

Studi Literatur Review Desain Dan Fluida Kerja Pada *Shell And Tube Heat Exchanger*

Nor Fajri^{1*}, Yudistira Anugrahadi Wiraputra², Fredi Insan Nurfadli³, Fisika Prasetyo Putra⁴

¹Jurusan Teknik Mesin, Proses Manufaktur, Politeknik Negeri Bandung, Bandung Barat, Indonesia

^{2,3}Jurusan Teknik Mesin, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung Barat, Indonesia

⁴Fakultas Teknik, Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta, Jakarta, Indonesia

Email: ^{1*}nor.fajri@polban.ac.id, ²yudistira.wiraputra@polban.ac.id, ³fredi.nurfadli@polban.ac.id,

⁴fisika.prasetyo@uta45jakarta.ac.id

(* : coresponding author : nor.fajri@polban.ac.id)

Abstrak - *Shell and Tube Heat Exchanger* merupakan jenis penukar kalor yang paling luas digunakan pada industri proses, energi, dan manufaktur karena keandalan struktural serta fleksibilitas operasionalnya. Namun, berbagai penelitian menunjukkan bahwa desain konvensional masih menghadapi keterbatasan dalam mencapai kinerja perpindahan panas yang tinggi dengan kerugian tekanan yang terkendali. Artikel ini bertujuan untuk mereview secara kritis pendekatan peningkatan performa *Shell and Tube Heat Exchanger* melalui modifikasi desain dan pemilihan fluida kerja. Metode dilakukan menggunakan pendekatan semi-sistematis terhadap studi eksperimental, numerik, dan review terdahulu yang membahas inovasi baffle, variasi geometri tube, penerapan porous media, metode peningkatan pasif, serta penggunaan nanofluida. Hasil menunjukkan bahwa modifikasi desain, khususnya pada baffle dan geometri tube, mampu meningkatkan kinerja perpindahan panas hingga 20–40% dibandingkan konfigurasi konvensional. Pendekatan peningkatan pasif dan porous media memperkuat pencampuran aliran dan intensitas turbulensi, namun sering diikuti peningkatan kerugian tekanan hingga 15–60%. Penggunaan nanofluida dan hybrid nanofluida dilaporkan meningkatkan kinerja termal hingga 25–35%, dengan keterbatasan utama pada peningkatan viskositas fluida dan kebutuhan daya pompa. Peningkatan performa STHE memerlukan pendekatan terpadu yang mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan perpindahan panas dan efisiensi hidrodinamik. Integrasi modifikasi desain dan rekayasa fluida kerja berpotensi menghasilkan sistem yang lebih optimal dan aplikatif.

Kata Kunci: *Shell and Tube Heat Exchanger*, Review, Modifikasi Desain, Fluida Kerja, Perpindahan Panas, Optimasi Termal

Abstract - *Shell and Tube Heat Exchanger s* are the most widely used type of heat exchanger in the process, energy, and manufacturing industries due to their structural reliability and operational flexibility. However, various studies show that conventional designs still face limitations in achieving high heat transfer performance with controlled pressure losses. This article aims to critically review approaches to improving the performance of *Shell and Tube Heat Exchanger s* through design modifications and working fluid selection. The method used a semi-systematic approach to experimental studies, numerical studies, and previous reviews discussing baffle innovations, tube geometry variations, the application of porous media, passive enhancement methods, and the use of nanofluids. The results show that design modifications, particularly to the baffles and tube geometry, can improve heat transfer performance by 20–40% compared to conventional configurations. Passive enhancement and porous media approaches enhance flow mixing and turbulence intensity, but are often accompanied by an increase in pressure loss of up to 15–60%. The use of nanofluids and hybrid nanofluids was reported to improve thermal performance by 25–35%, with the main limitations being increased fluid viscosity and pump power requirements.

