

ANALISIS EFEKTIVITAS *HIGH PRESSURE HEATER* UNIT 1 PLTU PANGKALAN SUSU *OPERATION AND MAINTENANCE*

ANALYSIS EFFECTIVENESS OF HIGH PRESSURE HEATER UNIT 1 PLTU PANGKALAN SUSU OPERATION AND MAINTENANCE

Lestari Handayani Lumban Tobing^{*}, Joko Sutrisno

^{*}Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Medan

Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155

Email korespondensi: lestarilumban@students.polmed.ac.id

ABSTRAK

Alat Penukar Kalor adalah suatu alat yang digunakan untuk menukar atau mengubah temperatur fluida atau mengubah fasa fluida dengan cara mengubah kalornya dengan fluida lain. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah sistem pembangkit termal dengan menggunakan uap sebagai fluida kerjanya. Di dalam sistem PLTU Unit 1 Pangkalan Susu *Operation And Maintenance* Unit PT Indonesia Power menerapkan prinsip penukar kalor. Salah satu contoh Alat Penukar Kalor yang dipakai adalah *High Pressure Heater (HPH)*. *High Pressure Heater* adalah alat yang berfungsi untuk memanaskan air umpan sebelum masuk ke boiler. Dengan beroperasinya *High Pressure Heater*, maka beban boiler akan semakin ringan, karena air yang masuk ke boiler memiliki temperatur yang tinggi. *High pressure heater* pada PLTU Unit 1 Pangkalan Susu *Operation And Maintenance* Unit PT Indonesia Power terdiri dari tiga unit dan *high pressure heater* yang dianalisis adalah *high pressure heater* unit 2 dengan temperatur uap masuk 369,62°C, laju aliran uap 7,167 kg/s dan temperatur air umpan masuk 222,7°C dengan laju aliran air 157,778 kg/s. Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui efektivitas dari *high pressure heater* pada Unit 1 PLTU Pangkalan Susu *Operation And Maintenance* Unit PT Indonesia Power. Dari hasil Analisis, diperoleh efektivitas *high pressure heater* sebesar 93,53%.

Kata kunci: Perpindahan panas, Alat Penukar kalor, efektivitas

ABSTRACT

A heat exchanger is a device used to change or change the temperature of the fluid or change the fluid phase by changing the heat with another fluid. Steam Power Plant (PLTU) is a thermal generating system using steam as its working fluid. In the PLTU Unit 1 Pangkalan Susu Operation and Maintenance Unit system, PT Indonesia Power applies the heat exchanger principle. A heat exchanger was used is the High Pressure Heater (HPH). High Pressure Heater is a tool that serves to heat feed water before it enters the boiler. With the operation of the High Pressure Heater, the boiler load will be lighter, due to the water entering the boiler has a high temperature. High pressure heater at PLTU Unit 1 Pangkalan Susu Operation and Maintenance Unit PT Indonesia Power consists of 3 units and the high pressure heater which is analyzed is the high pressure heater unit 2 with an incoming steam temperature of 369.62 °C, steam flow rate of 7.167 kg/s and water temperature. The purpose of this thesis is to determine the effectiveness of the high pressure heater at Unit 1 of the Pangkalan Susu PLTU Operation and Maintenance Unit of PT Indonesia Power. From the analysis, it was found that the effectiveness of the high pressure heater was 93.53%.

Keywords: *heat transfer, heat exchanger, effectiveness*

PENDAHULUAN

Listrik merupakan sumber energi yang digunakan manusia. Banyaknya kebutuhan energi listrik di Indonesia mendesak pemerintah untuk membangun pembangkit energi listrik. Pembangkit listrik yang banyak digunakan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), selain dapat menghasilkan daya listrik relatif besar juga mudah untuk mendapatkan fluida utamanya. PLTU memanfaatkan energi panas dari uap dengan cara memanaskan air untuk mengubah fasa cair menjadi fasa uap untuk menghasilkan energi listrik.

