



ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT EXCHANGER* UNTUK SISTEM HIDROLIK MENGGUNAKAN SIMULASI *SOLIDWORKS*

Muhammad Naufal Ibrahim

Jurusan Teknik Mesin , Fakultas Teknologi Industri Itenas Bandung

Jl. PHH. Mustafa No.23 Bandung 40124

E-mail : naufalibrahi14@gmail.com

Masuk : 20 Februari

Direvisi : 17 Maret 2025

Disetujui : 5 April 2025

Abstrak: *Heat exchanger* merupakan alat penukar kalor yang berfungsi untuk mendinginkan atau memanaskan fluida dalam berbagai aplikasi. Dalam kehidupan sehari-hari, perangkat ini diterapkan pada sistem pendingin ruangan dan radiator kendaraan bermotor. Pada industri, *heat exchanger* berperan penting dalam menjaga temperatur fluida hidrolik tetap di bawah 50°C untuk memastikan stabilitas operasional mesin hidrolik. Penelitian ini mengkaji penerapan *heat exchanger* yang dipasang pada pipa masuk fluida menuju reservoir sistem hidrolik. Sistem pendinginan ini memerlukan fluida pendingin eksternal untuk menurunkan temperatur fluida kerja secara efektif. Berdasarkan analisis perpindahan panas, etilen glikol dipilih sebagai fluida pendingin optimal dengan konduktivitas termal 0,48 W/m.K, yang memberikan efisiensi pertukaran kalor yang baik. Simulasi numerik dilakukan untuk memvisualisasikan kinerja *heat exchanger*, meliputi simulasi aliran pada pipa dan karakteristik perpindahan panas. Hasil simulasi menunjukkan penurunan temperatur fluida kerja yang signifikan ke rentang 41-50°C. Temuan ini mengonfirmasi bahwa sistem *heat exchanger* mampu mempertahankan temperatur operasional fluida hidrolik dalam batas yang aman, sehingga meningkatkan stabilitas dan efisiensi kerja mesin hidrolik dalam proses produksi industri.

Kata kunci: *heat exchanger*, sistem hidrolik, etilen glikol, perpindahan panas, simulasi termal

Abstract: *A heat exchanger is a heat transfer device that functions to cool or heat fluids in various applications. In daily life, this device is applied in air conditioning systems and motor vehicle radiators. In industrial settings, heat exchanger s play a crucial role in maintaining hydraulic fluid temperature below 50°C to ensure operational stability of hydraulic machinery. This research examines the implementation of a heat exchanger installed on the inlet pipe to the hydraulic system reservoir. This cooling system requires external cooling fluid to effectively reduce the working fluid temperature. Based on heat transfer analysis, ethylene glycol was selected as the optimal cooling fluid with a thermal conductivity of 0.48 W/m.K, providing efficient heat exchange performance. Numerical simulations were conducted to visualize the heat exchanger performance, including pipe flow simulation and heat transfer characteristics. The simulation results demonstrate a significant reduction in working fluid temperature to the range of 41-50°C, with the inner pipe surface temperature of the heat exchanger reaching 44.67°C. These findings confirm that the heat exchanger system is capable of maintaining hydraulic fluid operational temperature within safe limits, thereby improving the stability and operational efficiency of hydraulic machinery in industrial production processes.*

Keywords: *heat exchanger, hydraulic system, ethylene glycol, heat transfer, thermal simulation*

PENDAHULUAN

Heat exchanger merupakan alat yang sangat berguna untuk menurunkan temperatur suatu fluida. Karena fungsinya sebagai alat penukar kalor, *heat exchanger* menjadi alternatif bagi mesin hidrolik yang selalu mengalami masalah dengan kenaikan temperatur fluida kerja yang mengakibatkan perubahan viskositas. Perubahan viskositas ini dapat mengganggu stabilitas dan performa sistem hidrolik secara keseluruhan.

Pada sistem hidrolik industri, menjaga temperatur fluida kerja di bawah 50°C sangat penting untuk memastikan operasional mesin tetap optimal[13]. Temperatur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi fluida hidrolik, penurunan efisiensi sistem, dan bahkan kerusakan komponen mesin. Oleh karena itu, pengaplikasian *heat exchanger* pada sistem hidrolik diharapkan dapat menjaga temperatur fluida kerja tetap pada kondisi stabil, sehingga tidak mengubah viskositas dan menjaga performa mesin hidrolik agar tetap optimal.

