

Analisis Laju Perpindahan Panas dan Efektivitas pada Kondensor Unit 2 PT XYZ Kabupaten Tabalong (Kalsel)

Agatha Risky Widjaja^{1*}, Arif Kurniawan¹

¹ Program Studi Teknik Mesin S1 Institut Teknologi Nasional Malang, Jawa Timur, Indonesia

Kata kunci

Kondensor
Perpindahan Panas
Efektivitas
LMTD
NTU
PLTU

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memerlukan sistem kondensasi yang efisien untuk menjaga kontinuitas dan efisiensi proses konversi energi. Penelitian ini bertujuan menganalisis laju perpindahan panas dan efektivitas pada kondensor Unit 2 PLTU PT XYZ, Kabupaten Tabalong, Kalimantan Selatan. Metode yang digunakan adalah Log Mean Temperature Difference (LMTD) dan Number of Transfer Unit (NTU) dengan menghitung overall heat transfer coefficient, bilangan Reynolds, dan bilangan Nusselt berdasarkan data aktual tanggal 1–2 Desember 2024. Hasil perhitungan menunjukkan laju perpindahan panas total sebesar 31.093.053,35 Watt, sedangkan nilai overall heat transfer coefficient (U) mencapai 1.553,66 W/m²·K. Efektivitas kondensor berdasarkan metode NTU sebesar 45,89%, yang menunjukkan bahwa kinerja kondensor belum optimal. Ditemukan bahwa semakin tinggi kevakuman di dalam kondensor, semakin mudah uap mengalir dan terkondensasi, sehingga meningkatkan efisiensi sistem. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi evaluasi kinerja sistem kondensasi di PLTU serta sebagai referensi dalam pengembangan strategi pemeliharaan, perbaikan desain, dan peningkatan efisiensi termal di masa mendatang.

* Corresponding author:

Nama corresponding author (email: widjajaagatha@gmail.com)

Diterima: 23 Agustus 2025

Disetujui: 27 Januari 2026

Dipublikasikan: 31 Maret 2026

1 Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memiliki peran penting dalam mendukung pasokan energi listrik nasional, terutama di kawasan industri yang membutuhkan daya besar [1]. PLTU PT XYZ di Kabupaten Tabalong, Kalimantan Selatan, memiliki kapasitas terpasang sebesar 2×30 MW dengan menggunakan teknologi *Circulating Fluidized Bed Combustion* (CFBC) yang mampu memanfaatkan batubara berkalori rendah dengan tingkat emisi lebih terkendali. Salah satu komponen vital pada siklus termal PLTU adalah kondensor, yang berperan mengubah uap hasil keluaran turbin menjadi air kondensat untuk digunakan kembali dalam siklus Rankine [2].

Efisiensi kondensor secara langsung memengaruhi kinerja pembangkit. Penurunan efektivitas pada kondensor dapat mengakibatkan turunnya efisiensi termal, peningkatan pemakaian bahan bakar, disertai bertambahnya emisi gas buang [3]. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kinerja kondensor meliputi *fouling* pada permukaan pipa, temperatur dan laju aliran air pendingin, tekanan vakum, serta karakteristik aliran fluida. Oleh karena itu, evaluasi berkala diperlukan untuk memastikan kondensor beroperasi pada kondisi optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju perpindahan panas dan efektivitas kondensor Unit 2 PLTU PT XYZ dengan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) dan *Number of Transfer Unit* (NTU). Data penelitian diperoleh dari pengukuran pada kondisi operasi *steady-state* selama 1–2 Desember 2024. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi acuan untuk evaluasi kinerja kondensor serta sebagai dasar perumusan strategi peningkatan efisiensi termal pembangkit.

