

## EVALUASI KINERJA HEAT EXCHANGER E-401 PADA UNIT PE3 PT. LOTTE CHEMICAL TITAN NUSANTARA

Achmad Naufal Al Ghifary<sup>1,\*</sup>, Amanda Nabila Hasya<sup>1</sup>, Tubagus Riadz<sup>2</sup>, Lia Cundari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya  
Jl. Raya Inderalaya-Prabumulih KM. 32  
Inderalaya, 30662, Indonesia

<sup>2</sup> PT. Lotte Chemical Titan Nusantara  
Jl. Raya Merak KM. 116  
Cilegon, 42436, Indonesia

\*Email: 03031281823042@student.unsri.ac.id

### Abstrak

*Heat exchanger* adalah peralatan yang digunakan dalam proses perpindahan panas antara fluida dingin dan panas yang memiliki perbedaan temperatur tanpa terjadi proses perpindahan massa di dalamnya. Permasalahan yang ada pada alat *heat exchanger* berupa pembentukan *fouling* yang dapat dipengaruhi oleh kondisi operasi yaitu temperatur fluida. Pembentukan *fouling* pada alat *heat exchanger* dapat menurunkan efisiensi kerja dari alat ini. Dalam laporan ini, dilakukan evaluasi kinerja *heat exchanger* E-401 pada Unit PE-3 PT. Lotte Chemical Titan Nusantara untuk mengetahui pengaruh dari gangguan pembentukan *fouling* terhadap kinerja dari *heat exchanger* E-401. Evaluasi kinerja *heat exchanger* E-401 diselesaikan dengan metode perhitungan Kern yang menggunakan aplikasi Microsoft Excel. Penelitian ini mengambil data operasional *heat exchanger* E-401 dalam rentang periode Agustus hingga Desember 2021 dengan tingkat efisiensi aktual sebesar 64.07%; 47.15%; 63.53%; 66.08%; 73.23%. Nilai *fouling factor* hasil perhitungan data aktual sebesar  $0.0002 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ . *Heat exchanger* E-401 memenuhi tingkat efisiensi desain jika mencapai angka 74.5827% dan nilai *fouling factor* desain sebesar  $0.0007 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ . Untuk itu, perlu dilakukan optimasi desain *heat exchanger* agar meningkatkan efisiensi kinerja alat.

**Kata Kunci:** *Heat Exchanger, Fouling Factor, Efisiensi*

*Performance evaluation of heat exchanger on PE3 unit of  
PT. Lotte Chemical Titan Nusantara*

### Abstract

Heat exchanger is equipment used in the process of heat transfer between hot and cold fluids that have a temperature difference without the process of mass transfer in it. Problems that may occurs in the heat exchanger tool in the form of fouling formation that can be affected by operating conditions such as fluid temperature. The formation of fouling on the heat exchanger can decrease the working efficiency of this equipment. In this report, an evaluation of the E-401 heat

exchanger was carried out on the PE-3 Unit of PT Lotte Chemical Titan Nusantara to figure out the influence of fouling formation on the performance of the E-401 heat exchanger. The performance evaluation of the E-401 heat exchanger was completed by the Kern calculation method using the Microsoft Excel application. This study took operational data of the E-401 heat exchanger in the period August to December 2021 with an actual efficiency rate of 64.07%; 47.15%; 63.53%; 66.08%; 73.23%. The fouling factor value of the actual data calculation is 0.0002 m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>C/kcal. Heat exchanger E-401 meets the design efficiency level if it reaches 74.5827% and the design fouling factor value of 0.0007 m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>C/kcal. For this reason, it is necessary to optimize the design of the heat exchanger in order to improve the performance efficiency of the equipment.

**Keywords:** *Heat Exchanger, Fouling Factor, Efficiency.*

## PENDAHULUAN

PT. Lotte Chemical Titan Nusantara melakukan proses produksi *High Density Polyethylene* (HDPE) dan juga *Linier Low Density Polyethylene* (LLDPE) yang dilakukan dengan melalui berbagai tahapan unit yaitu unit prepolimerisasi, unit polimerisasi, dan unit *Additive and Palleting* (APU). Unit polimerisasi merupakan tahapan yang sangat penting dimana pada unit ini etilena, hidrogen, nitrogen, butena dan prepolimer powder direaksikan di dalam *Fluidized Bed Reactor* (R-400). Reaksi tersebut merupakan reaksi eksotermis sehingga penting untuk menjaga suhu agar tetap stabil. Oleh karena itu, pada unit polimerisasi digunakan *heat exchanger* untuk menjaga kestabilan suhu reaktor. *Heat exchanger* didesain sedemikian rupa untuk memindahkan panas dari satu fluida ke fluida lain atau dari suatu zat ke zat lain. Jaringan aliran *heat exchanger* dalam suatu proses di pabrik diatur sedemikian untuk memanfaatkan penggunaan energi semaksimal mungkin dengan modal pemasangan sekecil mungkin. Dalam industri kimia, panas yang dihasilkan dalam suatu proses dapat dimanfaatkan kembali untuk memanaskan proses lain. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk memanfaatkan kembali panas yaitu *heat exchanger*.

*Heat exchanger* yang digunakan PT. Lotte Chemical Titan Nusantara pada unit polimerisasi merupakan tipe shell and tube. Terdapat dua buah *Heat exchanger* pada unit polimerisasi. Yang pertama berfungsi sebagai primary gas cooler dan yang kedua berfungsi sebagai final gas cooler yaitu untuk menurunkan temperatur umpan pada reaktor polimerisasi, sehingga sesuai dengan temperatur yang dibutuhkan. Menjaga kestabilan suhu reaktor sangat penting saat melakukan proses polimerisasi karena dapat menyebabkan kerugian proses jika diabaikan. Kerugian tersebut berupa reaksi akan berjalan lambat jika suhu reaktor kurang dari yang seharusnya dan jika suhu

reaktor lebih dari yang seharusnya dapat menyebabkan *flow ability* yang buruk dan menimbulkan kemungkinan terbentuknya agglom pada reaktor. Efisiensi *heat exchanger* yang menurun kemungkinan dapat disebabkan oleh penyumbatan powder pada tube dan juga terbentuknya kerak. Efisiensi *heat exchanger* yang menurun dapat mempengaruhi kinerja reaktor polimerisasi serta pada nilai ekonomis alat. Oleh karena itu, untuk mengetahui kelayakan operasinya *heat exchanger* harus dilakukan evaluasi.

Efisiensi *heat exchanger* yang menurun kemungkinan disebabkan oleh penyumbatan powder pada tube dan juga terbentuknya kerak. Selain itu, *heat exchanger* pada unit polimerisasi berjalan secara kontinu dan *heat exchanger* yang telah beroperasi dalam jangka waktu lama akan mengalami penurunan kinerja sehingga perlu dilakukan pembersihan pada periode tertentu (Djaruddin, 2008). Efisiensi *Heat Exchanger* yang menurun dapat mempengaruhi kinerja reaktor polimerisasi serta pada nilai ekonomis alat. Oleh karena itu, untuk mengetahui kelayakan operasinya *heat exchanger* harus dilakukan evaluasi. *Heat exchanger* E-401 pada PT. Lotte Chemical Titan Nusantara mulai digunakan sejak beroperasinya unit PE-3 yaitu pada Bulan Juni 1998 dan belum pernah dilakukan penggantian mayor ataupun minor dan hanya dilakukan pembersihan (*cleaning*) selama dua tahun sekali.

