



ARTIKEL PENELITIAN

Efek laju alir dan arah aliran terhadap analisis performa alat penukar panas tipe *shell and tube heat exchanger* menggunakan SCADA

Feerzet Achmad^{1,*}, Yosi Anugrah S.M Tampubolon¹, Muhammad Fajri¹, Dennis Farina Nury¹, Rico Aditia Prahmana², Suhartono³, Suharto⁴

¹Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung, 35365, Indonesia

²Teknik Mesin, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung, 35365, Indonesia

³Teknik Kimia, Universitas Jenderal Achmad Yani, Jl. Terusan Jend. Sudirman, Cibeber, Kec. Cimahi Selatan, Kota Cimahi, Jawa Barat, 40513, Indonesia

⁴Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jalan Ir. Sutami Km.15, Tanjung Bintang, Sindang Sari, Lampung Selatan, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung, 35361, Indonesia

Disubmit 29 Agustus 2022; direvisi 03 Februari 2023; diterima 27 April 2023



OBJECTIVES Heat or heat is energy that can be transferred due to temperature differences. In carrying out heat transfer, a tool is needed to support the heat transfer. The heat transfer device used in this study is the Shell and Tube Heat Exchanger (STHE). This study uses the SCADA program which can process data acquisition and control of the dependent variable, which is the flow rate of the hot fluid so that it is expected that the data displayed in the SCADA program can represent the effect of flow rate and flow direction on the performance analysis of STHE type heat exchangers. **METHODS** The research was carried out by varying the flow rate of hot fluids in the range of 0.8 L/min – 1.8 L/min, where this device has a maximum flow rate of 2.1 L/min. **RESULTS** From this study it was found that the highest effectiveness was 0.44 at a hot fluid flow rate of 1.8 L/min with the fluid flowing in the opposite direction. **CONCLUSIONS** From this, it can be concluded that the fluid flow rate and fluid flow direction affect the effectiveness of the heat exchanger, but not only affect the effectiveness of the heat exchanger, the flow rate and direction of fluid flow also affect other analyzes such as the Reynolds number, logarithmic average temperature change, Number of Tran-

sfer Unit (NTU), and also the effectiveness of NTU. The flow rate in the heat exchanger affects the amount of heat that will be absorbed and released so that when the flow rate increases, the effectiveness of the heat exchanger will also increase because this is influenced by the amount of heat released and received.

KEYWORDS Effectivity, Fluid Flow rate, SCADA, Shell and tube

TUJUAN Panas atau kalor merupakan energi yang dapat berpindah dikarenakan perbedaan temperatur. Dalam melakukan perpindahan panas, dibutuhkan sebuah alat agar mendukung terjadinya perpindahan panas. Alat perpindahan panas yang digunakan pada penelitian ini adalah *Shell and Tube Heat Exchanger* (STHE). Penelitian ini menggunakan program SCADA yang dapat melakukan proses akuisisi data dan kontrol terhadap variabel dependen yaitu laju alir fluida panas sehingga diharapkan data yang ditampilkan pada program SCADA dapat merepresentasikan pengaruh laju alir dan arah aliran terhadap analisis performa alat penukar panas tipe STHE. **METODE** Penelitian dilakukan dengan memvariasikan laju alir fluida panas pada rentang 0.8 L/min – 1.8 L/min, dimana pada alat ini memiliki maksimum laju alir 2,1 L/min. **HASIL** Dari penelitian ini didapatkan bahwa efektivitas tertinggi sebesar 0,44 pada laju alir fluida panas 1.8 L/min dengan aliran fluida berlawanan arah. **KESIMPULAN** Dari hal ini, dapat disimpulkan bahwa laju alir fluida dan arah aliran fluida mempengaruhi efektivitas alat penukar panas, namun bukan hanya mempengaruhi efektivitas alat penukar panas, laju alir dan arah aliran fluida juga mempengaruhi analisis yang lainnya seperti bilangan Reynold, perubahan temperatur rata-rata logaritmik, *Number of Transfer Unit* (NTU), dan juga efektivitas NTU. Laju alir pada alat penukar panas berpengaruh terhadap besarnya panas yang akan diserap maupun dikeluarkan sehingga, ketika laju alir mengalami peningkatan maka efektivitas alat penukar panas juga akan mengalami

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

peningkatan dikarenakan hal ini dipengaruhi oleh besarnya panas yang dikeluarkan maupun yang diterima.

KATA KUNCI Efektivitas; Laju alir fluida; SCADA; *Shell and Tube*.

1. PENDAHULUAN

Panas atau kalor merupakan energi yang dapat berpindah dikarenakan perbedaan temperatur. Satuan dari kalor sering dinotasikan dengan Joule menurut satuan internasional (SI). Panas dapat berpindah maupun bergerak (Krisdiyanto dkk. 2021). Panas berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah, peristiwa inilah disebut sebagai perpindahan panas (Sutowo 2012). Berdasarkan caranya, perpindahan panas dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu: konduksi, konveksi dan radiasi. Konduksi merupakan salah satu cara perpindahan panas dimana panas berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur rendah didalam suatu medium perpindahan panas (padat, cair dan gas). Konveksi merupakan proses perpindahan panas yang merupakan gabungan dari konduksi panas, penyimpanan dan gerakan mencampur. Radiasi adalah proses perpindahan panas secara langsung tanpa melalui medium apapun (Supu dkk. 2016).

Proses perpindahan panas membutuhkan sebuah alat penghantar panas agar terjadinya perpindahan panas. Alat perpindahan panas ini memiliki peranan yang cukup penting dalam suatu proses di dalam dunia perindustrian. Alat penukar panas ini memiliki beberapa jenis yaitu *cooler, heater, reboiler, chiller*, dan juga *condenser* (Septian dkk. 2021). Selain memiliki beberapa jenis, alat penukar panas ini memiliki beberapa tipe seperti *Shell And Tube Heat Exchanger, Plate And Frame Heat Exchanger, Double Pipe Heat Exchanger, Cross Flow Heat Exchanger* dan yang lainnya (Budiman dkk. 2014).

Alat penukar panas yang sering digunakan dalam dunia industri yang melibatkan proses kimia adalah *Shell and Tube Heat Exchanger*. Alat ini memiliki sebuah *shell* atau cangkang dibagian luar dan sejumlah *tube* dibagian dalam. Untuk alat ini memiliki TEMA type (*Tubular Exchanger Manufactures Association*) dan menggunakan standar ASME dalam melakukan pemilihan bahan. Alat ini sering digunakan dalam dunia industri yang melibatkan proses kimia dikarenakan memiliki beberapa keunggulan, diantaranya: pemilihan bahan atau pemilihan material dapat divariasikan, efisiensi perpindahan panas lebih baik dikarenakan fluida panas dan fluida dingin dialirkan terpisah, *pressure drop* dapat divariasikan sesuai dengan kapasitas *heat exchanger* (Siagian 2016). Disamping memiliki keuntungan, alat penukar panas tipe STHE memiliki beberapa kelemahan diantaranya biaya perawatan cukup mahal dikarenakan bundel pada *shell* tidak dapat dilepas sehingga bagian luar *tube* tidak dapat dibersihkan secara mekanis dan juga jika terjadi kerusakan alat penukar panas STHE cukup mahal jika mengganti bagian yang mengalami kerusakan (Bakrie dan Fatimura 2020).

