

UJI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK *THERMAL CONVECTION* PADA FLAT PLATE DAN TUBE BUNDLE

*Athaya Mirabel¹, Khoiri Rozi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

E-mail: athayamirabel@students.undip.ac.id

Abstrak

Studi ini membahas pengaruh variasi kecepatan aliran terhadap karakteristik perpindahan panas konveksi pada *Plate* dan *Tube Banks*. Penelitian bertujuan untuk memahami hubungan antara kecepatan aliran dan bilangan *Nusselt* (Nu) dalam sistem konveksi paksa yang digunakan pada penukar kalor. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan dua model uji, yaitu *Flat Plate* dan *Tube Bundle*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran berbanding langsung dengan peningkatan *Nusselt number*, dengan *plate heat exchanger* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan *tube banks*. Semakin tinggi kecepatan aliran, semakin efisien proses perpindahan panas karena aliran fluida yang lebih turbulen, yang menyebabkan lapisan batas termal menjadi lebih tipis. Selain itu, hasil penelitian mengungkapkan bahwa *plate* menghasilkan nilai *Nusselt* yang lebih tinggi, mengindikasikan bahwa desain dan geometri *plate* memungkinkan distribusi aliran fluida yang lebih merata dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Penelitian ini memberikan wawasan penting dalam desain dan optimasi sistem konveksi paksa, terutama dalam aplikasi industri yang memerlukan efisiensi tinggi dalam proses perpindahan panas, seperti dalam sistem HVAC dan penukar kalor industri.

Kata kunci: kecepatan aliran; konveksi paksa; *nusselt number*; *plate*; *tube bank*

Abstract

This study examines the effect of flow velocity variation on the convection heat transfer characteristics in Plate and Tube Banks. The research aims to understand the relationship between flow velocity and Nusselt number (Nu) in forced convection systems used in heat exchangers. Experiments were conducted using two test models: Flat Plate and Tube Bundle. The results show that an increase in flow velocity directly correlates with an increase in Nusselt number, with plate heat exchangers performing better than tube banks. As the flow velocity increases, the heat transfer process becomes more efficient due to the more turbulent fluid flow, which causes the thermal boundary layer to become thinner. Additionally, the results reveal that the plate design yields higher Nusselt values, indicating that the design and geometry of the plate allow for more uniform fluid flow distribution, thereby improving heat transfer efficiency. This study provides valuable insights into the design and optimization of forced convection systems, particularly in industrial applications that require high efficiency in heat transfer processes, such as in HVAC systems and industrial heat exchangers

Keywords: flow velocity; forced convection; *nusselt number*; *plate*; *tube banks*

1. Pendahuluan

Konveksi termal dalam sistem penukar panas seperti Tube Banks dan Flat Plate memiliki peran yang sangat penting dalam aplikasi teknik, termasuk dalam industri HVAC, pemrosesan makanan dan minuman, serta sistem pendinginan dan pemanas. Plate heat exchanger, yang terdiri dari pelat logam tipis yang disusun berlapis dan dipisahkan oleh gasket untuk membentuk saluran sempit bagi aliran fluida, merupakan salah satu contoh aplikasi yang banyak digunakan dalam industri. Sistem ini memungkinkan efisiensi perpindahan panas yang tinggi melalui desain kontrarius, di mana fluida panas dan dingin mengalir bergantian dalam saluran sempit yang bersebrangan (Daniël Walraven et al., 2014). Begitu pula dengan penukar panas jenis shell-and-tube, yang sering digunakan dalam industri proses dan petrokimia, memiliki desain fleksibel dan efisien dalam mentransfer panas antara dua fluida dengan konfigurasi desain yang variatif (Daniël Walraven et al., 2014).

