

KINERJA HEAT EXCHANGER – 03 TIPE SHELL AND TUBE PADA UNIT KILANG PPSDM MIGAS CEPU

Anisa Nurul Izza¹, Kharistya Indah Putri¹, Ariani¹, Dwi Purwanto²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

² PPSDM Migas Cepu, Jl. Sorogo No. 1, Blora 58315, Indonesia

anisaizza012@gmail.com ; [ariani@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Penurunan kinerja *Heat Exchanger* (HE) umumnya disebabkan oleh terbentuknya lapisan *fouling*, yaitu endapan yang terbentuk pada permukaan penukar panas sehingga menurunkan laju perpindahan panas. Evaluasi terhadap parameter seperti efisiensi, *fouling factor* (Rd), dan *pressure drop* diperlukan untuk mengetahui kelayakan operasional unit HE-03 di Kilang PPSDM Migas Cepu. Penelitian ini bertujuan untuk menilai performa aktual HE-03 berdasarkan data operasional harian. Metode penelitian melibatkan pengumpulan data primer berupa suhu masuk dan keluar serta laju alir fluida panas dan dingin yang diukur langsung pada *inlet* dan *outlet* sisi *shell* dan *tube* selama lima hari berturut-turut, serta data sekunder yang diperoleh dari dokumen spesifikasi unit, yang memuat ukuran bagian *shell* (diameter, jumlah *baffle*, jarak antar *baffle*) dan bagian *tube* (diameter *tube*, jumlah *tube*, *pitch*, dan panjang *tube*). Analisis dilakukan terhadap nilai koefisien perpindahan panas bersih dan kotor, *fouling factor*, serta tekanan di sisi *shell* dan *tube*. Hasil menunjukkan efisiensi perpindahan panas sebesar 66,81%, masih di bawah standar kinerja industri sebesar 80. Nilai *fouling factor* yang diperoleh adalah 0,00689 hr.ft².°F/Btu, lebih tinggi dari batas toleransi 0,005 hr.ft².°F/Btu, yang menunjukkan terbentuknya lapisan *fouling* pada permukaan perpindahan panas. Meskipun demikian, *pressure drop* sebesar 0,02508 psi (*shell*) dan 0,001484 psi (*tube*) masih jauh di bawah ambang batas 5–10 psi. Dengan demikian, HE-03 masih dinyatakan layak beroperasi. Namun, perawatan rutin dan pemantauan berkala sangat disarankan untuk mencegah penurunan performa lebih lanjut akibat *fouling*.

Kata kunci: : Efisiensi, *Fouling Factor*, *Heat Exchanger*, *Pressure Drop*, *Shell and Tube*

ABSTRACT

The decline in *Heat Exchanger* (HE) performance is generally caused by the formation of *fouling* layers, namely deposits that accumulate on heat transfer surfaces and reduce the heat transfer rate. An evaluation of parameters such as efficiency, *fouling factor* (Rd), and *pressure drop* is required to determine the operational feasibility of the HE-03 unit at the PPSDM Migas Cepu refinery. This study aims to assess the actual performance of HE-03 based on daily operational data. The research method involved collecting primary data in the form of inlet and outlet temperatures and fluid flow rates, measured directly at the shell and tube sides over five consecutive days. Secondary data were obtained from unit specification documents that include shell dimensions (diameter, number of baffles, baffle spacing) and tube dimensions (tube diameter, number of tubes, pitch, and length). The analysis included determining the clean and dirty overall heat transfer coefficients, *fouling factor*, and *pressure drop* on both the shell and tube sides. The results showed a heat transfer efficiency of 66.81%, which remains below the industrial performance standard of 80%. The *fouling factor* obtained was 0.00689 hr.ft².°F/Btu, higher than the allowable limit of 0.005 hr.ft².°F/Btu, indicating the presence of *fouling* on the heat transfer surface. Nevertheless, the pressure drops of 0.02508 psi (*shell*) and 0.001484 psi (*tube*) were far below the typical threshold of 5–10 psi. Therefore, HE-03 is still considered operationally feasible. However, routine maintenance and regular monitoring are recommended to prevent further performance decline due to *fouling*.