High pressure heater merupakan suatu alat yang berfungsi untuk memanaskan air yang akan diisi ke dalam boiler atau pemanas air umpan yang diolah pada *Feed water pump*. *High pressure heater* dibutuhkan untuk menaikkan temperatur air sebelum masuk ke boiler sehingga kerja boiler tidak terlalu berat dan apabila kinerja *High pressure heater* menurun akan berakibat naiknya konsumsi bahan bakar pada boiler sehingga menurunkan efisiensi PLTU dan biaya produksi meningkat. Alat ini terdiri dari sebuah *shell* silindris dibagian luar dan sejumlah *tube* (*tube bundle*) di bagian dalam, dimana temperature fluida di dalam *bundle* berbeda dengan di luar *tube* (di dalam *shell*) sehingga terjadi perpindahan panas antara aliran fluida di dalam *tube* dan di luar *tube* (Pardosi, S. C. P., 2018).



Gambar 1. *High pressure heater*

(PLTU Unit 1 Pangkalan Susu Operation And Maintenance Unit PT Indonesia Power, 2020)

Faktor Pengotoran

Faktor pengotoran ditentukan berdasarkan harga koefisien perpindahan panas menyeluruh baik dalam kondisi bersih ataupun kotor. Pengotoran ini dapat terjadi karena endapan dari fluida yang mengalir, dan juga disebabkan oleh korosi pada komponen dari *heat exchanger* akibat pengaruh dari jenis fluida yang dialirinya. Terjadinya pengotoran tersebut dapat mempengaruhi temperatur fluida mengalir juga koefisien perpindahan panas menyeluruh dari fluida tersebut. Beberapa faktor yang dipengaruhi akibat pengotoran antara lain temperatur fluida, temperatur dinding plat dan kecepatan aliran fluida (Iskandar S, 2014; Muin, S. A., 1988). Faktor pengotoran harus didapatkan dari percobaan yaitu dengan menentukan perpindahan panas menyeluruh untuk kondisi bersih dan kondisi kotor pada alat penukar kalor sebagai berikut: (Iskandar S, 2014; Muin, S. A., 1988)

$$Rf = \frac{1}{U_{kotor}} - \frac{1}{U_{bersih}} \tag{1}$$

Rf = faktor pengotoran (*fouling factor*)

U_{kotor} = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh direncanakan [W/m²°C]

U_{bersih} = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh bersih [W/m²°C]

Nilai faktor pengotoran untuk berbagai fluida ditunjukkan pada tabel di bawah ini

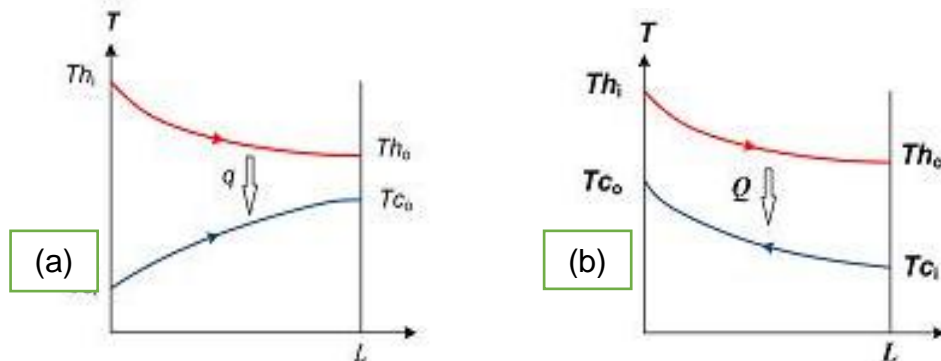
Tabel 1. Nilai faktor pengotoran untuk berbagai fluida (Iskandar, S, 2014)

Jenis fluida	Faktor pengotoran	
	R, ft ² ·°F/Btu	(m ² °C/W)
Air laut, di bawah 125 °F	0,0005	0,00009
Di atas 125 °F	0,001	0,002
Air umpan ketel yang diolah	0,001	0,0002
Minyak bakar	0,005	0,0009
Minyak celup	0,004	0,0007
Uap alkohol	0,0005	0,00009
Uap, tak mengandung minyak	0,0005	0,00009
Udara industri	0,002	0,0004
Zat cair pendingin	0,001	0,0002

Analisis Perhitungan Alat Penukar Kalor

1. Analisis Efektivitas dengan Pendekatan LMTD

Pendekatan LMTD (*log mean temperature difference*) dalam analisis penukar kalor berguna jika temperatur masuk dan keluar diketahui sehingga LMTD dapat dihitung. Temperatur antara fluida panas dan fluida dingin pada waktu masuk dan pada waktu keluar tidaklah sama (JP.Holman, 1997).



