

Rancang Bangun Prototipe Heat Exchanger Type Shell and Tube
Arah Aliran Searah

Anisa Muhammad Hayoto¹⁾, A.N. Hatuwe^{2*)} dan Kristofor Waas³⁾

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon

Jln. Ir. M. Putuhena Wailela, Desa Rumah Tiga, Kota Ambon 97234

Provinsi Maluku –Indonesia

anisamhayoto03@gmail.com, noor.azmain@gmail.com, kresWaas@gmail.com

ABSTRACT

This research aims to analyze the design and fabrication of a parallel-flow shell-and-tube heat exchanger prototype. The research was motivated by the need for concrete and effective practical learning media in the Mechanical Engineering Department of Ambon State Polytechnic, which is currently limited to theoretical material.

The design method for this device uses a "build and build" approach. This design combines a 6 mm diameter aluminum pipe for the hot fluid tube and a 4 inch diameter galvanized iron pipe as the shell for the cold fluid. The fluid used for the hot and cold sides is water. The mass flow rates applied to the hot and cold fluids are 0.089 kg/s and 0.12572989 kg/s, respectively.

The design calculations resulted in the creation of a prototype exchanger with a shell length of 0.5 m, an outer tube diameter of 0.006 m, and 74 aluminum tubes. Leakage testing was conducted using compressed air at 16 psi for 5 minutes. No leaks were found during the test.

Keywords : *heat exchanger, shell and tube, parallel flow*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis desain dan fabrikasi prototipe penukaran kalor tipe cangkang dan tabung aliran searah. Latar belakang penelitian ini adalah kebutuhan akan media pembelajaran praktis yang konkret dan efektif di Departemen Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon, yang saat ini masih terbatas pada materi teori.

Metode perancangan alat ini menggunakan pendekatan "dan bangun". Desain ini menggabungkan pipa aluminium berdiameter 6 [mm] untuk tabung fluida panas dan pipa besi galvanis berdiameter 4 [inci] sebagai cangkang untuk fluida dingin. Fluida yang digunakan untuk sisi panas dan dingin adalah air. Laju aliran massa yang diterapkan pada fluida panas dan dingin masing-masing adalah 0,089 [Kg/s] dan 0,12572989 [Kg/s].

Hasil perhitungan rancangan dapat dibuat prototipe exchanger dengan ukuran panjang shell 0,5 m, diameter luar tube 0,006 m dan jumlah tube sebanyak 74 buah dengan material tube aluminium. Sedangkan pengujian terhadap kemungkinan kebocoran, dilakukan menggunakan udara bertekanan sebesar 16 Psi selama 5 menit. Selama pengujian tidak ditemukan adanya kebocoran.

Kata Kunci: *Heat Exchanger, Shell and Tube, arah aliran*

PENDAHULUAN

Efektivitas pembelajaran di institusi pendidikan tinggi, khususnya pada program studi Teknik mesin, sangat bergantung pada ketersediaan fasilitas praktikum yang memadai. Fasilitas ini memungkinkan mahasiswa untuk mengaplikasikan teori ke dalam praktik, sehingga dapat meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan teknis mereka terkait cara kerja berbagai Sistem Konversi Energi. Namun, berdasarkan observasi awal, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon masih menghadapi kendala signifikan, yaitu belum tersedianya perangkat praktikum alat penukar kalor (*heat exchanger*). Kondisi ini secara langsung menghambat mahasiswa dalam

melakukan eksperimen dan penelitian, yang seharusnya krusial untuk diperoleh pemahaman mendalam tentang perpindahan panas, yang merupakan inti dari kinerja Mesin Konversi Energi.

Selama proses perkuliahan, materi mengenai alat penukar kalor umumnya disampaikan melalui media presentasi seperti *PowerPoint*. Meskipun media ini dapat memperkenalkan konsep dasar, keterbatasan dalam menyajikan visualisasi langsung dan interaksi fisik dengan objek studi menyebabkan mahasiswa hanya mampu membayangkan dan memperkirakan bentuk serta cara kerja alat penukar kalor. Idealnya, Laboratorium Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon perlu menyediakan berbagai alat pengujian *heat exchanger* untuk memfasilitasi pembelajaran yang lebih holistik.

