



Pengaruh Kenaikan Laju Alir Fluida Panas dan Arah Aliran terhadap Kinerja *Plate and Frame Heat Exchanger*

Effect of Increase in Hot Fluid Flow Rate and Flow Direction on Plate and Frame Heat Exchanger Performance

Feerzet Achmad*, Roy Naldi, Dikri Uzlifah Janah, Rifqi Sufra, Reni Yuniarti

Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Lampung Selatan, 35365, Indonesia

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

Article history:

Diterima : 8 November 2023
Direvisi : 21 Januari 2024
Disetujui : 10 Februari 2024
Mulai online : 23 Maret 2024

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Feerzet Achmad, Roy Naldi, Dikri Uzlifah Janah, Rifqi Sufra, Reni Yuniarti. (2024). Pengaruh Kenaikan Laju Alir Fluida Panas dan Arah Aliran terhadap Kinerja *Plate and Frame Heat Exchanger*. Jurnal Teknik Kimia USU, 13(1), 40-47.

ABSTRAK

Plate and Frame Heat Exchanger (PFHE) adalah alat penukar panas tipe pelat dan dibingkai yang efisien serta efektif dalam meningkatkan efisiensi energi. Penelitian menggunakan PFHE bertujuan untuk mengetahui pengaruh kenaikan laju alir fluida panas terhadap kinerja *heat exchanger*. Penelitian ini dilakukan pada variasi laju alir 0,7 L/menit, 0,9 L/menit, 1,1 L/menit, 1,3 L/menit, 1,5 L/menit, 1,7 L/menit, dan 1,8 L/menit dengan pengujian 180 detik setiap variasi dan merekam data setiap 2 detik. Fluida dingin yang digunakan adalah air keran dan fluida panas yang digunakan adalah akuades. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan meningkatnya laju alir fluida panas, maka kinerja PFHE juga meningkat karena efektivitas NTU (ϵ -NTU) mengalami peningkatan. Nilai ϵ -NTU aliran searah adalah 25,37% - 44,87% dan berlawanan arah 37% - 68,39%. Nilai ϵ -NTU terbesar pada aliran berlawanan arah yang menunjukkan aliran berlawanan arah lebih efektif dari pada aliran searah. Selain itu, peningkatan laju alir meningkatkan bilangan *Reynold* (N_{re}) dan *Nusselt* (Nu) yang menunjukkan perpindahan panas konveksi paling besar terjadi pada laju alir paling tinggi.

Kata kunci: efektivitas, *heat exchanger*, laju alir, *plat and frame*

ABSTRACT

Plate and Frame Heat Exchanger (PFHE) is a plate and frame type heat exchanger that is efficient and effective in improving energy efficiency. Research using PFHE aims to determine the effect of increasing the flow rate of hot fluid on heat exchanger performance. This research was conducted at a flow rate variation of 0.7 L/min, 0.9 L/min, 1.1 L/min, 1.3 L/min, 1.5 L/min, 1.7 L/min, and 1.8 L/min with 180 seconds of testing each variation and recording data every 2 seconds. The cold fluid used is tap water and the hot fluid used is distilled water. The results showed that with the increase in hot fluid flow rate, the performance of PFHE also increased because the effectiveness of NTU (ϵ -NTU) increased. The ϵ -NTU value of unidirectional flow is 25.37% - 44.87% and in the opposite direction 37% - 68.39%. The largest ϵ -NTU value in the countercurrent flow indicates that the countercurrent flow is more effective than the unidirectional flow. In addition, increasing the flow rate increases the *Reynold's number* (N_{re}) and *Nusselt's number* (Nu) which indicates the greatest convection heat transfer occurs at the highest flow rate.

