



Analisis Kinerja *Heat Exchanger* Tipe *Shell and Tube* Berdasarkan Nilai *Fouling Factor*, Efisiensi, dan *Pressure Drop* sebagai Indikator Kinerja Operasional

Rantika Sekar Nandira ¹, Sarah Dampang ^{1*}, Sesilia Romalinda ¹, Sheryl Ayesha Bruning ¹, dan Jatmiko ²

Sitasi: Nandira, Rantika S.; Dampang, Sarah; Romalinda, Sarah; Bruning, S. Ayesha; Jatmiko. (2026). Analisis Kinerja *Heat Exchanger* Tipe *Shell and Tube* Berdasarkan Nilai *Fouling Factor*, Efisiensi, dan *Pressure Drop* sebagai Indikator Kinerja Operasional. J-TETA: Jurnal Teknik Terapan, V(5) N(1), hlm. 78 – 84.



Copyright: © 2026 oleh para penulis. Karya ini dilisensikan di bawah Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

¹ Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, 41361, Indonesia;

² Program Studi Teknik Pengolahan Minyak, PEM Akamigas Cepu, Blora, 58315, Indonesia;

* Korespondensi: sarah.dampang@staff.unsika.ac.id

Abstract: The oil and gas industry heavily relies on the efficiency of shell-and-tube heat exchangers to maintain operational stability, optimize energy consumption, and preserve product quality. However, the performance of these units is often degraded by fouling, which increases thermal resistance. This study aims to evaluate the actual performance of a heat exchanger unit in the oil and gas industry by analyzing operational data over a specific period. The research methodology involved direct field observation and quantitative analysis based on key performance parameters, including the overall heat transfer coefficient, fouling factor, thermal efficiency, and pressure drop. The fouling factor was calculated as the difference between the clean and dirty heat transfer coefficients, while thermal efficiency was determined as the ratio of the actual heat transferred to the maximum possible heat transfer. Pressure drop analysis was conducted on both the shell and tube sides using friction factor correlations and fluid hydrodynamic parameters to evaluate flow characteristics. The results indicate a fouling factor of $0.2076 \text{ hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$, which significantly exceeds the standard threshold proposed by Kern ($0.002\text{--}0.005 \text{ hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$). This high level of fouling results in a heat transfer efficiency of only 64.62%, well below the ideal operational standard of 75%. Hydrodynamic analysis shows that the pressure drop is very low ($0.0003\text{--}0.0006 \text{ psi}$), indicating that the flow is in the laminar regime ($Re < 2100$). This laminar condition reduces heat transfer effectiveness due to the dominance of conduction and accelerates the deposition of solid particles on the heat transfer surface. Although the unit is still considered operable, the evaluation results highlight the need for immediate cleaning and flow rate optimization to restore the equipment's performance to optimal levels and prevent further energy losses.

Keywords: Heat Exchanger, Shell and Tube, Fouling Factor, Pressure Drop, Laminar Flow.

Abstrak: Industri minyak dan gas bumi sangat bergantung pada efisiensi alat penukar panas (*Heat Exchanger*) tipe *shell and tube* untuk menjaga stabilitas operasi, mengoptimalkan konsumsi energi dan mempertahankan kualitas produk. Namun, performa alat ini seringkali terdegradasi oleh fenomena *fouling* yang dapat meningkatkan resistansi termal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja aktual *Heat Exchanger* pada sebuah unit di industri migas melalui pengamatan data operasional selama periode tertentu. Metode penelitian dilakukan dengan observasi langsung di lapangan serta analisis kuantitatif berbasis parameter kinerja utama, meliputi koefisien perpindahan panas, *fouling factor*, efisiensi termal, dan *pressure drop*. Perhitungan *fouling factor* dilakukan menggunakan pendekatan perbedaan koefisien perpindahan panas bersih dan kotor, sedangkan efisiensi termal dihitung berdasarkan rasio antara panas aktual yang ditransfer terhadap panas maksimum yang dapat ditransfer. Analisis *pressure drop* dilakukan pada sisi shell dan tube menggunakan persamaan faktor gesek dan parameter hidrodinamika fluida untuk mengevaluasi karakteristik aliran. Hasil penelitian menunjukkan nilai *fouling factor* sebesar $0,2076 \text{ jam}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$, yang secara signifikan melampaui ambang batas standar yang dikemukakan Kern ($0,002\text{--}0,005 \text{ jam}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$). Tingginya kadar pengotor ini berakibat pada rendahnya efisiensi perpindahan panas yang hanya mencapai 64,62%, jauh di bawah standar ideal operasional sebesar 75%. Analisis

