ANALISIS KINERJA LEAN/RICH EXCHANGER UNTUK PENENTUAN PRIORITAS PEMBERSIHAN

Muhammad Bisma Megantara[1], Mochammad Faqihudin[2], Tun Sriana[1*]
[1]Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No.37 Cepu Blora 58315
[2]Job JOB Pertamina - Medco E&P Tomori Sulawesi, Jl. Jend. Gatot Subroto Kav. 71–73, Pancoran, Jakarta Selatan 12870
E-mail: tun.sriana@gmail.com

ABSTRAK

Lean/Rich Exchanger merupakan alat penukar panas yang berperan penting dalam memulihkan panas pada unit pengolahan gas berbasis amina, namun kinerjanya dapat menurun akibat fouling pada permukaan perpindahan panas sehingga memerlukan pembersihan. Keterbatasan sumber daya perawatan menyebabkan hanya satu unit yang dapat dibersihkan dalam satu waktu, sehingga diperlukan metode obyektif untuk menentukan unit prioritas. Penelitian dilakukan pada empat unit *Lean/Rich Exchanger* (Unit A, B, C, dan D), dengan tiga unit beroperasi paralel (A, B, D) dan satu unit siaga (C). Karena Unit C tidak memiliki data operasi, evaluasi kuantitatif hanya dilakukan terhadap tiga unit aktif (A, B, dan D). Penelitian ini bertujuan menentukan unit prioritas pembersihan berdasarkan koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dan faktor pengotor (Rd). Metode yang digunakan adalah pendekatan Kern, meliputi perhitungan beban panas, koefisien perpindahan panas aktual (UD), koefisien perpindahan panas desain terkoreksi terhadap laju alir aktual (UC), faktor pengotor, serta persentase performa berdasarkan data operasi sekunder dari sistem historian/DCS. Hasil penelitian menunjukkan Unit B memiliki performa terendah sebesar 55,37% dengan faktor pengotor tertinggi sebesar 0,0132 hr.ft².°F/Btu, diikuti Unit A (81,63%; Rd 0,00393 hr.ft².°F/Btu), sedangkan Unit D mencatat performa mendekati desain sebesar 100,68% (Rd −0,00011 hr.ft².°F/Btu, setara dengan Rd ≈ 0). Unit B ditetapkan sebagai prioritas utama pembersihan, sedangkan Unit C yang berstatus siaga dapat dimanfaatkan sebagai unit rotasi selama pembersihan berlangsung. Penelitian ini terbatas pada kondisi sebelum pembersihan sehingga efektivitas pembersihan belum dievaluasi.

Kata kunci: Lean/Rich Exchanger, Fouling Factor, Koefisien Perpindahan Panas, Prioritas Pembersihan