Keyword: effectiveness, *heat exchanger*, flow rate, *plate and frame*



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v13i1.14321>

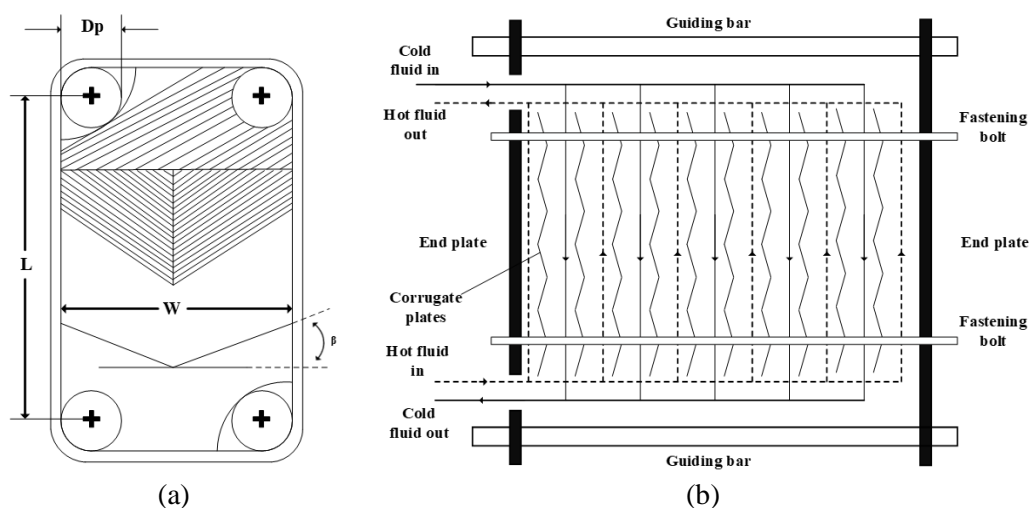
1. Pendahuluan

Dalam upaya mengakomodasi pertumbuhan kebutuhan energi yang terus meningkat dan standar kenyamanan yang semakin tinggi, peningkatan permintaan energi terus berlanjut, meskipun saat ini banyak yang beralih ke sumber energi terbarukan. Sebagian besar gas rumah kaca (GRK) masih dihasilkan melalui pembakaran bahan bakar fosil. Sekitar 1.262 giga ton emisi CO_2 dihasilkan selama tahun 2021 di Indonesia berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia. Berdasarkan jumlah tersebut, 35% berasal dari pembangkit listrik batubara [1]. Untuk memitigasi timbulnya GRK, Indonesia berusaha untuk meningkatkan efisiensi energi agar mencapai *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 [2]. Langkah yang dapat mendukung pencapaian target ini adalah meningkatkan efisiensi dalam proses pemulihan energi panas. Cara ini dapat diimplementasikan dengan memanfaatkan *Heat Exchanger* (HE) yang memiliki desain kompak, tingkat efisiensi tinggi, dan teknologi canggih, yang menerapkan metode terkini untuk meningkatkan intensitas perpindahan panas [3].

HE adalah alat untuk mentransfer energi panas antara dua atau lebih fluida dalam kontak termal pada temperatur yang berbeda. Pada HE, biasanya tidak ada interaksi antara panas dan kerja luar. Aplikasi yang umum digunakan adalah pemanasan atau pendinginan aliran fluida dan penguapan atau kondensasi aliran fluida tunggal atau multikomponen, sedangkan aplikasi lainnya untuk pemulihan atau penghilangan panas, sterilisasi, pasteurisasi, fraksionasi, penyulingan, pemekatan, pengkristalan, serta pengendalian cairan proses. Salah satu jenis HE yang memiliki efisiensi yang baik adalah *Plate and Frame Heat Exchanger* (PFHE) [4].

PFHE adalah salah satu peralatan perpindahan panas yang paling efisien [5] dengan menggunakan *metal plates* untuk menukar atau memindahkan panas antarfluida. PFHE memiliki luas permukaan yang lebih besar, biaya total yang lebih rendah, lebih tahan terhadap pengendapan, dan desain termal yang lebih fleksibel jika dibandingkan dengan *Shell and Tube Heat Exchangers* (STHE) [6]. PFHE juga dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi energi, meningkatkan kinerja termal-hidrolik, dan mengurangi konsumsi bahan bakar serta emisi CO_2 [7, 8]. PFHE memiliki banyak keunggulan, salah satu keunggulan yang paling terkenal adalah temperatur pendekatan minimum dalam penukar panas pelat yang bisa serendah 2°C akibat koefisien perpindahan panas yang tinggi [9, 10]. Keunggulan ini berdampak bahwa PFHE banyak digunakan dalam berbagai industri proses, seperti industri pendinginan, industri petrokimia, industri makanan dan minuman, serta pemrosesan gas alam [3].

PFHE terdiri dari serangkaian pelat bergelombang yang disusun dalam satu bingkai. Salah satu ujung bingkai terpasang secara tetap, sementara ujung lainnya dapat digerakkan untuk memungkinkan penambahan atau pelepasan pelat. Pelat dipasang pada rangka melalui palang pemandu atas dan bawah serta dijepit dengan baut pengikat. Ruang di antara pelat diisi dengan gasket polimer. Pada desain PFHE, *header* distribusi tidak diperlukan karena *port-port* penting sudah terintegrasi ke dalam desain pelat. Berbagai parameter geometri menggambarkan PFHE yang ditampilkan pada Gambar 1, termasuk jumlah pelat (N), jumlah lintasan (P), panjang pelat (L), lebar pelat (W), sudut *chevron* (β), jarak antarpelat (b), diameter lubang (D_p), tebal pelat (τ), dan faktor pembesaran (ϕ) [11].



Gambar 1. *Plate and frame heat exchangers*: (a) geometri pelat *chevron* dan (b) rakitan penukar panas secara keseluruhan

PFHE memiliki dua jenis aliran, yaitu aliran searah dan berlawanan arah. Pada saat fluida panas dan fluida dingin yang masuk ke PFHE berada pada arah yang sama, maka aliran tersebut merupakan aliran searah. Jenis

ini membutuhkan lebih banyak energi pemanasan atau pendinginan karena temperatur fluida dingin yang keluar tidak bisa lebih tinggi dari temperatur fluida panas yang keluar. Pada saat fluida panas dan fluida dingin yang masuk ke PFHE berada pada arah yang berlawanan, maka aliran tersebut merupakan aliran berlawanan arah. Pada aliran ini, temperatur fluida dingin yang keluar lebih besar dari temperatur fluida panas keluar, sehingga aliran berlawanan arah lebih efisien daripada aliran searah [12].

