

**EFEK PERUBAHAN JENIS FLUIDA PADA ALIRAN DI *HEAT EXCHANGER*
DENGAN SIMULASI ANSYS FLUENT**

***EFFECT OF FLUID TYPE CHANGE ON FLOW IN HEAT EXCHANGERS USING
ANSYS FLUENT SIMULATION***

Dastin Sidek, Universitas Negeri Yogyakarta

Rida Siti Nur'aini Mahmudah, Universitas Negeri Yogyakarta

*e-mail: dastinsidek.2021@student.uny.ac.id

Abstrak. *Heat exchanger* merupakan komponen penting dalam sistem termal, termasuk reaktor nuklir, yang berfungsi mentransfer panas antar fluida. Efisiensi perpindahan panas sangat bergantung pada jenis fluida kerja yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja tiga jenis fluida air, air berat, dan garam cair FliBe pada *heat exchanger* tipe *shell and tube* menggunakan simulasi numerik dengan perangkat lunak ANSYS Fluent. Simulasi dilakukan dalam kondisi tunak dan aliran turbulen dengan *finite volume method* (FVM) serta algoritma SIMPLEC. Parameter suhu *inlet* fluida ditentukan berdasarkan referensi, yaitu 300 K dan 340 K untuk air dan air berat, serta 824,82 K dan 864,82 K untuk FliBe. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi FliBe–FliBe memiliki efektivitas perpindahan panas tertinggi sebesar 41,80%, diikuti oleh air–air sebesar 26,14% dan air berat–air berat sebesar 24,07%. Distribusi suhu pada fluida FliBe juga menunjukkan kontur yang stabil dan linier, mencerminkan perpindahan panas yang efisien. Dengan demikian, FliBe dinilai sebagai fluida kerja yang potensial untuk sistem perpindahan panas bersuhu tinggi, khususnya dalam aplikasi reaktor nuklir generasi lanjut seperti Molten Salt Reactor (MSR).

Kata kunci: *heat exchanger, ANSYS Fluent, FliBe, perpindahan panas, efisiensi termal*

Abstract. *Heat exchangers* are essential components in thermal systems, including nuclear reactors, functioning to transfer heat between fluids. The efficiency of heat transfer is highly influenced by the type of working fluid used. This study aims to compare the performance of three working fluids—water, heavy water, and molten salt FliBe—in a shell-and-tube heat exchanger using numerical simulations with ANSYS Fluent. The simulations were conducted under steady-state conditions and turbulent flow using the finite volume method and the SIMPLEC algorithm. Inlet temperature parameters were set based on literature: 300 K and 340 K for water and heavy water, and 824.82 K and 864.82 K for FliBe. Simulation results show that the FliBe–FliBe configuration yields the highest heat transfer effectiveness at 41.80%, followed by water–water at 26.14% and heavy water–heavy water at 24.07%. Temperature distribution for FliBe also exhibited the most stable and linear contour, indicating efficient and consistent heat transfer. Thus, FliBe is considered a highly potential working fluid for high-temperature heat transfer systems, particularly in advanced nuclear reactor applications such as the Molten Salt Reactor (MSR).

Keywords: *heat exchanger, ANSYS Fluent, FliBe, heat transfer, thermal efficiency*

PENDAHULUAN

Perpindahan panas merupakan fenomena fisis penting dalam berbagai aplikasi rekayasa teknik, khususnya pada sistem termal yang melibatkan aliran fluida dalam kondisi suhu tinggi maupun rendah. Salah satu komponen utama dalam sistem tersebut adalah *heat exchanger*, yaitu perangkat yang dirancang untuk memindahkan energi panas dari satu fluida ke fluida lainnya tanpa terjadi perpindahan massa antar fluida tersebut. *Heat exchanger* banyak diterapkan dalam sektor industri seperti pembangkit listrik tenaga panas, sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*), industri kimia, sistem energi terbarukan, hingga teknologi reaktor nuklir generasi lanjut. Performa *heat exchanger* sangat bergantung pada banyak parameter, di antaranya desain geometri, kondisi operasi, jenis fluida, serta sifat termofisika dari fluida kerja yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan fluida kerja yang tepat merupakan faktor fundamental untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas.

Dalam praktiknya, air merupakan fluida kerja yang paling umum digunakan karena ketersediaannya yang melimpah, murah, dan memiliki sifat termal yang cukup baik pada kondisi operasi standar. Selain itu, air berat (D_2O) juga sering digunakan dalam sistem reaktor nuklir tertentu, seperti reaktor tipe CANDU, karena kemampuannya memperlambat neutron dan menahan suhu lebih tinggi dibanding air biasa. Namun, dalam sistem energi bersuhu sangat tinggi seperti reaktor *Molten Salt Reactor* (MSR), fluida konvensional seperti air dan air berat sering kali tidak mampu mempertahankan kestabilan termal dan kinerja efisien dalam jangka panjang. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif fluida kerja dengan karakteristik termal unggul yang mampu bertahan pada suhu ekstrem tanpa mengalami degradasi performa.

Salah satu kandidat fluida yang menjanjikan dalam aplikasi suhu tinggi adalah $LiBe$, yakni campuran *lithium fluoride* (LiF) dan *beryllium fluoride* (BeF_2). $LiBe$ memiliki titik leleh rendah, konduktivitas termal tinggi, kapasitas panas jenis besar, serta viskositas rendah pada suhu tinggi, sehingga sangat cocok digunakan dalam sistem termal berbasis molten salt. Fluida ini juga memiliki stabilitas kimia dan termal yang baik, serta tidak mudah mengalami korosi terhadap material struktur penukar kalor. Dengan sifat-sifat tersebut, $LiBe$ menjadi kandidat kuat untuk menggantikan air atau air berat dalam sistem termal generasi baru, khususnya yang berkaitan dengan pembangkitan energi nuklir berkelanjutan dan aman.

Seiring berkembangnya teknologi simulasi numerik, analisis performa termal suatu sistem kini dapat dilakukan secara efisien tanpa bergantung pada eksperimen fisik yang kompleks dan mahal. Perangkat lunak ANSYS Fluent merupakan salah satu *tools Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang andal dan banyak digunakan untuk melakukan simulasi aliran fluida serta transfer energi. Dengan pendekatan numerik berbasis *Finite Volume Method* (FVM), simulasi dalam ANSYS Fluent mampu memberikan visualisasi mendetail terhadap distribusi suhu, tekanan, serta kecepatan aliran fluida dalam domain simulasi. Selain itu, pemanfaatan model turbulensi, algoritma solver seperti SIMPLEC, serta teknik diskretisasi orde tinggi menjadikan hasil simulasi lebih akurat dan sesuai dengan fenomena fisis aktual.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis dan perbandingan kinerja termal dari tiga jenis fluida kerja, yaitu air, air berat, dan $LiBe$, dalam sistem *heat exchanger* tipe *shell and tube*. Simulasi dilakukan pada kondisi aliran turbulen dengan geometri yang divalidasi menggunakan data eksperimental. Setiap konfigurasi diuji menggunakan suhu *inlet* dan *outlet* yang berbeda sesuai karakteristik fluida masing-masing. Hasil simulasi akan dianalisis berdasarkan distribusi suhu, perubahan suhu *inlet-outlet*, efektivitas perpindahan panas, serta visualisasi kontur dan grafik.

