MeKanik, Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Mesin *Vol.19, No.1 Mei 2026*
e-ISSN: 3046-8272, p-ISSN: 1979-0708 **(Hal: 1-7)**
Alamat Redaksi : Politeknik Negeri Samarinda, Jurusan Teknik Mesin, Jl.Ciptomangunkusumo Kampus Gg.Lipan Samarinda Kalimantan Timur

PERBANDINGAN KINERJA ALIRAN BERLAWANAN DAN SEARAH PADA HEAT EXCHANGER SHELL AND TUBE TYPE SKALA LABORATORIUM

Comparison Of Countercurrent And Uni-Direction Flow Performance In A Laboratory-Scale Shell And Tube Type Heat Exchanger

Suwarto[1], Hidayat[2], Muhammad Zaid Abdullah[3], Bagus Faturozi[4], Agustyawan[5], Juardy Pratama Mathius[6], Wahyu Setiawan[7]

[1,2] Dosen Jurusan Teknik Mesin, Prodi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Samarinda,
[,3,4,5.6.7] Mahasiswa, Prodi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Samarinda,
Jl.Dr.Ciptomangunkusumo Kampus Gunung Lipan, Samarinda Seberang, Kota Samarinda
e-mail: [1]suwarto@polnes.ac.id , [2]hidayat@polnes.ac.id ,[3]muhammadzaidabdullah05@gmail.com ,
[4]bagus12@polnes.ac.id , [5]agus_s436@polnes.ac.id

Info Artikel

Riwayat Artikel:
Diterima: 09/03/2026
Diterima dalam bentuk revisi: 20/04/2026
Diteima/publis: 25/05/2026

Kata Kunci :
Heat Exchanger, Shell And Tube, Aliran Berlawanan, Aliran Searah, Perpindahan Panas.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja pola aliran searah (*parallel flow*) dan berlawanan (*counter flow*) pada heat exchanger tipe shell and tube skala laboratorium. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan memanfaatkan air sebagai fluida panas maupun fluida dingin. Variabel utama yang diamati meliputi temperatur masuk dan keluar fluida panas serta fluida dingin, waktu operasi, serta efektivitas perpindahan panas yang dianalisis menggunakan pendekatan *Log Mean Temperature Difference (LMTD)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi aliran berlawanan menghasilkan kinerja perpindahan panas lebih baik dibandingkan dengan aliran searah. Hal ini ditunjukkan oleh temperatur keluar fluida panas yang lebih rendah (68,9°C dibandingkan 70,7°C) dan temperatur keluar fluida dingin yang lebih tinggi (44,1°C dibandingkan 41,9°C). Meskipun waktu perpindahan panas pada aliran berlawanan lebih lama (5,61 menit) dibandingkan searah (4,55 menit), efektivitas perpindahan panas pada konfigurasi aliran berlawanan tetap lebih tinggi. Dengan demikian, pola aliran berlawanan direkomendasikan sebagai konfigurasi yang lebih efisien dalam meningkatkan performa heat exchanger tipe shell and tube, baik sebagai media pembelajaran maupun untuk aplikasi industri skala kecil.

Abstract

This study aims to compare the performance of parallel flow and counter flow configurations in a laboratory-scale shell and tube heat exchanger. The experimental method was carried out using water as both the hot and cold fluids. The main observed variables include the inlet and outlet temperatures of the hot and cold fluids, operating time, and heat transfer effectiveness, analyzed using the Log Mean Temperature Difference (LMTD) approach. The results indicate that the counter flow configuration provides better heat transfer performance compared to the parallel flow. This is shown by a lower outlet temperature of the hot fluid (68.9°C compared to 70.7°C) and a higher outlet temperature of the cold fluid (44.1°C compared to 41.9°C). Although the heat transfer process in the counter flow configuration takes longer (5.61 minutes) than in the parallel flow (4.55 minutes), the overall effectiveness remains higher. Therefore, the counter flow configuration is recommended as a more efficient arrangement to improve the performance of shell and tube heat exchangers, both as an educational learning medium and for small-scale industrial applications.

