

ANALISIS EFEKTIVITAS PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT EXCHANGER* DENGAN VARIASI FLUIDA PANAS

EFFECT OF HOT FLUID VARIATION ON HEAT TRANSFER EFFECTIVENESS IN A HEAT EXCHANGER

Sumarsih¹, Vita Efelina², Sarah Dampang^{1*}

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

²Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

¹sumarsih.sumarsih19042@student.unsika.ac.id, ²vita.efelina@staff.unsika.ac.id, ^{*}sarah.dampang@staff.unsika.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 8 Mei 2025

Direvisi: 5 Juni 2026

Disetujui: 25 Juni 2026

ABSTRAK

Heater merupakan salah satu jenis *heat exchanger* yang berfungsi meningkatkan temperatur fluida proses melalui perpindahan panas dari fluida pemanas. Pada unit sintesis amonia, ammonia preheater digunakan untuk memanaskan amonia cair sebelum masuk ke reaktor agar kondisi operasi sesuai dengan kebutuhan proses. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja termal Ammonia Preheater EA-101 pada kondisi aktual yang menggunakan *hot water* sebagai fluida pemanas serta menganalisis peningkatan kinerja termal setelah dilakukan redesain menggunakan steam sebagai fluida pemanas. Evaluasi dilakukan melalui pendekatan analisis perpindahan panas berdasarkan neraca energi, perhitungan laju perpindahan panas, efektivitas penukar panas, dan faktor pengotor (*fouling factor*) untuk membandingkan kondisi aktual dengan kondisi redesain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi aktual dengan *hot water*, efektivitas penukar panas sebesar 53% dengan faktor pengotor 0,0097 hr·ft²·°F/Btu. Setelah dilakukan redesain menggunakan steam, efektivitas meningkat menjadi 73% dengan faktor pengotor 0,0091 hr·ft²·°F/Btu. Selain itu, laju perpindahan panas meningkat dari 9.801.117,25 Btu/jam menjadi 19.923.137,10 Btu/jam. Peningkatan efektivitas sebesar 20 poin persentase dan kenaikan laju perpindahan panas yang mencapai sekitar dua kali lipat menunjukkan bahwa penggunaan steam sebagai fluida pemanas mampu memberikan gaya pendorong termal yang lebih besar dibandingkan *hot water*. Dengan demikian, redesain ammonia preheater menggunakan steam terbukti dapat meningkatkan kinerja termal peralatan dan berpotensi mendukung pencapaian target temperatur proses pada unit sintesis amonia.

Kata Kunci:

Heat Exchanger, Ammonia Preheater, Hot Water, Steam, Efektivitas, Fouling Factor

ABSTRACT

A heater is a type of heat exchanger used to increase the temperature of a process fluid by transferring heat from a heating medium. In an ammonia synthesis unit, an ammonia preheater heats liquid ammonia before it enters the reactor, ensuring the required operating conditions are met. This study evaluates the thermal performance of the EA-101 Ammonia Preheater under actual operating conditions, using hot water as the heating medium, and examines the potential improvements achievable by redesigning the system to use steam as the heating medium. The evaluation was carried out using a heat-transfer analysis based on energy balance, heat-transfer rate, heat-exchanger effectiveness, and fouling factor to compare the actual and redesigned conditions. The results show that, under actual operation with hot water, the heat exchanger effectiveness was 53%, with a fouling factor of 0.0097 hr·ft²·°F/Btu. In the redesigned steam-using condition, the effectiveness increased to 73%, while the fouling factor decreased slightly to 0.0091 hr·ft²·°F/Btu. The heat transfer rate also increased from 9,801,117.25 Btu/h to 19,923,137.10 Btu/h. The 20-percentage-point increase in effectiveness, together with the nearly twofold increase in heat transfer rate, indicates that steam provides a higher thermal driving force than hot water. Therefore, redesigning the ammonia preheater to use steam as the heating medium can improve the equipment's thermal performance and help achieve the required process temperature in the ammonia synthesis unit.

Keywords:

Heat Exchanger, Ammonia Preheater, Hot Water, Steam, Effectivities, Fouling Factor

*Corresponding author: sarah.dampang@staff.unsika.ac.id

I. PENDAHULUAN

Heat exchanger merupakan peralatan utama dalam industri proses karena berperan dalam menjaga kestabilan temperatur, efisiensi energi, dan kontinuitas operasi (Bell, 2004; Raghuvanshi et al., 2025; Yao, 2018). Pada unit sintesis amonia, ammonia preheater digunakan untuk menaikkan temperatur amonia cair sebelum masuk ke reaktor sehingga kondisi operasi yang dibutuhkan dapat tercapai. Penurunan kinerja *preheater* dapat menyebabkan temperatur umpan tidak sesuai target, meningkatkan beban utilitas, serta berpotensi menurunkan efisiensi proses secara keseluruhan. Oleh karena itu, evaluasi performa heat exchanger pada kondisi operasi aktual menjadi penting, khususnya pada unit industri yang beroperasi secara kontinu (Nuruzzaman, 2018).

Salah satu faktor yang memengaruhi performa termal heat exchanger adalah jenis fluida panas yang digunakan. Pada Ammonia Preheater No.1 (EA-101) di PT XX, fluida panas yang digunakan adalah *hot water*, sedangkan pada Ammonia Preheater No.2 (EA-102) digunakan fluida panas berbasis steam. Perbedaan ini penting karena *hot water* dan steam memiliki karakteristik perpindahan panas yang berbeda. Secara termodinamika, *hot water* memindahkan panas terutama melalui panas sensibel yang bergantung pada laju alir massa, kapasitas panas, dan perubahan temperatur fluida. Sebaliknya, *steam* dapat menyediakan panas dalam jumlah lebih besar melalui pelepasan panas laten selama proses kondensasi. Mekanisme kondensasi tersebut umumnya menghasilkan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi dan *thermal driving force* yang lebih besar dibandingkan pemanasan menggunakan *hot water*. Dengan demikian, perubahan fluida panas dari *hot water* menjadi steam berpotensi meningkatkan laju perpindahan panas dan efektivitas preheater ammonia (Astawa et al., 2022; Kim et al., 2014; Sidek, 2025; Wardhani et al., 2022).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengevaluasi kinerja heat exchanger dengan berbagai pendekatan. Metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) digunakan untuk menganalisis efektivitas perpindahan panas berdasarkan perbedaan temperatur fluida (Al-Rawashdeh, 2025; Evran & Kurt, 2024). Sidek dkk, meneliti pengaruh variasi jenis fluida terhadap performa perpindahan panas menggunakan simulasi ANSYS Fluent (Sidek, 2025). Perubahan kecepatan aliran fluida dapat memengaruhi efektivitas heat exchanger (Achmad et al., 2024; Syahputra et al., 2023). Pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis pengaruh variasi baffle dan konfigurasi tube terhadap perilaku termohidraulik shell and tube heat exchanger. Kajian-kajian tersebut menunjukkan bahwa performa heat exchanger dipengaruhi oleh sifat fluida, kondisi aliran, konfigurasi geometri, serta pendekatan desain (Ali et al., 2024; Eko Wahyu Saputro & Agus Jamaldi, 2025).