Namun, jika ditinjau dari performa *heat exchanger* yang masih baik pada tahun 2020 dan 2021 maka tidak dilakukan jadwal *cleaning* yang seharusnya dilakukan pada tahun 2020 dan akan dilakukan *cleaning* pada tahun 2022. Hal ini berarti *heat exchanger* E-401 belum dibersihkan sejak tahun 2018 dan menjadi keresahan dalam hal efisiensi. Selain itu evaluasi *heat exchanger* E-401 juga diperlukan karena berdasarkan data *trend* operasi didapatkan bahwa temperatur inlet maupun outlet *heat exchanger* E-401 telah

melenceng dari temperatur inlet dan outlet desain.

Salah satu proses evaluasi yang dapat dilakukan yaitu dengan meninjau nilai *fouling factor* (Rd) aktual berdasarkan data aktual dari *logsheet* yang ada kemudian dibandingkan dengan nilai *fouling factor* desain maksimal yang diperbolehkan (Jalu, dkk., 2021). Penurunan efisiensi yang disebabkan oleh *fouling factor* yang melebihi batas yaitu sebesar 374.83 W/m<sup>2</sup>°C dari batas desain 367.07 W/m<sup>2</sup>°C pernah terjadi pada PT. Pertamina RU IV-Cilacap dan didapatkan bahwa *heat exchanger* pada perusahaan tersebut mengalami penurunan efisiensi dan jika penurunan efisiensi *heat exchanger* terlalu besar dapat berdampak pada proses keseluruhan (Romadon, 2018). *Fouling factor* yang tinggi menyebabkan adanya endapan yang berat sehingga secara signifikan mengganggu aliran fluida dan meningkatkan penurunan tekanan yang diperlukan untuk mempertahankan laju aliran melalui *heat exchanger* (Labelealawa dan Ohia, 2014).

Pada laporan ini, evaluasi dilakukan dengan menggunakan metode Kern dengan mengevaluasi nilai koefisien perpindahan panas *clean overall* (Uc), koefisien perpindahan panas *dirty overall* (Ud), *fouling factor* (Rd) dan efisiensi (Kern, 1983). Dengan dilakukannya evaluasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi perpindahan kalor pada *heat exchanger* melalui upaya pembaruan, secara kondisi operasi maupun optimasi desain *heat exchanger*.

## METODOLOGI PENELITIAN

Metode perhitungan efisiensi *Heat Exchanger* menggunakan metode Kern, Evaluasi dilakukan dengan menggunakan metode Kern dimana evaluasi dilakukan terhadap nilai koefisien perpindahan panas *clean overall* (Uc), koefisien perpindahan panas *dirty overall* (Ud), *fouling factor* (Rd) dan efisiensi (Zain dan Mustain, 2020). Formula yang digunakan pada metode Kern terdiri dari menghitung kalor,

*Log Mean Temperature Difference* (LMTD), *Mean Temperature Difference* (MTD), *Overall Heat Transfer Coefficient*, *Fouling Factor*, *Pressure Drop* dan menghitung efisiensi. Adapun formula yang digunakan dengan metode Kern disajikan di bawah ini:

- Formula perhitungan kalor (Kern, 1983)

$$Q = m \times C_p \times \Delta t \quad (1)$$

- Formula perhitungan *Log Mean Temperature Difference* (Kern, 1983)

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

- Formula perhitungan *Mean Temperature Difference* (Kern, 1983)

$$\Delta t_m = \Delta t_{lm} \times cF \quad (3)$$

- Formula perhitungan *Overall Heat Transfer Coefficient* (Kern, 1983)

$$Q = U \times A \times \Delta t_m$$

$$Ud = \frac{Q}{A \times \Delta t_m} \quad (4)$$

- Formula perhitungan *Fouling Factor* (Kern, 1983)

$$Rd = \frac{Uc - Ud}{Uc \times Ud} \quad (5)$$

- Formula perhitungan *Pressure Drop* (Sinnot, 2005)

$$\Delta P_f = 8f_f \left( \frac{D_f}{d_i} \right) \left( \frac{L}{d_i} \right) \frac{\rho v^2}{2} \left( \frac{K}{\rho v} \right)^{-0.175}$$

$$\Delta P_e = N_p \left[ B_f \left( \frac{L}{d_i} \right) \left( \frac{v}{\rho v} \right)^{1.75} + 2.5 \right] \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.8) \quad (6)$$

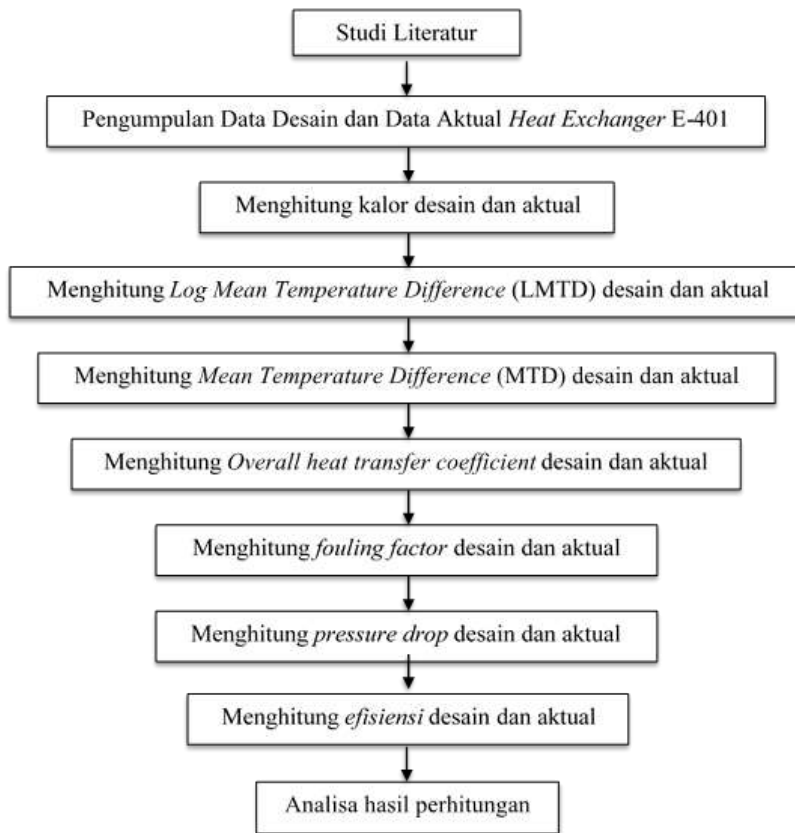
- Formula perhitungan efisiensi (Kern, 1983)

$$\eta = \frac{Q}{Q_{desain}} \times 100\% \quad (7)$$

## Diagram Alir Evaluasi

Diagram alir dari evaluasi *heat exchanger* dengan metode kern dan

simulasi dapat dilihat pada gambar dilakukan pengolahan data untuk mengetahui efisiensi *heat exchanger*.  
 dibawah ini :



**Data**

Pengumpulan data diperoleh melalui data desain dan data aktual yang ditampilkan pada tabel 2.1 dan 2.2. Berdasarkan data yang terkumpul,  
 A. Data Desain

