

PENINGKATAN KINERJA TERMAL PENUKAR KALOR PIPA -GANDA TWISTED TURBULATOR ALIRAN BERLWAWAN

Eric Maspaitella¹⁾, Nicolas Titahelu²⁾, Cendy Sophia Edwina Tupamahu³⁾

¹⁾S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Pattimura

Email:ericmas82@gmail.com,

²⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura

Email:titahelunick@gmail.com,

³⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura

Email:tupamahucendy@gmail.com,

Abstrak Pada sistem pembakaran dalam, efisiensi thermal yang bisa dimanfaatkan hanya sekitar 25-30%. Pada mesin pembakaran dalam dengan bahan bakar fosil hanya mampu mengkonversi 35% energi dari total energi masukan, dimana sisanya akan terbuang sebagai limbah panas. Dalam rangka memanfaatkan limbah panas yang terbuang dari suatu mesin pembakaran dalam yakni Genset 5 KV A, maka pada penelitian ini akan dirancang penukar kalor dengan tambahan twisted turbulator. Variasi rasio pitch 0,8 - 3,9 bertujuan untuk mendapatkan laju perpindahan panas yang efektif untuk mengoptimalkan kinerja penukar kalor. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengetahui kinerja penukar kalor dengan twisted turbulator tersebut. Dimana model akan didesain menggunakan material tembaga pada bagian tube bank dan material pipa baja pada bagian casing. Temperatur fluida dingin masuk konstan pada 302 K. Hasil menunjukkan bahwa temperatur udara keluar yang maksimal terjadi pada variasi p/d yang rendah ditunjukkan pada p/d 0,8 dengan temperatur udara keluar sebesar 425,85 K dan temperatur udara keluar terendah terjadi pada variasi p/d 3,9 ditunjukkan dengan temperatur udara keluar sebesar 403,22 K. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan efektivitas penukar kalor tertinggi terjadi pada variasi p/d 0,8 dengan nilai efektivitas mencapai 39,95 %.

Kata kunci: Penukar kalor, twisted turbulator, rasio pitch.

1. PENDAHULUAN

Penukar kalor merupakan perangkat yang digunakan untuk mentransfer energi panas antara dua atau lebih fluida yang dipisahkan oleh material padat. Departemen Energy Amerika Serikat (US DOE) menyatakan bahwa sebanyak 20-50% energi masukan di sektor industri pada akhirnya dibuang sebagai limbah panas dalam beberapa bentuk energi panas. Tingkat konversi energi efektif mesin pembakara konvensional hanya mencapai 35% sedangkan sisanya menjadi limbah panas. Pada sistem pembakaran dalam, efisiensi thermal yang bisa dimanfaatkan hanya sekitar 25-30%, sedangkan sisanya terbuang dalam berbagai bentuk seperti :30-35% terbuang sebagai limbah panas, 30-35% terbuang melalui sistem pendingin, dan 5-10% terbuang akibat gesekan.

Pemanfaatan limbah panas dapat mengurangi penggunaan bahan bakar fosil sehingga akan berdampak baik pada lingkungan. Beberapa model penukar kalor dikembangkan untuk memanfaatkan limbah panas hasil gas buang : tipe pipa sirip H, pipa spiral, pipa pemanas, *shell and tube*, *tube bank*, dan *inner turbulator*. Parameter yang digunakan untuk mengukur kinerja penukar kalor model *inner tube turbulator* antara lain penambahan sirip, variasi geometri, dan model *turbulator*. Pada penelitian ini dirancang penukar kalor

Pipa ganda dengan tambahan *twisted turbulator*, dimana akan divariasikan perbandingan panjang putaran sirip terhadap diameter *tube* (p/d). Hal ini dilakukan untuk mengukur seberapa besar pengaruh p/d *twisted* turbulator terhadap kinerja termal dari penukar panas pipa ganda dan mencari temperatur udara udara dingin keluar yang maksimal.

2. METODE

Waktu penelitian dilaksanakan Juni 2024 sampai selesai pada laboratorium termodinamika dan perpindahan panas fakultas teknik Universitas Pattimura. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengetahui kinerja penukar kalor dengan *twisted turbulator* tersebut.