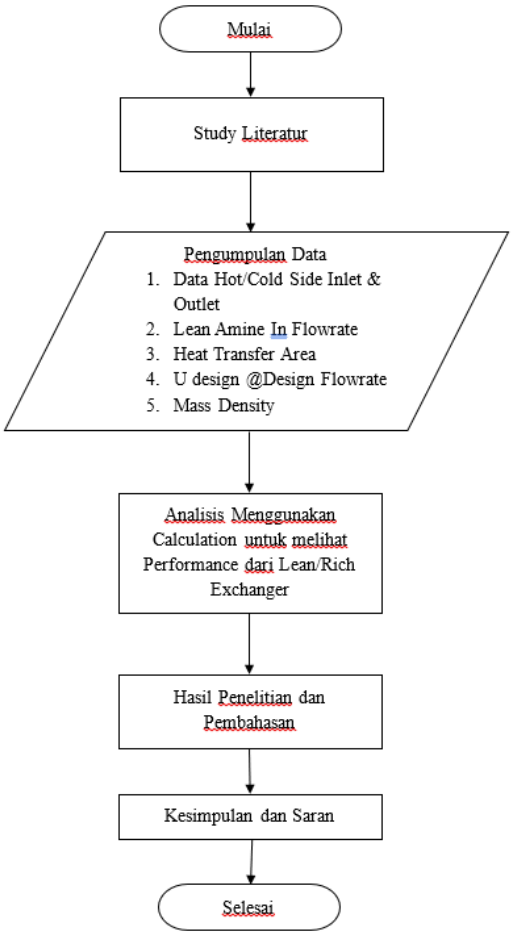
1. PENDAHULUAN

Unit pengolahan gas yang menggunakan proses pengikatan gas asam (acid gas removal) dengan larutan amina memanfaatkan Lean/Rich Exchanger sebagai alat penukar panas untuk memulihkan panas sensibel dari larutan lean amine panas yang keluar dari regenerator guna memanaskan larutan rich amine sebelum memasuki kolom regenerator. Efisiensi pemulihan panas pada alat ini berpengaruh langsung terhadap konsumsi energi pada reboiler regenerator, sehingga penurunan kinerjanya akan meningkatkan beban energi keseluruhan unit. Fouling atau pengendapan pengotor pada permukaan perpindahan panas dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas sehingga alat memerlukan pembersihan secara berkala [1].

Dalam praktiknya, ketersediaan sumber daya perawatan (tim maintenance) untuk melakukan pembersihan seringkali terbatas, sehingga hanya satu unit yang dapat dibersihkan dalam satu periode kerja meskipun terdapat lebih dari satu unit yang mengalami penurunan kinerja. Kondisi ini menuntut adanya metode evaluasi kinerja yang obyektif untuk menentukan unit mana yang paling membutuhkan pembersihan (prioritas), agar waktu dan sumber daya

perawatan dapat dimanfaatkan secara optimal. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa evaluasi kinerja heat exchanger secara kuantitatif dapat dilakukan dengan menghitung koefisien perpindahan panas menyeluruh pada kondisi bersih (Clean Overall Coefficient, U_C) dan kondisi kotor (Dirty Overall Coefficient, U_D) menggunakan metode Kern, kemudian dibandingkan untuk memperoleh nilai faktor pengotor (fouling factor, Rd) [2], [3], [5], [7].
Pendekatan serupa telah diterapkan pada berbagai heat exchanger shell and tube di unit kilang dan unit proses lainnya, dengan fouling factor dan penurunan performa sebagai indikator utama [4], [6], [8]–[10]. Pendekatan tersebut memberikan dasar kuantitatif yang dapat diaplikasikan untuk membandingkan kinerja antar unit yang identik, seperti pada kasus empat unit Lean/Rich Exchanger (A, B, C, dan D) yang menjadi obyek penelitian ini, sehingga penentuan prioritas pembersihan tidak lagi didasarkan pada perkiraan atau jadwal rutin semata, melainkan pada kondisi aktual masing-masing unit.
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja aktual tiga unit Lean/Rich Exchanger yang beroperasi (Unit A, B, dan D) guna menentukan unit yang menjadi prioritas pembersihan, dengan mengacu pada indikator kinerja berupa koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dan faktor pengotor (Rd). Unit C berada dalam kondisi siaga dan tidak memiliki data operasi sehingga tidak dievaluasi secara kuantitatif; unit ini hanya dibahas sebagai opsi rotasi operasi selama pembersihan. Penelitian ini dibatasi pada kondisi sebelum pembersihan, sehingga efektivitas pembersihan tidak menjadi bagian dari kajian.

2. METODE



Gambar 1. Diagram Alir

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif dengan studi kasus pada empat unit Lean/Rich Exchanger (A, B, C, dan D) di sebuah unit pengolahan gas. Tiga unit (A, B, dan D) beroperasi secara paralel, sedangkan satu unit (C) berada dalam kondisi siaga (stand by) dan tidak memiliki data operasi. Oleh karena itu, perhitungan kuantitatif hanya dilakukan terhadap tiga unit aktif (A, B, dan D). Data yang digunakan merupakan data operasi sekunder berupa suhu masuk dan keluar aliran lean amine dan rich amine, laju alir, serta tekanan pada masing-masing unit, yang diperoleh dari sistem historian/DCS perusahaan. Nilai koefisien perpindahan panas desain (U design) sebesar 586 Btu/hr.ft².

