

PERANCANGAN COOLER UNTUK PENURUNAN SUHU PRODUK *HIGH FRUCTOSE SYRUP* BIJI NANGKA

Anggini Islamiach Anugerah Putri dan Ari Susanti

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
angginianugerah@gmail.com; [ari.susanti@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Pemanfaatan biji nangka sebagai bahan baku *High Fructose Syrup* (HFS) merupakan salah satu strategi dalam pengolahan limbah organik menjadi produk bernilai tambah. Dalam proses produksinya, tahap pendinginan HFS setelah evaporasi menjadi penting untuk menjaga kestabilan produk dan mencegah degradasi termal. Perancangan ini bertujuan untuk merancang sistem pendingin menggunakan *Shell and Tube Heat exchanger* (STHE) dengan material *Carbon Steel SA 283 Grade C*. Metodologi yang digunakan mencakup pengumpulan data suhu, laju alir, dan sifat fisik fluida, serta perhitungan area perpindahan panas, koefisien perpindahan panas, dan *pressure drop*. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh luas area perpindahan panas sebesar 316,17 ft² dan beban panas sebesar 287.244,803 Btu/jam, dengan koefisien perpindahan panas keseluruhan sebesar 14,731 Btu/jam.ft².°F. Nilai luas perpindahan panas yang melebihi 200 ft² menjadi dasar pemilihan STHE sebagai tipe *heat exchanger* yang dipilih. Material *Carbon Steel SA 283 Grade C* dipilih karena sifat mekaniknya yang baik, kemudahan fabrikasi, serta ketersediaannya yang luas dan ekonomis. Hasil ini menunjukkan bahwa rancangan STHE yang dibuat mampu memenuhi kebutuhan pendinginan HFS secara efisien dan sesuai dengan kebutuhan industri.

Kata kunci: *Carbon Steel, High Fructose Syrup, pendinginan, perancangan, Shell and Tube Heat exchanger*

ABSTRACT

The utilization of jackfruit seeds as raw material for High Fructose Syrup (HFS) production is a strategy to convert organic waste into high-value products. In the production process, the cooling stage after evaporation is crucial to maintain product stability and prevent thermal degradation. This study aims to design a cooling system using a Shell and Tube Heat exchanger (STHE) made from Carbon Steel SA 283 Grade C. The methodology includes data collection on temperature, flow rate, and fluid properties, as well as calculations of heat transfer area, heat transfer coefficient, and pressure drop. Based on the results, the required heat transfer area was 316.17 ft² with a heat load of 287,244.803 Btu/hr and an overall heat transfer coefficient of 14.731 Btu/hr.ft².°F. Since the area exceeds 200 ft², the STHE type was selected accordingly. Carbon Steel SA 283 Grade C was chosen due to its favorable mechanical properties, ease of fabrication, and cost efficiency. The results show that the designed STHE is capable of efficiently meeting the cooling requirements of HFS and is in line with industry needs.

Keywords: *Carbon Steel, cooling, design, High Fructose Syrup, Shell and Tube Heat*

1. PENDAHULUAN

HFS (*High Fructose Syrup*) merupakan pemanis cair yang secara luas dimanfaatkan dalam sektor industri makanan dan minuman, hal ini disebabkan oleh tingkat kemanisan yang lebih tinggi dibandingkan sukrosa [1]. Salah satu bahan baku potensial untuk produksi HFS adalah biji Nangka (*Artocarpus heterophyllus*) yang mengandung karbohidrat tinggi dan

dapat dikonversi menjadi gula sederhana melalui proses hidrolisis enzimatis. Biji Nangka yang dimanfaatkan sebagai bahan baku HFS tidak hanya meningkatkan nilai tambah limbah pertanian, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular dengan mengurangi limbah organik yang dihasilkan [2].

Proses pembuatan HFS melalui beberapa tahap yang terdiri dari persiapan, pembuatan tepung, hidrolisis, pemisahan, isomerisasi, pemekatan, dan penyimpanan produk. Setelah proses pemekatan, HFS didinginkan terlebih dahulu hingga mencapai suhu yang sesuai sebelum disalurkan ke dalam tangki penyimpanan produk. Beberapa penelitian terdahulu secara spesifik mengkaji degradasi termal larutan fruktosa dan menunjukkan bahwa peningkatan suhu serta waktu pemanasan dapat mempercepat penurunan kualitas fruktosa dan aktivitas antioksidan [3]. Suhu penyimpanan yang tidak optimal dapat mengurangi kinerja alat yang digunakan serta menyebabkan degradasi komponen dalam HFS, seperti fruktosa, serta meningkatkan resiko pencemaran mikroba [2]. Hasil ini menegaskan pentingnya pengendalian suhu pascaproses pemekatan untuk menjaga mutu HFS.