A. Variabel Penelitian

- Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi perbandingan panjang putaran sirip terhadap diameter tube (p/d).
- Variabel terikat pada penelitian ini adalah karakteristik perpindahan panas konveksi yakni; laju perpindahan panas total (Q).

B. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan metode eksperimen, yaitu penelitian yang dilakukan melalui pengujian langsung pada sistem penukar panas dengan memvariasikan nilai perbandingan panjang putaran sirip terhadap diameter tube (p/d) disebut juga pitch rasio..

a. Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian dilakukan dengan melakukan studi literatur terkait penukar panas dan prinsip perpindahan panas, diikuti dengan penyiapan serta pemeriksaan alat uji penukar panas dan instrumen pengukuran untuk memastikan kondisi alat siap digunakan sebelum pengujian dilakukan.

b. Alat dan Bahan yang digunakan

Untuk menunjang pelaksanaan pengujian dan memperoleh data yang akurat, penelitian ini menggunakan beberapa alat dan bahan yang dijelaskan sebagai berikut:

1) Alat:

- Penukar panas
- Pompa fluida untuk mengalirkan fluida kerja
- Sumber pemanas
- Sensor suhu (termokopel/termometer)
- Flowmeter
- Pipa dan katup pengatur aliran

2) bahan:

- Fluida kerja berupa air
- Alat bantu lainnya

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

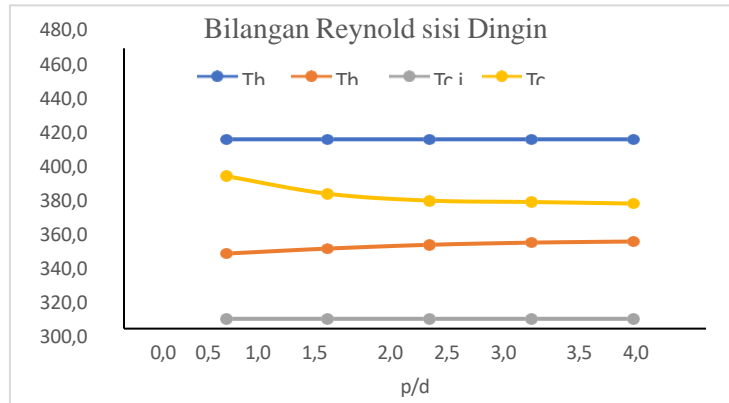
a. Temperatur Fluida Masuk dan Keluar

Data temperatur fluida masuk dan keluar yang diperoleh dari hasil pengujian pada variasi rasio pitch to diameter (p/d) disajikan pada Tabel 1. Data tersebut merupakan hasil pengukuran langsung selama proses pengujian penukar panas dengan variasi konfigurasi turbulator.

Table 1. Data Terukur

p/d	$T_{h,i}$ (K)	$T_{c,i}$ (K)	$V_{c,i}$ (m/s)	$V_{h,i}$ (m/s)	$T_{h,o}$ (K)	$T_{c,o}$ (K)
-------	---------------	---------------	-----------------	-----------------	---------------	---------------

0,8	523,2	308,2	1,0	5,0	361,99	425,84
1,6	523,2	308,2	1,0	5,0	366,06	411,38
2,4	523,2	308,2	1,0	5,0	369,21	405,68
3,2	523,2	308,2	1,0	5,0	371,00	404,50
3,9	523,2	308,2	1,0	5,0	371,94	403,22



Gambar 1. Grafik pengaruh p/d terhadap data output temperature

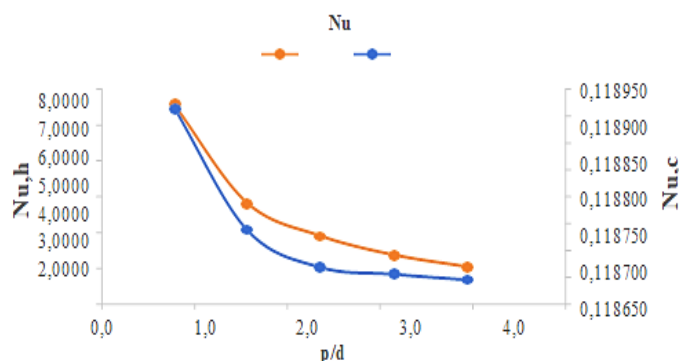
Hubungan antara rasio p/d terhadap temperatur keluaran fluida ditunjukkan pada Gambar 1. Grafik tersebut memperlihatkan perubahan temperatur keluaran fluida pada setiap variasi p/d, yang menunjukkan adanya pengaruh parameter geometrik terhadap karakteristik temperatur fluida di dalam penukar panas.