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

PENDAHULUAN

Perpindahan panas (*heat transfer*) merupakan aspek fundamental dalam rekayasa termal yang berkaitan dengan perpindahan energi akibat perbedaan temperatur antar media[1], [2]. Pada aplikasi praktis seperti heat exchanger shell-and-tube, dua konfigurasi aliran berlawanan (counterflow) dan searah (parallel flow) mempengaruhi kinerja alat secara signifikan [3], [4].

Dalam aliran searah, fluida panas dan dingin bergerak sepanjang pelat tukar dalam arah yang sama, menyebabkan *temperature difference* yang menurun secara progresif sepanjang elemen tukar sehingga efisiensi perpindahan panasnya tergolong lebih rendah [5],[6]. Sebaliknya, konfigurasi aliran berlawanan tetap mempertahankan selisih temperatur yang lebih besar di sepanjang permukaan tukar, meningkatkan *log mean temperature difference (LMTD)* dan efektivitas perpindahan panas secara keseluruhan [7], [8] .

Pentingnya memahami dan membandingkan kedua konfigurasi ini menjadi sangat relevan pada skala laboratorium untuk mendidik pemahaman konsep termodinamis dan perilaku perpindahan panas dalam desain heat exchanger shell-and-tube [9], [10]. Berbekal pendekatan eksperimental, perbandingan antar aliran tersebut membuka wawasan praktis mengenai perbedaan laju perpindahan panas, koefisien perpindahan panas (*heat duty*), serta efektivitas alat informasi yang sangat berguna dalam merancang dan memilih sistem pendinginan atau pemanasan dalam skala industri maupun pendidikan [11], [12].

TINJAUAN PUSTAKA

Heat exchanger atau alat penukar kalor merupakan perangkat yang berfungsi memindahkan energi panas antara dua fluida yang berbeda temperatur tanpa mencampurkan keduanya secara langsung [13], [14].Jenis shell and tube heat exchanger merupakan salah satu yang paling banyak digunakan di industri karena strukturnya sederhana, kapasitas perpindahan panas besar, serta kemudahan perawatan prinsip dasar perpindahan panas dalam heat exchanger melibatkan mekanisme konduksi melalui dinding pemisah dan konveksi pada sisi fluida, yang kemudian dianalisis dengan pendekatan Log Mean Temperature Difference (LMTD) atau Effectiveness-NTU [15], [16].

Dalam heat exchanger shell and tube type, konfigurasi aliran dapat berupa sejajar (parallel flow) maupun berlawanan (counter flow)[6], [15]. Pada aliran sejajar, kedua fluida masuk dari sisi yang sama dan mengalir ke arah yang sama, sehingga perbedaan temperatur rata-rata logaritmik relatif lebih kecil. Sebaliknya, pada aliran berlawanan, kedua fluida bergerak dalam arah berlawanan sehingga efisiensi perpindahan panasnya lebih tinggi [17], [10].

Karakteristik perpindahan panas pada *shell and tube heat exchanger* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti konfigurasi arah aliran fluida, laju aliran, luas permukaan perpindahan panas, serta desain konstruksi alat [18]. Perbedaan arah aliran fluida menyebabkan perbedaan distribusi temperatur sepanjang alat penukar kalor sehingga mempengaruhi nilai *Log Mean Temperature Difference*(LMTD), efektivitas perpindahan panas, dan koefisien perpindahan panas total [19]. Selain itu, peningkatan laju aliran fluida juga dapat meningkatkan turbulensi aliran yang berdampak pada meningkatnya laju perpindahan panas, meskipun pada kondisi tertentu dapat menyebabkan kenaikan *pressure drop* pada system [15]. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi aliran yang tepat menjadi faktor penting dalam meningkatkan performa termal heat exchanger [15], [20].

Pada konfigurasi *parallel flow*, fluida panas dan fluida dingin bergerak searah sehingga perbedaan temperatur antar fluida akan semakin kecil sepanjang lintasan aliran [5], [20].Kondisi ini menyebabkan kemampuan perpindahan panas cenderung menurun pada bagian akhir alat penukar kalor [17]. Sebaliknya, konfigurasi *counter*

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

flow mampu mempertahankan selisih temperatur antar fluida secara lebih stabil sehingga proses perpindahan panas berlangsung lebih efektif. Dengan distribusi temperatur yang lebih merata, konfigurasi aliran berlawanan umumnya menghasilkan efektivitas perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi aliran sejajar [9], [20].