Untuk mengoperasikan PFHE, perlu diketahui efektivitas dari alat tersebut. Ada beberapa cara untuk mengetahui efektivitas PFHE, salah satunya dengan menggunakan metode *Number of Transfer Unit* (NTU). Analisis variasi temperatur fluida panas dengan laju alir konstan terhadap efektivitas NTU pada STHE menggunakan metode NTU telah dilakukan [13]. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur, maka efektivitas *shell and tube* juga meningkat, maksimum pada temperatur 323 °C, tetapi juga mengalami penurunan pada temperatur 353 °C. Nilai bilangan *Nusselt* juga mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur fluida panas masuk. Analisis variasi laju alir dan arah aliran terhadap kinerja STHE juga dilakukan [14]. Hasil analisis menunjukkan dengan meningkatnya laju alir, maka efektivitas STHE juga meningkat.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi laju alir fluida panas masuk dan variasi arah aliran terhadap efektivitas NTU alat PFHE. Variasi laju alir fluida panas masuk yang digunakan adalah 0,7 L/menit, 0,9 L/menit, 1,1 L/menit, 1,3 L/menit, 1,5 L/menit, 1,7 L/menit, dan 1,8 L/menit. Arah aliran yang digunakan adalah aliran searah dan berlawanan arah. Penelitian ini menggunakan air sebagai fluida dingin dan akuades sebagai fluida panas, yang memiliki sifat perpindahan panas yang baik dan tidak berbahaya. Pada penelitian ini, akan dihitung laju alir perpindahan panas (Q), perbedaan temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}), koefisien perpindahan panas menyeluruh (U), NTU, efektivitas (ϵ), efektivitas NTU (ϵ -NTU), bilangan *Prandtl* (Pr), dan bilangan *Nusselt* (Nu).

2. Metode

Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan laju alir keluaran air panas dengan nilai 0,7 L/menit, 0,9 L/menit, 1,1 L/menit, 1,3 L/menit, 1,5 L/menit, 1,7 L/menit, dan 1,8 L/menit, serta melakukan variasi arah aliran (searah dan berlawanan arah). Estimasi perekaman data yang dilakukan oleh komputer adalah setiap 2 detik dan setiap variasi dilakukan selama 180 detik. Laju air dingin masuk ditetapkan pada nilai $\pm 1,8$ L/menit - 1,9 L/menit dan temperatur pemanas ditetapkan pada 70 °C.

Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan adalah air keran untuk fluida dingin dan akuades untuk fluida panas. Pemilihan air keran untuk pendingin mempertimbangkan kemudahan transfer panas dan aman digunakan, sedangkan pemilihan akuades sebagai fluida panas mempertimbangkan *impurities* karena fluida panas tidak dilakukan penggantian secara berkala, sehingga tidak terjadinya korosi. Peralatan yang digunakan adalah *Heat Exchanger* tipe *Plate and Frame* dari Edibon. Alat ini terdiri dari tiga rangkaian, yaitu TIUS (*base service unit*) (Gambar 2.a), TICC (*Control Interface Box*) (Gambar 2.b), dan TIPL (*Plate Heat Exchanger for TICC*) (Gambar 2.c).



Gambar 2. Rangkaian peralatan PFHE pada Edibon SCADA yaitu, (a) TIUS (*base service unit*), (b) TICC (*Control Interface Box*), (c) TIPL (*Plate Heat Exchanger for TICC*), dan (d) *Data Acquisition Bord* (DAP)

TIUS berfungsi untuk memanaskan fluida panas yang terdiri dari tangki pemanas (terdiri dari koil pemanas (AR-1) untuk memanaskan fluida panas), kontrol temperatur (ST-16) untuk mengontrol atau menetapkan temperatur yang diinginkan, dan level tangki (AN-1) untuk menjaga ketinggian air dalam tangki. TIUS juga memiliki pompa panas (AB-1) untuk mengalirkan fluida panas pada tangki menuju *plate*, *bypass valve hot* (VR-1), *valve* (VR-2) untuk kontrol laju alir fluida dingin, *valve* (VR-3) untuk kontrol laju alir fluida panas, sensor aliran fluida panas (SC-1), dan sensor aliran fluida dingin (SC-2). Selain ketiga rangkaian alat tersebut, terdapat alat untuk merekam hasil penelitian dari Edibon *Supervisory, Control and Data Acquisition Systems* (SCADA) yang dinamakan dengan *Data Acquisition Bord* (DAP) (Gambar 2.d).

Teknik Analisis

Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menentukan hubungan laju perpindahan panas (Q), perbedaan temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}), koefisien perpindahan panas menyeluruh (U), NTU, efektivitas (ϵ), efektivitas NTU (ϵ -NTU), bilangan *Prandtl* (Pr), dan bilangan *Nusselt* (Nu) terhadap kenaikan laju alir fluida panas berdasarkan persamaan penelitian sebelumnya [14, 15].