Dalam berbagai industri, pengendalian suhu merupakan faktor krusial untuk memastikan efisiensi operasional dan kualitas produk. Salah satu teknologi yang umum digunakan untuk mengatur suhu dalam sistem pendinginan adalah *cooler* [2]. Salah satu jenis yang paling sering digunakan di industri adalah tipe *shell and tube*. Tipe ini memiliki konstruksi yang karakteristiknya berupa serangkaian pipa yang ditempatkan di dalam sebuah selubung berbentuk silinder. *Heat exchanger* tipe *shell and tube* memiliki prinsip kerja yang didasarkan pada perpindahan panas antara permukaan material, baik padat maupun cair, dengan fluida yang mengalir di sekitarnya akibat perbedaan suhu [4].

Studi lain yang dilakukan oleh Afandiyanto, dkk. (2018) serta Hanan, dkk. (2021) membahas desain dan evaluasi kinerja *shell and tube heat exchanger* (STHE) pada berbagai proses kimia [4,5]. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji secara spesifik pengaruh desain cooler terhadap stabilitas produk pangan berbasis gula, seperti HFS. Selain itu, penelitian berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) oleh Asadbeigi, dkk. (2023) menunjukkan bahwa desain STHE yang tepat dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas serta menurunkan konsumsi energi pada proses pasteurisasi pangan [6]. Hasil penelitian tersebut mengindikasikan bahwa STHE memiliki potensi besar untuk diaplikasikan pada sistem pendinginan HFS, namun kajian perancangannya secara spesifik masih terbatas. Selain itu, hasil penelitian Afghani, dkk. (2024) menunjukkan bahwa pemilihan tipe *heat exchanger* serta penentuan parameter desain, seperti koefisien perpindahan panas dan *pressure drop*, berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pendinginan dan keandalan operasi sistem, sehingga perancangan *cooler* yang tepat menjadi faktor penting dalam proses industri [7].

Pada *heat exchanger* tipe *shell and tube*, fluida panas mengalir pada pipa-pipa (*tube*), sementara fluida pendingin mengalir melalui ruang yang ada di sekitar pipa-pipa tersebut (*shell*). Proses transfer panas berlangsung melalui dinding pipa, di mana energi panas dari fluida panas dipindahkan ke fluida pendingin yang memiliki suhu lebih rendah. Desain ini memungkinkan perpindahan panas yang efisien dengan ukuran unit yang tertata dengan baik [5]. Untuk merancang *heat exchanger* diperlukan beberapa parameter untuk menjadi fokus dalam pertimbangan perancangannya yang meliputi luas permukaan perpindahan

panas (A), beban panas (Q), koefisien perpindahan panas *overall* (U) dan perbedaan suhu rata-rata logaritmik (ΔT_{LMTD}) untuk mengetahui apakah *heat exchanger* yang dirancang memenuhi standar atau tidak [6].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pendingin (*cooler*) produk High Fructose Syrup (HFS) dari biji nangka menggunakan *Shell and Tube Heat exchanger* (STHE) dengan material *Carbon Steel SA 283 Grade C*, serta mengevaluasi kinerjanya melalui perhitungan beban panas, luas perpindahan panas, koefisien perpindahan panas keseluruhan, dan *pressure drop* guna memastikan sistem pendinginan yang efisien dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi industri.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang relevan dan akurat sebagai dasar dalam perancangan *cooler*. Terdapat beberapa data awal yang harus diketahui yaitu suhu yang masuk dan keluar dari fluida, *flowrate* fluida, dan fluida *properties*.