Berdasarkan karakteristik tersebut, penelitian mengenai perbandingan konfigurasi *parallel flow* dan *counter flow* pada *shell and tube heat exchanger* menjadi penting untuk dilakukan, khususnya pada skala laboratorium. Pengujian eksperimental terhadap kedua konfigurasi aliran dapat memberikan pemahaman mengenai pengaruh arah aliran terhadap temperatur keluaran fluida, laju perpindahan panas, dan efektivitas system [21]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam menentukan konfigurasi aliran yang paling optimal untuk meningkatkan performa perpindahan panas pada aplikasi industri maupun sebagai media pembelajaran di laboratorium perpindahan panas.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan menggunakan alat penukar kalor tipe *shell and tube*. Tujuan utama penelitian adalah membandingkan kinerja perpindahan panas antara dua konfigurasi pola aliran, yaitu aliran berlawanan (*counter flow*) dan aliran searah (*parallel flow*). Tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut :

1. Alat dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

a) Shell and tube heat exchanger skala laboratorium.
b) Tangki penampung fluida panas dan fluida dingin.
c) Pompa sirkulasi fluida.
d) Termokopel digital untuk mengukur temperatur fluida masuk dan keluar.
e) Stopwatch untuk mengukur waktu operasi.

Fluida yang digunakan dalam penelitian adalah air sebagai fluida panas maupun fluida dingin, dengan temperatur awal yang diatur sesuai kebutuhan.

2. Prosedur Penelitian
   1) Menyiapkan sistem heat exchanger dengan konfigurasi shell and tube.
   2) Mengatur temperatur awal fluida panas (Th,in) sebesar ±80°C dan temperatur awal fluida dingin (Tc,in) sebesar ±32°C.
   3) Mengalirkan kedua fluida dengan dua pola aliran berbeda, yaitu aliran searah (parallel flow) dan aliran berlawanan (counter flow).
   4) Mencatat temperatur masuk dan keluar fluida panas (Th,in dan Th,out) serta fluida dingin (Tc,in dan Tc,out) pada masing-masing pola aliran.
   5) Mengukur waktu operasi yang dibutuhkan sampai kondisi steady tercapai.
   6) Melakukan pengulangan percobaan sebanyak tiga kali untuk memperoleh data yang lebih akurat.
3. Teknik Analisis Data

Data hasil pengukuran kemudian dianalisis dengan langkah-langkah berikut :

a) Menghitung perubahan temperatur fluida panas dan fluida dingin pada masing-masing pola aliran.
b) Membandingkan efektivitas perpindahan panas berdasarkan perbedaan temperatur keluar fluida pada kedua konfigurasi.
c) Menghitung persentase perbedaan temperatur serta waktu operasi antara aliran berlawanan dan searah.
d) Menganalisis efektivitas sistem menggunakan pendekatan *log mean temperature difference* (LMTD).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan pengujian kinerja alat penukar kalor dengan dua jenis pola aliran, yaitu aliran berlawanan (counter flow) dan aliran searah (parallel flow). Data hasil pengukuran temperatur masuk dan keluar fluida panas ($T_{h,in}$ dan $T_{h,out}$) serta fluida dingin ($T_{c,in}$ dan $T_{c,out}$), ditampilkan pada Tabel 1.

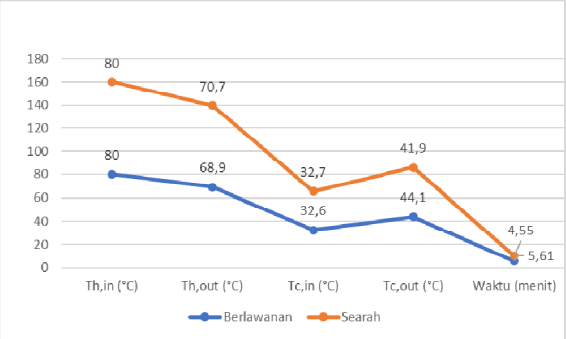
@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

