



Submitted : 22 Januari 2022

Revised : 18 Maret 2022

Accepted : 1 Juni 2022

PENGARUH TEMPERATUR DAN ARAH ALIRAN TERHADAP EFEKTIVITAS PENUKAR PANAS NTU (ϵ -NTU) PADA ALAT PENUKAR PANAS TIPE *PLATE AND FRAME*

**Reni Yuniarti¹, Feerzet Achmad^{1*}, Yuniar Luthfia Listyadevi¹, Lisa Angraini¹,
Muhammad Alfarizi Tazkia¹, Suhartono², Suharto³**

¹Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera

Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung

²Program Studi Teknik Kimia, Universitas Jenderal Achmad Yani

Jl. Terusan Jenderal Sudirman, Cimahi, Jawa Barat

³BRIN LIPI UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung

Jalan Ir. Sutami Km.15, Tanjung Bintang, Sindang Sari, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung

*Email: feerzet.achmad@tk.itera.ac.id

Abstrak

Alat penukar panas merupakan salah satu alat yang digunakan sebagai perpindahan panas antara dua fluida yang memiliki temperatur yang berbeda. Alat penukar panas memiliki tipe dan desain struktur yang berbeda, salah satu alat yang digunakan yaitu Plate and Frame Heat Exchanger (PFHE). Tujuan penelitian PFHE ini adalah untuk mengetahui pengaruh kenaikan temperatur fluida panas masuk dengan perbedaan arah aliran fluida terhadap efektivitas penukar panas NTU (ϵ -NTU). Penelitian ini dilakukan pada temperatur fluida panas 39-52°C pada arah aliran searah dan arah aliran berlawanan arah. Fluida panas dan fluida dingin yang digunakan pada penelitian ini yaitu air karena proses perpindahan panas yang baik dan tidak berbahaya. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa meningkatnya temperatur fluida panas masuk diperoleh kenaikan efektivitas penukar panas NTU (ϵ -NTU) pada arah aliran searah maupun pada arah aliran berlawanan arah. Nilai ϵ -NTU pada arah aliran berlawanan arah adalah 31,97-38,80% dan nilai ϵ -NTU pada arah aliran searah adalah 24,13-27,95%. Nilai ϵ -NTU pada arah aliran berlawanan arah lebih besar dari pada arah aliran searah. Ini menunjukkan bahwa arah aliran berlawanan arah lebih efektif melakukan proses perpindahan panas dari pada arah aliran searah.

Kata Kunci: Alat Penukar Panas, Fluida, *Plate and Frame*, Efektivitas Alat Penukar Panas

Abstract

A heat exchanger is a device used to transfer heat between two fluids at different temperatures. Heat exchangers have different types and structural designs. One of them is a plate and frame heat exchanger (PFHE). This PFHE study aimed to determine the effect of increasing the temperature of hot fluid and the flow direction on the effectiveness of the NTU heat exchanger (ϵ -NTU). This research was conducted at a temperature of 39-52°C with a co-current and counter-current flow. The hot and cold fluids used in this research are water because the heat transfer process is excellent and harmless. This study concluded that higher hot fluid temperature increased the effectiveness of the NTU heat exchanger (ϵ -NTU) for both co-current and counter-current flow. The value of ϵ -NTU in counter-current flow is 31.97-38.80%, and the value of ϵ -NTU in the co-current is 24.13-27.95%, thus showing that the counter-current flow is more effective in carrying out the heat transfer process than the co-current flow.

Keywords: Heat Exchanger, Fluid, Plate and Frame, Effectiveness of Heat Exchanger

1. PENDAHULUAN

Alat penukar panas merupakan sebuah alat yang digunakan untuk proses perpindahan panas antar fluida yang memiliki perbedaan temperatur atau proses perpindahan panas dari fluida panas ke fluida dingin. Perpindahan panas yang terjadi di dalam alat penukar panas berlangsung secara konveksi dan konduksi tanpa mencampur kedua fluida karena adanya suatu pemisah. Fluida yang biasa digunakan pada alat penukar panas sebagai fluida panas adalah uap air dan sebagai fluida dingin yaitu air. Fluida air banyak digunakan sebagai media perpindahan panas karena lebih mudah diperoleh/diproses dan tidak berbahaya. Berdasarkan fungsinya, ada beberapa jenis alat penukar panas yaitu *cooler*, *condenser*, *heater*, *reboiler*, *vaporizer*, dan *chiller*.

Alat penukar panas tersebut banyak digunakan di industri untuk berbagai aplikasi yang berperan sangat penting dalam suatu proses produksi. Sebagai contoh alat penukar panas yaitu *condenser* yang berfungsi merubah fase uap menjadi fase cair pada industri pengolahan minyak bumi mentah atau digunakan pada industri pembangkit listrik pembangkit tenaga uap (PLTU) dengan alat penukar panas *vaporizer*.

Beberapa keuntungan dan kelemahan dari alat penukar panas tipe PFHE. Keuntungan alat penukar panas PFHE ini adalah efisiensi perpindahan panas lebih baik, lebih gampang dalam pemeliharaan atau perawatannya, korosi lebih rendah, dan rancangan alat lebih sederhana dengan biaya yang lebih murah. Sedangkan kelemahannya adalah material plat yang digunakan tidak terlalu tahan pada tekanan lebih tinggi dari 30 atm, maksimum temperatur yang dapat digunakan yaitu 250°C tetapi tergantung material plat yang (Lin dan Rochelle, 2017; Sammeta dkk., 2011).

Perubahan temperatur kedua fluida akan dapat menentukan nilai efektivitas alat penukar panas dengan menggunakan perbandingan perpindahan panas antara salah satu fluida dengan perpindahan panas minimum antara kedua fluida, perhitungan *log mean temperature different* (LMTD), dan NTU. Nilai efektivitas alat penukar panas akan menentukan kinerjanya, semakin besar nilai efektivitas maka proses penukaran panas di dalamnya akan semakin baik.