hidrodinamika melalui *nilai pressure drop* yang sangat rendah (0,0003–0,0006 psi) mengonfirmasi bahwa aliran fluida berada dalam rezim laminar ($Re < 2100$). Kondisi laminar ini terbukti memperburuk efektivitas transfer panas karena dominasi konduksi dan mempercepat laju deposisi partikel padat pada permukaan pipa. Meskipun unit saat ini masih dinyatakan layak beroperasi, hasil evaluasi menegaskan perlunya tindakan pembersihan (*cleaning*) segera serta optimalisasi laju alir fluida untuk mengembalikan performa alat ke kondisi optimal guna mencegah kerugian energi yang lebih besar.

Kata kunci: *Heat Exchanger, Shell and Tube, Fouling Factor, Pressure Drop, Aliran Laminar.*

1. Pendahuluan

Peralatan proses memegang peranan krusial dalam industri minyak dan gas bumi, khususnya alat penukar panas tipe *shell and tube*. Perangkat ini berfungsi mengalirkan energi termal di antara dua fluida yang memiliki perbedaan suhu [1]. Tingkat efisiensi perangkat ini memiliki korelasi langsung terhadap optimalisasi konsumsi energi, stabilitas proses operasional, serta standar kualitas produk yang dihasilkan [2,3]. Kinerja alat penukar panas cenderung terdegradasi seiring waktu akibat akumulasi *fouling*, yaitu akumulasi material yang tidak diinginkan pada permukaan perpindahan panas [4,5]. Dampak ekonomi dari degradasi performa akibat *fouling* sangat signifikan; studi menunjukkan bahwa kerugian di sektor industri Amerika Serikat saja diperkirakan mencapai 1,4 miliar USD per tahun yang disebabkan oleh hilangnya efisiensi energi dan peningkatan biaya pemeliharaan [6].

Penimbunan deposit pada permukaan perpindahan panas ini meningkatkan resistansi termal, yang secara langsung mereduksi efektivitas termal perangkat [7]. Degradasi efisiensi sering kali dipicu oleh faktor-faktor seperti serangan korosif, deposisi kerak di dalam pipa, atau kegagalan mekanis berupa kebocoran [8], [9]. Penelitian terdahulu mengungkapkan bahwa peningkatan resistansi *fouling* sebesar 100% dapat menurunkan rata-rata perpindahan panas sebesar 0,37%, sementara kenaikan nilai faktor *fouling* dari 0,00015 menjadi 0,00035 mampu menurunkan efisiensi termal sistem hingga 0,448% [10]. Selain menghambat aliran panas, akumulasi deposit juga mempersempit luas penampang aliran fluida, yang memicu kenaikan kehilangan tekanan (*pressure drop*) secara drastis [11]. Hal ini berdampak pada peningkatan beban kerja pompa dan konsumsi energi operasional secara keseluruhan [5]. Dari sisi lingkungan dan efisiensi bahan bakar pun, degradasi performa termal akibat *fouling* memaksa sistem pemanas (seperti *furnace*) bekerja lebih keras untuk mengompensasi hilangnya panas, yang berujung pada lonjakan emisi CO₂ yang lebih tinggi [12].