Tabel 1. Data Operasi dan Spesifikasi Lean/Rich Exchanger

Parameter	Nilai	Satuan
Hot side Inlet (Unit A, B, D)	248.8	°F
Hot side Outlet (Unit A)	183	°F
Hot side Outlet (Unit B)	204	°F
Hot side Outlet (Unit D)	168	°F
Cold side Inlet	134.8	°F
Cold Side Outlet (Unit A)	210	°F
Cold Side Outlet (Unit B)	220	°F
Cold Side Outlet (Unit D)	180	°F
Lean Amine In Flowrate (Desain)	250	USGPM/Unit
Heat Transfer Area	2049.7	ft^2
Total Heat Transfer Area (3 exchanger seri)	6149.1	ft^2
U Design @Design Flowrate	586	Btu/hr.ft².°F

2.1. Log Mean Temperature Difference *(LMTD)*

LMTD merupakan selisih suhu rata-rata logaritmik antara fluida panas (lean amine) dan fluida dingin (rich amine) sepanjang exchanger, dinyatakan dalam satuan derajat Fahrenheit (°F). Parameter ini digunakan sebagai driving force perpindahan panas, mengingat selisih suhu antara kedua fluida tidak konstan dari ujung masuk hingga ujung keluar exchanger, melainkan berubah secara logaritmik akibat perpindahan panas yang terjadi sepanjang alat. LMTD dihitung dari empat titik suhu terukur (suhu masuk dan keluar pada masing-masing sisi hot dan cold), dan nilainya akan menjadi salah satu komponen utama dalam perhitungan koefisien perpindahan panas menyeluruh, baik pada kondisi aktual (U_D) maupun kondisi desain terkoreksi (U_C) [2], [7].

$$\mathrm{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (1)$$

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out} \quad (2)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in} \quad (3)$$

2.2. Lean Amine In Mass Flowrate *(ṁ)*

Lean Amine In Mass Flowrate adalah laju alir massa larutan lean amine yang masuk ke Lean/Rich Exchanger, dinyatakan dalam satuan lb/h (pound per jam). Data operasi lapangan pada umumnya mencatat laju alir dalam satuan volumetrik (USGPM), sehingga ṁ diperoleh melalui konversi menggunakan densitas larutan amine pada suhu operasi rata-rata, sesuai Persamaan (4), dengan V̇ adalah laju alir volumetrik (USGPM), 7,48052 adalah

faktor konversi gallon ke ft³, dan ρ adalah densitas (lb/ft³). Parameter ini merupakan salah satu komponen utama dalam perhitungan neraca energi untuk memperoleh beban panas (Q), karena besarnya energi yang dipindahkan berbanding lurus dengan jumlah massa fluida yang mengalir per satuan waktu [2].

$$\dot{m} = \left(\frac{\dot{V}}{7.48052}\right) \times 60 \times \rho \quad (4)$$

2.3. Avg. Heat Capacity *(Cp)*

Avg. Heat Capacity adalah kapasitas panas spesifik rata-rata larutan lean amine, dinyatakan dalam satuan Btu/lb.°F, yang menunjukkan jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu satu satuan massa larutan sebesar satu derajat. Nilai Cp diambil sebagai rata-rata pada rentang suhu antara suhu masuk dan suhu keluar aliran, mengingat kapasitas panas larutan amine bergantung pada jenis dan konsentrasi amine serta bervariasi terhadap suhu [11]. Parameter ini digunakan bersama dengan laju alir massa (ṁ) dan selisih suhu untuk menghitung beban panas exchanger melalui persamaan neraca energi.

$$C_{p,avg} = \frac{C_{p,1}+C_{p,2}}{2} \quad (5)$$

$$C_p = \left(\frac{T-T_2}{T_1-T_2}\right)\left(C_{p,1} - C_{p,2}\right) + C_{p,2} \quad (6)$$

2.4. Heat Exchanger Duty *(Q)*

Heat Exchanger Duty adalah beban panas yang dipindahkan oleh Lean/Rich Exchanger, dinyatakan dalam satuan MMBtu/h (juta Btu per jam). Parameter ini dihitung dari neraca energi aliran lean amine berdasarkan laju alir massa (ṁ), kapasitas panas spesifik rata-rata (Cp), serta selisih suhu masuk dan keluar. Nilai Q merepresentasikan jumlah energi aktual yang berhasil dipindahkan pada kondisi operasi terkini, dan menjadi parameter kunci yang digunakan pada tahap selanjutnya untuk menurunkan koefisien perpindahan panas [2], [8].