Keywords: Efficiency, *Fouling Factor*, *Heat Exchanger*, *Pressure Drop*, *Shell and Tube*

Corresponding author: Ariani

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: ariani@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Heat exchanger merupakan alat yang digunakan untuk mentransfer panas antara dua fluida, baik melalui kontak langsung atau dipisahkan oleh dinding padat. Alat ini berperan penting dalam berbagai proses industri seperti pemanasan, pendinginan, penguapan, dan kondensasi, karena mampu meningkatkan efisiensi pengolahan energi [1].

Salah satu jenis *heat exchanger* yang umum digunakan adalah *shell and tube heat exchanger* (STHE), yaitu alat yang terdiri dari serangkaian tabung, di mana satu set tabung dialiri fluida panas dan set lainnya dialiri fluida dingin, sehingga memungkinkan terjadinya pertukaran panas secara efisien antara kedua fluida [2]. STHE banyak digunakan di kilang minyak dan pabrik kimia karena desainnya yang memungkinkan satu fluida mengalir di dalam tabung dan fluida lainnya mengalir di sekitar tabung, sehingga proses perpindahan panas dapat berlangsung dengan optimal [3].

Pada kilang PPSDM Migas Cepu digunakan *heat exchanger* tipe *shell and tube*. Dalam proses pengolahan minyak bumi, *crude oil* dipanaskan terlebih dahulu menggunakan *heat exchanger* sebelum dilanjutkan ke proses berikutnya. Terdapat lima unit *heat exchanger*, di mana unit 01, 02, dan 03 menggunakan solar sebagai fluida panas untuk memanaskan *crude oil*, sedangkan unit 04 dan 05 menggunakan fluida berupa residu. Seluruh unit tersebut berfungsi menaikkan suhu *crude oil* dari 30°C menjadi kurang lebih 120°C sebelum masuk ke furnace, sehingga beban pemanasan berkurang dan konsumsi bahan bakar lebih efisien. Saat ini tiga unit masih beroperasi, dan dua unit lainnya dalam tahap perbaikan. Semua unit ini termasuk unit 3 yang diamati pada penelitian ini perlu dilakukan evaluasi untuk memastikan kinerjanya agar tetap sesuai standar operasional.

Salah satu metode untuk mengevaluasi kinerja *heat exchanger* adalah meninjau nilai *fouling factor* (R_d) dari data operasional, lalu membandingkannya dengan batas maksimum [4]. Evaluasi ini bertujuan menilai dampak *fouling* terhadap efisiensi perpindahan panas dan memastikan kelayakan operasional. Berdasarkan penelitian sebelumnya, nilai *fouling factor* pada HE-03 di PPSDM Migas Cepu mencapai 0,267, jauh melebihi batas maksimum yaitu 0,005 [5]. Hasil ini mengindikasikan adanya penumpukan kerak yang berpotensi menurunkan efisiensi perpindahan panas. Temuan tersebut juga sejalan dengan penelitian lain, yang menganalisis parameter operasional HE-03 selama tujuh hari dan memperoleh nilai pressure drop 0,00000175 psi pada sisi *shell* dan 0,02462 psi pada sisi *tube*, serta efisiensi perpindahan panas 76,02% yang menunjukkan penurunan performa [6]. Namun, kondisi operasional unit dapat berubah dari waktu ke waktu, sehingga diperlukan perhitungan ulang untuk memperoleh kondisi terbaru dan memastikan apakah tingkat *fouling* pada HE-03 masih berada pada kisaran yang sama atau mengalami peningkatan.

