



STUDI EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN PANAS DAN BILANGAN *REYNOLDS-NUSSELT* PADA *COMPACT HEAT EXCHANGER* DENGAN SIRIP SPIRAL BERPOTONGAN

Muhammad Syahril^{a*}, Ahmad Syuhada^b, Hamdani^b, Muhammad Amin^a, Ali Akbar^c, Syamsul Bahri Widodo^a, Sumawijaya^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Rekayasa, Universitas Samudra, Jl. Prof. Dr. Syarief Thayeb Meurandeh Langsa Lama, Kota Langsa dan 24416, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Syiah Kuala, Jl. Tengku Syech Abdur Rauf No.7 Kopelma Darussalam, Banda Aceh dan 23111, Indonesia

^cProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Jl. Mojopahit 666-B, Jati, Sidoarjo, Jawa Timur, dan 61215, Indonesia

*Corresponding author at: muhammadsyahril@unsam.ac.id (Muhammad Syahril) Tel.: +6282361100628

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 30 Maret 2026

Direvisi pada 11 Juni 2026

Disetujui pada 29 Juni 2026

Tersedia daring pada 30 Juni 2026

Kata kunci:

Compact heat exchanger, Sirip Spiral Berpotongan, Reynolds Number, Nusselt Number, Perpindahan Panas

Keywords:

Compact heat exchanger, Intersecting spiral fins, Reynolds number, Nusselt number, Heat transfer

ABSTRAK

Compact heat exchanger (CHE) banyak digunakan pada sistem pendinginan mesin termal karena memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi sehingga mampu meningkatkan efektivitas perpindahan panas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik perpindahan panas pada *compact heat exchanger* dengan variasi konfigurasi sirip spiral berpotongan serta mengevaluasi kinerjanya menggunakan pendekatan bilangan *Reynolds–Nusselt*. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan pipa galvanis berdiameter luar 22 mm dengan panjang laluan 300 mm. Sirip spiral terbuat dari aluminium dengan ketebalan 0,3 mm, tinggi 10 mm, dan jarak antar sirip 30 mm. Variasi konfigurasi meliputi tanpa sirip, tanpa berpotongan, serta sirip spiral berpotongan 2 mm, 5 mm, dan 7 mm. Fluida kerja berupa air panas dengan temperatur *inlet* konstan 80°C dan laju aliran massa 0,57 kg/s, sedangkan pendinginan menggunakan aliran udara dengan kecepatan 3,59 m/s; 4,45 m/s; dan 5,07 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara meningkatkan bilangan *Reynolds* dari 4.936 hingga 6.971, yang menunjukkan bahwa aliran telah berada pada kondisi turbulen. Seiring dengan peningkatan bilangan *Reynolds*, bilangan *Nusselt* juga mengalami peningkatan pada seluruh konfigurasi pengujian, yang menunjukkan meningkatnya intensitas perpindahan panas secara konveksi. Di antara seluruh konfigurasi yang diuji, konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm menghasilkan kinerja termal terbaik, dengan laju perpindahan panas maksimum sebesar 11.682,7 W dan koefisien perpindahan panas konveksi sebesar 604 W/m²·K. Peningkatan kinerja tersebut dipengaruhi oleh intensifikasi turbulensi aliran serta gangguan lapisan batas termal akibat geometri sirip. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi konfigurasi sirip spiral dan peningkatan kecepatan aliran udara berpengaruh signifikan terhadap kinerja perpindahan panas pada *compact heat exchanger*.

ABSTRACT

Compact heat exchangers (CHE) are widely used in thermal system cooling applications due to their high surface-area-to-volume ratio, which enhances heat transfer effectiveness. This study aimed to analyze the heat transfer characteristics of a compact heat exchanger with various intersecting spiral fin configurations and to evaluate its performance using the *Reynolds–Nusselt* number approach. The experimental study was conducted using a galvanized pipe with an outer diameter of 22 mm and a flow length of 300 mm. The spiral fins were made of aluminum with a thickness of 0.3 mm, a height of 10 mm, and a fin spacing of 30 mm. The tested configurations consisted of a plain tube, a non-intersecting spiral fin, and intersecting spiral fins with intersection distances of 2 mm, 5 mm, and 7 mm. Hot water was used as the working fluid with a constant inlet temperature of 80°C and a mass flow rate of 0.57 kg/s, while cooling was provided by airflow velocities of 3.59 m/s, 4.45 m/s, and 5.07 m/s. The results showed that increasing the air velocity increased the *Reynolds* number from 4,936 to 6,971, confirming turbulent flow conditions. Correspondingly, the *Nusselt* number increased for all tested

configurations, indicating enhanced convective heat transfer intensity. Among all configurations, the 5 mm intersecting spiral fin exhibited the best thermal performance, achieving a maximum heat transfer rate of 11,682.7 W and a convective heat transfer coefficient of 604 W/m²-K. The performance enhancement was attributed to intensified flow turbulence and disruption of the thermal boundary layer caused by the fin geometry. The findings demonstrate that variations in spiral fin configuration and increases in air velocity significantly affect the heat transfer performance of compact heat exchangers.

1. PENGANTAR

Energi merupakan faktor penting dalam pengembangan industri modern, khususnya dalam upaya meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan. Dalam berbagai sektor industri, pemanfaatan energi panas tidak dapat dihindari karena sebagian besar proses produksi melibatkan konversi energi termal. Mesin termal sebagai salah satu komponen utama dalam sistem industri menghasilkan panas selama proses operasinya, sehingga diperlukan sistem pendinginan yang efektif untuk menjaga performa, efisiensi, dan keandalan sistem secara berkelanjutan (Alam dkk., 2023; Yadav dkk., 2022).

