
Komparasi Desain Alat Penukar Panas Tipe Air-Cooled

Muhammad Ikhsan Kamil¹, Dessy Agustina Sari*²

¹Universitas Singaperbangsa Karawang

Email: dessy.agustina8@staff.unsika.ac.id

ABSTRACT

The discussion regarding detailed comparisons of air-cooled heat exchanger designs using mathematical equation calculations was carried out based on several literature sources related to heat exchanger design using simulation model calculations in the Aspen EDR V10 software. This ACHE-type heat exchanger is designed to carry out processes with hot fluid in the form of saturated water vapor at a pressure of 2 bar and cold fluid in the form of air at a pressure of 1,101 bar. The saturated water vapor used has a temperature of 251,2°F, and the air used has a temperature of 84,2°F. The variables used for comparison are the performance parameters of the heat exchanger, which include the log mean temperature difference, pressure drop (ΔP), fouling factor (R_D), heat transfer rate (Q), and overall heat transfer coefficient (U). The calculation results show that the mathematical model calculations and the simulation model in the software have differences, but that does not change the fact that the two calculation models produce tool performance parameter values that are in accordance with operating standards when viewed from the pressure drop value, fouling factor value, and heat transfer coefficient value. Overall, if you look at the type of fluid used in the process,

Keywords: air-cooled heat exchanger, fin, fouling factor, heat transfer, tube bundle.

INTISARI

Pembahasan tentang perbandingan detail desain alat penukar panas berpendingin udara dengan menggunakan perhitungan persamaan matematis, dilakukan berdasarkan beberapa sumber literatur terkait perancangan alat penukar panas dengan perhitungan model simulasi pada *software* Aspen EDR V10. *Heat exchanger* tipe *air-cooled* ini dirancang untuk melakukan proses dengan fluida panas berupa uap air jenuh pada tekanan 2 bar dan fluida dingin berupa udara pada tekanan 1,101 bar. Uap air jenuh yang digunakan bersuhu 251,2°F, dan udara yang digunakan bersuhu 84,2°F. Variabel yang digunakan sebagai pembanding adalah parameter unjuk kerja *heat exchanger* yang meliputi *log mean perbedaan temperatur*, *pressure drop* (ΔP), *fouling factor* (R_D), laju perpindahan panas (Q), dan koefisien perpindahan panas keseluruhan (U). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penggunaan persamaan matematis dan simulasi pada perangkat lunak terdapat perbedaan. Akan tetapi, capaian tersebut tidak mengubah kenyataan bahwa kedua cara perhitungan kinerja ACHE tersebut menghasilkan nilai parameter kinerja alat yang sesuai dengan standar pengoperasian jika dilihat dari nilai *pressure drop*, faktor pengotor, dan nilai koefisien perpindahan panas atas fluida yang dilibatkan (uap air dan udara).

Kata kunci: faktor pengotor, *fin*, penukar panas *air-cooled*, perpindahan panas, *tube bundle*.

PENDAHULUAN

Perpindahan panas adalah peristiwa yang terjadi ketika energi panas bergerak dari suatu bahan ke bahan lain yang berbeda suhu. Peristiwa ini berperan penting dalam berbagai aplikasi industri dan kehidupan sehari-hari, seperti dalam proses produksi, pemanasan rumah, dan pendinginan mesin. Salah satu alat yang digunakan untuk mengatur perpindahan panas adalah alat penukar panas atau *heat exchanger*. Alat ini dirancang khusus untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas antara dua fluida yang berbeda, seperti antara udara dan air, gas dan cairan, atau bahkan cairan yang berbeda.

Alat penukar panas digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari pendinginan mesin kendaraan hingga pemrosesan produk industri dan pengolahan minyak dan gas. Unit peralatan ini bekerja dengan prinsip dasar memindahkan panas dari satu fluida ke fluida lainnya tanpa mencampur keduanya. Di dunia industri terdapat beberapa alat penukar panas yang umum digunakan seperti *shell and tube heat exchanger*, *air-cooled heat exchanger*, *double pipe heat exchanger* dan lainnya. Dilihat dari keunggulannya dari sisi ketahanan terhadap korosi, Kendala-kendala lingkungan seperti minimnya persediaan air dan polusi termal umumnya lebih mendukung penggunaan penukar panas tipe *Air-Cooled Heat Exchanger* (ACHE). Walaupun biaya modal pembuatan ACHE biasanya tinggi, biaya operasionalnya biasanya jauh lebih rendah dibandingkan dengan penukar panas tipe pendingin