Kesenjangan antara kebutuhan akan pemahaman praktis dan ketersediaan fasilitas praktikum yang memadai ini mendorong urgensi pengembangan media pembelajaran yang lebih interaktif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk rancang bangun pembuatan *heat exchanger* tipe *shell and tube baffle* sejajar dengan arah aliran searah. Prototipe ini direncanakan akan dibuat dari material *shell Galvanis Pipe* dengan diameter 4 inch dan *tube Aluminium Pipe* berdiameter 6 mm (0,23622 inch), dengan panjang diameter *shell and tube* 0,5 meter. Fluida panas dan fluida dingin yang dialirkan dalam *heat exchanger* dengan suhu *input* 100°C dan 26°C dan suhu *output* 58°C dan 55,83°C, dengan debit aliran air panas masuk *tube* sebesar 0,089 Kg/s. Jumlah *tube* akan ditentukan melalui perhitungan teknis yang relevan. Diharapkan, alat penukar kalor ini dapat berfungsi sebagai media pembelajaran praktikum yang efektif di Politeknik Negeri Ambon, memberikan pemahaman awal yang lebih konkret kepada mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, serta membantu mengatasi keterbatasan fasilitas praktikum yang ada. Sehingga dalam penelitian ini yang menjadi masalah bagaimana rancang bangun prototipe *heat exchanger* tipe *shell and tube* dengan arah aliran searah.

TINJAUAN PUSTAKA

Heat Exchanger

Penukar kalor merupakan perangkat yang berfungsi untuk mentransfer energi panas antara dua atau lebih fluida yang memiliki perbedaan suhu. Pada umumnya, fluida dalam sistem ini dipisahkan oleh permukaan perpindahan panas untuk mencegah terjadinya pencampuran, sehingga memungkinkan proses perpindahan panas yang efisien (Thulukkanam, 2013).

Heat exchanger tipe *shell and tube* merupakan salah satu jenis penukar panas yang memiliki tingkat fleksibilitas tinggi dan banyak digunakan di berbagai sektor industri. *Heat exchanger* tipe *shell and tube* dirancang dengan susunan pipa berbentuk silinder yang dipasang sejajar di dalam cangkang berbentuk silinder. Dalam proses perpindahan panas, salah satu fluida dialirkan melalui bagian dalam pipa, sedangkan fluida lainnya mengalir melintasi serta sepanjang sumbu utama penukar panas. Adapun komponen utama yang membentuk sistem ini terdiri dari *tube bundle* (kelompok pipa), *shell* (cangkang), *front-end head* (kepala depan), *rear-end head* (kepala belakang), *baffle* (pengarah aliran), serta *tube sheet* (Kakaç, Liu, & Pramuanjaroenkij, 2012).

Kajian Teoritis

Dalam perancangan atau prediksi kinerja penukar kalor, laju perpindahan kalor total harus dikaitkan dengan temperatur fluida masuk dan keluar, koefisien perpindahan kalor keseluruhan, serta luas permukaan perpindahan kalor. Hubungan ini diperoleh melalui keseimbangan energi pada fluida panas dan dingin. Jika fluida tidak mengalami perubahan fasa dan panas jenis dianggap konstan, persamaan ini dapat disederhanakan :

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (\Delta T_h) \quad (2-1)$$

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (\Delta T_c) \quad (2-2)$$

Dimana :

q = Jumlah panas atau kalor yang diserap atau dilepaskan (W)

\dot{m} = Laju aliran massa (Kg/s)

c_p = Kapasitas panas spesifik fluida (J/Kg°C)

ΔT = Perbedaan suhu (°C)

2.5.1 Beda Suhu Rata-Rata Log (LMTD)

Persamaan yang menggambarkan laju perpindahan panas, yang sering disebut sebagai persamaan laju perpindahan panas :

$$q = UA\Delta T_m \quad (2-3)$$

dimana :