2.2. Penentuan Jenis Cooler

Untuk menentukan jenis *cooler* diperlukan perhitungan dengan literatur yaitu menggunakan metode perhitungan pada buku literatur *Process Heat Transfer, D. Q. Kern* [8].

a. Menghitung *Rate Volumetric*

Rate volumetric dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Rate Volumetrik} = \frac{\text{Rate Bahan Masuk}}{\rho \text{ bahan masuk}} \quad (1)$$

Keterangan :

ρ bahan masuk = densitas fluida yang masuk

b. Menghitung *Heat Balance* untuk *High Fructose Syrup* dan *Cooling Water*

$$Q = m \times Cp \times \Delta T \quad (2)$$

Keterangan :

m = Laju Alir massa

Cp = Kapasitas panas spesifik

Δp = Perbedaan suhu

c. Menghitung *Log Mean Temperature Difference* (Δt LMTD)

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

Hasil dari persamaan 3 dapat digunakan dalam perhitungan luas perpindahan panas (A).

d. Menghitung Luas Permukaan *Heat exchanger* (A)

$$A = \frac{Q}{U_d \times \Delta T} \quad (4)$$

Keterangan :

Q = *heat transfer* (kJ)

U_d = *overall heat exchanger coefficient* (Btu/hr.ft².°F)

ΔT_{LMTD} = *log mean temprature difference*

e. Menentukan jenis HE

Pemilihan jenis penukar kalor (HE) dapat dilakukan berdasarkan nilai A yang telah diketahui, dengan mempertimbangkan ketentuan-ketentuan berikut [2] :

Jika $A < 120-200 \text{ ft}^2$ maka HE yang digunakan berjenis DPHE

Jika $A > 120 \text{ ft}^2$ maka HE yang digunakan berjenis STHE

2.3. Perhitungan Desain Cooler

a. Menentukan Jumlah Tube

$$N_t = \frac{A}{a'' \times L} \quad (7)$$

b. Evaluasi Perpindahan Panas

- Menghitung Nre sisi tube :

$$a_t = \frac{N_t \times a'}{144 \times n} \quad (8)$$

$$G_t = \frac{W}{a_t} \quad (9)$$

$$Nre = \frac{D_e \times G_t}{\pi} \quad (10)$$

- Menghitung Nre sisi shell :

$$a_s = \frac{ID_s \times C' \times B}{144 \times P_T} \quad (11)$$

$$G_s = \frac{W}{a_s} \quad (12)$$

$$Nre = \frac{D_e \times G_s}{\pi} \quad (13)$$

Keterangan :

a_t = Flow area tube (ft^2)

G_t = Mass velocity pada tube (lb/jam.ft^2)

a_s = Flow area shell (ft^2)

G_s = Mass velocity shell (lb/jam.ft^2)

ID_s = Inside Diameter shell (inch)

C' = Jarak antar dinding (inch)

B = Gap baffle (inch)

P_T = Jarak antar pusat tabung

N_t = Jumlah Tube

W = Laju alir massa pada fluida (lb/jam)

n = Jumlah lewatan pada shell

- Menghitung faktor panas jH

Faktor panas jH ditentukan dari *figure 24* untuk sisi tube (HFS) dan *figure 28* untuk sisi shell (cooling water) pada buku literatur *Process Heat Transfer, D. Q. Kern* [8].

- Menghitung nilai h_i dan h_{io} pada bagian tube :

$$h_i = jH \left(\frac{k}{D_i} \right) \left(\frac{c\mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \varphi_t \quad (14)$$

$$h_{io} = h_i \times \left(\frac{ID}{OD} \right) \quad (15)$$

- Menghitung nilai h_o pada bagian shell :

$$H_o = jH \left(\frac{k}{D_e} \right) \left(\frac{c\mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \varphi_s \quad (16)$$

- Menghitung nilai t_w

$$tw = tc + \frac{h_o}{h_{io} + h_o} (T_c - t_c) \quad (17)$$

Keterangan :

h_i	= Heat-transfer coefficient pada bagian dalam (Btu/jam.ft ² .°F)
h_{io}	= Heat-transfer coefficient pipa (Btu/jam.ft ² .°F)
h_o	= Heat-transfer coefficient pada bagian luar (Btu/jam.ft ² .°F)
jH	= Heat Factor
μ	= viskositas (cps)
ID	= Diameter bagian dalam pada tube (ft)
OD	= Diameter bagian luar pada tube (ft)
k	= Thermal Conductivity (Btu/jam.ft ² .(F/ft))

c. Perhitungan *Clean Overall Coefficient* (U_c)

Secara teoritis, nilai overall heat transfer coefficient saat kondisi bersih (U_c) seharusnya lebih tinggi dibandingkan nilai saat kondisi kotor (U_D), karena perpindahan panas pada HE dalam keadaan bersih berlangsung lebih efisien dibandingkan setelah terjadi *fouling* atau pengotoran [9].