Keywords: *Shell and Tube Heat Exchanger* , Review, Design Modification, Working Fluid, Heat Transfer, Thermal Optimization

1. PENDAHULUAN

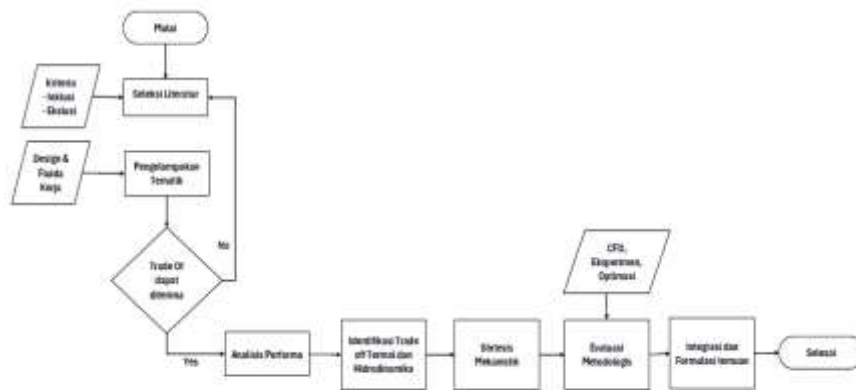
Shell and Tube Heat Exchanger (STHE) merupakan salah satu jenis penukar kalor yang paling luas digunakan dalam industri proses, pembangkit energi, dan petrokimia karena konstruksinya yang kokoh serta kemampuannya beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi (Saffarian et al., 2019). Meskipun demikian, berbagai studi menunjukkan bahwa konfigurasi konvensional dengan segmental *baffle* masih menghadapi keterbatasan dalam distribusi aliran sisi shell dan efisiensi perpindahan panas (Abbasion Arani & Moradi, 2019; Mohammadi et al., 2020).

Upaya peningkatan performa STHE banyak difokuskan pada modifikasi desain, seperti penggunaan *baffle* non-konvensional, *porous baffle*, serta variasi geometri *tube* untuk meningkatkan turbulensi dan memperbaiki distribusi aliran (Abbasian Arani & Moradi, 2019; Mohammadi et al., 2020). Selain itu, metode peningkatan pasif seperti *twisted tape* dan *insert vortex generator* dilaporkan mampu meningkatkan bilangan Nusselt melalui gangguan lapisan batas aliran (Córcoles et al., 2020; Saffarian et al., 2019).

Di sisi lain, pendekatan berbasis fluida kerja berkembang melalui penggunaan nanofluida dan *hybrid* nanofluida yang bertujuan meningkatkan konduktivitas termal efektif fluida (Bouselsal et al., 2023; Perumal, Venkatraman, et al., 2022). Meskipun peningkatan performa termal tercapai, sebagian penelitian melaporkan kenaikan viskositas yang berdampak pada peningkatan *pressure drop* (Córcoles et al., 2020; Plant & Saghir, 2021).

Perkembangan penelitian terkini menunjukkan kecenderungan penggunaan simulasi numerik berbasis *computational fluid dynamics* (CFD) serta metode optimasi multi-parameter untuk mencapai keseimbangan antara performa termal dan karakteristik hidrodinamik (Perumal, Sundaresan, et al., 2022; Sohrabi et al., 2024). Namun, kajian yang mengintegrasikan secara komprehensif pendekatan modifikasi desain dan rekayasa fluida kerja dalam satu sintesis analitis masih terbatas.

2. METODE



Gambar 1. Diagram Alir

Penelitian ini disusun dalam bentuk *literatur review* yang mengintegrasikan analisis tematik, komparatif, dan evaluatif terhadap pendekatan peningkatan performa *Shell and Tube Heat Exchanger* (STHE). Alur metodologi mengikuti tahapan seleksi literatur, pengelompokan tematik, analisis performa, evaluasi *trade-off* termo-hidrodinamik, sintesis mekanisme fisik, serta integrasi temuan.

