

Pengukuran efisiensi perpindahan panas pada *heat exchanger shell and tube* dengan metode *Log Mean Temperature Difference (LMTD)*

Cindy Caroline^{1*}, Ibnu Abdul Rosid¹

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Teknologi Industri, Universitas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta

*Email korespondensi : saticiyasr@gmail.com

Received Feb 15, 2022; Accepted Feb 24, 2022; Published Mar 8, 2022

Abstrak. Dalam pengelolaan produk pupuk dan non-pupuk di PT Petrokimia Gresik, salah satu elemen terpentingnya adalah pengelolaan bahan baku yang didukung oleh utilitas berupa mesin penukar panas (*Heat exchanger*). Keberhasilan selama rangkaian proses produksi pupuk di Petrokimia Gresik didukung oleh peranan dari *heat exchanger*. Agar dapat mendukung operasional suatu unit produksi dan memperoleh hasil yang diharapkan, maka *heat exchanger* harus berada dalam performa terbaiknya. Karakteristik dalam menentukan performa dari kinerja suatu *heat exchanger* dapat dilihat dari keefektivannya dalam menukar panas. Pengolahan data menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference (LMTD)*, dengan membandingkan temperatur fluida disetiap akhir perpindahan panas. Pendekatan menggunakan metode LMTD dapat digunakan jika diketahui temperatur fluida saat masuk dan keluar, sehingga dapat ditentukan koefisien dari perpindahan panas. Evaluasi *heat exchanger* menggunakan metode LMTD meliputi fouling factor (R_d), dan penurunan tekanan (ΔP). Analisa kinerja *heat exchanger* dilakukan dengan metode (LMTD), memperoleh hasil dengan nilai untuk koefisien perpindahan kalor keseluruhan (U_d) sebesar 0,018, koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U_c) sebesar 0,068, Faktor Pengotoran (*fouling factor*/ R_d) sebesar 40,32, serta *pressure drop* (ΔP) pada sisi *shell* sebesar 0,16 kPa dan pada sisi *tube* sebesar 1,56 kPa, dengan efisiensi dari efektifitas *heat exchanger* (η) sebesar 96%. Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata nilai yang dihasilkan masih berada pada batas nilai yang diizinkan, kecuali pada perhitungan *pressure drop* (ΔP) sisi *shell* yang memiliki nilai 8% lebih besar dari nilai yang diizinkan. Hal ini menunjukkan jika *heat exchanger* masih layak dioperasikan tapi membutuhkan perawatan pembersihan.

Kata kunci: *Heat exchanger*, *Log Mean Temperature Difference*, efisiensi

1. Pendahuluan

Sebagai produsen pupuk terlengkap yang tidak hanya memproduksi pupuk, Petrokimia Gresik banyak mengaplikasikan ilmu dalam bidang teknik yang termasuk dalam proses produksi pupuk dan non-pupuk, proses pengolahan limbah, hingga sistem pendukung proses produksi utama. Berdasarkan hal tersebut, Petrokimia Gresik dapat mendukung mahasiswa teknik untuk dapat mempelajari banyak hal.

Dalam pengelolaan produk pupuk dan non-pupuk di PT Petrokimia Gresik, salah satu elemen terpentingnya adalah pengelolaan bahan baku utamanya yang diolah pada Departemen Produksi III. Departemen produksi III sendiri terbagi menjadi beberapa bagian yang salah satunya merupakan pabrik Asam Sulfat yang didukung oleh utilitas berupa mesin penukar panas (*Heat exchanger*). *Heat Exchanger*



adalah perangkat yang digunakan untuk mentransfer energi panas (entalpi) antara dua atau lebih fluida, antara permukaan padat fluida, atau antara partikulat padat dan fluida, pada temperatur yang berbeda dan dalam bentuk kontak termal [1]. *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) menjadi salah satu metode analisis perhitungan dalam *heat exchanger*.

Keberhasilan selama rangkaian proses produksi pupuk di Petrokimia Gresik didukung oleh peranan dari *heat exchanger*. Agar dapat mendukung operasional suatu unit produksi dan memperoleh hasil yang diharapkan, maka *heat exchanger* harus berada dalam performa terbaiknya. Akibat dari menurunnya kinerja *heat exchanger* ini dapat mengakibatkan suatu unit berhenti beroperasi. Menurunnya performa suatu *heat exchanger* dapat dipicu oleh kegagalan operasional, maupun mekanikal. Karakteristik dalam menentukan performa dari kinerja suatu *heat exchanger* dapat dilihat dari keefektivannya dalam menukar panas [2]. Untuk melihat performa dari kinerja *heat exchanger* yang digunakan PT Petrokimia Gresik, maka penulis akan melakukan analisa efektivitas dari *heat exchanger* dengan melakukan perhitungan menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD).