Oleh karena itu, kondisi ini menuntut adanya inspeksi berkala dan evaluasi performa demi menjaga reliabilitas sistem [2,7]. Mengingat urgensi tersebut, pelaksanaan analisis kinerja terhadap *Heat Exchanger* tipe *shell and tube* menjadi sangat esensial. Evaluasi ini bertujuan untuk mendiagnosis kondisi aktual perangkat serta merumuskan strategi pemeliharaan yang berbasis data guna untuk menjaga stabilitas keberlangsungan operasional industri [11].

2. Bahan dan Metode

Studi ini dilaksanakan dengan melakukan observasi langsung terhadap unit *Heat Exchanger* pada salah satu perusahaan yang bergerak di sektor hulu minyak dan gas bumi.

2.1. Fouling Factor

Fouling factor didefinisikan sebagai resistansi terhadap transfer panas yang dipicu oleh akumulasi deposit di dalam unit penukar panas [4,7]. Endapan ini dapat muncul dari partikel-partikel yang terbawa oleh aliran fluida maupun sebagai produk sampingan dari korosi akibat karakteristik kimiawi fluida tersebut [13].

$$R_d = \frac{U_c - U_d}{U_c \times U_d} \quad (1)$$

2.2. Efisiensi

Secara terminologi, efisiensi *Heat Exchanger* merujuk pada rasio antara jumlah kalor yang diterima oleh fluida dingin terhadap total kalor yang diserahkan oleh fluida panas [14]. Tingkat efisiensi ini dipengaruhi oleh sejumlah variabel kritis, termasuk kondisi kebersihan permukaan perpindahan panas, gradien temperatur antar fluida, serta tingkat relevansi desain alat terhadap parameter operasional di lapangan[3].

$$Efisiensi (\eta) = \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_{\text{maksimum}}} \times 100\% \quad (2)$$

2.3. Pressure Drop

Penurunan tekanan (*pressure drop*) memiliki korelasi langsung dengan konsumsi energi pompa dan berfungsi sebagai indikator adanya anomali operasional, seperti penyumbatan atau akumulasi *fouling* di dalam sistem penukar panas[3,7]. Berdasarkan standar desain, ambang batas aman *pressure drop* untuk aliran likuida biasanya ditetapkan tidak melampaui rentang 5–10 psi [15].

a) *Shell*

$$\Delta P_s = \frac{f \times G_s^2 \times I D_s \times (N+1)}{5.22 \times 10^{10} \times D_e \times S G_s \times \phi_s} \quad (3)$$

b) *Tube*

$$\Delta P_t = \frac{f \times G_t^2 \times L \times n}{5.22 \times 10^{10} \times D \times S G_t \times \phi_t} \quad (4)$$

$$\Delta P_r = \frac{4 \times n \times v^2}{S G_t \times 2 g'} \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_t + \Delta P_r \quad (6)$$

3. Pembahasan

Tabel 1. Hasil perhitungan analisis kinerja Heat Exchanger berdasarkan indikator kinerja operasional

Data Perhitungan	Satuan	Analisis
Rd	jam.ft ² .°F/Btu	0,2076
η	%	64,62%
ΔP_s	Psi	0,0003
ΔP_t	Psi	0,0006

Melalui perhitungan analisis kinerja, didapatkan nilai faktor pengotoran (*fouling factor*) seperti pada Tabel 1. sebesar 0,2076 jam.ft².°F/Btu. Parameter ini ditentukan berdasarkan perbandingan antara koefisien perpindahan panas saat kondisi bersih (*Uc*) sebesar 9,04 Btu/jam.ft².°F dengan kondisi operasional saat ini (*Ud*) 3,14 Btu/jam.ft².°F. Deviasi yang signifikan antara *Uc* dan *Ud* mengonfirmasi bahwa akumulasi deposit telah menciptakan resistansi termal yang menghambat proses transfer panas secara masif [11].