Tabel 1. Ringkasan Tema dan Karakteristik Literatur yang Direview

No.	Fokus Kajian	Ruang Lingkup Penelitian	Metode Penelitian
1	Desain dasar STHE	Prinsip desain, konfigurasi konvensional, parameter termal	Review analitis
2	Modifikasi baffle	Segmental, <i>disk</i> , <i>combined</i> , <i>porous baffle</i>	CFD, eksperimen, optimasi
3	Geometri tube	<i>Corrugated tube</i> , <i>ribbed tube</i> , <i>non-sirkular</i> , <i>tube bundle</i>	Eksperimen, CFD

4	Porous media	<i>Porous baffle</i> dan media berpori pada sisi shell	Simulasi numerik, optimasi
5	Metode peningkatan pasif	<i>Twisted tape</i> , <i>perforated insert</i> , <i>vortex generator</i>	Eksperimen, numerik
6	Nanofluida	Al ₂ O ₃ , CNT, nanofluida konsentrasi tinggi	Eksperimen, numerik
7	Hybrid nanofluida	Al ₂ O ₃ -MWCNT dan fluida hibrida	Eksperimen, numerik
8	Optimasi dan CFD	DOE, ANN, GA, optimasi multi-objektif	CFD, kecerdasan buatan
9	Konfigurasi non-konvensional	<i>Tube arrangement</i> , <i>compact heat exchanger</i>	Eksperimen, numerik

2.1 Seleksi Literatur

Tahap awal dilakukan melalui seleksi literatur berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Literatur yang dipilih merupakan penelitian yang membahas peningkatan performa STHE melalui modifikasi desain maupun rekayasa fluida kerja, baik berbasis eksperimen, simulasi numerik, maupun studi optimasi (Mohammadi et al., 2020; Silaipillayarputhur & Khurshid, 2019).

Kriteria inklusi mencakup penelitian yang melaporkan parameter performa termal dan/atau hidrodinamik secara kuantitatif, seperti koefisien perpindahan panas, bilangan Nusselt, heat transfer rate, dan pressure drop (Abbasian Arani & Moradi, 2019; Perumal, Venkatraman, et al., 2022). Literatur yang tidak membahas mekanisme perpindahan panas atau tidak relevan dengan konfigurasi STHE tidak disertakan.

2.2. Sumber Data dan Ruang Lingkup Literatur

Literatur terseleksi kemudian dikelompokkan ke dalam dua tema utama, yaitu:

1. Pendekatan Modifikasi Desain, meliputi inovasi *baffle*, *porous media*, variasi geometri *tube*, serta metode peningkatan pasif seperti *twisted tape* dan *vortex generator* (Nakhchi et al., 2020; Saffarian et al., 2019).
2. Pendekatan Fluida Kerja, meliputi penggunaan nanofluida dan *hybrid nanofluida* sebagai strategi peningkatan konduktivitas termal efektif (Bouselsal et al., 2023; Plant & Saghir, 2021).

2.3. Analisis Performa

Setiap studi dianalisis berdasarkan peningkatan performa relatif dibandingkan konfigurasi konvensional. Analisis difokuskan pada perubahan *heat transfer rate*, koefisien perpindahan panas, serta kerugian tekanan sebagai indikator utama performa termo-hidrodinamik (Abbasian Arani & Moradi, 2019; Mohammadi et al., 2020). Perbandingan dilakukan dalam konteks kondisi operasi yang dilaporkan masing-masing penelitian untuk menjaga konsistensi interpretasi hasil.

2.4. Identifikasi *Trade-Off* Termal dan Hidrodinamik

Tahap selanjutnya adalah mengevaluasi apakah peningkatan perpindahan panas diikuti oleh kenaikan *pressure drop* yang signifikan. Konsep *trade-off* termo-hidrodinamik digunakan untuk menilai keseimbangan antara peningkatan performa termal dan konsekuensi hidrodinamik (Perumal, Venkatraman, et al., 2022; Tavousi et al., 2023). Pendekatan dinilai efektif apabila peningkatan performa termal tidak disertai penalti tekanan yang berlebihan.

2.5. Sintesis Mekanisme Fisik

Sintesis dilakukan dengan menganalisis mekanisme fisik yang mendasari peningkatan performa. Pada modifikasi desain, peningkatan terjadi akibat redistribusi aliran dan peningkatan turbulensi pada sisi *shell* maupun *tube* (Abbasian Arani & Moradi, 2019; Mohammadi et al., 2020).