Dalam menjalankan percobaan menggunakan alat penukar panas, selain dibutuhkan alat yang ingin digunakan diperlukan juga *software* pendukung sebagai sistem kontrol untuk mengontrol data yang ingin divariasikan terhadap penggunaan alat. *Software* yang akan digunakan sebagai pendukung untuk mengontrol data yang divariasikan adalah

SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) (Rahmawati 2011). SCADA merupakan salah satu *software* ataupun sistem yang berfungsi dalam melakukan proses akuisisi data, kontrol dan juga pemantauan sistem kontrol industri. SCADA ini memiliki kelebihan untuk memantau, mengendalikan, mengkonfigurasi dan mencatat kerja sistem setiap saat dan juga dapat menangani gangguan menggunakan *remote* dari pusat kontrol. Selain memiliki kelebihan alat ini juga memiliki kekurangan yaitu listrik yang dibutuhkan untuk menjalankan alat ini cukup besar sehingga dapat dikatakan alat ini cukup mahal (Ningrum dkk. 2020).

Dalam sebuah alat pastinya memiliki parameter agar performa atau kinerja alat tersebut dapat diukur. Performa ini menunjukkan kondisi alat bekerja dalam keadaan bagus atau tidak bagus. Sama halnya dengan alat pada umumnya, STHE ini juga memiliki parameter agar STHE ini memiliki kinerja yang bagus ketika dioperasikan. Salah satu parameter atau faktor yang mempengaruhi performa alat STHE ini adalah efektivitas. Efektivitas dapat dinyatakan sebagai ukuran keberhasilan alat tersebut dalam mencapai tujuannya (Sasmita dkk. 2021). Dalam penelitian ini, performa alat STHE ditinjau dengan memvariasikan laju alir fluida panas yang masuk dan perbedaan arah aliran fluida yaitu aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah. Adapun data yang dibandingkan diantaranya *Log Mean Temperature Difference* (ΔT_{LMTD}), laju perpindahan panas (Q), koefisien perpindahan panas *overall* (U), *Number of Transfer Unit* (NTU), dan efektivitas. Data tersebut diperoleh dari *software* SCADA yang sudah terinstall dengan alat STHE merek Edibon.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan alat penukar panas yang memiliki 2 bagian utama yang diproduksi oleh Edibon[®], yaitu :

1. The Base Service Unit, "TIUS", yang memiliki fungsi untuk memanaskan air dalam suatu bak termostatik yang dikendalikan oleh komputer, memompa air panas, mengatur dan mengukur suhu masuk dan keluar aliran air dingin dan air panas, serta mengukur penurunan tekanan di alat penukar panas.
2. "TICT", yaitu *Shell and Tube Heat Exchanger for TICC/CIB* yang terdiri dari serangkaian *tubes* dalam penukar panas sebagai media tempat fluida panas mengalir, fluida dingin mengalir melalui ruang diantara *inner tubes* dan *the shell*. TICC/CIB merupakan *Control Interface Box* yang memiliki sensor yang dikontrol menggunakan program SCADA untuk melakukan akuisisi data dengan memakai DAB (*Data Acquisition Board*).

Rangkaian peralatan *shell and tube* yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 1. Pada bagian *shell* dialirkan fluida dingin sedangkan pada bagian *tube* dialirkan fluida panas. Fluida panas merupakan air yang dipanaskan menggunakan elemen "TIUS" yang diatur pada suhu 43 °C sedangkan fluida dingin merupakan air biasa tanpa perlakuan khusus. Pada bagian *shell* dipasang 4 *baffle* dan setiap *baffle* itu ada selang keluaran air atau *bubble* jika terdapat didalam *shell*. Ada 4 sensor temperatur ditempatkan disetiap *baffle* tersebut untuk mengukur temperatur fluida dingin.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 2 arah aliran fluida yaitu aliran fluida searah Gambar 2.a dan alir-



GAMBAR 1. Rangkaian peralatan STHE yang digunakan pada penelitian, (a) "TIUS"; (b) "TICT".

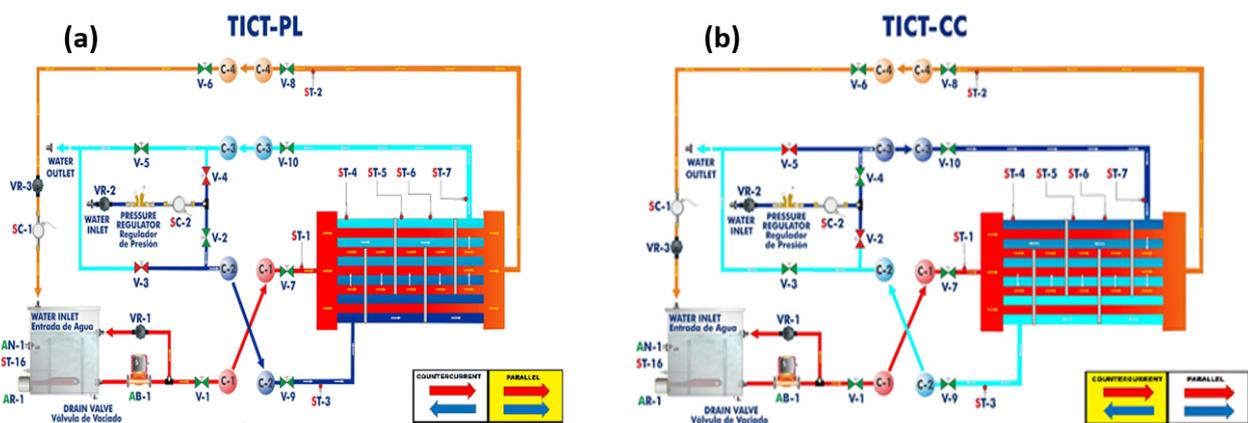
an fluida berlawanan arah Gambar 2.b yang ditampilkan pada rangkaian alat SCADA-Edibon®. Arah aliran diatur dengan mengatur bukaan keran. Jika, keran V-3 dan V-4 ditutup namun keran V-2 dan V-5 dibuka, maka arah aliran tersebut merupakan aliran fluida searah. Sedangkan jika keran V-2 dan V-5 ditutup namun keran V-3 dan V-4 dibuka, maka arah aliran tersebut merupakan aliran fluida berlawanan arah. Koil pemanas (AR-1) berfungsi untuk memanaskan fluida yang temperaturnya diukur menggunakan sensor temperature ST-16. Sensor temperatur ST-1 digunakan untuk mengukur temperatur fluida panas masuk dan sensor temperatur ST-2 digunakan untuk mengukur temperatur fluida panas keluar. Sensor temperatur ST-3 dan ST-7 adalah sensor temperatur fluida dingin masuk dan sensor temperatur fluida dingin keluar. Sensor temperatur ST-4, ST-5 dan ST-6 merupakan perubahan temperatur yang terjadi di dalam shell alat STHE.