Sistem konveksi paksa menjadi mekanisme utama dalam banyak aplikasi, termasuk pemindahan panas dari gas buang ke sistem pendinginan melalui proses evaporator dan kondensor. Pada sistem ini, konveksi paksa mempercepat perpindahan panas dengan memanfaatkan fluida yang dialirkan secara paksa melalui permukaan panas, meningkatkan efisiensi transfer energi (Francisco P. et al., 2015). Pengetahuan yang mendalam tentang konveksi paksa sangat penting untuk merancang sistem penukar panas yang efisien, dan salah satu faktor utama yang mempengaruhi efisiensi ini adalah bilangan *Reynolds* (Re). Variasi bilangan Re mempengaruhi pola aliran, koefisien perpindahan panas, dan penurunan

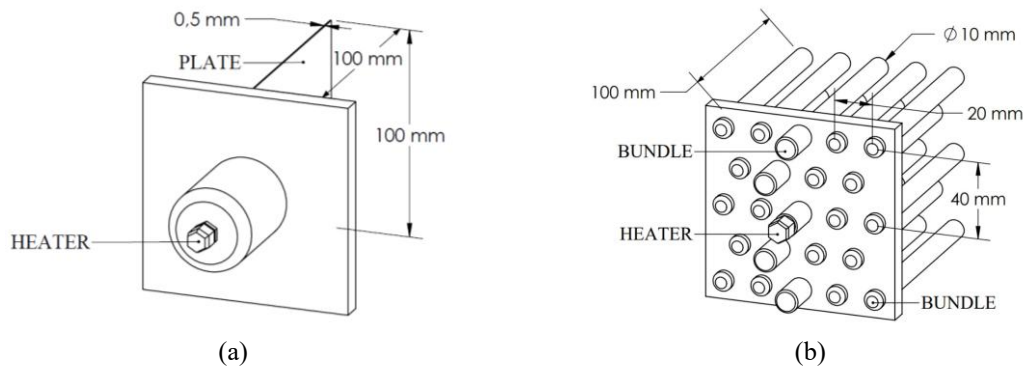
tekanan dalam sistem, yang secara langsung berhubungan dengan kinerja termal sistem.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa peningkatan bilangan *Reynolds* pada kondisi aliran turbulen dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas dalam sistem konveksi paksa. Sebagai contoh, pada pipa mikro-fin dan penggunaan sisipan pita terpilin, peningkatan bilangan *Re* terbukti meningkatkan efisiensi transfer panas secara signifikan (Widayanta et al., 2019; Mochammed et al., 2019). Pemahaman yang lebih dalam tentang bagaimana variasi bilangan *Re* mempengaruhi konveksi termal pada pipa dan plate heat exchanger sangat penting dalam merancang sistem perpindahan panas yang optimal di berbagai aplikasi teknik, termasuk dalam industri HVAC dan sistem penukar panas industri lainnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh variasi kecepatan aliran terhadap karakteristik konveksi termal dalam sistem penukar panas tipe plate dan tube banks, dengan fokus pada pemahaman hubungan antara bilangan kecepatan aliran dan bilangan *Nusselt* dalam konveksi paksa.