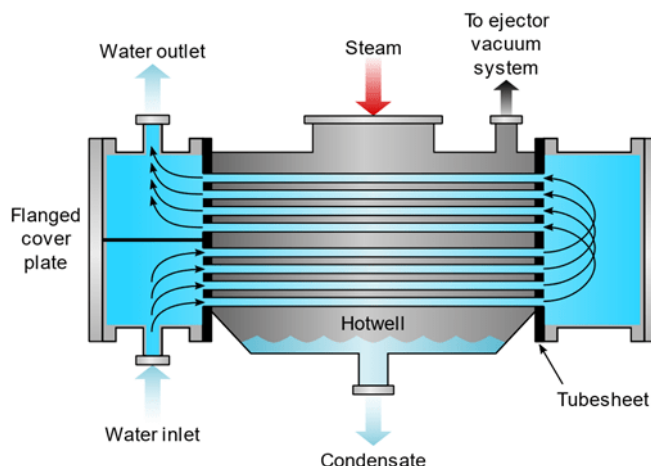
2 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi kasus pada kondensor Unit 2 PLTU PT XYZ di Kabupaten Tabalong, Kalimantan Selatan. Data yang digunakan terdiri dari data teknis kondensor dan data operasi aktual yang diperoleh langsung dari control room pada tanggal 1–2 Desember 2024 saat pembangkit beroperasi pada kondisi steady-state [7].

Tahapan penelitian meliputi:

2.1 Studi Literatur

Pengumpulan referensi dari buku, artikel ilmiah dan studi sebelumnya yang membahas sistem kondensor, metode perhitungan Log Mean Temperature Difference (LMTD) dan Number of Transfer Unit (NTU), serta variabel-variabel yang memengaruhi perpindahan panas [4].



Gambar 1. Sistem Kondesor

2.2 Pengumpulan Data Teknis dan Operasional

Data teknis meliputi jumlah pipa, diameter luar dan dalam pipa, panjang pipa, jenis material, dan susunan aliran. Data operasi mencakup suhu uap pada inlet dan outlet, suhu air pendingin pada inlet dan outlet tekanan vakum, serta laju aliran massa uap dan air pendingin.

Tabel 1. Data spesifikasi desain

Design Spesification	
Jumlah Tube (N)	2994
Type	Two Pass, Horizontal, Surface Kondensor
Number of Water Passes	Two (2)
Outside Diameter (Do)	23 mm
Thicknes	0,5 mm
Efective Lenght (L)	7800 mm
Vacum Condensor	0,903 Bar
Luas Penampang (A)	1687 m ²
Cooling Water	Treated Boiler Feedwater
Flow Rate (Q)	4100 m ³ /h
Velocity In Tube (V)	$Q = V/A = 0,000675$ m/s
Turbin Exhaust	92,46 th/h = 92.460 kg/h

Tabel 2. Data aktual

Actual Data	
Condenser Vacuum	- 0,958 Bar
Treated cooling Inlet Temperature (T_{ci})	29,88 °C
Treated cooling Outlet Temperature (T_{co})	33,996 °C
Steam inlet temperature (T_{hi})	38,36 °C
Steam outlet temperature (T_{ho})	38 °C

2.3 Perhitungan Parameter Termal

Perhitungan meliputi faktor koreksi sesuai konfigurasi aliran, koefisien perpindahan panas menyeluruh (U), bilangan Reynolds (Re), bilangan Nusselt (Nu), dan laju perpindahan panas (Q). Rumus-rumus yang digunakan mengacu pada literatur standar perpindahan panas [4].

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{\frac{4}{5}} \times Pr^n \quad (2)$$

$$Re_D^{\frac{4}{5}} \times Pr^n \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R''_{f,o} + \frac{r_o}{k} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + R''_{f,i} \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \frac{1}{h_i}} \quad (4)$$

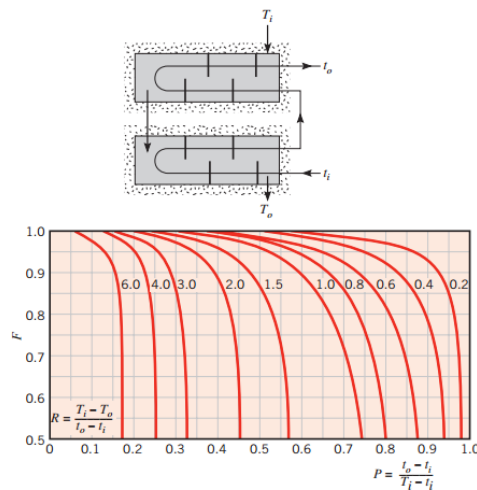


FIGURE 11S.2 Correction factor for a shell-and-tube heat exchanger with two shell passes and any multiple of four tube passes (four, eight, etc., tube passes).