Alat STHE ini memiliki spesifikasi diantaranya, *tube length*: 0,566 m, diameter dalam *shell*: 0,158 m, diameter luar *shell*: 0,160 m, diameter dalam *tube*: 0,008 m, diameter luar *tube*: 0,01 m, jarak antar *tube*: 0,015 m, jarak antar *baffles* 0,1 m, jumlah *tube*: 21 buah. Fluida yang digunakan pada penelitian ini adalah air yang memiliki sifat-sifat seperti kapasitas panas spesifik 4.178 J/kg.°C, densitas 987,1 kg/m³ pada kondisi

suhu 25°C dan tekanan 1 atm dan luas penampang pipa 0,373 m². Laju alir fluida panas di ukur dengan sensor SC-1 dengan laju alirnya divariasikan antara 0,8 sampai 1,8 L/min dan laju alir fluida dingin diukur dengan SC-2 dengan lajur alir sebesar 2,2-2,3 L/min. Fluida panas diatur masuk dengan bantuan pompa (AB-1) sedangkan fluida dingin mengalir dengan bantuan pompa tambahan yang dipasang kedalam alat STHE. Data penelitian ini direkam dengan menggunakan SCADA selama 5 menit setelah alat STHE beroperasi selama 15 menit agar diperoleh kondisi alat yang lebih stabil.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data penelitian yang diperoleh dari alat penukar panas tipe *Shell and Tube* (STHE) dengan menggunakan *software* SCADA dan ditampilkan pada Tabel 1. Data yang didapatkan dari SCADA yaitu temperatur fluida panas masuk dan temperatur fluida panas keluar, temperatur fluida dingin masuk dan temperatur fluida dingin keluar, perbedaan temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}), laju perpindahan panas (Q), koefisien perpindahan panas *overall* (U), *Number of Transfer Unit* (NTU), dan efektifitas. Data yang diperoleh merupakan hasil yang pencatatan dan perhitungan yang dilakukan secara otomatis oleh program SCADA yang memiliki fungsi untuk mengakuisisi data, sehingga program ini memudahkan peng-



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, ST-5, ST-6: Sensor temperatur untuk aliran fluida dingin pada posisi tengah shell; ST-7: 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 2. Rangkaian peralatan STHE secara SCADA-Edibon yang digunakan pada penelitian. (a) TICT-PL (*Shell and Tube Heat Exchanger for TICC-Co-Current*) atau aliran fluida searah dan (b) TICT-CC (*Shell and Tube Heat Exchanger for TICC-Counter Current*) atau aliran fluida berlawanan arah.

TABEL 1. Data Hasil Penelitian dari SCADA.

Data SCADA													
Arah Aliran	mh (l/min)	mc (l/min)	TH (Tangki)	TH in	TH out	TC in	TC out	ΔT LMTD	Qc (W)	Qh (W)	U (W/m ² K)	NTU	eff (-)
Searah	0,80	2,31	43	42,05	35,65	31,82	33,71	4,98	300,99	-367,75	197,66	0,46	0,18
	1,00	2,30	43	41,95	36,08	31,93	33,85	5,18	303,85	-417,15	215,58	0,51	0,19
	1,20	2,30	43	41,95	36,68	32,16	34,18	5,34	319,30	-445,12	223,22	0,53	0,21
	1,40	2,28	43	42,04	37,29	32,43	34,69	5,37	354,68	-459,84	229,55	0,55	0,24
	1,60	2,30	43	42,00	37,38	32,28	34,58	5,56	362,86	-500,66	241,07	0,57	0,24
	1,80	2,28	43	42,11	37,82	32,59	34,99	5,51	377,07	-517,65	251,50	0,60	0,25
Berlawanan arah	0,80	2,17	43	41,95	35,75	32,02	35,42	4,99	506,64	-360,05	194,34	0,49	0,34
	1,00	2,13	43	41,78	35,94	32,15	35,52	4,92	494,69	-421,01	229,01	0,58	0,35
	1,20	2,08	43	41,80	36,51	32,22	35,89	5,05	524,35	-448,93	237,88	0,62	0,38
	1,40	2,06	43	41,85	36,98	32,27	36,14	5,20	547,68	-477,80	246,30	0,65	0,40
	1,60	1,95	43	41,98	37,50	32,32	36,52	5,32	563,21	-501,45	252,50	0,71	0,44
	1,80	2,04	43	42,03	37,80	32,35	36,59	5,44	595,07	-527,64	259,64	0,69	0,44

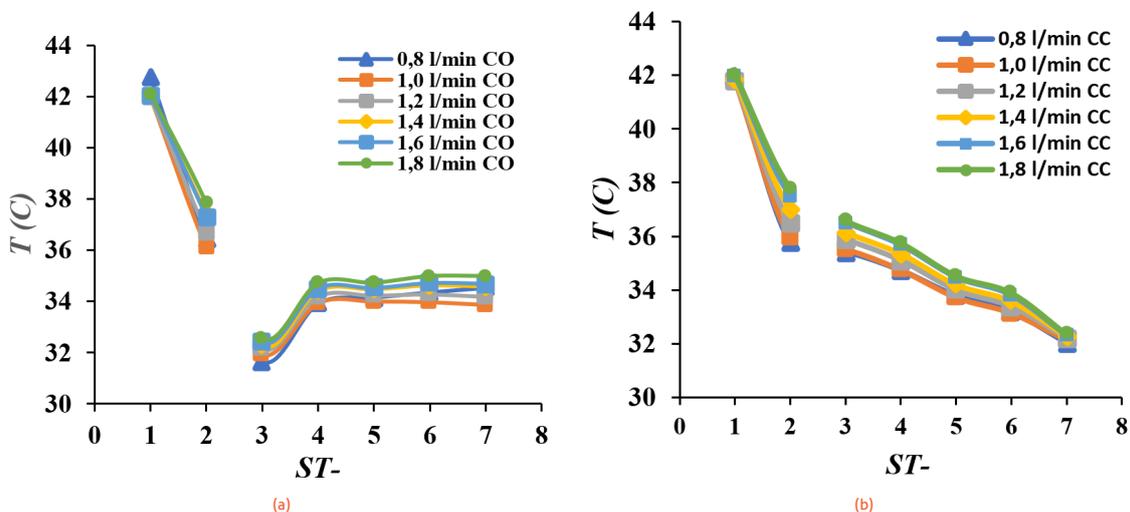
gunanya untuk melakukan analisis terhadap performa alat penukar panas yang digunakan. Selain itu, SCADA juga dapat mengontrol laju alir dan arah aliran yang digunakan sesuai dengan variabel yang telah di tetapkan. Program SCADA juga menampilkan perubahan temperatur di setiap *baffle* pada alat penukar panas. Dari data-data yang didapatkan dapat merepresentasikan pengaruh laju alir dan arah aliran terhadap analisis performa alat penukar panas jenis STHE Alat yang digunakan juga cukup transparan sehingga pengguna dapat melihat aliran fluida dengan jelas didalam alat penukar panas jenis *shell and tube*.