**Tabel 1.** Data Desain

| <b>Data</b>                                     | <b>Shell Side</b>    | <b>Tube Side</b>          |
|---|----------------------|---------------------------|
| <i>Fluid circulated</i>                         | <i>Cooling water</i> | <i>Gas + Condensables</i> |
| Laju alir (kg/h)                                | 4080000              | 1269378.9                 |
| Temperatur <i>in</i> (oC)                       | 35                   | 60.6                      |
| Temperatur <i>out</i> (oC)                      | 39.2                 | 45.3                      |
| <i>Number of pass</i>                           | 1                    | 1                         |
| <i>Fouling resistance</i> (m <sup>2</sup> oC/W) | 0.0003               | 0.00071                   |
| <i>Pressure drop</i> (bar)                      | 0.44                 | 0.64                      |
| <i>Heat exchanged</i> (kW)                      |                      | 19697.5                   |
| MTD (oC)  |                      | 13.7                      |
| Ud (kcal/m <sup>2</sup> hoC)                    |                      |                           |
| Luas permukaan (m <sup>2</sup> )                |                      | 2607                      |

## B. Data Aktual

Tabel 2. Data Aktual

| Bulan     | Gas stream ( <i>Tube Side</i> ) |                |                 | Cooling water ( <i>Shell Side</i> ) |                |                 |
|-----------|---------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------------|----------------|-----------------|
|           | Flowrate<br>(Ton/hr)            | Tinlet<br>(oC) | Toutlet<br>(oC) | Flowrate<br>(Ton/hr)                | Tinlet<br>(oC) | Toutlet<br>(oC) |
| Agustus   | 1143.84                         | 51.99          | 43.48           | 4499.8                              | 42.49          | 43.74           |
| September | 1097.261667                     | 65.78          | 52.12           | 4498.76                             | 51.98          | 52.9            |
| Oktober   | 1072.978387                     | 56.98          | 45.78           | 4497.64                             | 45.18          | 46.42           |
| November  | 1095.0204                       | 63.69          | 51.1            | 4496.99                             | 50.54          | 51.83           |
| Desember  | 1083.672581                     | 66.3           | 52.47           | 4495.745                            | 51.89          | 53.32           |

## HASIL DAN PEMBAHASAN

*Heat exchanger* E-401 yang digunakan pada PT. Lotte Chemical Titan Nusantara pada unit PE 3 merupakan *heat exchanger* jenis *Shell and tube*. Pada bagian *shell*, dilalui oleh media pendingin berupa *cooling water* sedangkan *tube* dilalui oleh fluida gas dan *condensables*. Penggunaan media pendingin tersebut dikarenakan fungsi dari *heat exchanger* itu sendiri yaitu untuk menurunkan suhu gas dan *condensables* yang keluar dari *cyclone*. Tipe aliran yang digunakan pada *heat exchanger* E-401 adalah aliran *counter-current*. Dengan penggunaan aliran *counter-current* ini berarti aliran gas dan media pendingin dilakukan secara berlawanan arah. Aliran *counter-current* digunakan karena memberikan perpindahan panas yang lebih baik. *Heat exchanger* E-401 mulai digunakan sejak beroperasinya unit PE-3 yaitu pada Bulan Juni tahun 1998 dan sejak tahun tersebut belum pernah dilakukan penggantian mayor maupun minor.

### Analisa Nilai *Fouling Factor* pada *Heat Exchanger* E-401

Analisa *fouling factor* dilakukan karena *fouling* dapat mempengaruhi kinerja *heat exchanger*. *Fouling* merupakan peristiwa adanya padatan atau

hambatan di permukaan penukar panas yang terkontak dengan fluida kerja, termasuk permukaan perpindahan panas. Peristiwa tersebut dapat berupa pengendapan, pengerakan, dan proses biologi. *Fouling factor* yang tinggi menyebabkan adanya endapan yang berat sehingga secara signifikan mengganggu aliran fluida dan meningkatkan penurunan tekanan yang diperlukan untuk mempertahankan laju aliran melalui *heat exchanger* (Labele-alawa dan Ohio, 2014). Sehingga adanya *fouling* dapat menyebabkan nilai koefisien perpindahan panas ,mengecil sehingga proses perpindahan panas akan terhambat. Ukuran besarnya hambatan akibat adanya kotoran atau endapan di dalam *heat exchanger* itulah yang disebut dengan *fouling factor*.

Menurut Diaz-Bejarano dkk. (2018), pembentukan *fouling* mempengaruhi kinerja perpindahan panas serta hidraulik pada *shell side* di dua area. Pertama pada permukaan luar dari *tube side*. Hal ini disebabkan oleh penumpukan *fouling* pada permukaan perpindahan panas ini dengan bagian dalam dari *tube* terganggu. Selain itu, berkurangnya area dari aliran fluida meningkatkan kecepatan *cross flow*, sehingga meningkatkan juga koefisien perpindahan panas serta *pressure drop* dari *shell side*. Kedua pada area *shell clearances* (*bundle-to-shell*, *shell-to-baffle*

serta *tube-to-baffle*). Ketika HE dalam kondisi bersih, fraksi aliran yang melewati setiap *clearances* ditentukan berdasarkan *geometrical clearances*. Ketika *fouling* menumpuk, aliran pada HE menjadi tersumbat dan *flow resistance* pada *bypass* meningkat. Dampaknya, *cross-flow* beserta performa perpindahan panas serta hidrolis dari HE berubah seiring waktu.

Penelitian yang dilakukan oleh Chambon dkk. (2018) menyebutkan bahwa ada beberapa teknik mitigasi yang dapat dilakukan untuk mencegah pembentukan

*fouling* pada *heat exchanger* seperti optimisasi kondisi operasi seperti *temperatur* dan *flow rate inlet*, penggunaan senyawa kimia seperti menambahkan zat kimia cair anti-foulant kedalam *heat exchanger* namun dinilai kurang ekonomis karena biaya yang dibutuhkan untuk membersihkan *heat exchanger* sebesar \$40.000 sampai dengan \$50.000 tiap *heat exchanger* (Lawler, 1979), serta cara instalasi bagian *tube* pada *heat exchanger*.

| Bulan            | Shell            | Tube         | Rd Desain<br>(m <sup>2</sup> h°C/kcal) | Rd Aktual<br>(m <sup>2</sup> h°C/kcal) | Ket   |
|------------------|------------------|--------------|--|--|-------|
| Agustus          |                  |              |  | 0.0018                                 | Kotor |
| September        |                  | Gas          |  | 0.0019                                 | Kotor |
| Oktober          | Cooling<br>Water | +            | 0.0007                                 | 0.0014                                 | Kotor |
| November         |                  | Condensables |  | 0.0014                                 | Kotor |
| Desember         |                  |              |  | 0.0001                                 | Kotor |
| <b>Rata-rata</b> |                  |              |  | 0.0013                                 | Kotor |

