

Design And Efficiency Of Heat Exchanger Simulation Equipment Using Water Cooling System

Ryan Ananda Simon¹, Arwizet Karudin^{1*}, Remon Lapisa¹, Andre Kurniawan¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author: arwizet@ft.unp.ac.id

Received Oktober 7th 2024; Revised Oktober 24th 2024; Accepted May 28th 2024

Abstract

The water cooling system is a technology commonly used in various industrial and automotive applications to control the temperature of engines and equipment. The heat exchanger, as a key component in this system, plays an important role in efficiently transferring heat from one medium to another. This study aims to design and construct a cross-flow heat exchanger simulation tool that uses a water cooling system, as well as to measure its heat transfer efficiency. The method employed is experimental, involving the measurement of inlet and outlet temperatures of air and water fluids, along with the ambient temperature surrounding the tool. The analysis considers three variations of air velocity: 40 m/s, 50 m/s, and 60 m/s, as well as two different climate conditions, to gain a comprehensive understanding of the tool's performance under varying situations. The research results indicate that this simulation tool is highly effective, as the resulting temperatures align with expectations, thereby enhancing the accuracy of heat transfer analysis. These findings not only benefit mechanical engineering students studying cross-flow heat exchangers as a practical study but also contribute to further developments in the field of heat transfer. This research is expected to serve as a foundation for future studies in the design and optimization of cooling systems and the improvement of efficiency in various industrial applications.

Keywords: *Water cooling system, heat exchanger, crossflow, climate, temperature*

Rancang Bangun Dan Efisiensi Alat Simulasi *Heat Exchanger* Menggunakan *Water Cooling System*

Abstrak

Sistem pendingin air (*water cooling system*) merupakan teknologi yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan otomotif untuk mengontrol suhu mesin dan peralatan. *Heat exchanger*, sebagai komponen utama dalam sistem ini, berperan penting dalam memindahkan panas secara efisien dari satu medium ke medium lain. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun alat simulasi *heat exchanger* tipe *cross-flow* yang menggunakan sistem pendingin air, serta mengukur efisiensi perpindahan panasnya. Metode yang digunakan adalah eksperimental, dengan prosedur eksperimen yang mencakup pengukuran suhu inlet dan outlet fluida air dan udara, serta suhu lingkungan di sekitar alat. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan tiga variasi kecepatan udara yaitu 40 m/s, 50 m/s, dan 60 m/s, serta dua kondisi iklim yang berbeda, untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif tentang kinerja alat dalam situasi yang bervariasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat simulasi ini sangat efektif, karena suhu yang dihasilkan sesuai dengan yang diharapkan, sehingga meningkatkan keakuratan dalam analisis perpindahan panas. Temuan ini tidak hanya berguna bagi mahasiswa teknik mesin yang mempelajari *heat exchanger* jenis *cross-flow* sebagai studi dan praktik, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan lebih lanjut dalam bidang perpindahan panas. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi studi lanjutan dalam perancangan, optimalisasi sistem pendinginan, serta peningkatan efisiensi dalam berbagai aplikasi industri.

Kata kunci: *Water cooling system*, *heat exchanger*, *crossflow*, iklim, suhu

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang terletak di garis khatulistiwa dan beriklim tropis sehingga matahari bersinar sepanjang tahun, khususnya Sumatera Barat. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mencatat Kota Padang pernah mengalami suhu yang luar biasa panas. Bahkan pada 25 April 2023 lalu, suhu Kota Padang tercatat sebagai yang terpanas di Sumatera, yakni mencapai 35,2°C. Selain itu, Kota Padang juga merupakan salah satu kota dengan penggunaan transportasi terbesar di Sumatera Barat, khususnya sepeda motor, agar suhu mesin motor tetap stabil saat bergerak di cuaca panas, maka digunakan radiator sebagai alat penukar panas agar suhu pada mesin motor tetap stabil.

Heat exchanger adalah alat yang berfungsi untuk memindahkan panas, dapat sebagai pemanas maupun pendingin. *Heat exchanger* didesain sedemikian rupa sehingga dapat menukar panas seefisien mungkin antara fluida yang ada di dalamnya. (Hebernando and Tahad 2017). Jenis penukar panas yang diterapkan di sini adalah *cross-flow*, penukar panas jenis *cross-flow* ini mungkin merupakan jenis penukar panas yang dominan dalam penggunaan secara keseluruhan. Mereka juga sering dijumpai sebagai radiator mesin kendaraan dan dalam aplikasi proses pendinginan dan pemanasan dan komponen lainnya. (Jeter n.d.). Sistem ini juga terdiri dari sirip tambahan di seluruh penampang tabung bersama dengan winglet delta sehingga menghasilkan turbulensi tambahan untuk meningkatkan laju perpindahan panas. Penukar panas sebagian besar digunakan di bagian pendingin di pembangkit listrik, radiator mobil, unit pemrosesan kimia, pemanas udara / air tenaga surya, unit pemulihan panas limbah, kogenerasi, dan industri farmasi. (Mangrulkar et al. 2019).