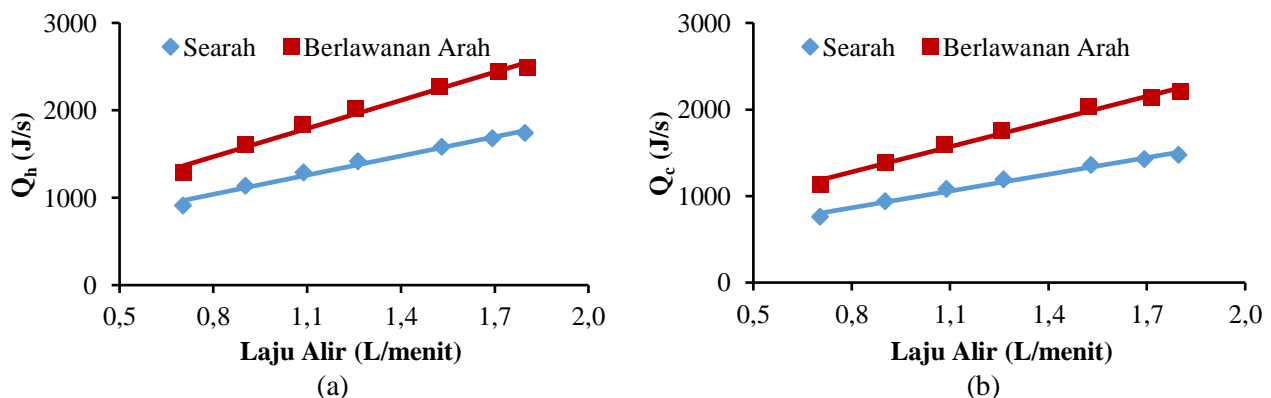
3. Hasil

Hasil yang diperoleh dari SCADA ditampilkan pada Tabel 1. Hasil tersebut berupa temperatur fluida panas masuk (ST-1), temperatur fluida panas keluar (ST-2), temperatur fluida dingin masuk dan keluar (ST-3), temperatur fluida dingin masuk dan keluar (ST-4), temperatur pemanas (ST-16), laju alir panas keluar (SC-1), laju alir dingin masuk (SC-2), temperatur rata-rata logaritma (ΔT_{LMTD}), laju perpindahan panas fluida panas (Q_h), laju perpindahan panas fluida dingin (Q_c), koefisien perpindahan panas menyeluruh (U), *Number of Transfer Unit* (NTU), efektivitas dengan metode perbedaan temperatur (ϵ), dan efektivitas dengan metode NTU (ϵ -NTU).

Tabel 1. Data hasil alat penukar panas PFHE

Arah Aliran	ST-1 (°C)	ST-2 (°C)	ST-3 (°C)	ST-4 (°C)	ST-16 (°C)	SC-1 (L/min)	SC-2 (L/min)	ΔT_{LMTD}	Q_h (J/s)	Q_c (J/s)	U (W/m ²)	NTU	eff	eff NTU
Searah	63,01	44,20	35,59	41,60	69,5	0,7	1,8	10,54	907,17	757,67	199,21	0,69	21,89	25,37
	63,94	45,61	35,59	42,89	69,5	0,9	1,9	10,94	1135,71	939,91	240,53	0,81	25,74	29,85
	63,90	46,70	35,63	43,90	69,5	1,1	1,9	10,95	1286,85	1076,73	270,50	0,90	29,25	33,45
	63,91	47,64	35,74	44,86	69,4	1,3	1,9	10,96	1412,44	1189,56	298,27	0,99	32,38	36,66
	64,03	49,00	35,79	46,11	69,3	1,5	1,9	11,12	1579,81	1356,02	328,84	1,09	36,55	40,62
	64,17	49,73	35,81	46,83	69,3	1,7	1,9	11,16	1678,81	1425,34	348,26	1,17	38,86	43,40
	64,25	50,19	35,84	47,28	69,3	1,8	1,9	11,19	1735,60	1473,94	359,09	1,21	40,27	44,87
Berlawanan Arah	62,96	36,56	43,91	34,73	69,4	0,7	1,8	7,34	1277,79	1127,15	402,91	1,44	32,52	37,00
	63,14	37,29	45,77	34,78	69,4	0,9	1,8	7,67	1604,18	1378,77	484,50	1,69	38,75	44,80
	62,79	38,25	47,38	34,84	69,2	1,1	1,8	7,95	1828,50	1594,97	532,60	1,83	44,87	50,81
	62,55	39,21	48,65	34,91	69,2	1,3	1,9	8,18	2013,79	1759,46	570,08	1,95	49,72	55,96
	62,42	40,75	50,55	35,05	69,0	1,5	1,9	8,41	2268,05	2029,01	624,52	2,08	56,64	61,84
	62,44	41,72	51,61	35,10	68,9	1,7	1,9	8,55	2439,61	2138,54	660,47	2,23	60,40	66,65
	62,37	42,27	52,20	35,11	68,6	1,8	1,9	8,58	2490,20	2203,98	672,06	2,27	62,68	68,39

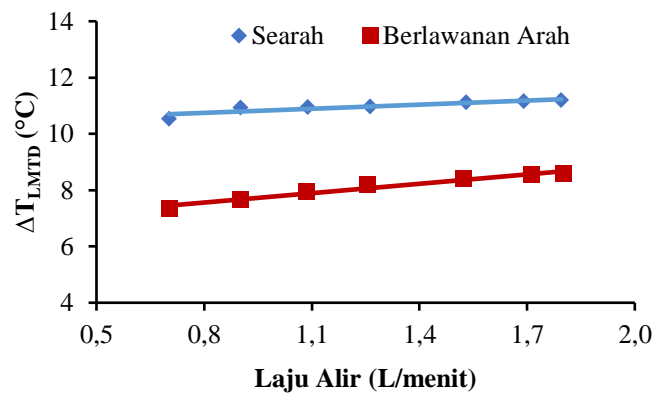
Laju Perpindahan Panas (Q)



Gambar 3. Hubungan perbedaan laju alir keluaran fluida panas (SC-1) terhadap laju perpindahan panas pada fluida panas, Q_h (a) dan laju perpindahan panas pada fluida dingin, Q_c (b) pada arah aliran searah (garis biru) dan arah aliran berlawanan arah (garis merah)