**Gambar 1.** Perbandingan Nilai Rd Desain dan Rd Aktual

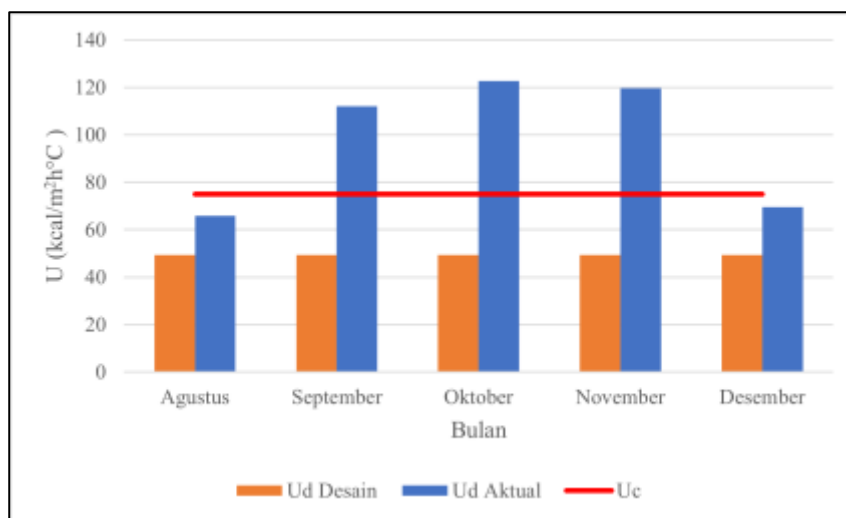
Perbandingan *fouling factor* desain dan aktual *heat exchanger* E-401 selama Agustus-Desember 2021 ditampilkan pada gambar 3.1. Besarnya nilai *fouling factor* berkaitan dengan nilai *overall heat transfer coefficient* pada saat terjadinya *fouling* ( $U_d$ ) dan pada saat bersih, tanpa kerak, dan tidak terjadinya *fouling* ( $U_c$ ). Nilai  $U_c$  merupakan nilai *overall heat transfer coefficient* terbaik yang dapat diberikan pada *heat exchanger* karena performa *heat exchanger* dihitung tanpa adanya pengaruh *fouling* sehingga nilai  $U_d$  tidak boleh melebihi nilai  $U_c$ . Pada perhitungan berdasarkan gambar 3.1 nilai  $U_d$  secara desain lebih kecil dari nilai  $U_c$ , begitu pula dengan hasil perhitungan aktual menunjukkan bahwa nilai  $U_d$  secara actual lebih kecil dari nilai  $U_c$ . Namun nilai  $U_d$  secara desain lebih kecil dibandingkan dengan nilai  $U_d$  aktual rata-rata.

Perhitungan nilai  $U_d$  dipengaruhi oleh *Mean Temperature Difference* (MTD). Nilai  $U_d$  berbanding terbalik dengan MTD dimana nilai MTD bergantung dengan perbedaan temperature gas inlet dan outlet. Temperatur input fluida bagian *tube* (gas) yang didapatkan memiliki rata-rata temperatur sebesar 60.95°C dan temperatur outputnya memiliki rata-rata 48.99°C. Temperatur ini memiliki perbedaan yaitu lebih besar secara keseluruhan dari temperatur desain dengan input sebesar 60.6°C dan output sebesar 45.3°C. Hal yang sama juga terjadi pada temperatur outlet aktual fluida bagian *shell* (*cooling water*) dengan rata-rata sebesar 49.64°C yang lebih besar dibandingkan dengan temperatur desain yaitu 39.2°C. Temperatur inlet aktual *cooling water* dengan rata-rata sebesar 48.42°C yang juga lebih besar jika dibandingkan dengan temperatur desainnya sebesar 35°C. Perbedaan temperatur tersebut akan



mempengaruhi proses perpindahan panas di dalam *heat exchanger*. Perbandingan

hasil perhitungan nilai  $U_c$ ,  $U_d$  desain, dan  $U_d$  aktual dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 2.** Perbandingan nilai  $U_c$ ,  $U_d$  desain, dan  $U_d$  Aktual

Walaupun secara keseluruhan temperature inlet dan outlet masing masing secara aktual lebih besar daripada desain, namun yang mempengaruhi nilai  $U_d$  adalah perbedaan temperature inlet dan outletnya. Secara desain, perbedaan temperature gas inlet dan outlet lebih besar dibandingkan dengan perbedaan temperature gas inlet dan outlet aktual. Dimana perbedaan temperature gas inlet dan outlet sebesar  $15.3^{\circ}\text{C}$  dan rata-rata perbedaan temperature gas inlet dan outlet aktual adalah  $11.96^{\circ}\text{C}$ . Hal tersebut menyebabkan nilai  $U_d$  aktual lebih besar dibandingkan dengan nilai  $U_d$  desain. Hasil perhitungan secara aktual memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan nilai *fouling factor* desain yang tertera pada table 3.2. yaitu nilai *fouling factor* aktual rata-rata sebesar  $0.001334236706 \text{ m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$  dan nilai *fouling factor* desain sebesar  $0.000694361749 \text{ m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$ . *Inlet heat exchanger* E-401 adalah gas hidrokarbon keluaran dari *cyclone* dimana *cyclone* tersebut berfungsi untuk memisahkan gas hidrokarbon dengan *powder* polietilen sehingga penyebab lain dari besarnya nilai *fouling factor* aktual adalah dikarenakan adanya sisa *powder* yang lolos keluar dari *cyclone* tersebut

karena memiliki ukuran yang terlalu kecil yaitu kurang dari  $80\mu\text{m}$ .

Nilai *fouling factor* aktual hasil perhitungan sudah jauh melebihi nilai *fouling factor* secara desain yang merupakan besarnya nilai *fouling factor* maksimal yang diperbolehkan terjadi dalam suatu *heat exchanger* sehingga hal ini menunjukkan terjadinya penumpukan terhadap *fouling* yang akan menghambat perpindahan panas sehingga perlu dilakukan pembersihan (*cleaning*).

#### **Analisa Efisiensi *Heat Exchanger* E-401**

Sistem aliran perpindahan panas pada *heat exchanger* biasanya menggunakan *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) untuk menentukan temperature *driving forcenya*. Nilai LMTD yang besar menunjukkan perpindahan panas yang terjadi juga besar. Nilai LMTD *heat exchanger* E-401 telah didapatkan dari hasil perhitungan yang telah dilakukan. Nilai LMTD aktual hasil perhitungan yaitu rata-rata sebesar  $3.481^{\circ}\text{C}$ . Nilai tersebut memiliki nilai yang terlampaui jauh lebih rendah dari nilai LMTD desain dengan nilai sebesar  $15.179^{\circ}\text{C}$ . Perbedaan nilai LMTD desain dan aktual dapat dilihat pada gambar 3.3.



| Bulan     | Shell            | Tube         | LMTD           | LMTD           | Ud                                  | Ud                                  | Uc                        |
|-----------|------------------|--------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|           |                  |              | Desain<br>(°C) | Aktual<br>(°C) | Desain<br>(kcal/m <sup>2</sup> h°C) | Aktual<br>(kcal/m <sup>2</sup> h°C) | (kcal/m <sup>2</sup> h°C) |
| Agustus   |                  |              |                | 3.4241         |                                     | 65.9086                             |                           |
| September | Cooling<br>Water | Gas          |                | 2.8175         |                                     | 112.1526                            |                           |
| Oktober   |                  | +            | 13.7           | 3.4729         | 49.2981                             | 122.6023                            | 74.9560                   |
| November  |                  | Condensables |                | 3.7013         |                                     | 119.6593                            |                           |
| Desember  |                  |              |                | 3.9895         |                                     | 69.6189                             |                           |
| Rata-rata |                  |              |                | 3.4811         |                                     | 54.1619                             |                           |

**Gambar 3.3.** Perbandingan Nilai LMTD Desain dan Aktual

Hal tersebut menandakan bahwa panas yang berpindah dari fluida panas ke fluida dingin secara aktual lebih kecil dibandingkan dengan kondisi desainnya yang ditunjukkan pada gambar 3.5 dengan  $Q_{\text{desain}}$  yaitu 16,948,154.47 kcal/h sedangkan  $Q_{\text{aktual}}$  rata-rata hanya sebesar 10,645,810.56 kcal/h. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa apabila nilai perbedaan temperatur LMTD semakin tinggi artinya penyerapan gas buang ke dalam pipa terhalang hambatan-hambatan (*fouling*) dan perpindahan panas tidak maksimal, maka kalor uap yang dihasilkan rendah dan menurunkan laju perpindahan panas pada heat exchanger (Suhengki dan Lubis, 2018).