Heat exchanger merupakan perangkat yang berfungsi untuk mentransfer energi panas dari satu fluida ke fluida lain tanpa terjadi pencampuran secara langsung. Dalam aplikasi pendinginan mesin termal, compact heat exchanger (CHE) banyak digunakan karena memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, sehingga mampu meningkatkan efektivitas perpindahan panas pada ruang yang relatif terbatas (Reshaeel dkk., 2024; Wang dkk., 2024). Selain meningkatkan efisiensi termal, pengembangan heat exchanger yang lebih efisien juga berkontribusi terhadap pengurangan energi terbuang dan emisi lingkungan dari sistem industri (Chen dkk., 2023; Rahman dkk., 2022).

Kinerja heat exchanger dipengaruhi oleh berbagai parameter, antara lain material, geometri pipa, kondisi aliran fluida, dan konfigurasi permukaan perpindahan panas. Salah satu metode yang banyak diterapkan untuk meningkatkan performa perpindahan panas adalah penambahan sirip pada permukaan pipa. Penambahan sirip dapat memperbesar luas permukaan perpindahan panas sekaligus memicu gangguan aliran yang meningkatkan turbulensi, sehingga koefisien perpindahan panas konveksi dapat meningkat secara signifikan (Kim dkk., 2023; Kumar dkk., 2021). Penelitian eksperimental yang dilakukan oleh Gao dkk. (2024) menunjukkan bahwa modifikasi geometri sirip pada finned tube heat exchanger mampu meningkatkan intensitas perpindahan panas melalui pembentukan pola aliran yang lebih kompleks. Hasil serupa dilakukan oleh Hussain dkk. (2023), yang menyatakan bahwa perubahan konfigurasi sirip berpengaruh signifikan terhadap performa termal compact heat exchanger pada kondisi aliran turbulen.

Salah satu konfigurasi sirip yang banyak dikembangkan adalah sirip spiral karena mampu meningkatkan performa perpindahan panas melalui pembentukan aliran sekunder, peningkatan turbulensi, serta penipisan lapisan batas termal di sekitar permukaan perpindahan panas (Liu dkk., 2024; Zhang, 2023; Singh dkk., 2025). Li dkk. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan sirip spiral pada heat exchanger menghasilkan peningkatan bilangan Nusselt yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi konvensional. Selain itu, karakteristik aliran udara dan distribusi temperatur di sekitar compact heat exchanger juga dipengaruhi oleh geometri sirip yang digunakan, sebagaimana ditunjukkan oleh Park dkk. (2021). Variasi parameter geometris seperti tinggi sirip, pitch, bentuk sirip, dan konfigurasi sirip memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik aliran dan performa termal heat exchanger (Wang dkk., 2024; Chen dkk., 2023). Patel dkk. (2023) juga menunjukkan bahwa konfigurasi sirip yang lebih kompleks mampu meningkatkan perpindahan panas konveksi secara signifikan melalui intensifikasi pencampuran aliran.

Dalam analisis perpindahan panas, penggunaan bilangan tak berdimensi seperti bilangan Reynolds (Re) dan bilangan Nusselt (Nu) sangat penting untuk memahami hubungan antara karakteristik aliran dan mekanisme perpindahan panas secara lebih umum. Peningkatan bilangan Reynolds akibat kenaikan kecepatan aliran fluida akan meningkatkan turbulensi aliran, yang selanjutnya berdampak pada peningkatan bilangan Nusselt dan koefisien perpindahan panas konveksi (Alam dkk., 2023; Liu dkk., 2024). Pendekatan berbasis bilangan tak berdimensi memungkinkan hasil penelitian dapat dibandingkan dengan berbagai konfigurasi dan kondisi operasi yang berbeda. Zhou dkk. (2025) menunjukkan bahwa optimasi struktur sirip yang kompleks pada compact heat exchanger perlu dievaluasi menggunakan pendekatan Reynolds–Nusselt untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme perpindahan panas.

Penelitian sebelumnya oleh Syahril dkk. (2024) menunjukkan bahwa konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm menghasilkan kinerja termal terbaik dibandingkan konfigurasi lainnya. Namun, analisis yang dilakukan masih terbatas pada parameter dimensional, seperti laju perpindahan panas dan koefisien perpindahan panas, sehingga belum sepenuhnya mampu menjelaskan hubungan antara karakteristik aliran fluida dan intensitas perpindahan panas secara menyeluruh.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) terkait terbatasnya analisis berbasis bilangan Reynolds dan Nusselt pada compact heat exchanger dengan konfigurasi sirip spiral berpotongan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik perpindahan panas pada compact heat exchanger dengan konfigurasi sirip spiral berpotongan melalui pendekatan eksperimental dan evaluasi berdasarkan bilangan Reynolds dan Nusselt. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara karakteristik aliran dan mekanisme perpindahan panas konveksi, serta menjadi dasar ilmiah dalam pengembangan desain compact heat exchanger yang lebih efektif, efisien, dan optimal.

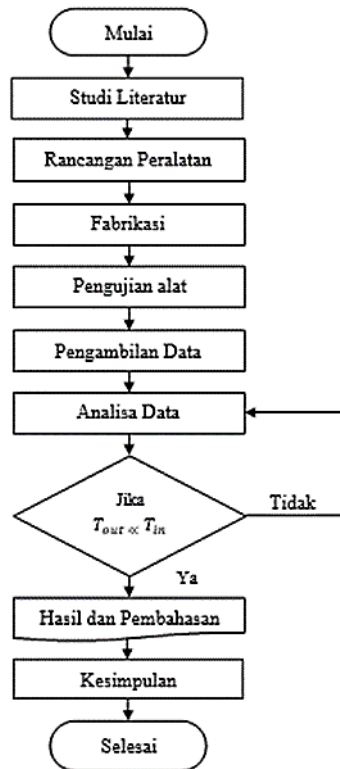
2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis karakteristik perpindahan panas pada *compact heat exchanger* dengan variasi konfigurasi sirip spiral berpotongan. Metode ini dipilih untuk memperoleh data aktual mengenai pengaruh variasi geometri sirip dan kecepatan aliran udara terhadap kinerja perpindahan panas. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan dan pembuatan alat uji, pengujian eksperimental, pengambilan data, serta analisis hasil pengujian.