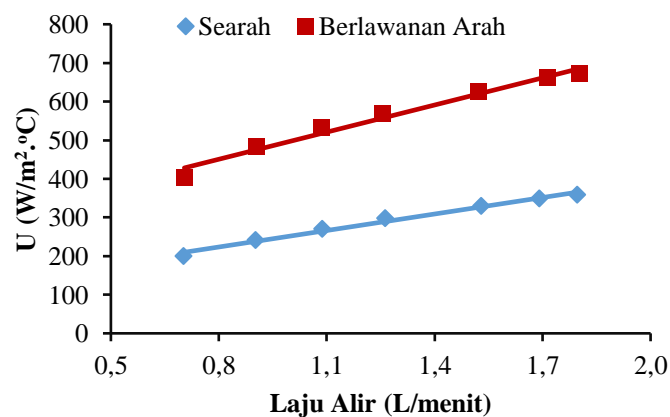
Gambar 3a dan 3b memperlihatkan hubungan antara SC-1 terhadap Q_h dan Q_c pada aliran searah dan berlawanan arah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika SC-1 meningkat, maka Q_h dan Q_c juga memiliki tendensi meningkat [15], sedangkan ketika SC-1 dinaikkan, maka laju alir massa (\dot{m}) fluida panas dan fluida dingin akan meningkat karena \dot{m} berbanding lurus terhadap Q , sehingga Q meningkat mengikuti laju alir massa fluida yang menunjukkan Q berbanding lurus terhadap SC-1 [16].

Arah aliran, baik aliran berlawanan maupun searah, memengaruhi Q . Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa Q lebih besar pada aliran berlawanan dari pada aliran searah. Hal ini terjadi karena pada aliran berlawanan, fluida panas dan fluida dingin bertemu dan bertukar panas dari kontak awal dalam *plate* hingga keluar *plate*, berbeda dengan aliran searah. Pertukaran panas signifikan hanya terjadi pada awal kontak saja. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [15]. Nilai Q yang terus mengalami peningkatan menyebabkan panas konveksi yang terjadi antara *plate* dan fluida lebih cepat karena resisten termal yang terjadi semakin kecil.

Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritma (ΔT_{LMTD})

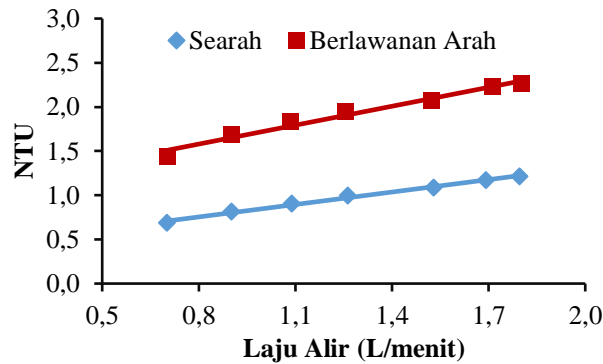
Gambar 4. Hubungan perbedaan laju alir keluaran fluida panas (SC-1) terhadap perbedaan temperatur rata-rata logaritma (LMTD) pada arah aliran searah (garis biru) dan arah aliran berlawanan arah (garis merah)

Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara SC-1 terhadap ΔT_{LMTD} pada aliran searah dan berlawanan arah. Nilai ΔT_{LMTD} aliran searah berkisaran antara 10 °C hingga 11 °C, sedangkan aliran berlawanan arah antara 7 °C hingga 8,8 °C. Nilai ΔT_{LMTD} aliran searah lebih besar dari aliran berlawanan. Meskipun ΔT_{LMTD} aliran searah lebih besar, hal ini tidak menjadi indikasi bahwa aliran searah lebih efektif. Tingginya ΔT_{LMTD} pada aliran searah disebabkan oleh nilai ΔT_1 dan ΔT_2 lebih besar dari aliran berlawanan arah. Ini didasarkan pada persamaan ΔT_{LMTD} aliran searah dan berlawanan arah [15]. Namun, efektifitas dari alat penukar panas tidak dipengaruhi oleh nilai ΔT_1 dan ΔT_2 , melainkan hanya dipengaruhi oleh laju kapasitas panas (C_c dan C_h) [15]. Nilai ΔT_{LMTD} meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya SC-1. Hal ini terjadi karena SC-1 yang tinggi menyebabkan selisih temperatur ΔT_1 dan ΔT_2 semakin besar, sehingga ΔT_{LMTD} memiliki tendensi meningkat [14]. Nilai ΔT_{LMTD} tertinggi diperoleh pada SC-1 1,8 L/menit.

Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh (U)

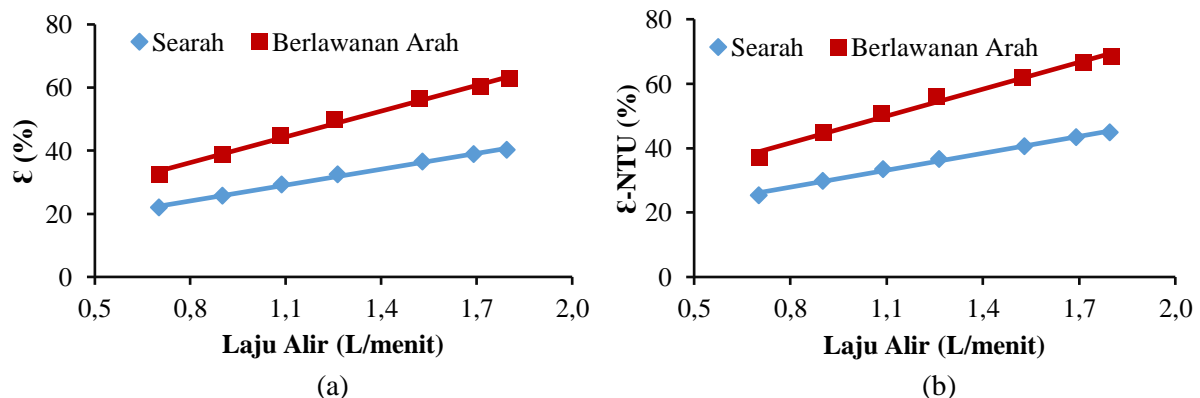
Gambar 5. Hubungan perbedaan laju alir keluaran fluida panas (SC-1) terhadap koefisien perpindahan panas keseluruhan pada arah aliran searah (garis biru) dan arah aliran berlawanan arah (garis merah)

Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara SC-1 terhadap U pada aliran searah dan berlawanan arah. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan SC-1 juga meningkatkan U. Jika didasarkan pada persamaan U [15], maka hasil ini sesuai dengan teori karena nilai U berbanding lurus terhadap Q dan nilai Q berbanding lurus terhadap SC-1 [17, 19]. Gambar 5 juga menunjukkan hubungan antara nilai U dengan arah aliran. Nilai U tertinggi diperoleh pada aliran berlawanan arah dengan nilai 402,9 W/m² hingga 672 W/m². Hasil ini sesuai dengan teori persamaan U [15], yang menyatakan bahwa nilai U berbanding terbalik dengan nilai ΔT_{LMTD} . Karena ΔT_{LMTD} aliran searah lebih besar dari aliran berlawanan, maka nilai U yang dihasilkan akan menjadi lebih kecil dibandingkan dengan aliran berlawanan arah. Nilai U terkecil terdapat pada SC-1 0,7 L/menit dengan arah aliran searah, dan terbesar pada SC-1 1,8 L/menit dengan aliran berlawanan arah.

Number of Heat Transfer Unit (NTU)

Gambar 6. Hubungan perbedaan laju alir keluaran fluida panas (SC-1) terhadap NTU pada arah aliran searah (garis biru) dan arah aliran berlawanan arah (garis merah)

Gambar 6 menunjukkan hubungan SC-1 terhadap NTU pada aliran searah dan arah aliran berlawanan arah. Nilai NTU akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan SC-1. Hasil ini sesuai dengan persamaan NTU [15]. Nilai NTU berbanding lurus terhadap nilai U dan nilai U yang dihasilkan terus mengalami tendensi peningkatan seiring dengan kenaikan SC-1. Nilai NTU terbesar pada aliran searah terjadi pada SC-1 1,8 L/menit dengan nilai NTU sebesar 1,21 dan nilai NTU terendah pada aliran searah terjadi pada SC-1 0,7 L/menit dengan nilai NTU sebesar 0,69. NTU terbesar terjadi pada aliran berlawanan arah pada SC-1 1,8 L/menit dengan nilai NTU 2,27; sedangkan NTU terkecil terjadi pada kecepatan aliran 0,7 L/menit dengan nilai NTU 1,44. Gambar 6 juga menunjukkan bahwa nilai NTU pada aliran berlawanan arah lebih besar dari pada nilai U pada aliran searah. Hal ini disebabkan oleh nilai U pada aliran searah lebih kecil daripada aliran berlawanan arah. Peningkatan nilai NTU pada aliran berlawanan arah seiring bertambahnya laju alir mengindikasikan bahwa perpindahan panas yang terjadi pada PFHE berlangsung dengan baik [17].

Efektivitas

Gambar 7. Hubungan perbedaan laju alir keluaran fluida panas (SC-1) terhadap efektivitas, ϵ (a) dan efektivitas NTU, ϵ -NTU (b) pada arah aliran searah (garis biru) dan arah aliran berlawanan arah (garis merah)

Gambar 7 menunjukkan hubungan SC-1 dengan ϵ dan ϵ -NTU. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan meningkatnya SC-1, maka ϵ dan ϵ -NTU juga mengalami tendensi peningkatan yang signifikan, baik pada aliran searah maupun aliran berlawanan arah. Pada Gambar 7a, nilai ϵ terendah untuk aliran searah yang dihasilkan adalah sebesar 21,89% dan tertinggi sebesar 40,27%, sedangkan pada aliran berlawanan arah, dihasilkan nilai ϵ terendah sebesar 32,52% dan tertinggi sebesar 62,68%. Pada Gambar 7b, nilai ϵ -NTU terendah untuk aliran searah yang dihasilkan adalah sebesar 25,37% dan tertinggi sebesar 44,287%, sedangkan pada aliran berlawanan arah, dihasilkan nilai ϵ -NTU terendah sebesar 37% dan tertinggi sebesar 68,39%.

Peningkatan ϵ disebabkan oleh terjadinya selisih temperatur yang lebih besar, yaitu selisih temperatur dingin keluar terhadap temperatur dingin masuk dan selisih temperatur panas masuk terhadap temperatur dingin masuk [15] seiring meningkatnya SC-1, begitu juga dengan nilai ϵ -NTU yang dipengaruhi oleh faktor temperatur. Penyebab nilai ϵ aliran berlawanan lebih besar dari aliran searah adalah aliran searah hanya terjadi penukaran temperatur pada awal kontak, sedangkan aliran berlawanan arah terjadi saat awal kontak hingga

keluar dari *plate* yang menyebabkan pelepasan panas oleh fluida panas lebih besar dan lebih banyak panas yang diserap oleh fluida dingin. Nilai ε -NTU aliran berlawanan lebih besar dari aliran searah dipengaruhi oleh nilai NTU, nilai NTU aliran berlawanan lebih besar dari aliran searah, maka nilai ε -NTU yang dihasilkan akan memiliki tendensi meningkat [17,18].