Selain dikarenakan oleh nilai LMTD, besarnya efisiensi juga dipengaruhi oleh nilai *fouling factor* yang telah dibahas sebelumnya. Dimana nilai *fouling factor* aktual lebih besar daripada nilai *fouling factor* desain. Hal ini menyebabkan efisiensi aktual lebih rendah dibandingkan efisiensi desain karena *fouling* menyebabkan terbentuknya lapisan pengotoran yang menyebabkan penambahan tahanan termal dan menyebabkan laju perpindahan panas pada heat exchanger berkurang sehingga berpengaruh pada kinerja *heat exchanger*. Efisiensi yang didapatkan dari perhitungan berdasarkan data desain yaitu sebesar 74.58% sedangkan efisiensi aktual pada Bulan Agustus hingga Desember 2021 secara berurutan yaitu sebesar 64.07%;

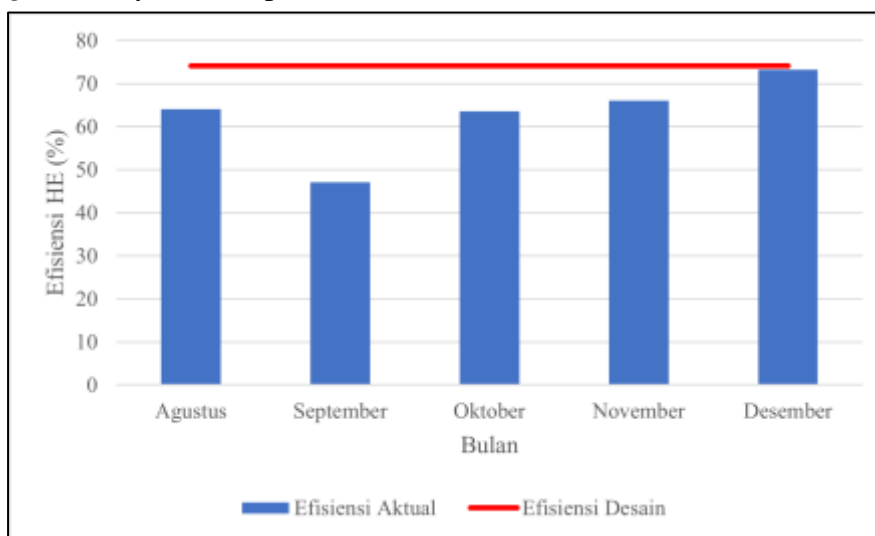
47.15%; 63.53%; 66.08%; 73.23% seperti disajikan pada gambar 3.5.

Hasil perhitungan efisiensi menunjukkan hasil yang tidak linear bahkan pada bulan September terjadi penurunan yang signifikan, hal ini disebabkan oleh temperatur inlet yang tidak linear pada *cooling water*. Nilai temperatur aktual yang fluktuatif dan tidak sesuai dengan kondisi desain juga disebabkan heat exchanger dan reaktor memiliki sistem yang berbeda terlepas dari gas loop. Heat exchanger memiliki loop sendiri dimana *cooling water* yang telah digunakan didinginkan kembali dengan mengontakkannya dengan air laut. Hal ini disebabkan karena *cooling water* yang digunakan pada *heat exchanger* E-401 menggunakan air demineralisasi. Setelah air demin berkontak di E-401, air demin akan didinginkan (diturunkan temperaturnya) dengan cara dikontakkan ke air laut. Air laut yang berkontak dengan air demin ini pun tidak konstan temperaturnya.

Temperatur air laut juga tidak konstan disebabkan karena pengaruh cuaca. Temperatur inlet *cooling water* tersebut mempengaruhi nilai LMTD dimana nilai LMTD mempengaruhi besarnya efisiensi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Oleh karena itu, untuk meminimalisir tidak linearnya temperatur *inlet* maka perlu dilakukan pengontrolan temperatur inlet yang disebabkan oleh hasil proses sebelumnya. Namun, karena ada pengaruh

eksternal yang berdampak pada temperatur inlet cooling water yaitu temperatur air

laut yang tidak bisa dikontrol.



**Gambar 3.4.** Grafik Efisiensi Heat Exchanger E-401

Efisiensi kinerja *heat exchanger* E-401 selama Agustus-Desember 2021 ditampilkan pada gambar 3.4. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan kinerja *heat exchanger* E-401 telah mengalami penurunan efisiensinya dalam melakukan

proses perpindahan panas. Efisiensi *heat exchanger* E-401 mengalami penurunan efisiensi rata-rata sebesar 11.77% dari efisiensi desainnya. Perbandingan efisiensi desain dan aktual ditampilkan pada gambar 3.5.

| Bulan            | Q Desain<br>(kcal/h) | Q Aktual<br>(kcal/h) | Efisiensi<br>Desain<br>(%) | Efisiensi<br>Aktual<br>(%) |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Agustus          |                      | 10,859,352.47        |                            | 64.0739                    |
| September        |                      | 7,990,636.181        |                            | 47.1475                    |
| Oktober          | 16,948,154.47        | 10,767,306.63        | 74.5827                    | 63.5308                    |
| November         |                      | 11,199,853.38        |                            | 66.0830                    |
| Desember         |                      | 12,411,904.13        |                            | 73.2345                    |
| <b>Rata-rata</b> |                      | <b>10,645,810.56</b> |                            | <b>62.814</b>              |

**Gambar Error! No text of specified style in document.5.** Perbandingan Nilai Efisiensi Desain dan Aktual

Penurunan efisiensi yang terjadi pada bulan September terjadi karena adanya transisi dari *mass flow rate* dari senyawa butene yang masuk ke dalam *heat exchanger* E-401. Butene dalam proses polimerisasi berperan sebagai kontrol densitas dari *powder* polietilen. Butene yang masuk ke dalam aliran *loop gas recycle* unit polimerisasi memiliki fasa

*liquid* yang akan dimasukkan ke aliran setelah *outlet* dari *cyclone*. Aliran gas dari *cyclone* masih memiliki temperatur tinggi (sekitar 80°C) sehingga diharapkan butene akan ter-evaporasi dalam pertemuan aliran tersebut.