Pada pendekatan fluida kerja, peningkatan disebabkan oleh kenaikan konduktivitas termal efektif akibat dispersi nanopartikel (Bouselsal et al., 2023). Pendekatan ini memungkinkan pemahaman hubungan sebab-akibat antara modifikasi sistem dan perubahan performa.

2.6. Evaluasi Metodologis

Setiap penelitian juga dievaluasi berdasarkan pendekatan metodologisnya, termasuk studi berbasis *computational fluid dynamics* (CFD), eksperimen laboratorium, serta metode optimasi seperti *design of experiments* (DOE) dan pendekatan berbasis kecerdasan buatan (Perumal, Sundaresan, et al., 2022; Sohrabi et al., 2024). Evaluasi ini bertujuan menilai konsistensi model, validasi hasil, dan kedalaman analisis multi-parameter.

2.7. Integrasi dan Formulasi Temuan

Tahap akhir dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh hasil analisis untuk mengidentifikasi pola umum, tren penelitian, serta celah riset dalam pengembangan STHE modern. Integrasi ini menghasilkan pemetaan komprehensif mengenai efektivitas modifikasi desain dan rekayasa fluida kerja dalam meningkatkan performa termo-hidrodinamik.

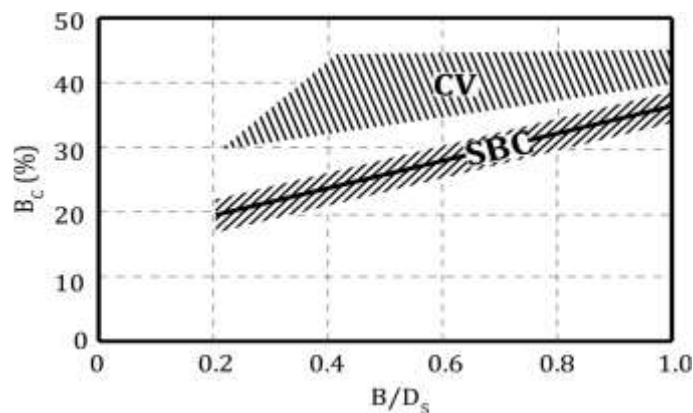
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pendekatan Modifikasi Desain *Shell and Tube Heat Exchanger*

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa modifikasi desain merupakan strategi paling dominan dalam meningkatkan performa *Shell and Tube Heat Exchanger* (STHE). Konfigurasi segmental *baffle* konvensional cenderung menghasilkan zona stagnasi dan distribusi aliran yang kurang merata pada sisi *shell*, sehingga efisiensi perpindahan panas tidak optimal (Silaipillayarputhur & Khurshid, 2019).

Penggunaan *baffle* non-konvensional, seperti *disk baffle* dan *porous baffle*, dilaporkan mampu memperbaiki distribusi aliran serta meningkatkan turbulensi lokal, yang berdampak pada peningkatan koefisien perpindahan panas dibanding konfigurasi standar (Abbasi Arani & Moradi, 2019; Mohammadi et al., 2020). Studi numerik berbasis CFD menunjukkan bahwa optimasi konfigurasi *baffle* dapat meningkatkan performa termal secara signifikan, meskipun disertai kenaikan *pressure drop* yang perlu dikendalikan (Mohammadi et al., 2020).

Selain modifikasi *baffle*, variasi geometri *tube* juga menjadi fokus penelitian. *Tube* dengan permukaan *corrugated* atau penampang non-sirkular mampu mengganggu *boundary layer* dan meningkatkan intensitas turbulensi di dalam *tube*, sehingga meningkatkan laju perpindahan panas (Córcoles et al., 2020; Saffarian et al., 2019). Namun demikian, peningkatan tersebut seringkali diikuti peningkatan resistansi aliran, sehingga diperlukan evaluasi termo-hidrodinamik secara menyeluruh.