Untuk memahami lebih dalam mengenai karakteristik perpindahan panas pada *heat exchanger*, dilakukan simulasi menggunakan *software SolidWorks*. Simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan pendekatan yang jelas mengenai desain *heat exchanger* dan pemilihan fluida pendingin yang tepat terhadap fluida hidrolik yang didinginkan.

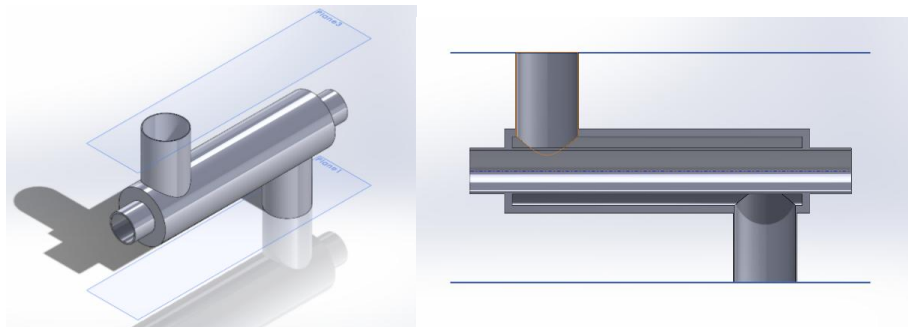
METODOLOGI

2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi komputasi. Penelitian bersifat eksperimental numerik yang bertujuan untuk menganalisis perpindahan panas pada *heat exchanger* untuk sistem hidrolik. Dengan melakukan pemodelan dan analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan aplikasi *solidwork* untuk mempelajari karakteristik perpindahan panas pada *heat exchanger* yang diaplikasikan[4].

2.2. Desain *Heat exchanger* Dengan Pemodelan 3D

Heat exchanger dirancang dengan tipe *shell and tube* sederhana dan di simulasikan menggunakan Pemodelan 3D untuk memperlihatkan rancangan *heat exchanger* yang telah di buat. *Heat exchanger* di design dengan mengikuti prinsip kerja *heat exchanger* konvensional, tatapi untuk sistem pendingin ini *heat exchanger* di buat lebih sederhana dan mudah dipahami. *Heat exchanger* terdiri dari dua *chamber* yang mengalirkan fluida dengan temperatur yang berbeda, fluida yang mengalir di *chamber* kecil akan mendinginkan fluida yang mengalir di *chamber* besar.



Gambar 1. Pemodelan 3D *Heat exchanger*

Dengan spesifikasi material Tembaga pada pipa bagian dalam dan Besi pada pipa bagian luar, kemudian dimensi yang di gunakan bisa di lihat pada tabel berikut:

Tabel 1. Dimensi Komponen *Heat exchanger*

No	Komponen	Diameter	Tebal	Panjang	Jumlah
1	Tube	20 mm	3 mm	400 mm	1 buah
2	Shell	90 mm	10 mm	400 mm	1 buah

2.3. Perhitungan Perpindahan Panas

Perhitungan perpindahan panas dilakukan untuk menemukan fluida pendingin yang tepat sehingga fluida pendingin yang di aplikasikan pada *heat exchanger* dapat menurunkan panas fluida hidrolik dengan temperatur yang diinginkan. Temperatur fluida pendingin saat masuk *heat exchanger* sudah ditentukan dan di kondisikan dengan alat yang tersedia sehingga yang harus dilakukan adalah mencari fluida pendingin yang mampu menurunkan temperatur fluida hidrolik ke temperatur yang diinginkan dengan temperatur fluida pendingin yang sudah ditentukan.