2.1 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian disusun secara sistematis yang meliputi studi literatur, perancangan dan fabrikasi alat heat exchanger, pengujian eksperimental, pengambilan data, serta analisis data. Diagram alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Secara umum, penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori dan referensi terkait, kemudian dilanjutkan dengan perancangan dan pembuatan alat uji. Pengujian dilakukan dengan variasi konfigurasi sirip spiral dan kecepatan aliran udara. Data hasil pengujian dianalisis untuk menentukan laju perpindahan panas, koefisien perpindahan panas, serta bilangan Reynolds dan Nusselt sebagai parameter evaluasi

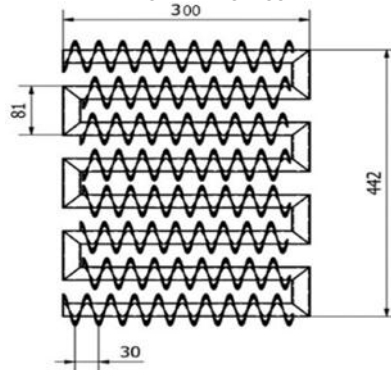
karakteristik aliran dan perpindahan panas. Hasil analisis selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pembahasan dan penarikan kesimpulan.



Gambar 1: Flowchart

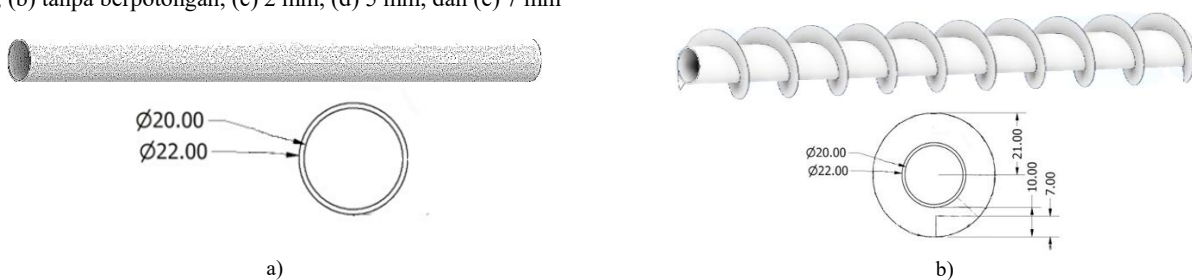
2.2 Spesifikasi dan Pembuatan Alat

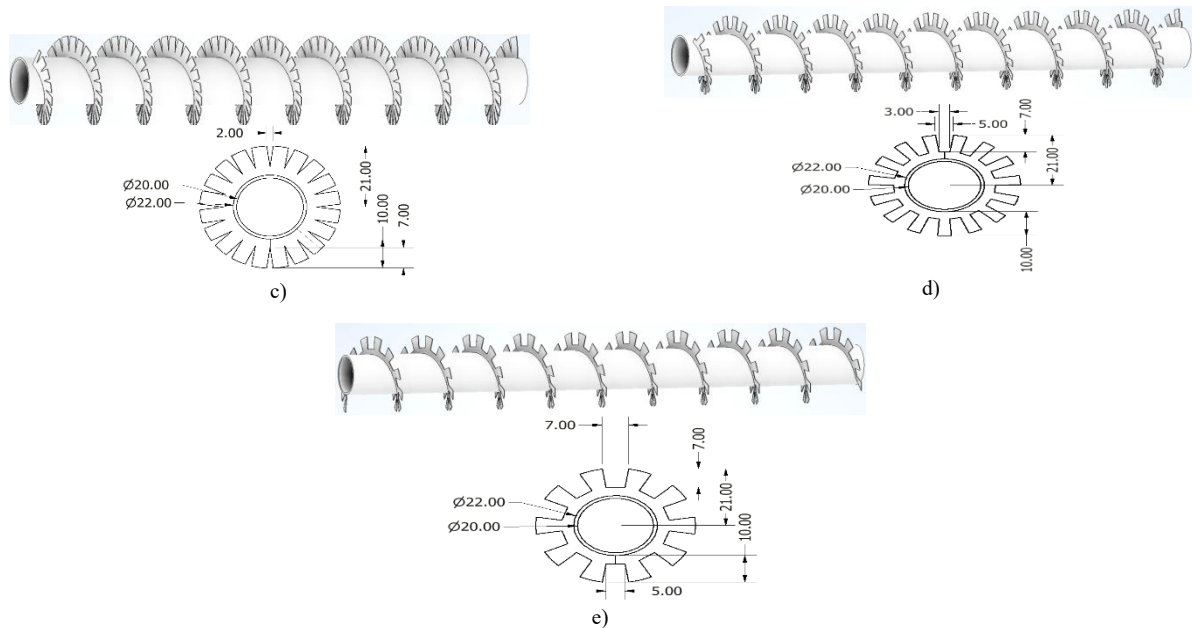
Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah compact heat exchanger tipe tube yang dibuat dari pipa galvanis standar SCH-40 dengan diameter dalam 20 mm dan diameter luar 22 mm. Panjang total pipa adalah 6 m dengan panjang laluan efektif sebesar 300 mm serta dilengkapi belokan tajam sepanjang 81 mm untuk meningkatkan gangguan aliran.