Kinerja dari alat penukar panas dapat dilihat melalui nilai efektivitas perpindahan panas (ϵ) dengan menggunakan metode *number of transfer units* (NTU) dan *log mean temperature difference* (LMTD). Efektivitas dalam metode NTU didefinisikan sebagai rasio laju perpindahan panas yang sebenarnya dari fluida panas ke fluida dingin terhadap laju perpindahan panas maksimum. Analisis perpindahan panas pada alat perpindahan panas untuk fluida yang tidak bercampur dengan jenis aliran berlawanan arah (Rao dkk., 2005). Analisis ini dilakukan dengan memvariasikan laju aliran fluida yang masuk. Hasil percobaan menyatakan bahwa perpindahan panas pada penukar panas menurun jika persentase fluida dingin yang masuk melebihi 50% dibandingkan dengan fluida panas. Besarnya panas yang berpindah

akan berbanding lurus dengan luas permukaan yang diperlukan (Rao dkk., 2005).

Penelitian dilakukan untuk menentukan efektivitas penukar panas NTU (ϵ -NTU) pada plat penukar panas tipe *Plate and Frame Heat Exchanger* (PFHE) dengan memvariasikan temperatur fluida panas masuk dan arah aliran. Temperatur fluida panas masuk dilakukan dari 39 sampai 52°C dengan kenaikan temperatur sebesar 3°C. Ada 2 sistem arah aliran pada penelitian ini yaitu arah aliran searah dan arah aliran berlawanan arah. Fluida panas dan fluida dingin yang digunakan pada penelitian ini adalah air karena proses perpindahannya lebih baik, lebih mudah diperoleh, tidak mudah mengalami perubahan fase, dan tidak berbahaya.

Dari penelitian ini juga dihitung nilai laju perpindahan panas pada aliran fluida panas (Q_h), laju perpindahan panas pada fluida dingin (Q_c), perbedaan temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}), laju perpindahan panas terendah (Cr), koefisien perpindahan panas keseluruhan (U), *number of heat transfer units* (NTU), efektivitas penukar panas metode perbedaan temperatur (ϵ) dan metode NTU (ϵ -NTU). Pada penelitian ini dilakukan perbandingan tentang nilai efektivitas penukar panas metoda perbedaan LMTD dibandingkan dengan efektivitas perpindahan panas metode NTU.

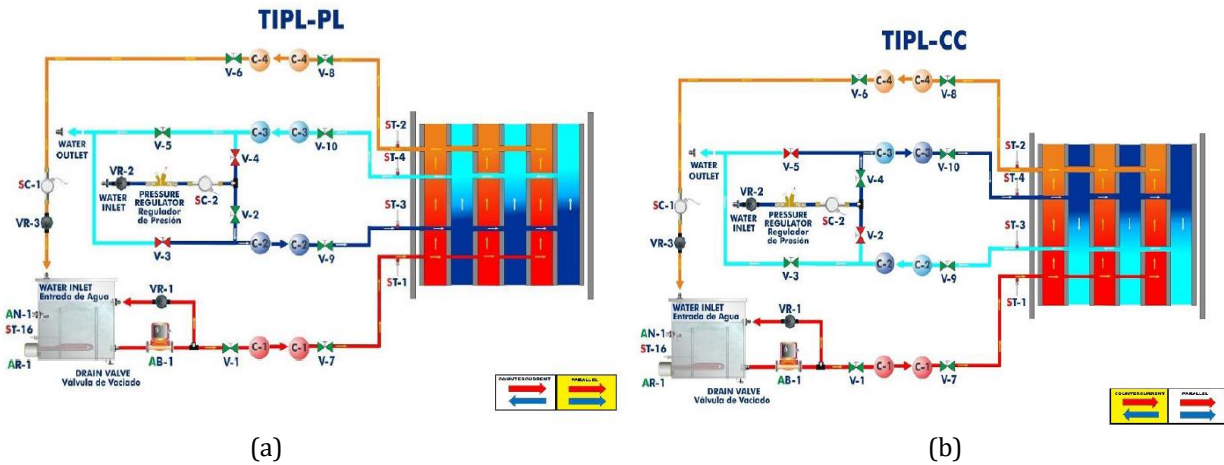
2. METODE PENELITIAN

2.1 Tahapan Percobaan

Rangkaian alat penukar panas yang digunakan dari Edibon dengan jenis *plate and frame heat exchanger* (PFHE) dengan tipe TIPL (*plate heat exchanger for TICC*), tangki pemanas yang digunakan tipe TIUS (*base service unit*) dan perekaman data menggunakan Edibon SCADA sistem tipe TICC (*the computer-controlled heat exchangers training system*).

Dilakukan percobaan dengan 2 arah aliran yaitu arah aliran searah (Gambar 1.a) dan arah aliran berlawanan arah (Gambar 1.b). Fluida panas dan fluida dingin yang digunakan pada percobaan ini adalah air. Fluida panas diperoleh dengan cara memanaskan air sesuai dengan temperatur yang diatur pada tangki pemanas. Tangki pemanas dilengkapi dengan koil pemanas (AR-1) untuk menaikkan temperatur air dan temperatur kontrol dipasang di dalam tangki untuk menjaga temperatur fluida (ST-16) serta level kontrol tangki (AN-1) untuk menjaga level air di dalam tangki. Fluida panas dialirkan menggunakan pompa sentrifugal (AB-1) ke dalam peralatan penukar panas PFHE. Kecepatan aliran fluida panas yang mengalir diukur menggunakan sensor kecepatan fluida (SC-1) dan laju alirnya diatur menggunakan keran VR-3. Temperatur masuk (ST-1) dan temperatur keluar (ST-2) dari fluida panas diukur menggunakan sensor temperatur fluida panas untuk mengetahui perubahan temperatur fluida. Fluida dingin dialirkan ke dalam PFHE menggunakan pompa dan kecepatan fluida dingin diatur menggunakan keran VR-2 dan diukur dengan menggunakan sensor kecepatan (SC-2).