Melalui penelitian ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih dalam mengenai pengaruh sifat fisik fluida terhadap efisiensi sistem perpindahan panas, khususnya pada

aplikasi sistem energi bersuhu tinggi. Temuan ini juga diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi penukar kalor yang lebih optimal, aman, dan hemat energi untuk masa depan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik dengan perangkat lunak ANSYS Fluent. Tujuan utamanya adalah menganalisis pengaruh variasi jenis fluida terhadap efisiensi perpindahan panas pada sistem *heat exchanger* tipe *shell and tube*.

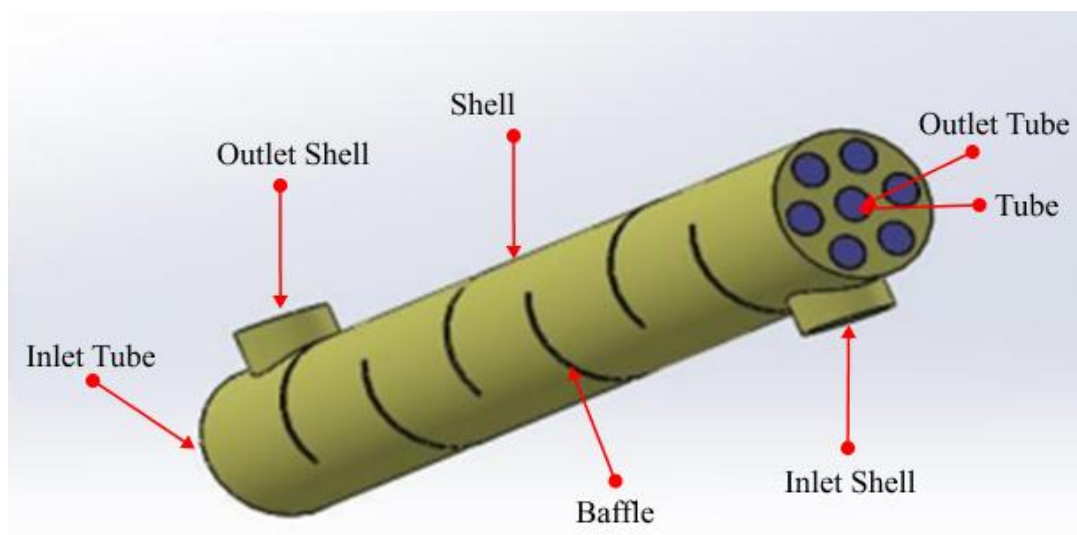
1. Desain dan Subjek Simulasi

Model *heat exchanger* dirancang berdasarkan spesifikasi pada Tabel 1 dari Ahmed et al. (2021).

Tabel 1. Spesifikasi *heat exchanger*

Fitur Desain Utama	Dimensi
Panjang <i>Heat exchanger</i> , L	600 mm
Diameter dalam <i>Shell</i> , Ds	90 mm
Panjang <i>Tube</i>	600 mm
Diameter luar <i>Tube</i> , Do	20 mm
Jumlah <i>Tube</i> , Nt	7
<i>Tube Pitch and Geometry</i> , Pt	Triangular, 30 mm
<i>Baffle Cut</i> , Bc	25 %
<i>Baffle Spacing</i> , Bs	85,7 mm
Ketebalan <i>Baffle</i> , t	3 mm
Jumlah <i>Baffle</i> , Nb	6
<i>Baffle inclination</i> , α	0 degree

Fluida kerja yang digunakan adalah air, air berat, dan FLiBe (campuran garam cair LiF-BeF₂). Untuk mengurangi jumlah sel dan memastikan tidak melebihi batas yang ditetapkan oleh ANSYS Student, digunakan fitur *symmetry*.



Gambar 1. Desain geometri *heat exchanger*

2. Langkah Pelaksanaan

Tahapan pelaksanaan simulasi meliputi:

- Pembuatan geometri menggunakan ANSYS DesignModeler
- Pembuatan *mesh* menggunakan ANSYS Meshing dengan jenis *tetradedral* dan target ukuran elemen 0,002 m
- Penetapan *boundary condition*, meliputi
 - Aliran *counter flow*
 - Laju aliran fluida 0,1 kg/s
 - Suhu inlet: 300 K (air dingin), 340 K (air panas) untuk fluida air dan air berat; 824,82 K dan 864,82 K untuk fluida FliBe
- Model Turbulensi: digunakan model RNG k- ϵ
- Solver: steady-state, pressure-based, SIMPLER scheme
- Skema Numerik: *second-order upwind* untuk momentum dan energi

3. Instrumen dan Parameter

Instrumen utama adalah perangkat lunak ANSYS Fluent Student 2025 R1, dijalankan pada laptop dengan RAM 12 GB dan prosesor AMD Athlon 2.3 GHz. Properti fluida seperti densitas, viskositas, konduktivitas termal, dan kapasitas panas spesifik dimasukkan berdasarkan data pustaka dan *built-in* ANSYS. Sifat fisik fluida (air, air berat, FliBe) dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Sifat fisik fluida (air, air berat, dan FliBe)

Sifat Fisik	Air	Air Berat	FliBe
Temperatur (K)	320	320	824,82
Densitas (kg/m ³)	998,2	1105	2285,6
Kapasitas Panas Spesifik (J/kg·K)	4182	4180	2386
Konduktivitas Termal (W/m·K)	0,6	0,5	0,91595
Viskositas (kg/m·s)	0,0001003	0,000849	0,02599

4. Validasi dan Analisis Data

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi air-air terhadap data eksperimental dari Ahmed et al. (2021). Nilai *error* dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\%Error = \left| \frac{\text{nilai acuan} - \text{hasil simulasi}}{\text{nilai acuan}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

(Sumber: Miftahuddin, Umaroh, dan Karim. 2020)

Untuk mengetahui efisiensi perpindahan panas, dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{q_{actual}}{q_{max}} \times 100\% \quad (2)$$

(sumber achmad et al. 2023)

$$\epsilon = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \times 100\% \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{\dot{m} C_p (T_{h,in} - T_{c,in})} \times 100\% \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{(T_o - T_i)}{(T_{h,in} - T_{c,in})} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

ϵ = Efisiensi perpindahan panas

q_{actual} = Panas yang benar-benar ditransfer (W)

q_{max} = Panas maksimum yang mungkin ditranfer (W)

$\dot{m}$ = Laju massa fluida (kg/s)

C_p = Kapasitas panas spesifik fluida (J/kg.K)

T_o = Suhu *outlet* fluida yang mengalami perubahan suhu (K)

T_i = Suhu *inlet* fluida yang mengalami perubahan suhu (K)

$T_{h,in}$ = Suhu *inlet* fluida panas (K)

$T_{c,in}$ = Suhu *inlet* fluida dingin (K)

C_{min} = Kapasitas panas minimum (W K)