$$U_c = \frac{h_o \times h_{io}}{h_o + h_{io}} \quad (18)$$

d. Menghitung *Dirt Factor* (R_D)

Dirt Factor (R_D) merupakan parameter yang digunakan untuk memperhitungkan penurunan kinerja perpindahan panas akibat adanya penumpukan kotoran atau *fouling* pada permukaan perpindahan panas [10].

$$R_D = \frac{U_c - U_D}{U_c \times U_D} \quad (19)$$

Keterangan :

U_c	= Clean Overall Coefficient (Btu/jam.ft ² .°F)
U_D	= Overall Heat Transfer Coefficient Design (Btu/jam.ft ² .°F)

e. *Pressure drop* (ΔP)

Perhitungan penurunan tekanan (*pressure drop*) dilakukan untuk mengetahui sejauh mana fluida mampu mempertahankan tekanannya selama proses aliran berlangsung. Nilai *pressure drop* dipengaruhi oleh kecepatan massa fluida, di mana peningkatan kecepatan massa akan menyebabkan kenaikan *pressure drop* yang lebih signifikan dibandingkan dengan peningkatan koefisien perpindahan panas [11].

- Menentukan nilai *Pressure drop* (ΔP) pada sisi *tube*

$$\Delta P_T = \frac{f \times G_T^2 \times L \times n}{5,22 \times 10^{10} \times D_i \times s \times \phi T} \quad (20)$$

- Menentukan nilai *Pressure drop* (ΔP) pada sisi *shell*

$$N + 1 = \frac{12 \times L}{B} \quad (21)$$

$$\Delta P_S = \frac{f \times G_T^2 \times ID_s \times (N+1)}{5,22 \times 10^{10} \times D_i \times s \times \phi s} \quad (22)$$

$$\Delta P \text{ Total} = \Delta P_T + \Delta P_S \quad (23)$$

Keterangan :

f	= Faktor friksi
s	= Specific gravity
N	= Jumlah baffle pada sisi <i>shell</i>
L	= Panjang <i>tube</i> (ft)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan dimensi utama *cooler* yang meliputi diameter *tube*, diameter *shell*, panjang *tube*, jumlah lewatan, *pitch*, serta jarak antar dinding disajikan secara rinci pada Tabel 1. Parameter – parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam perhitungan evaluasi perpindahan panas dan penurunan tekanan pada sistem pendinginan yang dirancang.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Dimensi *Cooler*

Dimensi	Tube Side			Shell Side		
	Simbol	Satuan	Nilai	Simbol	Satuan	Nilai
Dimensi bagian Luar	OD_T	in	$\frac{3}{4}$			
Dimensi bagian Dalam	ID_T	in	0,652	ID_S	in	13,25
Panjang <i>Tube</i>	L	ft	9			
Jumlah Lewatan	n	buah	4			
BWG	-	-	18			
Jarak antar dinding <i>tube</i>	C'	in	0,25			
Pitch	PT	in	12			
Jumlah Lewatan	n	buah	7			
Gap <i>baffle</i>				B	in	26,5

Berdasarkan data dimensi *cooler* yang disajikan pada Tabel 1, selanjutnya dilakukan evaluasi kinerja perpindahan panas yang mencakup koefisien perpindahan panas, beban panas, LMTD, serta kerugian tekanan pada sisi *shell and tube*.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Evaluasi Perpindahan Panas

Evaluasi Perpindahan Panas	Overall		
	Notasi	Satuan	Nilai
Luas area perpindahan panas	A	ft ²	316,17
Koefisien <i>heat transfer shell</i>	H_o	-	4,273
Koefisien <i>heat transfer tube</i>	H_{io}	-	2,363
Koefisien perpindahan panas <i>overall</i>	Ud	Btu/jam.ft ² .°F	14,731
Koefisien perpindahan panas bersih	Uc	-	1,521
Beban Panas (Q)	-	Btu/jam	287244,803
LMTD	-	°F	62,070
Kerugian tekanan <i>shell</i>	ΔP_s	psi	0,000314
Faktor pengotor	Rd	-	0,589
Kerugian tekanan <i>tube</i> (ΔP_T)	psi		0,000394

3.2. Pembahasan

Perancangan sistem pendingin (*cooler*) untuk produk *High Fructose Syrup* (HFS) biji Nangka merupakan bagian penting dalam rangkaian proses produksi sirup, terutama

setelah tahap evaporasi yang menghasilkan suhu produk yang relatif tinggi, yang berkisar antara 70°-90°C. Penurunan suhu produk dilakukan untuk menjaga stabilitas senyawa fruktosa, mencegah reaksi degradasi termal, serta mempersiapkan produk untuk tahap pengemasan dan penyimpanan. Selain itu juga, suhu penyimpanan akan mempengaruhi umur simpan produk tersebut dan juga meminimalisir aktivitas enzim dan pertumbuhan mikroorganisme [12].