3.1 Perubahan temperatur fluida panas dan fluida dingin

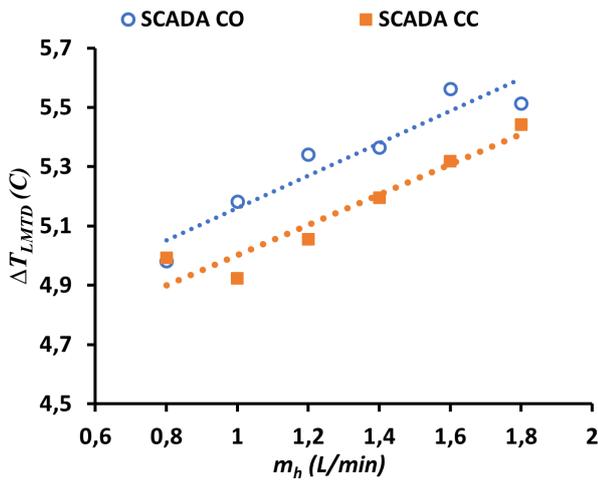
Perubahan temperatur fluida panas dan fluida dingin pada alat perpindahan panas STHE pada berbagai variasi laju alir fluida panas dimana temperatur fluida diukur dengan menggunakan sensor temperatur (ST) untuk aliran fluida searah maupun aliran fluida berlawanan arah ditampilkan pada **Gambar 3**. Penelitian ini dilaksanakan dengan laju alir fluida panas (m_h) antara 0.8-1.8 L/min dengan interval kenaikan laju alir sebesar 0.2 L/min. Alat perpindahan panas STHE pada bagian *shell* mempunyai 4 *baffle* dimana mengalir fluida dingin didalamnya. Sedangkan pada bagian *tube* alat SHE ini dialirkan fluida panas dengan pertimbangan proses penyerapan panas dapat terjadi baik oleh fluida dingin dan tidak

ada panas yang hilang secara percuma ke lingkungan. Temperatur fluida panas masuk (ST-1) sebesar 42 °C mengalami penurunan temperatur fluida panas keluar (ST-2) sangat signifikan hingga mencapai 36,08 °C pada laju alir fluida panas 0,8 L/min. Tendensi ini terjadi pada arah aliran fluida searah (**Gambar 3a**) dan aliran fluida berlawanan arah (**3b**). Penurunan temperatur fluida panas (ST-2) terjadi hingga mencapai 35,75 °C pada aliran fluida berlawanan arah dan penurunan temperatur ST-2 ini lebih besar jika dibandingkan dengan penurunan temperatur ST-2 pada aliran fluida searah. Penurunan temperatur fluida panas masuk ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas terjadi dengan baik. Penurunan temperatur juga dipengaruhi oleh perbedaan laju alir fluida panas yang masuk ke dalam alat perpindahan panas STHE dimana semakin besar laju alir fluida panas maka semakin besar penurunan temperatur ST-2.

Temperatur fluida dingin masuk (ST-3) mengalami peningkatan sangat signifikan pada aliran fluida searah (**Gambar 3a**) dimana perubahan ini terjadi pada ST-4 yaitu fluida dingin masuk ke dalam alat STHE pada *baffle* ke-1. Penambahan temperatur fluida dingin ini mencapai 2,5 °C pada aliran fluida searah. Hal ini disebabkan karena adanya kontak pertama antara fluida panas yang masuk dengan fluida dingin yang masuk ke dalam alat perpindahan panas STHE dimana temperatur fluida panas yang masuk masih tinggi. Ini



GAMBAR 3. Perubahan temperatur pada berbagai laju alir fluida diukur oleh sensor temperatur ST-1 hingga ST-7 secara SCADA pada aliran fluida searah (SCADA CO) (a) dan aliran fluida berlawanan arah (SCADA CC) (b)



GAMBAR 4. Pengaruh laju alir fluida panas terhadap nilai ΔT_{LMTD} secara SCADA pada aliran fluida searah (SCADA CO) dan aliran fluida berlawanan arah (SCADA CC).

menunjukkan bahwa fluida dingin dapat menyerap panas dengan baik dari fluida panas. Namun perubahan temperatur fluida dingin pada *baffle* ke-2 hingga *baffle* ke-4 terjadi tidak terlalu signifikan karena panas sudah terserap maksimal pada saat *baffle* ke-1. Temperatur fluida dingin masuk (ST-7) mengalami proses penyerapan panas lebih baik pada aliran fluida yang berlawanan arah (3a). Temperatur fluida dingin terus mengalami kenaikan hingga mencapai 36,59 °C dengan laju alir fluida panas masuk 1.8 mL/menit. Peningkatan temperatur fluida dingin ini hingga mencapai 3,3 °C pada aliran fluida berlawanan arah. Dari gambar 3a dan gambar 3b dapat dilihat bahwa proses penyerapan panas oleh fluida dingin terjadi sangat besar pada aliran fluida yang berlawanan arah. Ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas dari fluida panas ke fluida dingin terjadi lebih baik pada aliran fluida berlawanan arah (Yuniarti dkk. 2022).

3.2 Perbedaan temperatur rata-rata logaritma (LMTD)

ΔT_{LMTD} atau *Logarithmic Mean Temperature Differential* dapat diartikan sebagai perbedaan temperatur rata-rata logaritma antara temperatur fluida masuk dengan temperatur fluida keluar dan ΔT_{LMTD} dapat dihitung dapat menggunakan persamaan (1),

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \tag{1}$$

Pada fluida dengan arah aliran berlawanan, perbedaan temperatur ΔT_1 dapat dihitung dengan rumus $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i}$, sedangkan perbedaan temperatur ΔT_2 dapat dihitung dengan rumus $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o}$. Perbedaan temperatur rata-rata logaritma dari persamaan (1) dapat disederhanakan menjadi persamaan (2) pada aliran fluida searah,

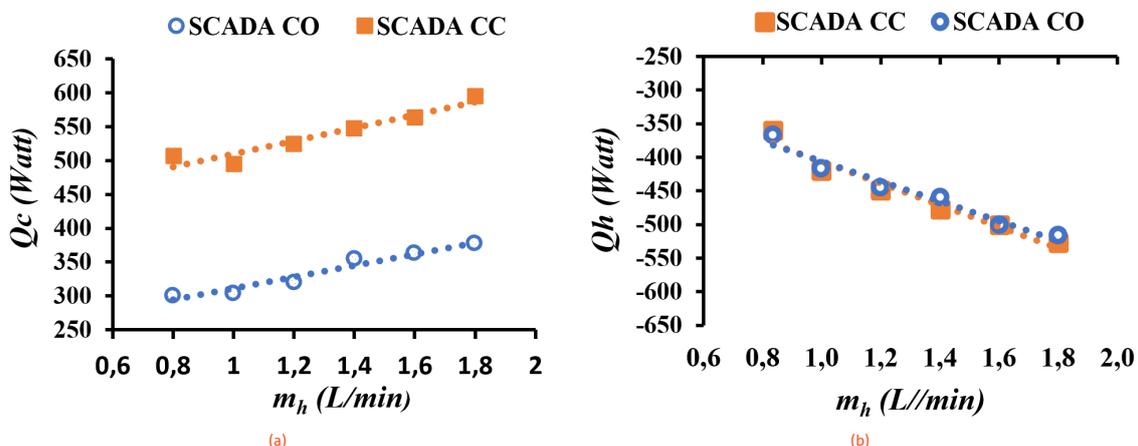
$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,i}}{T_{h,o} - T_{c,o}}\right)} \tag{2}$$

Pada fluida dengan arah aliran searah, 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 (2) dapat disederhanakan menjadi persamaan (3) pada aliran fluida berlawanan arah,