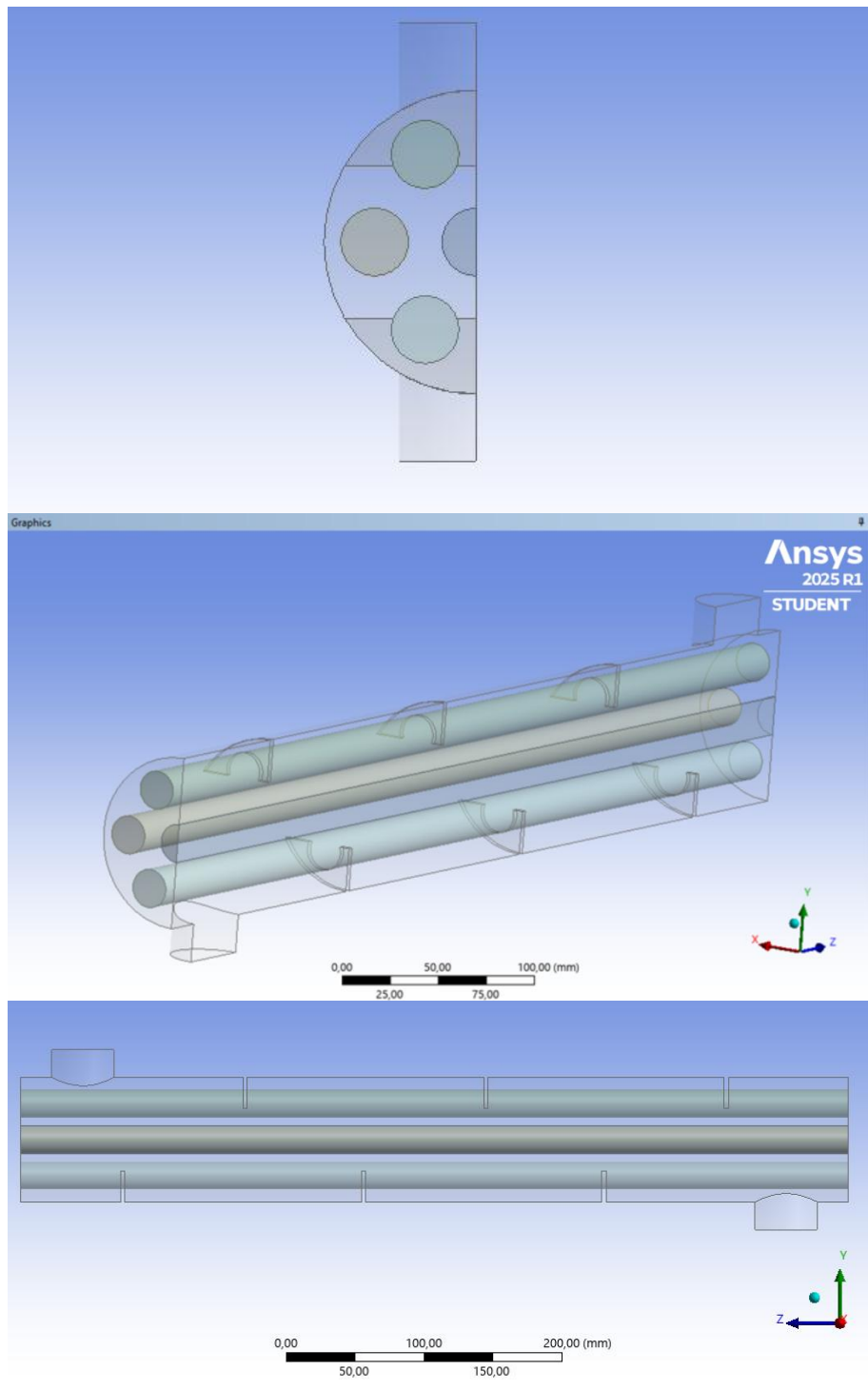
HASIL

Penelitian ini menghasilkan desain geometri, meshing, data numerik serta visual dari simulasi tiga konfigurasi fluida: air–air, air berat–air berat, dan FLiBe–FLiBe, dalam sistem *heat exchanger* tipe *shell and tube*. Data utama mencakup perubahan suhu *inlet* dan *outlet*, serta efektivitas perpindahan panas masing-masing fluida.

1. Geometri dan Jaringan Mesh

Sebelum dilakukan simulasi fluida, dilakukan pemodelan geometri dan jaringan *mesh* pada sistem *heat exchanger* tipe *shell and tube*. Geometri disusun berdasarkan referensi dari Ahmed et al. (2021), dengan desain terdiri dari shell silinder berisi tujuh buah

pipa (tube), enam baffle segmental, serta aliran *counter flow* antara fluida panas di sisi *tube* dan fluida dingin di sisi *shell*. Desain geometri yang sudah di *symmetry* dapat dilihat pada Gambar 2.

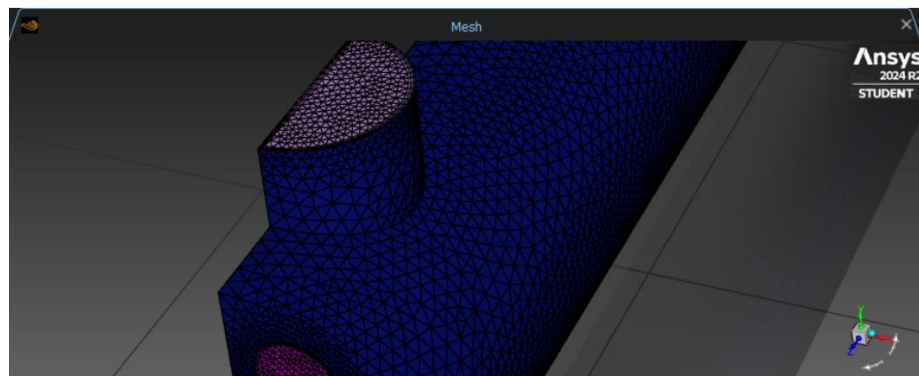


Gambar 2. Desain geometri *heat exchanger* pada Design Modeler ANSYS

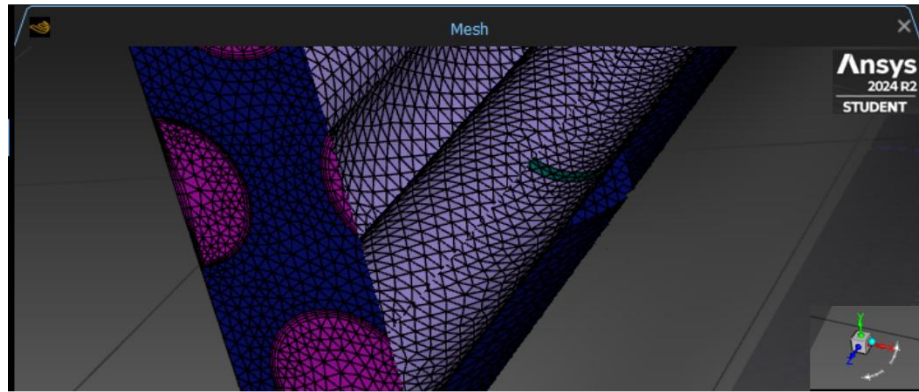
Setelah proses pemodelan selesai, langkah selanjutnya adalah melakukan meshing pada geometri menggunakan ANSYS Meshing, guna memperoleh domain diskret yang siap digunakan dalam proses simulasi numerik. Untuk pengaturan pada mesh Fluent sebagai berikut:

Tabel 3. Pengaturan pada Mesh Fluent

Workflow	Tahapan	Keterangan
<i>Add local Sizing</i>	• <i>Growth Rate 1,2</i> • <i>Size Control Type Face Size</i> • Target mesh 0,002 m	Fokus utama diarahkan pada bagian inlet dan outlet dari sistem shell and tube
<i>Generate the Surface Mesh</i>	• <i>Growth Rate 1,2</i> • <i>Size Function Culvature</i> • <i>Culvature Normal Angle 14 deg</i>	Mendeskrripsikan dan membuat mesh pada permukaan dinding
<i>Describe Geometry</i>	• <i>Geometry Type The geometry consists of only fluid regions with no voids</i> • <i>Change all fluid-fluid boundary types from 'wall' to 'internal' No.</i> • <i>Do you want to apply Share Topology Yes</i>	Mendeskrisikan geometri
<i>Add boundary layer</i>	• <i>Number of layer 3</i> • <i>Transition Rasio 0,272</i> • <i>Growth Rate 1,2</i>	Memperhalus mesh pada bagian sudut dinding yang tajam
<i>Generate the Volume Mesh</i>	• <i>Fill with tetrahedral</i> • <i>Growth Rate 1,2</i> • <i>Max Cell Length 0,0080862 m</i>	membuat mesh pada volume geometri