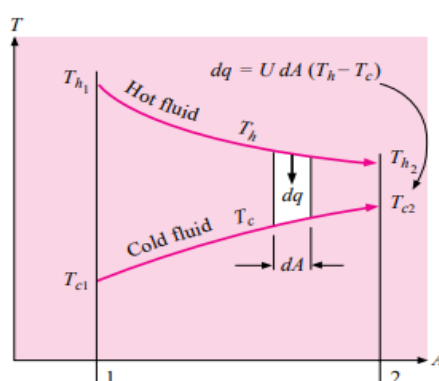
q = Laju perpindahan panas (W)

U = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh ($W/m^2\text{°C}$)

A = Luas permukaan perpindahan kalor (m^2)

ΔT_m = Perbedaan suhu logaritmik rata-rata/ LMTD (°C)

Bentuk dari T_m dapat diperoleh dengan menerapkan prinsip keseimbangan energi pada elemen-elemen diferensial yang ada pada fluida panas dan fluida dingin. Setiap elemen tersebut memiliki panjang dx dan area permukaan transfer panas dA , seperti yang digambarkan dalam gambar 2.5



(Sumber : Holman, 2010. Halaman 532)

Gambar 1. Profil suhu untuk aliran sejajar

Berdasarkan persamaan laju perpindahan kalor pada kondisi titik 1 dan 2 seperti pada gambar 2.4 diperoleh :

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h,in} - T_{c,in})(T_{h,out} - T_{c,out})}{\ln \left[\frac{T_{h,in} - T_{c,in}}{T_{h,out} - T_{c,out}} \right]} \quad (2-4)$$

Notasi h dan c menunjukkan fluida panas dan fluida dingin. Dalam analisis ini, digunakan beberapa asumsi sebagai berikut :

1. Penukar panas diasumsikan memiliki isolasi sempurna, sehingga tidak terjadi perpindahan panas dengan lingkungan dan hanya terdapat interaksi termal antara fluida panas dan dingin.
2. Efek konduksi aksial sepanjang tabung dianggap tidak signifikan dan dapat diabaikan.
3. Perubahan energi potensial serta energi kinetik dalam sistem dianggap tidak berpengaruh terhadap analisis perpindahan panas.
4. Nilai panas jenis fluida tetap dan tidak berubah selama proses berlangsung.
5. Koefisien perpindahan panas keseluruhan dianggap konstan di sepanjang penukar panas (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007).

Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh

Koefisien perpindahan panas menyeluruh menggambarkan aliran panas total yang terjadi sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi. Besaran ini dinyatakan dalam satuan $W/m\text{°C}$ atau $Btu/h\text{°F}$ (Buchori, 2011). Perpindahan panas secara keseluruhan dapat dinyatakan dengan rumus :

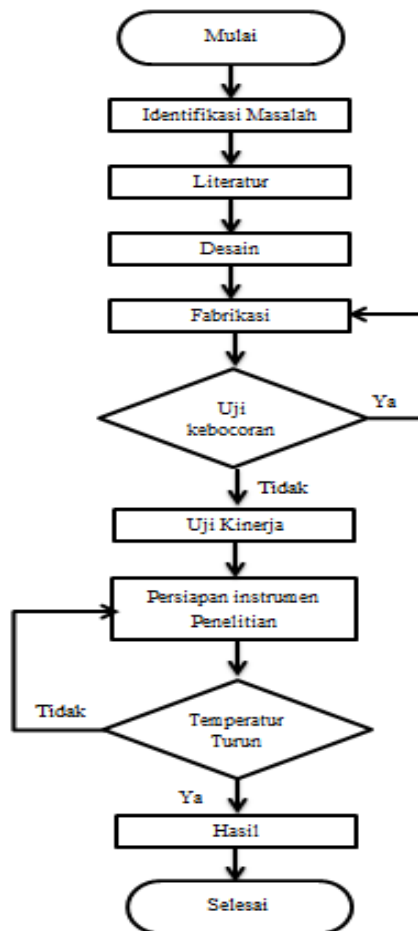
$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad (2-5)$$