Menghitung Nilai Angka *Grasshoof* [1]:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (Ts - T\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (1)$$

Dimana

g : Percepatan Gravitasi ($\frac{m}{s^2}$)

β : Koefisien Ekspansi Termal (K)

Ts : Temperatur Fluida Hidrolik ($^{\circ}C$)

$T\infty$: Temperatur Permukaan Tube ($^{\circ}C$)

ν : Viskositas Kinematik ($\frac{m^2}{s}$)

L : Panjang Pipa (M)

Menghitung Angka *Reyleght* [1]:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2)$$

Dimana

Gr : Angka *Grasshoff*

Pr : Angka *Prandtl*

Ra : Angka *Rayleght*

Menghitung Angka *Nusselt* [5]:

$$Nul = \frac{0,67 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0,492}{Pr})^{\frac{9}{16}})^{\frac{4}{9}}} \quad (3)$$

Dimana

Nul : Angka *Nusselt*

Ra : Angka *Rayleght*

Pr : Angka *Prandtl*

Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Fluida Hidrolik [1]:

$$h = Nu \frac{k}{L} \quad (4)$$

Dimana

k : Konduktivitas Termal Fluida Hidrolik (W/Mk)

L : Panjang Pipa (M)

h : Koefisien Perpindahan Panas ($\frac{W}{m^2 K}$)

Menghitung Perpindahan Kalor [1]:

$$Q = h.A.(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

Dimana

Q : Percepatan Perpindahan Panas (W)

h : Koefisien Perpindahan Panas ($\frac{W}{m^2 K}$)

A : Luas Selimut Pipa (m)

T_s : Temperatur ($^{\circ}C$)

T_∞ : Temperatur Lingkungan ($^{\circ}C$)

Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Pada *Shell* [1]:

$$h = \frac{Q}{A(T_s - T_\infty)} \quad (6)$$

Dimana

Q : Percepatan Perpindahan Panas (W)

h : Koefisien Perpindahan Panas ($\frac{W}{m^2 K}$)

A : Luas Selimut Pipa (m^2)

T_s : Temperatur Fluida Hidrolik ($^{\circ}C$)

T_∞ : Temperatur Permukaan Tube ($^{\circ}C$)

Menghitung Angka Reynold Pada Pipa Tube [1]:

$$Re = \frac{u_\infty L}{\nu} \quad (7)$$

Dimana

ν : Viskositas Kinematik ($\frac{m^2}{s}$)

L : Panjang Pipa (m)

u_∞ : Kecepatan Fluida Pendingin $\frac{m}{s}$

Menghitung angka *Nusselt* [1]:

$$Nu = 0,015 . Re^{0,84} . Pr^{0,42} \quad (8)$$

Dimana

Pr : Angka *Prandtl*

Re : Angka Reynold

Menghitung Konduktivitas Termal Fluida Pendingin [1]:

$$k = \frac{L.h}{Nu} \quad (9)$$

Dimana

L : Panjang Pipa (m)

k : Konduktivitas Termal (w/mk)

h : Koefisien Perpindahan Panas ($\frac{w}{m^2 k}$)

2.4. Fluida Kerja

Terdapat dua fluida kerja yang beroperasi di *heat exchanger* yaitu fluida pendingin di bagian *tube* dan fluida hidrolik di bagian *shell*. Pada bagian *tube* mengalir fluida pendingin dengan kecepatan 10 m/s dan di dalam *shell* mengalir fluida hidrolik dengan kecepatan 0,01 m/s. Fluida hidrolik yang di gunakan adalah oli dengan jenis turalik 48 dengan spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 2. Spesifikasi Turalik 48 [3]

ISO Viscosity Grade	Density at 15 °C, kg/l	Kinematic Viscosity, at 40 °C, cSt	Kinematic Viscosity, at 100 °C, cSt	Viscosity Index	ASTM Colour	Flash Point, °C	Pour Point, °C
46	0.8750	46.55	6.989	107	L 1.5	226	-21

Selanjutnya untuk pemilihan fluida pendingin harus di pilih berdasarkan hasil perhitungan yang di lakukan. Perhitungan perpindahan panas yang di lakukan menghasilkan konduktivitas termal yang akan jadi patokan dalam pemilihan fluida pendingin agar hasil dari pemindahan panas yang di lakukan sesuai dengan yang di inginkan.