Berdasarkan standar nilai *fouling factor* untuk *shell and tube heat exchanger* menurut Kern (1955) yang berkisar antara 0,002 hingga 0,005 jam.ft².°F/Btu, nilai Rd pada unit ini telah melampaui ambang batas normal secara signifikan. Kondisi ini mengindikasikan akumulasi deposit yang sangat masif pada permukaan perpindahan panas. Fenomena tersebut diduga dipicu oleh kandungan fraksi berat hidrokarbon, *wax*, serta partikel padat seperti pasir dan sulfur dalam fluida residu serta *crude oil* [13,16]. Sejalan dengan teori Kern (1950), suhu operasional pada sisi *shell* yang ditunjukkan pada Tabel 2. dapat mencapai 207–223°C jauh di atas titik kritis 121°C menjadi faktor akselerasi utama terbentuknya kerak dan pengendapan hidrokarbon.

Tabel 2. Data *shell and tube* pada Heat Exchanger yang didapat

Shell (Residu)					
Tanggal	Kapasitas (L/day)	Suhu Masuk (°C)	Suhu Keluar (°C)	Densitas (kg/m ³)	Specific Gravity
08/07/2025	44.600	223	117	898,8000	0,8997
09/07/2025	46.607	232	125	884,3500	0,8852
10/07/2025	77.709	242	134	910,3000	0,9112
11/07/2025	60.127	230	132	902,3000	0,9032

14/07/2025	44.602	229	122	906,5000	0,9074
15/07/2025	40.763	86	200	903,7500	0,9046
16/07/2025	45.163	210	122	900,7500	0,9016
Rata-rata	51367,2857	207,4286	134,5714	900,9643	0,9018

<i>Tube (Crude Oil)</i>					
Tanggal	Kapasitas, L/day	Suhu Masuk, °C	Suhu Keluar, °C	Densitas, kg/m ³	Specific Gravity
08/07/2025	272.677	78	103	829,2000	0,8300
09/07/2025	275.957	82	109	821,7000	0,8225
10/07/2025	269.700	80	113	828,5500	0,8293
11/07/2025	269.611	78	103	828,9000	0,8297
14/07/2025	173.242	72	112	833,7500	0,8345
15/07/2025	152.607	76	107	833,9000	0,8347
16/07/2025	161.645	74	107	833,3000	0,8341
Rata-rata	225062,7143	77,1429	107,7143	829,9000	0,8307

Penentuan nilai *fouling factor* memungkinkan evaluasi lebih lanjut terhadap efisiensi termal *Heat Exchanger*. Berdasarkan analisis neraca panas, jumlah energi termal yang dilepaskan oleh fluida panas (residu) pada sisi *shell* tercatat sebesar 323.418 Btu/jam, sementara energi yang diserap oleh fluida dingin (*crude oil*) pada sisi *tube* mencapai 500.485 Btu/jam. Hasil ini menunjukkan efisiensi perpindahan panas sebesar 64,62%. Kesenjangan nilai tersebut mengindikasikan adanya kehilangan panas (*heat loss*) yang signifikan, yakni sebesar 177.067 Btu/jam atau setara dengan 35,38% dari total potensi transfer panas.

Capaian efisiensi pada Tabel 1. sebesar 64,62% ini tergolong rendah karena berada di bawah standar ideal operasional *Heat Exchanger* yang umumnya ditetapkan di atas 75%. Besarnya tingkat kehilangan panas tersebut mengindikasikan bahwa sebagian besar energi termal dari fluida panas gagal ditransfer ke fluida dingin akibat tingginya resistansi termal atau disipasi energi ke lingkungan sekitar [17].