$$Q = \dot{m} \times C_{p,avg} \times \left(T_{h,in} - T_{h,out}\right) \quad (7)$$

$$Q = \frac{\dot{m} \times C_{p,avg} \times \left(T_{h,in} - T_{h,out}\right)}{10^6} \quad (8)$$

2.5. U Actual *(UD)*

U Actual adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh pada kondisi aktual, dinyatakan dalam satuan Btu/hr.ft².°F. Parameter ini menggambarkan kemampuan perpindahan panas exchanger pada kondisi operasi terkini, termasuk pengaruh lapisan fouling yang telah terbentuk pada permukaan perpindahan panas. U_D diturunkan dari beban panas (Q), luas permukaan perpindahan panas total (A_{total}) yang bersifat tetap sesuai spesifikasi desain alat, faktor koreksi LMTD (F), dan LMTD itu sendiri. Luas total merupakan jumlah luas tiga exchanger yang tersusun seri pada setiap unit (3 × 2.049,7 ft² = 6.149,1 ft²). Semakin rendah nilai U_D dibandingkan kondisi desainnya, semakin besar hambatan perpindahan panas yang terjadi akibat akumulasi fouling [2], [8].

$$Q = U_D \times A_{total} \times F \times \text{LMTD} \quad (9)$$

$$U_D = \frac{Q \times 10^6}{A_{total} \times F \times \text{LMTD}} \quad (10)$$

2.6. LMTD Correction *(F)*

LMTD Correction adalah faktor koreksi tak berdimensi terhadap nilai LMTD, diperlukan karena Lean/Rich Exchanger yang dievaluasi merupakan tipe shell and tube dengan konfigurasi aliran yang tidak sepenuhnya counter-current murni (terdapat multi-pass pada sisi tube). Faktor F ditentukan dari dua rasio, yaitu rasio suhu R (perbandingan perubahan suhu fluida panas terhadap fluida dingin, Persamaan 11) dan efektivitas P (efektivitas perpindahan panas pada sisi dingin, Persamaan 12), dengan mengacu pada grafik/tabel koreksi standar sebagaimana tercantum pada metode Kern [2]. Nilai F akan mendekati satu apabila konfigurasi aliran mendekati counter-current murni, dan menjadi pengali langsung terhadap LMTD dalam perhitungan U_D.

$$R = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{c,out} - T_{c,in}} \tag{11}$$

$$P = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \tag{12}$$

2.7. U Design @ Actual Flowrate *(UC)*

U Design @ Actual Flowrate (U_C) adalah koefisien perpindahan panas desain yang telah dikoreksi terhadap laju alir aktual, dinyatakan dalam satuan Btu/hr.ft².°F. Nilai U desain pada data sheet pabrikan umumnya dihitung pada laju alir desain, sehingga tidak dapat langsung dibandingkan dengan U_D apabila laju alir aktual berbeda dari laju alir desain, mengingat koefisien film perpindahan panas berbanding lurus dengan kecepatan aliran fluida secara tidak linear (mengikuti hubungan pada aliran turbulen). Oleh karena itu, U desain dikoreksi menggunakan rasio antara laju alir aktual dan laju alir desain, sehingga U_C merepresentasikan kondisi permukaan bersih (clean) pada laju alir operasi yang sama dengan U_D. Nilai U desain sebesar 586 Btu/hr.ft².°F pada laju alir desain 250 USGPM per unit, sedangkan laju alir aktual tiap unit disajikan pada Tabel 1. Parameter inilah yang menjadi acuan pembanding utama terhadap U_D untuk menentukan tingkat penurunan kinerja tiap unit [2], [8].