Radiator secara teknis dikenal sebagai penukar panas, tetapi prinsip dasarnya sangat mirip. Untuk menjaga agar mesin tetap cukup dingin agar dapat berfungsi dengan baik, air dipompa melalui mesin pembakaran internal dan dipanaskan oleh proses pembakaran. Air kemudian mengalir ke radiator dan

melalui banyak tabung yang lebih kecil, yang terhubung ke banyak sirip. Deretan sirip ini sangat meningkatkan luas permukaan sehingga meningkatkan kapasitas pendinginan udara yang mengalir melalui radiator. Udara yang mengalir menghilangkan panas dari air yang mengalir melalui pipa-pipa untuk dibuang ke atmosfer. (Peyghambarzadeh et al. 2011). Radiator dianggap sebagai komponen yang sangat vital karena berhubungan langsung dengan proses pendinginan mesin. (Ricki Murti 2008). Memiliki kinerja perpindahan panas yang efektif dan struktur yang ringkas, penukar panas sirip dan tabung ringkas digunakan di berbagai bidang. (Zeeshan et al. 2017). Selain itu, cairan pendingin yang paling umum digunakan adalah air. Kapasitas panasnya yang tinggi dan biayanya yang murah membuatnya menjadi media transfer panas yang cocok. (Ettefaghi et al. 2018; Naiman Ibrahim et al. 2019), sedangkan media yang menghantarkan panas adalah udara. (Dittus et al. n.d.). Apabila *overheat* dari mesin ini tidak dibuang, temperatur mesin menjadi sangat tinggi yang mengakibatkan panas berlebih dan penurunan viskositas oli pelumas, pelemahan logam pada bagian mesin yang terlalu panas, dan tekanan di antara bagian-bagian mesin yang mengakibatkan keausan yang lebih cepat, di antara komponen-komponen yang bergerak. (Elmqvist and Hartland 2016).

II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan menghitung perbedaan temperatur rata-rata pada peralatan penukar kalor/ radiator di iklim tropis dan iklim temperatur rendah dalam waktu satu minggu secara manual dengan menggunakan perhitungan *log mean temperature difference* (LMTD). Pengukuran dilakukan dengan memonitor temperatur fluida yang masuk dan keluar radiator, temperatur udara yang masuk dan udara yang dibuang ke atmosfer di dalam radiator. Salah satu upaya untuk menghitung perbedaan efisiensi adalah dengan menggunakan rumus *log mean temperature difference* (LMTD). Metode *log mean temperature difference* (LMTD) merupakan salah satu metode umum yang biasa digunakan untuk perhitungan *heat exchanger*. (Thombare et al. 2012).

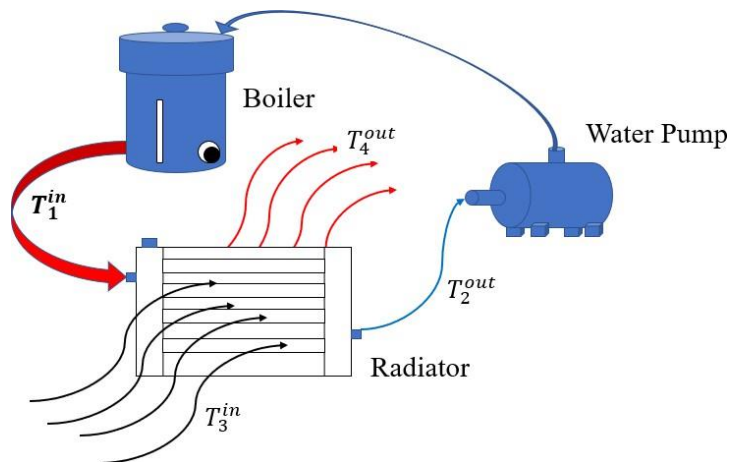
Sebelum melakukan pengambilan data penelitian, perlu dilakukan pengecekan dan penyetelan peralatan agar dapat dioperasikan dengan baik. (Saputra et al. 2019). Pada motor, ukuran alat penukar panas (radiator) memegang peranan yang sangat penting. Semakin besar ukurannya, maka semakin besar pula gaya hambat yang bekerja pada kendaraan. (Yadav et al. 2017). Jenis ukuran pada radiator yang akan diaplikasikan pada tabel 1.

Table 1. Ukuran radiator yang digunakan dalam alat penukar panas

No	Data	Nilai
1	Tipe Radiator	<i>Compact Heat Exchanger Flat Tube Flat Fin</i>
2	Volumen Radiator	$P \times L \times T = 450 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 420 \text{ cm}$
3	Luas Tube	Tebal 2 mm x Lebar 40 mm x Panjang 45 mm
4	Panjang Tube	450 mm
5	Jumlah Baris Tube	43
6	Jumlah Tube Tiap Baris	2
7	Jarak Antar Tube	10 mm
8	Bahan	Almunium

1. Skema uji eksperimental

Alat ini bekerja dengan memanaskan air menggunakan boiler, lalu pompa mengalirkan air panas ke radiator melalui selang. Di dalam radiator, air panas melewati pipa-pipa yang dikelilingi sirip-sirip, sementara kipas menghembuskan udara eksternal melewati radiator untuk menyerap panas dari air. Sensor suhu pada selang inlet dan outlet mengukur perubahan suhu air sebelum dan sesudah radiator, sedangkan sensor di depan dan belakang radiator mengukur suhu udara yang masuk dan keluar. Setelah didinginkan, air dialirkan kembali ke boiler untuk dipanaskan, membentuk siklus yang terus berulang.