Gambar 2. Faktor koreksi cros flow

2.4 Perhitungan Efektivitas Kondensor

Efektivitas dihitung menggunakan metode NTU–Effectiveness dengan membandingkan kapasitas panas minimum dan maksimum, serta rasio kapasitas panas[5].

$$Cr = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (1)$$

(2)

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1 + \exp [- (NTU)_1 (1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}}]}{1 - \exp [- (NTU)_1 (1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}}]} \right\}^{-1} \quad (3)$$

2.5 Analisis Hasil

Hasil perhitungan dibandingkan dengan nilai rujukan dari literatur untuk menilai kondisi kinerja aktual kondensor dan menentukan penyebab perbedaan yang terjadi.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Hasil Pengukuran Lapangan

Pengukuran lapangan dilakukan pada kondensor Unit 2 PLTU PT XYZ pada 1–2 Desember 2024 saat unit beroperasi pada kondisi steady-state. Data yang diambil meliputi suhu uap inlet, suhu inlet dan outlet air pendingin, tekanan vakum, serta debit massa uap dan air pendingin.

Tabel 3. Data aktual

Actual Data	
Condenser Vacuum	- 0,958 Bar
Treated cooling Inlet Temperature (Tci)	29,88 °C
Treated cooling Outlet Temperature (Tco)	33,996 °C
Steam inlet temperature (Thi)	38,36 °C
Steam outlet temperature (Tho)	38 °C

3.2 Perhitungan ΔT_{LM} (Log Mean Temperature Difference)

ΔT_{LM} dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai ΔT_{LM} di setiap zona

$$\begin{aligned} \Delta T_{LM} &= \\ \Delta T_{LM,desup} &= 12,0309 \text{ K} \times 0,985 = 11,85043 \text{ K} \\ \Delta T_{LM,cond} &= 26,7167 \text{ K} \times 0,985 = 26,31600 \text{ K} \\ \Delta T_{LM,subcool} &= 16,46511 \text{ K} \times 0,985 = 16,218133 \text{ K} \end{aligned}$$

3.3 Perhitungan Laju Perpindahan Panas Total

Persamaan dasar yang digunakan adalah:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

di mana:

A = luas permukaan perpindahan panas kondensor

Q = laju perpindahan panas

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$\begin{aligned} q_{tot} &= q_{desuperheating} + q_{condensing} + q_{subcooling} = (1170,92680 + 31090999,938 + 882,48060) Watt \\ &= 31093053,3454 Watt \end{aligned}$$

3.4 Perhitungan Overall Heat Transfer Total(U)

Pada perhitungan ini digunakan rumus sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R''_{f,o} + \frac{r_o}{k} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + R''_{f,i} \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \frac{1}{h_i}}$$

Keterangan:

U = overall heat transfer coefficient (W/mk)

h_o = koefisien konveksi di luar tube (W/m²K)

h_i = koefisien konveksi di dalam tube (W/m²K)

r_o = jari-jari luar tube (m)

r_i = jari-jari dalam tube (m)

k = konduktivitas thermal (W/mk)

$R''_{f,o}$ = fouling factor di luar tube (m²K/W)

$R''_{f,i}$ = fouling factor di dalam tube (m²K/W)

U_{total}

$$\begin{aligned} U_{tot} &= U_{desuperheating} + U_{condensing} + U_{subcooling} = (14,31254 + 1407,33544 + 132,01161) \frac{W}{m^2 \cdot k} \\ &= 1553,65959 \frac{W}{m^2 \cdot k} \end{aligned}$$

Nilai U ini masih berada dalam kisaran wajar untuk kondensor tipe surface.