Mesh tampak luar



Mesh tampak dalam

Gambar 3. Hasil mesh heat exchanger tetrahedral

2. Validasi Hasil Simulasi

Sebelum menganalisis variasi fluida, validasi model dilakukan menggunakan fluida air–air dengan parameter suhu inlet dan geometri yang mengacu pada Ahmed et al. (2021). Tujuan validasi ini adalah memastikan bahwa konfigurasi mesh, model turbulensi, dan boundary condition yang diterapkan menghasilkan hasil yang konsisten dengan data eksperimental dan numerik yang telah diterbitkan. Perbandingan data simulasi dengan data referensi ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Perubahan Suhu (ΔT)

Analisis Domain Fluida	Hasil Analisis (ΔT) Kelvin (Ahmed et al. 2021)	Hasil Eksperimental (ΔT) Kelvin (Ahmed et al. 2021)	Hasil Simulasi Sekarang (ΔT) Kelvin
Perubahan Suhu dalam fluida air panas	4,279	4,3	4,7
Perubahan Suhu dalam fluida air dingin	14,14	14,5	14,91

Tabel 4 menyajikan perubahan suhu (ΔT) hasil simulasi data referensi dan simulasi saat ini. Selanjutnya menghitung persentase error menggunakan persamaan (1) dari data perubahan suhu seperti pada tabel 5.

Tabel 5. Persentase Error Perubahan Suhu (ΔT)

	Analisis	Eksperimen
persentase error shell	2,82 %	2,77 %
persentase error tube	9,28 %	5,38 %

3. Perubahan Suhu Fluida

Simulasi menunjukkan bahwa perbedaan suhu (ΔT) antara *inlet* dan *outlet* pada masing-masing fluida bervariasi tergantung pada sifat termofisikanya. Rangkuman data suhu *inlet* dan *outlet* untuk fluida panas dan dingin disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Data suhu inlet dan outlet fluida kerja hasil simulasi

Fluida	Suhu <i>Inlet Tube</i> (K)	Suhu <i>Outlet Tube</i> (K)	ΔT Panas (K)	Suhu <i>Inlet Shell</i> (K)	Suhu <i>Outlet Shell</i> (K)	ΔT Panas (K)
Air-air	340	330,65	9,35	300	310,46	10,46
Air berat-air berat	340	331,58	8,42	300	309,63	9,63
FliBe-FliBe	864,82	848,1	16,72	824,82	841,54	16,72

Tabel 6 menyajikan data perubahan suhu (ΔT) hasil simulasi masing-masing fluida. Selanjutnya menghitung efektivitas perpindahan panas menggunakan persamaan (5) pada Tabel 6.

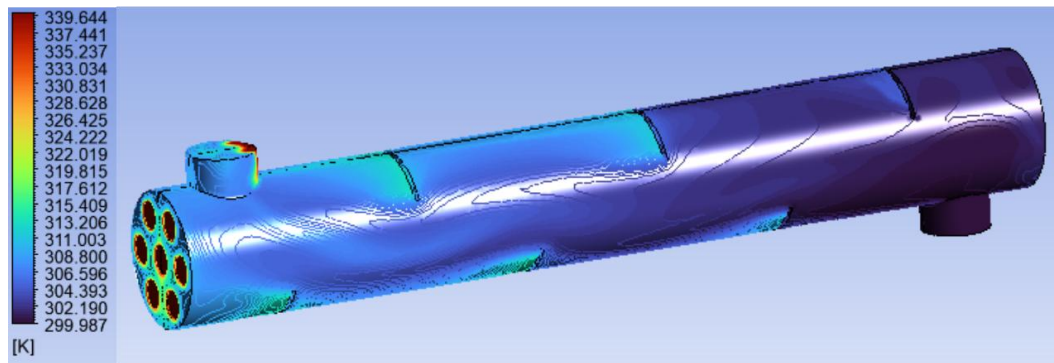
Tabel 7. Efektivitas perpindahan panas

Konfigurasi Fluida	Efektivitas (%)
Air-air	26,14
Air berat-air berat	24,08
FliBe-FliBe	41,8

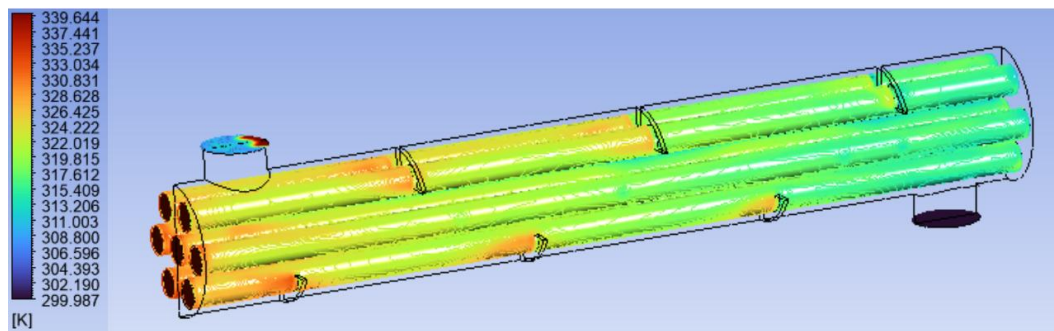
4. Visualisasi Kontur Temperatur

Visualisasi kontur suhu digunakan untuk memperlihatkan distribusi termal sepanjang heat exchanger. Gambar 4 hingga Gambar 6 menunjukkan kontur suhu masing-masing fluida.