Keran dibuka atau ditutup tergantung jenis aliran yang digunakan seperti ditampilkan pada Tabel 1.



Keterangan:

ST-1: Sensor temperatur untuk aliran fluida panas masuk; ST-2: Sensor temperatur untuk aliran fluida panas keluar; ST-3: Sensor temperatur untuk aliran fluida dingin masuk/keluar; ST-4: Sensor temperatur untuk aliran fluida dingin masuk/keluar; ST-16: Sensor temperatur tangki pemanas; V-1 till V-10: Keran; C-1 till C-4: Koneksi antar pipa; AB-1: Pompa sentrifugal aliran fluida panas; AR-1: Koil pemanas; AN-1: Level control; SC-1: Sensor laju alir fluida panas; SC-2: Sensor laju alir fluida dingin; VR-1: Bypass valve untuk fluida panas; VR-2: Keran kontrol laju alir fluida dingin; VR-3: Keran kontrol laju alir fluida panas.

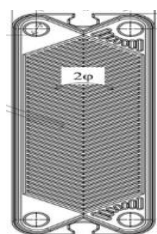
Gambar 1. Rangkain peralatan PFHE yang digunakan pada penelitian (a) TIPL-PL (*plate heat exchanger for TICC-co-current*) atau arah aliran searah dan (b) TIPL-CC (*plate heat exchanger for TICC-counter current*) arah aliran berlawanan arah

Keran V-3 dan V-4 ditutup jika fluida dingin dengan arah aliran searah sedangkan keran V-2 dan V-5 ditutup jika fluida dingin dengan arah aliran berlawanan arah. Temperatur fluida dingin masuk PFHE diukur menggunakan sensor temperatur ST-3 untuk arah aliran searah dan temperatur fluida dingin keluar PFHE diukur menggunakan sensor temperatur ST-4 (Gambar 1.a). Sedangkan temperatur fluida dingin masuk PFHE diukur menggunakan sensor temperatur ST-4 untuk arah aliran berlawanan arah dan temperatur fluida dingin keluar diukur menggunakan sensor temperatur ST-3.

untuk fluida panas dan fluida dingin sebesar 987,1 kg/m³, luas penampang pipa adalah 0,432 m², jumlah *plate* yang digunakan sebanyak 20 lembar. laju alir fluida panas sebesar 1,1-1,3 l/min dan laju alir fluida dingin sebesar 2,1-2,2 l/min. Fluida dingin mengalir ke dalam sistem alat penukar panas dengan menggunakan pompa. Alat penukar panas dibiarkan beroperasi sekitar 15 menit untuk membuat kondisi alat lebih stabil dan pencatatan hasil selama 5 menit. Tabel 2 menampilkan temperatur dan laju alir untuk fluida panas dan fluida dingin yang digunakan pada penelitian alat penukar panas tipe PFHE.

Tabel 1. Pengaturan keran berdasarkan arah aliran

Keran	Arah aliran	
	Searah	Berlawanan arah
Keran V-2	Buka	Tutup
Keran V-3	Tutup	Buka
Keran V-4	Tutup	Buka
Keran V-5	Buka	Tutup



Gambar 2. Alat penukar panas tipe *plate and frame* (PicOn dkk., 2011)

Rancangan alat PFHE yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *plate and frame* yang ditampilkan pada Gambar 2. Diameter pipa yang digunakan untuk fluida panas dan fluida dingin adalah 0,0374 m², kapasitas panas spesifiknya untuk fluida panas dan fluida dingin adalah 4178 J/kg. K, densitas

2.2 Analisis Laju Perpindahan Panas

Untuk mengetahui besarnya perpindahan panas dari fluida panas ke fluida dingin pada PFHE dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dan persamaan (2). Laju perpindahan panas pada fluida panas (Q_h) dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$Q_h = \dot{m}_h \cdot C_{p_h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{1}$$

Dengan: \dot{m}_h , laju alir massa dari fluida panas (kg/min)
 C_{p_h} , kapasitas panas dari fluida panas (kal/kg.K)
 $T_{h,i}$, temperatur fluida panas masuk (K)
 $T_{h,o}$, temperatur fluida panas keluar (K)

Sedangkan, laju perpindahan panas pada fluida dingin (Q_c) dapat dihitung menggunakan persamaan (2),

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \tag{2}$$

Dengan: \dot{m}_c , laju alir massa dari fluida dingin (kg/min)
 C_{p_c} , kapasitas panas dari fluida dingin (kal/kg.K)
 $T_{c,o}$, temperatur fluida dingin keluar (K)
 $T_{c,i}$, temperatur fluida dingin masuk (K)

Temperatur fluida panas masuk yang digunakan pada rentang 39–52°C dengan interval kenaikan temperatur sebesar 3°C.

2.3 Analisis Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritma (LMTD)

Log mean temperature difference (LMTD), ΔT_{LMTD} atau perbedaan temperatur rata-rata logaritma secara umum dapat dihitung menggunakan persamaan (3),

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3)$$

Untuk arah aliran searah, perbedaan temperatur ΔT_1 dapat dihitung dengan cara $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i}$, sedangkan perbedaan temperatur ΔT_2 dapat dihitung dengan cara $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o}$. Perbedaan temperatur rata-rata logaritma dari persamaan (3) dapat disederhanakan menjadi persamaan (4),

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,i}}{T_{h,o} - T_{c,o}}\right)} \quad (4)$$

Untuk arah aliran berlawanan arah, perbedaan temperatur ΔT_1 dapat dihitung dengan cara $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$, sedangkan perbedaan temperatur ΔT_2 dapat dihitung dengan cara $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$. Perbedaan temperatur rata-rata logaritma dari persamaan (3) dapat disederhanakan menjadi persamaan (5).