Gambar 2. Profil temperatur untuk aliran sejajar (a) dan aliran lawan arah (b) dalam penukar kalor (Iskandar, S, 2014)

Jika aliran panas dan dingin masuk atau keluar di kedua ujung penukar panas maka LMTD didefinisikan dengan persamaan 2 sebagai berikut (Iskandar S, 2014):

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(Th_2 - Tc_2) - (Th_1 - Tc_1)}{\ln \frac{(Th_2 - Tc_2)}{(Th_1 - Tc_1)}} \tag{2}$$

T_{h1} = Temperatur *inlet* pada sisi panas [°C], [K]

T_{h2} = Temperatur *outlet* pada sisi panas [°C], [K]

T_{c1} = Temperatur *inlet* pada sisi dingin [°C], [K]

T_{c2} = Temperatur *outlet* pada sisi dingin [°C], [K]

2. Bilangan Reynolds

Untuk menentukan jenis aliran laminar maupun turbulen ditunjukkan oleh bilangan reynolds (Iskandar S, 2014; Muin, S. A., 1988). Aliran laminar merupakan aliran fluida yang dapat bergerak dengan kondisi yang membentuk garis-garis alir yang tidak berpotongan satu sama lain. Aliran turbulen merupakan aliran fluida yang partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuatif yang saling berinteraksi. Jenis aliran fluida dapat ditentukan dari bilangan reynoldsnya pada persamaan 3 sebagai berikut: (Kreith, F., 2018; Iskandar S, 2014):

$$Re = \frac{\rho Dv}{\mu} = \frac{Dv}{\nu} \quad (3)$$

- D = Diameter pipa [m]
 v = Kecepatan aliran [m/s]
 ρ = Kerapatan massa fluida [kg/m³]
 μ = Kekentalan dinamik [Pa.s]
 ν = Kekentalan kinematik [m²/s]

Dengan ketentuan:

Aliran laminar ($Re < 2000$)

Aliran transisi ($2000 < Re < 4000$)

Aliran turbulen ($Re > 4000$)

3. Analisis dengan metode Efektivitas

Analisis dengan menggunakan metode yang berdasarkan efektifitas penukar panas dalam memindahkan sejumlah panas tertentu. Perpindahan panas sebenarnya dapat dihitung dari energi yang dilepaskan oleh fluida panas atau energi yang diterima oleh fluida dingin. Untuk penukar kalor aliran sejajar (Iskandar S, 2014; Irijanto, M. Z., 2012):

Persamaan 4 yaitu efektifitas dalam aliran sejajar, jika fluida minimum adalah fluida dingin (Putra, D. S. N., 2012)

$$\varepsilon_c = \frac{\dot{m}_c C_c (T_{c2} - T_{c1})}{\dot{m}_c C_c (T_{h1} - T_{c1})} = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (4)$$

Persamaan 5 yaitu efektifitas dalam aliran sejajar, jika fluida minimum adalah fluida panas

$$\varepsilon_h = \frac{\dot{m}_h C_h (T_{h1} - T_{h2})}{\dot{m}_h C_h (T_{h1} - T_{c1})} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (5)$$

Persamaan 6 yaitu efektifitas dalam aliran lawan arah, jika fluida minimum adalah fluida dingin

$$\varepsilon_c = \frac{\dot{m}_c C_c (T_{c1} - T_{c2})}{\dot{m}_c C_c (T_{h1} - T_{c2})} = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c2}} \quad (6)$$

Persamaan 7 yaitu efektifitas dalam aliran lawan arah, jika fluida minimum adalah fluida panas

$$\varepsilon_h = \frac{\dot{m}_h C_h (T_{h1} - T_{h2})}{\dot{m}_h C_h (T_{h1} - T_{c2})} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c2}} \quad (7)$$