Gambar 2: Desain heat exchanger

Gambar 2 menunjukkan desain alat heat exchanger yang digunakan dalam penelitian ini. Dimensi geometris dijaga konstan untuk setiap variasi agar perbedaan hasil hanya dipengaruhi oleh konfigurasi sirip spiral. Sirip spiral dipasang pada permukaan luar pipa menggunakan material aluminium dengan ketebalan 0,3 mm, tinggi sirip 10 mm, dan jarak antar sirip (pitch) sebesar 30 mm. Variasi konfigurasi sirip yang digunakan meliputi tanpa sirip, sirip spiral tanpa berpotongan, serta sirip spiral berpotongan 2 mm, 5 mm, dan 7 mm. Konfigurasi pipa tanpa sirip sebagai kondisi pembandingan ditunjukkan pada Gambar 3 yang menampilkan variasi konfigurasi sirip: (a) tanpa sirip, (b) tanpa berpotongan, (c) 2 mm, (d) 5 mm, dan (e) 7 mm

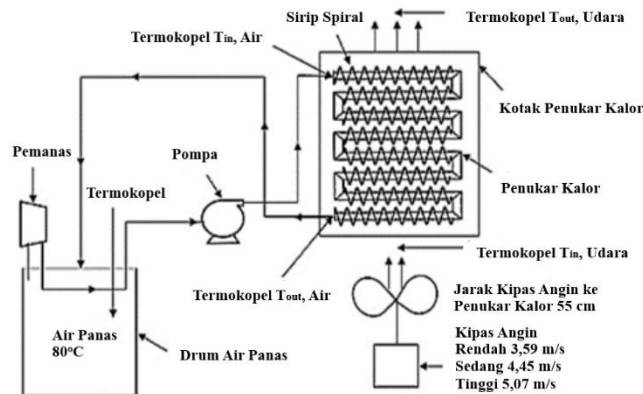




Gambar 3: Variasi konfigurasi sirip spiral: (a) tanpa sirip, (b) tanpa berpotongan, (c) 2 mm, (d) 5 mm, dan (e) 7 mm

2.3 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan secara eksperimental menggunakan fluida kerja berupa air panas yang dipanaskan hingga temperatur *inlet* konstan sebesar 80 °C dan dialirkan ke dalam *heat exchanger* dengan laju aliran massa sebesar 0,57 kg/s menggunakan pompa sirkulasi. Pendinginan pada permukaan luar *heat exchanger* dilakukan menggunakan aliran udara yang dihasilkan oleh kipas dengan variasi kecepatan sebesar 3,59 m/s; 4,45 m/s; dan 5,07 m/s. Kipas ditempatkan pada jarak 55 cm untuk memastikan distribusi aliran udara yang merata. Gambar 4 menunjukkan skema sistem pengujian yang terdiri dari *heat exchanger*, pemanas air, pompa sirkulasi, kipas udara, serta instrumen pengukuran temperatur. Temperatur diukur menggunakan termokopel yang dipasang pada sisi *inlet* dan *outlet* fluida.



Gambar 4: Skematis alat uji penelitian

2.4 Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis untuk menentukan parameter perpindahan panas dan karakteristik aliran. Laju perpindahan panas dihitung menggunakan persamaan (1) (Incropera dkk., 2011).

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Dimana q adalah laju perpindahan panas (W), \dot{m} adalah laju aliran massa air (kg/s), C_p adalah kalor jenis air (J/kg. K), ΔT adalah perbedaan temperatur air *inlet* dan air *outlet* (K). Nilai kalor jenis air C_p yang digunakan adalah 4200 J/kg.K.

Koefisien perpindahan panas konveksi dihitung menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) pada Persamaan (2) (Çengel & Ghajar, 2015).

$$h = \frac{q}{A \cdot \Delta T_{lmtd}} \quad (2)$$

Dimana h adalah koefisien perpindahan panas konveksi (W/m². K), q adalah laju perpindahan panas (W), A adalah luas permukaan bidang perpindahan panas (m²), ΔT_{lmtd} adalah *log mean temperature difference*.

Nilai LMTD dihitung menggunakan Persamaan (3):

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3)$$

Dimana ΔT_1 adalah selisih temperatur pada sisi masuk (K), ΔT_2 adalah selisih temperatur pada sisi keluar (K) Karakteristik aliran dianalisis menggunakan bilangan *Reynolds* pada persamaan (4) (Çengel & Ghajar, 2015).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \tag{4}$$

Dimana ρ adalah densitas udara (kg/m³), v adalah kecepatan udara (m/s), μ adalah viskositas dinamik udara (pa.s). Bilangan *Nusselt* dihitung menggunakan persamaan (5) (Incropera dkk., 2011).

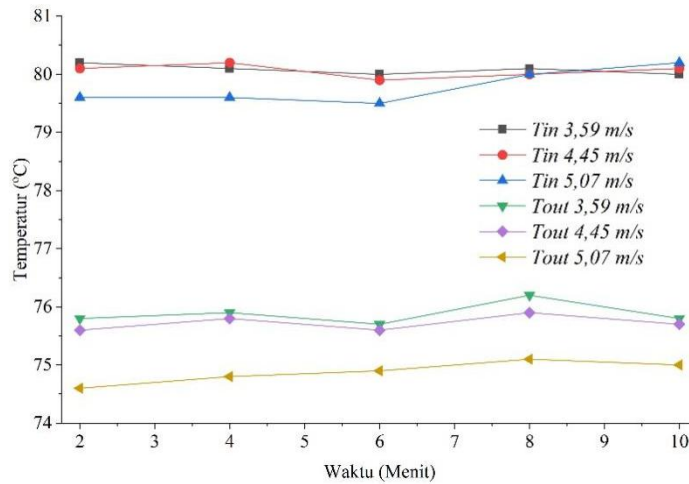
$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \tag{5}$$

Dimana h adalah koefisien perpindahan panas konveksi sisi udara (W/m².K), k adalah konduktivitas termal udara (W/m.K), D adalah diameter pipa (m). Nilai diameter pipa 0,022 m. Nilai konduktivitas termal udara (k), diperoleh berdasarkan temperatur rata-rata udara selama pengujian. Pada temperatur sekitar 30°C, nilai konduktivitas termal udara yang digunakan adalah sebesar 0,026 W/m.K (Çengel & Ghajar, 2015). Analisis dilakukan untuk melihat hubungan antara bilangan *Reynolds-Nusselt* serta pengaruh konfigurasi sirip terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Distribusi Temperatur