air. ACHE terdiri dari satu atau lebih kelompok tube ber-*fin* (yang juga disebut sebagai *tube bundle*) dengan udara ditiupkan oleh satu atau lebih kipas. Kipas bisa lebih dari satu buah untuk menghembuskan udara untuk bertukar panas dengan pipa atau *tubes* pada *bundle* yang di dalamnya mengalir fluida bersuhu lebih tinggi.

Desain ACHE harus memperhitungkan berbagai faktor seperti kapasitas perpindahan panas, karakteristik penurunan tekanan, dimensi fisik, pengaturan, daya pompa yang dibutuhkan oleh fluida proses, laju aliran udara, dan pola aliran yang berbeda seperti aliran berlawanan, searah, dan silang. Proses desain ACHE ini mirip dengan desain penukar panas tipe shell and tube dan dimulai dengan mencari desain awal menggunakan koefisien perpindahan panas keseluruhan yang diperkirakan. Selanjutnya, desain awal tersebut mengalami modifikasi berulang-ulang dengan metode uji coba hingga mendapatkan desain yang memenuhi kriteria toleransi tertentu, sehingga merupakan metode efektif dalam mengevaluasi unit yang ada dan menciptakan desain baru melalui simulasi.

Sejumlah artikel yang membahas mengenai simulasi dan optimalisasi *air-cooled heat exchanger* telah diterbitkan (Doodman et al., 2009; Evenko, 2002; Lez et al., 2001; Manassaldi et al., 2014; Park et al., 2022; Pieve & Salvadori, 2011; Salimpour & Bahrami, 2011). Kajian dari (Manassaldi et al., 2014) menjabarkan suatu model matematika inovatif yang mengadopsi pendekatan disjungtif dalam upaya merancang ACHE secara efisien. Model ini mencakup tujuh keputusan diskrit yang terkait dengan berbagai aspek seperti jenis *tube ber-fin*, jumlah *tube rows*, jumlah *tube per rows*, jumlah *passes*, *fin* per unit panjang, ketebalan *fin* rata-rata, dan tipe aliran. Selain itu, model ini juga mempertimbangkan aspek-aspek kontinyu seperti diameter kipas, lebar *bundle*, panjang *tube*, *pressure drop*, kecepatan di kedua sisi, luas perpindahan panas, serta konsumsi daya kipas.

Desain alat penukar panas tidak hanya dilakukan secara matematis, tetapi dapat dilakukan menggunakan simulasi pada perangkat komputer. Salah satu *software* yang biasa digunakan dalam simulasi yang mencakup proses desain ialah *software Aspen Exchanger Design and Rating* disingkat Aspen EDR. Aspen tipe ini adalah rangkaian program yang sangat lengkap dalam industri untuk merancang penukar panas, yang menyederhanakan proses rekayasa melalui satu kerangka kerja terintegrasi (AspenTech, 2023). Sejumlah artikel yang membahas mengenai penggunaan Aspen EDR untuk melakukan simulasi desain untuk alat penukar panas telah diterbitkan (Bi & Ju, 2021; Janaun et al., 2016). Peneliti (Bi & Ju, 2021) menjelaskan studi perbandingan evaluasi dan validasi pada parameter alat penukar panas seperti Joshi & Webb, Manglik & Bergles, dan Maiti & Sarangi pada alat penukar panas tipe plat *fin*.

Artikel ini menyajikan perbandingan desain model alat penukar panas tipe ACHE dengan menggunakan model matematis dan program simulasi pada perangkat Aspen EDR, serta meninjau performa rancangan alat penukar panas tersebut berdasarkan beberapa parameter. Parameter tersebut mencakup *pressure drop* (ΔP), *fouling factor* (R_D), laju perpindahan panas (Q), dan koefisien perpindahan panas *overall* (U). Keempat tinjauan tersebut merupakan sama halnya dengan perancangan tipe alat penukar panas lainnya (Bizzy & Setiadi, 2013; Kharisma, 2020).