a. Suhu *outlet shell* 310,45 K



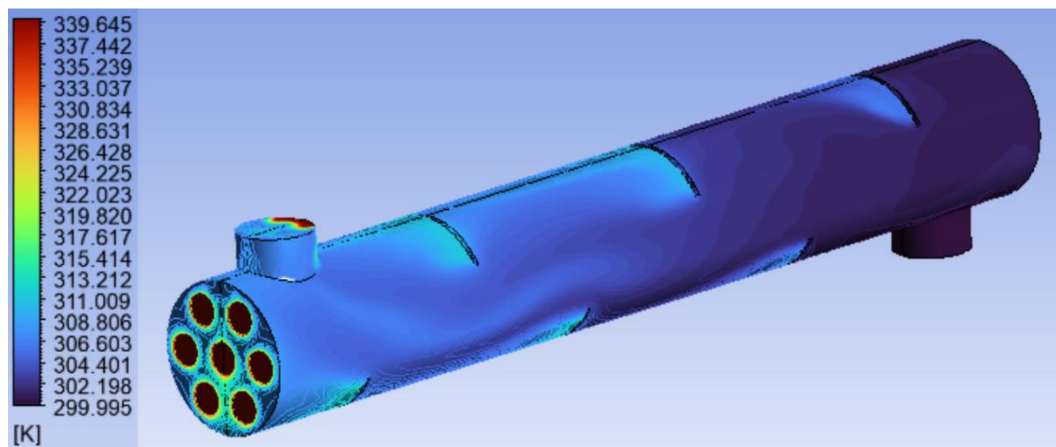
b. Kondisi *steady state*



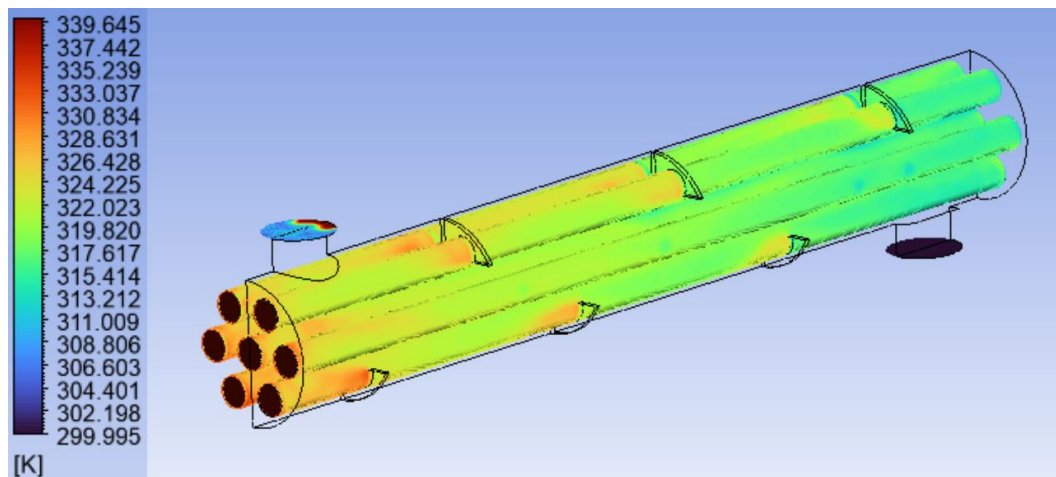
Gambar 4. Kontur perubahan suhu *heat exchanger* fluida air-air

Kontur menunjukkan gradien suhu tajam dari sisi tube ke sisi shell. Distribusi suhu tidak linier, menunjukkan proses transfer panas kurang efisien.

a. Suhu *outlet shell* 309,63 K



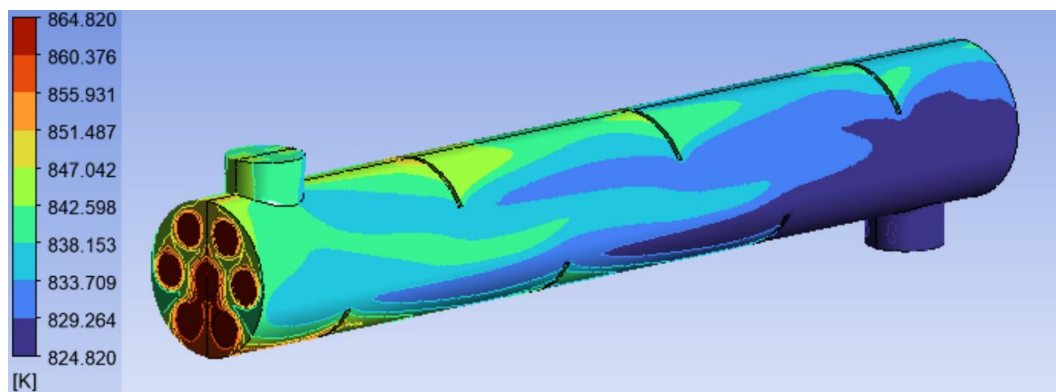
b. Kondisi *steady state*



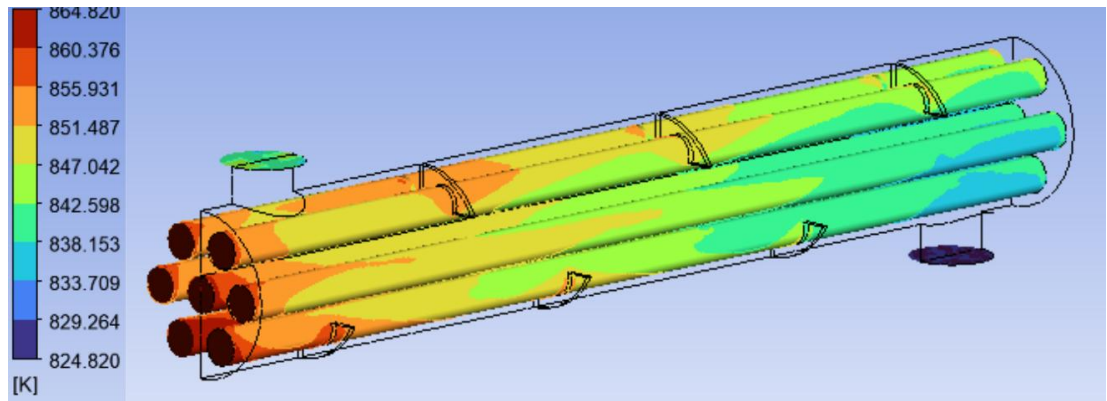
Gambar 5. Kontur perubahan suhu *heat exchanger* fluida air berat–air berat

Distribusi suhu lebih seragam dibanding air biasa. Gradien suhu antar sisi fluida relatif halus.