2.5. Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan dengan melakukan perhitungan perpindahan panas untuk mendapatkan fluida pendingin yang dibutuhkan. Lalu membuat pemodelan 3D *heat exchanger* menggunakan *software solidwork* berdasarkan dimensi dan jenis *heat exchanger* yang telah di tentukan. Selanjutnya adalah menentukan *inlet* dan *outlet* dari pipa *tube* dan *shell*, di saat yang sama pilih fluida yang di gunakan di setiap komponen dan juga menentukan kecepatan aliran serta temperatur fluida. Lalu menentukan *goals* yang di inginkan dari simulasi yang di lakukan yaitu dengan memasukkan rumus ke program yang tersedia dan menentukan keterangan apa saja yang ingin di tunjukan seperti temperatur fluida dan temperatur pada komponen *heat exchanger* . Analisa dilakukan dengan melihat apakah temperatur fluida hidrolik di *outlet shell* menunjukkan penurunan temperatur yang menandakan tingkat keberhasilan simulasi yang di jalankan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan perpindahan panas untuk menemukan fluida pendingin dapat di lihat pada operasi perhitungan berikut :

Menghitung Nilai Angka *Grasshoof*

$$\begin{aligned}
 Gr &= \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \\
 &= \frac{9,81 \times 0,0691 \times (64 - 40) \cdot 0,4^3}{(3,33 \times 10^{-5})^2} \\
 &= 9,38 \times 10^8
 \end{aligned}$$

Menghitung Angka *Reyleght*

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$= (9,81 \times 10^9) \times 10,3$$

$$= 9,661 \times 10^9$$

Menghitung Angka *Nusselt*

$$Nul = \frac{0,67 \cdot Ra^{1/4}}{(1 + (\frac{0,492}{Pr})^{1/6})^{4/9}}$$

$$= \frac{0,67 \times (9,456 \times 10^8)^{1/4}}{(1 + (\frac{0,492}{10,3})^{1/6})^{4/9}}$$

$$= 195,127$$

Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Fluida Hidrolik

$$h = Nul \frac{k}{L}$$

$$h = 233,971 \times \frac{0,140}{(0,11 \times 3,14) \times 0,4}$$

$$h = 197,72 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Menghitung Perpindahan Kalor

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$Q = 278,18 \times (3,14 \times 0,11 \times 0,4) \times (64 - 40)$$

$$Q = 665,6 \text{ W}$$

Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Pada *Shell*

$$h = \frac{Q}{A (T_s - T_\infty)}$$

$$h = \frac{665,9}{(3,14 \times 0,054 \times 0,5) (40 - 35)}$$

$$h = 1933,23 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Menghitung Angka Reynold Pada Pipa *Tube*

$$Re = \frac{U_\infty \cdot L}{\nu}$$

$$Re = \frac{10 \times 0,5}{0,725 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 6,89 \times 10^6$$

