

STUDI EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI PADA HEAT EXCHANGER DENGAN KONFIGURASI ALIGNED DAN STAGGERED TUBE BUNDLE

*Akhmad Iqbal Ekadiarta¹, M.S.K Tony Suryo Utomo², 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: akabata17@gmail.com

Abstrak

Heat exchanger dengan konfigurasi pipe bundle merupakan peralatan penting dalam aplikasi industri untuk efisiensi perpindahan panas konveksi paksa. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh jumlah tube bundle, kecepatan aliran udara, dan daya pemanas terhadap performa termohidraulik secara eksperimental. Eksperimen menggunakan heat exchanger dengan variasi 1-3 tube bundle, kecepatan udara 4-28 m/s ($Re\ 10^3$ - 10^5), dan daya pemanas 20-40 W. Pengukuran mencakup koefisien konveksi h , Nusselt number Nu , pressure drop ΔP , dan selisih suhu ΔT pada konfigurasi heater tunggal hingga 3-tube bundle. Hasil utama menunjukkan: (1) Pressure drop meningkat signifikan pada konfigurasi 2-3 tube bundle akibat blockage ratio tinggi, dengan ΔP jauh lebih besar dibanding 1 tube bundle; (2) Kecepatan aliran dominan terhadap performa, h dan Nu meningkat dengan Re , ditandai ΔT mengecil; (3) Daya pemanas 20-40 W menghasilkan h linear naik kemudian menurun pada 35-40 W (ΔT masih tinggi), sementara Nu relatif konstan. Konfigurasi multi-tube bundle tingkatkan heat transfer namun memiliki pressure drop tinggi. Optimalisasi pemilihan rentang Re dan daya input penting untuk efisiensi termal industri.

Kata kunci: bilangan nusselt; bilangan reynolds; koefisien perpindahan panas; penurunan tekanan; tube bundle

Abstract

Heat exchangers with pipe bundle configurations are essential equipment in industrial applications for efficient forced convection heat transfer. This study aims to experimentally analyze the effects of tube bundle quantity, air flow velocity, and heater power on thermohydraulic performance. The experiment utilized a heat exchanger with 1 to 3 tube bundles, air velocities ranging from 4 to 28 m/s ($Re\ 10^3$ - 10^5), and heater power settings of 20, 30, and 40 W. Measurements included the convection coefficient h , Nusselt number Nu , pressure drop ΔP , and temperature difference ΔT across configurations from a single heater up to a 3-tube bundle arrangement. The main results show that: (1) pressure drop increased significantly in the 2- and 3-tube bundle configurations due to the high blockage ratio, with ΔP substantially larger than that of the single tube bundle; (2) air flow velocity exerted a dominant influence on performance, with h and Nu increasing with Re while ΔT decreased; (3) as heater power was raised from 20 to 40 W, h rose linearly but then declined at 35-40 W (where ΔT remained high), whereas Nu remained relatively constant. Multi-tube bundle configurations enhance heat transfer but are accompanied by a higher pressure drop. Optimizing the selection of Re range and input power is important for industrial thermal efficiency.

Keywords: heat transfer coefficient; nusselt number; pressure drop; reynolds number; tube bundle