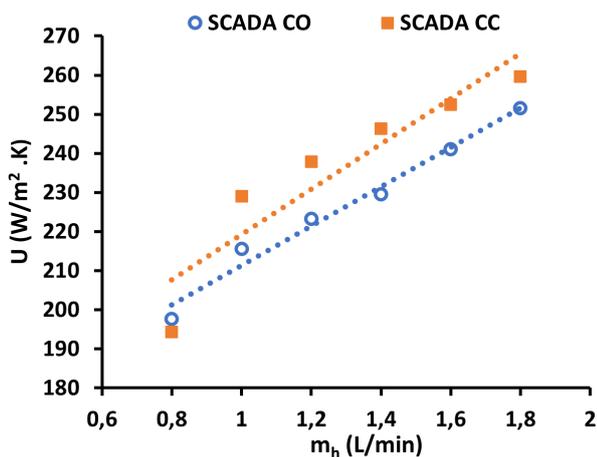
$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)} \tag{3}$$

Pada fluida panas temperatur masuk mengalami penurunan temperatur, sehingga nilai $T_{h,i}$ lebih besar dibandingkan nilai $T_{h,o}$ hal ini disebabkan terjadinya penyerapan panas oleh fluida dingin. Namun, pada fluida dingin berlaku hal yang sebaliknya, temperatur masuk mengalami peningkatan temperatur, sehingga nilai $T_{c,i}$ lebih kecil dibandingkan nilai $T_{c,o}$ hal ini disebabkan fluida dingin melakukan penyerapan panas terhadap fluida panas (Harini 2017).

Hubungan perbedaan laju alir fluida panas terhadap perbedaan temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}) pada aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah ditampilkan pada Gambar 4. Nilai ΔT_{LMTD} yang diperoleh dari hasil penelitian ini antara 4,9 hingga 5,6 °C. Nilai ΔT_{LMTD} yang diperoleh meningkat secara signifikan dengan meningkatkan laju alir fluida panas pada aliran fluida searah maupun pada aliran fluida berlawanan arah. Nilai ΔT_{LMTD} lebih besar terjadi pada aliran fluida searah jika dibandingkan dengan nilai ΔT_{LMTD} pada aliran fluida berlawanan arah. Hal ini menun-



GAMBAR 5. Pengaruh laju alir fluida panas terhadap laju perpindahan panas pada fluida dingin, Q_c (a) dan laju perpindahan panas pada fluida panas, Q_h (b) secara SCADA pada aliran fluida searah (SCADA CO) dan aliran fluida berlawanan arah (SCADA CC).



GAMBAR 6. Pengaruh laju alir fluida panas terhadap koefisien perpindahan panas overall secara SCADA pada aliran fluida searah (SCADA CO) dan aliran fluida berlawanan arah (SCADA CC).

jujukan bahwa pada aliran fluida searah dimana proses perpindahan/penyerapan panas oleh fluida dingin terjadi secara baik daripada aliran fluida searah.

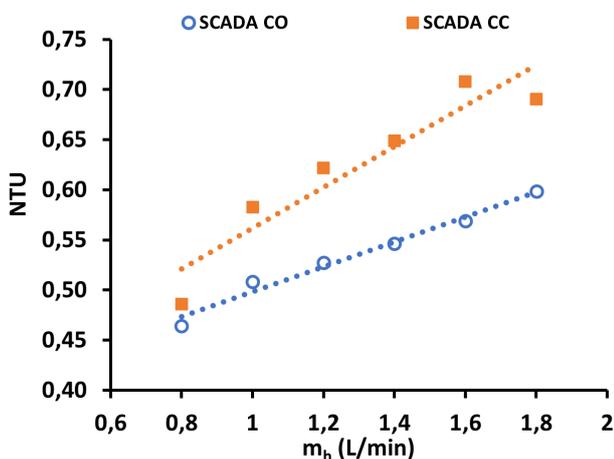
3.3 Laju Perpindahan Panas (Q)

Perhitungan untuk laju perpindahan panas secara umum dapat menggunakan persamaan (4):

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \tag{4}$$

Notasi \dot{m} , C_p , dan ΔT masing-masing menunjukkan laju alir masa (kg/min), kapasitas panas (kal/kg.°C), dan perubahan temperatur dari masing-masing fluida (Hersandi dkk. 2014). Persamaan (4) dapat digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas pada fluida panas (Q_h) maupun laju perpindahan panas pada fluida dingin (Q_c). Nilai ΔT ini akan menyesuaikan jika fluida yang digunakan sebagai pemanas maka untuk menghitung nilai ΔT adalah dengan melakukan pengurangan terhadap fluida panas keluar dengan fluida panas masuk, begitu juga jika fluida yang digunakan sebagai pendingin.

Gambar 5a menampilkan pengaruh laju alir fluida pa-



GAMBAR 7. Hubungan laju alir fluida panas terhadap NTU pada aliran fluida searah (SCADA CO) dan aliran fluida berlawanan arah (SCADA CC).

nas terhadap laju perpindahan panas pada aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah. Dari penelitian ini diperoleh bahwa laju perpindahan panas pada fluida dingin (Q_c) memiliki tendensi meningkat secara signifikan dengan meningkatnya laju alir fluida panas. Tendensi ini terjadi pada aliran fluida searah maupun pada aliran fluida berlawanan arah (Yuniarti dkk. 2022). Q_c terendah diperoleh sebesar 300,99 watt untuk aliran searah sedangkan Q_c terendah sebesar 595,07 watt untuk aliran berlawanan arah pada laju fluida panas 1,8 L/min.

Nilai laju perpindahan pada fluida panas (Q_h) memiliki tendensi menurun secara signifikan dengan meningkatnya laju alir fluida panas pada aliran searah maupun pada aliran berlawanan arah (Gambar 5b). Tanda negatif pada Q_h menunjukkan bahwa terjadinya pelepasan panas dari fluida panas ke fluida dingin. Pada aliran searah, dapat dilihat ketika laju alir terkecil ($\dot{m}_h = 0,8$ L/min) nilai Q_h yang didapatkan senilai -367,75 W. Namun, ketika laju alir terbesar ($\dot{m} = 1,8$ L/min) nilai Q_h yang didapatkan senilai -517,65 W. Pada aliran berlawanan arah, dapat dilihat ketika laju alir terkecil ($\dot{m} = 0,8$ L/min) nilai Q_h yang didapatkan senilai -360,05 W. Namun, ketika laju alir terbesar ($\dot{m} = 1,8$ L/min) nilai Q_h yang didapatkan senilai -527,64 W. Dari Gambar 5a dapat dilihat bahwa laju perpindahan panas pada fluida panas untuk aliran searah dan aliran berlawanan arah adalah sama. Ini menunjukkan bahwa kondisi pompa bekerja dengan baik dan proses perpindahan panas STHE dari fluida panas ke fluida dingin berlangsung baik.

Dari Gambar 5 dapat disimpulkan bahwa nilai Q panas yang masuk terhadap fluida dingin pada aliran fluida berlawanan arah memiliki nilai Q yang paling besar dibandingkan dengan nilai Q pada aliran searah, hal ini dikarenakan pada aliran fluida berlawanan arah ΔT fluida dingin yang keluar dari alat penukar panas lebih tinggi dibandingkan ΔT fluida panas yang keluar dari alat penukar kalor. Hal tersebut dikarenakan pada aliran berlawanan arah ini panas yang masuk terhadap fluida dingin lebih banyak dan aliran ini juga sering dianggap lebih baik jika dibandingkan dengan aliran searah (Reshid dkk. 2019).