Menghitung angka *Nusselt*

$$Nu = 0,015 \cdot Re^{0,84} \cdot Pr^{0,42}$$

$$Nu = 0,015 \cdot (6,89 \times 10^6)^{0,84} \cdot 0,71^{0,42}$$

$$Nu = 2247,94$$

Menghitung Konduktivitas Termal Fluida Pendingin

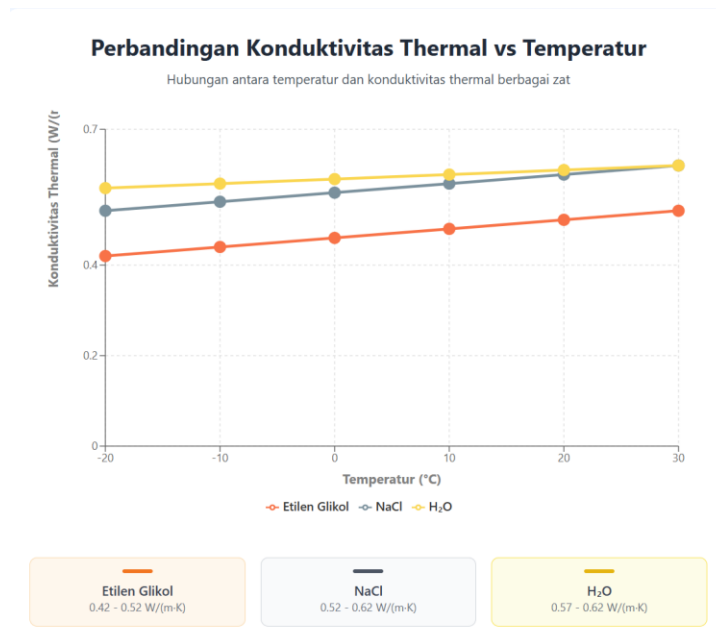
$$k = \frac{L \cdot h}{Nul}$$

$$k = \frac{0,5 \times 1933,23}{2247,94}$$

$$k = 0,43 \text{ W/mc}$$

3.2. Fluida Pendingin

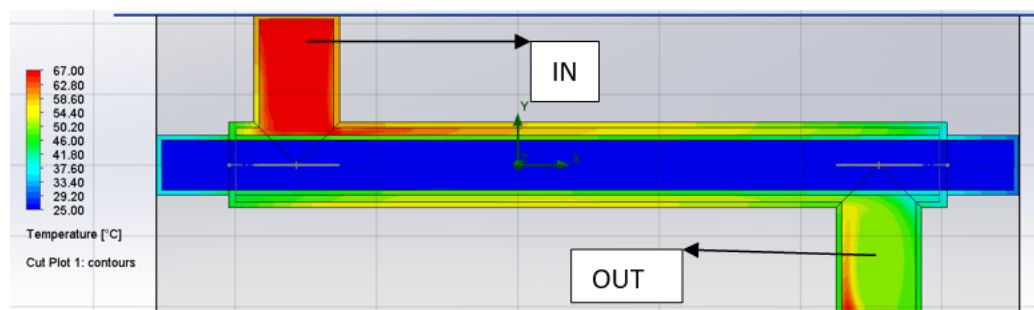
Pemilihan fluida pendingin didasari oleh perhitungan yang telah di lakukan artinya dibutuhkan fluida pendingin dengan konduktivitas termal 0,43 W/mc dengan temperatur masuk sebesar 20°C. Maka berdasarkan perhitungan di atas dan survei jenis fluida pendingin dari jurnal yang ada[7]. Fluida pendingin yang di gunakan adalah campuran *etilen glycol* 30% dengan air sebesar 70% air. Berdasarkan penelitian yang di lakukan campuran *etilen glycol* tersebut mampu menghasilkan konduktivitas termal sebesar 0,48 W/mc pada temperatur 30°C[2]. Dalam aplikasi nya jenis *etilen glycol* yang di gunakan ialah *Monoethylene glycol* yang memiliki konduktivitas termal yang sama saat di kombinasikan dengan air dengan komposisi yang sama[6].



Gambar 2. Grafik Perbandingan Konduktivitas Termal VS Temperatur[2]

3.3. Hasil Simulasi

Simulasi perpindahan panas dan gerak fluida di lakukan untuk menggambarkan seperti apa pergerakan fluida dan temperatur yang di hasilkan dari perpindahan panas yang terjadi. Untuk mengetahuinya pendekatan di lakukan untuk membatu proses simulasi lebih mudah, yaitu dengan menggunakan prinsip *heat exchanger* untuk menggambarkan kasus yang sedang di pelajari[4].



Gambar 3. Perubahan Temperatur Pada *heat exchanger*

Hasil dari simulasi perpindahan panas adalah *heat exchanger* dapat menurunkan temperatur dari 67°C ke $41-50^{\circ}\text{C}$, bisa di lihat pada bagian inlet shell yang mengalir fluida hidrolik masuk pada temperatur $62,8-67^{\circ}\text{C}$ dan pada saat fluida mengalir keluar *shell* temperatur fluida berubah menjadi kisaran $41-50^{\circ}\text{C}$ hasil dari simulasi yang di lakukan bisa di simpulkan bahwa fluida hidrolik berhasil di dinginkan. Penyebab penurunan temperatur ini bisa terjadi adalah penggunaan fluida pendingin yaitu campuran antara 30% *ethylene glycol* dan 70% air. Pemilihan fluida tersebut di dasarkan pada hasil perhitungan yang telah di lakukan dan juga jurnal pendukung yang menyatakan bahwa 30% *ethylene glycol* dan 70% air memiliki konduktivitas termal sekitar $0,48\text{ (W/m.K)}$ saat fluida bekerja di temperatur $25-30^{\circ}\text{C}$ [2].