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada analisis desain, variasi geometri, perubahan laju alir, atau simulasi fluida dalam kondisi ideal. Kajian yang secara spesifik membandingkan pengaruh penggunaan *hot water* dan steam terhadap performa preheater amonia pada kondisi operasi aktual industri masih terbatas. Padahal, pada operasi nyata,

performa heat exchanger tidak hanya ditentukan oleh sifat termofisika fluida, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor operasional seperti fouling, penurunan koefisien perpindahan panas, perubahan temperatur aktual, serta keterbatasan utilitas di lapangan. Fouling dapat membentuk resistansi termal tambahan pada permukaan perpindahan panas sehingga menurunkan laju perpindahan panas dan efektivitas alat (Al Ghifary et al., 2022; Chrisanta, 2020; Dampang, 2018; Izza et al., 2025). Oleh karena itu, evaluasi berbasis data operasi aktual diperlukan untuk memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai kinerja preheater amonia.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi komparatif performa termal Ammonia Preheater EA-101 antara kondisi eksisting yang menggunakan hot water dan skenario redesain yang menggunakan steam sebagai fluida panas. Evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan parameter teknis utama, yaitu laju perpindahan panas, efektivitas heat exchanger, dan faktor pengotor. Pendekatan ini tidak hanya menilai perubahan performa dari sisi termal, tetapi juga memberikan dasar teknis untuk menentukan kelayakan perubahan fluida panas pada unit industri. Secara praktis, peningkatan efektivitas preheater dapat membantu mencapai temperatur umpan reaktor, mengurangi kehilangan energi, meningkatkan pemanfaatan utilitas panas, dan berpotensi menekan biaya operasional akibat kebutuhan pemanasan tambahan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja termal Ammonia Preheater EA-101 pada kondisi aktual menggunakan *hot water* serta menganalisis peningkatan performa setelah dilakukan skenario perubahan fluida panas menjadi steam. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar teknis dalam optimasi operasi ammonia preheater dan mendukung pengambilan keputusan terkait pemilihan fluida panas yang lebih efisien pada unit sintesis amonia.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada *shell and tube heat exchanger* (STHE) tipe BEM yang berfungsi sebagai Ammonia Preheater No.1 (EA-101) pada salah satu pabrik pupuk di Indonesia. Alat ini digunakan untuk memanaskan amonia cair sebelum memasuki unit reaktor pada proses sintesis amonia. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui kinerja termal aktual alat dengan fluida panas berupa *hot water* serta membandingkannya dengan skenario redesain menggunakan steam sebagai fluida panas.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data spesifikasi alat, data operasi aktual, dan data sifat termofisika fluida. Data spesifikasi alat diperoleh dari *datasheet* Ammonia Preheater EA-101, sedangkan data operasi aktual diperoleh dari data lapangan dan/atau *log sheet* operasi yang mencakup temperatur masuk dan keluar fluida, laju alir massa, serta kondisi operasi fluida panas dan fluida dingin. Untuk meningkatkan validitas data, data operasi yang digunakan dipilih pada kondisi operasi stabil, yaitu ketika perubahan temperatur dan laju alir tidak menunjukkan fluktuasi signifikan selama periode pengamatan.

Validasi data operasi dilakukan dengan memeriksa konsistensi neraca panas antara sisi fluida panas dan sisi

fluida dingin. Selisih laju perpindahan panas antara kedua sisi dihitung sebagai *heat balance error* menggunakan Persamaan (1). Data dianggap layak digunakan apabila selisih neraca panas masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk perhitungan teknik.

Secara operasional, fluida proses yang terlibat pada alat ini adalah amonia cair sebagai fluida dingin dan *hot water* sebagai fluida panas. Data lapangan yang digunakan dalam analisis meliputi temperatur masuk dan keluar fluida, laju alir massa, dimensi utama alat, serta spesifikasi geometri tube dan shell pada Tabel 1. Data tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan parameter kinerja perpindahan panas.

TABEL 1
SFESIFIKASI ALAT DAN KONDISI OPERASI AMMONIA PREHEATER NO.1 (EA-101)

Shell			Tube		
Fluida	Hot water		Fluida	Amonia	
Suhu masuk	176	°F	Suhu masuk	92,3	°F
Suhu keluar	162,68	°F	Suhu keluar	137,48	°F
Laju alir	176370	lbm/jam	Laju alir		lbm/jam
Diameter dalam, Idshell	27,6	in	Panjang tube, L	23,62	ft
Jarak baffle, B	13,78	in	Susunan tube, Triangular BWG	13	
			Diameter luar, ODtube	0,625	in
			Diameter dalam, IDtube	0,435	in
			Lintasan	1	

Metode penelitian ini meliputi beberapa tahapan, yaitu studi literatur mengenai karakteristik dan analisis kinerja shell and tube heat exchanger, pengumpulan data spesifikasi alat dan kondisi operasi, penentuan sifat termofisika fluida proses, pengolahan data menggunakan persamaan matematis, serta analisis hasil perhitungan. Studi literatur dilakukan terutama berdasarkan teori perpindahan panas dari Kern untuk memastikan bahwa pendekatan analitis yang digunakan sesuai dengan karakteristik alat dan data operasi yang tersedia.

Evaluasi kinerja heater dilakukan melalui perhitungan laju perpindahan panas, log mean temperature difference (LMTD), number of transfer unit (NTU), dan efektivitas perpindahan panas. Laju perpindahan panas dihitung berdasarkan neraca energi pada sisi fluida panas dan fluida dingin. Secara umum, laju perpindahan panas dapat dinyatakan sebagai:

$$Q = WC(T_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1) \quad (1)$$

dengan Q adalah laju perpindahan panas (Btu/jam atau W), $\dot{m}$ adalah laju alir massa, c_p adalah panas jenis fluida, sedangkan indeks h dan c masing-masing menyatakan fluida panas (hot fluid) dan fluida dingin (cold fluid).

Beda temperatur rata-rata logaritmik atau log mean temperature difference (LMTD) digunakan untuk merepresentasikan gaya pendorong perpindahan panas sepanjang alat penukar panas, yang dirumuskan sebagai:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (2)$$

Selanjutnya, metode NTU digunakan untuk menggambarkan kemampuan alat dalam mentransfer panas relatif terhadap kapasitas panas minimum fluida. Nilai NTU dihitung dengan persamaan:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (3)$$

di mana U adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh, A adalah luas perpindahan panas, dan C_{min} adalah laju kapasitas panas minimum, yang didefinisikan sebagai:

$$C = \dot{m}c_p$$

Efektivitas perpindahan panas (ϵ) didefinisikan sebagai perbandingan antara laju perpindahan panas aktual dengan laju perpindahan panas maksimum yang secara teoritis dapat dicapai oleh alat. Persamaan efektivitas dinyatakan sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{maks}} \quad (4)$$

Dengan demikian, efektivitas penukar panas menunjukkan sejauh mana alat mampu mendekati kondisi perpindahan panas ideal berdasarkan keterbatasan kapasitas panas kedua fluida. Nilai efektivitas yang semakin tinggi menunjukkan bahwa kinerja termal alat semakin baik.