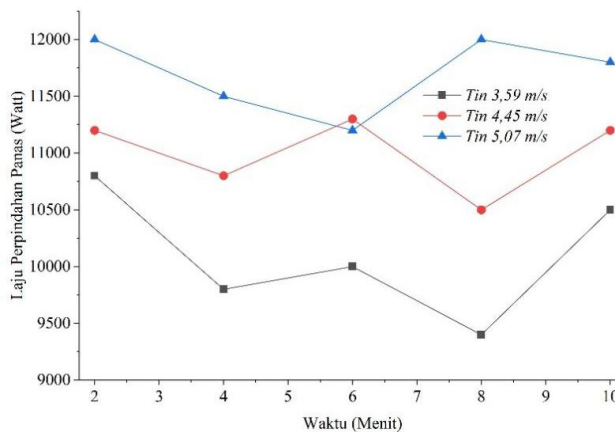
Pada penelitian ini, analisis distribusi temperatur dilakukan untuk memastikan bahwa sistem pengujian telah mencapai kondisi tunak (*steady state*) sebelum parameter perpindahan panas dianalisis lebih lanjut. Distribusi temperatur diamati pada interval waktu menit ke-2 hingga menit ke-10 selama pengujian berlangsung.



Gambar 5: Pengaruh kecepatan udara terhadap distribusi temperatur pada *heat exchanger* dengan sirip spiral berpotongan 5 mm

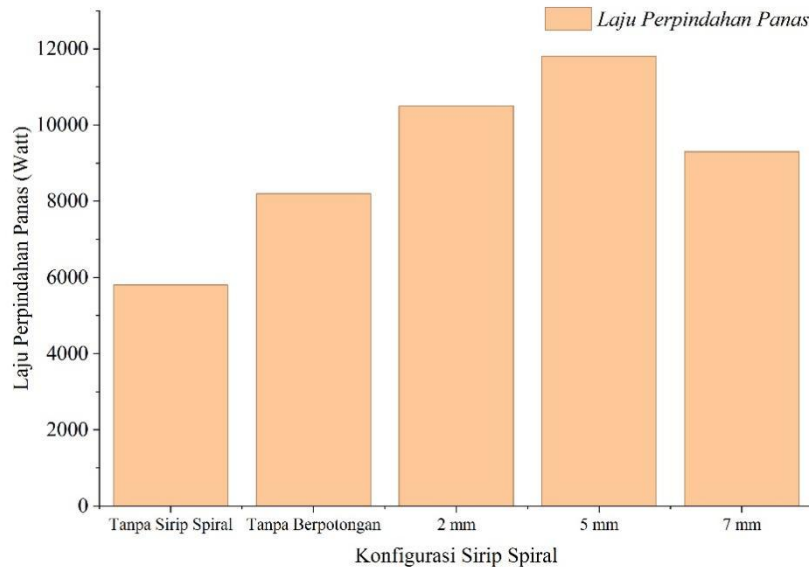
Gambar 5 menunjukkan distribusi temperatur air pada sisi *inlet* dan *outlet heat exchanger* terhadap waktu pengujian untuk konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm dengan variasi kecepatan udara 3,59 m/s; 4,45 m/s; dan 5,07 m/s. Konfigurasi ini dipilih karena berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Syahril dkk. (2024), konfigurasi tersebut menghasilkan kinerja perpindahan panas yang optimal.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur *inlet* relatif konstan selama pengujian, sedangkan temperatur *outlet* hanya mengalami fluktuasi kecil tanpa perubahan signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem telah mencapai kondisi tunak (*steady state*), sehingga data yang diperoleh dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Peningkatan kecepatan udara dari 3,59 m/s menjadi 5,07 m/s menyebabkan selisih temperatur antara *inlet* dan *outlet* meningkat sekitar 4%-5%, yang menunjukkan peningkatan efektivitas perpindahan panas. Fenomena ini terjadi karena peningkatan kecepatan aliran udara memperkuat mekanisme konveksi pada permukaan *heat exchanger*. Hasil ini sejalan dengan penelitian Syahril dkk. (2024), yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara meningkatkan intensitas perpindahan panas konveksi dan menurunkan temperatur *outlet* secara lebih signifikan. Dengan demikian, data hasil pengujian dinilai memadai untuk digunakan dalam analisis lebih lanjut, yang meliputi perhitungan laju perpindahan panas, koefisien perpindahan panas konveksi, serta evaluasi karakteristik aliran dan perpindahan panas berdasarkan bilangan *Reynolds* dan *Nusselt*.



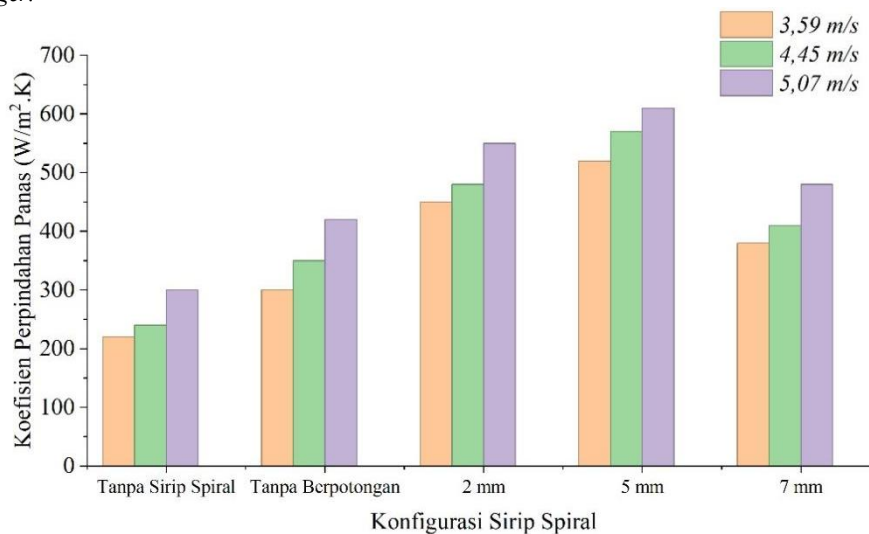
Gambar 6: Pengaruh kecepatan udara terhadap laju perpindahan panas pada *heat exchanger* dengan sirip spiral berpotongan 5 mm