3.4. Perbandingan dengan Penelitian Lain

Hasil penelitian ini dibandingkan dengan penelitian terkini untuk validasi dengan melakukan analisis perbandingan :

Tabel 3. Tabel Analisa Perbandingan Hasil Penelitian

Penelitian	Tahun	Metode	Fokus Penelitian	Hasil Utama
Penelitian Ini	2025	CFD (<i>SolidWorks</i>)	<i>Shell & tube</i> untuk hidrolik	Penurunan $17-26^{\circ}\text{C}$ dengan EG 30:70, $k=0,48\text{ W/m}\cdot\text{K}$
<i>Bohne et al. [2]</i>	1984	Eksperimen	<i>Properti termal EG-air</i>	$k=0,48\text{ W/m}\cdot\text{K}$ pada 30°C untuk komposisi 30:70
<i>Keklikcioglu et al. [8]</i>	2020	Eksperimen	<i>EG-air</i> dengan <i>passive enhancement</i>	EG meningkatkan efisiensi, optimal pada 20-30%
<i>Yashawantha & Vinod [9]</i>	2022	Eksperimen	<i>Plate HE</i> dengan <i>nanofluid EG-air</i>	Peningkatan 19,32% dengan <i>Al₂O₃ nanofluid</i>
<i>Gemeda [12]</i>	2020	CFD	<i>Shell & tube</i> dengan variasi <i>baffle</i>	Konfigurasi <i>baffle</i> mempengaruhi <i>heat transfer coefficient</i>
<i>Bora et al. [10]</i>	2023	CFD (<i>ANSYS</i>)	<i>Plain vs corrugated tube</i>	<i>Corrugated tube</i> : ΔT 6 K lebih tinggi, <i>pressure drop</i> 37,5x
<i>Al Mezrakchi [11]</i>	2024	CFD Numerical	<i>Hybrid nanofluid</i>	<i>CuO-ZnO-Water</i> : peningkatan >9% pada 0,5 m/s

Berdasarkan perhitungan yang di lakukan pemilihan campuran *etilen glikol* 30% dengan air 70% (konduktivitas termal $0,48\text{ W/m}\cdot\text{K}$) berhasil menurunkan temperatur $17-26^{\circ}\text{C}$ (25-39%). Komposisi fluida pendingin yang sama juga di dukung oleh *Keklikcioglu et al. [8]* yang menyatakan komposisi 20-30% etilen glikol optimal untuk keseimbangan efisiensi dan viskositas fluida. Dari hasil eksperimen yang di lakukan menyatakan bahwa data yang di berikan oleh *Bohne et al. [2]* dapat di gunakan.

Selain menggunakan komposisi 20-30% *etilen glikol* *Yashawantha dan Vinod [9]* pada penelitiannya menggunakan fluida tambahan berupa *Al₂O₃ nanofluid* yang mampu meningkatkan performa sebesar 19,32%. Di jurnal penelitian yang lain *Al Mezrakchi [11]* mencapai >9% dengan *hybrid nanofluid CuO-ZnO-Water* pada kecepatan 0,5 m/s. Namun, penelitian ini membuktikan bahwa dengan fluida konvensional 30:70 dan kecepatan 10 m/s, perpindahan panas sudah sangat efektif tanpa penambahan nanopartikel. Pendekatan ini lebih praktis dengan biaya lebih rendah dan *maintenance* lebih mudah untuk aplikasi industri.

Selain melakukan perhitungan perpindahan panas untuk memperdalam pemahaman mengenai *performa heat exchanger* di lakukan juga pemodelan dan simulasi CFD menggunakan *software* komputer. *SolidWorks Flow Simulation* dalam penelitian ini sejalan dengan tren CFD untuk analisis *heat exchanger*. Gemeda [12] dan Bora *et al.* [10] juga menggunakan simulasi CFD (dengan *software* berbeda) dan membuktikan bahwa metode ini dapat memprediksi karakteristik perpindahan panas dengan akurat. Simulasi yang di lakukan dapat memberikan gambaran terhadap bagaimana *heat exchanger* dengan fluida pendingin yang di pilih dapat mengatasi beban kalor dari fluida yang ingin di dinginkan.