METODE

Pengambilan data

Data yang digunakan merupakan data dari salah satu pabrik pengolahan kelapa sawit di Indonesia. Data tersebut berupa:

- Properti fisika rata-rata untuk uap air dan udara
- Laju alir massa, suhu masuk, dan keluar dari kedua aliran fluida, *fouling factor*, dan *pressure drop* maksimum yang diizinkan.
- Tube* dengan diameter 1 in, *tube pitch* 2,25 in, dan *tube layout*-nya *triangular pitch*
- Memiliki satu buah kipas dengan satu buah *tube bundle*.

Pengolahan data

Berdasarkan data di lapangan, sebuah persamaan matematis didapatkan dengan menggunakan korelasi persamaan matematika yang diadopsi dari buku tentang peralatan perpindahan panas (Coker, 2015; Foust et al., 1962; Kern, 1950; Serth & Lestina, 2014). Laju dan luas perpindahan panas (Q ; A) dihitung menggunakan persamaan (1) berikut.

$$Q = \Delta T_{lm} \times U_D \times F_t \times A_{tot} \quad (1)$$

Nilai U_D mengacu pada koefisien perpindahan panas keseluruhan yang merupakan nilai asumsi awal berdasarkan jenis fluida pada sisi *tube*. Sedangkan ΔT_{lm} adalah T_{LMTD} (perbedaan suhu rata-rata logaritma) yang dikoreksi oleh faktor koreksi (F_t) yang mana bergantung pada jumlah lintasan (N_p) dan jumlah *rows* (N_r). Kedua nilai dari (N_p) dan (N_r) diperoleh atas perhitungan rasio antara luas

perpindahan total (A_{tot}) dengan luas perpindahan panas *face* (A_{face}) yang didasari persamaan (2) dan mengarahkan ke penggunaan persamaan (3) berikut ini.

$$A_{face} = \frac{m_{udara}}{\rho_{udara\ std} \times V_{face}} \quad (2)$$

$$A_{face} = WL = 3W^2$$

Keterangan: m_{udara} ; $\rho_{udara\ std}$; V_{face} adalah laju alir massa udara, densitas udara pada suhu standar, dan kecepatan rata-rata udara yang digunakan dengan kisaran umumnya sebesar 300-800 ft/menit, secara berturut-turut. Kemudian, W ; L merupakan lebar dari *tube bundle*, dan panjang *tube*.

$$N_t = \frac{A_{tot}}{(A_{tot}/L) \times L} \quad (3)$$

Rasio luas perpindahan panas total terhadap panjang *tube* didapatkan dengan didasari nilai diameter *tube* dan tinggi fin yang disajikan oleh (Serth & Lestina, 2014) melalui pada *characteristics of typical high-fin tube array*.

Koefisien perpindahan panas clean secara keseluruhan, U_c diestimasi dengan menggunakan persamaan (4) hingga (6) sebagai berikut.

$$U_c = \left[\frac{(A_{tot}/A_i)}{h_i} + \frac{(A_{tot}/L) \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k_{tube}} + \frac{1}{\eta_w \times h_o} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$h_i = \left(\frac{k_i}{D_i}\right) \times 0.023Re^{0.8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (5)$$

$$h_o = \left(\frac{k_o}{D_o}\right) 0.38Re^{0.6} \times Pr^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{A_{tot}}{A_o}\right)^{-0.15} \quad (6)$$

Diketahui h_i ; h_o merupakan koefisien perpindahan panas pada sisi dalam dan sisi luar alat penukar panas. Kemudian, nilai (A_{tot}/A_i) dan (A_{tot}/L) berasal dari rujukan data *characteristics of typical high-fin tube array*. Supaya desain dapat berjalan atau dapat digunakan, keberadaan batasan dan faktor pengotor perlu diperhatikan melalui penggunaan persamaan (7) dan (8) yaitu:

$$R_D = R_{Di} \left(\frac{A_{tot}}{A_i}\right) + \frac{R_{Do}}{\eta_w} \quad (7)$$

$$U_c > U_D \quad (8)$$

Pressure drop pada sisi *tube* (ΔP_{tube}) dan pada sisi udara (ΔP_{udara}) udara dikalkulasi dengan menggunakan persamaan matematis dengan melibatkan persamaan (9) dan (10) berikut.