Fouling sendiri merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan efisiensi pada sistem *heat exchanger*. Penumpukan kerak pada permukaan perpindahan panas meningkatkan hambatan termal, menurunkan koefisien perpindahan panas total, serta menyebabkan kenaikan *pressure drop* yang membebani sistem secara keseluruhan [7]. Penelitian lain juga menyatakan bahwa penumpukan *fouling* dapat mengganggu aliran fluida, meningkatkan *pressure drop*, dan menurunkan efisiensi sistem secara signifikan [8]. Dampak lebih lanjutnya dapat mengganggu stabilitas dan efektivitas proses secara keseluruhan [9].

Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan evaluasi lebih lanjut terhadap kinerja *Heat Exchanger-03* yang ada di PPSDM Migas Cepu dengan menghitung efisiensi, *fouling*

factor, dan *pressure drop* menggunakan data operasional aktual. Ketiga parameter tersebut dianalisis secara bersamaan untuk memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kondisi unit dan memastikan apakah masih sesuai dengan standar operasional. Dengan demikian, penelitian ini diperlukan untuk mengetahui kondisi terkini *heat exchanger* dan menentukan apakah unit masih layak beroperasi atau memerlukan tindakan perawatan lebih lanjut.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui dua metode, yaitu pengamatan langsung (data primer) dan pengambilan data dari sistem (data sekunder). Data primer diperoleh dari pencatatan suhu masuk dan keluar serta laju alir fluida panas dan dingin selama lima hari berturut-turut, yang kemudian dirata-ratakan sebagai dasar perhitungan. Adapun data sekunder mencakup informasi spesifikasi desain, seperti diameter dan panjang pipa, serta konfigurasi *shell and tube* pada *Heat Exchanger-03*. Adapun data sekunder yang diperoleh dari dokumen spesifikasi unit, yang memuat ukuran bagian *shell* (diameter, jumlah *baffle*, jarak antar *baffle*) dan bagian *tube* (diameter *tube*, jumlah *tube*, *pitch*, dan panjang *tube*).

2.2. Metode Perhitungan

Evaluasi kinerja *Heat Exchanger-03* di PPSDM Migas Cepu mengacu pada prosedur perhitungan menurut Kern (1965) [10]. Tahapan perhitungan yang digunakan dapat dilihat pada uraian berikut.

1. Menghitung Laju Alir Massa (W)

$$W = V \times \rho \quad (1)$$

Keterangan:

V = Laju alir volumetrik (ft³/jam)

ρ = Densitas fluida (lb/ft³)

2. Menghitung Neraca Panas

Panas dari fluida panas sama dengan panas yang diterima fluida dingin.

$$Q_1 = Q_2 \quad (2)$$

$$W_s \times C_p \times (T_1 - T_2) = W_t \times c_p \times (t_2 - t_1) \quad (3)$$

Keterangan:

Q_1 = Jumlah panas yang dipindahkan oleh fluida panas (Btu/jam)

Q_2 = Jumlah panas yang dipindahkan oleh fluida dingin (Btu/jam)

W_s = Laju alir fluida panas (lb/jam)

W_t = Laju alir fluida dingin (lb/jam)

C_p = *Specific heat* fluida panas (Btu/lb)

T_1 = Suhu fluida panas masuk (°F)

T_2 = Suhu fluida panas keluar (°F)

t_1 = Suhu fluida dingin masuk (°F)

t_2 = Suhu fluida dingin keluar (°F)

3. Menghitung Log Mean Temperature Difference (LMTD)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta t_h - \Delta t_c}{\log\left(\frac{\Delta t_h}{\Delta t_c}\right)} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\log\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (4)$$

$$\Delta t = \Delta T \text{ LMTD} \times f_T \quad (5)$$

Keterangan :

$\Delta T \text{ LMTD}$ = Selisih temperatur rata-rata logaritmik

Δt_h = Suhu paling tinggi pada kedua fluida ($^{\circ}\text{F}$)