Namun, karena adanya perubahan *mass flow rate* butene pada bulan Agustus dari konsentrasi 0% menjadi sekitar 15%, terjadi *partial block* yang menghambat

proses perpindahan panas dalam *heat exchanger*. *Partial block* merupakan dampak dari belum seimbangannya kondisi perubahan fasa butene yang masuk ke dalam aliran *gas recycle*. Efisiensi yang turun tiba-tiba dalam industri polietilen merupakan hal yang wajar karena data *heat exchanger* yang dihimpun pada Agustus-Desember 2021, terjadi transisi *grade product* yang akan diproduksi sehingga *heat exchanger* E-401 belum perlu dilakukan pembersihan sebelum jadwal rutin yang seharusnya.

Pembersihan *heat exchanger* E-401 pada PT. Lotte Chemical Titan Nusantara dilakukan mengikuti jadwal pencucian keseluruhan pabrik yaitu yang dilakukan setiap 2 tahun sekali. Namun ditinjau dari performa tahun 2020 dan 2021 yang masih baik, *heat exchanger* yang seharusnya dibersihkan pada tahun 2020 belum dibersihkan dimana *heat exchanger* terakhir dibersihkan pada tahun 2018. Pembersihan selanjutnya akan dilakukan pada tahun 2022.

*Heat exchanger* E-401 hanya berjumlah satu alat dan tidak dapat digantikan dengan alat lain sehingga pencuciannya mengharuskan pabrik untuk *shutdown*. Maka, pencucian *heat exchanger* E-401 mengikuti jadwal *shutdown* pabrik sehingga pencucian lebih efisien dan tidak mengganggu proses utama pabrik.

Menurut Barun dan Rukmana (2007), nilai efisiensi *heat exchanger* dapat ditingkatkan dengan menggunakan perubahan laju aliran massa fluida dinginnya karena setiap fluida dingin yang mengalir ke dalam alat penukar panas akan membawa panas yang dialirkan melalui dinding-dinding pipa suatu alat penukar panas tersebut (konduktansi), selain itu kecepatan fluida dingin yang mengalir akan semakin mempermudah panas meresap kedalam fluida dingin (konveksi). Maka dari itu, semakin besar laju aliran massa fluida dingin yang dialirkan pada suatu alat penukar panas maka akan semakin besar keefektifan yang akan

dihasilkan oleh alat penukar panas tersebut.

Namun berdasarkan data yang telah didapatkan pada bulan agustus sampai desember 2021, diketahui bahwa laju alir fluida dingin yaitu *cooling water* sudah lebih besar dibandingkan dengan laju alir *cooling water* desain dimana laju alir *cooling water* aktual memiliki nilai rata rata sebesar 4,497.787 ton/jam dan laju alir *cooling water* desain sebesar 4,080 ton/jam. Tetapi dengan laju alir *cooling water* aktual yang lebih besar dibandingkan dengan laju alir *cooling water* desain, efisiensi rata rata aktual tetap lebih kecil dibandingkan dengan efisiensi desain. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *fouling factor* sangat mempengaruhi efisiensi *heat exchanger*.

Berdasarkan gambar 3.3. sampai gambar 3.5 didapatkan bahwa nilai efisiensi *heat exchanger* yang menunjukkan kemampuan perpindahan alat tersebut berbanding lurus dengan koefisien perpindahan panas global, nilai LMTD dan nilai *fouling factor*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh (Suhengki dan Lubis, 2018). Pada penelitiannya, dinyatakan bahwa laju perpindahan panas pada *superheater* berbanding lurus dengan koefisien perpindahan panas global pada *superheater* dan berbanding lurus dengan nilai LMTD nilai *fouling factor* *superheater* tersebut. Pernyataan di atas membuktikan persamaan berikut ini

$$Q = U \times A \times F \times \text{LMTD}$$

Keterangan:

U = overall heat transfer coefficient

A = heat transfer area

F = fouling factor

LMTD = log mean temperature difference

### **Analisa Pressure Drop pada Heat Exchanger E-401**

*Pressure drop* merupakan peristiwa menurunnya tekanan dari satu titik ke titik lainnya dalam suatu pipa atau tabung. *Pressure drop* dipengaruhi oleh berbagai macam faktor, beberapa diantaranya yaitu

faktor gesekan, diameter pipa, panjang pipa, temperatur aliran, dan kecepatan aliran yang terjadi di dalam pipa atau

tabung sehingga pressure drop memiliki peranan penting dalam kinerja *heat exchanger*.

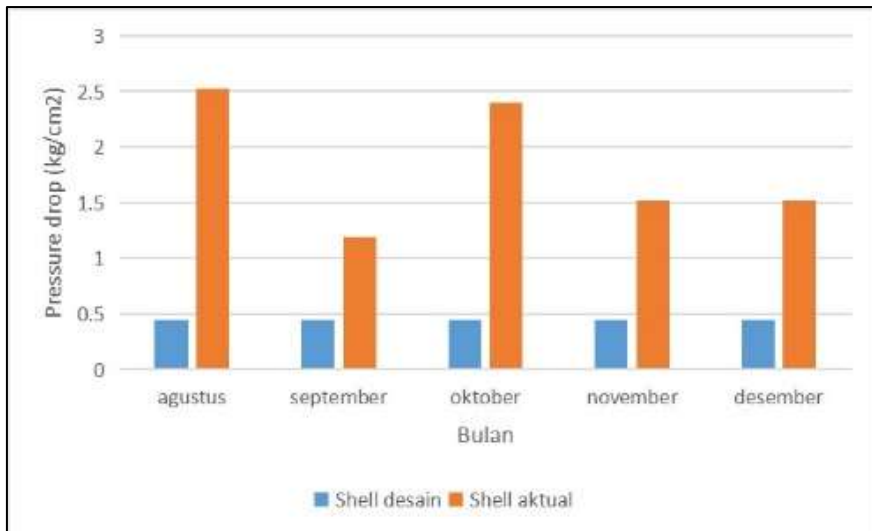
| Bulan            | Pressure Drop Desain (kg/cm <sup>2</sup> ) |        | Pressure Drop Aktual (kg/cm <sup>2</sup> ) |        |
|------------------|--|--------|--|--------|
|                  | Shell                                      | Tube   | Shell                                      | Tube   |
| Agustus          |  |        | 2.5280                                     | 0.1019 |
| September        |  |        | 1.1937                                     | 0.1033 |
| Oktober          | 0.4487                                     | 0.6526 | 2.4020                                     | 0.0797 |
| November         |  |        | 1.5202                                     | 0.0823 |
| Desember         |  |        | 1.5203                                     | 0.0822 |
| <b>Rata-rata</b> |  |        | 1.8328                                     | 0.0899 |