2. Metode

Pengolahan data menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), metode ini didasari pada perbedaan suhu rata-rata dari fluida yang melalui proses dalam *heat exchanger* [3]. dengan membandingkan temperatur fluida disetiap akhir perpindahan panas. Pendekatan menggunakan metode LMTD dapat digunakan jika diketahui temperatur fluida saat masuk dan keluar, sehingga dapat ditentukan koefisien dari perpindahan panas. Jika besar panas yang dilepaskan sama dengan Q per satuan waktu, maka panas yang diterima fluida dingin dapat dihitung dengan persamaan,

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

Keterangan :

Q = Kalor yang dilepaskan/diterima (W)

U = Koefisien perpindahan panas menyeluruh ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)

A = Luas perpindahan panas (m^2)

ΔT_m = Selisih temperatur rata-rata ($^\circ\text{C}$)

Berdasarkan selisih temperatur yang fluida yang masuk dan keluar dari kalor, penentuan nilai LMTD terlebih dahulu dilakukan sebelum menentukan luas permukaan kalor (A) [1]. Persamaan yang dapat digunakan dalam menentukan nilai LMTD sebagai berikut,

$$LMTD = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (2)$$

Untuk aliran fluida paralel : $\Delta T_{\max} = (T_1 - t_1)$ dan $\Delta T_{\min} = (T_2 - t_2)$

Untuk aliran fluida silang : $\Delta T_{\max} = (T_1 - t_2)$ dan $\Delta T_{\min} = (T_2 - t_1)$

Keterangan :

LMTD = Selisih temperatur rata-rata logaritma ($^\circ\text{C}$)

T_1 = Temperatur fluida masuk ke dalam *shell* ($^\circ\text{C}$)

T_2 = Temperatur fluida keluar *shell* ($^\circ\text{C}$)

Evaluasi mesin *heat exchanger* menggunakan metode LMTD meliputi *fouling factor* (Rd), dan penurunan tekanan (ΔP). *Fouling factor* menggabungkan perpindahan panas yang dibutuhkan dengan kotoran yang terdapat pada dinding *shell and tube*. Endapan fluida yang mengalir, dan korosi akibat pengaruh jenis fluida yang digunakan merupakan penyebab dari pengotoran yang terjadi pada komponen *heat exchanger* [4]. Dampak dari kotoran yang menempel pada dinding *shell and tube* apabila tidak dibersihkan maka akan menurunkan tingkat efektivitas mesin penukar panas. *Fouling factor* dapat dihitung dengan persamaan,

$$R_f = \frac{1}{u_d} - \frac{1}{u_c} \quad (3)$$

Keterangan :

u_c = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh bersih ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)

u_d = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh direncanakan ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)

Sedangkan ΔP , dievaluasi berdasarkan ketentuan penurunan tekanan pada setiap aliran [5]. Pada sisi *shell* ΔP ditinjau dari isothermal dari fluida yang dipanaskan atau didinginkan [4], sehingga dapat dihitung dengan persamaan,

$$\Delta P_s = \frac{f_s \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_s \cdot S \cdot \phi_s} \quad (4)$$

Persamaan dari faktor gesekan dari fluida yang dipanaskan atau didinginkan pada sisi *tube* diformulasikan dengan,

$$\Delta P_t = \frac{f_t \cdot G_t^2 \cdot D_s \cdot L \cdot n}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_t \cdot S \cdot \phi_t} \quad (5)$$

Keterangan :

n = jumlah *pass* aliran *tube*

L = Panjang *tube*

L.n = Panjang total lintasan dalam f_t

3. Hasil

Tahap pertama yang dilakukan yaitu mengumpulkan data instalasi yang berupa spesifikasi produk, dan data operasi yang berupa temperatur fluida yang dioperasikan dalam *heat exchanger*.

Tabel 1. Data Operasi

Suhu masuk ($^\circ\text{C}$)	Suhu Keluar ($^\circ\text{C}$)	Rata-Rata ($^\circ\text{C}$)
<i>SHELL</i>		
234,0690	452,6552	343,3621
<i>TUBE</i>		
506,5172	433,2414	469,8793

Dari sampel data yang diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan data sebagai berikut,

1) Perhitungan LMTD

Jika diketahui,

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co} = 512 \text{ }^\circ\text{C} - 400 = 112 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci} = 440 \text{ }^\circ\text{C} - 304 = 136 \text{ }^\circ\text{C}$$

Maka,

$$LMTD = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}}$$

$$= \frac{136 - 112}{\ln \frac{136}{112}} = 123,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Koefisien Perpindahan Kalor Keseluruhan (U_d)