Gambar 1. Skema penukar panas

Prosedur pengambilan data dimulai dengan memastikan bahwa alat dalam kondisi siap dan terisi dengan air pendingin. Setelah itu, kecepatan udara yang dihembuskan oleh kipas disetel sesuai dengan variasi yang ingin diuji. Ketika alat dinyalakan, suhu dicatat dari sensor yang terletak di inlet dan outlet, serta suhu udara di depan dan belakang radiator. Pengambilan data dilakukan selama 2 jam dan 20 menit setiap hari selama seminggu, dengan memperhatikan kondisi iklim yang bervariasi. Seluruh data suhu dan kecepatan udara dicatat untuk analisis lebih lanjut.



Gambar 2. Alat simulasi heat exchanger

III. HASIL PENELITIAN

1. Analisis temperatur fluida pada alat heat exchanger di iklim tropis

Penggunaan alat heat exchanger di iklim tropis didistribusikan pada 3 jenis variasi kecepatan udara, yaitu 40m/s, 50m/s, 60m/s.

- t : Waktu
- N : *Revolutions Per Minute* (RPM)
- T_L : Temperatur lingkungan °C
- T_1^{in} : Temperatur fluida air masuk °C
- T_2^{out} : Temperatur fluida air keluar °C
- T_3^{in} : Temperatur fluida udara masuk °C
- T_4^{out} : Temperatur fluida udara keluar °C
- ΔT_{LMTD} : Log Mean Temperature Difference °C

Table 2. Data penelitian pada tingkat kecepatan udara 40 m/s

Waktu t	RPM N	T_L °C	T_1^{in} °C	T_2^{out} °C	T_3^{in} °C	T_4^{out} °C	ΔT_{LMTD} °C
9:00	82.8	30.3	73.4	71.6	31.5	69.7	15.2
9:10	85.5	30.4	74.2	72.7	31.8	70.1	16
9:20	86.3	31.6	76.1	75.3	34.4	71.4	16.7
9:30	83.5	32.1	76.2	74.8	34.1	69.9	18.4
9:40	85.4	32.5	77.9	76.6	34.6	70.1	20.3
9:50	89.9	33.1	79.5	78.1	34.9	72.3	20
10:00	84.3	33	80.3	78.8	34.2	71.1	22.4
10:10	87	33.1	77.4	76.3	35.5	71.6	17.9
10:20	89.1	34.3	75.1	74.6	36.6	73.1	12.4
10:30	86.1	33.4	76.4	73.6	37.3	71.6	16.1
10:40	86.1	33.2	76.9	75.8	35.9	71.3	17.4
10:50	87.3	34.7	79.4	78.5	38.1	72.5	18.9
11:00	90.3	34.7	74.5	73.5	35.3	69.3	16.5

Table 3. Data penelitian kecepatan udara 50m/s

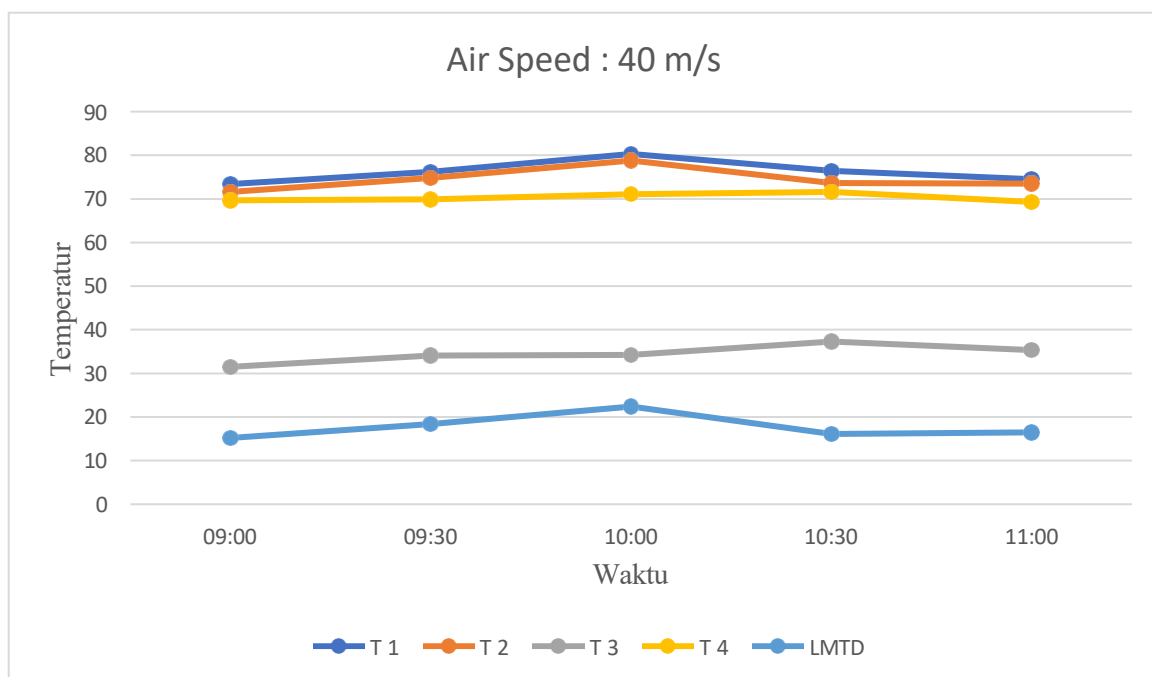
Waktu t	RPM N	T_L °C	T_1^{in} °C	T_2^{out} °C	T_3^{in} °C	T_4^{out} °C	ΔT_{LMTD} °C
9:00	132	34.3	78.4	77.6	35.4	73.5	17.3
9:10	132.4	35	78.5	77.9	36.7	75.6	14.4
9:20	137.1	35.9	78.4	77.3	36.6	75.9	13.6
9:30	133.5	36.5	79.4	78.5	36.8	76.2	14.9
9:40	131.3	36	79.1	78.7	36.7	75.8	15.2
9:50	137.5	35.4	78.4	76.4	35.8	73.7	16.6
10:00	138.4	35.6	78.2	76.4	36.5	73.5	16.4
10:10	138.9	35.5	77.8	76	36.2	73.8	15.5
10:20	138.5	35.7	78.3	76.7	36.8	73.3	16.8
10:30	138.8	35.7	78.7	76.5	35.5	73.6	17.2
10:40	138.7	36	78.9	76.5	35.3	74.1	16.9
10:50	138.2	36.2	77.9	76	35.4	73.8	15.9
11:00	138.5	36.2	77.6	76.3	36.1	73.6	15.6