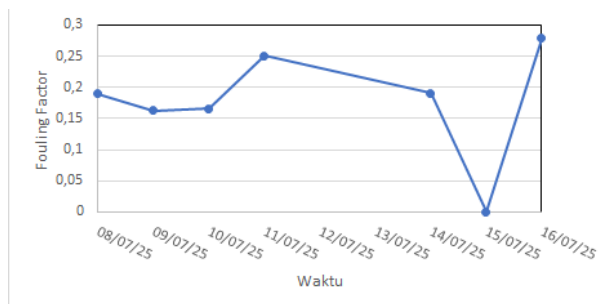
Rendahnya efisiensi termal ini berkorelasi kuat dengan tingginya *fouling factor* serta karakteristik hidrodinamika fluida. Data penelitian menunjukkan bahwa aliran pada kedua sisi *Heat Exchanger* bersifat laminar dengan bilangan Reynolds (Re) di bawah 2100. Dalam rezim laminar, mekanisme perpindahan panas didominasi oleh konduksi yang kurang efisien dibandingkan konveksi paksa pada aliran turbulen, dikarenakan gaya viskositas yang lebih dominan daripada gaya inersia. Kondisi ini diperparah oleh laju alir yang rendah, yang meskipun memperlama waktu tinggal, justru menurunkan koefisien perpindahan panas konvektif secara keseluruhan [18]. Kondisi aliran laminar turut mempercepat laju deposisi partikel padat pada dinding saluran, yang pada gilirannya mempercepat pembentukan *fouling*. Tanpa adanya gaya angkat dan turbulensi yang memadai, partikel-partikel tersuspensi dalam fluida cenderung mengendap secara permanen pada permukaan perpindahan panas [19].

Selain parameter efisiensi dan faktor pengotoran, analisis performa *Heat Exchanger* juga mencakup evaluasi penurunan tekanan (*pressure drop*). Berdasarkan perhitungan, Tabel 1. menunjukkan nilai *pressure drop* pada sisi *shell* tercatat sebesar 0,0003 psi dan pada sisi *tube* sebesar 0,0006 psi. Secara teknis, rendahnya nilai ΔP ini mengindikasikan bahwa resistansi aliran akibat friksi dinding maupun akumulasi deposit belum mencapai ambang batas yang dapat mengganggu stabilitas operasional sistem [20].

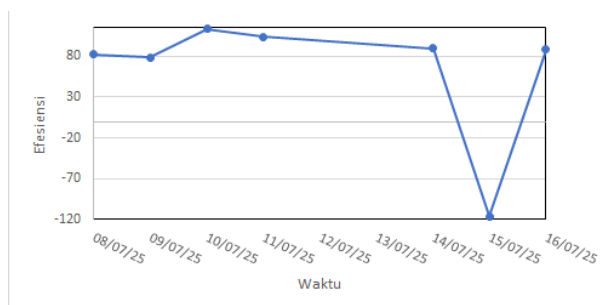
Meskipun demikian, interpretasi terhadap parameter ini memerlukan ketelitian yang tinggi. Rendahnya nilai *pressure drop* tidak secara otomatis merefleksikan kondisi kebersihan unit penukar panas. Dalam operasional *Heat Exchanger*, besaran ΔP yang sangat minimal selaras dengan laju alir massa yang rendah dan rezim aliran laminar, di mana gaya gesek antara fluida dan dinding pipa relatif kecil [21]. Pada kondisi kecepatan rendah tersebut, penurunan tekanan menunjukkan hubungan linear yang berbanding lurus dengan kecepatan aliran [22].

Sekalipun nilai ΔP masih berada dalam batas aman operasional, kondisi ini sebenarnya tidak ideal karena rezim aliran laminar berkontribusi pada dua permasalahan fundamental: rendahnya koefisien perpindahan panas serta akselerasi laju deposisi *fouling* [20,23]. Dengan demikian, rendahnya nilai ΔP dalam kasus ini lebih mencerminkan ketidakoptimalan kecepatan aliran daripada menjadi indikator kebersihan internal alat yang prima [4,7,20].

Untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika kinerja *Heat Exchanger* selama periode pengamatan, dilakukan analisis tren parameter *fouling factor*, efisiensi, dan *pressure drop* terhadap waktu. Berdasarkan grafik hubungan parameter kinerja terhadap waktu, nilai *fouling factor* menunjukkan kecenderungan fluktuatif dengan tren peningkatan pada akhir periode pengamatan seperti yang terlihat pada Gambar 1.. Hal ini mengindikasikan adanya akumulasi deposit secara bertahap pada permukaan perpindahan panas yang menyebabkan peningkatan resistansi termal [9,24].