a. Suhu *outlet shell* 842,54 K



a. Kondisi *steady state*

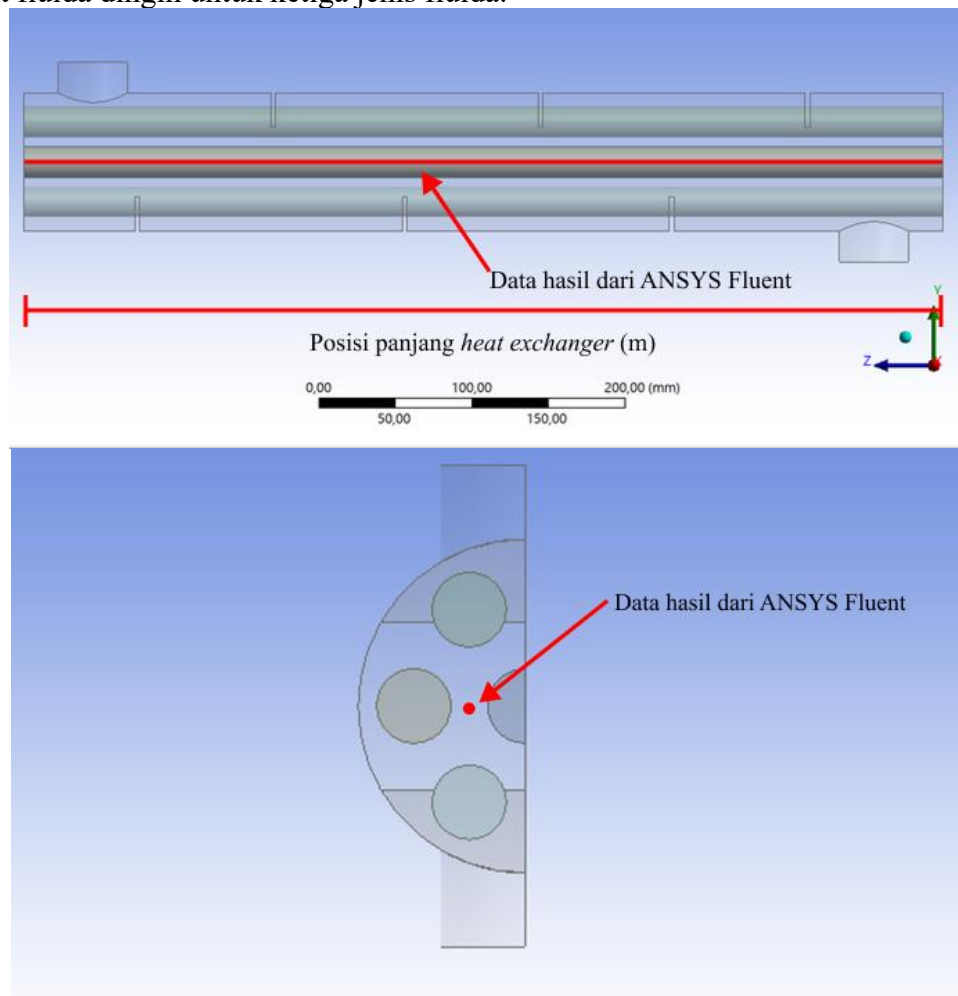


Gambar 6. Kontur perubahan suhu *heat exchanger* fluida FLiBe–FLiBe

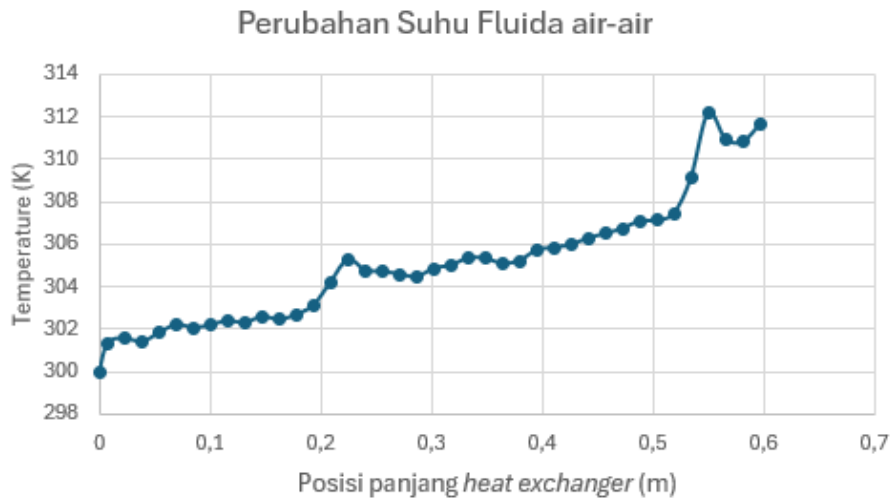
Distribusi suhu sangat linier dan merata dari *inlet* hingga *outlet*. Hal ini mengindikasikan kestabilan aliran termal dan efisiensi perpindahan panas yang tinggi.

5. Grafik Perbandingan *Outlet*

Untuk memperjelas perbedaan performa termal, disusun grafik perbandingan suhu outlet fluida dingin untuk ketiga jenis fluida.

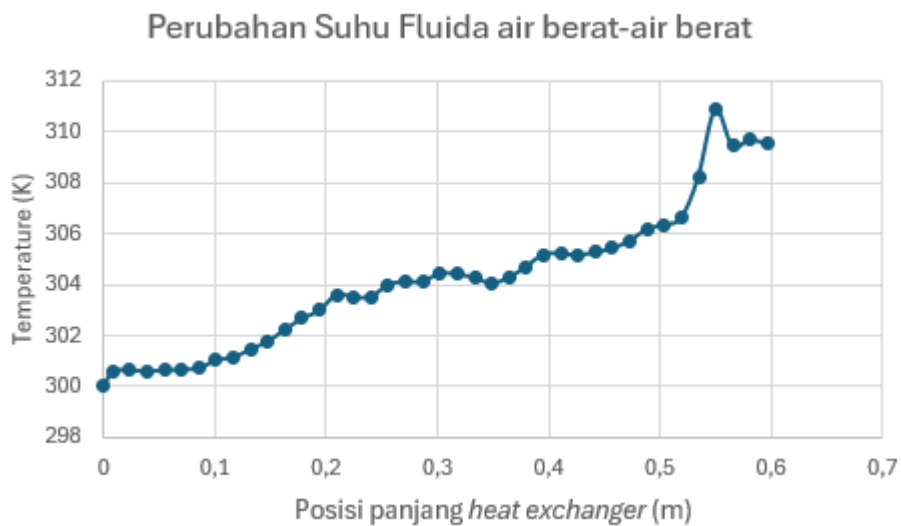


Gambar 7. Garis penanda perpindahan panas untuk grafik



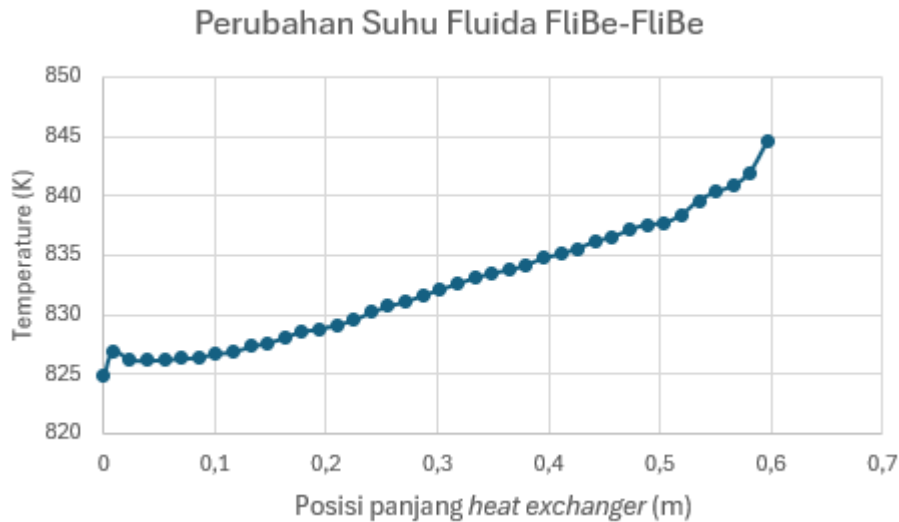
Gambar 8. Grafik perubahan suhu fluida air-air

Kontur menunjukkan gradien suhu tajam dari sisi tube ke sisi shell. Distribusi suhu tidak linier, menunjukkan proses transfer panas kurang efisien.



Gambar 9. Grafik perubahan suhu fluida air berat-air berat

Distribusi suhu lebih seragam dengan air biasa. Gradien suhu antar sisi fluida hampir sama dengan fluida air biasa.



Gambar 10. Grafik perubahan suhu fluida FLiBe-FLiBe

Distribusi suhu sangat linier dan merata dari inlet hingga outlet. Hal ini mengindikasikan kestabilan aliran termal dan efisiensi perpindahan panas yang tinggi.

PEMBAHASAN

1. Geometri dan *Mesh*

Geometri model yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *heat exchanger* tipe *shell and tube* dengan satu jalur *shell* dan satu jalur *tube*. Dimensi keseluruhan *heat exchanger* dirancang menyerupai model eksperimental pada penelitian referensi, agar hasil validasi lebih relevan. Model dibangun dalam tampilan 3D, dengan fluida panas mengalir melalui sisi *tube*, sedangkan fluida dingin mengalir dalam *shell* secara berlawanan arah (*counter flow*). Konfigurasi ini dipilih karena efisiensinya yang tinggi dalam memaksimalkan perpindahan panas antar fluida.