2.8. Faktor Pengotor *(Rd)*

Faktor Pengotor (Rd) adalah tahanan termal tambahan akibat lapisan fouling pada permukaan perpindahan panas, dinyatakan dalam satuan hr.ft².°F/Btu. Rd dihitung dari selisih tahanan termal kondisi kotor ($1/U_D$) dan kondisi bersih ($1/U_C$) menurut metode Kern [2]. Semakin besar nilai Rd, semakin besar lapisan pengotor dan penurunan kinerja unit [8].

$$R_d = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_C} \tag{13}$$

2.9. Persentase Performa *(%Performance)*

Persentase Performa (%Performance) adalah rasio koefisien perpindahan panas aktual (U_D) terhadap koefisien desain terkoreksi (U_C), dinyatakan dalam satuan persen (%). Parameter ini merupakan indikator ringkas yang menunjukkan seberapa jauh kinerja aktual suatu unit telah menyimpang dari kondisi desainnya pada laju alir operasi yang sama. Nilai %Performance mendekati 100% menunjukkan kondisi permukaan perpindahan panas yang masih mendekati kondisi bersih/desain, sedangkan nilai yang jauh di bawah 100% mengindikasikan akumulasi fouling yang signifikan, sehingga unit tersebut menjadi kandidat prioritas pembersihan. Bersama dengan faktor pengotor (Rd), parameter %Performance digunakan pada bagian Pembahasan untuk menyusun peringkat prioritas pembersihan antar unit [8], [10].

$$\% \text{ Performance} = \frac{U_D}{U_C} \times 100\% \quad (14)$$

2.10. Performa Gabungan Sistem

Performa gabungan sistem dihitung sebagai perbandingan total beban panas aktual ketiga unit aktif terhadap beban panas desain, sebagaimana Persamaan (16). Total beban panas aktual adalah 8,19 + 5,55 + 10,10 = 23,84 MMBtu/h. Parameter ini hanya digunakan sebagai pembanding tingkat sistem dan tidak menggantikan evaluasi per unit.

$$\text{Performa sistem} = \frac{\sum Q_{aktual}}{Q_{desain}} \times 100\% \quad (15)$$

3. PEMBAHASAN

A. Data Operasi Lean/Rich Exchanger

Data operasi aktual (kondisi sebelum pembersihan) untuk empat unit Lean/Rich Exchanger yang identik (Unit A, B, C, dan D) disajikan pada Tabel 1. Tiga unit beroperasi paralel (Unit A, B, dan D), sedangkan Unit C berada dalam kondisi siaga (standby) sehingga tidak memiliki data operasi dan tidak dianalisis secara kuantitatif. Laju alir lean amine desain adalah 250 USGPM per unit. Suhu masuk sisi panas (hot side inlet) seragam sebesar 248,8°F dan suhu masuk sisi dingin (cold side inlet) seragam sebesar 134,8°F. Luas permukaan perpindahan panas tiap exchanger sebesar 2.049,7 ft², dengan tiga exchanger tersusun seri per unit sehingga luas total menjadi 6.149,1 ft². Koefisien perpindahan panas desain pada laju alir desain (U Design @ Design Flowrate) ditetapkan sebesar 586 Btu/hr.ft².°F sebagai acuan kondisi bersih.

B. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas dan Faktor Pengotor

Berdasarkan data pada Tabel 1, dilakukan perhitungan beban panas (Q), koefisien perpindahan panas menyeluruh kondisi kotor (U_D = U aktual), koefisien perpindahan panas menyeluruh kondisi bersih pada laju alir aktual (U_C, dikoreksi dari U desain 586 Btu/hr.ft².°F terhadap laju alir aktual), serta faktor pengotor ($Rd = 1/U_D - 1/U_C$) mengikuti metode Kern [2].

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kinerja Lean/Rich Exchanger

Unit	Q (MMBtu/h)	UD = U aktual (Btu/hr.ft².°F)	UC (desain terkoreksi) (Btu/hr.ft².°F)	Rd (hr.ft².°F/Btu)	Performa (%)
Unit A	8.19	46.73	57.25	0.00393	81.63
Unit B	5.55	33.82	61.07	0.01320	55.37
Unit D	10.10	63.03	62.61	-0.00011	100.68

Beban panas (duty) tertinggi dicapai oleh Unit D sebesar 10,10 MMBtu/h dengan U_D 63,03 Btu/hr.ft².°F, mendekati bahkan sedikit melampaui nilai U_C-nya (62,61 Btu/hr.ft².°F, performa 100,68%), yang mengindikasikan permukaan perpindahan panas unit ini masih relatif bersih. Sebaliknya, Unit B mencatat duty terendah di antara ketiga unit aktif (5,55 MMBtu/h) dengan U_D hanya 33,82 Btu/hr.ft².°F, jauh di bawah U_C-nya (61,07 Btu/hr.ft².°F), sehingga menghasilkan Rd tertinggi (0,0132 hr.ft².°F/Btu). Unit A berada di antara keduanya dengan performa 81,63% dan Rd 0,00393 hr.ft².°F/Btu. Pola ini konsisten dengan temuan penelitian evaluasi kinerja heat exchanger sejenis, di mana nilai Rd yang meningkat berbanding lurus dengan penurunan performa terhadap nilai desain [3]–[10].