Koefisien dari perpindahan kalor secara keseluruhan dapat di hitung dengan perbandingan antara perpindahan panas (Q) dengan luas penampang yang di kalikan dengan LMTD, sehingga dapat dituliskan kedalam persamaan,

$$U_d = \frac{Q}{A \times LMTD} \quad (6)$$

Luas permukaan perpindahan kalor dapat dihitung dengan langkah sebagai berikut,

$$A = N_t \times L \times \pi \times D_t \quad (7)$$

$$= 1300 \times 10,92 \times 3,14 \times 0,0483 = 2.153 \text{ m}^2$$

Maka, nilai dari U_d adalah

$$U_d = \frac{4.840,86 \text{ W}}{2.153 \text{ m}^2 \times 123,62 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0,018 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

3) Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh (U_c)

Koefisien perpindahan panas secara menyeluruh dapat dihitung setelah menentukan koefisien perpindahan panas dari sisi *Shell* dan *Tube*, sehingga digunakan persamaan sebagai berikut,

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_o}} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,13} + \frac{\ln \left(\frac{1,7619}{1,5619} \right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 10,92 \cdot 0,0005} + \frac{1}{3,47}}$$

$$= 0,068 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

4) Faktor Pengotoran (R_f)

Faktor pengotoran dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$R_f = \frac{U_c - U_d}{U_c \cdot U_d} \quad (9)$$

$$= \frac{0,068 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C} - 0,018 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}}{0,068 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C} \cdot 0,018 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$= 40,32 \text{ } ^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$$

5) Penurunan Tekanan (ΔP)

Perhitungan ΔP dilakukan pada pada sisi *Tube* maupun sisi *Shell*, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut,

a. Sisi *Shell*

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot d_i \cdot (N_b + 1)}{2 \cdot g \cdot \rho \cdot d_e \cdot \phi_s}$$

$$= 16,6419 \text{ Kg}/\text{m}^2 = 0,16 \text{ kPa}$$

b. Sisi *Tube*

$$\Delta P_t = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n}{2 \cdot g \cdot d_i \cdot \rho \cdot \phi}$$

$$= 158,76 \text{ Kg}/\text{m}^2 = 1,56 \text{ kPa}$$

6) Efektifitas Alat Penukar Panas (η)

Efektivitas dari mesin penukar panas dapat dicari dengan membandingkan koefisien perpindahan panas selama proses operasi, dengan koefisien perpindahan panas secara menyeluruh, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut,

$$\eta = \frac{U_d}{U_c} \times 100\% \quad (10)$$

$$= \frac{7,1354}{7,4158} \times 100\% = 96\%$$

Dari hasil perhitungan data yang telah dilakukan, diperoleh nilai dari setiap parameter yang digunakan dalam menganalisa efektifitas dari *heat exchanger* dengan metode LMTD sebagai berikut,

Tabel 2. Hasil Perhitungan

Variabel	Notasi	Hasil Perhitungan	Satuan
Koefisien Perpindahan Kalor Keseluruhan	U_d	0,018	$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$
Faktor Pengotoran	R_f	40,32	$\text{°Cm}^2/\text{W}$
Penurunan Tekanan			
Sisi Shell		0,16	kPa
Sisi Tube	ΔP	1,56	kPa
Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh	U_c	0,068	$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$
Efektifitas Alat Penukar Kalor	η	96	%

Heat exchanger unit Pengolahan Asam Sulfat, Departemen III, PT Petrokimia Gresik. *Heat exchanger* menggunakan fluida panas berbentuk gas SO₂, SO₃, O₂, dan N₂ yang mengalir pada sisi *tube*, serta fluida dingin dengan bentuk gas SO₂, O₂, dan N₂ pada sisi *shell* [6]. Analisa kinerja dari *heat exchanger* menggunakan beberapa parameter, seperti Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh (*clean overall coefficient/Uc*), Koefisien Perpindahan Kalor Keseluruhan (*dirt overal/Ud*), Faktor Pengotoran (*fouling factor/Rd*), serta Efisiensi dan *pressure drop* (ΔP) pada sisi *shell and tube exchanger* [1].

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan diperoleh nilai untuk koefisien perpindahan kalor keseluruhan (*Ud*) sebesar 0,018 W/m²°C, dan perpindahan kalor menyeluruh (*Uc*) sebesar 0,068 W/m²°C. Hal ini menunjukkan bahwa pada *heat exchanger*, perpindahan panas pada keadaan bersih lebih tinggi jika dibanding hantaran perpindahan panas jika sudah beroperasi, atau sudah terdapat endapan. Hasil yang diperoleh dari perhitungan *Ud* dan *Uc* sesuai dengan teori Kern, yang menyatakan nilai *clean overall heat transfer coefficient* (*Uc*) harus lebih besar dari *dirt overall heat transfer coefficient* (*Ud*).