Koefisien perpindahan panas keseluruhan dapat dihitung berdasarkan area permukaan baik pada sisi dalam maupun sisi luar pipa. Oleh karena itu :

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_o}} \quad (2-6)$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}} \quad (2-7)$$

METODOLOGI PENELITIAN

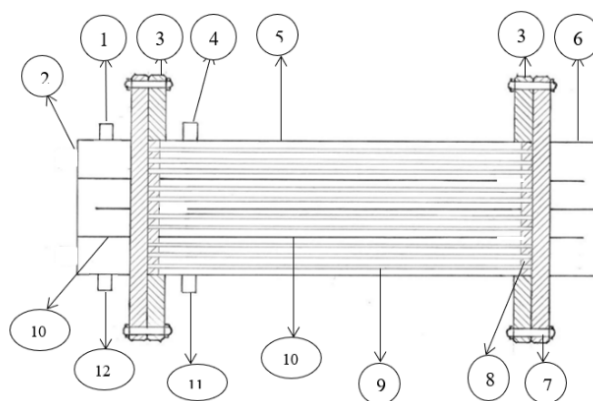


Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Desain *heat exchanger* tipe *shell and tube*

Bagian-bagian *heat exchanger* :

1. *Tube outlet*
2. *Head stationer*
3. Flange
4. *Shell outlet*
5. *Shell*
6. *Head bagian belakang*
7. Baut penyangga
8. *Tube sheet*
9. *Tube*
10. *Baffle longitudinal*
11. *Shell inlet*
12. *Tube inlet*



Gambar 3. Bagian-bagian *heat exchanger*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini merupakan penelitian rancang bangun (*Research and Development/ R&D*) yaitu metode penelitian yang bertujuan untuk menciptakan atau menyempurnakan suatu produk agar lebih efektif dalam penerapannya.

Penukar panas yang dibuat pada penelitian ini merupakan tipe cangkang dan tabung (*heat exchanger* tipe *shell and tube*) *baffle* sejajar dengan arah aliran searah, yang dirancang secara spesifik untuk aplikasi pendinginan air (*water cooling*). Pemilihan desain ini dimaksudkan untuk mengarahkan fluida pendingin mengalir searah dengan fluida proses, sehingga distribusi aliran menjadi lebih teratur dan penurunan tekanan relatif lebih rendah. Prinsip kerja utama dari perangkat ini adalah mentransfer energi termal dari suatu fluida berproses bersuhu tinggi ke media pendingin, yaitu air, melalui konduksi termal pada dinding-dinding tabung tanpa adanya kontak fisik langsung antar kedua fluida.

Analisis Perhitungan

A. Menentukan Kondisi Operasi

- Fluida Panas (Air Panas)
 $T_{h,in} = 100^{\circ}\text{C}$
 $T_{h,out} = 58^{\circ}\text{C}$
 $\dot{m}_h = 0,089 \text{ Kg/s}$
- Fluida Dingin (Air Leding)
 $T_{c,in} = 26^{\circ}\text{C}$
 $T_{c,out} = 55,83^{\circ}\text{C}$
- Panjang *shell and tube* : 0,5 m
- Diameter dalam *tube* : 0,004 m
- Diameter luar *tube* : 0,006 m
- Shell 4 inch : ID = 0,106 m
OD = 0,114 m

B. Menghitung Nilai Q

Laju aliran energi : maka dari fluida panas, laju aliran energi adalah

$$Q = \dot{m}_h \times c_{p_h} \times \Delta T$$

$$Q = 0,089 \text{ Kg/s} \times 4193 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{C} \times (100 - 58)^{\circ}\text{C} = 15673,434 \text{ J/s}$$