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)} \quad (5)$$

ΔT_{LMTD} digunakan pada umumnya di dalam alat penukar panas karena adanya perbedaan temperatur fluida pada saat masuk dengan temperatur fluida pada saat keluar. Temperatur fluida panas pada saat masuk mengalami penurunan temperatur pada saat fluida keluar karena terjadinya penyerapan panas oleh fluida dingin dan begitu juga sebaliknya temperatur fluida dingin pada saat masuk mengalami kenaikan temperatur pada saat fluida keluar.

2.4 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan (U)

Koefisien perpindahan panas keseluruhan dapat diartikan sebagai perpindahan panas secara tidak langsung yang terjadi secara konveksi paksa pada suatu dinding logam antara fluida panas pada satu sisi dan fluida dingin pada sisi lain. Koefisien Perpindahan panas keseluruhan dapat dihitung menggunakan persamaan (6).

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{LMTD}} \quad (6)$$

Notasi Q, A, dan ΔT_{LMTD} masing-masing menunjukkan laju perpindahan panas (Watt), luas penampang permukaan perpindahan panas (m^2), dan perbedaan temperatur rata-rata logaritma (K).

2.5 Perhitungan Number Of Heat Transfer Units (NTU)

Number of heat transfer units, NTU adalah jumlah satuan perpindahan panas yang merupakan tolak ukur perpindahan panas suatu alat penukar panas. Harga NTU semakin besar maka penukar panas mendekati batas termodinamikanya (Rao dkk., 2005). NTU dapat dihitung menggunakan persamaan (7).

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_R} \quad (7)$$

Notasi NTU, U, A, dan C_R masing-masing menunjukkan Number of Heat Transfer Units, koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2.K$), area perpindahan panas (m^2), laju kapasitas panas terendah (W/K).

Laju kapasitas panas terendah (C_R) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (8),

$$C_R = \frac{C_c}{C_h} \quad (8)$$

Untuk laju kapasitas panas untuk fluida panas (C_h) dan laju kapasitas panas untuk fluida dingin (C_c) dihitung menggunakan persamaan (9) dan persamaan (10),

$$C_h = \dot{m}_h \cdot C_{p_h} \quad (9)$$

$$C_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \quad (10)$$

2.6 Efektivitas

2.6.1 Efektivitas Alat Penukar Panas (ϵ)

Efektivitas alat penukar panas didefinisikan sebagai perbandingan laju perpindahan panas yang sebenarnya dalam penukar panas terhadap laju pertukaran panas maksimum. Dapat dikatakan juga bahwa efektivitas alat penukar panas adalah nilai kinerja alat penukar panas yang didapatkan dari perhitungan laju aliran panasnya. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi efektivitas alat penukar panas seperti *pressure drop*, laju perpindahan panas, faktor pengotor, dan sebagainya (Nandiati dkk, 2019). Evaluasi kinerja alat penukar panas perlu dihitung untuk meningkatkan efektivitas alat PFHE sehingga penggunaannya sesuai dengan kondisi operasi yang diharapkan.

Efektivitas alat penukar panas dihitung secara metode perbedaan temperatur (ϵ) dengan menggunakan persamaan (11),

$$\epsilon = \frac{q_{real}}{q_{max}} \quad (11)$$

Notasi q_{real} dan q_{max} masing-masing menunjukkan laju perpindahan panas pada sistem (Watt) dan laju perpindahan panas maksimum (Watt).

Efektivitas alat penukar panas (ϵ) dapat dihitung menggunakan persamaan (12) jika laju kapasitas panas untuk fluida dingin (C_c) lebih besar dari laju kapasitas panas untuk fluida panas (C_h) dan begitu sebaliknya efektivitas alat penukar panas (ϵ) dapat dihitung menggunakan persamaan (13) jika laju kapasitas panas untuk fluida dingin (C_c) lebih kecil dari laju kapasitas panas untuk fluida panas (C_h).

$$\epsilon = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (12)$$

$$\text{jika } C_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} > C_h = \dot{m}_h \cdot C_{p_h}$$

$$\epsilon = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (13)$$

$$\text{jika } C_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} < C_h = \dot{m}_h \cdot C_{p_h}$$

2.6.2 Efektivitas Alat Penukar Panas NTU (ϵ -NTU)

Cara lain untuk menentukan efektivitas alat penukar panas adalah dengan metode NTU. Efektivitas dengan metode NTU (ϵ -NTU) dapat dihitung menggunakan persamaan (14) untuk arah aliran searah, sedangkan persamaan (15) digunakan untuk

menghitung efektivitas alat penukar panas NTU untuk arah aliran berlawanan arah.

$$\varepsilon - NTU = \left(\frac{1 - e^{-(NTU(1+Cr))}}{(1+Cr)} \right) \times 100\% \quad (14)$$

$$\varepsilon - NTU = \left(\frac{1 - e^{-(NTU(1-Cr))}}{(1-Cr) e^{-(NTU(1-Cr))}} \right) \times 100\% \quad (15)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Semua data yang diperoleh pada alat penukar panas PFHE ditampilkan pada Tabel 2. Laju perpindahan panas pada aliran fluida panas (Qh), laju perpindahan panas pada fluida dingin (Qc), perbedaan temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}), laju perpindahan panas terendah (Cr), koefisien perpindahan panas keseluruhan (U), *number of heat transfer units* (NTU), efektivitas penukar panas metode perbedaan temperatur (ε) dan efektivitas penukar panas metode NTU (ε -NTU) pada arah aliran searah dan arah aliran berlawanan arah.