$$\Delta P_{tube} = \frac{f_{tube} \times N_p \times L \times G_{tube}^2}{7.50 \times 10^{12} \times D_i \times s \times \Phi} + 1.334 \times 10^{-13} D + E \quad (9)$$

$$D = (2N_p - 1.5) \times \left(\frac{G_{tube}^2}{s}\right); E = 2 \times 10^{-13} \left(\frac{G_n^2}{s}\right)$$

$$\Delta P_{udara} = 1.1 \left(\frac{9.22 \times 10^{-10} f_{udara} \times N_r \times G_{udara}^2}{\rho_{udara}}\right) \quad (10)$$

Dengan nilai f ; G ; s adalah faktor friksi, *mass flux*, dan *specific gravity* dari masing-masing fluida.

Fan and motor sizing, konsumsi daya *fan* (W_{motor}) diestimasi dengan menggunakan persamaan (11) berikut.

$$W_{motor} = \frac{\Delta P_{fan} \times v_{fan}}{\eta_{fan} \times \eta_{sr} \times \eta_{motor}} \quad (11)$$

Keterangan: nilai ΔP_{fan} ; v_{fan} mengacu pada penurunan tekanan total pada *fan* dan laju aliran volumetrik udara melalui *fan*. Kemudian, η_{fan} ; η_{sr} ; η_{motor} merupakan efisiensi pada *fan*, peredam kecepatan, dan motor. Selanjutnya, penurunan tekanan total pada kipas (ΔP_{fan}) menerapkan persamaan (12) yaitu:

$$\Delta P_{fan} = \Delta P_{udara} + \left(\frac{1 + 0.13}{2} \right) H \quad (12)$$

$$H = \rho_{udara} \left(\frac{W_{udara}}{N_{fan} \times \rho_{udara}} \right)^2 \left(\frac{1}{\pi \times D_{fan}^2} \right)^2$$

Dengan N_{fan} ; D_{fan} ; W_{udara} merupakan jumlah fan, diameter fan, dan laju aliran massa udara, secara berturut-turut. Berdasarkan ketentuan pada persamaan (13) dan (14) diketahui bahwa luas yang dibutuhkan oleh fan minimal 40% dari luas *face bundle* dan diameter fan harus 6 in lebih kecil dari lebar *bundle*.

$$N_{fan} \times \frac{\pi}{4} D_{fan}^2 \geq 0,4 WL \quad (13)$$

$$D_{fan} \leq W - 6 \text{ in} \quad (14)$$

Simulasi *air-cooled heat exchanger*

Model simulasi dilakukan pada perangkat computer dengan melakukan input data berdasarkan data yang didapatkan di lapangan industri kelapa sawit, dan selebihnya melalui pelibatan persamaan matematis. *Software* yang digunakan pada artikel ini adalah *Aspen Exchanger Design and Rating* versi 10 (*Aspen EDR V10*) dengan urutan langkah berupa geometri ACHE, pemrosesan data, dan penginputan properti fisika (Harydary, 2019).

Langkah pertama – geometri ACHE diawali oleh pendataan geometri untuk diameter *outside* dan *inside tube*, *tube pitch*, tinggi *fin*, tipe *tubing*, *tube layout*, panjang *tube*, jumlah aliran, jumlah baik *tube*, *bundle*, dan *fan*. Selanjutnya, selain data geometri awal yang dimasukkan, data proses mencakup laju alir massa udara dan uap air juga diinputkan. Data lainnya disusulkan yaitu suhu dan tekanan (inlet maupun outlet) dari kedua fluida, serta faktor pengotor dan *pressure drop* maksimum.

Langkah ketiga berupa simulasi ACHE. Data properti fisika yang dimasukkan hanya ditujukan untuk fluida pada sisi *tube* karena untuk udara telah diestimasi melalui penggunaan *software* keteknikkimiaan. Sehingga, penginputan pada sisi udara berupa suhu masuk dan keluar. Sedangkan, untuk sisi *tube* pada data properti fisika bagi fluida yang digunakan berupa densitas, viskositas, panas spesifik, konduktivitas termal. Data lapangan untuk kebutuhan properti fisika disajikan Tabel 1 untuk membantu proses pengolahan melalui simulasi *Aspen EDR V10* maupun penerapan persamaan matematis (1) hingga (14).