Gambar 2. Korelasi Antara *Baffle Cut*, Jarak Antar *Baffle*, dan Ukuran *Shell* Untuk Segmental *Baffle Cut* (SBC) dan Uap Yang Mengalami Kondensasi (CV) berdasarkan metode *Bell-Delaware*. (Mohammadi et al., 2020)

Tabel 2. Data Kuantitatif Variasi *Permeability*

Permeability (m ²)	Heat Transfer Rate Q (kW)	Pressure Drop ΔP (kPa)
10 ⁻⁹	479.15.00	22.45
10 ⁻¹²	337.06.00	30.43.00
10 ⁻¹⁵	336.94	30.45.00

Tabel 3. Data Variasi *Baffle Cut*

Baffle Cut	Heat Transfer Rate (kW)	Pressure Drop (kPa)
25%	468.84	51.74
35%	386.07.00	19.49
50%	298.24.00	12.09

3.2 Penggunaan Nanofluida dan *Hybrid* Nanofluida

Selain modifikasi desain, peningkatan performa STHE juga dilakukan melalui rekayasa fluida kerja. Penggunaan nanofluida berbasis Al₂O₃ dan CNT terbukti meningkatkan konduktivitas termal efektif, sehingga meningkatkan bilangan Nusselt dibanding fluida konvensional (Perumal, Venkatraman, et al., 2022; Plant & Saghir, 2021).

Pengembangan *hybrid* nanofluida, seperti Al₂O₃–MWCNT, menunjukkan potensi peningkatan performa yang lebih tinggi dibanding nanofluida tunggal karena kombinasi sifat termal dan dispersi partikel yang lebih baik (Babar et al., 2024; Bouselsal et al., 2023). Namun demikian, peningkatan viskositas akibat penambahan partikel dapat meningkatkan kebutuhan daya pompa, sehingga analisis performa harus mempertimbangkan keseimbangan termo-hidrodinamik secara komprehensif.

Tabel 4. Kesimpulan Pengaruh Konsentrasi Nanopartikel terhadap Performa Termal

Konsentrasi (vol.%)	Nanopartikel	Heat Transfer Rate (W)	Heat Transfer Coefficient (W/m ² K)
00.05	Al ₂ O ₃	3	1365.12.00
01.00	Al ₂ O ₃	06.08	2458.61
01.05	Al ₂ O ₃	12.04	3365.57.00
02.00	Al ₂ O ₃	19	4025.31.00
02.00	TiO ₂	29.43.00	4253.22.00
02.00	SiO ₂	16.07	3625.23.00
02.00	ZrO ₂	15.47	3710.21.00

Tabel 5. Perubahan Sifat Termofisik akibat Penambahan Nanopartikel

Fluida	μ (kg/m·s)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg·K)	k (W/m·K)	Pr
Water	0.001002	998.02.00	4182	0,425694444	6,48
0.01 Al ₂ O ₃ –Water	0.00107	1024.03.00	4061.09.00	4,390277778	6,9
0.02 Al ₂ O ₃ –Water	0.001189	1050.03.00	3947.07.00	4,540972222	7,18

3.3 Perbandingan Pendekatan Design dan Fluida Kerja

Hasil pembacaan data menunjukkan bahwa modifikasi desain, khususnya variasi *permeability porous baffle* dan *baffle cut*, berpengaruh signifikan terhadap performa termo-hidrodinamik *Shell and Tube Heat Exchanger*. *Permeability* sebesar 10^{-9} m² menghasilkan laju perpindahan panas tertinggi (479,15 kW) dan *pressure drop* terendah (22,45 kPa), sedangkan *permeability* lebih rendah menurunkan *heat transfer* hingga sekitar 337 kW dan meningkatkan *pressure drop* hingga ± 30 kPa. Sementara itu, *baffle cut* 25% menghasilkan *heat transfer* tertinggi (468,84 kW) namun dengan *pressure drop* besar (51,74 kPa), sedangkan *baffle cut* 50% menurunkan *pressure drop* menjadi 12,09 kPa tetapi juga menurunkan *heat transfer* menjadi 298,24 kW. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi desain harus mempertimbangkan keseimbangan antara intensifikasi turbulensi dan kerugian tekanan.