Nilai Rd Unit D sebesar −0,00011 hr.ft².°F/Btu tidak diartikan sebagai fouling negatif, karena secara fisik tahanan pengotor tidak dapat bernilai negatif. Nilai ini sangat kecil (U_D hanya 0,7% di atas U_C) dan lebih tepat dipandang sebagai Rd ≈ 0, yaitu permukaan dalam kondisi bersih. Penyimpangan tersebut kemungkinan berasal dari (i) ketidakpastian pengukuran suhu dan laju alir pada data DCS, yang berpengaruh besar karena LMTD dan Q dihitung dari selisih suhu, (ii) variasi kondisi operasi sesaat karena data bersifat snapshot dan bukan rata-rata jangka panjang, serta (iii) ketidakpastian pada basis U desain/U_C, termasuk koreksi laju alir dan faktor koreksi LMTD (F). Karena selisihnya jauh lebih kecil daripada selisih Unit A dan B, pemeringkatan prioritas tidak berubah.

Total duty aktual tiga unit adalah 8,19 + 5,55 + 10,10 = 23,84 MMBtu/h. Performa gabungan yang melampaui 100% ini tercapai karena kompensasi dari unit berkinerja baik (terutama Unit D), sehingga berpotensi menutupi penurunan kinerja lokal pada Unit B apabila evaluasi hanya dilakukan pada tingkat sistem. Karena itu evaluasi per unit sebagaimana dilakukan pada penelitian ini tetap diperlukan.

C. Penentuan Prioritas Pembersihan

Peringkat kinerja tiga unit yang beroperasi (Unit A, B, dan D) berdasarkan nilai Rd (dari tertinggi ke terendah) ditampilkan pada Tabel 3. Unit B menempati peringkat pertama dengan Rd tertinggi (0,0132 hr.ft².°F/Btu) dan performa terendah (55,37%), sehingga ditetapkan sebagai prioritas utama pembersihan. Penetapan ini didasarkan pada dua indikator kinerja yang konsisten, yaitu Rd tertinggi dan performa terendah, serta duty terendah di antara ketiga unit (5,55 MMBtu/h), yang berarti pemulihan panas pada unit ini paling rendah. Unit B juga memiliki U_D terendah (33,82 Btu/hr.ft².°F), sekitar 55% dari U_C-nya.

Tabel 3. Peringkat Prioritas Pembersihan

Peringkat	Unit	Rd (hr.ft².°F/Btu)	Performa (%)	Status
1	Unit B	0.01320	55.37	Prioritas utama
2	Unit A	0.00393	81.63	Dipantau
3	Unit D	-0.00011	100.68	Mendekati desain

Keberadaan unit siaga (Unit C) memberi ruang bagi tim perawatan untuk melakukan rotasi operasi: Unit C dapat menggantikan posisi Unit B selama pembersihan atau selama menunggu jadwal pembersihan, sedangkan setelah Unit B dibersihkan dan dikembalikan ke layanan, Unit C dapat dijadikan cadangan sementara. Dengan demikian beban fouling tidak terus terakumulasi pada satu unit yang sama dan keandalan operasi tetap terjaga. Perlu diperhatikan bahwa kondisi permukaan Unit C sendiri tidak diketahui karena belum dievaluasi.

Penelitian ini hanya menyajikan kondisi sebelum pembersihan. Data sesudah pembersihan tidak tersedia, sehingga efektivitas pembersihan (peningkatan U_D, penurunan Rd, atau pemulihan duty setelah pembersihan) belum dapat dievaluasi dan disarankan sebagai penelitian lanjutan.