Laju perpindahan panas dihitung berdasarkan karakteristik masing-masing fluida panas. Pada kondisi aktual, fluida panas yang digunakan adalah air panas, sehingga laju perpindahan panas dihitung berdasarkan panas sensibel. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Q = W C_p (T_1 - T_2) \quad (5)$$

$$Q = 735819,61 \frac{lb}{hr} \cdot 1 \frac{Btu}{lb^\circ F} \cdot 13,32^\circ F$$

Sementara itu, pada kondisi desain dengan fluida panas berupa steam, laju perpindahan panas dihitung berdasarkan panas laten kondensasi, sehingga digunakan persamaan:

$$Q = W \cdot \lambda$$

(6)

$$Q = 20533 \frac{lb}{hr} \cdot 970,3 \frac{Btu}{lb^\circ F} = 19923137,1 \frac{Btu}{hr}$$

Pada penelitian ini, seluruh parameter tersebut dihitung berdasarkan data operasi aktual Ammonia Preheater No.1 (EA-101). Hasil perhitungan kemudian digunakan untuk mengevaluasi kinerja eksisting alat serta menganalisis pengaruh perubahan fluida panas terhadap laju perpindahan panas dan efektivitas heat exchanger.

Faktor pengotor dihitung untuk mengevaluasi besarnya resistansi termal tambahan akibat endapan yang terbentuk pada permukaan perpindahan panas. Persamaan yang digunakan adalah:

$$Rd = \frac{U_c - U_d}{U_c U_d} \quad (7)$$

Efektivitas perpindahan panas didefinisikan sebagai perbandingan antara laju perpindahan panas aktual dengan laju perpindahan panas maksimum yang mungkin dicapai oleh alat. Persamaan yang digunakan adalah:

$$\varepsilon = \frac{Q_{aktual}}{Q_{maks}} 100\% \quad (8)$$

Perhitungan kinerja heat exchanger dilakukan dengan beberapa asumsi utama sebagai berikut.

1. Sistem bekerja pada kondisi tunak atau *steady state*, sehingga perubahan energi terhadap waktu diabaikan.
2. Kehilangan panas ke lingkungan dianggap kecil karena alat beroperasi dalam sistem industri yang terisolasi, sehingga panas yang dilepas oleh fluida panas dianggap sama dengan panas yang diterima oleh fluida dingin setelah memperhitungkan toleransi neraca panas.
3. Fluida panas dan fluida dingin diasumsikan mengalir secara kontinu dengan laju alir massa konstan selama periode pengambilan data.
4. Tidak terjadi perubahan energi kinetik dan energi potensial yang signifikan.
5. Perubahan sifat termofisika fluida terhadap temperatur dianggap kecil dalam rentang operasi, sehingga properti fluida ditentukan pada temperatur rata-rata.
6. Amonia pada sisi tube diasumsikan berada pada fase cair sesuai kondisi operasi alat.
7. Untuk skenario penggunaan steam, perpindahan panas dianalisis dengan mempertimbangkan potensi pelepasan panas laten selama proses kondensasi. Apabila fluida yang digunakan adalah steam condensate, maka perpindahan panas diperlakukan sebagai panas sensibel cairan kondensat, bukan panas laten kondensasi.
8. Aliran fluida dianalisis berdasarkan konfigurasi aktual alat sebagaimana tercantum pada *datasheet*. Koreksi LMTD digunakan apabila konfigurasi lintasan shell dan tube tidak sesuai dengan aliran lawan arah ideal.

Pengolahan data dilakukan menggunakan Microsoft Excel untuk perhitungan neraca panas, LMTD, NTU, efektivitas, koefisien perpindahan panas menyeluruh, dan faktor pengotor. Perhitungan dilakukan secara bertahap dengan memasukkan data operasi aktual, data geometri alat, serta sifat termofisika fluida. Microsoft Excel digunakan karena memungkinkan perhitungan berulang, pengecekan satuan, serta perbandingan langsung antara kondisi aktual dan skenario redesain. Untuk mengurangi kesalahan perhitungan, setiap persamaan dimasukkan secara terpisah pada lembar kerja dan hasilnya diverifikasi melalui pengecekan neraca panas antara sisi fluida panas dan sisi fluida dingin.

Tahapan analisis dalam penelitian ini meliputi:

1. pengumpulan data spesifikasi alat dan data operasi aktual;
2. validasi data operasi melalui pengecekan neraca panas;
3. penentuan sifat termofisika fluida berdasarkan temperatur rata-rata;
4. perhitungan laju perpindahan panas aktual;
5. perhitungan LMTD dan koefisien perpindahan panas menyeluruh;
6. perhitungan faktor pengotor;
7. perhitungan NTU dan efektivitas heat exchanger;
8. perbandingan performa antara kondisi aktual menggunakan hot water dan skenario redesain menggunakan steam.

Hasil perhitungan kemudian digunakan untuk mengevaluasi apakah perubahan fluida panas dari hot water menjadi steam mampu meningkatkan performa termal Ammonia Preheater EA-101 secara signifikan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi kinerja Ammonia Preheater No.1 (EA-101) dilakukan dengan membandingkan dua kondisi operasi, yaitu kondisi aktual menggunakan *hot water* sebagai fluida panas dan kondisi desain/redesain menggunakan steam sebagai fluida panas. Parameter yang dianalisis meliputi laju perpindahan panas, faktor pengotor (*fouling factor*), dan efektivitas penukar panas. Perbandingan kedua kondisi tersebut disajikan pada Tabel II.

TABEL II

HASIL PERHITUNGAN KINERJA AMMONIA PREHEATER EA-101

Parameter	Kondisi Aktual	Kondisi Desain/Redesain
Fluida panas	<i>Hot water</i>	Steam
Fluida dingin	Amonia	Amonia
Laju umpan amonia	176.370 lb/jam	176.370 lb/jam
Laju perpindahan panas, (Q)	9.801.117,25 Btu/jam	19.923.137,10 Btu/jam
Faktor pengotor, (Rd)	0,0097 hr·ft ² ·°F/Btu	0,0091 hr·ft ² ·°F/Btu
Efektivitas penukar panas.	53%	73%

Berdasarkan Tabel II, perubahan fluida panas dari *hot water* menjadi steam memberikan peningkatan kinerja termal yang signifikan pada Ammonia Preheater EA-101. Laju perpindahan panas meningkat dari 9.801.117,25 Btu/jam pada kondisi aktual menjadi 19.923.137,10

Btu/jam pada kondisi desain/redesain. Dengan demikian, penggunaan steam menghasilkan laju perpindahan panas sekitar 2,03 kali lebih besar dibandingkan penggunaan *hot water*. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pemilihan fluida panas memiliki pengaruh penting terhadap kemampuan heat exchanger dalam mentransfer energi dari fluida pemanas ke amonia sebagai fluida proses (Isa et al., 2006; Kang et al., 2019; Oberholzer et al., 2019).