Tabel 1. Data lapangan untuk desain geometri *air-cooled heater exchanger*

Data properti				Geometri <i>tube bundle</i>		
Udara				Panjang <i>tube</i> , L	ft	9,75
Suhu masuk	°F	84,2		Lebar <i>tube</i> , W	ft	2,8
Suhu keluar	°F	203,0		Ukuran <i>pitch</i> , P_T	in	2,25
Laju alir	lbm/jam	81.640		Jumlah aliran, N_p		3
Uap air				Jumlah <i>rows</i> , N_r		6
Suhu masuk	°F	251,2		Jumlah <i>tube</i> , N_t		83
Suhu keluar	°F	249,4		<i>Fin</i> /panjang, N_f	<i>fin</i> /in	9
Laju alir	lbm/jam	2.457		Tinggi <i>fin</i> , b	in	0,5
ID <i>tube</i>	in	1		Ketebalan <i>fin</i> , τ	in	0,013
OD <i>tube</i>	In	0,81		Jumlah kipas		1
				Diameter kipas, D_{fan}	ft	3
				Daya kipas, W_{motor}	HP	5
				Panjang <i>tube</i> , L	ft	9,75

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keterlibatan suhu masuk dan keluar udara akan mengarah ke kuantitas laju perpindahan panas dan persamaan matematis lainnya (Yaws, 1999) hingga didapatkan tinjauan kinerja alat penukar panas tipe *air-cooled*. Berdasarkan spesifikasi geometri alat penukar panas pada Tabel 1 didapatkan hasil yang disajikan oleh Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perbandingan hasil desain ACHE

Parameter	PM	Simulasi
T_{LMTD} , °F	92,4	92,7
Q, Btu/jam	2.347.177	2.415.202
A, ft ²	3.821	3.918
U_C , Btu/jam.ft ² .°F	8,36	9,29
U_D , Btu/jam.ft ² .°F	8,33	9,20
ΔP_{tube} , psi	0,36	0,38
ΔP_{udara} , psi	0,029	0,029
R_D , jam.ft ² .°F/Btu	0,00045	0,0006

Keterangan: PM adalah persamaan matematis

Fluida panas yang digunakan adalah uap air dalam kondisi jenuh dengan kondisi tekanan sebesar 2 bar. Dari penggunaan persamaan matematis didapatkan nilai koefisien perpindahan panas desain keseluruhan (U_D) yang didasari oleh (Serth & Lestina, 2014). Capaian ini mengindikasikan bahwa fluida panas yang digunakan berupa *pure steam* yang bertekanan di bawah 2,4 bar dan mampu menghasilkan nilai U_D dengan kisaran 6,3–9,4. Capaian ini mengarahkan aktivitas *trial and error* bagi U_D untuk mendapatkan rentang tersebut.

Nilai estimasi atas T_{LMTD} pada Tabel 2 tersebut mampu mengarahkan pengambilan nilai U_D yang berdasarkan literatur sebesar 8,33. Nilai U_C yang diperoleh adalah lebih besar dari nilai U_D maka desain geometri dan perhitungan sebelumnya dapat diterima serta dapat diterapkan bagi perhitungan selanjutnya. Kemudian, capaian atas *pressure drop* baik di sisi *tube* maupun udara memberikan dampak lanjutan bagi nilai faktor pengotor (*fouling factor*) yang tertera pada Tabel 2 tersebut. Hasilnya apabila disesuaikan dengan ketentuan tergolong masih dalam kisaran atau batas standar, yaitu proses perpindahan panas yang melibatkan kedua fluida dengan batas *pressure drop* dan *fouling factor* masing-masing adalah 5 psi dan 0,0005 jam.ft².°F (Coker, 2015). Kedua fluida yang berlangsung di dalam ACHE memiliki fasa gas dan mampu berperan sebagai memicu *pressure drop*. Akibatnya, *fouling* atau kerak di dalam unit peralatan penukar panas menjadi lebih sedikit. Kemudian, umumnya kecepatan dari fluida gas umumnya akan terbilang tinggi dan memberikan dampak faktor pengotor menjadi lebih kecil

Sama halnya dengan desain alat penukar panas yang menggunakan pemrosesan simulasi melalui *software* Aspen EDR V10 telah dilakukan. Hasil yang didapatkan adalah nilai laju perpindahan panas (Q) dari penggunaan *software* tersebut terhadap penerapan persamaan matematis dengan deviasi sebesar 2,89% dan tergolong dapat diabaikan. Capaian ini juga dialami untuk hasil luas perpindahan panas dan seterusnya seperti yang tertera di Tabel 2. Nilai penyimpangan pada U_C dan U_D mampu mencapai 10,44-11,124%. Perbedaan hasil antara penerapan persamaan matematis dan simulasi keteknikkimiaan ini diduga penyesuaian data yang berada dari properti fisika dari ragam studi literature terhadap *source software*.