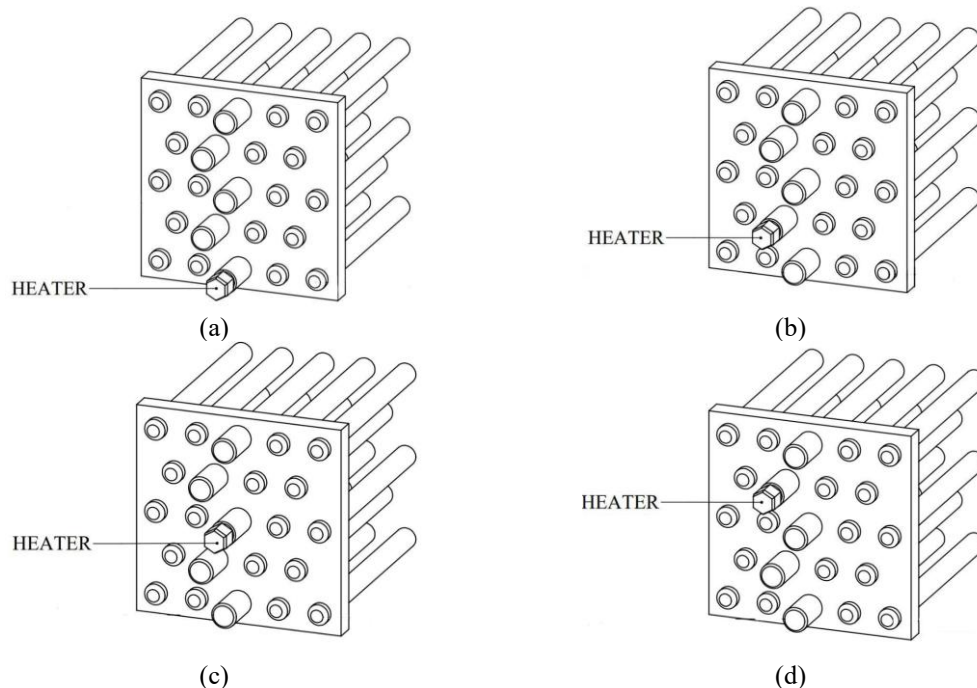
2. Bahan dan Metode Penelitian

Dalam penelitian ini beberapa model uji flat plate dan tube bundle sebagai representasi model system dari heat exchanger diuji. Gambar 1 menampilkan model uji flat plate dan tube bundle pada penelitian ini.



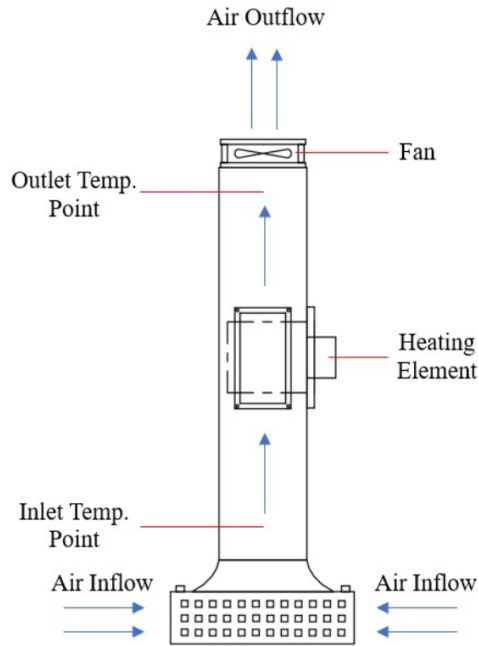
Gambar 1. Model uji (a) *flat plate* (b) *tube bundle*

Penelitian ini terdapat beberapa variasi posisi heater dengan bundle. Variasi posisi heater ditampilkan pada Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Variasi posisi heater tube (a) heater tube 1 (b) heater tube 2 (c) heater tube 3 (d) heater tube 4

Gambar 3 menggambarkan unit eksperimen yang digunakan untuk menguji performa thermal dari flat plate dan tube bundle pada eksperimen ini.

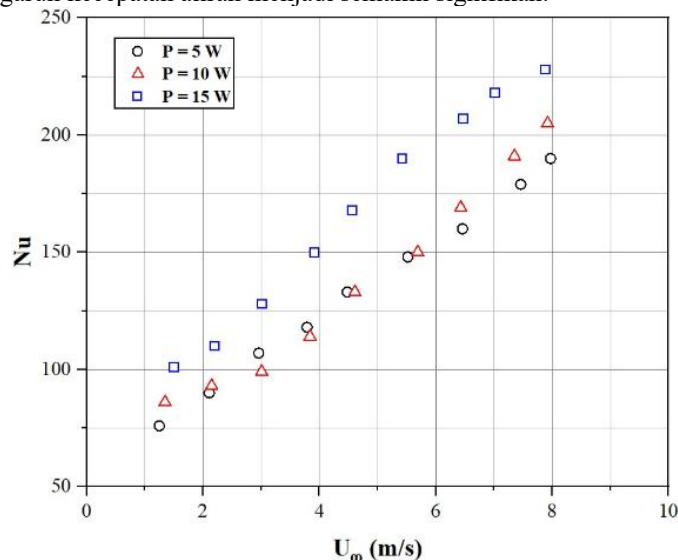


Gambar 3. Unit eksperimen

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Flat Plate

Hasil-hasil eksperimen pada sistem konveksi paksa untuk *Nusselt number* (Nu) sebagai fungsi kecepatan aliran pada variasi tiga daya diplot pada Gambar 4. Dari plot ini dapat dilihat bahwa perubahan Nu meningkat seiring dengan pertambahan daya pemanas yang diberikan. Dari plot-plot ini juga bisa dilihat bahwa gradien perubahan Nu terhadap kecepatan paling tajam dibuat oleh daya aliran fluida 15W. Selain itu, grafik ini juga menunjukkan pada perpindahan panas dengan 5W, nilai Nu pada 10W cenderung lebih tinggi untuk setiap tingkat kecepatan yang sama. Ini menunjukkan bahwa peningkatan daya pemanasan menghasilkan gradien suhu yang lebih besar antara permukaan pemanas dan aliran udara, sehingga memperkuat mekanisme konveksi. pada daya 10W, perpindahan panas berlangsung lebih efektif daripada pada 5W, dan pengaruh kecepatan aliran menjadi semakin signifikan.