Peningkatan juga terlihat pada efektivitas penukar panas. Pada kondisi aktual menggunakan *hot water*, efektivitas heat exchanger sebesar 53%, sedangkan pada kondisi desain/redesain menggunakan steam meningkat menjadi 73%. Kenaikan sebesar 20 poin persentase ini menunjukkan bahwa penggunaan steam membuat alat mampu memanfaatkan potensi perpindahan panas secara lebih optimal. Dengan kata lain, heat exchanger pada kondisi desain/redesain bekerja lebih dekat terhadap kondisi perpindahan panas maksimum teoritis dibandingkan kondisi aktual menggunakan *hot water* (Fakheri, 2007).

A. Analisis Laju Perpindahan Panas

Laju perpindahan panas merupakan parameter utama dalam mengevaluasi performa thermal heat exchanger. Secara umum, nilai laju perpindahan panas dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas menyeluruh, luas permukaan perpindahan panas, dan beda temperatur rata-rata antara fluida panas dan fluida dingin. Pada penelitian ini, laju perpindahan panas dianggap tetap karena evaluasi dilakukan pada basis peralatan yang sama. Oleh karena itu, peningkatan laju perpindahan panas terutama disebabkan oleh perubahan karakteristik fluida panas dan peningkatan gaya pendorong perpindahan panas (Roetzel & Na Ranong, 2018; Rozi et al., 2025; Waware et al., 2025).

Pada kondisi aktual, *hot water* memindahkan panas ke amonia melalui panas sensibel. Mekanisme ini bergantung pada perubahan temperatur *hot water* selama mengalir di dalam heat exchanger. Semakin kecil penurunan temperatur *hot water*, semakin terbatas pula jumlah energi panas yang dapat dilepaskan ke fluida dingin. Selain itu, temperatur *hot water* akan menurun sepanjang lintasan aliran sehingga beda temperatur lokal antara fluida panas dan amonia juga mengalami perubahan. Kondisi ini dapat membatasi nilai beda temperatur rata-rata logaritmik atau *log mean temperature difference* (LMTD), yang pada akhirnya membatasi laju perpindahan panas actual (Huang et al., 2019; Lee, 2017).

Sebaliknya, steam memiliki kemampuan transfer panas yang lebih tinggi karena dapat melepaskan panas laten selama proses kondensasi. Dalam proses kondensasi, steam dapat memberikan energi panas dalam jumlah besar pada temperatur yang relatif konstan. Kondisi ini menyebabkan beda temperatur antara fluida panas dan fluida dingin dapat dipertahankan lebih stabil sepanjang permukaan perpindahan panas. Akibatnya, gaya pendorong perpindahan panas menjadi lebih besar dibandingkan

penggunaan *hot water*. Hal inilah yang menjelaskan mengapa laju perpindahan panas pada kondisi desain/redesain menggunakan steam meningkat secara signifikan (Li et al., 2022).

Dari sudut pandang termodinamika, perbedaan utama antara *hot water* dan steam terletak pada bentuk energi panas yang ditransfer. *Hot water* mentransfer energi melalui penurunan temperatur fluida, sedangkan steam mentransfer energi terutama melalui perubahan fase dari uap menjadi kondensat. Energi yang dilepaskan selama perubahan fase tersebut umumnya jauh lebih besar dibandingkan energi sensibel pada rentang temperatur yang sama. Oleh karena itu, walaupun laju alir dan geometri alat tidak berubah secara ekstrem, penggunaan steam tetap dapat menghasilkan peningkatan kapasitas perpindahan panas yang substantial (Charach & Zemel, 1992; Kitaev et al., 2020).

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori dasar perpindahan panas bahwa pemilihan fluida panas sangat memengaruhi kinerja heat exchanger. Fluida dengan kemampuan mempertahankan temperatur tinggi dan memiliki koefisien perpindahan panas yang baik akan menghasilkan transfer energi yang lebih efektif (Duraisamy & Narasimhalu, 2026). Dengan demikian, peningkatan nilai (Q) dari 9.801.117,25 Btu/jam menjadi 19.923.137,10 Btu/jam menunjukkan bahwa steam lebih sesuai digunakan sebagai fluida pemanas pada sistem ammonia preheater yang membutuhkan transfer panas tinggi dalam waktu operasi kontinu.

B. Analisis Efektivitas Penukar Panas

Efektivitas penukar panas menunjukkan perbandingan antara laju perpindahan panas aktual dan laju perpindahan panas maksimum yang secara teoritis dapat dicapai. Nilai efektivitas yang tinggi menunjukkan bahwa *heat exchanger* mampu memanfaatkan potensi beda temperatur antara fluida panas dan fluida dingin secara lebih baik. Pada kondisi aktual, efektivitas EA-101 sebesar 53%. Nilai ini menunjukkan bahwa alat masih mampu mentransfer lebih dari separuh potensi panas maksimum, tetapi performanya belum optimal.

Efektivitas 53% pada kondisi aktual dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, *hot water* memiliki keterbatasan dalam menyediakan energi panas karena hanya mengandalkan panas sensibel. Kedua, penurunan temperatur *hot water* selama proses perpindahan panas menyebabkan gaya pendorong temperatur tidak dapat dipertahankan secara konstan. Ketiga, adanya *fouling* pada permukaan perpindahan panas dapat meningkatkan resistansi termal sehingga menurunkan koefisien perpindahan panas menyeluruh. Kombinasi faktor-faktor tersebut menyebabkan nilai efektivitas aktual lebih rendah dibandingkan kondisi desain/redesain.

Pada kondisi desain/redesain menggunakan steam, efektivitas meningkat menjadi 73%. Peningkatan ini

menunjukkan bahwa steam mampu memperbaiki performa thermal heat exchanger melalui peningkatan gaya pendorong perpindahan panas dan kemampuan transfer panas yang lebih besar. Steam yang mengalami kondensasi dapat mempertahankan temperatur pemanasan relatif konstan, sehingga beda temperatur efektif antara fluida panas dan amonia menjadi lebih besar. Selain itu, proses kondensasi steam umumnya menghasilkan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan pemanasan menggunakan air panas. Dengan meningkatnya koefisien perpindahan panas menyeluruh, nilai NTU juga meningkat, sehingga efektivitas heat exchanger menjadi lebih tinggi (Shen et al., 2015).

Kenaikan efektivitas dari 53% menjadi 73% juga menunjukkan bahwa optimasi performa heat exchanger tidak selalu harus dilakukan melalui perubahan geometri alat. Pada beberapa kasus industri, perubahan jenis fluida panas dapat menjadi strategi yang lebih praktis karena tidak memerlukan modifikasi besar pada struktur heat exchanger. Namun, keputusan untuk mengganti fluida panas tetap harus mempertimbangkan batas desain alat, tekanan operasi, temperatur operasi, sistem kontrol, serta ketersediaan utilitas di pabrik.