**Gambar 3.6.** Perbandingan *Pressure Drop* Desain dan Aktual

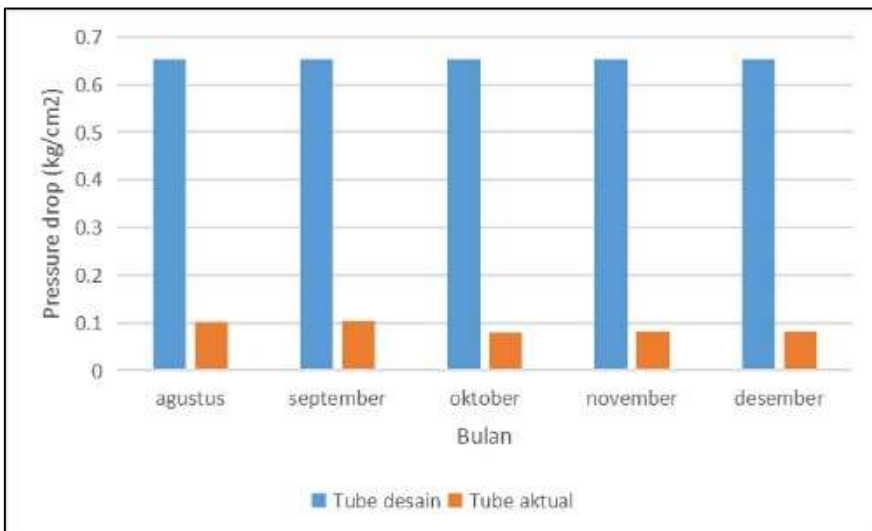
Perhitungan *pressure drop* telah dilakukan terhadap *Heat Exchanger* E-401 dari Bulan Agustus hingga Desember 2021 dan hasilnya ditunjukkan pada gambar 3.6. Berdasarkan tabel tersebut menunjukkan *pressure drop* aktual pada shell memiliki nilai lebih besar daripada *pressure drop* desain. Sedangkan pada *pressure drop* bagian tube memiliki nilai yang lebih kecil daripada *pressure drop* desain. Hal tersebut juga menyebabkan efisiensi aktual lebih kecil dibandingkan efisiensi desain. Hasil perhitungan *pressure drop* desain dan aktual pada bagian *shell* dan *tube heat exchanger* E-401 ditampilkan dalam gambar 3.7 dan 3.8.

Nilai *pressure drop* yang melebihi batas *pressure drop* desain adalah *pressure drop* pada bagian *shell* sehingga perlu untuk

dilakukan optimasi. Untuk mengoptimasi *pressure drop* yang terjadi pada bagian *shell* agar nilai *pressure drop* aktual bisa lebih kecil dari nilai *pressure drop* desain, salah satunya yang terlibat dalam nilai *pressure drop* tersebut adalah variabel diameter *shell* dibagi dengan diameter ekuivalen. *Pressure drop* dipengaruhi oleh bilangan Reynolds dimana semakin besar bilangan Reynolds aliran menjadi semakin turbulen dan menyebabkan *pressure drop* yang lebih. Bilangan Reynolds juga dipengaruhi oleh diameter pipa atau wadah aliran mengalir. Bilangan Reynolds akan mempengaruhi efisiensi dari alat *heat exchanger*, artinya semakin rendah Bilangan Reynolds akan menghasilkan efisiensi *heat exchanger* yang optimum



**Gambar 3.7.** *Pressure drop* pada bagian shell



**Gambar 3.8.** *Pressure drop* pada bagian tube

*Pressure drop* pada bagian *shell* yang tinggi juga disebabkan oleh *flow rate cooling water* karena *pressure drop* dapat terjadi karena penurunan kecepatan ataupun perubahan tinggi suatu fluida. Nilai dari *pressure drop* sendiri dipengaruhi oleh kecepatan aliran saat masuk dan luas penampang pipa. Hal ini mengakibatkan semakin besar *flow rate*, maka *pressure drop* akan semakin besar (Falah, 2018). *Flow rate cooling water* aktual pada Bulan Agustus sampai Desember 2021 memiliki rata-rata sebesar 4,497.787 ton/jam. Nilai rata-rata *flow rate* aktual tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai *flow rate* desain yaitu sebesar 4,080 ton/jam. Besarnya nilai ratarata *flow rate* aktual tersebut berarti *cooling water* mengalir terlalu besar dibandingkan kebutuhan *heat exchanger* E-401. Hal tersebut dapat menyebabkan adanya gesekan dan menyebabkan tingginya *pressure drop*. Berdasarkan nilai *flow rate* tersebut direkomendasikan untuk memperkecil nilai *flow rate* sesuai dengan kebutuhan *cooling water* yaitu sebesar nilai *flow rate* desain. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Rahmadani (2017) dimana nilai *flow rate* aktual lebih besar dari nilai *flow rate* desain sehingga dilakukan optimasi dengan cara memperkecil nilai *flow rate* dan didapatkan perbedaan temperatur *inlet* dan *outlet* yang lebih besar karena perpindahan panas yang terjadi lebih besar.

Menurut Tabares dkk. (2019), efisiensi *heat exchanger* dapat dicapai dengan menyeimbangkan variabel-variabel seperti *pressure drop*, tenaga pompa, pembentukan *fouling*, dan erosi pada pipa. Selain itu, *pressure drop* juga dipengaruhi oleh *baffle spacing* berdasarkan rumus yang telah dilampirkan sebelumnya bahwa *pressure drop* dipengaruhi oleh perbandingan panjang *shell* dan *baffle spacing*. Sinnot (1993) menyatakan bahwa *baffle spacing* yang efektif berada pada rentang 0.2-1 m dari diameter *shell*. Menurut TEMA (*Tubular Exchanger*

*Manufacturers Association*), *baffle spacing* harus lebih besar dari 1/5 dari diameter dalam *shell* (Ali, dkk., 2012). *Baffle spacing* pada data adalah 162.4 mm dan diameter *shell* pada data sebesar 1,7 m. Nilai minimum *baffle spacing* adalah 0.34 m atau  $3.4 \times 10^{-4}$  mm. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *baffle spacing* sudah memenuhi nilai minimum, namun direkomendasikan untuk diperbesar hingga 0.73546 m atau 735,46 mm untuk mengurangi *pressure drop* karena *baffle* meningkatkan turbulensi sehingga dengan menambah *baffle spacing* maka *baffle* yang digunakan semakin sedikit sehingga turbulensi dapat berkurang.

Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Prabaswara, dkk. (2021) yang menyatakan bahwa penurunan tekanan semakin lama semakin besar sebab *fouling factor* yang tersedia semakin mendekati jenuh/melebihi batas 10% dari desain. Kenaikan *pressure drop* pada *shell and tube heat exchanger* juga dapat disebabkan oleh pengaturan jarak *baffle* yang kurang memadai. Dimana jarak *baffle* tersebut mempengaruhi pola pembentukan deposit padatan pada titik-titik tertentu yang menyebabkan kenaikan *pressure drop*.

Penggunaan atau penambahan *baffle* membuat kecepatan fluida dingin dalam *shell* meningkat karena luas penampang yang tegak lurus dengan aliran udara semakin kecil. Dengan bertambahnya kecepatan aliran, koefisien perpindahan panas akan meningkat. Oleh karena itu dengan bertambahnya jumlah *baffle* yang dipasang, atau semakin kecil jarak antar *baffle*, efektifitas meningkat. Namun, dengan bertambahnya jumlah *baffle* membuat fraksi aliran melintang (*cross flow*) menurun (Anggraini, 2001). Menurut Hewitt, G.F., Shires, G.L., and Bott, T.R. (1994), perpindahan panas yang paling efektif dalam *heat exchanger* adalah pada aliran jenis melintang (*cross flow*). Dengan berkurangnya fraksi aliran melintang berarti perpindahan panas dari fluida panas ke fluida dingin menjadi berkurang. Jadi,

jarak antar *baffle* yang lebih kecil menaikkan koefisien perpindahan panas namun mengurangi fraksi aliran melintang. Fenomena ini membuat adanya harga optimum dari efektifitas pada jarak antar *baffle* tertentu.