b. Karakteristik Perpindahan Panas (Bilangan Nusselt)

Nilai bilangan Nusselt yang diperoleh dari hasil perhitungan pada setiap variasi rasio pitch to diameter (p/d) disajikan pada Tabel 2. Nilai tersebut merupakan hasil pengolahan data temperatur dan parameter aliran fluida pada sisi panas penukar panas.

Table 2. hasil perhitungan bilangan *Nusselt* pada sisi panas (Nu_h)

p/d	Re_h	Pr_h	f_h	Nu_h
0,8	11718,5	0,0007405	0,00533459	7,569
1,6	9202,8	0,0007395	0,00379019	4,825
2,4	8711,1	0,0007388	0,00298491	3,895
3,2	8441,9	0,0007384	0,00251106	3,361
3,9	8383,3	0,0007382	0,00217885	3,027



Gambar 2. Grafik pengaruh p/d terhadap bilangan Nusselt

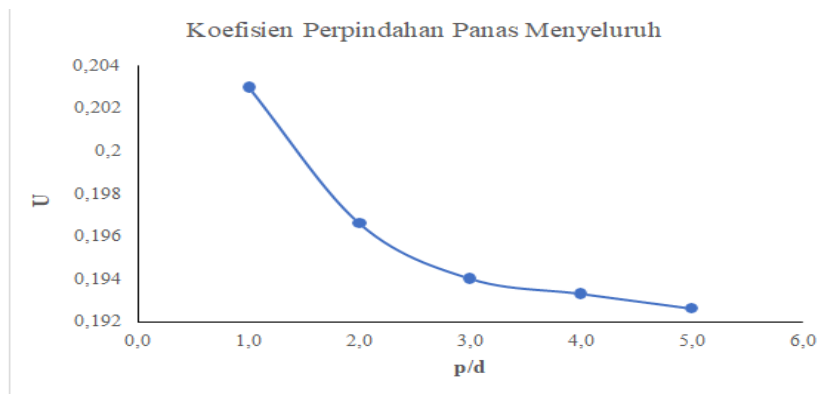
Hubungan antara rasio p/d dan bilangan Nusselt ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik tersebut memperlihatkan perubahan nilai bilangan Nusselt pada setiap variasi p/d, yang menggambarkan karakteristik perpindahan panas konveksi akibat variasi parameter geometrik yang diterapkan

c. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh yang diperoleh dari hasil perhitungan pada setiap variasi rasio pitch to diameter (p/d) disajikan pada Tabel 3. Nilai tersebut dihitung berdasarkan parameter perpindahan panas pada sisi panas dan sisi dingin penukar panas.

Tabel 3. Hasil perhitungan koefisien perpindahan panas menyeluruh (U)

p/d	L (m)	λ_w ($m/m \cdot K$)	h_h W/m^2 K	h_c W/m^2 K	U ($m/m \cdot K$)
0,8	2,0	387	8,429	0,032	0,2029
1,6	2,0	387	5,295	0,032	0,1966
2,4	2,0	387	4,227	0,031	0,1940
3,2	2,0	387	3,624	0,031	0,1933
3,9	2,0	387	3,254	0,031	0,1926



Gambar 3. Grafik pengaruh p/d terhadap koefisien perpindahan panas menyeluruh

Hubungan antara rasio p/d dan koefisien perpindahan panas menyeluruh ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik tersebut memperlihatkan perubahan nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh akibat variasi konfigurasi turbulator yang diterapkan pada penukar panas.