Δt_c = Suhu paling rendah pada kedua fluida ($^{\circ}\text{F}$)

f_T = *Correction Factor*

4. Menghitung *Caloric Temperature*

Fluida panas (T_c) :

$$T_c = T_2 + (f_c \times (T_1 - T_2)) \quad (6)$$

Fluida dingin (t_c) :

$$t_c = t_1 + (f_c \times (t_2 - t_1)) \quad (7)$$

Keterangan:

f_c = *Caloric temperature factor*

5. Menghitung *Flow Area* (a)

$$\text{Shell : } a_s = \frac{ID_s \times C' \times B}{P_t \times 144} \quad (8)$$

$$\text{Tube : } a_t = \frac{N_t \times A't}{n \times 144} \quad (9)$$

Keterangan:

$a_{s/t}$ = *Flow area shell/tube side* (ft^2)

ID_s = Diameter dalam *shell* (in)

C' = *Tube clearance* (in)

B = *Baffle spacing* (in)

P_t = *Pitch tube* (in)

N_t = Jumlah *tube*

$A't$ = *Flow area per tube* (in^2)

n = Jumlah *pass tube side*

6. Menghitung *Mass Velocity* (G)

Mass velocity dihitung terpisah pada sisi *shell* dan *tube*.

$$G = \frac{W_{s/t}}{a_{s/t}} \quad (10)$$

Keterangan :

W_s = Laju alir fluida panas (lb/jam)

W_t = Laju alir fluida dingin (lb/jam)

$a_{s/t}$ = *Flow area shell/tube side* (ft^2)

7. Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Fluida

$$\text{Shell : } \frac{h_o}{\phi_s} = jH \frac{k}{De} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$\text{Tube : } \frac{h_i}{\phi_t} = jH \frac{k}{ID_t} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Keterangan:

$h_{o/i}$ = Koefisien perpindahan panas di *shell/tube* (Btu/jam. ft^2 $^{\circ}\text{F}$)

jH = Faktor perpindahan panas

k = *Thermal Conductivity* fluida (Btu/jam.ft)

$\phi_{s/t}$ = Viskositas rasio fluida di *shell/tube*

8. Menghitung Koefisien Transfer Panas Bagian *Shell* (h_o) dan *Tube* (h_{io})

$$\text{Shell : } h_o = \frac{h_o}{\phi_s} \times \phi_s \quad (13)$$

$$\text{Tube : } \frac{h_{io}}{\phi_t} = \frac{h_i}{\phi_t} \times \frac{ID_t}{OD_t} \quad (14)$$

$$h_{io} = \frac{h_o}{\phi_t} \times \phi_t \quad (15)$$

Keterangan :

h_{io} = Koefisien perpindahan panas konveksi diameter luar *tube* (Btu/jam. ft²°F)

OD_t = Diameter luar *tube* (in)

ID_t = Diameter dalam *tube* (in)

9. Menghitung Nilai *Clean Overall Heat transfer Coefficient* (U_c)

$$U_c = \frac{h_{io} \times h_o}{h_{io} + h_o} \quad (16)$$

10. Menghitung Nilai *Design/Dirty Overall Coefficient* (U_D)

$$U_D = \frac{Q}{A \times \Delta t} \quad (17)$$

11. Menghitung Nilai *Fouling Factor* (R_d)

$$R_d = \frac{U_c - U_D}{U_c \times U_D} \quad (18)$$

12. Menghitung Nilai Efisiensi Alat (η)

$$\eta = \frac{Q_t}{Q_s} \times 100\% \quad (19)$$

Keterangan :

Q_t = Jumlah panas yang dipindahkan oleh fluida dingin (Btu/jam)

Q_s = Jumlah panas yang dipindahkan oleh fluida panas (Btu/jam)