METODE PENELITIAN

Prosedur Perhitungan Efektivitas Pemanas Tekanan Tinggi (*High Pressure Heater*)

Untuk menghitung efektifitas pemanas tekanan tinggi (*high pressure heater*), dapat ditentukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Menentukan temperatur rata-rata air dan uap air
2. Menentukan sifat-sifat fluida pada temperatur rata-rata air dan uap air dengan menggunakan tabel (*properties of saturated water*)
3. Menentukan beda temperatur rata-rata (ΔT_{LMTD})
4. Menentukan bilangan reynolds pada *shell* dan *tube*
5. Menghitung faktor perpindahan panas berdasarkan jenis aliran masing-masing pada

6. Menghitung koefisien perpindahan panas menyeluruh
7. Menentukan faktor pengotoran
8. Menghitung laju perpindahan panas
9. Menghitung jumlah kalor yang dipindahkan
10. Menghitung efektivitas *high pressure heater*

Metode Analisis Data

Mencari landasan teori dan metode perhitungan yang dibutuhkan dalam penyusunan tugas akhir dengan judul yang telah ditentukan, studi kepustakaan kemudian mengumpulkan data yang diperlukan untuk perhitungan teoritis. Selanjutnya memasukkan data ke dalam metode perhitungan yang telah didapat untuk mengetahui hasil perhitungan yang diinginkan. Analisis data dilakukan untuk mengetahui hasil perhitungan efektivitas alat penukar kalot tipe *shell and tube*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data High Pressure Heater Unit 1 PLTU Pangkalan Susu Operation and Maintenance Unit PT Indonesia Power

Data pada *shell* sebagai berikut:

Fluida yang digunakan	: Bled Steam (uap ekstrasi turbin)
Temperatur uap masuk, T_{hi}	: 369,62°C
Temperatur uap keluar, T_{ho}	: 249,5°C
Laju aliran uap, \dot{m}_{uap}	: 7,167 kg/s
Diameter dalam, d_s	: 1,35 m
Jarak sekat, L_b	: 0,3 m
Jumlah laluan, n_{pass}	: 2

Data pada *tube* sebagai berikut:

Fluida yang digunakan	: Air umpan
Temperatur air masuk, T_{ci}	: 222,7°C
Temperatur air keluar, T_{co}	: 241,2°C
Laju aliran air, \dot{m}_{air}	: 157,778 kg/s
Diameter dalam, d_i	: 0,0204 m
Diameter luar, d_o	: 0,016 m
Jumlah <i>tube</i> , N_t	: 1936
Panjang <i>tube</i> , L	: 10 m
Pitch <i>tube</i> , P_t	: 1,8 $d_o = 1,8 (0,015 \text{ m}) = 0,0288 \text{ m}$

Menentukan sifat-sifat fluida dingin dan fluida panas

1. Temperatur rata-rata fluida dingin (air) dan fluida panas (uap air)

$$T_c = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2} = \frac{(222,7 + 241,2)^\circ\text{C}}{2} = 231,95^\circ\text{C}$$

$$T_h = \frac{T_{hi} + T_{ho}}{2} = \frac{369,62 + 249,5^\circ\text{C}}{2} = 309,56^\circ\text{C}$$

$$C_{p_{air}} = 4699,62 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$C_{p_{uap}} = 6897,76 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\mu_{air} = 0,115 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$$

$$\mu_{uap} = 2,017 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

$$Pr_{air} = 0,847$$

$$Pr_{uap} = 1,82$$

$$\rho_{air} = 824,41 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{uap} = 54,954 \text{ kg/m}^3$$

$$k_{air} = 0,639 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$k_{uap} = 0,076 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

2. Menghitung Beda Temperatur Rata-rata (ΔT_{LMTD})

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(Th_i - Tc_o) - (Th_o - Tc_i)}{\ln \frac{(Th_i - Tc_o)}{(Th_o - Tc_i)}}$$

$$= \frac{(369,62 - 241,2)^\circ\text{C} - (249,5 - 222,7)^\circ\text{C}}{\ln \frac{(369,62 - 241,2)^\circ\text{C}}{(249,5 - 222,7)^\circ\text{C}}} = \frac{(128,42 - 26,8)^\circ\text{C}}{\ln \frac{128,42^\circ\text{C}}{26,8^\circ\text{C}}} = 64,891^\circ\text{C}$$