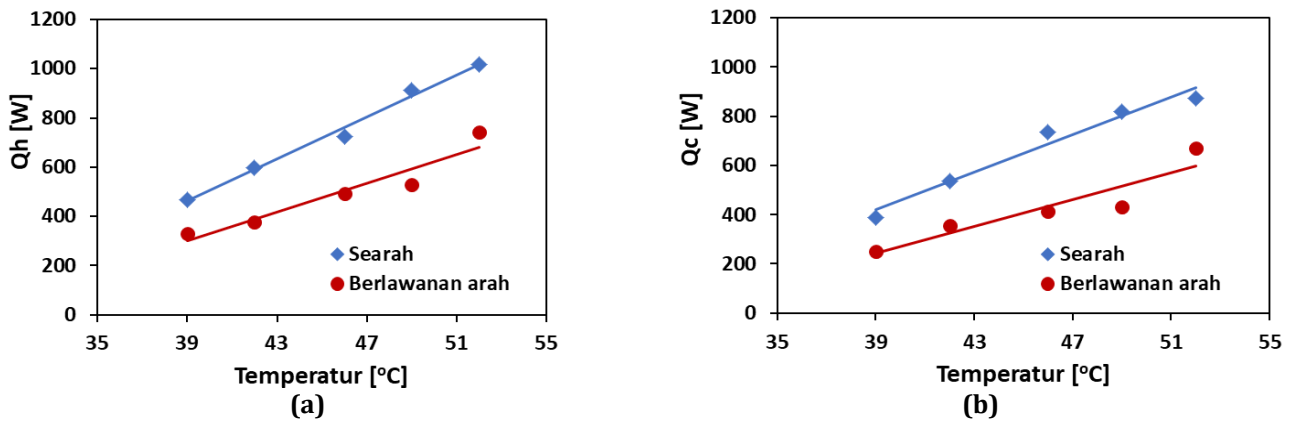
3.1 Laju Perpindahan Panas (Q)

Gambar 3 menampilkan hubungan antara perbedaan temperatur fluida panas masuk terhadap laju perpindahan panas (Qh) (Gambar 3a) dan hubungan perbedaan temperatur fluida panas masuk

dengan laju perpindahan panas dari fluida dingin (Qc) (Gambar 3b) pada arah aliran searah dan arah aliran berlawanan arah.

Diperoleh bahwa laju perpindahan panas pada fluida panas masuk dimana mempunyai tendensi meningkat secara signifikan dengan meningkatnya temperatur fluida panas. Tendensi ini juga terjadi pada arah aliran yang searah maupun arah aliran yang berlawanan arah. Nilai Qc dan Qh pada arah aliran searah lebih tinggi daripada arah aliran berlawanan arah. Dengan meningkatnya laju perpindahan panas dapat diartikan proses perpindahan panas dari fluida panas ke fluida dingin berlangsung dengan baik.

Persamaan (1) dan persamaan (2) menampilkan bahwa laju perpindahan panas dipengaruhi oleh laju alir masa fluida dan perbedaan temperatur yang keluar. Laju alir masa fluida dingin lebih tinggi daripada laju alir fluida panas. Tingginya laju alir masa fluida dingin dapat meningkatkan laju perpindahan panas. Laju perpindahan panas (Q) yang semakin besar mengakibatkan resistansi termal semakin kecil sehingga perpindahan panas secara konveksi antara sisi plat dan fluida terjadi lebih cepat (Arsenyeva dkk, 2011; PicÓN-Núñez dkk, 2010).



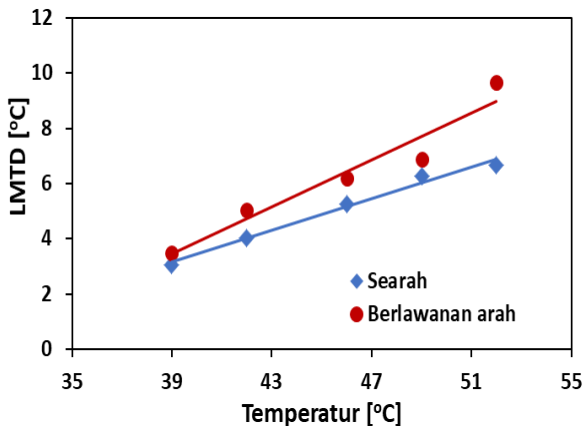
Gambar 3. Hubungan perbedaan temperatur fluida panas terhadap laju perpindahan panas pada fluida panas, Qh (a) dan laju perpindahan panas pada fluida dingin, Qc (b) pada arah aliran searah (garis merah) dan arah aliran berlawanan arah (garis biru)

Tabel 2. Data alat penukar panas PFHE

Searah															
T Set	ST 1 (°C)	ST 2 (°C)	ST 3 (°C)	ST 4 (°C)	ST 16 (°C)	SC-1 (l/min)	SC-2 (l/min)	Qh (W)	Qc(W)	ΔT_{lm} (K)	Cr	U (W/K.m ²)	NTU	eff(%)	effNTU
39	37.7	34.0	31.1	32.4	39.9	1.301	2.921	466.84	389.59	3.06	1.78	615.11	0.90	19.19	24.13
42	39.4	34.8	30.0	32.5	36.0	1.182	2.051	598.82	536.73	4.03	1.83	483.61	0.92	26.58	27.95
46	42.7	36.5	31.0	33.7	45.6	1.147	2.202	725.39	736.17	5.26	2.03	381.60	0.92	23.34	26.90
49	44.5	37.3	31.3	34.3	48.6	1.072	2.114	912.37	818.89	6.27	2.11	313.88	0.93	22.50	26.62
52	47.8	37.6	29.1	33.4	51.7	1.055	2.273	1015.38	873.89	6.66	1.89	305.02	0.99	22.94	24.98
Berlawanan arah															
T Set	ST 1 (°C)	ST 2 (°C)	ST 3 (°C)	ST 4 (°C)	ST 16 (°C)	SC-1 (l/min)	SC-2 (l/min)	Qh(W)	Qc(W)	ΔT_{lm} (K)	Cr	U (W/K.m ²)	NTU	eff(%)	effNTU
39	36.4	31.0	31.7	29.1	39.8	1.259	2.245	331.02	252.24	3.50	2.24	218.78	0.47	35.57	32.46
42	39.4	32.3	33.3	29.8	42.9	1.224	2.244	376.59	353.82	5.05	1.74	172.50	0.53	36.32	31.97
46	39.9	30.6	32.0	27.3	42.8	1.135	2.300	493.99	415.01	6.19	1.92	184.77	0.53	37.33	38.70
49	45.0	32.4	34.4	29.0	48.7	1.046	2.207	528.64	430.63	6.90	1.97	177.29	0.53	36.26	38.80
52	46.2	33.1	35.3	29.4	51.5	1.130	2.131	741.80	668.84	9.66	2.15	177.72	0.49	36.50	33.77