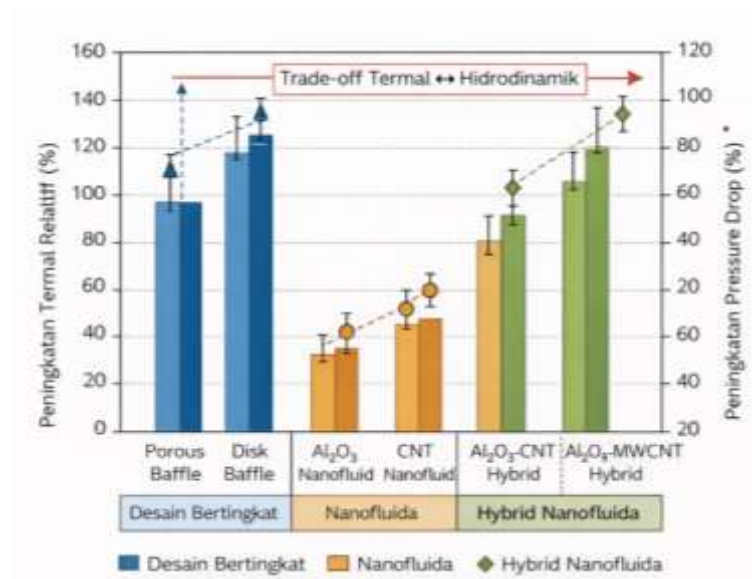
Tabel 6. Perbandingan Dua Pendekatan

Aspek	Modifikasi Desain	Nanofluida	Hybrid
Peningkatan Q	Signifikan	Signifikan	Sangat tinggi
Pengaruh ΔP	Bisa turun (<i>permeability</i>) atau naik (<i>baffle cut</i> kecil)	Naik	Cenderung lebih naik
Kompleksitas	Perubahan mekanis	Perubahan fluida	Kombinasi kompleks
Potensi Optimal	Tinggi	Tinggi	Sangat baik

Tabel 7. Perbandingan Performa Relatif Modifikasi Desain dan Fluida Kerja pada STHE

Metode	Kategori	Peningkatan Termal Relatif (%)	Peningkatan Pressure Drop (%)
<i>Porous Baffle</i>	Desain Bertingkat	95	70
<i>Disk Baffle</i>	Desain Bertingkat	125	85
<i>Al₂O₃ Nanofluid</i>	Nanofluida	35	60
<i>CNT Nanofluid</i>	Nanofluida	45	65
<i>Al₂O₃-CNT Hybrid</i>	Hybrid Nanofluida	90	75
<i>Al₂O₃-MWCNT Hybrid</i>	Hybrid Nanofluida	120	95

Pada pendekatan fluida kerja, peningkatan konsentrasi nanofluida secara konsisten meningkatkan performa termal. Pada 2 vol.%, TiO₂ menghasilkan *heat transfer* tertinggi (29,43 W), diikuti Al₂O₃, SiO₂, dan ZrO₂, dengan koefisien perpindahan panas meningkat lebih dari tiga kali lipat dibanding konsentrasi rendah. Peningkatan ini didukung oleh kenaikan konduktivitas termal fluida, meskipun viskositas juga meningkat dan berpotensi menambah *pressure drop*. *Hybrid* nanofluida Al₂O₃-MWCNT menunjukkan potensi performa lebih tinggi karena konduktivitas MWCNT yang sangat besar, namun tetap memerlukan evaluasi keseimbangan termo-hidrodinamik. Secara keseluruhan, modifikasi desain bekerja melalui rekayasa pola aliran, sedangkan nanofluida dan hybrid melalui peningkatan sifat termofisik, dan integrasi keduanya berpotensi memberikan performa paling optimal.