Dalam naskah ini, nilai efektivitas aktual telah diseragamkan menjadi 53% sesuai dengan Tabel II. Nilai 5,4% yang sebelumnya muncul pada pembahasan tidak digunakan kembali karena menimbulkan inkonsistensi antara abstrak, tabel, dan pembahasan. Konsistensi nilai ini penting agar interpretasi hasil penelitian tidak menimbulkan keraguan terhadap validitas perhitungan.

C. Analisis Faktor Pengotor

Faktor pengotor atau *fouling factor* merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja heat exchanger karena menunjukkan adanya tambahan tahanan termal akibat pengotor pada permukaan perpindahan panas. Pada kondisi aktual menggunakan *hot water*, nilai (Rd) diperoleh sebesar $0,0097 \text{ hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$. Sementara itu, pada kondisi desain/redesain menggunakan steam, nilai (Rd) sebesar $0,0091 \text{ hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi desain/redesain memiliki tahanan pengotor yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kondisi aktual, meskipun perbedaannya tidak terlalu besar.

Jika dibandingkan dengan standar Kern, nilai faktor pengotor aktual tersebut tergolong tinggi. Kern melaporkan bahwa nilai *fouling factor* untuk *hot water* sekitar $0,003 \text{ hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$, sedangkan untuk steam sekitar $0,001 \text{ hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$. Dengan demikian, nilai (Rd) aktual sebesar $0,0097 \text{ hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$ berada jauh di atas nilai standar untuk *hot water*. Hal ini mengindikasikan adanya akumulasi deposit atau lapisan pengotor yang cukup signifikan pada permukaan perpindahan panas.

Fouling factor yang tinggi dapat disebabkan oleh beberapa mekanisme. Pada sisi *hot water*, *fouling* dapat berasal dari kandungan mineral terlarut, padatan tersuspensi, produk

korosi, atau pembentukan kerak akibat perubahan temperatur. Endapan tersebut dapat menempel pada permukaan perpindahan panas dan membentuk lapisan dengan konduktivitas termal rendah. Lapisan ini bertindak sebagai isolator termal sehingga menghambat aliran panas dari fluida panas menuju dinding tube dan selanjutnya ke fluida ammonia (Zhao & Muller-Steinhagen, 2023).

Secara teoritis, *fouling* meningkatkan resistansi termal total pada *heat exchanger*. Ketika resistansi termal meningkat, koefisien perpindahan panas menyeluruh akan menurun. Penurunan koefisien perpindahan panas menyeluruh menyebabkan laju perpindahan panas aktual menjadi lebih rendah dibandingkan kondisi bersih. Dengan demikian, walaupun heat exchanger masih dapat beroperasi, kemampuan termalnya akan terus menurun apabila *fouling* tidak dikendalikan (Bott, 2023).

Dampak *fouling* tidak hanya terjadi pada aspek termal, tetapi juga pada aspek operasional. *Fouling* dapat mempersempit area aliran fluida, meningkatkan *pressure drop*, meningkatkan kebutuhan energi pemompaan, dan menyebabkan temperatur outlet fluida proses tidak mencapai target. Pada unit preheater amonia, kondisi ini dapat berdampak pada kestabilan temperatur umpan sebelum memasuki reaktor. Jika temperatur umpan terlalu rendah, sistem memerlukan tambahan energi dari unit lain atau penyesuaian operasi untuk mempertahankan kondisi proses (Amani, 2018).

Nilai *fouling factor* yang tinggi menunjukkan bahwa EA-101 memerlukan evaluasi jadwal pembersihan (*cleaning schedule*). Pembersihan secara mekanik maupun kimia dapat dipertimbangkan untuk mengurangi deposit pada permukaan perpindahan panas. Selain itu, kualitas *hot water* sebagai fluida utilitas perlu dikontrol, terutama terkait kandungan mineral, padatan tersuspensi, oksigen terlarut, dan potensi korosi. Pengendalian kualitas fluida panas sangat penting karena *fouling* yang terus meningkat akan menurunkan efisiensi energi dan meningkatkan biaya operasional (Singh et al., 2021).

Walaupun penggunaan *steam* pada kondisi desain/redesain menunjukkan nilai (Rd) sedikit lebih rendah, nilai tersebut tetap lebih tinggi dibandingkan acuan standar. Oleh karena itu, peningkatan performa melalui perubahan fluida panas harus tetap diikuti dengan pengendalian *fouling*. Dengan kata lain, penggunaan *steam* dapat meningkatkan kemampuan perpindahan panas, tetapi tidak sepenuhnya menghilangkan masalah resistansi termal akibat kontaminan.

D. Implikasi Termodinamika Penggunaan Steam

Peningkatan performa *heat exchanger* pada penggunaan *steam* dapat dijelaskan berdasarkan prinsip termodinamika dan perpindahan panas. *Steam* memiliki karakteristik unik karena mampu melepaskan panas laten selama proses kondensasi. Pada proses ini, energi panas dilepaskan tanpa perubahan temperatur yang besar. Kondisi tersebut

memungkinkan steam mempertahankan temperatur pemanasan yang relatif stabil selama proses perpindahan panas berlangsung (Akimoto et al., 2016).

Berbeda dengan *steam*, *hot water* mengalami penurunan temperatur secara bertahap karena energi yang dilepaskan berasal dari panas laten. Penurunan temperatur ini menyebabkan gaya pendorong perpindahan panas berkurang sepanjang lintasan aliran. Akibatnya, kemampuan *hot water* untuk mempertahankan beda temperatur dengan amonia menjadi lebih terbatas. Hal inilah yang menyebabkan efektivitas dan laju perpindahan panas pada kondisi aktual lebih rendah dibandingkan kondisi desain/redesain menggunakan *steam* (Oberholzer et al., 2019).

Selain itu, proses kondensasi *steam* dapat menghasilkan koefisien perpindahan panas sisi fluida panas yang lebih besar. Pada kondensasi film, *steam* yang bersentuhan dengan permukaan *tube* akan membentuk lapisan kondensat. Apabila lapisan kondensat tersebut dapat mengalir dan terdrainase dengan baik, resistansi termal pada sisi steam menjadi relatif rendah. Kondisi ini mendukung peningkatan koefisien perpindahan panas secara menyeluruh. Namun, apabila kondensat tidak terbuang secara efektif, lapisan kondensat dapat menebal dan justru menjadi hambatan tambahan. Oleh karena itu, desain jalur kondensat dan keberadaan *steam trap* menjadi faktor penting dalam penerapan steam sebagai fluida panas (Li et al., 2022; Morrison et al., 1998).

Dari sisi metode NTU efektivitas, peningkatan efektivitas pada penggunaan *steam* dapat dikaitkan dengan peningkatan nilai NTU. Nilai NTU menggambarkan kemampuan *heat exchanger* dalam mentransfer panas relatif terhadap kapasitas panas minimum fluida. Jika koefisien perpindahan panas menyeluruh meningkat, maka nilai NTU juga meningkat. Peningkatan NTU menyebabkan *heat exchanger* mampu mentransfer fraksi panas yang lebih besar, sehingga efektivitas meningkat. Dengan demikian, kenaikan efektivitas dari 53% menjadi 73% bukan hanya disebabkan oleh kenaikan temperatur fluida panas, tetapi juga oleh mekanisme perpindahan panas *steam* yang lebih efektif.