Pada perancangan *cooler* ini menggunakan jenis *cooler* yaitu *Shell and Tube Heat exchanger* (STHE). Dengan jenis bahan yang digunakan yaitu *Carbon Steel SA 283 Grade C*. material ini dipilih karena memiliki kelebihan diantara kekuatan mekanik yang baik, kemudahan dalam proses pembendukan dan pengelasan, serta ketersediaannya yang luas dengan biaya yang relatif rendah. Selain itu, penggunaan STHE memberikan keuntungan dalam efisiensi perpindahan panas, kemudahan perawatan serta fleksibilitas dalam pengaturan aliran fluida dan suhu operasi, sehingga sangat cocok digunakan untuk proses pendinginan HFS secara efektif dan berkelanjutan dalam skala industri. Pada tahap perancangan *cooler*, berdasarkan hasil perhitungan yang ditampilkan pada Tabel 2, diperoleh nilai luas area perpindahan panas (A) sebesar 316,17 ft². Berdasarkan kriteria pemilihan jenis *heat exchanger*, apabila luas perpindahan panas melebihi 200 ft², maka jenis yang direkomendasikan adalah STHE. Oleh karena itu, dengan nilai A yang lebih besar dari 200 ft², dipilih STHE sebagai jenis HE yang digunakan dalam perancangan ini.

Selain itu, dalam industri pengolahan makanan, pemilihan dan perancangan HE yang tepat sangat krusial untuk memastikan efisiensi proses dan kualitas produk akhir. Salah satu contohnya yaitu simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis perpindahan panas pada proses pasteurisasi pasta tomat menggunakan STHE yang hasilnya menunjukkan bahwa desain STHE dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan mengurangi konsumsi energi [6].

Faktor pengotor (*fouling factor*) juga menjadi parameter utama dalam desain STHE. Akumulasi pengotor dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan konsumsi energi. Nilai pengotor yang tinggi dapat menurunkan efisiensi termal penukar kalor hingga 71 – 87% sehingga diperlukan sistem pembersihan rutin untuk menjaga kinerja optimal [13]. Berdasarkan hasil perhitungan yang disajikan pada Tabel 1.2, nilai *fouling factor* sebesar 0,589 yang dimana angka tersebut masih berada di batas aman, namun perlu dilakukan sistem *Clean in Place* (CIP) secara berkala. Di samping pengaruh *fouling*, tingkat efisiensi *heat exchanger* juga sangat ditentukan oleh spesifikasi peralatan, termasuk sejauh mana desainnya telah dioptimalkan untuk mendukung proses perpindahan panas secara maksimal [14].

Selain faktor pengotor. Penurunan tekanan (*pressure drop*) juga merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja HE. Kenaikan *pressure drop* juga dapat dipengaruhi oleh ukuran celah (*gap*) *baffle* yang tidak optimal. Celah tersebut berperan dalam menentukan pola aliran fluida, sehingga celah yang terlalu sempit atau tidak merata dapat memicu akumulasi endapan padatan di area tertentu, yang pada akhirnya meningkatkan tekanan jatuh dalam sistem [15]. Nilai *pressure drop* pada sisi *shell* dan *tube* yang ditunjukkan pada Tabel 2 masing-masing sebesar 0,000314 psi dan 0,000394 psi. Nilai tersebut masih berada dalam ambang batas yang aman, mengingat batas maksimum *pressure drop* yang diperbolehkan adalah sebesar 10 psi [8].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, dapat disimpulkan bahwa sistem pendinginan produk *High Fructose Syrup* (HFS) berbasis *Shell and Tube Heat exchanger* (STHE) dengan material *Carbon Steel SA 283 Grade C* dapat memenuhi kebutuhan proses pendinginan secara efektif. Nilai luas *heat transfer* sebesar 316,17 ft² menegaskan bahwa STHE merupakan tipe *heat exchanger* yang sesuai untuk aplikasi ini. Selain itu, pemilihan material *Carbon Steel SA 283 Grade C* didukung oleh kekuatan mekanik yang baik, kemudahan dalam proses fabrikasi, dan efisiensi biaya, sehingga cocok digunakan dalam skala industri.