Gambar 6 menunjukkan perubahan laju perpindahan panas selama pengujian untuk konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm pada variasi kecepatan udara 3,59 m/s; 4,45 m/s; dan 5,07 m/s. Konfigurasi ini digunakan karena berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Syahril dkk. (2024), konfigurasi 5 mm menghasilkan kinerja perpindahan panas tertinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju perpindahan panas cenderung stabil pada rentang waktu menit ke-2 hingga menit ke-10, yang menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi tunak (*steady state*). Nilai laju perpindahan panas tertinggi diperoleh pada kecepatan udara 5,07 m/s sebesar sekitar 11.682,7 W, sedangkan nilai terendah pada 3,59 m/s berada pada kisaran 10.100 W. Peningkatan kecepatan udara dari 3,59 m/s menjadi 5,07 m/s menghasilkan peningkatan laju perpindahan panas sekitar 15%-20%, yang menunjukkan peningkatan efektivitas perpindahan panas konveksi pada permukaan *heat exchanger*. Hal ini disebabkan oleh peningkatan turbulensi aliran yang memperbesar koefisien perpindahan panas. Hasil ini sejalan dengan penelitian Syahril dkk. (2024), yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara berkontribusi langsung terhadap peningkatan laju perpindahan panas melalui mekanisme konveksi yang lebih intensif.



Gambar 7: Pengaruh variasi konfigurasi sirip terhadap laju perpindahan panas pada kecepatan udara 5,07 m/s

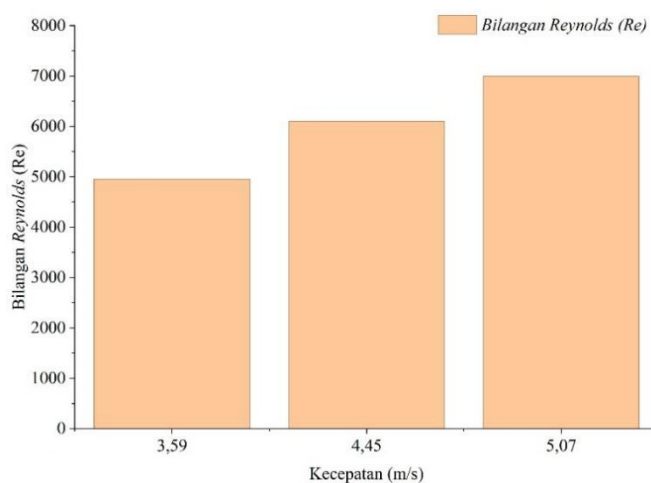
Gambar 7 menunjukkan perbandingan laju perpindahan panas rata-rata terhadap variasi konfigurasi sirip pada kecepatan udara tertinggi. Hasil menunjukkan bahwa penambahan sirip spiral secara signifikan meningkatkan laju perpindahan panas dibandingkan pipa tanpa sirip. Nilai laju perpindahan panas tertinggi diperoleh pada konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm sebesar sekitar 11.682,7 W, sedangkan nilai terendah pada kondisi tanpa sirip sebesar sekitar 5.841,4 W. Hal ini menunjukkan peningkatan performa hampir 100% akibat penambahan sirip. Sementara itu, konfigurasi 7 mm mengalami penurunan kinerja menjadi sekitar 9.288,7 W, atau menurun sekitar 20% dibandingkan konfigurasi 5 mm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan berpotongan pada sirip spiral berperan dalam meningkatkan gangguan aliran dan pembentukan turbulensi di sekitar permukaan perpindahan panas. Peningkatan turbulensi tersebut mendorong peningkatan laju perpindahan panas konveksi. Namun, ukuran berpotongan yang terlalu besar menyebabkan meningkatnya hambatan aliran dan menurunkan efektivitas distribusi udara, sehingga kinerja perpindahan panas mengalami penurunan. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Syahril dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm menghasilkan kinerja termal terbaik. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi sirip yang tepat menjadi faktor penting dalam meningkatkan kinerja *compact heat exchanger*.



Gambar 8: Pengaruh konfigurasi sirip spiral berpotongan terhadap koefisien perpindahan panas pada berbagai kecepatan udara

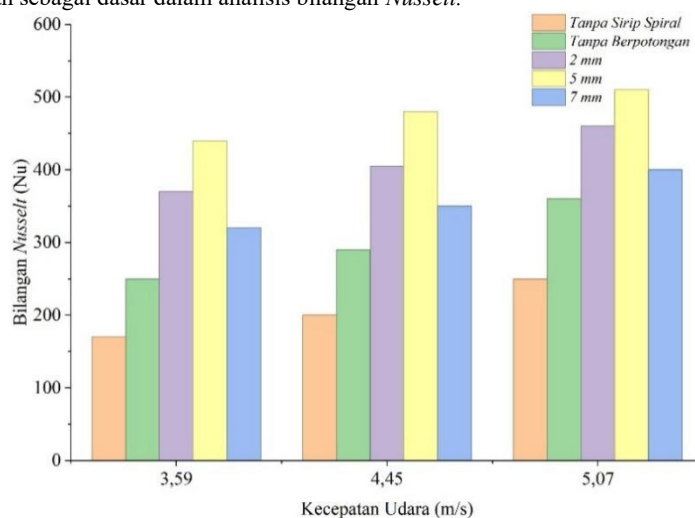
Gambar 8 menunjukkan perbandingan koefisien perpindahan panas rata-rata untuk seluruh konfigurasi sirip pada variasi kecepatan udara. Secara umum, koefisien perpindahan panas mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran udara, yang menunjukkan semakin dominannya mekanisme konveksi paksa pada kondisi aliran yang lebih tinggi. Nilai koefisien