Table 4. Data penelitian kecepatan udara 60m/s

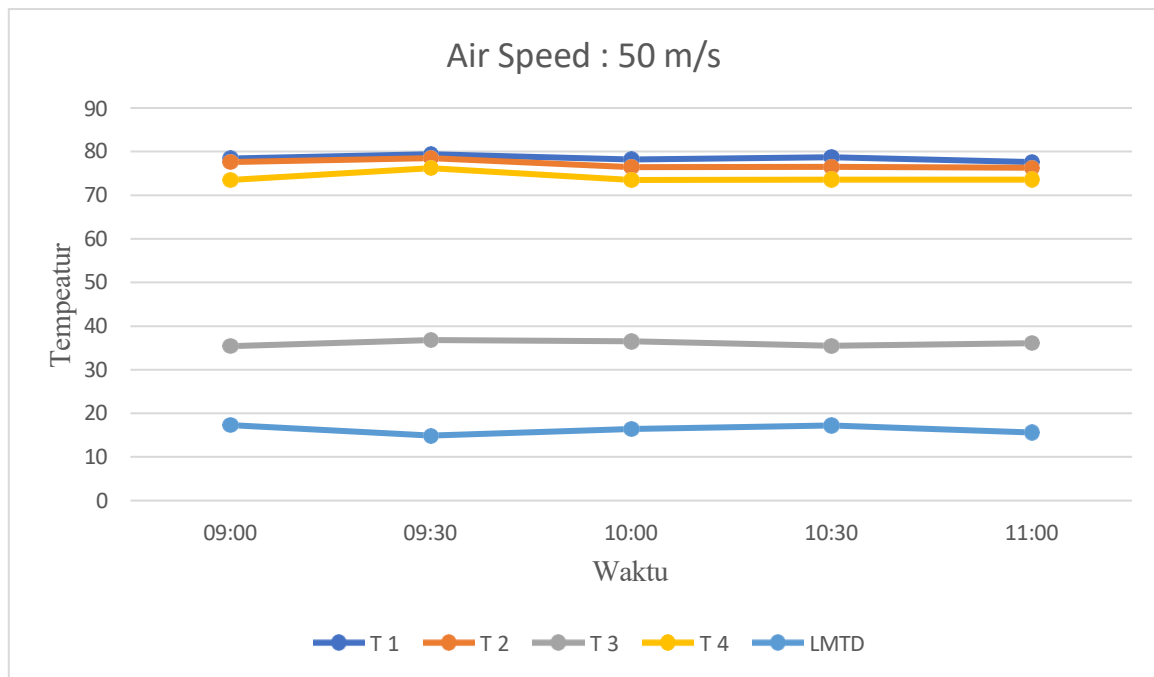
Waktu t	RPM N	T_L °C	T_1^{in} °C	T_2^{out} °C	T_3^{in} °C	T_4^{out} °C	ΔT_{LMTD} °C
9:00	142.1	32.5	78.9	77.6	34.6	73.2	18.4
9:10	142.8	33.9	78.5	76.9	34.5	73	18
9:20	142	35.6	78.3	76.7	34.7	73.3	17.3

9:30	142	36.5	78.5	77.4	35.5	73.7	17.1
9:40	141.8	36.6	77.9	76.8	35.2	73.1	17
9:50	142.2	35.7	77.2	76.5	35.6	72.8	16.3
10:00	142.2	34.6	78.2	77.6	33.9	73.6	17.3
10:10	142.3	33.2	77.6	76.7	34.5	73.6	16.2
10:20	142	32.9	77.8	76.9	34.3	73.5	16.7
10:30	141.6	32.9	78.2	76.9	33.8	72.7	18.2
10:40	141.5	33	78.4	77.3	34.2	73.5	17.5
10:50	142	32.4	78.1	76.8	34	73.8	16.7
11:00	142.6	32.5	77.6	76.1	32.8	72.4	17.9