Untuk pengembangan lebih lanjut, perancangan sistem pendingin ini dapat disempurnakan dengan melakukan simulasi atau perhitungan menggunakan perangkat lunak teknik seperti Aspen HYSYS, ANSYS, atau SolidWorks Flow Simulation. Penggunaan aplikasi tersebut dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan mendetail.

REFERENSI

- [1] R. Natori, S. Winarti, dan R. A. Anggreini, "Karakteristik HFS (high fructose syrup) dari umbi gembolo yang diproduksi secara hidrolisis enzimatis menggunakan amilase dan inulinase," *Teknologi Pangan: Media Informasi dan Komunikasi Ilmiah Teknologi Pertanian*, vol. 13, no. 2, hal. 166–174, 2022.
- [2] A. R. Salsabila, A. Chumaidi, dan E. Naryono, "Desain cooler pada prarancangan pabrik disproportionated rosin dari gondorukem grade WG dengan kapasitas 3000 ton/tahun," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 4, hal. 460–469, 2023.
- [3] K. S. Woo, I. Hwang, dan H. Kim, "Thermal degradation characteristics and antioxidant activity of fructose solution with heating temperature and time," *Journal of Medicinal Food*, vol. 14, no. 1–2, hal. 167–172, 2011.
- [4] A. Afandiyanto, M. Hazwi, A. Pintoro, dan P. G. Sembiring, "Analisa penukar kalor aftercooler type shell and tube dengan metode Delaware dan Will Johnston," *Dinamis*, vol. 6, no. 1, hal. 10, 2018.
- [5] F. A. Hanan, A. Bayu, dan D. Nandiyanto, "Shell and tube heat exchanger design for producing methylaniline," *International Journal of Design*, vol. 1, hal. 65–70, 2021.
- [6] S. Asadbeigi, E. Ahmadi, M. Goodarzi, dan A. Sagharichian, "Analyzing and simulating heat transfer and designing a shell and tube heat exchanger for the pasteurization process of tomato paste: A CFD study," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, hal. e21593, 2023.
- [7] A. Al Afghani, M. T. Ulhakim, dan R. L. Azizah, "Evaluating the thermal performance of shell-and-tube heat exchangers: The role of flow rate in water-based systems," *Mechanical Xplore (JTMMX)*, vol. 5, no. 1, hal. 38–49, 2024.
- [8] D. Q. Kern, *Process Heat Transfer*, 1950.
- [9] M. R. Zain dan A. Mustain, "Evaluasi efisiensi heat exchanger (HE-4000) dengan metode Kern," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 6, no. 2, hal. 415–421, 2023.
- [10] K. Khairunnisa, E. Naryono, dan M. I. A., "Evaluasi efektivitas alat heat exchanger 11E-25 pada kilang fuel oil complex (FOC) I di PT Pertamina RU-IV Cilacap," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 7, no. 2, hal. 288–296, 2023.
- [11] P. Risky N., "Perancangan alat cooler pada prarancang pabrik glucitol dengan bahan baku dextrose menggunakan catalytic hydrogenation process," 2019.
- [12] R. Adolph, *Teknologi Hasil Pengolahan dan Hasil Pertanian*, 2016.

- [13] J. R. H. Panjaitan, N. Nurhasanah, L. F. Atikasari, dan P. Ponilawati, "Efisiensi dan fouling factor sealtube heat exchanger pada proses pendinginan refined bleached deodorized palm oil," *Rekayasa*, vol. 15, no. 1, hal. 29–35, 2022.
- [14] V. F. Tasyakuranti, R. D. Chrisnandari, A. Rahmatulloh, Setiyono, dan N. Kamaliya, "Evaluasi kinerja cooler-05 pada crude distillation unit di PPSDM Migas Cepu," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 2, hal. 177–189, 2023.
- [15] A. A. Abd, M. Q. Kareem, dan S. Z. Naji, "Performance analysis of shell and tube heat exchanger: Parametric study," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 12, hal. 563–568, 2018.