4. SIMPULAN

Hasil analisis kinerja terhadap tiga unit Lean/Rich Exchanger yang beroperasi (Unit A, B, dan D) menunjukkan bahwa Unit B memiliki kinerja terendah, dengan performa 55,37% terhadap kondisi desain pada laju alir aktual dan faktor pengotor (Rd) tertinggi sebesar 0,0132 hr.ft².°F/Btu. Unit B karena itu ditetapkan sebagai unit prioritas utama pembersihan. Unit A (performa 81,63%, Rd 0,00393 hr.ft².°F/Btu) berstatus dipantau, sedangkan Unit D (performa 100,68%, Rd mendekati nol) masih mendekati kondisi desain sehingga belum memerlukan pembersihan segera. Unit C berstatus siaga dan tidak memiliki data operasi sehingga tidak dievaluasi secara kuantitatif, tetapi dapat dimanfaatkan sebagai unit pengganti selama proses pembersihan Unit B berlangsung.

Temuan ini menunjukkan bahwa penentuan prioritas pembersihan berdasarkan indikator kinerja aktual, yaitu koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) dan faktor pengotor (Rd), memberikan dasar yang lebih obyektif dibandingkan jadwal rutin atau perkiraan semata, sejalan dengan penelitian evaluasi kinerja heat exchanger sejenis [3]–[10]. Pendekatan ini dapat menjadi acuan bagi tim perawatan dalam mengalokasikan sumber daya yang terbatas secara lebih efisien tanpa mengorbankan keandalan proses.

Penelitian ini terbatas pada data kondisi sebelum pembersihan dan pada tiga unit aktif. Evaluasi efektivitas pembersihan, yaitu perbandingan U_D, Rd, dan duty sebelum dan sesudah pembersihan, serta evaluasi Unit C setelah dioperasikan, disarankan sebagai penelitian lanjutan. Pemantauan U_D dan Rd secara berkala dengan data yang lebih panjang juga disarankan untuk mengurangi pengaruh ketidakpastian data pada satu waktu pengukuran.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] D. K. Singh, A. Villamayor, and L. Lacheheb, “Shell and tube heat exchanger progression fouling and its mitigation using chemical cleaning process,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2317, no. 1, Feb. 2021, doi: 10.1063/5.0036112.

[2] D. Q. Kern, *Process Heat Transfer*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1950.

[3] A. T. Permatasari, L. N. Azizah, N. Fauziyah, and R. R. Widjatma, “Evaluasi kinerja heat exchanger 02 dan 03 di unit kilang Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi (PPSDM MIGAS),” *Maj. Ilm. Swara Patra*, vol. 15, no. 1, pp. 65–74, Mar. 2025, doi: 10.37525/SP/2025-1/628.

[4] L. Septiana, A. Andini, A. S. Ananda, and I. Ramadana, “Evaluasi kinerja heat exchanger 1 (HE-1) dan heat exchanger 2 (HE-2) pada unit kilang,” *J. Nas. Pengelolaan Energi MigasZoom*, 2025, doi: 10.37525/mz/2025-1/644.

[5] P. V. Gusniawan, A. Z. Aldillah, and S. Rulianah, “Evaluasi performa heat exchanger 11E-25 CDU I (Crude Distillation Unit I) pada FOC I (Fuel Oil Complex I) PT Pertamina (Persero) Refinery Unit IV Cilacap Jawa Tengah,” *Distilat: J. Teknol. Separasi*, vol. 10, no. 2, pp. 463–475, 2024, doi: 10.33795/distilat.v10i2.5065.

[6] I. A. Fitria, D. A. Sari, V. P. Fahriani, and M. Djaeni, “Shell and tube heat exchanger fouling factor via Heat Transfer Research Inc (HTRI) software,” *Reka Buana: J. Ilm.*

Tek. Sipil dan Tek. Kim., vol. 7, no. 2, pp. 104–113, Sep. 2022, doi: 10.33366/rekabuana.v7i2.4030.

[7] M. Rais Zain and A. Mustain, "Evaluasi efisiensi heat exchanger (HE-4000) dengan metode Kern," *Distilat: J. Teknol. Separasi*, vol. 6, no. 2, pp. 415–421, Aug. 2020, doi: 10.33795/distilat.v6i2.133.