1. Pendahuluan

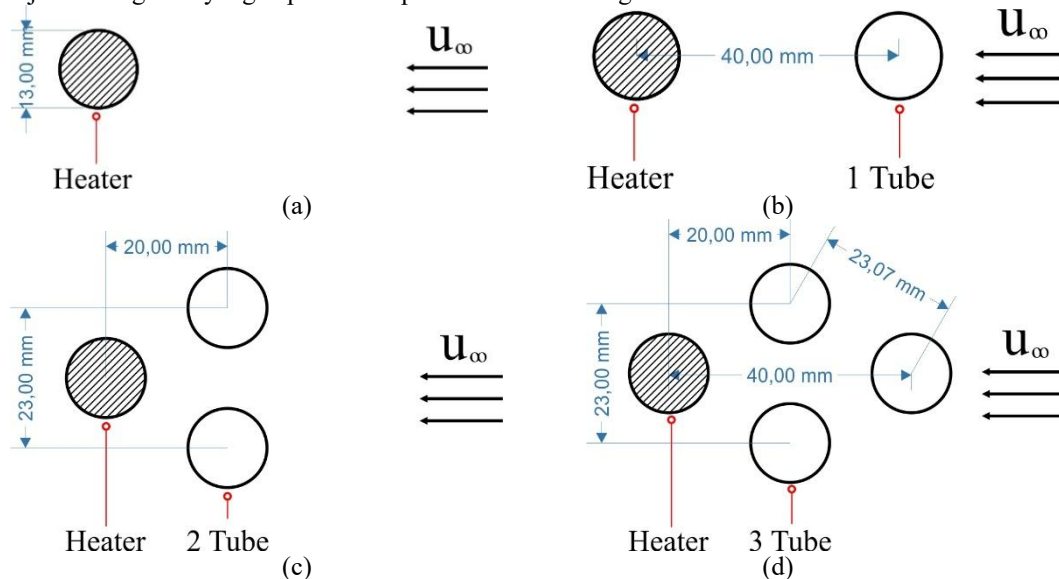
Heat exchanger (HE) merupakan peralatan penting dalam berbagai aplikasi industri dan energi, seperti pembangkit listrik, proses petrokimia, sistem pendingin udara, dan industri makanan, dengan efisiensi perpindahan panas yang dapat menghemat energi hingga 30-50% serta mengurangi emisi karbon. Di Indonesia, permintaan HE semakin tinggi seiring pengembangan industri manufaktur dan energi terbarukan, di mana konfigurasi shell and tube menjadi pilihan utama karena kemudahan fabrikasi dan skalabilitas [1], [2], [3]. Performa HE dipengaruhi kecepatan fluida, diameter tube, susunan (aligned/staggered), pitch ratio, dan jumlah baris tube. Tube bundle cross-flow bergantung pada korelasi empiris Nu dan ΔP [2], [3], [4], [5]. Tube banks digunakan luas dalam cross-flow heat exchangers, desain bergantung pada korelasi empiris pressure drop dan heat transfer [3]. Susunan pipa bundel umumnya diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu aligned (sejajar) dan staggered (berselang-seling) [6], [7]. Penelitian menunjukkan bahwa susunan staggered mampu menghasilkan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi, sekitar 7%, dibandingkan dengan susunan aligned, terlepas dari jumlah baris pipa yang digunakan [5]. Pada perpindahan panas

penghasil vortex memiliki peran penting di mana pada susunan staggered, vorteks terlihat di setiap baris, sedangkan pada in-line tidak ditemukan vorteks setelah baris pertama karena zona wake [2], [8]. Selain itu, peningkatan kecepatan aliran fluida juga berperan penting dalam meningkatkan bilangan Reynolds dan bilangan Nusselt, yang pada akhirnya meningkatkan koefisien perpindahan panas. Dengan demikian, laju perpindahan panas akan semakin besar seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran fluida [9], [10]. Dalam penelitian ini, fokus utama adalah menganalisis perpindahan panas konveksi paksa pada alat crossflow heat exchanger dengan penampang persegi dan susunan tube bundle. Penelitian ini akan dilakukan dengan memfokuskan analisis pada satu heater untuk menyederhanakan evaluasi pengaruh lokal terhadap kinerja termal sistem, kemudian diberi tambahan tube bundle sebagai variasi aliran fluida.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Model Eksperimen

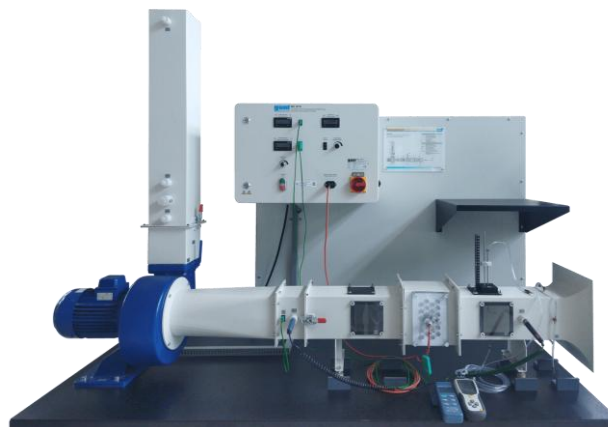
Pada studi eksperimental ini menggunakan model uji elemen pemanas yang diberi hambatan tube bundle yang disusun menjadi konfigurasi yang dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Spesimen Pengujian (a) Hanya Heater, (b) 1 Tube Bundle, (c) 2 Tube Bundle, dan (d) 3 Tube Bundle

