., Gong, C., Zhang, J., and Su, G., 2018. Review of Conceptual Design and Fundamental Research of Molten Salt Reactors in China. *International Journal of Energy Research*, 42(5), pp. 1834-1848.
- Zhang, Y. Q., Li, L., Sadiq, M. and Chien, F. S., 2023. The Impact Of Non-Renewable Energy Production And Energy Usage On Carbon Emissions: Evidence From China. *Energy & Environment*, 35(4), pp. 2248-2269.