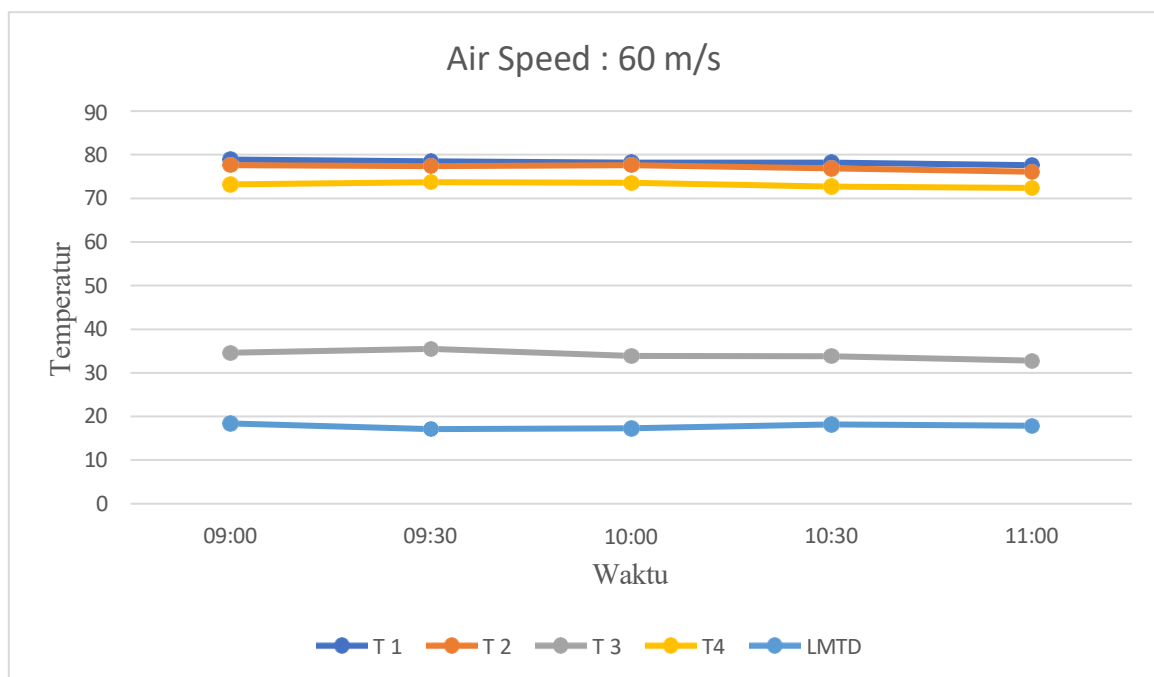
Dari hasil pengambilan data dan perhitungan, kemudian dilakukan analisa grafik temperatur fluida, analisa ΔT_{LMTD} radiator terhadap variasi laju kecepatan udara seperti yang dijelaskan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. Grafik penelitian alat penukar panas dengan kecepatan 40 m/s



Gambar 4. Grafik penelitian alat penukar panas dengan kecepatan 50 m/s



Gambar 5. Grafik penelitian alat penukar panas dengan kecepatan 60 m/s

2. Analisis temperatur fluida pada alat heat exchanger di iklim rendah

Selain di daerah beriklim tropis, performa radiator juga terpengaruh di daerah beriklim rendah, dimana temperatur iklim yang rendah akan membuat udara yang mengalir mengalir pada temperatur yang rendah sehingga temperatur rata-rata yang dihasilkan juga rendah.

Table 5. Data penelitian pada kecepatan udara 40 m/s

Waktu t	RPM N	T_L °C	T_1^{in} °C	T_2^{out} °C	T_3^{in} °C	T_4^{out} °C	ΔT_{LMTD} °C
9:00	84.3	27	73.4	72.3	30.6	65.2	20.6
9:10	87.3	27.7	74.3	72.3	30.8	65.4	21.1
9:20	83.7	28.1	78.1	75.9	32.3	69.6	21.4
9:30	87.3	28.1	78.7	76.2	32.2	69.9	21.8
9:40	88.7	28.1	78.3	76.1	32	69	22.3
9:50	88.8	28.1	77.5	74.7	32.1	69.8	20.4
10:00	84.5	28.3	77.8	74.9	32.4	69.5	20.9
10:10	85.8	28.5	78.2	75.3	32	71	20.1
10:20	87.5	28.3	78.4	75.8	32.5	70.8	20.5
10:30	89.1	28.3	77	74.6	32.2	69.6	20
10:40	84.8	28.4	78	74.7	32.5	69.8	20.7
10:50	86.2	28.3	78.5	75.3	32.7	70.5	20.6
11:00	83.7	28.5	78.9	75.8	33.1	72.4	19.3