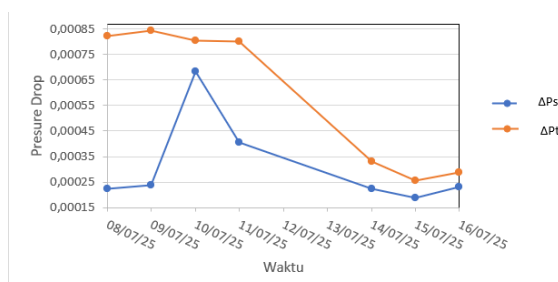


Gambar 1. Grafik perubahan *fouling factor* selama periode waktu analisis



Gambar 2. Grafik perubahan efisiensi selama periode waktu analisis

Seiring dengan peningkatan *fouling factor*, efisiensi *Heat Exchanger* yang ditunjukkan oleh Gambar 2. juga cenderung mengalami perubahan. Hubungan ini menunjukkan korelasi terbalik antara kedua parameter, di mana semakin besar nilai *fouling*, maka kemampuan alat dalam mentransfer panas menjadi semakin rendah [25]. Penurunan efisiensi ini memperkuat hasil analisis sebelumnya yang menunjukkan adanya kehilangan panas (*heat loss*) yang signifikan dan memiliki hubungan eksponensial terhadap pertumbuhan *fouling* [10].



Gambar 3. Grafik perubahan *pressure drop* selama periode waktu analisis

Sementara itu, nilai *pressure drop* pada sisi *shell* dan *tube* menunjukkan pola fluktuatif seperti pada Gambar 3. dengan kecenderungan relatif rendah. Secara teoritis, peningkatan *fouling* dapat menyebabkan kenaikan *pressure drop* akibat penyempitan area aliran [26]. Namun, pada kondisi ini nilai ΔP tetap rendah yang mengindikasikan bahwa sistem masih berada dalam rezim aliran laminar dengan kecepatan aliran yang relatif kecil [15].

Pada salah satu titik pengamatan, terlihat adanya anomali data yang ditunjukkan oleh penurunan drastis *fouling factor* serta nilai efisiensi yang tidak normal. Secara keseluruhan, hasil analisis tren ini memperkuat bahwa *fouling factor*,

efisiensi, dan *pressure drop* merupakan parameter yang saling berkaitan dan dapat digunakan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi kinerja operasional *Heat Exchanger* tipe *shell and tube* [1,10,27].

4. Kesimpulan

Hasil evaluasi kinerja *Heat Exchanger* menunjukkan indikasi pengotoran yang kritis dengan nilai *fouling factor* mencapai 0,2076, yang merepresentasikan akumulasi deposit masif pada permukaan termal. Kondisi ini berdampak langsung pada penurunan efisiensi hingga angka 64,62%, nilai yang berada di bawah ambang batas operasional ideal. Di sisi lain, rendahnya *pressure drop* (0,0003–0,0006 psi) mengonfirmasi keberadaan rezim aliran laminar yang menghambat efektivitas perpindahan panas. Meskipun unit dinyatakan masih layak beroperasi, sinergi ketiga parameter tersebut menegaskan urgensi tindakan pembersihan serta modifikasi laju alir guna memulihkan performa alat ke tingkat optimal.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas terselesainya penulisan artikel ini. Penulis sampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Dr. Ir. Sarah Dampang, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Kerja Praktek yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta koreksi mendalam selama proses studi dan penyusunan naskah ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak Jatmiko, A.Md., selaku Dosen Pembimbing Lapangan di unit kilang minyak dan gas bumi, atas bimbingan teknis, pendampingan selama pengambilan data, serta wawasan berharga mengenai operasional *heat exchanger* di lapangan.

Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada seluruh staf produksi dan staf laboratorium di unit kilang minyak dan gas bumi tempat penulis melaksanakan kerja praktek, atas bantuan teknis, dukungan administratif, serta fasilitas yang diberikan selama proses pengumpulan data berlangsung. Penulis juga mengucapkan apresiasi setinggi-tingginya kepada rekan satu tim, Sesilia Romalinda dan Sheryl Ayesha Bruning, atas kerja sama, diskusi, motivasi, dan dukungan penuh sejak persiapan hingga penyelesaian artikel ini. Semua kontribusi dan bantuan yang diberikan sangat berarti dan menjadi bagian dari penelitian ini.

Referensi

- [1] K. Y. Ravelo-Mendivelso, M. T. Villate-Fonseca, J. D. Hernández-Vásquez, O. M. Miranda-Samper, P. J. Pacheco-Torres, and M. J. Campuzano, "Thermal and Hydrodynamic Performance Analysis of a Shell and Tube Heat Exchanger Using the AHP Multicriteria Method," *International Journal of Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 522–535, 2023, doi: 10.14716/ijtech.v14i3.6000.
- [2] S. A. Marzouk, M. M. Abou Al-Sood, E. M. S. El-Said, M. M. Younes, and M. K. El-Fakharany, "A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers," Aug. 01, 2023, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s10973-023-12265-3.
- [3] S. K. Lodhi, H. K. Hussain, and I. Hussain, "Using AI to Increase Heat Exchanger Efficiency: An Extensive Analysis of Innovations and Uses," *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts*, vol. 3, no. 4, pp. 1–14, Sep. 2024, doi: 10.47709/ijmdsa.v3i4.4617.
- [4] S. Dampang, "Evaluasi Alat Penukar Kalor (Cooler) di High Vacuum Unit (HVU) III (Studi Kasus di Kilang XYZ)" *Jurnal Konversi*, vol. 7, no. 1, Apr. 2018.
- [5] S. K. Ogbonnaya and O. O. Ajayi, "Fouling phenomenon and its effect on heat exchanger: A review," *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, vol. 9, 2017, doi: 10.5098/hmt.9.31.
- [6] A. C. Caputo, P. M. Pelagagge, and P. Salini, "Joint economic optimization of heat exchanger design and maintenance policy," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1381–1392, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.12.033.
- [7] mohsen souri Ali and N. Borujerdi, "The Impact of Fouling on Heat Transfer, Pressure Drop, and the Effectiveness of Heat Exchangers," *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 6, no. 5, pp. 12264–12275, May 2025, doi: 10.55248/gengpi.6.0525.18145.