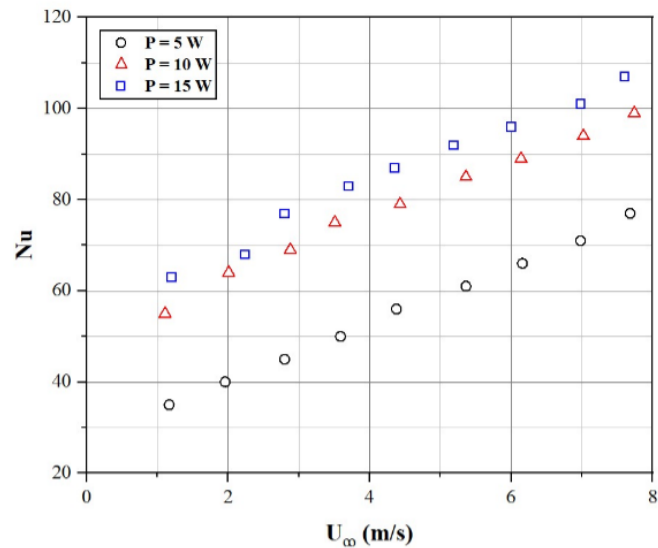


Gambar 4. Pengaruh Nu terhadap kecepatan aliran

3.2 Karakteristik Tube Bundle

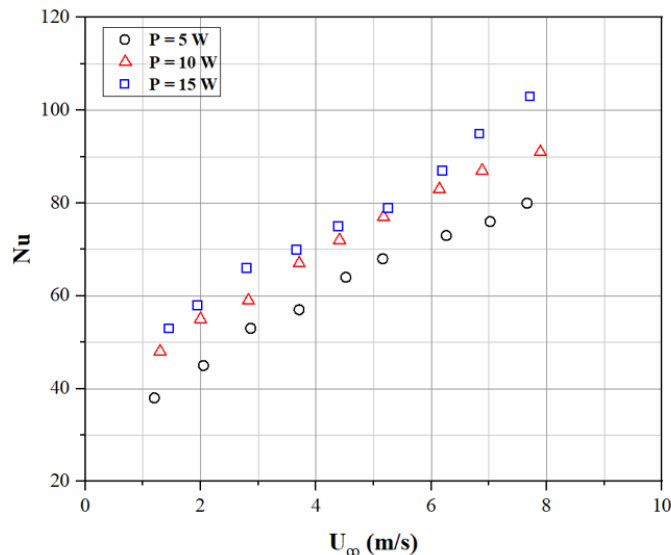
Gambar 5 menampilkan hubungan antara Nu dan kecepatan aliran. Hasil eksperimen pada sistem konveksi paksa di posisi *tube* 1 menunjukkan bahwa Nu meningkat seiring dengan bertambahnya daya pemanas, dengan nilai tertinggi tercatat pada kondisi 15W. Peningkatan daya pemanas menghasilkan suhu permukaan yang lebih tinggi, menciptakan perbedaan suhu yang lebih besar antara permukaan dan udara. Pada daya 10W, meskipun ada peningkatan daya pemanas dibandingkan dengan 5W, perbedaan suhu tidak sebesar pada 15W, sehingga Nu lebih rendah. Pada daya 5W, daya yang

lebih rendah menghasilkan perbedaan suhu yang lebih kecil.