Kondisi operasi pada alat *air-cooled heat exchanger* tersebut dapat ditelusuri melalui nilai *pressure drop* yang terjadi unit kerja terkadang menghasilkan tekanan pada aliran outlet fluida yang tidak stabil (data rata-rata yang menjadi rujukan) dan tentu berdampak bagi data properti fisika terutama bagi *steam*. Perbedaan hasil antara penerapan persamaan matematis dan simulasi Aspen EDR juga diungkapkan di beberapa kajian (Amir & Syuhada, 2013; Bizzy & Setiadi, 2013; Galih Putra Baskara, 2023; Kiswoyo & Ramadhan, 2017; Lestari & Sari, 2018; Taufiq, 2015; Widiawaty et al., 2017). Lalu, pada tipe penukar panas lainnya yaitu *shell and tube* juga ditemukan demikian melalui penggunaan *software* HTRI – *Heat Transfer Research Inc* (Bizzy & Setiadi, 2013; Fitria et al., 2022). Bahkan perbedaan pemrosesan data lapangan diawali dari perolehan laju perpindahan panas dengan disinyalir perbedaan data properti fisika pada literatur buku terhadap data properti yang dimiliki *software* keteknikkimiaan. Namun, aspek keakuratan dapat ditelusuri melalui penyajian hasil simulasi pada perangkat komputer sebagai pihak praktisi industri (Sutardi et al., 2020; Ulfa et al., 2020) bagi pabrik pengolahan pabrik kelapa sawit maupun pabrik kimia lainnya (Sari et al., 2016) yang mensinergikan antara persamaan matematis terhadap *software* keteknikkimiaan.

KESIMPULAN

Tinjauan kinerja alat penukar panas untuk tipe *air-cooled* telah dilakukan dengan melibatkan persamaan matematis dan penerapan simulasi proses melalui penggunaan *Aspen Exchanger Design and Rating* versi 10. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua tinjauan menghasilkan parameter kinerja penukar panas yang mencakup laju perpindahan panas (Q), *log mean temperature difference*,