2.2 Alat Uji Eksperimen

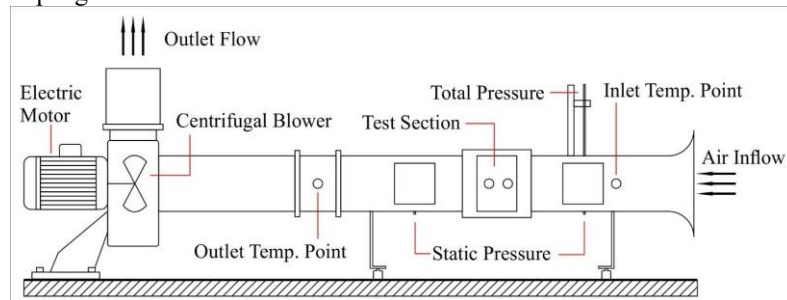
Unit pengujian yang digunakan merupakan cross flow heat exchanger WL314 dari GUNT yang dapat dilihat pada Gambar 3.2. Alat pengujian cross flow heat exchanger ini dirancang untuk pengujian perpindahan panas konveksi dengan aliran udara menggunakan pemanas dengan suhu maksimal pada 85°C. Suhu maksimal tersebut merupakan sistem pengaman cut-off untuk mematikan elemen pemanas secara otomatis apabila suhu pemanas melewati 85°C. Sistem ini menggunakan ducting berpenampang persegi dengan ukuran 150x150 mm dan menggunakan fan sentrifugal untuk mengalirkan udara.



Gambar 2. Unit Cross Flow Heat Exchanger WL314

Titik pengukuran pada pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.9 di bawah. Berikut penjelasan di tiap titik pengukuran pada Gambar 3. Inlet Temp. Point merupakan titik pengukuran suhu air inflow. Total Pressure merupakan titik pengukuran tekanan stagnasi atau tekanan total aliran inflow. Static Pressure 1 merupakan titik untuk mengukur tekanan static sebelum dan sesudah mengenai tube bundle. Juga digunakan untuk mengukur tekanan jika digunakan

dengan pengukuran total. Static Pressure 2 merupakan titik untuk mengukur tekanan static sesudah mengenai tube bundle. Test Section merupakan bagian pengukuran pada tube bundle, fokusnya di suhu permukaan heater. Outlet Temp. Point merupakan titik pengukuran suhu aliran outlet.



Gambar 3. Titik Pengukuran WL314

2.3 Alat Ukur

Pada eksperimen ini untuk pengambilan data menggunakan 3 alat ukur tambahan di luar dari alat pengujian WL314 yang dapat dilihat pada Gambar 4. Terdapat pitot tube untuk mengukur tekanan total yang dihubungkan pada manometer digital DD850. Manometer ini dibungkan melalui konektor di kedua selangnya. Pada bagian inlet dan outlet temp. diukur menggunakan thermometer digital 2 channel. Thermometer ini menggunakan thermokopel tipe K.