13. Menghitung *Pressure Drop*a. Menghitung *Shell side* :

$$\text{Pressure Drop Shell : } \Delta P_s = \frac{f \times G_s^2 \times ID_s \times (N+1)}{5,22 \times 10^{10} \times D_e \times S_{g_s} \times \phi_s} \quad (20)$$

b. Menghitung *Tube side*

$$\text{Pressure Drop Tube : } \Delta P_t = \frac{f \times G_t^2 \times L \times n}{5,22 \times 10^{10} \times ID_t \times S_{g_t} \times \phi_t} \quad (21)$$

Keterangan :

f = Friction factor (ft²/in)

$G_{s/t}$ = Mass velocity per cross section area shell/ tube (lb/jam.ft²)

$N+1$ = Number of Crosses

L = Panjang (ft)

n = Jumlah *passes*

D_e = Diameter ekuivalen *shell* (ft)

$\phi_{s/t}$ = Viskositas rasio fluida di *shell/tube*

$S_{g_{s/t}}$ = Specific Gravity fluida dalam *shell*

c. Menghitung *ssReturn pressure drop* (ΔP_r)

$$\Delta P_r = \frac{4 \times n \times v^2}{S_{g_t} \times 2 \times G_t} \quad (22)$$

Keterangan :

n = Jumlah *passes*

v = velocity (ft/jam)

S_{g_t} = Specific Gravity fluida dalam *tube*

G_t = Mass velocity per cross section area tube (lb/jam.ft²)

d. Total pressure drop (ΔP_T)

$$\Delta P_T = \Delta P_t + \Delta P_r \quad (23)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Heat Exchanger (HE)-03 yang terdapat di Unit Kilang PPSPDM merupakan penukar panas tipe *shell and tube*. Penukar panas ini terdiri dari sebuah silinder (*shell*) yang mengelilingi sekumpulan pipa (*tube bundle*), di mana energi panas ditransfer antara fluida yang mengalir di dalam pipa dan fluida yang mengalir di luar pipa (di dalam *shell*), dengan memanfaatkan perbedaan suhu untuk memungkinkan terjadinya proses perpindahan panas secara efisien [11]. Kinerja *heat exchanger* dianalisis menggunakan beberapa parameter, seperti efisiensi, *fouling factor*, dan *pressure drop*, yang memberikan gambaran mengenai performa *heat exchanger* dalam proses perpindahan panas. Hasil perhitungan ketiga parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai dasar penilaian kinerja HE-03.

Tabel 1. Hasil Perhitungan *Heat exchanger*-03

Data Perhitungan	Satuan	Standar	Hasil Perhitungan
U_c	Btu/hr.ft ² .°F	$U_c > U_d$	5,8666
U_d	Btu/hr.ft ² .°F	$U_c > U_d$	5,6384
R_d	hr.ft ² .°F/Btu	< 0,005	0,0069
η	%	Min.80%	66,81
ΔP_s	Psi	< 10 psi	0,02508
ΔP_t	psi	< 10 psi	0,001484

Efisiensi menunjukkan seberapa besar panas dari solar yang berhasil ditransfer ke *crude oil*. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan prosedur perhitungan menurut Kern (1965), panas yang dilepaskan oleh solar sebesar 1.164.973,61 Btu/jam, sedangkan panas yang diterima oleh *crude oil* sebesar 778.255,871 Btu/jam. Nilai efisiensi dari perhitungan tersebut ditampilkan pada Tabel 1 yaitu sebesar 66,81% dan *losses* sebesar 33,19%. Nilai ini menunjukkan bahwa HE-03 belum bekerja secara optimal karena efisiensinya masih di bawah standar kinerja industri yaitu 80% [12]. Efisiensi yang rendah menandakan bahwa sebagian panas tidak berhasil ditransfer dan hilang ke lingkungan. Kondisi ini umumnya dipengaruhi oleh peningkatan *pressure drop*, penurunan koefisien perpindahan panas, perubahan laju alir massa fluida, serta tingkat *fouling* di dalam *heat exchanger* [13].