Table 6. Data penelitian kecepatan udara 50m /s

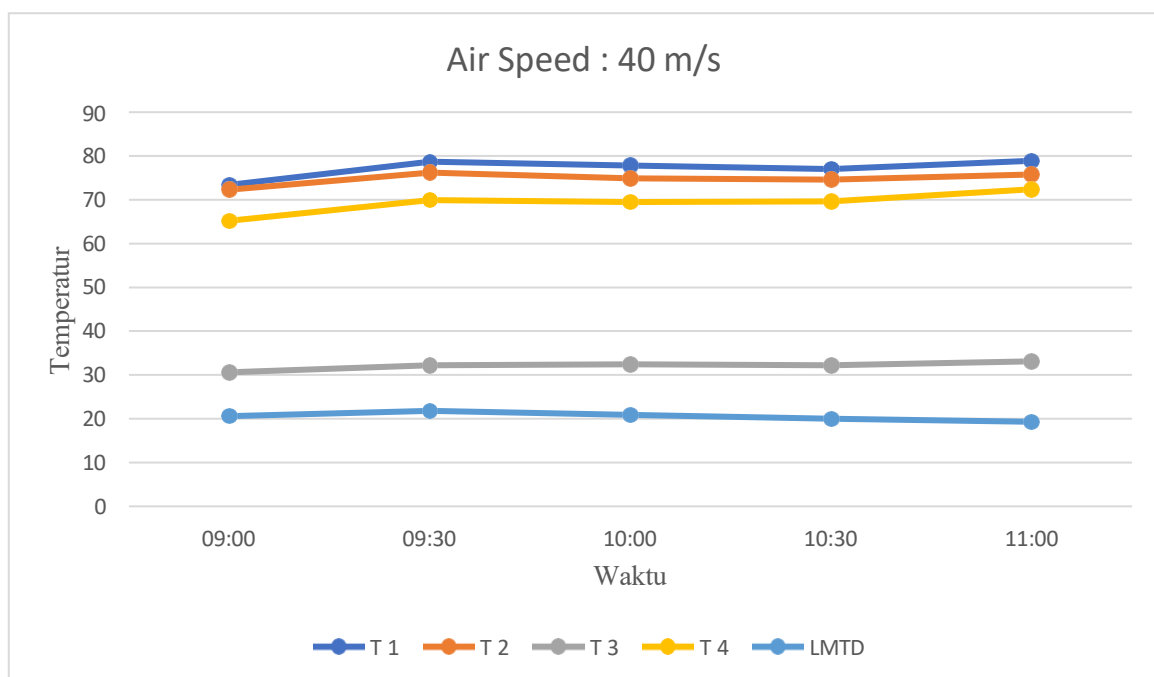
Waktu t	RPM N	T_L °C	T_1^{in} °C	T_2^{out} °C	T_3^{in} °C	T_4^{out} °C	ΔT_{LMTD} °C
9:00	138.7	27.6	45	44.1	28.3	38.5	15.8
9:10	135.5	27.7	64.9	62.7	30.1	53.1	20.4
9:20	135.7	28.1	79.9	77.3	31.4	66.5	26.3
9:30	135	28.4	77.2	76.1	31.8	66	24
9:40	136.9	28.2	74.2	73.6	30.6	69.9	16.8
9:50	136.9	27.8	73.3	72.5	30.4	69.6	15.7
10:00	137	27.6	72.8	71.1	30.9	69.9	14.1
10:10	136.7	27.4	75.1	74.5	30.5	70.7	17.1
10:20	136.9	27.5	73.6	72.8	30.6	70.1	15.5
10:30	137.1	27.5	74.7	73.5	30.9	71.6	15
10:40	136.4	27.7	72.7	71.9	30.9	69.6	14.6
10:50	136.4	27.8	72.8	72.2	30.9	69.4	15.1
11:00	136.8	27.9	72.5	71.6	31.1	69.6	14.2

Table 7. Data penelitian kecepatan udara 60m/s

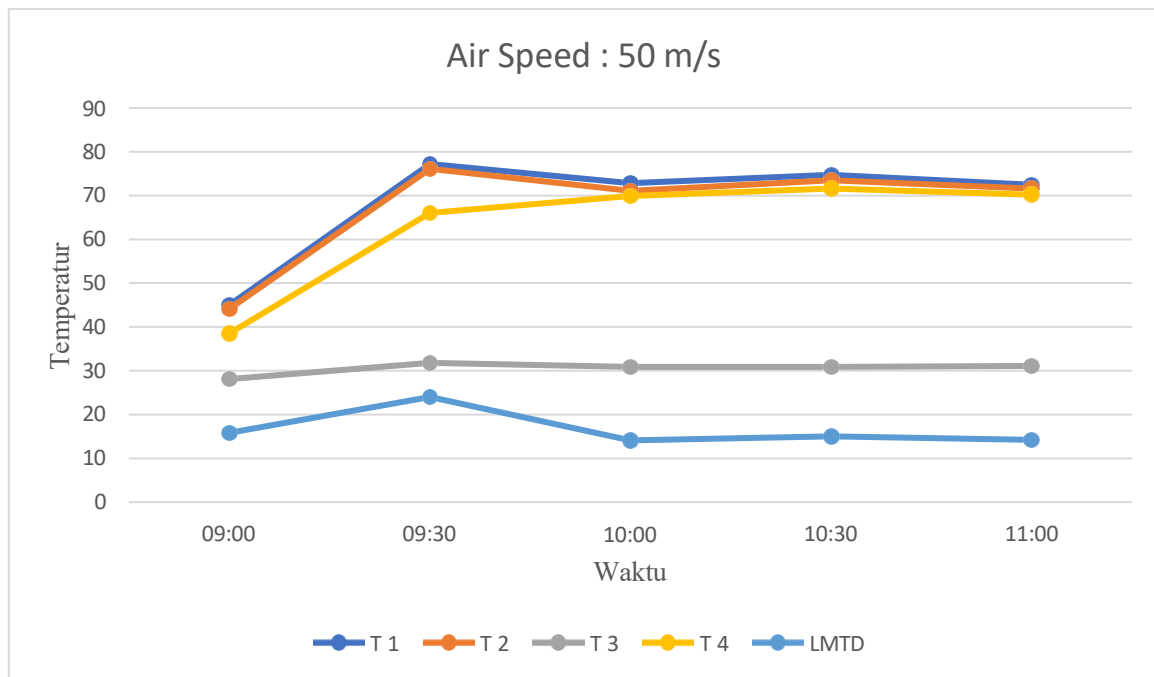
Waktu t	RPM N	T_L °C	T_1^{in} °C	T_2^{out} °C	T_3^{in} °C	T_4^{out} °C	ΔT_{LMTD} °C
11:30	142.5	27.2	73.5	72.8	31.2	69.7	15.7
11:40	141.8	27.3	73.8	73.2	31.5	69.4	16.5
11:50	142.2	27.5	74.1	73.5	31.8	70.3	15.8