KESIMPULAN

Dilihat dari hasil simulasi yang di lakukan menggunakan *SolidWorks Flow Simulation*, dapat disimpulkan bahwa *heat exchanger* yang dirancang mampu menurunkan temperatur fluida hidrolik secara efektif dari 67°C menjadi rentang 41-50°C dengan penurunan temperatur mencapai 17-26°C. Hasil ini dicapai dengan menggunakan campuran 30% *ethylene glycol* dan 70% air sebagai fluida pendingin dengan konduktivitas termal sebesar 0,48 W/m·K pada temperatur operasi 25-30°C. Penurunan temperatur yang signifikan ini mampu untuk menjaga stabilitas viskositas fluida hidrolik pada rentang optimal yang menyebabkan performa sistem hidrolik dapat terjaga dengan baik. Hasil simulasi membuktikan bahwa penerapan *heat exchanger* sederhana bisa menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi masalah kenaikan temperatur yang terjadi pada sistem hidrolik yang di amati.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kreith, F. (2010). Principles of Heat Transfer.
- [2] Bohne, D., S. Fischer, and E. Obermeier. "Thermal Conductivity, Density, Viscosity, and Prandtl-Numbers of Ethylene Glycol-Water Mixtures." *International Journal of Thermophysics*, vol. 5, no. 4, 1984, pp. 385–394.
- [3] PT Pertamina Lubricants. *Pertamina Lubricant Guide*. 2025, <https://www.pertamina.com/id/lubricants>.
- [4] Tominaga, Y. (2024). CFD Simulations of Turbulent Flow and Dispersion in Built Environment: A Perspective Review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2024, p. 105741.
- [5] Apet, V. P., and S. L. Borse. "Experimental Investigation of Forced Convection Heat Transfer Enhancement in Dimpled Tube." *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace - Science and Engineering (JOMASE)*, vol. 35, no. 1, 2016, pp. 1–6.
- [6] Al-Amayreh, M. "Experimental Study of Thermal Conductivity of Ethylene Glycol Water Mixtures." *International Journal of Engineering Research & Applications (IJERA)*, vol. 10, no. 1, Series-2, 2020, article K1001026268.
- [7] Candra, R., and R. Rofiroh. "Analisis Perbandingan Campuran Aditif Etilen Glikol 30 banding 70 dan 50 banding 50 Pada Cairan Sistem Pendingin Toyota New Rush 1.5 MT." *Motor Bakar: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 7, no. 2, 2023, pp. 23–30.
- [8] Keklikcioglu and V. Ozceyhan, "Experimental investigation on heat transfer enhancement of a tube with coiled-wire inserts installed with a separation from the tube wall," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 140, no. 6, pp. 2425–2436, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08817-3.
- [9] M. Yashawantha and A. V. Vinod, "Heat transfer characteristics and entropy generation analysis in a plate heat exchanger using an ethylene glycol–water based Al₂O₃ nanofluid," *J. Enhanced Heat Transfer*, vol. 29, no. 5, pp. 429–446, 2022, doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2022040134.
- [10] Bora, A., Kalita, A. P., Bardalai, M., and Dutta, P. P. (2023). Modeling and Simulation of Plain and Corrugated Shell and Tube Heat exchanger . In: *Advances in Smart Energy Systems*. Smart Innovation, Systems and Technologies, 301. Springer, Singapore.

- [11] Al Mezrakchi, R. (2024). Investigation of various hybrid nanofluids to enhance the performance of a shell and tube heat exchanger . *AIMS Energy*, 12(1), 235-255.
- [12] Gameda, A. N. (2020). Parametric & CFD Analysis of Shell and Tube Heat exchanger by Varying Baffles Geometry. *Industrial Engineering Letters*, 10(3), 30-42.
- [13] Syahputra, M. R. Siregar, and R. Siregar, “Penggunaan sistem hidrolik untuk meningkatkan efisiensi energi dan performa operasional,” *Jurnal Mekanova*, vol. 10, no. 1, pp. 15–22, 2024.