E. Implikasi Industri, Energi, dan Operasional

Secara praktis, peningkatan laju perpindahan panas dan efektivitas *heat exchanger* berdampak langsung pada operasi unit sintesis amonia. Ammonia *preheater* berfungsi untuk memastikan bahwa amonia cair mencapai temperatur yang sesuai sebelum memasuki tahap proses berikutnya. Apabila performa *preheater* rendah, temperatur outlet amonia dapat berada di bawah target. Kondisi ini dapat menyebabkan peningkatan beban pemanasan pada unit lain, penurunan efisiensi energi, serta potensi gangguan kestabilan proses.

Penggunaan *steam* sebagai fluida panas berpotensi meningkatkan efisiensi pemanasan karena energi laten

yang dilepaskan selama kondensasi dapat dimanfaatkan lebih efektif. Dengan laju perpindahan panas sekitar 2,03 kali lebih besar dibandingkan dengan kondisi aktual, steam mampu menyediakan energi panas yang lebih besar pada alat yang sama. Hal ini dapat mengurangi kebutuhan pemanasan tambahan dan meningkatkan pemanfaatan utilitas panas di pabrik.

Namun, penerapan steam juga perlu dianalisis dari aspek konsumsi energi dan biaya utilitas. Steam umumnya diproduksi melalui boiler yang membutuhkan bahan bakar, air umpan boiler, pengolahan air, serta sistem distribusi. Oleh karena itu, peningkatan performa termal harus dibandingkan dengan biaya produksi dan distribusi *steam*. Jika steam tersedia sebagai utilitas berlebih atau dapat diperoleh dari integrasi panas proses, maka penggunaan steam dapat menjadi pilihan yang menguntungkan. Sebaliknya, jika steam harus diproduksi secara tambahan, maka manfaat peningkatan perpindahan panas perlu dikaji terhadap tambahan biaya bahan bakar dan operasional boiler (Pitolin et al., 2023).

Dari sisi keselamatan, penggunaan steam memerlukan perhatian yang lebih besar dibandingkan *hot water*. Steam biasanya beroperasi pada tekanan dan temperatur yang lebih tinggi, sehingga perlu dipastikan bahwa heat exchanger, sistem pipa, valve, gasket, dan instrumentasi mampu menahan kondisi operasi tersebut. Selain itu, sistem drainase kondensat, *steam trap*, kontrol tekanan, dan proteksi terhadap *water hammer* harus diperhatikan. Akumulasi kondensat pada jalur steam dapat menyebabkan gangguan perpindahan panas dan meningkatkan risiko kerusakan mekanik (Kirsner, 2005).

Dengan demikian, penggunaan *steam* memang memberikan keuntungan termal, tetapi implementasinya tidak dapat hanya didasarkan pada peningkatan nilai (Q) dan efektivitasnya. Kajian teknis tambahan tetap diperlukan, terutama terkait batas desain tekanan dan temperatur, konsumsi steam, pengembalian kondensat, keamanan operasi, serta biaya utilitas. Analisis ini penting agar rekomendasi perubahan fluida panas dapat diterapkan secara aman, efisien, dan ekonomis di industri.

F. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa performa *heat exchanger* dipengaruhi oleh jenis fluida, sifat termofisika, kondisi aliran, dan konfigurasi alat. Rawashdeh dkk., menekankan pentingnya analisis LMTD dalam mengevaluasi gaya pendorong perpindahan panas pada *heat exchanger*. Dalam penelitian ini, peningkatan performa pada penggunaan steam dapat dikaitkan dengan kemampuan steam mempertahankan beda temperatur efektif yang lebih besar dibandingkan dengan *hot water* (Al-Rawashdeh, 2025).

Sidek dkk menunjukkan bahwa variasi jenis fluida dapat menyebabkan perbedaan efektivitas perpindahan panas karena setiap fluida memiliki kapasitas panas, densitas,

viskositas, dan konduktivitas termal yang berbeda. Hasil penelitian ini mendukung temuan tersebut, tetapi dengan konteks yang lebih spesifik pada ammonia preheater industri. Perbedaan antara *hot water* dan steam tidak hanya terletak pada sifat fisiknya, tetapi juga pada mekanisme perpindahan panas. *Hot water* mentransfer panas melalui panas sensibel, sedangkan steam mentransfer panas melalui panas laten kondensasi (Sidek, 2025).

Afgani melaporkan bahwa variasi kondisi aliran dapat memengaruhi efektivitas *heat exchanger*. Temuan tersebut relevan dengan penelitian ini karena perubahan fluida panas juga dapat memengaruhi karakteristik perpindahan panas pada sisi shell, termasuk koefisien perpindahan panas dan resistansi termal (Afgani et al., 2024). Sementara itu, konfigurasi *baffle*, *geometri tube*, dan luas area perpindahan panas berperan penting dalam performa termohidraulik *shell and tube heat exchanger*. Berbeda dari penelitian tersebut yang berfokus pada aspek desain dan simulasi, penelitian ini menekankan evaluasi berbasis data operasi aktual serta skenario perubahan fluida panas pada unit preheater ammonia (Eko Wahyu Saputro & Agus Jamaldi, 2025).

Kontribusi penelitian ini terletak pada analisis komparatif penggunaan *hot water* dan steam sebagai fluida panas pada ammonia preheater aktual di industri. Penelitian ini tidak hanya menunjukkan peningkatan numerik pada laju perpindahan panas dan efektivitas, tetapi juga menjelaskan penyebab peningkatan tersebut berdasarkan konsep panas laten, LMTD, NTU, koefisien perpindahan panas, dan fouling. Dengan demikian, penelitian ini memberikan dasar teknis bagi industri untuk mengevaluasi pemilihan fluida panas sebagai strategi optimasi kinerja *heat exchanger*.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan fluida panas dari *hot water* menjadi steam mampu meningkatkan kinerja termal pada Ammonia Preheater EA-101. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan laju perpindahan panas dari 9.801.117,25 Btu/jam menjadi 19.923.137,10 Btu/jam, atau sekitar 2,03 kali lebih besar dibandingkan kondisi aktual. Efektivitas penukar panas juga meningkat dari 53% menjadi 73%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa steam memberikan gaya pendorong termal dan kemampuan transfer panas yang lebih baik dibandingkan dengan *hot water*. Namun demikian, nilai *fouling factor* yang masih tinggi menunjukkan bahwa optimasi fluida panas perlu disertai dengan pengendalian fouling, evaluasi jadwal pembersihan, serta kajian kelayakan teknis-operasional terkait penggunaan *steam*.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan jenis fluida panas berpengaruh nyata terhadap kinerja termal Ammonia Preheater EA-101. Berdasarkan hasil perhitungan, penggunaan steam sebagai fluida panas menghasilkan

performa yang lebih baik dibandingkan *hot water*. Laju perpindahan panas meningkat dari 9.801.117,25 Btu/jam pada kondisi aktual menjadi 19.923.137,10 Btu/jam pada kondisi desain/redesain, atau sekitar 2,03 kali lebih besar. Efektivitas penukar panas juga meningkat dari 53% menjadi 73%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa steam memiliki kemampuan transfer panas yang lebih tinggi karena dapat memberikan gaya pendorong termal yang lebih besar dan, pada kondisi kondensasi, mampu melepaskan panas laten dalam jumlah signifikan.