Proses *meshing* domain dilakukan menggunakan *mesh* bertipe *tetrahedral* yang dipilih karena kemampuannya beradaptasi dengan geometri kompleks dan sudut sempit. Ukuran *mesh* disesuaikan agar mampu menangkap gradasi suhu dan aliran dengan presisi tinggi, khususnya di sekitar dinding *tube*, tempat gradien termal signifikan terjadi. Untuk menjaga keseimbangan antara akurasi dan waktu komputasi, dilakukan pengujian independensi *mesh* pada tahap awal simulasi. Dengan pendekatan FVM, solusi numerik untuk persamaan kontinuitas, momentum, dan energi dapat diselesaikan secara konservatif di seluruh domain.

2. Perbedaan Kondisi *Inlet* dan *Outlet* Antar Fluida

Simulasi dilakukan pada tiga konfigurasi fluida yang berbeda, yaitu air–air, air berat–air berat, dan FLiBe–FLiBe. Setiap konfigurasi dirancang dengan kondisi steady state dan model aliran turbulen menggunakan model RNG $k-\epsilon$, dengan skema diskretisasi *second-order upwind* dan algoritma pemecahan SIMPLEC.

Untuk fluida air dan air berat, suhu inlet fluida dingin ditetapkan sebesar 300 K, sedangkan fluida panas diatur pada 340 K. Rentang suhu ini dipilih berdasarkan batas temperatur aman yang umum diterapkan pada sistem fluida konvensional. Sebaliknya, konfigurasi FLiBe–FLiBe menggunakan suhu inlet sebesar 824,82 K untuk fluida dingin

dan 864,82 K untuk fluida panas, sesuai dengan rentang operasi optimal FLiBe dalam sistem MSR sebagaimana dijelaskan oleh Son et al. (2022).

Peningkatan suhu operasi yang signifikan dimungkinkan karena FLiBe memiliki stabilitas termal yang tinggi, sehingga mampu beroperasi pada suhu tinggi tanpa mengalami degradasi sifat fisik maupun kimia. Namun, penting untuk menjaga agar suhu tetap berada di atas titik beku FLiBe, karena pada suhu rendah fluida ini dapat mengalami perubahan fasa menjadi padatan yang dapat menghambat aliran. Oleh karena itu, perbedaan suhu antara *inlet* fluida panas dan dingin pada konfigurasi FLiBe–FLiBe ditetapkan sebesar 40 K, sama seperti yang diterapkan pada konfigurasi air dan air berat, agar perbandingan termal tetap sebanding dalam konteks analisis perpindahan panas.

3. Validasi Model dengan Konfigurasi Fluida Air

Sebelum dilakukan analisis komparatif antar fluida, tahap awal penelitian ini adalah melakukan validasi model simulasi menggunakan konfigurasi fluida air–air. Tujuannya adalah memastikan bahwa pendekatan numerik berbasis FVM yang diterapkan melalui perangkat lunak ANSYS Fluent mampu menghasilkan keluaran yang konsisten dengan data eksperimen. Parameter validasi mencakup suhu inlet dan outlet fluida panas maupun dingin yang diacu dari Ahmed et al. (2021). Berdasarkan hasil validasi, diperoleh selisih perubahan suhu fluida air dengan persentase error $< 10\%$, baik di sisi *shell* maupun *tube*, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Hal ini menunjukkan bahwa model turbulensi RNG $k-\epsilon$, skema SIMPLER, serta diskretisasi second-order upwind yang digunakan sudah cukup representatif untuk menggambarkan fenomena perpindahan panas dalam sistem heat exchanger tipe shell and tube.

4. Hasil Simulasi Tiga Konfigurasi Fluida

Hasil simulasi untuk ketiga konfigurasi fluida menunjukkan tren peningkatan suhu fluida dingin dan penurunan suhu fluida panas, sesuai prinsip perpindahan panas konvektif. Pada konfigurasi air–air, fluida dingin mengalami kenaikan suhu dari 300 K menjadi 314,91 K ($\Delta T = 14,91$ K), sedangkan fluida panas menurun dari 340 K menjadi 335,3 K ($\Delta T = 4,7$ K).

Untuk air berat–air berat, suhu fluida dingin meningkat menjadi 316,24 K ($\Delta T = 16,24$ K), dan fluida panas menurun menjadi 334,48 K ($\Delta T = 5,52$ K). Meskipun massa jenis air berat (1105 kg/m^3) lebih rendah dari air biasa ($2285,57 \text{ kg/m}^3$), efisiensi perpindahan panas lebih tinggi. Ini menunjukkan bahwa selain massa jenis, kapasitas panas jenis dan viskositas juga berpengaruh besar terhadap efektivitas perpindahan panas.

Pada konfigurasi FLiBe–FLiBe, fluida dingin yang masuk dengan suhu tinggi 824,82 K naik menjadi 841,54 K ($\Delta T = 18,25$ K), sementara fluida panas turun menjadi 848,10 K ($\Delta T = 16,72$ K). Rentang perubahan suhu yang besar ini menunjukkan kemampuan FLiBe dalam menyerap dan melepaskan energi panas secara simultan dan efisien.

5. Efektivitas Perpindahan Panas

Perhitungan efektivitas perpindahan panas menggunakan persamaan (5) menunjukkan bahwa konfigurasi FLiBe–FLiBe mencapai nilai efektivitas sebesar 41,8%, yang jauh lebih tinggi dibandingkan air–air (26,14%) maupun air berat–air berat (24,08%). Hal ini mengonfirmasi bahwa FLiBe merupakan fluida yang sangat cocok untuk sistem perpindahan panas bersuhu tinggi. Tingginya kapasitas panas jenis ($2386 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) dan konduktivitas termal ($0,91595 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) pada suhu 824,82 K menjadikan FLiBe sangat efektif dalam menyerap dan menghantarkan energi panas tanpa penurunan performa signifikan. Sebaliknya, performa air dan air berat terbatas oleh viskositas lebih tinggi dan kemampuan menyerap panas yang relatif lebih kecil pada rentang suhu yang diuji.

6. Analisis Visualisasi Kontur Temperatur

Distribusi suhu secara visual disajikan dalam bentuk kontur (Gambar 4–6). Kontur suhu pada fluida air-air menunjukkan gradasi yang tajam dengan distribusi tidak linier. Hal ini menandakan adanya resistansi terhadap aliran panas, yang menyebabkan efisiensi perpindahan panas menurun. Sementara itu, pada fluida air berat-air berat, distribusi terlihat lebih halus dengan perbedaan gradien yang tidak terlalu mencolok, namun masih menunjukkan batas antara zona fluida panas dan dingin. Pada fluida FliBe-FliBe, kontur distribusi suhu terlihat sangat linier dan merata dari inlet ke outlet. Tidak ditemukan zona stagnan atau perubahan suhu mendadak, yang mengindikasikan aliran yang stabil dan sangat kondusif untuk perpindahan panas. Hasil ini memperkuat performa termal FliBe yang telah dihitung secara numerik.