3.4 Koefisien perpindahan panas overall

Nilai U atau koefisien perpindahan panas overall dapat diartikan sebagai nilai koefisien perpindahan panas secara tidak langsung yang terjadi konveksi paksa pada suatu dinding logam antara fluida panas pada satu sisi dan fluida dingin pada sisi lain. Nilai U ini, dapat dihitung menggunakan persamaan (5),

$$U = \frac{Q}{A \times \Delta T_{LMTD}} \tag{5}$$

Nilai Q dan ΔT_{LMTD} dapat dihitung menggunakan persamaan (4) dan (2). Nilai Q menunjukkan nilai laju perpindahan panas yang diserap oleh fluida dingin maupun fluida panas yang dikeluarkan oleh fluida panas. Sedangkan nilai ΔT_{LMTD} menunjukkan besar perbedaan nilai temperatur rata-rata. Untuk nilai A merupakan nilai yang menunjukkan luas penampang (Abdul Chalim dkk. 2021).

Gambar 6 menampilkan pengaruh laju alir terhadap nilai koefisien perpindahan panas overall (U) secara SCADA pada aliran fluida searah dan pada aliran fluida berlawan-

TABEL 2. Bilangan Nusselt dan bilangan Prandtl pada aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah.

Arah Aliran	mh (l/min)	mc (l/min)	Nuh	Nuc	Prh	Prc
Co-Current	0,80	2,31	0,28	7,48	5,02	5,18
	1,00	2,30	0,33	7,43	5,02	5,18
	1,20	2,30	0,38	7,42	5,02	5,18
	1,40	2,28	0,46	7,40	5,02	5,18
	1,60	2,30	0,49	7,39	5,02	5,18
	1,80	2,28	0,50	7,38	5,02	5,18
Counter Current	0,80	2,17	0,28	7,10	5,02	5,18
	1,00	2,13	0,33	6,99	5,02	5,18
	1,20	2,08	0,38	6,84	5,02	5,18
	1,40	2,06	0,43	6,80	5,02	5,18
	1,60	1,95	0,48	6,78	5,02	5,18
	1,80	2,04	0,52	6,68	5,02	5,18

an arah. Dari penelitian ini diperoleh bahwa nilai U memiliki tendensi meningkat secara signifikan dengan meningkatnya laju alir fluida panas. Tendensi ini juga terjadi pada arah aliran yang searah maupun arah aliran yang berlawanan arah (Yuniarti dkk. 2022). Nilai U tertinggi diperoleh sebesar $259,64 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ pada arah aliran fluida berlawanan arah dan nilai U tertinggi dicapai sebesar $251,50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ pada arah aliran fluida searah dengan laju alir fluida panas $1,8 \text{ L/min}$. Nilai U pada aliran fluida berlawanan arah lebih besar jika dibandingkan dengan nilai U dengan aliran fluida searah. Reshid dkk. (2019) melakukan penelitian tentang pengaruh laju alir masa terhadap nilai U pada aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah dimana diperoleh hasil bahwa nilai U meningkat dengan meningkatnya laju alir masa dan nilai U lebih besar untuk aliran berlawanan arah daripada aliran searah. Hal ini disebabkan karena laju perpindahan panas yang terjadi pada aliran berlawanan arah lebih baik jika dibandingkan dengan perpindahan panas yang terjadi di aliran searah untuk aliran yang mengalir secara laminar. Hal ini dapat dilihat dari temperatur keluaran dari fluida panas lebih kecil dibanding temperatur keluaran fluida dingin jika dalam aliran berlawanan arah, namun jika pada aliran searah, temperatur keluaran fluida dingin tidak bias melebihi temperatur keluaran fluida panas. Hal ini menyebabkan, nilai laju perpindahan panas pada aliran berlawanan arah lebih besar dibandingkan pada aliran searah, hal ini juga berpengaruh terhadap nilai koefisien perpindahan panas (Thirumarim dkk. 2008; Reshid dkk. 2019).

3.5 Number of Transfer Unit (NTU)

NTU atau *number of transfer unit* merupakan jumlah satuan perpindahan panas yang merupakan tolak ukur terjadinya proses perpindahan panas suatu alat penukar panas. NTU dapat dihitung menggunakan persamaan (6) (Abdul Chalim dkk. 2021),

$$NTU = \frac{U \times A}{C_R} \quad (6)$$

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara laju alir fluida panas terhadap NTU secara SCADA pada aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah. Nilai NTU mempunyai tendensi meningkat dengan meningkatnya laju alir fluida panas secara SCADA pada aliran fluida searah maupun berlawanan arah. Namun jika dibandingkan nilai NTU pada

aliran fluida berlawanan arah lebih besar dibandingkan aliran fluida berlawanan arah. Hal ini dikarenakan pada aliran berlawanan arah terjadi perpindahan panas yang lebih besar dibandingkan dengan aliran yang searah sehingga nilai NTU ini yang merepresentasikan nilai laju perpindahan panas akan meningkat juga seiring meningkatnya laju perpindahan panas yang terjadi. Nilai NTU tertinggi diperoleh sebesar $0,71$ pada aliran fluida berlawanan arah dengan laju alir fluida panas $1,6 \text{ L/min}$ dan nilai NTU tertinggi dicapai sebesar $0,60$ pada aliran fluida searah dengan laju alir fluida panas $1,8 \text{ L/min}$.

3.6 Bilangan Prandtl dan Nusselt

Bilangan Prandtl merupakan bilangan yang menunjukkan perbandingan antara viskositas kinematik fluida terhadap difusivitas termal fluida. Bilangan Prandtl ini dapat digunakan untuk mengetahui keefektifan dari perpindahan momentum dan energi oleh difusi pada lapis batas. Untuk menghitung Bilangan Prandtl dapat menggunakan persamaan (7).

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{K} \quad (7)$$

Bilangan Nusselt merupakan bilangan yang menunjukkan perbandingan antara gradien temperatur permukaan terhadap gradien temperatur konveksi. Bilangan Nusselt dengan kata lain dapat diartikan sebagai bilangan yang menggambarkan karakteristik proses perpindahan kalor. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung Bilangan Nusselt dapat dilihat pada persamaan (8).

$$Nu = 0,0366 N_{re}^{0,8} \times N_{pr}^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Tabel 2 menampilkan hasil perhitungan Bilangan Prandtl dan Bilangan Nusselt pada fluida panas dan fluida dingin untuk aliran searah maupun aliran berlawanan arah. Bilangan Prandtl pada fluida panas menghasilkan nilai yang sama di setiap laju alir dan arah aliran yang berbeda, yaitu $5,02$ begitu juga Bilangan Prandtl pada fluida dingin menghasilkan, yaitu $5,18$. Berdasarkan persamaan 7, Bilangan Prandtl dipengaruhi oleh kapasitas panas (C_p), viskositas (μ) dan konduktivitas panas fluida (K). Nilai C_p , μ , dan K tersebut dipengaruhi oleh temperatur fluida sedangkan pada penelitian ini, proses perpindahan panas hanya memvariasikan laju alir fluida dan nilai tersebut tercatat oleh SCADA adalah sama sehingga Bilangan Prandtl tidak mengalami perubahan.