3. Menentukan Bilangan Reynold pada Shell dan Tube

1. Bilangan Reynold pada tube

$$Re_t = \frac{Vt \, di}{\nu}$$

$$= \frac{0,3026 \, \text{m/s} \cdot 0,0204 \, \text{m}}{1,394 \times 10^{-7} \, \text{m}^2/\text{s}} = 44282 \, (Re > 4000 \, \text{aliran turbulen})$$

2. Bilangan Reynold pada shell

$$Re_s = \frac{Vs \times De}{\nu}$$

Nilai De ditentukan berdasarkan pola susunan tube. Pola susunan tube High Pressure Heater ini adalah triangular,

$$De = \frac{4 \left(0,5Pt \times 0,866Pt - 0,5\pi \cdot \frac{do^2}{4} \right)}{0,5\pi \, do}$$

$$= \frac{4 \left(0,5 \cdot 0,0288 \, \text{m} \times 0,866 \cdot 0,0288 \, \text{m} - 0,5 \cdot 3,14 \cdot \frac{(0,016 \, \text{m})^2}{4} \right)}{0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,016 \, \text{m}}$$

$$= \frac{0,00103467 \, \text{m}^2}{0,02512 \, \text{m}} = 0,041189 \, \text{m}$$

$$\text{Maka, } Re_s = \frac{Vs \, De}{\nu}$$

$$= \frac{0,7245 \, \text{m/s} \cdot 0,041189 \, \text{m}}{3,6703 \times 10^{-7} \, \text{m}^2/\text{s}} = 81305,153 \, (Re > 4000 \, \text{aliran turbulen})$$

3. Menghitung Koefisien Perpindahan Panas

Koefisien perpindahan panas pada tube:

$$h_i = \frac{Nu_t \cdot k_{\text{air}}}{di} = \frac{112,166 \cdot 0,639 \, \text{W/m}^\circ\text{C}}{0,0204 \, \text{m}} = 3513,43 \, \text{W/m}^2^\circ\text{C}$$

Koefisien perpindahan panas pada shell:

$$h_o = \frac{Nu_s \cdot k_{\text{uap}}}{De} = \frac{81,964 \cdot 0,076 \, \text{W/m}^\circ\text{C}}{0,041189 \, \text{m}} = 151,236 \, \text{W/m}^2^\circ\text{C}$$

4. Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh dan Menentukan Faktor Pengotoran Dengan temperatur dinding tube 270,75°C, maka diperoleh nilai k baja karbon sebesar 35 W/m°C

$$Uo = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{r_o \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}{k} + \frac{1}{h_o}}$$

$$= \frac{1}{\frac{0,008 \, \text{m}}{0,010 \, \text{m}} \cdot \frac{1}{3513,43^\circ\text{C}} + \frac{0,008 \, \text{m} \cdot \ln \left(\frac{0,008 \, \text{m}}{0,010 \, \text{m}} \right)}{35 \, \text{W/m}^\circ\text{C}} + \frac{1}{151,236 \, \text{W/m}^2^\circ\text{C}}}$$

$$= 147,318 \, \text{W/m}^2^\circ\text{C}$$

$R_{di} = 0,0002 \text{ m}^2\text{°C}/\text{W}$ (air umpan ketel yang diolah)

$R_{do} = 0,00009 \text{ m}^2\text{°C}/\text{W}$ (uap, tak mengandung minyak)

Maka:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_o} + U = R_{di} + R_{do}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{147,318 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}} + 0,0002\text{m}^2\text{°C}/\text{W} + 0,00009 \text{ m}^2\text{°C}/\text{W}, U$$

$$= 141,283 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$$

Untuk menentukan nilai faktor koreksi (F) dapat melalui diagram/grafik Maka $F = 1$