12:00	142.5	27.6	73.8	72.9	31.9	69.1	16.7
12:10	142.3	27.7	72.2	71.5	32.1	67.7	16
12:20	142.3	28.3	73.7	72.9	31.5	69.3	16.5
12:30	142.3	27.7	71.9	70.8	31.4	68.6	14.5
12:40	142.3	27.5	72.3	71.5	31.3	70.2	12.9
12:50	141.9	27.5	72.1	71.1	31.3	68.5	15
13:00	142.3	27.6	73.3	72.3	32	71	13.2
13:10	142	27.9	73.5	72.6	31.8	70.9	13.8
13:20	142.1	28	72.4	71.5	32.7	69.9	13.2
13:30	142.4	28	73.4	72.6	32.7	69.3	15.7

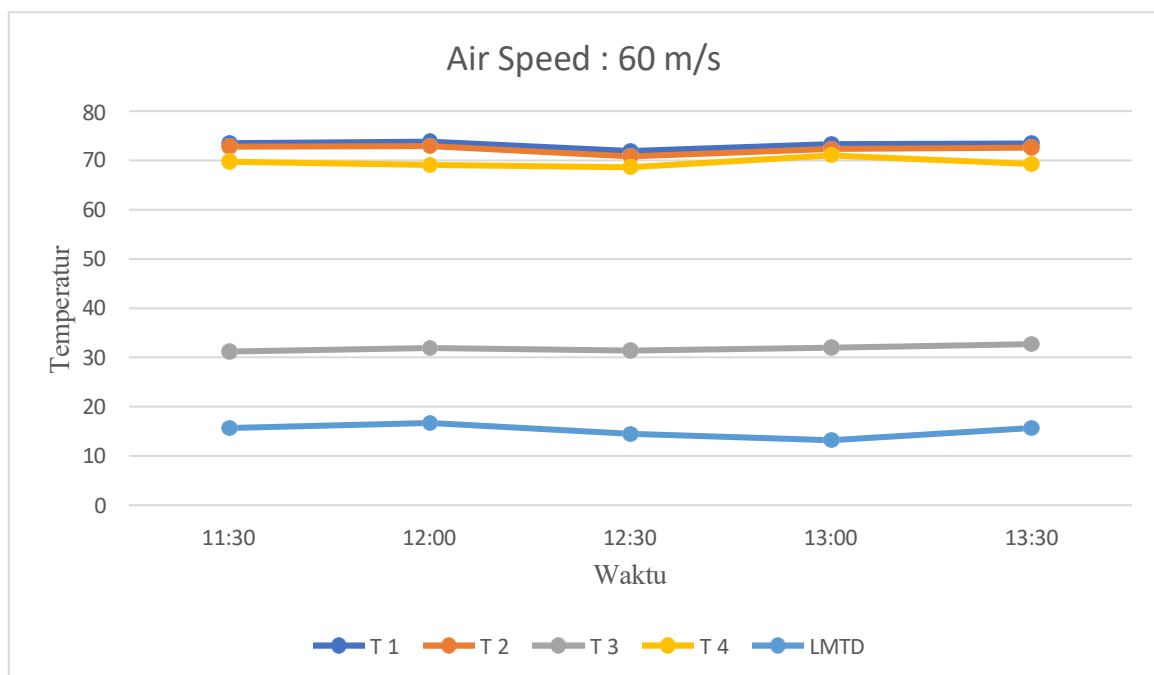
Dari tabel tersebut juga didapatkan grafik yang menentukan jarak temperatur antar waktu.



Gambar 6. Grafik penelitian alat penukar panas dengan kecepatan 40 m/s



Gambar 7. Grafik penelitian alat penukar panas dengan kecepatan 50 m/s



Gambar 8. Grafik penelitian alat penukar panas dengan kecepatan 60 m/s

IV. PEMBAHASAN

Pembahasan penelitian ini bertujuan untuk menentukan perbedaan suhu rata-rata dengan menganalisis perbedaan hasil dari 3 kecepatan udara. Secara umum, LMTD dihitung dengan membagi total fluida masuk dan udara yang keluar dengan fluida keluar dan udara yang mengalir ke radiator. (Li et al. 2017). Secara umum, ini adalah:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_1^{in} - T_4^{out}) - (T_2^{out} - T_3^{in})}{\ln \frac{(T_1^{in} - T_4^{out})}{(T_2^{out} - T_3^{in})}} = \quad (1)$$

$$\frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \Delta T_{LMTD} \quad (2)$$

Dimana:

ΔT_{LMTD} = Log Mean Temperature Difference °C

V_u = Air Velocity m/s

N = Fan Spin Rate

T_L = Temperatur lingkungan °C

T_1^{in} = Cairan panas yang masuk °C

T_2^{out} = Cairan panas yang keluar °C

T_3^{in} = Udara ke tabung radiator °C

T_4^{out} = Udara dari radiator yang dibuang ke atmosfer °C

Prosedur penelitian ini diawali dengan pengambilan data kecepatan udara dan temperatur fluida pada alat penukar kalor. Pengambilan data pada penelitian ini menggunakan termometer yang telah terpasang pada alat penukar kalor, data temperatur fluida panas dan fluida dingin, data kecepatan udara dan putaran fan, temperatur udara masuk dan udara keluar.