d. Perpindahan Panas Aktual dan Maksimum

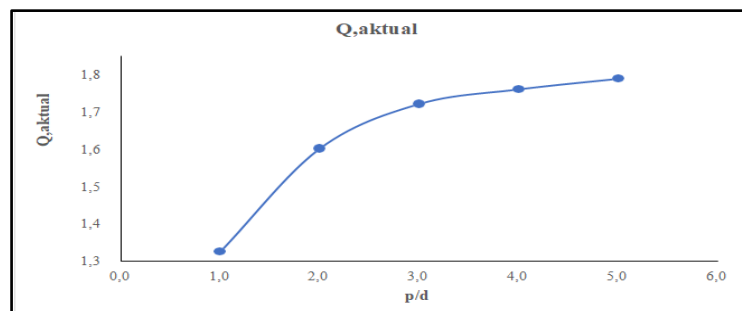
Nilai perpindahan panas aktual dan perpindahan panas maksimum yang diperoleh dari hasil perhitungan pada setiap variasi rasio pitch to diameter (p/d) disajikan pada Tabel 4. dan Tabel 5. Nilai tersebut dihitung berdasarkan data temperatur fluida serta parameter perpindahan panas yang diperoleh selama proses pengujian.

Tabel 4. Hasil perhitungan untuk perpindahan panas aktual (Q_{aktual})

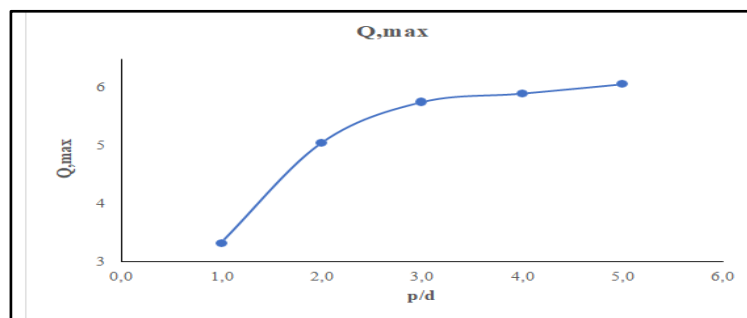
p/d	U (W/m^2K)	A (m^2)	ΔT_{lm} (K)	Q_{aktual} (W)
0,8	0,2029	0,1595	40,964	1,326
1,6	0,1966	0,1595	51,063	1,601
2,4	0,1940	0,1595	55,600	1,720
3,2	0,1933	0,1595	57,070	1,760
3,9	0,1926	0,1595	58,194	1,788

Tabel 5 Hasil perhitungan untuk perpindahan panas maksimum (Q_{maks})

p/d	\dot{m} (kg/s)	C_p (J/Kg · K)	ΔT (K)	Q_{maks} (W)
0,8	0,115	0,949	30,360	3,3193
1,6	0,119	0,945	44,820	5,0452
2,4	0,121	0,944	50,520	5,7507
3,2	0,121	0,943	51,700	5,8986
3,9	0,121	0,943	52,980	6,0596



Gambar 4. Grafik pengaruh p/d terhadap perpindahan panas aktual



Gambar 5. Grafik pengaruh p/d terhadap perpindahan panas maksimum

Hubungan antara rasio p/d terhadap perpindahan panas aktual dan perpindahan panas maksimum ditunjukkan pada Gambar 4. dan Gambar 5. Grafik tersebut memperlihatkan perubahan nilai perpindahan panas pada setiap variasi p/d , yang menggambarkan pengaruh variasi konfigurasi turbulator terhadap kinerja perpindahan panas penukar panas.