3.5 Perhitungan Efektivitas Kondensor

Perhitungan efektivitas kondensor diawali dengan menentukan nilai kapasitas panas fluida dingin (Cc) dan fluida panas (Ch), yaitu:

- Kapasitas panas pada sisi tube :

$$\begin{aligned} C_c &= \dot{m}_c \times C_{p,f} \\ &= 508,9248 \frac{kg}{s} \times 4,178 \frac{kJ}{kg.k} \\ &= 2126,2878 \frac{kJ}{s} \rightarrow (C_{max}) \end{aligned}$$

- Kapasitas panas di sisi shell :

$$\begin{aligned} C_h &= \dot{m}_h \times (C_{p,s} + C_{p,g} + C_{p,f}) \\ C_h &= 3,73855 \frac{kg}{s} \times (1,877 + 1,877 + 4,178) \frac{kJ}{kg.k} \\ &= 29,6541786 \frac{kJ}{s.k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_r &= \frac{C_{min}}{C_{max}} \\ &= \frac{29,6541786 \frac{kJ}{s.k}}{2126,2878 \frac{kJ}{s.k}} \\ &= 0,0139465 \frac{kJ}{s.k} \end{aligned}$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

$$NTU = \frac{1553,65959 \frac{W}{m^2.k} \times \pi \times 0,023 m \times 7,800 \times 1687}{29,6541786 \frac{kJ}{s.k}}$$

$$NTU = 49814,48707$$

Mengacu pada penggunaan zona kondensasi pada kondensor tipe shell and tube dengan dua lintasan pipa (2 tube passes), persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1 + \exp [-(NTU)_1 (1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}}]}{1 - \exp [-(NTU)_1 (1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}}]} \right\}^{-1}$$

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + 0,0139465 + (1 + 0,0139465^2)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1 + \exp [-(49814,48707)_1 (1 + 0,0139465^2)^{\frac{1}{2}}]}{1 - \exp [-(49814,48707)_1 (1 + 0,0139465^2)^{\frac{1}{2}}]} \right\}^{-1}$$

$$\varepsilon = 0,458896$$

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kinerja kondensor Unit 2 PLTU PT XYZ, diketahui bahwa kondensor bertipe two pass horizontal surface condenser dengan debit air pendingin 4.100 m³/jam atau 90% dari kapasitasnya mampu menghasilkan laju perpindahan panas total sebesar 31,09 MW, di mana kontribusi terbesar berasal dari zona condensing. Nilai koefisien perpindahan panas total yang diperoleh sebesar 1.553,66 W/m²·K menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam memindahkan panas masih berada pada kategori baik. Hasil perhitungan menggunakan metode NTU–Effectiveness menghasilkan NTU sebesar 49.814,48 dengan efektivitas 45,89%, yang mengindikasikan bahwa kapasitas perpindahan panas memadai, namun masih terdapat peluang peningkatan kinerja melalui optimasi kondisi operasi maupun perbaikan desain. Faktor-faktor yang memengaruhi performa kondensor meliputi temperatur air pendingin masuk yang relatif tinggi, laju aliran massa fluida yang bervariasi, serta potensi fouling pada permukaan perpindahan panas.

5 Referensi

- [1] Anwar, M., 2018., Perencanaan Pengering Sepatu Boot dengan Memanfaatkan Panas Buang Udara Kondensor., Universitas Muhammadiyah Malang., Malang
- [2] Anggara, E. R., & Gaos, Y. S., 2022., Analisis Eksergi Kondensor pada PLTU Batu Bara Kapasitas 65 MW Bukit Asam., ALMIKANIK, Vol. 4, No. 1, hlm. 15–21., Universitas Ibn Khaldun., Bogor
- [3] Suardi, Chairat, Muhammad, Impak, & Tekuk, 2017., Analisis Performa Kondensor di PT. Indonesia Power UJP PLTU Lontar Banten Unit 2., Jurnal Power Plant, Vol. 4, No. 4., Universitas Muhammadiyah Tangerang., Tangerang.
- [4] Incropera, F. P., & Dewitt, D. P., 2011., Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Seventh Edition), John Wiley & Sons., Singapore.
- [5] Moran, M. J., & Shapiro, H. N., 2006., Fundamentals of Engineering Thermodynamics (5th Edition), John Wiley & Sons., New York.