Meskipun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa nilai *fouling factor* masih relatif tinggi, yaitu 0,0097 hr·ft²·°F/Btu pada kondisi aktual dan 0,0091 hr·ft²·°F/Btu pada kondisi desain/redesain. Nilai ini mengindikasikan adanya resistansi termal tambahan akibat fouling yang dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas. Oleh karena itu, peningkatan performa *heat exchanger* tidak cukup hanya dilakukan melalui perubahan fluida panas, tetapi juga perlu disertai pengendalian fouling, evaluasi kualitas fluida utilitas, dan penjadwalan pembersihan alat secara lebih tepat.

Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan dasar teknis bagi industri pupuk untuk mempertimbangkan penggunaan steam sebagai alternatif fluida panas pada ammonia preheater, terutama apabila target temperatur ammonia sulit dicapai dengan *hot water*. Namun, penerapan steam perlu disertai evaluasi terhadap ketersediaan utilitas, tekanan operasi, sistem kondensat, potensi *water hammer*, batas desain peralatan, serta biaya produksi dan distribusi steam. Dengan demikian, rekomendasi perubahan fluida panas harus mempertimbangkan aspek termal, operasional, keselamatan, dan ekonomi secara terpadu.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena analisis dilakukan berdasarkan data operasi aktual dan perhitungan teoritis, belum disertai pengujian langsung pada berbagai variasi kondisi operasi maupun simulasi termohidraulik yang lebih rinci. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi lapangan setelah perubahan fluida panas diterapkan, menganalisis variasi laju alir dan tekanan *steam*, menghitung konsumsi energi dan biaya utilitas secara kuantitatif, serta melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak desain *heat exchanger* atau CFD. Kajian lanjutan tersebut diperlukan agar optimasi *preheater ammonia* dapat menghasilkan rekomendasi yang lebih akurat, aman, dan layak diterapkan dalam industri pupuk.

DAFTAR RUJUKAN

- Achmad, F., Naldi, R., Uzlifah Janah, D., Sufra, R., & Yuniarti, R. (2024). Pengaruh Kenaikan Laju Alir Fluida Panas dan Arah Aliran terhadap Kinerja Plate and Frame Heat Exchanger. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 13(1), 40–47. <https://doi.org/10.32734/jtk.v13i1.14321>

- Afgani, A. A., Zaidar, C., Saputra Sigalingging, W., Sukarman, Khoirudin, K., & Abdulah, A. (2024). Evaluating the Thermal Performance of Shell-and-Tube Heat Exchangers: The Role of Flow Rate in Water-Based Systems. *Jurnal Teknik Mesin Mechanical Xplore*, 5(1), 38–49. <https://doi.org/10.36805/jtmmx.v5i1.6129>
- Akimoto, H., Anoda, Y., Takase, K., Yoshida, H., & Tamai, H. (2016). Condensation Heat Transfer. In H. Akimoto, Y. Anoda, K. Takase, H. Yoshida, & H. Tamai, *Nuclear Thermal Hydraulics* (Vol. 4, pp. 347–359). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55603-9_17
- Al Ghifary, A. N., Hasya, A. N., Riadz, T., & Cundari, L. (2022). Evaluasi Kinerja Heat Exchanger E-401 Pada Unit Pe3 Pt. Lotte Chemical Titan Nusantara. *Jurnal Sains Dan Teknologi Reaksi*, 20(01). <https://doi.org/10.30811/jstr.v20i01.3255>
- Ali, F., Amin Khan, T., Ahmad Qureshi, Z., Muzafar, M., & Li, W. (2024). Effectiveness of Multi Baffles With Trefoils on the Performance of Shell and Tube Heat Exchanger. *ASME 2024 Heat Transfer Summer Conference*, V001T14A006. <https://doi.org/10.1115/HT2024-130564>
- Al-Rawashdeh, S. A. (2025). CFD Analysis of Heat Exchanger Effectiveness and LMTD with Varying Pipe Length. *Emerging Science Journal*, 9(4), 2118–2131. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-04-020>
- Amani, Y. (2018). PREDICT TUBE OVERAL FOULINGIN HEATEXCHANGER 53 EA-1001. *Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, 2(1). <https://doi.org/10.29103/sisfo.v2i1.1005>
- Astawa, K., Surya, I. G. T. P., & Tenaya, I. G. N. P. (2022). Analisis Efektivitas Perpindahan Panas pada Alat Penukar Panas Jenis Water to Water. *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*, 6(1). <https://doi.org/10.18196/jmpm.v6i1.14896>
- Bell, K. J. (2004). Heat Exchanger Design for the Process Industries. *Journal of Heat Transfer*, 126(6), 877–885. <https://doi.org/10.1115/1.1833366>
- Bott, T. R. (2023). MITIGATION OF HEAT EXCHANGER FOULING. *Proceeding of Advances in Heat Transfer Engineering*, 15–27. <https://doi.org/10.1615/BHT4.30>
- Charach, C., & Zemel, A. (1992). Irreversible thermodynamics of phase change heat transfer: Basic principles and applications to latent heat storage. *Open Systems & Information Dynamics*, 1(3), 423–458. <https://doi.org/10.1007/BF02228849>
- Chrisanta, I. (2020). Optimasi Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh pada Ekonomiser Package Boiler BBF-4101 berdasarkan Faktor Fouling dan Kondisi Operasi di PT. XYZ. *Jurnal Teknik Mesin ITI*, 4(3), 99. <https://doi.org/10.31543/jtm.v4i3.498>
- Dampang, S. (2018). EvaluasiAlat Penukar Kalor (Cooler)di High Vacuum Unit(HVU)III (studi kasus di kilang XYZ). *Universitas Muhammadiyah Jakarta*, 7, 29–34. <https://doi.org/10.24853/konversi.7.1.6>
- Duraisamy, K., & Narasimmalu, R. (2026). Optimizing Heat Exchanger Performance and Thermal Efficiency Using Different Fluid Blends in Power Plants. *Heat Transfer*, 55(1), 168–182. <https://doi.org/10.1002/hjt.70067>
- Eko Wahyu Saputro & Agus Jamaldi. (2025). Studi Numerik Pengaruh Geometri Tube dan Variasi Baffle terhadap Perpindahan Kalor pada Heat Exchanger Tipe Shell and Tube. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro Dan Komputer*, 5(3), 162–170. <https://doi.org/10.51903/juritek.v5i3.5334>
- Evrans, S., & Kurt, M. (2024). Numerical analysis of fluid type and flow mass rate on logarithmic temperature difference and heat transfer coefficient of double pipe heat exchanger. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 85(24), 4133–4146. <https://doi.org/10.1080/10407782.2023.2252173>
- Fakheri, A. (2007). Heat Exchanger Efficiency. *Journal of Heat Transfer*, 129(9), 1268–1276. <https://doi.org/10.1115/1.2739620>
- Huang, W., Wu, Z., & Cheng, P. (2019). Heat and mass transfer characteristic of vertical falling film generator with annular structure for ammonia-water system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(6), 064701. <https://doi.org/10.1063/1.5125631>
- Isa, A., Hagura, Y., & Suzuki, K. (2006). Enhancement of Heat Transfer Rate and Thermal Efficiency by Combining Far Infrared Heating with Superheated Steam Treatment. *Japan Journal of Food Engineering*, 7(4), 225–232. <https://doi.org/10.11301/jsfe2000.7.225>
- Izza, A. N., Putri, K. I., Ariani, A., & Purwanto, D. (2025). KINERJA HEAT EXCHANGER – 03 TIPE SHELL AND TUBE PADA UNIT KILANG PPSDM MIGAS CEPU. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 11(4), 790–798. <https://doi.org/10.33795/distilat.v11i4.7524>
- Kang, D. H., Na, S.-I., Yoo, J. W., Lee, J. H., & Kim, M. S. (2019). Experimental study on the performance of a steam generation heat pump with the internal heat exchanging effect. *International Journal of Refrigeration*, 108, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.003>
- Kim, E., Yoshida, T., & Yashiki, T. (2014). Validation of dynamic heat-exchanger model for any combination of water and steam states using actual operating data. *Transactions of the JSME (in Japanese)*, 80(814), TEP0156–TEP0156. <https://doi.org/10.1299/transjsme.2014tep0156>
- Kirsner, W. (2005). Condensation-Induced Water Hammer in District Steam Systems: Circumstances Resulting in Catastrophic Failures. *Volume 4: Fluid Structure Interaction*, 875–881. <https://doi.org/10.1115/PVP2005-71590>
- Kitaev, D., Aralov, E., Bugaevsky, D., & Makarov, A. (2020). Modeling the work of a steam-water injector in a heat supply system. *E3S Web of*