- [8] A. B. D. Nandiyanto, R. Ragadhita, S. R. Putri, R. Maryanti, and T. Kurniawan, "Design of heat exchanger for the production of zinc imidazole framework-8 (ZIF-8) particles," *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, vol. 9, 2021, doi: 10.36909/jer.ASSEEE.16035.
- [9] M. A. Cucumo, M. Mele, F. Nicoletti, A. Galloro, D. Perrone, and N. Greco, "Evaluation of crude oil fouling formation in a heat exchanger with twisted tape inserts," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 927–935, 2019, doi: 10.18280/ijht.370401.
- [10] F. S. Musonye, H. Ndiritu, and R. Kinyua, "Performance assessment of heat exchangers for process heat integration," *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, vol. 118, no. 2, pp. 211–224, 2021, doi: 10.32604/EE.2021.013890.
- [11] H. Ceylan and B. Çınar, "The Effect of Fouling on the Baffle Spacing of a Shell and Tube Heat Exchanger," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 24, no. 3, pp. 584–592, Dec. 2020, doi: 10.19113/sdufenbed.678736.
- [12] A. Chambon, Z. Anxionnaz-Minvielle, G. Cwicklinski, N. Guintrand, A. Buffet, and B. Vinet, "Shell-and-Tube Heat Exchanger Geometry Modification: An Efficient Way to Mitigate Fouling," *Heat Transfer Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 170–177, Jan. 2020, doi: 10.1080/01457632.2018.1522093.
- [13] M. Cucumo, A. Galloro, N. Greco, M. Mele, F. Nicoletti, and D. Perrone, "Thermal Fluid Dynamics Analysis of Crude Oil Fouling in a Heat Exchanger with Internal Mechanical Inserts," *TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science*, vol. 63, no. 2–4, pp. 151–157, Jun. 2019, doi: 10.18280/ti-ijes.632-406.
- [14] A. S. Abbas and A. A. Mohammed, "Enhancement Of Plate-Fin Heat Exchanger Performance with Aid of Various Types of Fin Configurations: A Review," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 99, no. 2, pp. 48–66, 2022, doi: 10.37934/arfmts.99.2.4866.
- [15] A. B. D. Nandiyanto *et al.*, "Computational Calculation on the Shell and Tube-Type Heat Exchanger for Lanthanum Oxide (La₂O₃) Nanoparticle Production Process for Energy-Related Material Application," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 10, no. 2, pp. 715–719, Apr. 2023, doi: 10.18280/mmep.100243.
- [16] S. Emani, N. A. Yusoh, R. M. Gounder, and K. Z. K. Shaari, "Effect of operating conditions on crude oil fouling through CFD simulations," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 1034–1044, Dec. 2017, doi: 10.18280/ijht.350440.
- [17] N. Kamar, M. L. P. Mostefa, H. Muhr, and P.-O. Jost, "Identification of areas susceptible to calcium carbonate formation on the surface of a plate and gasket heat exchanger," *Chemical Engineering Communications*, vol. 6, no. 9, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1080/00986445.2022.2075741.
- [18] S. Luthfia Romadhona *et al.*, "Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV (SENASTITAN IV) Surabaya," 2024.
- [19] dan Amru Fathony Lubis and J. Teknik Mesin STT-PLN Menara PLN Jl Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, "PENGARUH FOULING TERHADAP LAJU PERPINDAHAN PANAS PADA SUPERHEATER BOILER CFB PLTU SEBALANG," *Jurnal Power Plant*, vol. 6, no. 1, 2018.
- [20] M. Awais and A. A. Bhuiyan, "Recent advancements in impedance of fouling resistance and particulate depositions in heat exchangers," Oct. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.011.
- [21] M. Everts and J. P. Meyer, "Relationship between pressure drop and heat transfer of developing and fully developed flow in smooth horizontal circular tubes in the laminar, transitional, quasi-turbulent and turbulent flow regimes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 117, pp. 1231–1250, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.072.
- [22] M. Picón-Núñez, J. C. Melo-González, and J. Luis García- Castillo, "Use of Heat Transfer Enhancement Techniques in the Design of Heat Exchangers," in *Advances in Heat Exchangers*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.78953.
- [23] Z. Zhuang, J. Zhao, C. Zhang, and H. Yin, "Numerical simulation of deposition characteristics of microorganisms and particles mixed fouling in sewage heat exchange tube," May 31, 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-4447058/v1.
- [24] K. Ikram, K. Djilali, D. Abdennasser, R. Al-Sabur, B. Ahmed, and A. N. Sharkawy, "Comparative analysis of fouling resistance prediction in shell and tube heat exchangers using advanced machine learning techniques," *Research on Engineering Structures and Materials*, vol. 10, no. 1, pp. 253–270, 2024, doi: 10.17515/resm2023.858en0816.
- [25] R. Jradi, A. Fguiri, C. Marvillet, and M. Razak Jeday, "Heat exchanger fouling in phosphoric acid concentration: analysis of field data," 2018. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-02388592v1>
- [26] O. U. 'Rehman, N. E. M. 'Rozali, and M. G. 'Ramasamy, "Fouling and Mechanism," in *Heat Transfer - Fundamentals, Enhancement and Applications*, S. N. Kazi, Ed., 2022, pp. 277–278.
- [27] A. N. Yudhatama, "STUDY KELAYAKAN HEAT EXCHANGER NOMOR 3 PADA KILANG PPSDM MIGAS CEPU," *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, vol. 15, no. 1, p. 59, Apr. 2023, doi: 10.24843/jem.2022.v15.i01.p08.