Bilangan Nusselt yang dihasilkan berdasarkan persamaan 8, dipengaruhi oleh Bilangan Reynold dan Bilangan Prandtl. Faktor yang mempengaruhi Bilangan Nusselt adalah Bilangan Reynold. Bilangan Reynold menyatakan aliran fluida bersifat laminar atau turbulen dipengaruhi oleh kecepatan aliran fluida, densitas fluida, dan viskositas fluida. Bilangan Nusselt tertinggi untuk fluida panas didapatkan pada laju alir 1.8 dengan aliran berlawanan arah yaitu 13.60, sedangkan untuk fluida dingin bilangan tertinggi didapatkan pada laju alir 1.8 dengan aliran berlawanan arah yaitu 18.42. Meningkatnya laju alir fluida panas untuk aliran fluida searah maupun aliran fluida berlawanan arah maka diperoleh Bilangan Nusselt semakin meningkat. Sebaliknya tendensi yang terjadi pada fluida dingin dimana Bilangan Nusselt semakin berkurang dengan berkurangnya laju alir fluida dingin. Hal ini berkaitan dengan Bilangan Reynold fluida. Bilangan Reynold pada penelitian ini yang tercatat secara SCADA cukup rendah berkisar antara 6-14 untuk fluida panas dan 320-390 untuk fluida dingin. Aliran fluida pada penelitian ini dapat dikategorikan aliran laminar ($N_{re} < 2100$).

3.7 Efektivitas

Efektivitas dapat didefinisikan sebagai tolak ukur keberhasilan alat itu melakukan penukar panas. Efektivitas alat penukar panas dapat juga diartikan sebagai perbandingan laju perpindahan panas yang sebenarnya dalam penukar panas terhadap laju pertukaran panas maksimum. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi efektivitas alat penukar panas seperti *pressure drop*, laju perpindahan panas, faktor pengotor, dan sebagainya (Siagian 2016). Dalam alat STHE perlu dilakukan evaluasi kinerja alat penukar panas agar dapat dilakukan peningkatan efektivitas alat STHE sehingga dalam penggunaannya sesuai dengan kondisi operasi yang diharapkan.

Efektivitas alat penukar panas dapat dihitung dengan metode perbedaan temperatur (ϵ) dengan menggunakan persamaan (9),

$$\epsilon = \frac{q_{real}}{q_{max}} \tag{9}$$

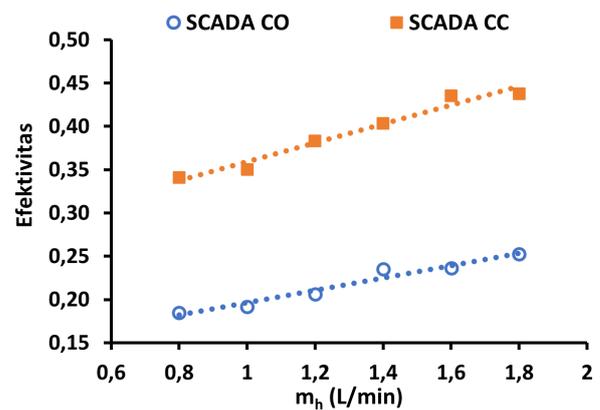
Notasi q_{real} dan q_{max} masing-masing menunjukkan laju perpindahan panas pada sistem (Watt) dan laju perpindahan panas maksimum (Watt). Efektivitas alat penukar panas (ϵ) dapat dihitung menggunakan persamaan (8) jika laju kapasitas panas untuk fluida dingin (C_c) lebih besar dari laju kapasitas panas untuk fluida panas (C_h) dan begitu sebaliknya efektivitas alat penukar panas (ϵ) dapat dihitung menggunakan persamaan (9) jika laju kapasitas panas untuk fluida dingin (C_c) lebih kecil dari laju kapasitas panas untuk fluida panas (C_h).

$$\epsilon = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \tag{10}$$

jika $C_c = m_c \cdot Cp_c > C_h = m_h \cdot Cp_h$

$$\epsilon = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \tag{11}$$

jika $C_c = m_c \cdot Cp_c < C_h = m_h \cdot Cp_h$



GAMBAR 8. Hubungan laju alir fluida panas terhadap efektivitas pada aliran fluida searah (SCADA CO) dan aliran fluida berlawanan arah (SCADA CC).

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 8, tendensi pengaruh laju alir terhadap efektivitas alat penukar panas adalah meningkat. Laju alir fluida panas mengalami peningkatan seiring dengan efektivitas alat penukar panas juga akan mengalami peningkatan (Thirumarim dkk. 2008). Nilai efektivitas alat penukar panas berada pada rentang 18-25% pada aliran fluida searah dan rentang 30%-45% pada aliran fluida berlawanan arah. Efektivitas alat penukar panas pada aliran fluida berlawanan arah lebih besar daripada aliran fluida searah (Yuniarti dkk. 2022).

Efektivitas alat STHE dengan menggunakan metode perbedaan temperatur dipengaruhi oleh temperatur serta laju kapasitas panas pada C_h dan C_c . Nilai C_c pada penelitian ini lebih besar daripada nilai C_h karena laju massa fluida dingin lebih besar dari laju massa fluida panas pada aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah. Aliran fluida searah dan aliran fluida berlawanan arah dapat dilihat hubungan antara efektivitas dengan laju alir berbanding lurus, hal ini disebabkan dari persamaan efektivitas yaitu hasil antara pengurangan dari temperatur fluida dingin yang keluar dengan temperatur dingin yang masuk lalu dibagi dengan temperatur fluida panas yang masuk dengan temperatur fluida dingin yang masuk. Jadi ketika laju alir meningkat maka temperatur keluarannya juga akan semakin besar sehingga efektivitasnya semakin besar (Reshid dkk. 2019; Yuniarti dkk. 2022).

Laju aliran fluida meningkatkan berarti kecepatan aliran meningkat. Kecepatan aliran yang meningkat membuat bilangan Reynold aliran menjadi meningkat juga (lebih turbulen), dimana hal ini membawa dampak akan menaikkan koefisien perpindahan panas konveksi yang pada akhirnya meningkatkan koefisien perpindahan panas total dalam alat penukar panas. Namun, kenaikan laju aliran massa juga membuat waktu kontak/singgung antara kedua fluida (dalam hal ini fluida panas dan fluida dingin) menjadi lebih singkat. Jadi, dengan meningkatnya laju alir fluida pada perpindahan panas dalam alat penukar panas lebih baik namun waktu kontak lebih singkat (Handoyo 2001).