3.2 Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritma (LMTD)

Hubungan perbedaan temperatur fluida panas terhadap perbedaan temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}) pada arah aliran searah dan arah aliran berlawanan arah ditampilkan pada Gambar 4. Dari Gambar 4 ini menunjukkan bahwa terjadi kenaikan temperatur fluida masuk dan temperatur fluida keluar. Nilai LMTD yang diperoleh juga meningkat secara signifikan pada arah aliran searah maupun pada arah aliran berlawanan arah.

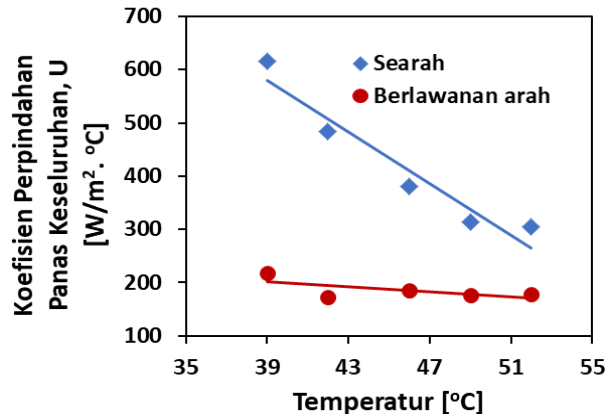


Gambar 4. Hubungan perbedaan temperatur fluida panas masuk terhadap perbedaan temperatur rata-rata logaritma (LMTD) pada arah aliran searah (garis merah) dan arah aliran berlawanan arah (garis biru)

Nilai LMTD yang diperoleh sekitar 3 hingga 10°C. Nilai LMTD ini mengartikan bahwa temperatur fluida panas masuk dengan temperatur fluida panas keluar mengalami perubahan yang cukup besar. Nilai LMTD lebih besar terjadi pada arah aliran berlawanan arah jika dibandingkan dengan nilai LMTD pada sistem aliran yang searah. Hal ini menunjukkan bahwa pada arah aliran berlawanan arah dimana proses perpindahan/ penyerapan panas oleh fluida dingin terjadi secara baik daripada arah aliran searah.

3.3 Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan (U)

Gambar 5 menampilkan hubungan perbedaan temperatur fluida panas masuk terhadap koefisien perpindahan panas keseluruhan (U) pada arah aliran searah dan pada arah aliran berlawanan arah. Dari Gambar 5 terlihat bahwa meningkatnya temperatur fluida panas masuk mengakibatkan koefisien perpindahan panas keseluruhan (U) menurun pada arah aliran yang searah. Penurunan secara signifikan terjadi pada arah aliran yang berlawanan arah dimana nilai U mengalami penurunan sangat tajam ketika kenaikan temperatur fluida panas masuk.

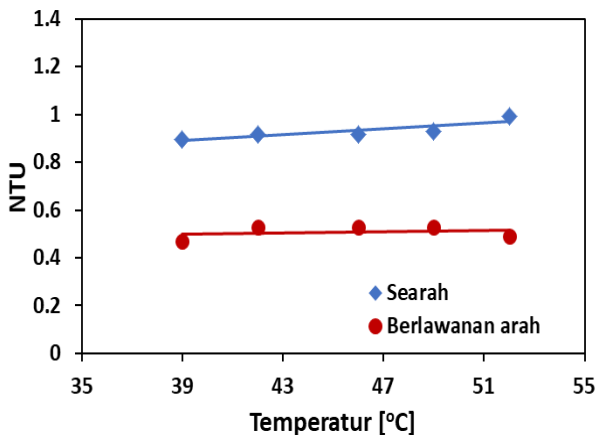


Gambar 5. Hubungan perbedaan temperatur fluida panas terhadap koefisien perpindahan panas keseluruhan pada arah aliran searah (garis merah) dan arah aliran berlawanan arah (garis biru)

Pada arah aliran searah, pada temperatur fluida panas masuk terkecil adalah 39°C diperoleh nilai U sebesar 219 W/m².K dan pada temperatur fluida panas masuk paling tinggi adalah 52°C diperoleh nilai U sebesar 179 W/m².K. Sedangkan pada arah aliran berlawanan arah, pada temperatur fluida panas masuk adalah 39°C diperoleh nilai U sebesar 615 W/m².K dan pada temperatur fluida panas masuk paling tinggi adalah 52°C diperoleh nilai U sebesar 305 W/m².K. Turunnya nilai U dengan meningkatnya temperatur fluida panas masuk disebabkan karena perpindahan panas secara tidak langsung yang terjadi secara konveksi paksa pada suatu dinding plat antara fluida panas pada satu sisi dan fluida dingin pada sisi yang lain berlangsung dengan baik (Syaichurrozi dkk., 2014).

3.4 Number of Heat Transfer Units (NTU)

Hubungan perbedaan temperatur fluida panas masuk terhadap NTU pada arah aliran searah dan pada arah aliran berlawanan arah ditampilkan pada Gambar 6. Nilai NTU pada arah aliran searah lebih tinggi dari pada arah aliran berlawanan arah. Nilai NTU terendah pada arah aliran berlawanan arah sebesar 0,47 pada temperatur fluida panas masuk 39°C dan nilai NTU tertinggi diperoleh sebesar 0,53 pada temperatur fluida panas masuk 49°C. Pada arah aliran searah, nilai NTU terendah sebesar 0,90 pada temperatur fluida panas masuk 39°C dan tertinggi diperoleh sebesar 0,99 pada temperatur fluida panas masuk 52°C. Temperatur fluida panas masuk meningkat maka nilai NTU juga bertambah namun perubahannya tidak terlalu signifikan. Peningkatan nilai NTU ini mengidentifikasi bahwa proses perpindahan panas pada alat penukar panas tipe PFHE dapat berlangsung dengan baik (Atikayanti dkk, 2011; Summeta fkk, 2011).