Untuk laju aliran massa fluida dingin adalah

$$Q_h = Q_c$$

$$Q_h = \dot{m}_c \times c_{p_c} \times \Delta T$$

$$\dot{m}_c = \frac{Q_h}{c p_c \times \Delta T}$$

$$\dot{m}_c = \frac{15673,434 \text{ J/s}}{4179 \text{ J/Kg}^\circ\text{C} \times (55,83 - 26)^\circ\text{C}} = 0,12572989 \text{ Kg/s}$$

C. Menghitung Nilai LMTD

Aliran yang digunakan adalah aliran paralel, sehingga :

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

$$\Delta LMTD = \frac{(100 - 26) - (58 - 55,83)}{\ln \left(\frac{100 - 26}{58 - 55,83} \right)} = 20,35225912^\circ\text{C}$$

D. Menghitung Nilai U Berdasarkan Luas Permukaan Luar Pipa

Pipa tube yang digunakan adalah aluminum pipe. Dimensi *tube* 6 mm

Diameter dalam = 0,004 m

Diameter luar = 0,006 m

Sifat-sifat air (*bulk temperatur*) pada 79°C ialah :

ρ = 972,2 Kg/m³

μ = 0,000362 Kg/ms

k = 0,670 W/m°C

Pr = 2,26

Sisi tube

Kecepatan fluida panas (air panas) adalah

$$u = \frac{\dot{m}_h}{\rho A_t}$$

$$u = \frac{0,089 \text{ Kg/s}}{(972,2 \text{ Kg/m}^3)(3,14 \times \frac{0,004^2 \text{ m}^2}{4})} = 7,288610637 \text{ m/s}$$

Bilangan Reynolds adalah

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu}$$

$$Re = \frac{972,2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 7,288610637 \text{ m/s} \times 0,004 \text{ W/m}^\circ\text{C}}{0,000362 \text{ Kg/ms}} = 78298,20178$$

Karena hasil perhitungan menunjukkan bahwa aliran adalah turbulen, kita dapat menerapkan persamaan (2-12) untuk analisis

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}$$

$$Nu = (0,023)(78298,20178)^{0,8} (2,26)^{0,3} = 241,5248373$$

$$h_i = \frac{Nuk}{d} = \frac{241,5248373 \times 0,670 \text{ W/m}^\circ\text{C}}{0,004 \text{ m}} = 40455,41024 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$$

Sisi shell

Untuk menentukan sifat-sifat air pada temperatur film, maka perlu diketahui dulu nilai suhu dinding (T_w),

$$q = -2\pi k r L \frac{dT}{dr}$$

$$T_i - T_o = \frac{-q \times (r_o - r_i)}{2\pi k L}$$

$$T_o = T_i + \frac{-q \times (r_o - r_i)}{2\pi r L}$$

$$T_o = 79 + \frac{-15673,434 \times (0,003 - 0,002)}{2 \times 3,14 \times 204 \times \ln(0,003/0,002) \times 0,5}$$

$$T_o = 79 + \frac{-15,673434}{960,84}$$

$$T_o = 78,98368778$$

Sifat-sifat air (*film temperatur*) 59,92732684 °C ialah

$$\rho = 983,3 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0,000472 \text{ Kg/ms}$$

$$k = 0,654 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\text{Pr} = 3,01$$

Kecepatan massa/ *mass velocity* pada *shell* adalah

$$G_s = \frac{\dot{m}}{A_s}$$

$$G_s = \frac{0,12572989 \text{ Kg/s}}{0,001682255 \text{ m}^2} = 74,73890095 \text{ Kg/s} \cdot \text{m}^2$$

$$De = \frac{4 \times 0,433 \times 0,01^2 - 0,5 \times 3,14 \times \frac{0,006^2}{4}}{0,5 \times 3,14 \times 0,006} = 0,016886412 \text{ m}$$

Maka

$$Re_{shell} = \frac{De G_s}{\mu_s}$$

$$Re_{shell} = \frac{0,016886412 \text{ m} \times 74,73890095 \text{ Kg/s} \cdot \text{m}^2}{0,000472 \text{ Kg/ms}} = 2673,881071$$