Salah satu faktor yang berdampak pada efisiensi *heat exchanger* adalah *fouling factor*. Penumpukan *fouling* dan korosi pada permukaan pipa dapat menurunkan kinerja alat, memengaruhi suhu fluida serta koefisien perpindahan panas keseluruhan (U), dan menyebabkan ketidakefisienan operasional yang memerlukan perawatan rutin serta penggantian pipa [14]. Peningkatan *fouling factor* secara langsung menurunkan nilai U dan berdampak pada efektivitas perpindahan panas dalam sistem *heat exchanger*. Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai U pada kondisi bersih (U_c) sebesar 5,8666 Btu/hr.ft².°F lebih besar dibandingkan dengan kondisi kotor (U_d) sebesar 5,6384 Btu/hr.ft².°F, yang masih memenuhi standar kelayakan operasi. Namun, nilai R_d sebesar 0,0069 hr.ft².°F/Btu melebihi batas maksimum yang diperbolehkan, sehingga mengindikasikan bahwa *fouling* yang terjadi berupa pembentukan kerak pada permukaan pipa [15].

Penumpukan kerak ini meningkatkan resistansi terhadap perpindahan panas, mengurangi efektivitas *heat exchanger*, menyebabkan pemborosan energi, serta meningkatkan waktu henti (*downtime*) untuk proses pembersihan. Hal ini berdampak langsung pada penurunan efisiensi operasional secara keseluruhan [16]. Salah satu penyebab utama *fouling* dan korosi adalah sifat dari *crude oil* itu sendiri, yang mengandung senyawa hidrokarbon dan non-hidrokarbon seperti sulfur, nitrogen, oksigen, serta logam berat seperti Pb, V, Ni, dan Cu [17]. Kandungan sulfur, abu, dan sedimen dapat memicu pembentukan kerak, sedangkan keberadaan air dan garam dalam *crude oil* berpotensi menyebabkan korosi [18]. Oleh karena itu, pembersihan *heat exchanger* secara berkala sangat diperlukan untuk menjaga performa alat tetap optimal [19].

Tabel 2. Spesifikasi *Heat Exchanger*-03

Keterangan	Notasi	Nominal	Satuan
Diameter luar <i>shell</i>	OD _s	31,614	<i>inch</i>
Diameter dalam <i>shell</i>	ID _s	30,748	<i>inch</i>
Jumlah <i>baffle</i>	N	4	buah
Jarak antar <i>baffle</i>	B	23,623	<i>inch</i>
<i>Pitch</i>	Pt	1,25	<i>inch</i>
Diameter luar tube	OD _t	1	<i>inch</i>
Jumlah tube	N	400	buah
Jarak antar tube	C	0,25	<i>inch</i>
Dimensi tabung	BWG	14	-
Jumlah <i>passes (shell and tube)</i>	n	1	buah
Jenis <i>pitch</i>		Square	

Parameter penting lainnya dalam evaluasi kinerja *heat exchanger* adalah *pressure drop*, yaitu penurunan tekanan akibat gesekan antara fluida dan dinding saluran [20]. Tekanan ini berperan sebagai gaya penggerak aliran fluida di dalam *shell* maupun *tube* [21]. Menurut Kern (1965), batas *pressure drop* yang diperbolehkan untuk aliran fluida cair adalah 5–10 psi. Berdasarkan data pada Tabel 1, *pressure drop* pada *shell* sebesar 0,02508 psi dan pada *tube* sebesar 0,00148 psi, yang masih jauh di bawah batas maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa HE-03 masih layak untuk dioperasikan. Nilai *pressure drop* yang rendah ini kemungkinan disebabkan oleh konfigurasi 1-pass *shell* dan 1-pass *tube* pada HE-03 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, yang membuat aliran fluida hanya melewati satu lintasan. Desain ini mengurangi gesekan dan turbulensi, serta menghasilkan panjang lintasan yang lebih pendek dibandingkan dengan sistem *multi-pass* [22].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil evaluasi *Heat Exchanger* (HE)-03 menunjukkan efisiensi sebesar 66,81%, yang masih berada di bawah standar kinerja industri yaitu 80%. Penurunan efisiensi ini dipengaruhi oleh penumpukan *fouling* dan korosi pada permukaan pipa, yang menyebabkan penurunan nilai *overall heat transfer coefficient* (U) dan peningkatan *fouling factor* (Rd) melebihi batas yang diizinkan. Meskipun demikian, nilai U masih memenuhi standar kelayakan operasi dan *pressure drop* yang terjadi pada *shell* dan *tube* masih jauh di bawah batas maksimum, sehingga HE-03 dinyatakan masih layak dioperasikan.