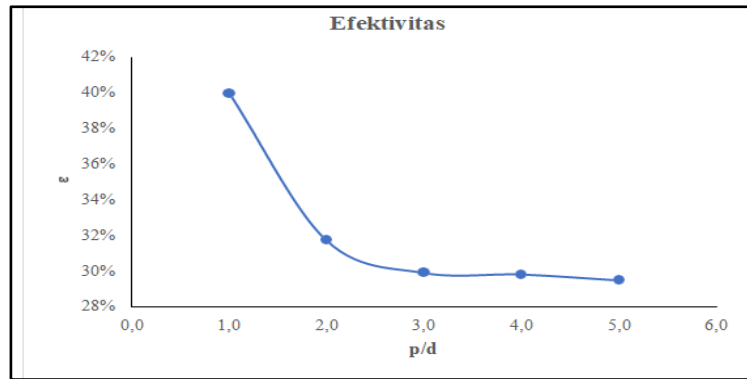
B. Pembahasan

a. Efektivitas Penukar Panas

Nilai efektivitas penukar panas pada setiap variasi rasio pitch to diameter (p/d) disajikan pada Tabel 6. dan hubungannya dengan rasio p/d ditunjukkan pada Gambar 6. Efektivitas dihitung berdasarkan perbandingan antara perpindahan panas aktual dan perpindahan panas maksimum yang diperoleh dari hasil perhitungan sebelumnya.

Tabel 6. hasil perhitungan efektivitas

p/d	Q_{aktual} (W)	Q_{maks} (W)	x100	ε
0,8	1,326	3,3193	100	39,95%
1,6	1,601	5,0452	100	31,74%
2,4	1,720	5,7507	100	29,92%
3,2	1,760	5,8986	100	29,83%
3,9	1,788	6,0596	100	29,50%

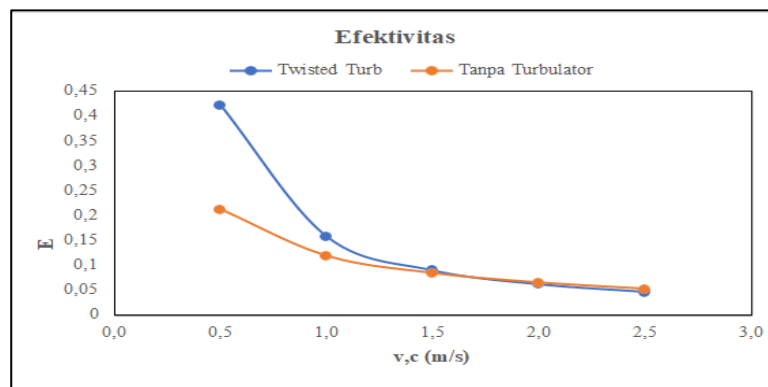


Gambar 6. Grafik pengaruh p/d terhadap efektivitas

Berdasarkan hasil yang ditampilkan, variasi rasio p/d memberikan pengaruh terhadap nilai efektivitas penukar panas. Perubahan nilai efektivitas tersebut berkaitan dengan peningkatan intensitas perpindahan panas konveksi yang dipengaruhi oleh konfigurasi turbulator, sehingga kemampuan penukar panas dalam memindahkan energi panas menjadi lebih optimal pada kondisi tertentu.

b. Perbandingan Twisted Turbulator dan Tanpa Turbulator

Perbandingan kinerja penukar panas antara penggunaan twisted turbulator dan tanpa turbulator ditunjukkan pada Gambar 7. Perbandingan tersebut didasarkan pada nilai efektivitas yang diperoleh pada kondisi pengujian yang sama, sehingga pengaruh penggunaan turbulator terhadap kinerja perpindahan panas dapat diamati secara langsung.



Gambar 7. Perbandingan efektivitas *twisted turbulator* dan tanpa *turbulator*

Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, penggunaan twisted turbulator menghasilkan nilai efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan penukar panas tanpa turbulator. Peningkatan efektivitas ini menunjukkan bahwa keberadaan twisted turbulator mampu meningkatkan turbulensi aliran fluida, yang berdampak pada peningkatan intensitas perpindahan panas konveksi di dalam penukar panas.

4. SIMPULAN

Dari hasil penelitian dengan memvariasikan nilai rasio p/d pada plat turbulator dengan temperatur udara masuk konstan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa Rasio p/d 0,8 yang paling efektif dengan nilai efektivitas sebesar 39,95 %. Rasio p/d 0,8 menghasilkan temperatur udara keluar paling maksimal yakni sebesar 425,84 °K.