Persamaan (2-14) untuk mencari nilai Bilangan Nuselt pada sisi *shell*,

$$Nu = C(Re^n)(Pr^{\frac{1}{3}})$$

$$Nu = 0,683 \times 2673,881071^{0,466} \times (1,11 \times 3,01^{1/3}) = 30,07718145$$

$$h_o = \frac{Nuk}{De}$$

$$h_o = \frac{30,07718145 \times 0,654 \text{ W/m}^\circ\text{C}}{0,016886412 \text{ m}} = 1164,870121 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Koefisien perpindahan kalor menyeluruh yang didasarkan atas permukaan luar secara matematis digunakan persamaan (2-9),

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k_{pipe} L} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{0,006}{0,004 \times 40455,41024} + \frac{0,006 \ln(\frac{0,003}{0,002})}{2 \times 204} + \frac{1}{1164,870121}} = 1109,255715 \text{ W/m}^2\text{C}$$

E. Menghitung Nilai A

$$Q = U \times A \times \Delta LMTD$$

$$A = \frac{Q}{U_o \times \Delta LMTD}$$

$$A = \frac{15673,434 \text{ J/s}}{1109,255715 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{C} \times 20,35226\text{C}} = 0,694256351 \text{ m}^2$$

Jumlah *tube* yang didapat adalah

$$n_{tube} = \frac{A}{A_{tube}}$$

Area tiap *tube* :

$$A_{tube} = \pi d_o L$$
$$A_{tube} = 3,14 \times 0,006 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 0,00942 \text{ m}^2$$

Jadi,

$$n_{tube} = \frac{0,694256351 \text{ m}^2}{0,00942 \text{ m}^2} = 73,700 \approx 74 \text{ buah}$$

Kecepatan real yang terjadi (sisi *tube*)

$$u_{real} = \frac{u}{nt_{pass}}$$
$$u_{real} = \frac{7,288610637}{18} = 0,404922813 \text{ m/s}$$



Gambar 4. Gambar Hasil pembuatan exchanger

Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian kebocoran dengan metode pneumatik, yang dilaksanakan sesuai standar ASME Section VIII, Divison 1, prototipe penukar panas (*heat exchanger*) ini dinyatakan lulus uji. Pengujian ini dilakukan pada tekanan 16 psi selama 3 menit, dan selama periode tersebut, tidak terdeteksi adanya penurunan tekanan pada alat ukur.



Gambar 5. Pengujian pneumatik pada sisi *shell*



Gambar 6. Pengujian pneumatik pada sisi *tube*

PENUTUP

1. Prototipe Echanger tipe shell and tube dapat dibuat dengan panjang shell 0,5 m, diameter luar *tube* 0,006 m dan jumlah tube sebanyak 74 buah dengan material tube alumanium.
2. Hasil uji kebocoran pneumatik dengan tekanan yang diberikan sebesar 16 psi menunjukkan bahwa penukar panas (*heat exchanger*) lulus dan siap untuk operasional

REFERENSI

- Buchori, Luqman. (2011). *Buku Ajar Perpindahan Panas*. Semarang. Badan Penerbit Universitas Diponegoro. Diakses pada 15 Juni 2025, dari <https://share.google/bq1ec94zLEsrIta0y>
- Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10th ed.). McGraw – Hill Higher Education. Diakses pada 15 Juni 2025, dari <https://share.google/sqEsbqpKGSC0WU24I>
- Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat Exchangers: Selection, rating, and thermal design* (3rd ed.). CRC Press. Diakses pada 15 Juni 2025, dari <https://share.google/xnHvb6ZeJfGADCtNS>
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook* (2nd ed). CRC Presss, Taylor & Francis Group. Diakses pada 15 Juni 2025, dari <https://share.google/3x13Em8g0R2r7LTEi>
- Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. (TEMA). (2019). *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (10th ed). Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. Diakses pada 15 Juni 2025, pada <https://share.google/Iu2P3d1SRSZp5JYEK>