Untuk meningkatkan kinerja HE-03, disarankan dilakukan pembersihan setiap 6 bulan. Selain itu, evaluasi efisiensi alat termasuk pengukuran *fouling factor* dan *pressure drop* dapat dilakukan bersamaan dengan pembersihan. Pemeriksaan menyeluruh terhadap kondisi alat dapat dilakukan setahun sekali untuk memastikan tidak ada kerusakan atau korosi yang parah. Pemasangan sensor pemantau suhu dan tekanan juga bisa dipertimbangkan untuk mendeteksi gangguan sejak dini.

REFERENSI

- [1] H. Uddhage, S. Kumbhare, dan K. Kumar Thakur, "Design And Development Of Shell And Tube Heat Exchanger by Using CFD," *IJARIE*, vol. 2, no. 1, 2016.
- [2] J. B. B. Rao dan V. R. Raju, "Numerical and Heat Transfer Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger With Circular and Elliptical Tubes," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 11, no. 1, 2016.
- [3] R. Schab, T. Dorau, S. Unz, dan M. Beckmann, "Parameter Study of Geometrically Induced Flow Maldistribution in Shell and Tube Heat Exchangers," *J Therm Sci Eng Appl*, vol. 14, no. 10, 2022.
- [4] R. Nugroho, S. Rulianah, Raharjo, dan C. Sindhuwati, "Evaluasi Faktor Kekotoran Pada Heat Exchanger-03 Crude Distillation Unit di PPSPDM Migas Cepu," *Distilat*, vol. 8, no. 1, hlm. 64–71, 2021.
- [5] A. Shahab dan A. Wahyuningsi, "Evaluasi Kinerja Heat Exchanger-003 di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak Dan Gas Bumi (PPSPDM MIGAS CEPU)," *Journal of Innovation Research and Knowledge*, vol. 2, no. 8, 2023.
- [6] R. Jalu Prabaswara, S. Rulianah, C. Sindhuwati, dan Raharjo, "Evaluasi Pressure Drop Heat Exchanger-03 Pada Crude Distillation Unit PPSPDM Migas Cepu," *Distilat*, vol. 7, no. 2, hlm. 505–513, 2021.
- [7] T. Mahmudiono, G. Widjaja, M.Z. Mahmoud, Y. Garnida, S. Aravindhan, G. Yasin, U.S. Altimari, M. Kadhimi, S. Chupradit, F.R. Alhachami, "Fouling Threshold Model of Plate Heat Exchangers for Use in The Dairy Industry," *Food Science and Technology*, vol. 43, 2023.
- [8] T. Lebele-Alawa, B. T. Lebele-Alawa, dan O. Ohia, "Influence of Fouling on Heat Exchanger Effectiveness in a Polyethylene Plant," *Energy and Power*, vol. 4, no. 2, hlm. 29–34, 2014.
- [9] D. Ratriyadi Romadon, "Pengaruh Pengendalian Temperatur Terhadap Pembentukan Fouling Pada Heat Exchanger," Surabaya, 2018.
- [10] D. Q. Kern, *Process Heat Transfer*. Tokyo: McGraw-Hill Book Company, 1965.
- [11] R. Kumar Gaur, Dr. S. Kumar Jain, dan Dr. S. Lomash, "Experimental Investigation on Triple Concentric Tube Heat Exchanger with Helical Baffles," *Smart Moves Journal Ijoscience*, vol. 6, no. 11, hlm. 14–20, 2020.
- [12] Y. A. Saputri, K. Sa'diyah, dan E. Yulianto, "Analisis Efisiensi Heater Pada Pengolahan Steam Unit 7 Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *Distilat*, vol. 8, no. 1, hlm. 54–63, 2022.
- [13] Q. W. Wang, G. D. Chen, J. Xu, dan Y. P. Ji, "Second Law Thermodynamic Comparison and Maximal Velocity Ratio Design of Shell and Tube Heat Exchangers with Continuous Helical Baffles," *J Heat Transfer*, vol. 132, no. 10, 2010.