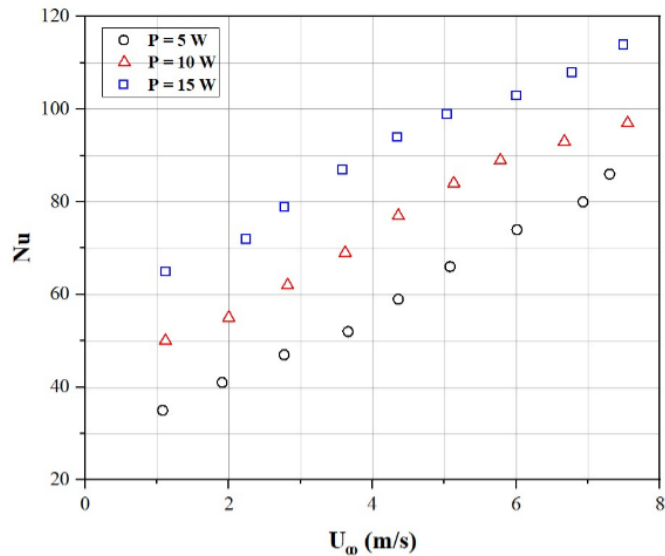
Gambar 5. Pengaruh Nu terhadap kecepatan aliran pada posisi tube 1

Hasil-hasil eksperimen pada sistem konveksi paksa karakteristik tube row 2 untuk perubahan sebagai fungsi kecepatan pada variasi tiga daya diplot pada Gambar 5. Grafik menunjukkan bahwa suhu meningkat seiring dengan bertambahnya daya. Meskipun ada peningkatan daya dari 5W ke 10W, perbedaan suhu antara permukaan dan udara tetap lebih kecil dibandingkan dengan 15W, sehingga $Nusselt\ number$ pada 10W lebih tinggi dibandingkan dengan 5W, namun tetap lebih rendah dibandingkan dengan 15W. Hal ini menunjukkan bahwa daya pemanasan yang lebih tinggi meningkatkan efisiensi konveksi, meskipun tidak seefektif pada 15W. Pada 5W, daya pemanasan yang lebih rendah menghasilkan suhu permukaan yang lebih rendah, sehingga mengurangi laju perpindahan panas, yang tercermin dalam Nu number yang lebih rendah.



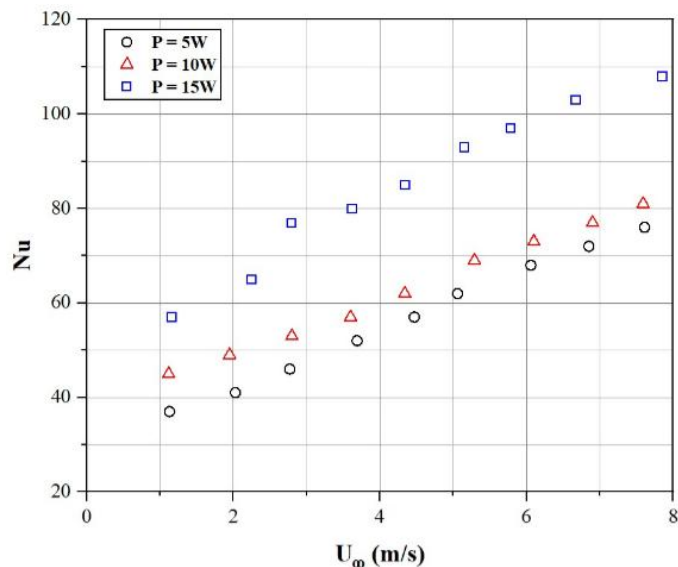
Gambar 6. Pengaruh Nu terhadap kecepatan aliran pada posisi tube 2

Gambar 7 menampilkan hubungan antara Nu dan kecepatan aliran. Hasil eksperimen pada sistem konveksi paksa untuk karakteristik tube row 3 menunjukkan bahwa suhu meningkat seiring dengan bertambahnya daya. Gradien suhu terhadap kecepatan meningkat secara konsisten dengan bertambahnya kecepatan aliran udara untuk ketiga kondisi daya. Pada daya 5W, $Nusselt\ Number$ meningkat signifikan dengan bertambahnya kecepatan. Pola serupa terlihat pada daya 10W, namun peningkatan Nu lebih besar pada kecepatan tinggi. Pada 15W, Nu meningkat lebih besar di seluruh rentang kecepatan, menunjukkan efisiensi perpindahan panas yang lebih baik pada daya tinggi, bahkan pada kecepatan rendah. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan hubungan positif antara kecepatan aliran udara dan Nu .