Gambar 3. Perbandingan Peningkatan Performa

4. KESIMPULAN

1. Modifikasi desain seperti variasi *permeability porous baffle* dan *baffle cut* berpengaruh signifikan terhadap performa termo-hidrodinamik STHE melalui pengaturan distribusi aliran dan intensitas turbulensi.
2. *Permeability* tinggi (10^{-9} m²) menghasilkan peningkatan *heat transfer* yang signifikan sekaligus menurunkan *pressure drop*, sehingga memberikan performa menyeluruh yang lebih optimal dibanding *permeability* rendah.
3. Variasi *baffle cut* menunjukkan adanya *trade-off*; *baffle cut* kecil meningkatkan perpindahan panas tetapi menyebabkan kenaikan *pressure drop* yang besar, sehingga diperlukan optimasi berbasis keseimbangan performa gabungan.
4. Nanofluida tunggal meningkatkan *heat transfer rate* dan koefisien perpindahan panas seiring kenaikan konsentrasi nanopartikel, yang didukung oleh peningkatan konduktivitas termal efektif fluida.
5. Peningkatan konsentrasi nanopartikel juga menyebabkan kenaikan viskositas, yang berpotensi meningkatkan *pressure drop* dan mempengaruhi efisiensi sistem.
6. *Hybrid nanofluida* (Al₂O₃–MWCNT) menunjukkan potensi peningkatan performa paling tinggi karena kombinasi konduktivitas termal yang sangat besar, namun tetap memerlukan evaluasi termo-hidrodinamik secara komprehensif.
7. Tidak terdapat satu pendekatan yang sepenuhnya unggul tanpa konsekuensi; optimasi STHE ideal memerlukan integrasi antara modifikasi desain dan rekayasa fluida kerja dengan mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan perpindahan panas dan efisiensi hidrodinamik.
8. Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada optimasi multi-parameter terpadu dan validasi eksperimental skala industri untuk memastikan implementasi yang andal dan efisien.

REFERENCES

- Abbasian Arani, A. A., & Moradi, R. (2019). *Shell and Tube Heat Exchanger optimization using new baffle and tube configuration. Applied Thermal Engineering, 157*.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113736>