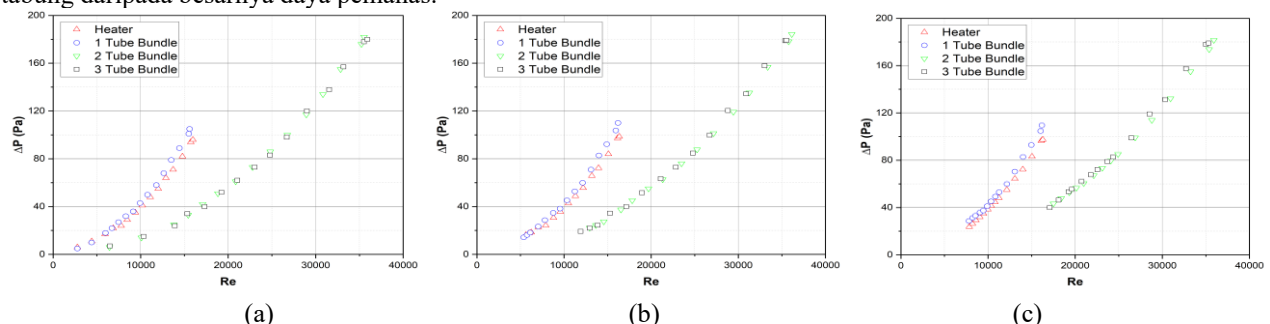
Gambar 4. Alat Ukur Eksperimen

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kerugian Tekanan (ΔP)

Hasil-hasil pengujian penurunan tekanan sebagai fungsi bilangan Reynolds pada variasi daya 20 W, 30 W, dan 40 W ditunjukkan dalam Gambar 5 a, b, dan c. Plot tersebut menunjukkan bahwa secara umum kerugian tekanan meningkat seiring bertambahnya bilangan Reynolds. Peningkatan ini disebabkan oleh semakin tingginya kecepatan aliran fluida yang mengakibatkan gaya gesek, tumbukan aliran terhadap permukaan tabung, serta pembentukan vorteks di sekitar tube bundle menjadi semakin besar, sehingga energi yang hilang sepanjang aliran juga meningkat.

Pada masing-masing variasi daya, konfigurasi dengan jumlah tube bundle yang lebih banyak menghasilkan kerugian tekanan yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi dengan jumlah tabung yang lebih sedikit. Hal ini terjadi karena penambahan tube bundle memperbesar blockage ratio, mempersempit luas penampang aliran efektif, dan meningkatkan kompleksitas lintasan aliran, sehingga hambatan aliran menjadi lebih besar. Dengan demikian, konfigurasi heater saja cenderung memiliki kerugian tekanan paling rendah, sedangkan konfigurasi 2 dan 3 tube bundle menunjukkan kerugian tekanan paling tinggi. Sementara itu, variasi daya pemanas 20 W, 30 W, dan 40 W tidak memberikan pengaruh yang terlalu signifikan terhadap kerugian tekanan dibandingkan pengaruh bilangan Reynolds dan jumlah tube bundle, karena pressure drop lebih dominan ditentukan oleh aspek dinamika aliran dan geometri susunan tabung daripada besarnya daya pemanas.

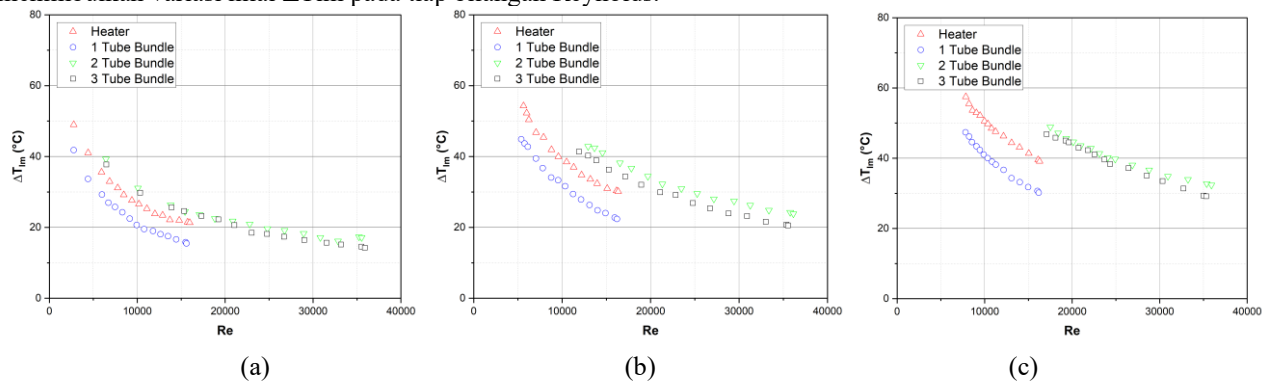


Gambar 5. Kerugian Tekanan Sebagai Fungsi Re Dengan Variasi Daya (a) 20 Watt, (b) 30 Watt, dan (c) 40 Watt