perpindahan panas tertinggi diperoleh pada konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm sebesar $604 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, sedangkan nilai terendah terjadi pada kondisi tanpa sirip sebesar $195 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Kondisi tersebut menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan panas sebesar sekitar 210% akibat penerapan sirip spiral. Selain itu, peningkatan kecepatan udara memberikan kontribusi terhadap kenaikan koefisien perpindahan panas sebesar sekitar 15–20% pada seluruh konfigurasi yang diuji. Peningkatan kinerja tersebut dikaitkan dengan bertambahnya intensitas pencampuran aliran yang memperkuat turbulensi serta mengurangi ketebalan lapisan batas termal di sekitar permukaan perpindahan panas. Akibatnya, hambatan termal menurun dan laju perpindahan panas konveksi meningkat secara signifikan. Konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm menghasilkan kinerja termal terbaik karena mampu memberikan keseimbangan yang optimal antara peningkatan luas permukaan perpindahan panas dan intensifikasi turbulensi aliran. Kondisi tersebut meningkatkan interaksi antara fluida dan permukaan perpindahan panas, sehingga koefisien perpindahan panas yang dihasilkan menjadi lebih tinggi dibandingkan konfigurasi lainnya. Sebaliknya, konfigurasi 7 mm menunjukkan penurunan kinerja dibandingkan konfigurasi 5 mm, meskipun nilainya masih lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa sirip. Penurunan tersebut diduga disebabkan oleh meningkatnya hambatan aliran serta berkurangnya efektivitas distribusi udara pada permukaan perpindahan panas akibat ukuran potongan sirip yang lebih besar. Hasil penelitian ini konsisten dengan penelitian Syahril dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm memberikan performa termal paling optimal dibandingkan konfigurasi lainnya. Oleh karena itu, kecepatan aliran udara dan konfigurasi geometri sirip merupakan parameter yang berperan penting dalam meningkatkan koefisien perpindahan panas dan kinerja termal *compact heat exchanger*.



Gambar 9: Pengaruh kecepatan udara terhadap bilangan *Reynolds*

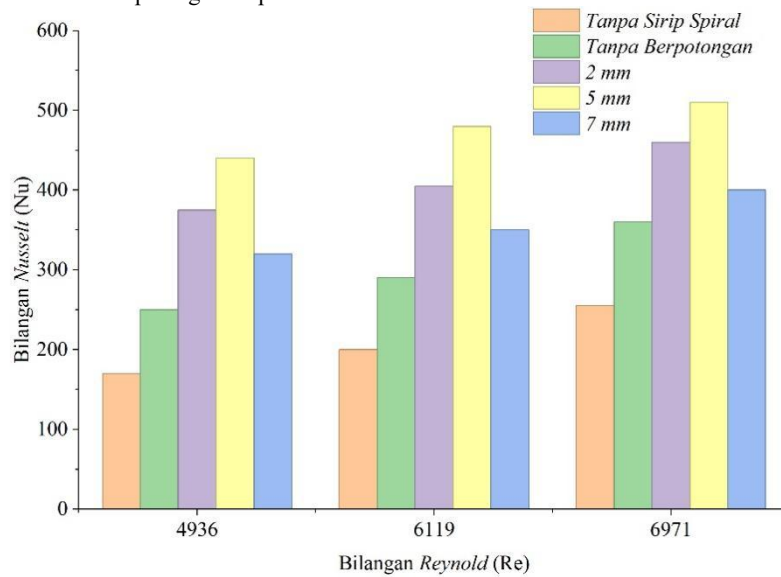
Gambar 9 menunjukkan hubungan antara bilangan *Reynolds* dan kecepatan udara pada pipa dengan konfigurasi sirip spiral 5 mm. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara dari 3,59 m/s menjadi 5,07 m/s menyebabkan bilangan *Reynolds* meningkat dari 4.936 menjadi 6.971 atau mengalami peningkatan sebesar 41%. Nilai *Reynolds* yang menunjukkan bahwa aliran udara berada pada kondisi turbulen karena memiliki nilai $Re > 4000$ (Çengel & Ghajar, 2015). Pada penelitian ini, aliran yang terjadi termasuk kategori aliran eksternal (*external flow*), dimana udara mengalir melewati permukaan luar pipa bersirip spiral. Kondisi turbulen tersebut meningkatkan intensitas pencampuran fluida dan menurunkan ketebalan lapisan batas termal pada permukaan *heat exchanger*, sehingga mekanisme perpindahan panas konveksi menjadi lebih efektif. Peningkatan kecepatan udara juga berpengaruh terhadap kenaikan laju perpindahan panas (q) dan koefisien perpindahan panas konveksi (h). Dengan demikian, bilangan *Reynolds* menjadi parameter penting dalam merepresentasikan karakteristik aliran yang mempengaruhi peningkatan performa termal *heat exchanger*. Nilai *Reynolds* selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis bilangan *Nusselt*.



Gambar 10: Pengaruh kecepatan udara terhadap bilangan *Nusselt*

Gambar 10 menunjukkan nilai rata-rata bilangan *Nusselt* untuk seluruh konfigurasi sirip spiral pada variasi kecepatan udara. Nilai *Nusselt* meningkat seiring kenaikan kecepatan udara, yang menunjukkan peningkatan intensitas perpindahan panas konveksi. Peningkatan tersebut berkaitan dengan bertambahnya bilangan *Reynolds* yang memperkuat turbulensi aliran, sehingga mempercepat

pencampuran fluida dan menipiskan lapisan batas termal pada permukaan *heat exchanger*. Kecenderungan ini sejalan dengan peningkatan laju perpindahan panas dan koefisien perpindahan panas pada kondisi yang sama, sehingga menunjukkan bahwa mekanisme konveksi turbulen menjadi faktor dominan dalam peningkatan performa termal.