DAFTAR PUSTAKA

E. Tavousi, N. Perera, D. Flynn, R. Hasan, and M. Rahman, "Effect of novel turbulators on the hydrothermal performance of counterflow double tube heat exchanger using nanofluid

- s," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 107, no. May, p. 109427, 2024, doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109427.
- B. Inc, "Waste Heat Recovery: Technology Opportunities in the UJS Industry," *Waste Heat Recover. Technol. Oppor. US Ind.*, pp. 1-112, 2008, doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- O. Douadi, R. Ravi, M. Faqir, and E. Essadiqi, "A conceptual framework for waste heat recovery from compression ignition engines: Technologies, working fluids & heat exchangers," *Energy Convers. Manag.* X, vol. 16, no. September, p. 100309, 2022, doi:10.1016/j.ecmx.2022.100309.
- A. Digdoyo, T. Surawan, D. Djamruddin, E. Yuniati, D. Ardiyan, and A. Saputra, "Review: Pemanfaatan Limbah Panas Dari Internal Combustion Engine Sebagai Energi Terbarukan Melalui Proses Pemulihan Gas Buang," *Technol. Renew. Energy Dev.*, pp. 130-144, 2021.
- M. H. Masud, A. A. Ananno, N. Ahmed, P. Dabnichki, and K. N. Salehin, "Experimental investigation of a novel waste heat based food drying system," *J. Food Eng.*, vol. 281, no. October 2019, p. 110002, 2020, doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.110002.
- S. Tang, X. Xie, Z. Zhao, and L. Ding, "Investigation of thermal-hydraulic characteristics in a novel finned tube heat exchanger for flue gas waste heat recovery," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 39, no. September, p. 102392, 2022, doi:10.1016/j.csite.2022.102392.
- Z. Mokhtar, J. Vanden Berghe, and J. Blondeau, "Experimental characterization of a spiral heat exchanger for waste water heat recovery from partially filled sewage pipes," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 52, no. August, p. 103770, 2023, doi:10.1016/j.csite.2023.103770.
- H. Jouhara, N. Khordehghah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, and S. A. Tassou, "Waste heat recovery technologies and applications," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 6, no. January, pp. 8-289, 2018, doi:10.1016/j.tsep.2018.04.017.
- I. A. Fetuga, O. T. Olakoyejo, S. M. Abolarin, J. K. Gbegudu, A. Onwuegbusi, and A. O. Adelaja, "Numerical analysis of thermal performance of waste heat recovery shell and tube heat exchangers on counter-flow with different tube configurations," *Alexandria Eng. J.*, vol. 64, pp. 859-875, 2023, doi:10.1016/j.aej.2022.09.017.
- S. Bari and T. S. Randhawa, "Optimizing the design of heat exchangers to reduce the cost and maximize the production of freshwater using waste heat from a diesel-gen-set," *Int. J. Thermofluids*, vol. 14, no. February, p. 100142, 2022, doi:10.1016/j.ijft.2022.100142.
- P. Zhang, T. Ma, W. D. Li, G. Y. Ma, and Q. W. Wang, "Design and optimization of a novel high temperature heat exchanger for waste heat cascade recovery from exhaust flue gases," *Energy*, vol. 160, pp. 3-18, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.216.
- A. El Maakoul, K. Feddi, S. Saadeddine, A. Ben Abdellah, and M. El Metoui, "Performance enhancement of finned annulus using surface interruptions in double-pipe heat exchangers," *Energy Convers. Manag.*, vol. 210, 2020, doi:10.1016/j.enconman.2020.112710.
- C. Luo and K. W. Song, "Thermal performance enhancement of a double-tube heat exchanger with novel twisted annulus formed by counter-twisted oval tubes," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 164, no. September 2020, p. 106892, 2021, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2021.106892.
- E. Tavousi, N. Perera, D. Flynn, R. Hasan, and M. Rahman, "Effect of novel turbulators on the hydrothermal performance of counterflow double tube heat exchanger using nanofluids," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 107, 2024, doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109427.
- T. Salameh, M. Alkasrawi, A. G. Olabi, A. Al Makky, and M. A. Abdelkareem, "Experimental and numerical analysis of heat transfer enhancement inside concentric counter flow tube heat exchanger using different nanofluids," *Int. J. Thermofluids*, vol. 20, no. September, p. 100432, 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100432.