- [14] Y. Amani dan M. Ilham Maulana, "Analisis Laju Fouling pada Tube Heat Exchanger 53 EA-1001," *Teknik Mesin Unsyiah*, vol. 4, no. 1, Jun 2016.
- [15] D. Alfianingrum dan A. Wibowo Ari, "Studi Pengaruh Ratio Umpan Reaksi Esterifikasi Terhadap Fouling Factor Preheater Kolom Destilasi Pemurnian Produk Metil Asetat," *Distilat*, vol. 6, no. 2, hlm. 254–258, 2019.
- [16] S. K. Ogbonnaya dan O. O. Ajayi, "Fouling Ihenomenon and its Effect on Heat Axchanger: A Review," *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, vol. 9, 2017.
- [17] H. Purwanto, R. Kurniawan Rustam, dan B. A. Budiarto, "Pemanfaatan Minyak Mentah (Crude Oil) Untuk Meningkatkan Stabilisasi Jalan Tanah Pada Daerah Makarti Jaya Kabupaten Banyuasin," *Jurnal Deformasi*, vol. 4, no. 2, Des 2019.
- [18] M. I. Pangindoman dkk., "ANALISIS DAMPAK BASE SEDIMENT & WATER TERHADAP LAJU KOROSI INTERNAL PIPELINE API 5L Gr B ANALYSIS OF BASE SEDIMENT & WATER EFFECT ON INTERNAL CORROSION RATE OF PIPELINE API 5L Gr B," *Jurnal Kinetika*, vol. 13, no. 03, hlm. 1–6, 2022.
- [19] F. Gora Sasmita, A. Dwi Yulianto, A. Fathul Huda, dan H. Priya Sudarminto, "Efektivitas Kinerja Heat Exchanger Shell and Tube 1- 2 dengan Variasi Flow Rate Natural Gas Pada Shell dan Reformer Pada Tube di Unit Hydrogent Plant 8 PT PERTAMINA (PERSERO) RU V Balikpapan," *Distilat*, vol. 7, no. 2, 2021.
- [20] Khairunnisa, E. Naryono, dan M. A. Ismail, "Evaluasi Efektivitas Alat Heat Exchanger 11e-25 Pada Kilang Fuel Oil Complex (FOC) I di PT Pertamina Ru-Iv Cilacap," *Distilat*, vol. 7, no. 2, hlm. 288–296, 2021.
- [21] A. Naufal, A. Ghifary, A. N. Hasya, T. Riadz, dan L. Cundari, "Evaluasi Kinerja Heat Exchanger E-401 Pada Unit PE3 PT Lotte Chemical Titan Nusantara," 2022.
- [22] Hairudin dan A. Mursadin, "Analisis Kinerja Condenser Shell And Tube Unit 2 di PT. PLN (Persero) Sektor Asam-Asam Kalimantan Selatan," *Rotary*, vol. 3, no. 2, 2021.