Gambar 11: Hubungan bilangan *Nusselt* terhadap bilangan *Reynolds* untuk seluruh konfigurasi sirip spiral.

Gambar 11 menunjukkan hubungan antara bilangan *Nusselt* dan bilangan *Reynolds* untuk seluruh konfigurasi sirip spiral. Peningkatan bilangan *Reynolds* dari 4.936 menjadi 6.971 diikuti oleh kenaikan bilangan *Nusselt* pada seluruh konfigurasi, dengan peningkatan berkisar 20%–30%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan turbulensi aliran memperkuat pencampuran fluida dan menipiskan lapisan batas termal, sehingga meningkatkan efektivitas perpindahan panas konveksi. Konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm secara konsisten menghasilkan nilai bilangan *Nusselt* tertinggi pada seluruh rentang bilangan *Reynolds*, dengan peningkatan sekitar 15%–20% dibandingkan konfigurasi lainnya. Hasil Penelitian sejalan dengan penelitian Syahril dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut memberikan kinerja termal paling optimal, dan pada penelitian ini diperkuat melalui analisis bilangan tak berdimensi. Sebaliknya, konfigurasi 7 mm menunjukkan nilai bilangan *Nusselt* yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi 5 mm pada bilangan *Reynolds* yang sama, dengan selisih sekitar 10%–15%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan jarak potongan sirip meningkatkan hambatan aliran dan menurunkan efektivitas distribusi fluida di sekitar permukaan perpindahan panas. Secara keseluruhan, hubungan antara bilangan *Reynolds* dan *Nusselt* menunjukkan bahwa peningkatan performa perpindahan panas dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik aliran dan geometri sirip spiral, serta memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap mekanisme perpindahan panas pada *compact heat exchanger*.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji karakteristik perpindahan panas pada *compact heat exchanger* dengan sirip spiral berpotongan melalui pendekatan eksperimental. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi tunak (*steady state*), sehingga data yang diperoleh layak digunakan untuk analisis perpindahan panas. Peningkatan kecepatan udara dari 3,59 m/s menjadi 5,07 m/s menghasilkan kenaikan laju perpindahan panas dan koefisien perpindahan panas pada seluruh konfigurasi sirip, dengan peningkatan berkisar 15% - 20%. Nilai bilangan *Reynolds* berada pada rentang 4.936-6.971, yang mengindikasikan aliran turbulen dan menunjukkan hubungan searah dengan bilangan *Nusselt*. Konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm menunjukkan kinerja termal terbaik, dengan nilai laju perpindahan panas maksimum sebesar 11.682,7 W serta menghasilkan bilangan *Nusselt* tertinggi dibandingkan konfigurasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan turbulensi aliran, yang dipengaruhi oleh kecepatan udara, serta optimasi geometri sirip berperan signifikan dalam meningkatkan perpindahan panas konveksi. Dengan demikian, konfigurasi sirip spiral berpotongan 5 mm merupakan kondisi optimum dalam penelitian ini. Hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar dalam perancangan *compact heat exchanger* yang lebih efisien untuk aplikasi pendinginan mesin termal.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, T., Khan, M. S., & Rahman, M. M. (2023). Effect of turbulent flow on convective heat transfer characteristics. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102345.
- Chen, Y., Li, Q., & Zhao, J. (2023). Influence of fin geometry on heat transfer enhancement in tube *heat exchangers*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 36, 101234.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

- Gao, X., Li, H., & Zhou, Y. (2024). Experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement in finned tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 235, 121345.
- Hussain, A., Khan, M. S., & Iqbal, M. (2023). Performance evaluation of compact heat exchangers with modified fin geometries under turbulent flow. *Energy Reports*, 9, 5678–5689.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Kim, S., Park, J., & Lee, D. (2023). Experimental investigation of enhanced heat transfer using finned tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 200, 123456.
- Kumar, A., Singh, S., & Gupta, R. (2021). Experimental study of heat transfer augmentation in finned tube heat exchangers. *Heat Transfer Engineering*, 42(15), 1305–1315.
- Li, J., Wang, X., & Zhao, Y. (2024). Thermal performance analysis of spiral finned heat exchangers using experimental methods. *International Journal of Thermal Sciences*, 195, 108765.
- Liu, X., Zhang, Y., & Wang, L. (2024). Enhancement of heat transfer using spiral fin configurations in compact heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 210, 124567.
- Park, S., Kim, H., & Lee, J. (2021). Analysis of airflow and heat transfer in compact heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116735.
- Patel, V., Sharma, R., & Singh, D. (2023). Enhancement of convective heat transfer using advanced fin configurations in heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 44, 102876.
- Rahman, M. M., Islam, M. T., & Hasan, M. (2022). Heat transfer enhancement in compact heat exchangers using advanced fin design. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 14(4), 041015.
- Reshaeel, M., Ahmed, S., & Rahman, M. (2024). Heat transfer enhancement techniques in compact heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113567.
- Singh, R., Kumar, P., & Sharma, V. (2025). Thermal performance of modified fin structures in compact heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 280, 116789.
- Syahril, M., Syuhada, A., & Hamdani, H. (2024). Experimental study on heat transfer characteristics of intersecting spiral finned tube in a heat exchanger. *Jurnal Polimesin*, 22(5), 45–53.
- Wang, Z., Liu, H., & Chen, G. (2024). Numerical and experimental analysis of finned tube heat exchanger performance. *Applied Energy*, 350, 121456.
- Yadav, S., Patel, R., & Kumar, A. (2022). Performance analysis of compact heat exchangers for thermal systems. *Energy Reports*, 8, 1123–1132.
- Zhang, H. (2023). Experimental study on spiral fin heat exchanger performance under turbulent flow conditions. *Applied Thermal Engineering*, 220, 119876.
- Zhou, Q., Chen, L., & Yang, F. (2025). Optimization of heat transfer performance in compact heat exchangers with complex fin structures. *Applied Energy*, 360, 122456.