3.2 Perubahan Suhu

Berdasarkan Gambar 6 grafik hubungan ΔT_{lm} terhadap bilangan Reynolds pada variasi daya pemanas 20 W, 30 W, dan 40 W, terlihat bahwa nilai ΔT_{lm} cenderung berubah mengikuti kondisi aliran dan konfigurasi tube bundle yang digunakan. Secara umum, ΔT_{lm} merupakan parameter penting yang menunjukkan besarnya gaya pendorong perpindahan panas pada heat exchanger, sehingga perubahannya dapat menggambarkan sejauh mana efektivitas pertukaran panas terjadi pada setiap kondisi pengujian. Oleh karena itu, grafik ini digunakan untuk melihat pengaruh bilangan Reynolds serta penambahan jumlah tube bundle terhadap karakteristik perpindahan panas pada sistem.

Pada setiap variasi daya, penambahan jumlah tube bundle dari heater saja, 1 tube bundle, 2 tube bundle, hingga 3 tube bundle menunjukkan perubahan ΔT_{lm} yang menandakan adanya peningkatan interaksi antara fluida dengan permukaan perpindahan panas. Semakin banyak tube bundle yang ditambahkan, aliran udara menjadi lebih terganggu sehingga kontak antara fluida dan permukaan tabung semakin intens, yang pada akhirnya memengaruhi besarnya perbedaan temperatur rata-rata logaritmik. Kondisi ini menunjukkan bahwa konfigurasi tube bundle yang lebih banyak dapat memperkuat proses perpindahan panas, meskipun di sisi lain juga dapat memengaruhi karakter aliran dan menimbulkan variasi nilai ΔT_{lm} pada tiap bilangan Reynolds.

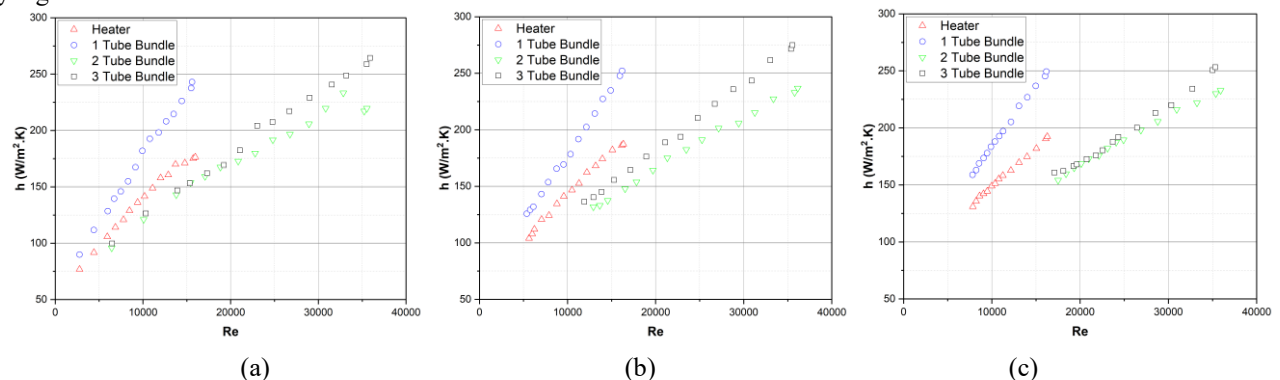


Gambar 6. Selisih Suhu Efektif Rata-Rata Sebagai Fungsi Re Dengan Variasi Daya (a) 20 Watt, (b) 30 Watt, dan (c) 40 Watt.

3.3 Koefisien Perpindahan Panas (h)

Dari Gambar 7 grafik hubungan koefisien perpindahan panas terhadap bilangan Reynolds pada variasi daya pemanas 20 W, 30 W, dan 40 W, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan panas mengalami perubahan yang dipengaruhi oleh kondisi aliran serta konfigurasi tube bundle yang digunakan. Koefisien perpindahan panas merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja heat exchanger karena menunjukkan seberapa efektif panas dapat dipindahkan dari permukaan pemanas ke fluida yang mengalir. Oleh karena itu, grafik ini digunakan untuk melihat pengaruh bilangan Reynolds dan variasi daya pemanas terhadap intensitas perpindahan panas pada masing-masing kondisi pengujian.