Tabel 1. Hasil Pengujian

ALIRAN SEARAH									
No.	Debit Hot		Debit Cold		Pompa Panas		Pompa Dingin		Waktu (t)
	Gpm	Lpm	Gpm	Lpm	Th,in	Th,out	Tc,in	Tc,out	
1	2,3	10	1,25	5	80°C	69,2°C	32,3°C	43°C	5,23
2	2,3	10	1,25	5	80°C	70,1°C	32,9°C	42,8°C	4,32
3	2,3	10	1,25	5	80°C	72,9°C	32,9°C	40°C	4,1
AVARAGE					**80°C**	**70,7°C**	**32,7°C**	**41,9°C**	**4,55**

ALIRAN BERLAWANAN									
No.	Debit Hot		Debit Cold		Pompa Panas		Pompa Dingin		Waktu (t)
	Gpm	Lpm	Gpm	Lpm	Th,in	Th,out	Tc,in	Tc,out	
1	2,3	10	1,25	5	80°C	67,5°C	33°C	45,5°C	6,12
2	2,3	10	1,25	5	80°C	67,9°C	31,9°C	44°C	5,49
3	2,3	10	1,25	5	80°C	69,9°C	32,9°C	43°C	5,23
AVARAGE					**80°C**	**68,4°C**	**32,6°C**	**44,1°C**	**5,61**

Pada Tabel 1 ditunjukkan hasil pengujian penukar kalor dengan menggunakan variasi laju aliran fluida panas sebesar 10 liter per menit (lpm) dan fluida dingin sebesar 5 liter per menit (lpm). Kedua variasi laju aliran ini diterapkan baik pada konfigurasi aliran searah (parallel flow) maupun aliran berlawanan (counter flow) untuk mengetahui perbedaan kinerja perpindahan panas.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Temperatur dan waktu heat exchanger shell and tube type pada aliran searah dan berlawanan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pola aliran berlawanan (counter flow) memiliki kinerja perpindahan panas lebih baik dibandingkan aliran searah (parallel flow). Pada fluida panas, temperatur keluar aliran berlawanan lebih rendah (68,9°C) dibandingkan searah (70,7°C), menandakan pelepasan kalor lebih optimal. Sebaliknya, pada fluida dingin, temperatur keluar aliran berlawanan lebih tinggi (44,1°C) dibandingkan searah (41,9°C), sehingga penyerapan kalor lebih efektif.

Meskipun waktu yang dibutuhkan pada aliran berlawanan lebih lama (5,61 menit) dibandingkan searah (4,55 menit), konfigurasi ini tetap lebih unggul. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan temperatur rata-rata logaritmik (log mean temperature difference/LMTD) yang lebih besar pada aliran berlawanan, sehingga laju perpindahan panas meningkat. Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa aliran berlawanan lebih efektif digunakan untuk meningkatkan efisiensi heat exchanger.

Selain perbedaan temperatur keluaran fluida, efektivitas perpindahan panas pada kedua konfigurasi aliran juga dipengaruhi oleh distribusi temperatur sepanjang permukaan perpindahan panas. Pada konfigurasi aliran berlawanan (*counter flow*), selisih temperatur antara fluida panas dan fluida dingin dapat dipertahankan lebih stabil dari sisi masuk hingga keluar alat. Kondisi ini menyebabkan proses perpindahan panas berlangsung lebih kontinu sehingga jumlah kalor yang ditransfer menjadi lebih besar. Sebaliknya, pada aliran searah (*parallel flow*), perbedaan temperatur cenderung menurun dengan cepat karena kedua fluida bergerak ke arah yang sama, sehingga kemampuan perpindahan panas berkurang pada bagian akhir alat penukar kalor. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Oni dkk. [7] dan Magazoni dkk. [8] yang menyatakan bahwa konfigurasi *counter flow* menghasilkan efektivitas termal lebih tinggi dibandingkan *parallel flow*.

Perbedaan performa perpindahan panas tersebut juga dapat diamati dari kecenderungan perubahan temperatur fluida dingin. Pada aliran berlawanan, temperatur keluar fluida dingin mengalami peningkatan yang lebih besar dibandingkan aliran searah. Hal ini menunjukkan bahwa energi panas yang dilepaskan fluida panas mampu diserap lebih optimal oleh fluida dingin. Dengan meningkatnya penyerapan kalor pada sisi fluida dingin, maka efisiensi kerja heat exchanger turut meningkat. Fenomena ini menunjukkan bahwa arah aliran fluida memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi energi panas di dalam sistem shell and tube heat exchanger.