Bilangan Prandtl (Pr) dan Nusselt (Nu)

Bilangan *Prandtl* (Pr) dan *Nusselt* (Nu) merupakan dua bilangan yang termasuk ke dalam bilangan tak berdimensi. Bilangan Pr didefinisikan sebagai perbandingan antara viskositas kinematik dengan termal difusi, sedangkan bilangan Nu didefinisikan sebagai rasio antara perpindahan panas konveksi terhadap konduktivitas murni suatu fluida [18]. Semakin besar nilai bilangan Nu, maka perpindahan panas konveksi akan semakin cepat terjadi [13]. Tabel 2 menunjukkan nilai bilangan Pr dan Nu setiap variasi SC-1 dan variasi arah aliran. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai bilangan Pr setiap variasi SC-1 dan variasi arah aliran tidak mengalami perubahan, sehingga nilai yang diperoleh adalah sama, yaitu sebesar 5,02 untuk bilangan Pr pada fluida panas dan 5,18 untuk bilangan Pr pada fluida dingin. Berdasarkan persamaan Pr [14], nilai yang diperoleh sesuai dengan teori bahwa dengan melakukan variasi SC-1 dan arah aliran tidak memengaruhi besar kecilnya bilangan Pr karena bilangan Pr hanya dipengaruhi oleh kapasitas panas (C_p), konduktivitas termal (K), dan viskositas (μ) dari fluida yang digunakan. Ketiga indikator tersebut tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya SC-1 dari fluida atau arah aliran yang digunakan, melainkan dipengaruhi oleh perbedaan temperatur. Jika temperaturnya berubah, maka ketiga indikator tersebut juga akan berubah.

Nilai Nu yang diperoleh dalam penelitian ini mengalami peningkatan pada fluida panas (Nu_h) dan mengalami fluktuasi pada fluida dingin (Nu_c). Berdasarkan persamaan Nu untuk aliran laminar [14], nilai Nu_h yang diperoleh sesuai dengan teoritis. Bilangan Nu_h meningkat karena dipengaruhi oleh bilangan Reynold (Nr). Nr pada fluida panas mengalami peningkatan. Peningkatan Nr ini terjadi karena Nr berbanding lurus terhadap SC-1. Nr terkecil terdapat pada SC-1 0,7 L/menit dan terbesar pada SC-1 1,8 L/menit, sehingga bilangan Nu terkecil dan terbesar juga terjadi pada SC-1 0,7 L/menit dan 1,8 L/menit dengan nilai 5,53 untuk SC-1 0,7 L/menit dan 11,72 untuk SC-1 1,8 L/menit. Berbeda dengan nilai bilangan Nu_c , Nu_c naik pada SC-1 0,7 L/menit - 1,5 L/menit dan turun pada 1,5 L/menit - 1,8 L/menit. Naik turunnya bilangan Nu_c tidak bertentangan dengan teoritis [14]. Hal ini dipengaruhi oleh SC-2. Pada fluida panas, variasi SC-1 dilakukan, sedangkan pada fluida dingin tidak dilakukan variasi SC-2, melainkan diusahakan untuk konstan.

Penyebab naik turunnya nilai Nu fluida dingin adalah pompa fluida dingin yang tidak sepenuhnya konstan. SC-2 yang diperoleh pada aliran searah adalah 1,84 L/menit, 1,87 L/menit, 1,89 L/menit, 1,90 L/menit, 1,91 L/menit, 1,88 L/menit, dan 1,87 L/menit, sedangkan pada aliran berlawanan arah adalah 1,79 L/menit, 1,83 L/menit, 1,85 L/menit, 1,86 L/menit, 1,90 L/menit, 1,883 L/menit, dan 1,877 L/menit. Nilai SC-2 inilah yang menyebabkan nilai bilangan Nu terbesar terjadi pada SC-2 1,91 L/menit untuk aliran searah dan 1,90 L/menit untuk aliran berlawanan arah, dengan nilai 12,45 dan 12,41. Pada fluida dingin, dapat disimpulkan bahwa nilai bilangan Nu_c sama seperti Nu_h yang mengalami peningkatan pada laju alir yang paling besar. Nr pada penelitian ini < 2300 , sehingga pada penelitian ini, aliran fluida yang dialami adalah aliran laminar.