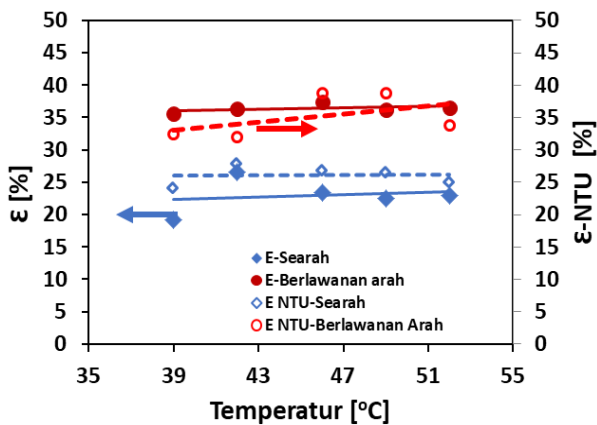


Gambar 6. Hubungan perbedaan temperatur fluida panas terhadap NTU pada arah aliran searah (garis merah) dan arah aliran berlawanan arah (garis biru)

3.5 Efektivitas

3.5.1 Efektivitas alat penukar panas (ϵ)

Pengaruh kenaikan temperatur fluida panas masuk terhadap efektivitas alat penukar panas tipe PFHE secara metode perbedaan temperatur dan NTU ditampilkan pada Gambar 7. Didapatkan bahwa meningkatnya nilai temperatur fluida panas masuk maka nilai efektivitas alat penukar panas juga meningkat pada arah aliran searah maupun pada arah aliran berlawanan arah. Nilai efektivitas alat penukar panas sekitar 19-27% pada arah aliran searah sedangkan nilai efektivitas alat penukar panas sekitar 36-38% pada arah aliran berlawanan arah. Namun perubahan nilai efektivitas ini tidak terlalu signifikan pada arah aliran berlawanan arah.



Gambar 7. Hubungan perbedaan temperatur fluida panas terhadap efektivitas (ϵ) (ditulis garis tidak putus) dan efektivitas NTU (ϵ -NTU) (ditulis garis putus-putus) pada arah aliran searah (garis merah) dan arah aliran berlawanan arah (garis biru)

Efektivitas alat penukar panas PFHE secara metoda perbedaan temperatur dipengaruhi oleh laju kapasitas panas pada Ch dan Cc . Nilai Cc pada penelitian ini lebih besar daripada nilai Ch karena laju massa fluida dingin lebih besar dari laju massa fluida panas pada aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah. Efektivitas alat penukar panas mencapai nilai maksimum ketika nilai U dan NTU

mencapai nilai maksimum. Hal itu karena pada sisi keluaran alat penukar panas terjadi proses pertukaran panas maksimal antara fluida panas dan fluida dingin (Sammeta dkk., 2011; Shokouhmand & Hasanpour, 2020).

3.5.2 Efektivitas alat penukar panas NTU (ϵ -NTU)

Gambar 7 ini juga menampilkan hubungan perbedaan temperatur fluida panas masuk terhadap efektivitas alat penukar panas dengan metoda NTU (ϵ - NTU) pada arah aliran searah dan pada arah aliran berlawanan arah. Nilai ϵ - NTU terendah sekitar 31,97% pada temperatur fluida panas masuk 42°C dan 38,80% pada temperatur fluida panas masuk 49°C untuk arah aliran berlawanan arah. Nilai ϵ - NTU terendah sekitar 24,13% pada temperatur fluida panas masuk 39°C dan 38,80% pada temperatur fluida panas masuk 49°C pada arah aliran searah.

Kenaikan nilai ϵ - NTU signifikan terjadi pada arah aliran berlawanan arah jika temperatur fluida panas masuk dinaikan sedangkan nilai ϵ - NTU tidak mengalami perubahan signifikan pada arah aliran searah jika temperatur fluida panas masuk dinaikkan. Ini menunjukkan bahwa efektivitas alat penukar panas lebih baik terjadi pada arah aliran berlawanan arah daripada arah aliran searah. Nilai Dari persamaan 14 dan persamaan 15 memperlihatkan bahwa nilai ϵ - NTU dipengaruhi oleh NTU dan laju kapasitas panas terendah (Cr). Nilai efektifitas panas metoda NTU meningkat dengan meningkatnya nilai NTU (Masitah dkk., 2014; Nandiati dkk., 2019; Nguyen dkk., 2021).

4. KESIMPULAN

Pengaruh kenaikan temperatur fluida panas masuk membuat nilai Q , ΔT_{LMTD} , NTU , dan efektivitas alat penukar panas meningkat dan sebaliknya nilai U menurun dengan perubahan temperatur fluida panas masuk. Nilai Q , U dan NTU untuk arah aliran searah lebih besar daripada untuk arah aliran berlawanan arah. Sedangkan nilai ΔT_{LMTD} dan efektivitas alat penukar panas untuk arah aliran searah lebih besar daripada untuk arah aliran berlawanan arah. Kenaikan nilai ϵ - NTU pada arah aliran searah maupun pada arah aliran berlawanan arah. Nilai ϵ - NTU pada arah aliran berlawanan arah adalah 31,97-38,80% dan nilai ϵ - NTU pada arah aliran searah adalah 24,13-27,95%. Nilai ϵ - NTU pada arah aliran berlawanan arah lebih besar dari pada arah aliran searah. Ini menunjukkan bahwa arah aliran berlawanan arah lebih efektif melakukan proses perpindahan panas dari pada arah fluida aliran searah.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Institut Teknologi Sumatera atas bantuan hibah penelitian dengan kontrak No: 134g/IT9.C1/PP/2018.