Penentuan nilai *fouling factor* (*Rd*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui kinerja dari *heat exchanger*. Nilai *fouling factor* bergantung dari nilai *clean overall heat transfer coefficient* (*Uc*) dan *dirt overall heat transfer coefficient* (*Ud*). Hasil perhitungan *fouling factor* merupakan hambatan dari perpindahan panas yang terjadi dalam *heat exchanger* akibat adanya endapan karena interaksi antara fluida yang menempel pada dinding *shell dan tube* [1]. Akumulasi nilai *fouling factor* terjadi karena *heat exchanger* telah digunakan selama beberapa waktu, dan mengakibatkan adanya pengotoran dan korosi pada dinding *heat exchanger* yang dapat mengganggu kinerja *heat exchanger* [4]. Semakin besar nilai *fouling factor* menyebabkan *heat exchanger* mengalami penurunan kinerja pada besarnya laju perpindahan panas, dan efektifitas (tri endang-278). Dengan nilai *Rd* 40,32 °Cm²/W, dan nilai efektifitas (η) *heat exchanger* berkisar pada angka 96%, menunjukkan bahwa pengendapan ataupun faktor pengotoran yang terdapat pada *heat exchanger* masih berada pada batas nilai yang diizinkan. Dan dapat disimpulkan jika *heat exchanger* masih pada tahap kinerja yang baik.

Parameter selanjutnya terkait penurunan tekanan (ΔP), dimana jika nilai ΔP terlalu besar maka akan berakibat penurunan dari tenaga penggerak pada fluida sehingga akan terjadi perbedaan jumlah fluida yang mengalir pada inlet dan outlet baik sisi *shell* maupun *tube*[2]. Dari hasil perhitungan dapat dilihat ΔP pada sisi *shell* sebesar 0,16 kPa dan pada sisi tube sebesar 1,56 kPa. Dengan nilai ΔP yang tertera pada lembar spesifikasi alat untuk sisi *shell* 0,1565 psi atau setara dengan 0,0790 kPa, dan untuk sisi tube 0,2845 psi atau 1,9615 kPa. Pada sisi tube besaran ΔP masih pada nilai yang diizinkan, sedangkan pada sisi *shell* memiliki nilai yang lebih besar dari nilai yang diizinkan. Hal ini menunjukkan jika *heat exchanger* membutuhkan perawatan pembersihan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Analisa kinerja *heat exchanger* dilakukan dengan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), dengan mempertimbangkan parameter memperoleh hasil dengan nilai untuk koefisien perpindahan kalor keseluruhan (*Ud*) sebesar 0,018 W/m²°C, koefisien perpindahan kalor menyeluruh (*Uc*) sebesar 0,068 W/m²°C, Faktor Pengotoran (*fouling factor/Rd*) sebesar 40,32 °Cm²/W, serta *pressure drop* (ΔP) pada sisi *shell* sebesar 0,16 kPa dan pada sisi tube sebesar 1,56 kPa, dengan efisiensi dari efektifitas *heat exchanger* (η) sebesar 96%.
- 2) Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata nilai yang dihasilkan masih berada pada batas nilai yang diizinkan, kecuali pada perhitungan *pressure drop* (ΔP) sisi *shell* yang memiliki nilai 8% lebih besar dari nilai yang diizinkan. Hal ini menunjukkan jika *heat exchanger* masih layak dioperasikan tapi membutuhkan perawatan pembersihan.

5. Daftar Pustaka

- [1] I Bizzy and R Setiadi “Studi Perhitungan Alat Penukar Kalor Tipe Shell and Tube Dengan Program Heat Transfer Research Inc (Htri)” *J Rekayasa Mesin Univ Sriwij* vol 13 no 1 pp 67–76 2016
- [2] T E Prasasti *et al* “Evaluasi Fouling Faktor Terhadap Kinerja Heat Exchanger Pada Gas Cooler Unit Co2 Liquid Plant” *Distilat J Teknol Separasi* vol 7 no 2 pp 570–578 2021 doi: 10.33795/distilat.v7i2.278
- [3] A Rubcov, S Paulauskaitė, and V Misevičiūtė “Experimental analysis of fin and tube heat exchanger in heating and cooling mode” *10th Int Conf Environ Eng ICEE 2017* no November 2017 doi: 10.3846/enviro.2017.272
- [4] Y Amani “Predict Tube Overall Fouling Heat” *J Sist Inf* vol 2 no 1 pp 95–109 2018
- [5] J Sudrajat “Bagian-Bagian Dalam Shell and Tube Heat Exchanger” *J Tek Mesin* vol 6 no 3 p 174 2017
- [6] Petrokimia Gresik “Laporan Berkelanjutan” *J Chem Inf Model* vol 53 no 9 pp 1689–1699 2019