- Babar, H., Wu, H., Zhang, W., Shah, T. R., McCluskey, D., & Zhou, C. (2024). The promise of nanofluids: A bibliometric journey through advanced heat transfer fluids in heat exchanger tubes. *Advances in Colloid and Interface Science*, 325(December 2023), 103112. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103112>
- Basavarajappa, S., Manavendra, G., & Prakash, S. B. (2020). A review on performance study of finned tube heat exchanger. *Journal of Physics: Conference Series*, 1473(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012030>
- Blaszczuk, A., & Jagodzick, S. (2020). Heat transfer characteristic in an external heat exchanger with horizontal tube bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149, 119253. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119253>
- Bouselsal, M., Mebarek-Oudina, F., Biswas, N., & Ismail, A. A. I. (2023). Heat Transfer Enhancement Using Al₂O₃-MWCNT Hybrid-Nanofluid inside a Tube/Shell Heat Exchanger with Different Tube Shapes. *Micromachines*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/mi14051072>
- Córcoles, J. I., Moya-Rico, J. D., Molina, A. E., & Almendros-Ibáñez, J. A. (2020). Numerical and experimental study of the heat transfer process in a double pipe heat exchanger with inner corrugated tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 158(June). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106526>
- Gorobets, V., Bohdan, Y., Trokhaniak, V., & Antypov, I. (2019). Investigations of heat transfer and hydrodynamics in heat exchangers with compact arrangements of tubes. *Applied Thermal Engineering*, 151, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.059>
- Hanan, A., Zahid, U., Feroze, T., & Khan, S. Z. (2023). Analysis of the performance optimisation parameters of Shell and Tube Heat Exchanger using CFD. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 21(3), 830–843. <https://doi.org/10.1080/14484846.2021.1914890>
- Li, Z. zhong, Ding, Y. dong, Liao, Q., Cheng, M., & Zhu, X. (2021). An approach based on the porous media model for numerical simulation of 3D finned-tubes heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 173, 121226. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121226>
- Lotfi, B., & Sundén, B. (2020). Development of new finned tube heat exchanger: Innovative tube-bank design and thermohydraulic performance. *Heat Transfer Engineering*, 41(14), 1209–1231. <https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1637112>
- Mohammadi, M. H., Abbasi, H. R., Yavarinasab, A., & Pourrahmani, H. (2020). Thermal optimization of Shell and Tube Heat Exchanger using porous baffles. *Applied Thermal Engineering*, 170(September 2019), 115005. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115005>
- Nakhchi, M. E., & Esfahani, J. A. (2020). Numerical investigation of heat transfer enhancement inside heat exchanger tubes fitted with perforated hollow cylinders. *International Journal of Thermal Sciences*, 147(September 2019), 106153. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106153>
- Nakhchi, M. E., Hatami, M., & Rahmati, M. (2020). Experimental investigation of heat transfer enhancement of a heat exchanger tube equipped with double-cut twisted tapes. *Applied Thermal Engineering*, 180(August), 115863. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115863>
- Ocloń, P., Łopata, S., Stelmach, T., Li, M., Zhang, J. F., Mzad, H., & Tao, W. Q. (2021). Design optimization of a high-temperature fin-and-tube heat exchanger manifold – A case study. *Energy*, 215, 119059. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119059>
- Pan, A., Lu, L., Cui, P., & Jia, L. (2019). A new analytical heat transfer model for deep borehole heat exchangers with coaxial tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 1056–1065. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.041>
- Perumal, S., Sundaresan, D., Sivanraju, R., Tesfie, N., Ramalingam, K., & Thanikodi, S. (2022). Heat Transfer Analysis in Counter Flow Shell and Tube Heat Exchanger Using Design of Experiments. *Thermal Science*, 26(2), 843–848. <https://doi.org/10.2298/TSCI200531077P>
- Perumal, S., Venkatraman, V., Sivanraju, R., Mekonnen, A., Thanikodi, S., & Chinnappan, R. (2022). Effects of Nanofluids on Heat Transfer Characteristics in Shell and Tube Heat Exchanger. *Thermal Science*, 26(2), 835–841. <https://doi.org/10.2298/TSCI200426076P>
- Plant, R. D., & Saghir, M. Z. (2021). Numerical and experimental investigation of high concentration aqueous alumina nanofluids in a two and three channel heat exchanger. *International Journal of Thermofluids*, 9(2021), 100055. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100055>
- Rezaei, M., Mahidashti, Z., Eftekhari, S., & Abdi, E. (2021). A corrosion failure analysis of heat exchanger tubes operating in petrochemical refinery. *Engineering Failure Analysis*, 119(August 2019), 105011. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105011>
- Saffarian, M. R., Fazelpour, F., & Sham, M. (2019). Numerical study of Shell and Tube Heat Exchanger with different cross-section tubes and combined tubes. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(1), 33–46. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-0297-9>
- Silaipillayarputhur, K., & Khurshid, H. (2019). The design of Shell and Tube Heat Exchanger s – A review. In *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* (Vol. 9, Issue 1, pp. 87–102). <https://doi.org/10.24247/ijmperdfeb201910>
- Sohrabi, N., Hammoodi, K. A., Hammoud, A., Jasim, D. J., Hashemi Karouei, S. H., Kheyri, J., & Nabi, H.

- (2024). Using different geometries on the amount of heat transfer in a *Shell and Tube Heat Exchanger* using the finite volume method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55(January), 104037. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104037>
- Tavousi, E., Perera, N., Flynn, D., & Hasan, R. (2023). Heat transfer and fluid flow characteristics of the passive method in double tube heat exchangers: A critical review. *International Journal of Thermofluids*, 17(January 2023), 100282. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100282>
- Wang, W., Shuai, Y., Li, B., Li, B., & Lee, K. S. (2021). Enhanced heat transfer performance for multi-tube heat exchangers with various tube arrangements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120905. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120905>
- Zheng, N., Yan, F., Zhang, K., Zhou, T., & Sun, Z. (2020). A review on single-phase convective heat transfer enhancement based on multi-longitudinal vortices in heat exchanger tubes. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114475. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114475>