6. NOTASI

- Q_h : Laju perpindahan panas pada fluida panas (Watt)
- Q_c : Laju perpindahan panas pada fluida dingin (Watt)

\dot{m}_h	: laju alir massa dari fluida panas (kg/min)
\dot{m}_c	: laju alir massa dari fluida dingin (kg/min)
Cp_h	: kapasitas panas dari fluida panas (kal/kg.°K)
Cp_c	: kapasitas panas dari fluida dingin (kal/kg.°K)
$T_{h,i}$: temperatur fluida panas masuk (°K)
$T_{h,o}$: temperatur fluida panas keluar (°K)
$T_{c,o}$: temperatur fluida dingin keluar (°K)
$T_{c,i}$: temperatur fluida dingin masuk (°K)
ΔT_{LMTD}	: perbedaan temperatur rata-rata logaritma (K)
ΔT_1	: perbedaan temperatur rata-rata logaritma (K)
ΔT_2	: perbedaan temperatur rata-rata logaritma (K)
A	: luas penampang permukaan perpindahan panas (m ²)
U	: Koefisien Perpindahan panas keseluruhan W/m ²
NTU	: Number of heat transfer units
C_R	: laju kapasitas panas terendah (-)
Ch	: laju kapasitas panas untuk fluida panas (W/K)
Cc	: laju kapasitas panas untuk fluida dingin (W/K)
ϵ	: Efektivitas penukar panas (%)
q_{real}	: Laju perpindahan panas pada sistem (Watt)
q_{max}	: Laju perpindahan panas maksimum (Watt)
ϵ -NTU	: Efektivitas penukar panas NTU (%)

7. DAFTAR PUSTAKA

- Atikayanti, Muthia Sari., Nur, Sagita Firza., Santoso, Budi., Ekayuliana, Arifia, (2012). Analisis Perbandingan Heat Exchanger Tipe Plate-Frame dan Shell and Tube Pada Intercooler. Seminar Nasional Teknik Mesin. 335-345.
- Arsenyeva, Olga P., Tovazhnyansky, Leonid L., Kapustenko, Petro O., Khavin, Gennadiy L. (2011). Optimal Design of Plate-and-Frame Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Process Industries. *Energy* (36), 4588-4598. doi:10.1016/j.energy.2011.03.022.
- Lin, Yu-Jeng. Rochelle, Gary T. (2017). Heat Transfer Enhancement and Optimazation of Lean/Rich Solvent Cross Exchanger for Amine Scrubbing. *Energy Procedia*, (114). 1890-1903. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1320
- Masitah, A.R.S., Ahmad, Mardiana I., Yatim, Y.M. (2015). Heat Transfer and Effectiveness Analysis of a Cross-Flow Heat Exchanger for Potential Energy Recovery Applications in Hot-Humid Climate. *Energy Research Journal* 2015, 6 (1), 7-14. DOI: 10.3844/erjsp.2015.7.14.
- Nandiati, Sucika., Kirom, M. Ramdhan., Ajiwiguna, Tri Ayodha., (2019). Evaluasi Kinerja Pada Berbagai Variasi Susunan Heat Exchanger Menggunakan Metode LMTD dan NTU. *e-Proceeding of Engineering*: 6, No.2 Agustus 2019, 5058-5065.
- Nguyen, Dong Ho., Kim, Koung Moon., Vo, Thi To Nguyen., Shim, Gyu Hyeon., Kim, Ji Hoon., Ahn, Ho Seon. (2021). Improvement of Thermal-Hydraulic Performance of Plate Heat Exchanger by Electroless Nickel, Copper and Silver Plating. *Case Studies in Thermal Engineering*. 23, 100797. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100797>
- Picón-Núñez, Martín., Polley, Graham Thomas., Jantes-Jaramillo, Dionicio, (2010). Alternative Design Approach for Plate and Frame Heat Exchangers Using Parameter Plots. *Heat Transfer Engineering*, 31(9), 742-749. DOI: 10.1080/01457630903500874.
- Polley, Graham T. & Abu-Khader, Mazen M., (2005). Compensating for End Effects in Plate-and-Frame Heat Exchangers. *Heat Transfer Engineering*, 26 (10), 3-7. DOI: 10.1080/01457630500248471.
- Rao, B. Prabhakara., Kumar, P. Krishna., Das, Sarit K. (2002). Effect of Flow Distribution to The Channels on The Thermal Performance of a Plate Heat Exchanger. *Chemical Engineering and Processing*. 41, 49-58.
- Rao, B. Prabhakara., Sunden, Bengt., Das, Sarit K., (2005). An Experimental and Theoretical Investigation of the Effect of Flow Maldistribution on the Thermal Performance of Plate Heat Exchangers. *Journal of Heat Transfer*, 127. 332-343. DOI: 10.1115/1.1860568.
- Sammata, Harika., Ponnusamy, Kalaichelvi., Majid, M.A., Dheenathayalan, K., (2011). Effectiveness Charts For Counter Flow Corrugated Plate Heat Exchanger. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 777-784. doi:10.1016/j.simpat.2010.10.012.
- Shokouhmand, Hossein. & Hasanpour, Majid. (2020). Effect of Number of Plates on The Thermal Performance of A Plate Heat Exchanger with Considering Flow Maldistribution. *Journal of Energy Storage*, 32, 101907. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101907>
- Syaichurrozi, Iqbal., Karina, Afdwiyarny Metta., Imanuddin, Ahmad. (2014). Kajian Performa Alat Penukar Panas Plate and Frame: Pengaruh Laju Alir Massa, Temperatur Umpan dan Arah Aliran Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh. *Eksergi*, (2) 11-18.