Tabel 2. Data perhitungan bilangan *Prandtl* (Pr) dan *Nusselt* (Nu)

SCADA	μ, h (Kg/ms)	μ, c (Kg/ms)	$C_{p,h}$ (J/KgK)	$C_{p,c}$ (J/KgK)	K_h (W/mK)	K_c (W/mK)	Pr_h	Pr_c	Nr_{hot}	Nr_{cold}	Nu_h	Nu_c
Searah	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	270,23	707,17	9,34	15,28
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	347,24	721,48	10,59	15,43
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	419,03	729,14	11,64	15,51
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	486,30	730,39	12,54	15,53
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	589,05	735,94	13,80	15,59
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	651,32	724,64	14,51	15,47
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	691,43	721,82	14,95	15,44
Berlawanan Arah	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	271,16	687,88	9,36	15,07
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	347,73	703,28	10,60	15,24
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	417,41	712,38	11,61	15,33
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	483,44	717,01	12,50	15,38
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	586,29	733,24	13,76	15,56
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	659,61	725,23	14,60	15,47
	0,0008	0,0008	4178	4178	0,64	0,62	5,02	5,18	694,24	722,76	14,98	15,45

4. Kesimpulan

Analisis pengaruh variasi SC-1 dan arah aliran fluida pada PFHE dengan menggunakan air sebagai fluida dingin dan akuades sebagai fluida panas selama 180 detik setiap variasi laju alir telah dilakukan. Hasilnya

dengan jelas menunjukkan bahwa jika semakin meningkat SC-1, maka nilai Q , ΔT_{LMTD} , U , NTU , ϵ , $\epsilon\text{-}NTU$, dan Nu juga akan mengalami peningkatan. Arah aliran fluida juga memengaruhi kinerja dari PFHE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah aliran yang paling efektif adalah aliran berlawanan arah karena menghasilkan nilai Q , U , NTU , ϵ , dan $\epsilon\text{-}NTU$ yang paling besar, serta menghasilkan nilai ΔT_{LMTD} yang paling kecil. Hal ini menunjukkan bahwa dengan variasi SC-1 yang memiliki ΔT_{LMTD} yang paling kecil pada perbedaan arah aliran, tidak mengindikasikan memiliki efektivitas yang paling kecil, tetapi sebaliknya dan arah aliran yang berlawanan tidak memengaruhi nilai Pr dan Nu yang diperoleh.

5. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] A. Priadi, “Cadangan batubara masih 38,84 miliar ton, teknologi bersih pengelolaannya terus didorong,” Kementerian ESDM RI, 2021.
- [2] H. EBTKE, “Sepanjang tahun 2022, emisi GRK turun 118 juta ton,” 2023.
- [3] J. E. Hesselgreaves, R. Law, and D. A. Reay, *Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [4] R. K. Shah and D. P. Sekulic, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, 1st ed. Canada: Simultaneously, 2003.
- [5] I. Gherasim, M. Taws, N. Galanis, and C. T. Nguyen, “Heat transfer and fluid flow in a plate heat exchanger part I. Experimental investigation,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 50, no. 8, pp. 1492–1498, 2011.
- [6] L. Wang, B. Sunden, and R. M. Manglik, *Plate Heat Exchangers: Design, Applications and Performance*, 1st ed. United Kingdom: WIT Press, 2007.
- [7] M. N. Pantzali, A. A. Mouza, and S. V. Paras, “Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE),” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 14, pp. 3290–3300, 2009.
- [8] B. P. Rao, P. K. Kumar, and S. K. Das, “Effect of flow distribution to the channels on the thermal performance of a plate heat exchanger,” *Chem. Eng. Process.*, vol. 41, no. 1, pp. 49–58, 2002.
- [9] S. D. Pandey and V. K. Nema, “An experimental investigation of exergy loss reduction in corrugated plate heat exchanger,” *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 2997–3001, 2011.
- [10] Z. J. Luan, G. M. Zhang, M. C. Tian, and M. X. Fan, “Flow resistance and heat transfer characteristics of a new-type plate heat exchanger,” *J. Hydrodyn.*, vol. 20, no. 4, pp. 524–529, 2008.
- [11] M. P. Nunez, J. C. Gonzalez, and J. L. G. Castillo, “Use of heat transfer enhancement techniques in the design of heat exchangers,” *IntechOpen*, pp. 1–18, 2019.
- [12] Y. A. Cengel, *Heat Transfer A Practical Approach*, 2nd ed. New York: Mcgraw-Hill, 2002.
- [13] C. S. Tupamahu, “Studi numerik pengaruh variasi bilangan reynolds dan bilangan prandtl terhadap karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas melintasi silinder sirkular tunggal,” *J. Ilmu Tek. Dan Sains*, vol. 13, no. 1, pp. 2145–2149, 2016.
- [14] F. Achmad, Y. A. S. M. Tampubolon, M. Fajri, D. F. Nury, R. A. Prahmana, Suhartono, and Suharto, “Efek laju alir dan arah aliran terhadap analisis performa alat penukar panas tipe shell and tube heat exchanger menggunakan SCADA,” *J. Rekayasa Proses*, vol. 17, no. 1, pp. 1–10, 2023.
- [15] R. Yuniarti, F. Achmad, Y. L. Listyadevi, L. Angraini, M. A. Tazkia, Suhartono, and Suharto, “Pengaruh temperatur dan arah aliran terhadap efektivitas penukar panas NTU ($\epsilon\text{-}NTU$) pada alat penukar panas tipe plate and frame,” *J. Integr. Proses*, vol. 11, no. 1, p. 32, 2022.
- [16] A. Husen, M. I. Akbar, and N. Cholis, “Analisis pengaruh kecepatan aliran fluida dingin terhadap efektivitas shell and tube heat exchanger,” *Bina Tek.*, vol. 16, no. 1, p. 1, 2020.
- [17] M. S. Atikayanti, S. F. Nur, B. Santoso, and A. Ekayuliana, “Analisis perbandingan heat exchanger tipe plate-frame dan shell and tube pada intercooler,” *Semin. Nas. Tek. Mesin Politek. NEGERI JAKARTA*, pp. 335–345, 2018.
- [18] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., vol. 112. America: John Wiley and Sons, 2023.