Selain itu, waktu operasi yang lebih lama pada konfigurasi aliran berlawanan menunjukkan bahwa proses pertukaran kalor berlangsung lebih intensif. Walaupun membutuhkan waktu lebih besar untuk mencapai kondisi stabil (*steady state*), konfigurasi ini mampu menghasilkan

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

perpindahan panas yang lebih efektif. Kondisi tersebut terjadi karena gradien temperatur antara kedua fluida tetap terjaga sepanjang lintasan aliran, sehingga proses konveksi panas berlangsung secara optimal. Hasil ini memperlihatkan bahwa peningkatan waktu kontak antara fluida panas dan fluida dingin dapat memberikan kontribusi positif terhadap besarnya kalor yang dipindahkan pada heat exchanger.

Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi aliran berlawanan lebih sesuai diterapkan pada sistem heat exchanger yang membutuhkan efektivitas perpindahan panas tinggi, baik untuk kebutuhan laboratorium maupun aplikasi industri skala kecil. Penggunaan konfigurasi *counter flow* mampu meningkatkan performa termal alat tanpa perlu melakukan modifikasi konstruksi yang kompleks. Oleh karena itu, pemilihan pola aliran menjadi salah satu faktor penting dalam perancangan dan pengoperasian shell and tube heat exchanger agar diperoleh efisiensi perpindahan panas yang optimal.

KESIMPULAN

Dari penelitian dan pengujian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Pola aliran berlawanan (counter flow) lebih efektif dalam perpindahan panas dibandingkan aliran searah (parallel flow).
2. Temperatur keluar fluida panas pada aliran berlawanan lebih rendah, menunjukkan pelepasan kalor lebih optimal.
3. Temperatur keluar fluida dingin pada aliran berlawanan lebih tinggi, menandakan penyerapan kalor lebih baik.
4. Waktu perpindahan panas pada aliran berlawanan lebih lama, namun sebanding dengan peningkatan efektivitas.
5. Secara keseluruhan, konfigurasi aliran berlawanan lebih direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi heat exchanger.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. A. Marzouk, M. M. Abou Al-Sood, E. M. S. El-Said, M. M. Younes, and M. K. El-Fakharany, “A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers,” *J. Therm. Anal. Calorim. 2023 14815*, vol. 148, no. 15, pp. 7539–7578, May 2023, doi: 10.1007/S10973-023-12265-3.

[2] Y. Wang, H. Li, S. Zhao, W. Chen, and G. Zhou, “Flow pattern and Vortex mechanisms on heat transfer performance in shell-and-tube heat exchangers,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 167, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109249.

[3] A. Shalsa, B. Wardhani, A. T. Labumay, and E. Ningsih, “Influence of Fluid Inflow Rate on Performance Effectiveness of Shell and Tube Type Heat Exchanger,” *J. Mech. Eng. Sci. Innov.*, vol. 2, no. 1, pp. 9–15, May 2022, doi: 10.31284/J.JMESI.2022.V2I1.2993.

[4] F. Achmad *et al.*, “Efek laju alir dan arah aliran terhadap analisis performa alat penukar panas tipe shell and tube heat exchanger menggunakan SCADA,” *J. Rekayasa Proses*, vol. 17, no. 2, pp. 148–157, Dec. 2023, doi: 10.22146/JREKPROS.77376.

[5] F. C. Magazoni, L. Cabezas-Gómez, P. F. Alvariño, and J. M. Sáiz-Jabardo, “Closed form relationships of temperature effectiveness of cross-flow heat exchangers,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 9, pp. 110–120, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.TSEP.2018.11.005.

[6] H. Küçük, M. S. Yılmaz, and M. Ünverdi, “An experimental comparative assessment of the effects of Minichannel and flow

arrangements in a shell and tube heat exchanger," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 168, p. 109520, Nov. 2025, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2025.109520.