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa laju alir fluida memiliki pengaruh terhadap panas yang diserap ataupun diterima, temperatur rata-rata, koefisien perpindahan panas *overall*, nilai besaran transfer panas

dan efektivitas. Dari penelitian yang telah dilakukan hasil yang didapatkan dari SCADA memiliki beberapa perbedaan, hal ini dipengaruhi oleh nilai temperatur yang didapatkan juga mengalami perbedaan serta luas transfer perpindahan panas juga memiliki perbedaan, sehingga hal ini menyebabkan perbedaan antara SCADA. Nilai efektivitas alat penukar panas berada pada rentang 18-25% pada aliran fluida searah dan rentang 30%-45% pada aliran fluida berlawanan arah dengan laju alir fluida panas 0,8 – 1,8 L/min. Efektivitas alat penukar panas pada aliran fluida berlawanan arah lebih besar daripada aliran fluida searah. Dari data yang telah didapatkan menggunakan SCADA, dapat dilihat SCADA memudahkan para pengguna untuk melakukan analisis terhadap performa alat penukar panas. Hal ini dapat dilihat bahwa data analisis yang ditampilkan SCADA, otomatis dan lengkap sehingga pengaruh variabel yang ditetapkan yaitu laju alir dan arah aliran terhadap data analisis yang ditampilkan oleh SCADA dapat dilihat dari grafik yang telah ditampilkan sebelumnya, dari analisis ini dapat dilihat laju alir terbaik pada angka 1,8 L/min dengan arah aliran yang berlawanan arah.

5. DAFTAR NOTASI

1. Q_h : Laju perpindahan panas pada fluida panas (Watt)
2. Q_c : Laju perpindahan panas pada fluida dingin (Watt)
3. m : Laju alir massa fluida (kg/min)
4. m_h : Laju alir masa dari fluida panas (kg/min)
5. m_c : Laju alir masa dari fluida dingin (kg/min)
6. C_p : Kapasitas panas fluida(kal/kg.K)
7. C_{p_h} : Kapasitas panas dari fluida panas (kal/kg.K)
8. C_{p_c} : Kapasitas panas dari fluida dingin (kal/kg.K)
9. $T_{h,i}$: Temperatur fluida panas masuk (K)
10. $T_{h,o}$: Temperatur fluida panas keluar (K)
11. $T_{c,o}$: Temperatur fluida dingin keluar (K)
12. $T_{c,i}$: Temperatur fluida dingin masuk (K)
13. ΔT_{LMTD} : Perbedaan temperatur rata-rata logaritma (K)
14. ΔT_1 : Perbedaan temperatur 1 (K)
15. ΔT_2 : Perbedaan temperatur 2 (K)
16. A : Luas penampang permukaan perpindahan panas (m^2)
17. U : Koefisien Perpindahan panas overall ($W/m^2.K$)
18. NTU : Number of Heat Transfer Units
19. C_R : Laju kapasitas panas terendah (-)
20. C_{p_h} : Laju kapasitas panas untuk fluida panas (W/K)
21. C_c : Laju kapasitas panas untuk fluida dingin (W/K)
22. ϵ : Efektivitas penukas panas (%)
23. Q_{real} : Laju perpindahan panas pada sistem (Watt)
24. Q_{max} : Laju perpindahan panas maksimum (Watt)

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Prodi Teknik Mesin, Institut Teknologi Sumatera atas izin pemakaian peralatan alat STHE.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Chalim, Ariani, MuchAgung Indra Iswara. 2021. Penentuan number transfer unit sistem fluida dietilen glikol – metanol, dalam evaluasi efisiensi penukar panas shell and tube 1-1. *Jurnal Teknik Ilmu Dan Aplikasi*. 9(1):73–86. doi:10.33795/jtia.v9i1.15.
- Bakrie M, Fatimura M. 2020. Optimalisasi rancangan shell-

dan-tube heat exchagers (tinjauan literatur). *Jurnal Redoks*. 5(2):116. doi:10.31851/redoks.v5i2.4992.

- Budiman A, Syarief A, Isworo H. 2014. Analisis Perpindahan Panas dan Efisiensi Efektif High Pressure Heater (HPH) di PLTU Asam-Asam. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unlam*. 03(2):76–82.
- Handoyo EA. 2001. Pengaruh penggunaan baffle pada shell-and-tube heat exchanger. *jurnal teknik mesin*. 3(1):19–23. <https://jurnalmesin.petra.ac.id/index.php/mes/article/view/15934>.
- Harini. 2017. Analisis perhitungan laju perpindahan panas alat penukar kalor type pipa ganda di laboratorium Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta. *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*. 2(8368):51–61. doi:<https://doi.org/10.21009/JKEM.4.2.1>.
- Hersandi M, Supriyadi B, Yushardi. 2014. Pengaruh bentuk elemen pemanas terhadap jumlah kalor yang dihasilkan. *Journal Pendidikan Fisika*. 3(1):23–27. <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/JPF/article/view/23233>.
- Krisdiyanto, Adi RK, Sudarisman, Hamdan SB. 2021. An analysis of tube thickness effect on shell and tube heat exchanger. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1(8-109):25–35. doi:10.15587/1729-4061.2021.225334.
- Ningrum RF, Siregar RRA, Rusjdi D. 2020. Penerapan sistem scada dalam perancangan model inferensi logika fuzzy mamdani pada pembebanan trafo gardu distribusi. *Petir*. 13(2):110–118. doi:10.33322/petir.v13i2.1001.
- Rahmawati D. 2011. Simulasi aplikasi supervisory and data acquisition (scada) pada pengaturan level air dengan winlog. *Rekayasa*. 4(2):157–161. <https://journal.trunojoyo.ac.id/rekayasa/article/view/2341>.
- Reshid MN, Chala GT, Muhamad WMW. 2019. Comparison of overall heat transfer coefficient between shell and tube and spiral coil heat exchangers. *Pertanika Journal of Science and Technology*. 27(4):2065–2077. <http://www.pertanika.upm.edu.my/pjst/browse/archives?article=JST-1341-2018>.
- Sasmita FG, Yulianto AD, Huda AF, Sudarminto HP. 2021. Efektivitas kinerja heat exchanger shell and tube 1-2 dengan variasi flow rate natural gas pada shell dan reformer pada tube di unit hydrogent plant 8 PT. Pertamina (Persero) Ru V Balikpapan. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*. 7(2):179–189. doi:10.33795/distilat.v7i2.213.
- Septian B, Aziz A, Rey PD, Studi P, Mesinfakultas T, Dan S, Universitas T, Assyafi'iyah Jakarta I, Besar B, Konversi T, Bppt E. 2021. Design of heat exchanger shell and tube. *Jurnal Baut dan Manufaktur*. 03(1):53–60.
- Siagian S. 2016. Analisa efektivitas alat penukar kalor jenis shell and tube hasil perencanaan mahasiswa skala laboratorium. *Energi dan Manufaktur*. 12:211–216.
- Supu I, Usman B, Basri S, Sunarmi. 2016. Pengaruh temperatur terhadap perpindahan panas pada material yang berbeda. 07(April):62–73.
- Sutowo C. 2012. Analisa heat exchanger jenis shell and tube dengan sistem single pass. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jakarta*. 1:1–9. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/sintek/article/view/105>.
- Thirumarim M, Kannadasan T, Ramasamy E. 2008. Performance analysis of shell and tube heat exchanger using

miscible system. *American Journal of Applied Sciences*. 5(5):548–552. doi:[10.3844/ajassp.2008.548.552](https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.548.552).

Yuniarti R, Achmad F, Listyadevi YL, Angraini L. 2022. Pengaruh temperatur dan arah aliran terhadap efektivitas pe-

nukar panas NTU (θ -NTU) pada alat penukar panas tipe plate and frame. *Jurnal Integrasi Proses*. 11(1):32–39. <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip/article/view/13989/9077>.