- Conferences, 157, 06037.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706037>
- Lee, C. K. (2017). New Characterization of Fluid Temperature Profiles in a Heat Exchanger. *Heat Transfer Engineering*, 38(5), 549–555.
<https://doi.org/10.1080/01457632.2016.1195183>
- Li, H., You, Z., & Zhang, H. (2022). Experimental investigation on the heat transfer enhancement of steam condensation on tube with hydrophilic-hydrophobic hybrid surface. *Journal of Physics: Conference Series*, 2280(1), 012059.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2280/1/012059>
- Morrison, J., Deans, J., & Mcfeaters, J. (1998). Condensation of Steam on a Thick-Walled Horizontal Tube. *Heat Transfer Engineering*, 19(1), 17–24.
<https://doi.org/10.1080/01457639808939910>
- Nuruzzaman, M. A. (2018). ANALISA KEEFEKTIFAN HEAT EXCHANGER PIPA KOSENTRIS PADA PROSES AMONIAK DENGAN VARIASI LAJU ALIRAN. *Jurnal Teknik Mesin ITI*, 2(1).
<https://doi.org/10.31543/jtm.v2i1.51>
- Oberholzer, P. Z., Uren, K. R., Van Schoor, G., & Van Niekerk, W. (2019). Comparative study of steam vs hot water as primary heat transfer medium for a laboratory scale two-tank heated system. *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, 559–564.
<https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704750>
- Pitolin, V., Koloshkin, N., & Babamuratov, K. (2023). EFFICIENT USE OF STEAM THERMAL ENERGY. *HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY. Series C FUNDAMENTAL SCIENCES*, (1), 49–55.
<https://doi.org/10.52928/2070-1624-2023-40-1-49-55>
- Raghuvanshi, N. S., Johri, A., Saxena, M., Kumar, A., & Gori, Y. (2025). Economic and environmental aspects of heat exchanger applications. In M. K. Awasthi, A. Kumar, N. Dutt, & S. Thangavel, *Heat Exchanger Technologies for Sustainable Renewable Energy Systems* (1st ed., pp. 158–189). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003534785-9>
- Roetzel, W., & Na Ranong, C. (2018). Thermal calculation of heat exchangers with simplified consideration of axial wall heat conduction. *E3S Web of Conferences*, 70, 02013.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187002013>
- Rozi, K., Fajar Tk, B., & Ikhwanul Mukmin, D. G. (2025). Experimental Study of Thermal Performance of Air-Cooled Cross-Flow Heat Exchanger. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 09(09), 30–33.
<https://doi.org/10.47001/IRJIET/2025.909005>
- Shen, S., Liu, H., Gong, L., Yang, Y., & Liu, R. (2015). Thermal analysis of heat transfer performance in a horizontal tube bundle. *Desalination and Water Treatment*, 54(7), 1809–1818.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.895780>
- Sidek, D. (2025). EFEK PERUBAHAN JENIS FLUIDA PADA ALIRAN DI HEAT EXCHANGER DENGAN SIMULASI ANSYS FLUENT. *Jurnal Ilmu Fisika Dan Terapannya*, 12(2), 63–79.
<https://doi.org/10.21831/jifta.v12i2.24993>
- Singh, D. K., Villamayor, A., & Lacheheb, L. (2021). *Shell and tube heat exchanger progression fouling and its mitigation using chemical cleaning process*. 030003. <https://doi.org/10.1063/5.0036112>
- Syahputra, A., Asnawi, A., Nayan, A., Alchalil, A., & Islami, N. (2023). Evaluation of Fluid Flow Velocity Variations on the Plate Heat Exchanger Performance. *TRANSMISI*, 19(1), 49–55.
<https://doi.org/10.26905/jtmt.v19i1.9650>
- Wardhani, A. S. B., Labumay, A. T., & Ningsih, E. (2022). Influence of Fluid Inflow Rate on Performance Effectiveness of Shell and Tube Type Heat Exchanger. *Journal of Mechanical Engineering, Science, and Innovation*, 2(1), 9–15.
<https://doi.org/10.31284/j.jmesi.2022.v2i1.2993>
- Waware, S. Y., Kore, S. S., Mache, A., & Kurhade, A. S. (2025). *Integrated CFD and Experimental Approach for Thermal Performance Evaluation of a Tubular Minijet Heat Exchange*.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7062204/v1>
- Yao, J. (2018). A Review of Industrial Heat Exchange Optimization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108, 042036.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042036>
- Zhao, Q., & Muller-Steinhagen, H. (2023). INFLUENCE OF SURFACE PROPERTIES ON HEAT EXCHANGER FOULING. *Proceeding of Proceedings of an International Conference on Mitigation of Heat Exchanger Fouling and Its Economic and Environmental Implications*, 217–228. <https://doi.org/10.1615/1-56700-172-6.240>