koefisien perpindahan panas keseluruhan (U), *pressure drop* (ΔP), dan *fouling factor* (R_D). Kedua penerapan memberikan hasil yang berada di ambang batas baik parameter koefisien perpindahan panas keseluruhan maupun *pressure drop* yaitu di bawah 5 psi dan kisaran 6,3-9,4 Btu/jam.ft².°F. Sedangkan, nilai faktor pengotor yang maksimal berada di angka 0,00050 jam.ft².°F/Btu menjadikan penggunaan persamaan matematis dan simulasi proses melalui *software* dapat tertengahi oleh pihak ketiga dari industri kelapa sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- Amir, F., & Syuhada, A. (2013). Pemodelan dan simulasi perpindahan panas padak olektor surya pelat datar. *Jurnal Ilmu Hukum Pascasarjana Universitas Syiah Kuala*, 1(4), 32–38.
- AspenTech, A. (2023). *Aspen Exchanger Design and Rating*. <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-exchanger-design-and-rating>
- Bi, Y., & Ju, Y. (2021). Design and analysis of CO₂ cryogenic separation process for the new LNG purification cold box. *International Journal of Refrigeration*, 130, 67–75.
- Bizzy, I., & Setiadi, R. (2013). Studi perhitungan alat penukar kalor tipe shell and tube dengan program heat transfer research inc (HTRI). *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(1), 67–77.
- Coker, A. K. (2015). *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants* (4th ed.). Elsevier Inc.
- Doodman, A. R., Fesanghary, M., & Hosseini, R. (2009). A robust stochastic approach for design optimization of air-cooled heat exchangers. *Applied Energy*, 86, 1240–1245.
- Evenko, V. I. (2002). Optimizing air-cooled heat exchanger tube bundle parameters. *Chemical and Petroleum Engineering*, 38(1–2), 41–47.
- Fitria, I. A., Sari, D. A., Fahriani, V. P., & Djaeni, M. (2022). Shell and tube heat exchanger fouling factor via Heat Transfer Research Inc (HTRI) software. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 7(2), 104–113.
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., & Andersen, L. B. (1962). *Principles of unit operations*. John Wiley & Sons Inc.
- Galih Putra Baskara. (2023). Perancangan alat penukar panas (APK) tipe U dengan memanfaatkan panas gas buang menggunakan simulasi CFD. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(2), 197–206.
- Harydary, J. (2019). *Chemical process design and Aspen Plus and Aspen Hysys application*. John Wiley & Sons Inc.
- Janaun, J., Kamin, N. H., Wong, K. H., Tham, H. J., Kong, V. V., & Farajpourlar, M. (2016). Design and simulation of heat exchangers using Aspen HYSYS, and Aspen exchanger design and rating for paddy drying application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 36, 1–8.
- Kern, D. Q. (1950). *Process heat transfer*.
- Kharisma, A. A. (2020). Perancangan heat exchanger tipe shell dan tube secara metode matematis dan simulasi software. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 20(2), 27–34.
- Kiswoyo, E., & Ramadhan, A. I. (2017). Perancangan dan validasi desain alat penukar kalor tipe shell and tube menggunakan computational fluid dynamics. *Dinamika Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 8(2), 39–46.
- Lestari, R. S. D., & Sari, D. K. (2018). Pemodelan matematis dan simulasi perpindahan panas pada fin heat exchanger. *Jurnal Teknika*, 14(1), 29–38.
- Lez, M. T. G., Petracci, N. C., & Urbicain, M. J. (2001). Air-cooled heat exchanger design using successive quadratic programming (SQP). *Heat Transfer Engineering*, 22, 11–16.
- Manassaldi, J. I., Scenna, N. J., & Mussati, S. F. (2014). Optimization mathematical model for the detailed design of air-cooled heat exchangers. *Energy*, 64, 734–746.
- Park, H., Roh, J., Oh, K. C., Cho, H., & Kim, J. (2022). Modeling and optimization of water mist system for effective air-cooled heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 184, 1–14.
- Pieve, M., & Salvadori, G. (2011). Performance of an air-cooled steam condenser for a waste-to-energy plant over its whole operating range. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1908–1913.
- Salimpour, M. R., & Bahrami, Z. (2011). Thermodynamic analysis and optimization of air-cooled heat exchangers. *Heat and Mass Transfer*, 47(1), 35–44.
- Sari, D. A., Soepryanto, A., & Burhanuddin, S. (2016). Re-design electric submersible pump pada PT Chevron Pacific Indonesia – Minas Pekanbaru. *Barometer*, 1(1), 25–33.

- Serth, R. W., & Lestina, T. G. (2014). *Process heat transfer: Principles, applications and rules of thumb* (2nd ed). Elsevier.
- Sutardi, M. P., Fardiansyah, M. I., Fauzia, F., & Sari, D. A. (2020). Program simulasi Aspen Hysis bagi mahasiswa teknik kimia di semester awal. *Prosiding Seminar Nasional Universitas Islam Syekh Yusuf*, 1, 1370–1373.
- Taufiq, T. (2015). Kajian eksperimental unjuk kerja heat exchanger double pipe. *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, 3(2), 17–21.
- Ulfa, V. S., Kharisma, H. D., & Sari, D. A. (2020). Optimasi akademisi dan mata kuliah teknik kimia melalui peran praktisi industri. *Prosiding Seminar Nasional Universitas Islam Syekh Yusuf*, 1, 1379–1383.
- Widiawaty, C. D., Gunadi, G. G. R., & Syuriadi, A. (2017). Pemodelan dan analisis kinerja shell and tube heat exchanger dengan metode CFD. *Jurnal Poli-Teknologi*, 16(3), 239–244.
- Yaws, C. L. (1999). *Chemical properties handbook: Physical, thermodynamics, environmental, transport, safety, and health related properties for organic and inorganic chemicals*. McGraw-Hill Companies.