Pada tahap ini, langkah awal yang dilakukan adalah menentukan kecepatan udara yang telah diukur dan temperatur fluida masuk dan keluar pada air dan udara. Metode LMTD mudah digunakan dalam analisis ini ketika temperatur inlet dan outlet fluida panas dan dingin diketahui atau dapat ditentukan. (Pandey and Dubey 2021). perpindahan panas secara keseluruhan tersedia, luas permukaan perpindahan panas membran dapat ditentukan dari Persamaan. (Almeshaal and Choubani 2023). Pengolahan data dengan menggunakan alat penukar kalor bermanfaat bagi lingkungan, kita dapat menghemat energi, mengurangi emisi gas, analisis resiko.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan, analisa data dan pembahasan di atas, diketahui bahwa kondisi optimum radiator diperoleh dari kecepatan udara dan iklim. Kecepatan udara yang tinggi membantu radiator dalam proses pendinginan mesin sepeda motor, sedangkan iklim dan temperatur lingkungan mempengaruhi kinerja radiator itu sendiri. Saat cuaca panas, radiator akan mengalami kesulitan dalam mendinginkan mesin. Selain itu, sirkulasi udara di sekitar radiator juga berpengaruh besar. Semakin banyak udara yang mengalir melewati radiator, maka proses penukaran panas akan semakin efektif. kecepatan putaran pada kipas dapat mempengaruhi kecepatan aliran udara. Oleh karena itu, penting untuk memahami interaksi antara kecepatan udara dan iklim agar radiator dapat berfungsi optimal dan menjaga performa mesin tetap baik.

VI. REFERENSI

- Almeshaal, M. A., and Choubani, K. (2023). Using the Log Mean Temperature Difference (LMTD) and ϵ -NTU Methods to Analyze Heat and Mass Transfer in Direct Contact Membrane Distillation. *Membranes (Basel)*, 13(6).
- Dittus, F. W., Boelter, L. M. K., and 12, V. J. (n.d.). =Ratio of outer tube surface (air) to surface of tube at mean diameter per unit length of tube $R' = \text{Ratio of inner tube surf:~ce (water) to surface of tube at mean diameter per } u\sim, \text{it length of tube } 2D \text{ } D+d \text{ } 2d \text{ } D+d \text{ } D = \text{Outside diameter of tube (inches) } d = \text{Inside diameter of tube (inches)}.$
- Ettefaghi, E. o. Ilah, Rashidi, A., Ghobadian, B., Najafi, G., Khoshtaghaza, M. H., Sidik, N. A. C., Yadegari, A., and Xian, H. W. (2018). Experimental investigation of conduction and convection heat transfer properties of a novel nanofluid based on carbon quantum dots. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 90, 85–92.

- Hebernando, O., and Tahad, S. A. (2017). *Chandra Wicaksono Eky Wijanarko*.
- Jeter, S. M. (n.d.). *2006 ASEE Southeast Section Conference Effectiveness and LMTD Correction Factor of the Cross Flow Exchanger: a Simplified and Unified Treatment*.
- Li, H., Huang, H., Xu, G., Wen, J., Wu, H., and Huang, H. (2017). Performance analysis of a novel compact air-air heat exchanger for aircraft gas turbine engine using LMTD method. *Appl Therm Eng*, 116, 445–455.
- Naiman Ibrahim, I., Sazali, N., Shahir Jamaludin, A., Ramasamy, D., Soffie, S. M., and Hafiz Dzarfan Othman, M. (2019). A Review on Vehicle Radiator Using Various Coolants. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal homepage*, 59, 330–337.
- Pandey, A., and Dubey, K. K. (2021). Heat Transfer Analysis of Recuperator for Waste Heat Recovery Purpose Using LMTD & NTU Method. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 1149(1), 012022.
- Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Jamnani, M. S., and Hoseini, S. M. (2011). Improving the cooling performance of automobile radiator with Al 2O₃/water nanofluid. *Appl Therm Eng*, 31(10), 1833–1838.
- Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Chamoli, S., Gupta, A., & Gawande, V. B. (2019). Recent advancement in heat transfer and fluid flow characteristics in cross flow heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109220.
- Elmqvist, R. E., & Hartland, A. (2016). Reference Module in Materials Science and Materials Engineering MATS 01908.
- Ricki Murti, M. (2008). *Laju pembuangan panas pada radiator dengan fluida campuran 80% air dan 20% RC pada rpm konstan. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM*.
- Saputra, E., Effendy, M., Surono, A., Prasetya, A., Program,), Teknik, S., Universitas, M., Surakarta, M., Tromol, J., Yani, A., and Kartasura, S. (n.d.). *KINERJA RADIATOR KENDARAAN PADA BERBAGAI LAJU ALIRAN UDARA PERFORMANCE OF RADIATOR VEHICLE ON A WIDE RANGE OF AIR FLOW RATE*.
- Yadav, M. S., Giri, S. A., & Momale, V. C. (2017). Sizing analysis of louvered fin flat tube compact heat exchanger by genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1426-1436.
- Thombare, D. (n.d.). *An Overview of Radiator Performance Evaluation and Testing*.
- Zeeshan, M., Nath, S., and Bhanja, D. (2017). Numerical study to predict optimal configuration of fin and tube compact heat exchanger with various tube shapes and spatial arrangements. *Energy Convers Manag*, 148, 737–752.