[7] T. O. Oni, A. A. Ojo, D. C. Uguru-Okorie, and D. O. Akindele, "Thermal Analysis of the Effects of Multifaceted Conditions on Performance of Shell-and-Tube Heat Exchanger," *Eur. J. Eng. Technol. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 69–75, 2021.

[8] F. C. Magazoni, L. Cabezas-Gómez, P. F. Alvariño, and J. M. Saiz-Jabardo, "Thermal performance of one-pass shell-and-tube heat exchangers in counter-flow," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 869–883, 2019, doi: 10.1590/0104-6632.20190362S20180424.

[9] S. Sameer, S. B. Prakash, and G. Narayana Swamy, "Effectiveness study in shell and tube heat exchanger at various concentrations of CuO nanofluid for parallel flow," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 235, no. 24, pp. 7951–7962, Dec. 2021, doi: 10.1177/09544062211000787.

[10] J. Chen, P. Zhao, Q. Wang, and M. Zeng, "Experimental Investigation of Shell-Side Performance and Optimal Design of Shell-and-Tube Heat Exchanger with Different Flower Baffles," *Heat Transf. Eng.*, vol. 42, no. 7, pp. 613–626, 2021, doi: 10.1080/01457632.2020.1716485.

[11] A. R. Al-darraji, S. A. Marzouk, A. Aljabr, F. A. Almehmadi, S. Alqaed, and A. Kaood, "Enhancement of heat transfer in a vertical shell and tube heat exchanger using air injection and new baffles: Experimental and numerical approach," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 236, p. 121493, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.121493.

[12] A. S. Kasumu, N. N. Nassar, and A. K. Mehrotra, "A heat-transfer laboratory experiment with shell-and-tube condenser," *Educ. Chem. Eng.*, vol. 19, pp. 38–47, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.ECE.2017.03.002.

[13] S. Han, X. Li, Z. Liu, B. Zhang, C. He, and Q. Chen, "Thermal-economic optimization design of shell and tube heat exchanger using an improved sparrow search algorithm," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 45, p. 102085, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.TSEP.2023.102085.

[14] S. Sanaye and H. Hajabdollahi, "Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 1937–1945, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.04.018.

[15] C. Yu, T. Cheng, J. Chen, Z. Ren, and M. Zeng, "Investigation on thermal-hydraulic performance of parallel-flow shell and tube heat exchanger with a new type of anti-vibration baffle and wire coil using RSM method," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 138, pp. 351–366, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.IJTHERMALSCI.2018.12.035.

[16] M. Prończuk and A. Krzanowska, "Experimental Investigation of the Heat Transfer and Pressure Drop inside Tubes and the Shell of a Minichannel Shell and Tube Type Heat Exchanger," *Energies 2021, Vol. 14, Page 8563*, vol. 14, no. 24, p. 8563, Dec. 2021, doi: 10.3390/EN14248563.

[17] S. Kallannavar, S. Mashyal, and M. Rajangale, "Effect of tube layout on

the performance of shell and tube heat exchangers," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 263–267, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.10.151.

[18] H. Li and V. Kottke, "Analysis of local shellside heat and mass transfer in the shell-and-tube heat exchanger with disc-and-doughnut baffles," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 18, pp. 3509–3521, Sep. 1999, doi: 10.1016/S0017-9310(98)00368-8.

[19] A. Al Afgani, C. Zaidar, W. Saputra Sigalingging, Sukarman, K. Khoirudin, and A. Abdulah, "Evaluating the Thermal Performance of Shell-and-Tube Heat Exchangers: The Role of Flow Rate in Water-Based Systems," *J. Tek. Mesin Mech. Xplore*, vol. 5, no. 1, pp. 38–49, Sep. 2024, doi: 10.36805/JTMMX.V5I1.6129.

[20] B. Masoumpour, M. Ataeizadeh, H. Hajabdollahi, and M. Shafiey Dehaj, "Performance evaluation of a shell and tube heat exchanger with recovery of mass flow rate," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 123, pp. 153–165, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JTICE.2021.05.022.

[21] H. Küçük, M. S. Yılmaz, and M. Ünverdi, "An experimental comparative assessment of the effects of Minichannel and flow arrangements in a shell and tube heat exchanger," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 168, p. 109520, Nov. 2025, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2025.109520.