Selanjutnya, pada setiap variasi daya, penambahan jumlah tube bundle dari heater saja, 1 tube bundle, 2 tube bundle, hingga 3 tube bundle menunjukkan adanya perubahan nilai koefisien perpindahan panas yang berkaitan dengan meningkatnya interaksi antara fluida dan permukaan perpindahan panas. Semakin banyak tube bundle yang ditambahkan, aliran udara mengalami gangguan yang lebih besar sehingga turbulensi meningkat dan perpindahan panas konveksi menjadi lebih intensif. Kondisi ini menyebabkan koefisien perpindahan panas cenderung mengalami peningkatan pada konfigurasi dengan jumlah tube bundle yang lebih banyak, meskipun pada beberapa titik dapat terjadi fluktuasi akibat perubahan lokal pada pola aliran. Dengan demikian, variasi koefisien perpindahan panas pada setiap konfigurasi dapat digunakan untuk menilai efektivitas heat exchanger dalam mentransfer panas pada kondisi operasi yang berbeda.

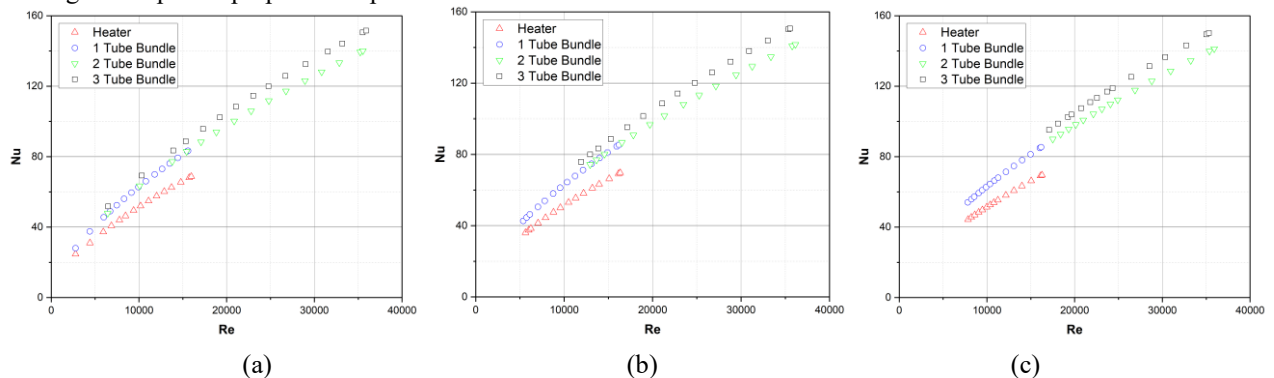


Gambar 7. Koefisien Perpindahan Panas Sebagai Fungsi Re Dengan Variasi Daya (a) 20 Watt, (b) 30 Watt, dan (c) 40 Watt.

3.4 Nusselt Number (Nu)

Berdasarkan grafik bilangan Nusselt terhadap bilangan Reynolds pada variasi daya pemanas 20 W, 30 W, dan 40 W pada Gambar 8, dapat diamati bahwa nilai bilangan Nusselt cenderung mengalami perubahan seiring dengan kondisi aliran dan konfigurasi tube bundle yang digunakan. Bilangan Nusselt merupakan parameter penting dalam analisis perpindahan panas konveksi karena menunjukkan perbandingan antara perpindahan panas konveksi dan konduksi pada fluida. Oleh karena itu, grafik ini digunakan untuk meninjau pengaruh bilangan Reynolds serta variasi daya pemanas terhadap intensitas perpindahan panas pada sistem yang diuji.

Kemudian, pada setiap variasi daya, penambahan jumlah tube bundle dari heater saja, 1 tube bundle, 2 tube bundle, hingga 3 tube bundle menunjukkan adanya perubahan nilai bilangan Nusselt yang berkaitan dengan meningkatnya turbulensi aliran di sekitar permukaan tabung. Semakin banyak tube bundle yang digunakan, gangguan terhadap aliran udara menjadi lebih besar sehingga perpindahan panas konveksi berlangsung lebih intensif. Kondisi ini menyebabkan bilangan Nusselt cenderung meningkat pada konfigurasi dengan jumlah tube bundle yang lebih banyak, meskipun pada beberapa titik dapat terjadi fluktuasi akibat perubahan lokal pada pola aliran. Dengan demikian, variasi bilangan Nusselt pada setiap konfigurasi dapat dijadikan dasar untuk menilai efektivitas heat exchanger dalam meningkatkan proses perpindahan panas.