Peningkatan dari *baffle spacing* akan mengurangi kecepatan aliran fluida sehingga *pressure drop* serta *overall heat transfer coefficient* juga ikut berkurang. Pernyataan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Li dan Kottke (1998). *Pressure drop* yang kecil artinya aliran makin berkurang turbulensinya dalam sistem perpindahan panas, sehingga jumlah panas yang berpindah menjadi berkurang juga namun hal ini meningkatkan efisiensi kinerja *heat exchanger*. Artinya, dalam proses mendesain *heat exchanger* perlu memperhatikan *pressure drop* yang ideal agar perpindahan panas yang terjadi dalam *heat exchanger* dapat berjalan dengan optimal.

### SIMPULAN

*Heat exchanger* E-401 dinyatakan kotor pada Bulan Agustus – Desember 2021 dengan nilai  $R_d$  rata-rata yaitu  $0.0013 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$  karena telah melewati batas maksimal yang diperbolehkan yaitu maksimal  $0.0007 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$ . Efisiensi *heat exchanger* E-401 aktual pada Bulan Agustus – Desember 2021 secara berurutan yaitu 64.07%; 47.15%; 63.53%; 66.08%; 73.23% telah berkurang sekitar 11.77% dari efisiensi desain sebesar 74.58%. *Pressure drop Heat exchanger* E-401 pada Bulan Agustus – Desember 2021 pada bagian *shell* dengan rata-rata yaitu sebesar  $1.8333 \text{ kg}/\text{cm}^2$  dan *tube*  $0.0899 \text{ kg}/\text{cm}^2$ . Nilai *pressure drop tube* belum melebihi batas maksimal yang diperbolehkan berdasarkan *pressure drop* desain yaitu sebesar  $0.6526 \text{ kg}/\text{cm}^2$ . Sedangkan nilai *pressure drop shell* lebih besar dari batas maksimal yang diperbolehkan berdasarkan *pressure drop* desain yaitu sebesar  $0.4487 \text{ kg}/\text{cm}^2$ . Hal tersebut memicu penurunan efisiensi *Heat*

*exchanger* E-401. Sehingga Temperatur dan laju alir *Heat exchanger* E-401 lebih baik dilakukan pengecekan setiap hari agar mendapatkan data yang lebih akurat untuk dilakukan perhitungan *fouling factor*, *pressure drop*, dan efisiensi. Diperlukan pengendalian kondisi operasi seperti laju alir dan temperatur agar tidak terlalu jauh dengan kondisi operasi desain sehingga perpindahan panas dapat berjalan optimal. Serta direkomendasikan untuk mengurangi diameter shell serta menambah *baffle spacing* agar nilai *pressure drop* aktual pada bagian shell dapat memenuhi nilai standar *pressure drop* desain.

### DAFTAR PUSTAKA

- B. Aznam dan E. Rukmana. 2007. *Analisis Performansi pada Heat Exchanger Jenis Shell and Tube Tipe Bem Dengan Menggunakan Perubahan Laju Aliran Massa Fluida Panas (Mh)*. SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Vol. 1, #1, 1-7.
- C. Anthony, Z. Anxionnaz-Minvielle, G. Cwicklinski, N. Guintrand, A. Buffet dan B. Vinet. 2020. *Shell-and-tube Heat Exchanger Geometry Modification: An Efficient Way to Mitigate Fouling*. Heat Transfer Engineering. Vol. 41, #2, 170-177.
- D.B. Emilio, F. Coletti, S. Macchietto. 2019. *Modeling and Prediction of Shell-side Fouling in Shell-and-tube Heat Exchangers*. Heat Transfer Engineering. Vol. 40, No. 11, pp. 845-861.
- Falah, H. 2018. *Analisis Pengaruh Flow Rate dan Pressure pada In Situ Well Repair Menggunakan Material Polyacrylamide dengan Cfd-Fem Coupling Method*. Tugas Akhir S1 Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- H. Ekadewi Anggraini. 2001. *Penggunaan Baffle pada Shell-and-Tube Heat Exchanger*. Jurnal Teknik Mesin. Vol. 3, #1, 19-23.
- H. Djaruddin. 2008. *Metode Penentuan Waktu Pembersihan Penukar Panas*



- Reaktor Nuklir*. Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir. Vol. 5, #2 25-31.
- H. Suhengki. dan A.F. Lubis. 2018. *Pengaruh Fouling terhadap Laju Perpindahan Panas pada Superheater Boiler CFB PLTU Sebalang*. Jurnal Power Plant. Vol. 6, #1, 48-57.
- G. F. Hewitt, G.L. Shires dan T. R. Bott, 1994. *Process Heat Transfer*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- F.J. Ali, A. Baheri, M.K. Hafshejani dan A. Arad. 2012. *Optimization of baffle spacing on heat transfer, pressure drop and estimated price in a shell-and-tube heat exchanger*. World Applied Sciences Journal. Vol. 18, #12, 1727-1736.
- D.Q. Kern, 1983. *Process Heat Transfer*. McGraw-Hill: Singapore.
- Labele-alawa, B.T. dan I.O. Ohia. 2014. *Influence of Fouling on Heat Exchanger Effectiveness in a Polyethylene Plant*. Energy and Power. Vol. 4, #2, 29-34.
- D. Lawler, 1979. *Fouling of Crude Oil in Refinery Heat Exchangers*. In *Proceeding of the Conference on Fouling, Science or Art, The Institute of Chemical Engineers UK*.
- L. Huadong dan V. Kottke. 1998. *Effect of baffle spacing on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement*. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 41, #10, 1303-1311.
- P. Reftian Jalu, S. Rulianah, C. Sindhuwati dan R. Raharjo. 2021. *Evaluasi Pressure Drop Heat Exchanger-03 pada Crude Distillation Unit PPSDM Migas Cepu*. Jurnal Teknologi Separasi. Vol. 7, #2, 505-513.
- Rahmadani, F. 2017. *Optimasi Kondisi Operasi untuk Mengurangi Fouling pada Heat Exchanger di Residual Fluid Catalytic Cracking Unit (RFCC) PT. Pertamina (persero) RU IV – Cilacap*. Tugas Akhir S1 Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Romadon, D. 2018. *Pengaruh Pengendalian Temperatur terhadap Pembentukan Fouling pada Heat Exchanger*. Tugas Akhir S1 Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- R. K. Sinnott, 1993. *Chemical Engineering Design Volume 6 Second Edition*. Oxford: Pergamon Press.
- R. K. Sinnott, 2005. *Chemical Engineering Design Volume 6 Fourth Edition*. London; Elsevier.
- J. S. R. Tabares, L. Perdomo-Hurtado dan J. L. Aragon. 2019. *Study of Gasketed-Plate Heat Exchanger Performance based on Energy Efficiency Indexes*. Applied Thermal Engineering. Vol. 159, 113-902.
- M.R. Zain dan A. Mustain. 2020. *Evaluasi Efisiensi Heat Exchanger (HE - 4000) dengan Metode Kern*. Jurnal Teknologi Separasi. Vol. 6, #2, 415-420.