[8] D. P. Nugroho, S. Rulianah, R. Raharjo, and C. Sindhuwati, "Evaluasi faktor kekotoran pada heat exchanger-03 crude distillation unit di PPSDM Migas Cepu," *Distilat: J. Teknol. Separasi*, vol. 8, no. 1, pp. 64–71, May 2023, doi: 10.33795/distilat.v8i1.301.

[9] R. J. Prabaswara, S. Rulianah, C. Sindhuwati, and R. Raharjo, "Evaluasi pressure drop heat exchanger-03 pada crude distillation unit PPSDM Migas Cepu," *Distilat: J. Teknol. Separasi*, vol. 7, no. 2, pp. 505–513, May 2023, doi: 10.33795/distilat.v7i2.287.

[10] A. N. Al Ghifary, A. N. Hasya, T. Riadz, and L. Cundari, "Evaluasi kinerja heat exchanger E-401 pada unit PE3 PT. Lotte Chemical Titan Nusantara," *J. Sains dan Teknol. Reaksi*, vol. 20, no. 1, Jun. 2022, doi: 10.30811/jstr.v20i01.3255.

[11] E. I. Concepción, A. Moreau, D. Vega-Maza, X. Paredes, and M. C. Martín, "Heat capacities of different amine aqueous solutions at pressures up to 25 MPa for CO2 capture," *J. Mol. Liq.*, vol. 377, Art. no. 121575, 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.121575.

Daftar Simbol

A	=	Luas permukaan perpindahan panas, *ft²*
A_{total}	=	Luas permukaan perpindahan panas total, *ft²*
LMTD (ΔT_{lm})	=	Beda suhu rata-rata logaritmik (Log Mean Temperature Difference), *°F*
ΔT_1	=	Selisih suhu pada titik 1 (Th,in − Tc,out), *°F*
ΔT_2	=	Selisih suhu pada titik 2 (Th,out − Tc,in), *°F*
$T_{h,in}$	=	Suhu masuk sisi panas (hot side inlet), *°F*
$T_{h,out}$	=	Suhu keluar sisi panas (hot side outlet), *°F*
$T_{c,in}$	=	Suhu masuk sisi dingin (cold side inlet), *°F*
$T_{c,out}$	=	Suhu keluar sisi dingin (cold side outlet), *°F*
T, T_1, T_2	=	Suhu acuan pada interpolasi kapasitas panas spesifik, *°F*
$\dot{V}$	=	Laju alir volumetrik lean amine, *USGPM*
$\dot{m}$	=	Laju alir massa lean amine (mass flowrate), *lb/h*
$\dot{m}_{Actual}$	=	Laju alir massa aktual, *lb/h*
$\dot{m}_{Design}$	=	Laju alir massa desain, *lb/h*
ρ	=	Massa jenis (densitas) larutan lean amine, *lb/ft³*
Q	=	Beban panas (heat exchanger duty), *MMBtu/h*
Cp	=	Kapasitas panas spesifik, *Btu/lb.°F*
Cp_{avg}	=	Kapasitas panas spesifik rata-rata, *Btu/lb.°F*
Cp_1, Cp_2	=	Kapasitas panas spesifik pada suhu T_1 dan T_2, *Btu/lb.°F*
U	=	Koefisien perpindahan panas menyeluruh (umum), *Btu/hr.ft².°F*
U_D	=	(U Actual) Koefisien perpindahan panas menyeluruh kondisi aktual/kotor, *Btu/hr.ft².°F*
U_C	=	Koefisien perpindahan panas desain terkoreksi (kondisi bersih pada laju alir aktual), *Btu/hr.ft².°F*
F	=	Faktor koreksi LMTD (LMTD correction factor), *tanpa dimensi*
R	=	Rasio suhu, perbandingan perubahan suhu fluida panas terhadap fluida dingin, *tanpa dimensi*
P	=	Efektivitas perpindahan panas pada sisi dingin, *tanpa dimensi*
Rd	=	Faktor pengotor (fouling factor), *hr.ft².°F/Btu*
%Performance	=	Persentase performa (rasio UD terhadap UC), *%*

Q_{desain}	=	Beban panas desain, *MMBtu/h*
Performa sistem	=	Rasio total duty aktual terhadap duty desain, *%*