7. Analisis Grafik Perubahan Temperatur

Gambar 8–10 memperlihatkan grafik suhu outlet fluida dingin untuk masing-masing konfigurasi fluida. Grafik fluida air dan air berat menunjukkan tren peningkatan suhu *outlet*, namun kemiringannya relatif rendah, yang menandakan kapasitas serap panas yang terbatas. Berbeda dengan FliBe, grafik menunjukkan kemiringan tajam dan linier, yang memperlihatkan proses peningkatan suhu fluida dingin secara signifikan. Grafik ini memperjelas hasil numerik bahwa FliBe memiliki kemampuan transfer panas yang lebih tinggi dibandingkan fluida lainnya. Adapun grafik ini hanya menampilkan tren perubahan pada fluida dingin, sebab fokus evaluasi difokuskan pada kemampuan fluida untuk menyerap panas, bukan pada kehilangan energi dari sisi fluida panas.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa jenis fluida kerja sangat berpengaruh terhadap efisiensi perpindahan panas pada sistem *heat exchanger* tipe *shell and tube*. Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent, konfigurasi fluida FliBe-FliBe menghasilkan efektivitas perpindahan panas tertinggi sebesar 41,80%, diikuti oleh air-air sebesar 26,14%, dan air berat-air berat sebesar 24,08%. Distribusi kontur suhu yang dihasilkan FliBe juga lebih stabil dan linier, mengindikasikan kestabilan aliran dan efisiensi termal yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh sifat termofisika FliBe yang unggul, seperti kapasitas panas jenis tinggi, konduktivitas termal besar, dan viskositas rendah pada suhu tinggi.

Kesimpulan ini menguatkan gagasan bahwa FliBe merupakan alternatif fluida kerja yang menjanjikan untuk aplikasi perpindahan panas bersuhu tinggi, khususnya pada sistem reaktor nuklir generasi lanjut seperti MSR. Validasi model simulasi terhadap data eksperimental menunjukkan tingkat akurasi yang dapat diterima, dengan *persentase error* di bawah 10%, membuktikan bahwa pendekatan numerik berbasis FVM dan model turbulensi RNG $k-\epsilon$ layak digunakan dalam studi termal kompleks seperti ini.

Kedepan, hasil penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan desain *heat exchanger* yang lebih efisien dan kompak dengan fluida berbasis garam cair. Studi lanjutan dapat difokuskan pada variasi geometri, laju alir, serta integrasi sistem kontrol suhu untuk meningkatkan performa sistem secara keseluruhan. Selain itu, pemodelan transien dan analisis kegagalan akibat tekanan termal atau korosi juga menjadi prospek penting untuk memastikan kelayakan teknologi ini dalam implementasi skala besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada kedua orang tua tercinta atas segala doa, dukungan, dan kasih sayang yang tidak pernah henti menyertai setiap langkah penulis selama proses studi dan penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada kakak penulis atas motivasi dan dorongan yang selalu diberikan.

Penulis secara khusus mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada dosen pembimbing, Dr. Rida Siti Nuraini Mahmudah, S.Si., M.Si., atas bimbingan, arahan, dan kesabaran beliau dalam mendampingi penulis menyelesaikan penelitian ini. Tak lupa, penulis juga berterima kasih kepada Salsabila Ekawati atas dukungan moril, semangat, dan pengertian yang diberikan selama proses penyusunan penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Hakim, R. R. A. (2020). Model energi Indonesia, tinjauan potensi energy terbarukan untuk ketahanan energi di Indonesia: Literatur review. *ANDASIH Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 1-11.
- Kuntoro, I. (2023). Keselamatan Reaktor Nuklir. Jakarta: Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
- Wang et al. (2017). Heat transfer analysis of the advanced Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) conceptual design.
- Ignatiev et al (2014). "Progress in development of Li, Be/F molten salt actinide recycler & transmuter concept",
- Elsheikh, B.M. (2013). Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 6(2), pp.63-70.
- Forsberg, Charles et al. (2022). Status of Molten Salt Reactor Development at Terrestrial Energy and MSRE Lessons Learned. *Nuclear Technology*: 1-24.
- Ali, Hasan et al. (2022). A Comparison of Finite Difference and Finite Volume Method with Numerical Simulations: Burgers Equation Model. <https://doi.org/10.1155/2022/9367638>
- Novalianda, Sari et al. (2020). Perhitungan Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*, 22(2), 50-54. <http://ejurnal.mipa.unsri.ac.id/index.php/jps/index>
- Widharma, I Gede Suputra et al. (2020). *Distributed Control System* pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Tesis. Politenik Negeri Bali
- Köse, Uğur et al. (2019). *Heat exchanger* Design Studies for Molten Salt Fast Reactor. *EPJ Nuclear Sci. Technol.* 5, 12. <https://doi.org/10.1051/epjn/2019032>
- Kuchibhotla, Aditya et al. 2020. Forced Convection *Heat exchanger* of Molten Salt: A review. *Nuclear Engineering and Design* 362 110591
- Sunu, Putu Wijaya et al. 2020. Karakteristik Temperatur Fluida Dingin Pada *Grooved Double Pipe Heat exchanger*. *Jurnal Teknosains*. 10(1): 64-74. <https://doi.org/10.22146/teknosains.43291>
- Widiawaty, Candra Damis et al. 2017. Pemodelan dan Analisis Kinerja *Shell and Tube Heat exchanger* Dengan Metode CFD. *Jurnal Politeknologi* 16(3): 239-244
- Suhaemi, Tjipa. 2018. Prospek Desain Reaktor Berbahan Bakar Cair *Molten Salt Reactor*. *Jurnal Seminat Nasional Teknoka* 3(2502-8782): 64-69
- F. Bostelmann, S. E. Skutnik, E. D. Walker, G. Ilas & W. A. Wieselquist (2022) Modeling of the Molten Salt Reactor Experiment with SCALE, *Nuclear Technology*, 208:4, 603-624. <https://doi.org/10.1080/00295450.2021.1943122>
- Wu, Jianhui et al. 2022. A Review of Molten Salt Reactor Multi-Physics Coupling Models and Development Prospects. *Energies* 2022, 15, 8296. <https://doi.org/10.3390/en15218296>

- Parastiwi, Andianti et al. 2018. Pemantauan Perubahan Suhu Terhadap Pengontrolan Pada *Heat exchanger* Dengan Sensor PT100 Berbasis. Jurnal ELTEK 16(2): 62-79
- Fikri, M. R. H. (2025). Analisis Pengaruh Densitas Beton terhadap Distribusi Radiasi di Luar Bunker Linac Menggunakan *Particle and Heavy Ion Transport Code System* (Phits). [Skripsi, Tidak diterbitkan]. Universitas Negeri Yogyakarta
- Son, I. W., Choi, S., Kimb, S. J., & Leea, J. I. (2022). *Heat exchanger* design study for micro molten salt reactor. In *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju*.
- Achmad, F., Tampubolon, Y. A. S., Fajri, M., Nury, D. F., Prahmana, R. A., Suhartono, S., & Suharto, S. (2023). Efek laju alir dan arah aliran terhadap analisis performa alat penukar panas tipe shell and tube *heat exchanger* menggunakan SCADA. *Jurnal Rekayasa Proses*, 17(2), 148-157.
- Engineering Toolbox. *Dry Air Properties*. Diakses pada 10 Juli 2025 dari https://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html
- Adenuga, K. O. (2021). *Design of a Heat Exchanger for a Supercritical CO2 Turbine System*. West Virginia University.
- Saeed, A. M., & Alfawaz, T. A. F. (2025). Finite Volume Method and Its Applications in Computational Fluid Dynamics. *Axioms*, 14(5), 359.
- Miftahuddin, Y., Umaroh, S., & Karim, F. R. (2020). Perbandingan metode perhitungan jarak euclidean, haversine, dan manhattan dalam penentuan posisi karyawan (Studi Kasus: Institut Teknologi Nasional Bandung). *Jurnal Tekno Insentif*, 14(2), 69-77.