Gambar 7. Pengaruh Nu terhadap kecepatan aliran pada posisi tube 3

Hasil eksperimen pada sistem konveksi paksa untuk karakteristik tube row 4 menunjukkan bahwa suhu meningkat seiring dengan pertambahan daya. Gradien suhu terhadap kecepatan meningkat secara konsisten dengan bertambahnya kecepatan aliran udara untuk ketiga kondisi daya. Semakin besar daya yang diterapkan, semakin besar perbedaan suhu antara permukaan dan udara, yang mempercepat perpindahan panas. Pada daya 10W, meskipun lebih tinggi dari 5W, perbedaan suhu tidak sebesar pada 15W, sehingga Nu lebih rendah. Namun, Nu pada 10W tetap lebih tinggi daripada 5W, karena daya yang lebih besar meningkatkan laju perpindahan panas meskipun tidak seefektif pada 15W.



Gambar 8. Pengaruh Nu terhadap kecepatan aliran pada posisi tube 4

4. Kesimpulan

1. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran mengurangi lapisan batas termal, sehingga meningkatkan koefisien perpindahan panas. Plate memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan tube banks, karena desain plate memungkinkan kontak panas yang lebih efektif dengan fluida.
2. Hasil eksperimen juga menunjukkan bahwa peningkatan bilangan *Reynolds* menyebabkan peningkatan bilangan Nu , yang menandakan aliran yang lebih turbulen dan efisiensi perpindahan panas yang lebih tinggi. Plate menghasilkan nilai Nu yang lebih tinggi daripada tube banks, berkat desain dan geometri yang memungkinkan distribusi aliran fluida yang lebih baik dan lapisan batas termal yang lebih tipis.

5. Daftar Pustaka

- [1] He, K., & Zhang, L. (2019). Cross flow and heat transfer of hollow-fiber tube banks with complex distribution patterns and various baffle designs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *147*, 118937.
- [2] Kong, F., Wang, X., Guo, W., Li, X., Ren, Y., & Xu, S. (2025). Effects of key thermal parameters on the flow boiling process of water and prediction of the heat transfer coefficient in the corrugated plate heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *163*, 108709.
- [3] Goncalo G. Cruza,b, Miguel A.A. Mendesb, , Jose M.C. Pereirab, H. Santosc, A. Nikulind, Ana S. Moitaa,e, (2021). “ Experimental and numerical characterization of single-phase pressure drop and heat transfer enhancement in helical corrugated tubes ” aIN+ Center for Innovation, Technology and Policy Research, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
- [4] Zohuri, B. (2017). Forced convection heat transfer. In *Springer eBooks* (pp. 323–345).
- [5] Bhowmik, H., & Tou, K. W. (2005). Experimental study of transient forced convection heat transfer from simulated electronic chips. *Heat and Mass Transfer*, *41*(7), 599–605.
- [6] Abdulrahman, G. a. Q., & Alharbi, S. M. (2024). Laminar and turbulence forced heat transfer convection correlations inside tubes. A review. *arXiv (Cornell University)*.
- [7] Cruz, G. G., Mendes, M. A., Pereira, J. M., Santos, H., Nikulin, A., & Moita, A. S. (2021). Experimental and numerical characterization of single-phase pressure drop and heat transfer enhancement in helical corrugated tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *179*, 121632.
- [8] Gentry, M., & Jacobi, A. (2016). Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: Vortex interactions with the boundary layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *14*(3), 231–242.
- [9] Mohammed, A. A., & Razuqi, S. A. (2018). FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER OF AXIAL AIR FLOW WITH HEATSINK ON UNIFORM HEAT FLUX. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, *22*(02), 10–21.
- [10] Zhao, J., Zhu, J., Xu, Y., & Li, Y. (2024). New generalized expressions for forced convective heat transfer coefficients across the flat plate. *Applied Thermal Engineering*, 124688.
- [11] Kaladgi, A. R., Vishwanath, K. C., Reddy, S., & Chandrashekar, A. (2021). Experimental Investigation of Forced Convection Heat Transfer from Vertical Grooved Plates. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, *1189*(1), 012036.
- [12] Ishak, M., Tahseen, T. A., & Rahman, M. (2013). Experimental Investigation on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Air Flow over A Staggered Flat Tube Bank in Crossflow. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *7*, 900–911.