Gambar 8. Bilangan Nusselt Sebagai Fungsi Re Dengan Variasi Daya (a) 20 Watt, (b) 30 Watt, dan (c) 40 Watt.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai perpindahan panas konveksi paksa pada crossflow heat exchanger dengan menggunakan variasi susunan tube bundle. Kerugian tekanan meningkat seiring bertambahnya tube bundle dan kecepatan aliran. Penurunan tekanan lebih banyak dipengaruhi oleh blockage ratio atau penyempitan luas penampang efektif aliran udara karena bertambahnya jumlah tube bundle secara transversal. Kecepatan aliran udara memiliki pengaruh besar terhadap performa keseluruhan, Dimana nilai h dan Nu meningkat seiring dengan Re . Sementara kemampuan untuk menurunkan suhu pemanas juga semakin baik ditandai dengan selisih suhu (ΔT_{lm}) yang semakin kecil tiap bertambahnya Re . Variasi daya pemanas 20 – 40 W menghasilkan kenaikan suhu pemanas linear dengan koefisien konveksi h meningkat seiring bertambahnya daya pemanas. Namun, konfigurasi pada 35 dan 40 W koefisien konveksi h mengalami penurunan, hal ini karena panas yang dihasilkan cukup tinggi sehingga perbedaan suhu ΔT_{lm} masih cukup tinggi. Sementara untuk Nu nilainya cenderung konstan terhadap perubahan daya pemanas.

5. Daftar Pustaka

- [1] M. K. Dey, N. Parthasarathy, and Y. W. Lee, "Numerical analysis of pressure drop and temperature in a hairpin heat exchanger with different shell and tube bank arrangements," *J. Adv. Mar. Eng. Technol.*, vol. 44, no. 4, pp. 288–297, Aug. 2020, doi: 10.5916/jamet.2020.44.4.288.
- [2] S. Sakib and A. Al-Faruk, "Flow and Thermal Characteristics Analysis of Plate-Finned Tube and Annular-Finned Tube Heat Exchangers for In-Line and Staggered Configurations," *Mech. Mech. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 1407–1418, Dec. 2018, doi: 10.2478/mme-2018-0110.
- [3] T. A. Tahseen, M. M. Rahman, and M. Ishak, "An Experimental Study of Air Flow and Heat Transfer over in-Line Flat Tube Bank," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 9, pp. 1487–1500, Jun. 2014, doi: 10.15282/ijame.9.2014.1.0123.
- [4] I. Rodriguez and A. Campo, "Numerical investigation of forced convection heat transfer from a sphere at low Prandtl numbers," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 184, p. 107970, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107970.
- [5] T. A. Tahseen, M. Ishak, and M. M. Rahman, "An overview on thermal and fluid flow characteristics in a plain plate finned and un-finned tube banks heat exchanger," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 363–380, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.070.
- [6] T. L. Bergman and F. P. Incropera, Eds., *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [7] F. P. Incropera and F. P. Incropera, Eds., *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.

-
- [8] M. Yuan *et al.*, “Performance study of spiral finned tubes on heat transfer and wake flow structure,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 196, p. 123278, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123278.
- [9] O. Quraan, H. Maaitah, A. S. Alsabagh, M. Elayyan, and H. M. Duwairi, “Fluid flow and heat transfer characteristics of Williamson fluids flowing in saturated porous media,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 15, no. 2, p. 16878132231157159, Feb. 2023, doi: 10.1177/16878132231157159.
- [10] H. Yang, B. Tang, Y. Tian, and W. Tan, “Dynamic load characteristics and wake vortex structure of spiral finned cylinders in cross-flow,” *Chin. J. Chem. Eng.*, vol. 82, pp. 105–115, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.cjche.2025.02.009.