5. Laju Perpindahan Kalor

$$Q_{PP} = U_o A_o \Delta T_{LMTD} F$$

$$= 147,318 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{°C} \cdot 1945,29 \text{ m}^2 \cdot 64,891 \text{°C}.$$

$$= 18596218 \text{ W}$$

$$Q_{total} = \dot{m}_{air} \cdot C_{p_{air}} (T_{c_o} - T_{c_i})$$

$$= 157,778 \text{ kg}/\text{s} \cdot 4699,62 \text{ J}/\text{kg}\text{°C} (241,2 - 222,7)\text{°C}$$

$$= 13717687,92 \text{ J}/\text{s} = 13717687,92 \text{ W}$$

6. Menghitung Efektivitas High pressure heater

$$\varepsilon = \frac{(Th_i - Th_o)}{(Th_i - Tc_o)} \times 100\%$$

$$= \frac{(369,62 - 249,5)\text{°C}}{(369,62 - 241,2)\text{°C}} \times 100\% = 93,53\%$$

KESIMPULAN

Setelah mengamati dan menganalisis perpindahan panas yang terjadi pada *high pressure heater* pada Unit 1 PLTU Pangkalan Susu *Operation and Maintenance* Unit PT Indonesia Power diperoleh simpulan Koefisien perpindahan panas *shell* (h_o) adalah $151,236 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$, Koefisien perpindahan panas *tube* (h_i) adalah $3513,43 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$; Laju perpindahan kalor (Q_{PP}) adalah 18596218 W , Perpindahan panas total adalah $13717687,92 \text{ W}$; sehingga efektivitas *high pressure heater* dihitung berdasarkan metode Efektivitas adalah $93,53\%$ dan nilai ini efektif untuk tekanan yang tinggi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan oleh Politeknik Negeri Medan (POLMED). Penulis juga mengucapkan terima kasih pada dosen pembimbing Dr. Arridina Susan Silitonga, S.T., M.Eng. yang telah banyak memberikan pelatihan dan bimbingan tentang penulisan jurnal ini.

REFERENSI

- El – Wakil, M.M., 1992, *Instalasi Pembangkit Daya*, Jakarta, Erlangga.
 Haryanto, A., 2015., *Perpindahan Panas*. Innosain, Yogyakarta.
 Iftadi, I., 2015, *Kelistrikan industri*, Yogyakarta, Graha Ilmu.
 Irijanto,. M. Z., 2012, *Pengujian Efektivitas Penukar Kalor Multi Flat Plate Heat Exchanger Aluminium dengan Aliran Cross Flow*, Jurnal Teknik Mesin, Universitas Diponegoro.
 Iskandar, S. 2014, *Perpindahan Kalor*, Jakarta, Erlangga.
 Kreith, F., 2018, *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*. Edisi ketiga, Jakarta, Erlangga.

- Muin, S. A., 1988, *Pesawat-pesawat Konversi Energi 1 (Ketel Uap)*, Rajawali Pres, Jakarta.
- Pardosi, S. C. P., 2018. Analisis Efektivitas *High Pressure Heater* Unit 2 dengan Beban 67 MW dan Tekanan 0,85 MPa pada PLTU Labuhan Angin, Tugas Akhir. Medan, Program Studi Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Medan.
- PLN., 2014, Pengoperasian PLTU, Pangkalan Susu: Pusat Pendidikan dan Pelatihan
- Pudjanarsa A dan Nurtemperaturd D., 2014, *Mesin Konversi Energi*, Andi, Yogyakarta.
- Putra, D. S. N., 2012, *Alat Penukar Kalor*, Depok, Departemen Teknik Mesin UI.
- Shiyakhin. P., 2017, *Turbin Uap*, Erlangga, Jakarta.
- Silalahi, R. L., 2015, Analisis Performansi *High Pressure Heater* Unit 4 dengan laju aliran air 64,28 kg/s di PLTU PT PLN (Persero)Pembangkitan Sumbagut Sektor Belawan. Tugas Akhir Program Studi Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Medan
- Soekardi, C., 2015, *Termodinamika Dasar Mesin Konversi Energi*, Andi, Yogyakarta.