



Analisis dan Optimasi Efisiensi Perpindahan Panas pada *Condenser* PLTGU Priok Blok 4 Menggunakan Sistem Pendingin Air Laut

Achmad Firman Muzzaky^{1*}, Muhammad Safi'i², Althesa Androva³

¹⁻³ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Indonesia

Email: muzzakyfirman@gmail.com¹, muhammadsafii@upgris.ac.id², althesaandrova@upgris.ac.id³

*Penulis Korespondensi: muzzakyfirman@gmail.com

Abstract. *The condenser is an essential component in a Combined Cycle Power Plant (CCPP), where it functions to convert exhaust steam from the turbine into condensate so it can be reused in the power generation cycle. In addition, the condenser helps maintain a vacuum condition at the turbine outlet, which plays an important role in overall system performance. This study aims to evaluate the heat transfer performance of the condenser at PLTGU Priok Block 4 using a seawater cooling system. The analysis is carried out using the Log Mean Temperature Difference (LMTD) method along with the calculation of condenser efficiency based on actual operational data. The observed data show that the inlet seawater temperature is 30.5°C, the outlet temperature is 36°C, and the steam temperature is 41°C. The results indicate that the LMTD value is 7.42°C, while the condenser efficiency reaches 52.38%. These findings suggest that heat transfer is occurring reasonably well, although there is still room for improvement. Several factors affecting the condenser performance include fouling on the tube surface, non-optimal fluid flow, and thermal resistance within the system. Therefore, optimization efforts such as regular tube cleaning, improving the cooling water flow rate, and maintaining the vacuum system are necessary to enhance the overall performance of the condenser.*

Keywords: *Combined Cycle Power Plant; Condenser; Efficiency; Heat Transfer; LMTD.*

Abstrak. *Condenser merupakan salah satu komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) yang berfungsi untuk mengubah uap buang turbin menjadi air kondensat agar dapat digunakan kembali dalam siklus pembangkit. Selain itu, condenser juga berperan dalam menjaga kondisi vakum yang mempengaruhi kinerja turbin secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja perpindahan panas pada condenser PLTGU Priok Blok 4 dengan menggunakan sistem pendingin air laut. Analisis dilakukan menggunakan metode Log Mean Temperature Difference (LMTD) serta perhitungan efisiensi condenser berdasarkan data operasional aktual. Berdasarkan data yang diperoleh, temperatur air laut masuk sebesar 30,5°C, temperatur keluar sebesar 36°C, dan temperatur uap sebesar 41°C. Hasil perhitungan menunjukkan nilai LMTD sebesar 7,42°C dan efisiensi condenser sebesar 52,38%. Hasil ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas sudah berlangsung dengan cukup baik, namun masih terdapat potensi peningkatan kinerja. Beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja condenser antara lain fouling pada permukaan tube, kondisi aliran fluida yang belum optimal, serta adanya hambatan perpindahan panas. Oleh karena itu, diperlukan upaya optimasi seperti pembersihan tube secara berkala, peningkatan aliran air pendingin, serta perbaikan sistem vakum untuk meningkatkan efisiensi condenser.*

Kata Kunci: *Condenser; Efisiensi; LMTD; Perpindahan Panas; PLTGU.*

1. LATAR BELAKANG

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) dikenal sebagai salah satu sistem pembangkit yang memiliki efisiensi tinggi karena menggabungkan dua siklus, yaitu turbin gas dan turbin uap. Dalam sistem ini, *condenser* memiliki peran yang sangat penting, yaitu mengubah uap bekas dari turbin menjadi air kembali agar dapat digunakan ulang dalam siklus pembangkit. Selain itu, *condenser* juga membantu menjaga kondisi vakum pada sisi keluaran turbin, yang sangat berpengaruh terhadap kinerja turbin itu sendiri. Kinerja *condenser* sangat bergantung pada seberapa efektif proses perpindahan panas yang terjadi di dalamnya. Pada

PLTGU Priok Blok 4, air laut digunakan sebagai media pendingin karena mudah diperoleh dan memiliki kemampuan menyerap panas yang cukup baik. Namun, penggunaan air laut juga membawa tantangan tersendiri, seperti terbentuknya kerak (*fouling*), korosi, dan penumpukan kotoran pada pipa-pipa *condenser*. Kondisi ini dapat menghambat perpindahan panas dan pada akhirnya menurunkan efisiensi sistem. Untuk memahami seberapa baik kinerja *condenser*, diperlukan metode analisis yang tepat. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), yang dapat memberikan gambaran lebih akurat mengenai perbedaan temperatur selama proses perpindahan panas berlangsung. Selain itu, efisiensi *condenser* juga dapat dihitung untuk mengetahui seberapa besar kemampuan sistem dalam menyerap panas dari uap yang masuk. Berdasarkan data operasional yang diperoleh, temperatur air laut masuk ke *condenser* adalah 30,5°C, sedangkan temperatur keluar mencapai 36°C. Sementara itu, temperatur uap yang didinginkan berada pada 41°C. Data ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas memang terjadi, namun belum tentu berada pada kondisi yang optimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui tingkat efisiensi serta potensi peningkatan kinerja *condenser*. Melalui penelitian ini, dilakukan analisis kinerja *condenser* menggunakan metode LMTD dan perhitungan efisiensi berdasarkan data aktual. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja *condenser* serta memberikan rekomendasi upaya optimasi yang dapat diterapkan. Dengan demikian, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran kondisi nyata di lapangan sekaligus menjadi dasar untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkit secara keseluruhan.

2. KAJIAN TEORITIS

Perpindahan Panas pada Condenser

Perpindahan panas pada *condenser* terjadi melalui mekanisme konveksi dan konduksi. Uap yang berada di sisi *shell* akan melepaskan panasnya ke dinding *tube*, kemudian panas tersebut diteruskan ke air pendingin di dalam *tube*.

Secara umum, laju perpindahan panas dirumuskan sebagai:

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

Dimana:

Q = laju perpindahan panas

U = koefisien perpindahan panas menyeluruh

A = luas permukaan perpindahan panas

ΔT = perbedaan temperatur

Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Untuk mendapatkan analisis yang lebih akurat, digunakan metode LMTD:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Metode ini mempertimbangkan perubahan temperatur sepanjang *heat exchanger*.

Efisiensi Condenser

Efisiensi *condenser* dapat dihitung dengan pendekatan efektivitas:

$$\eta = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{steam} - T_{in}} \times 100\%$$

Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi

- a. *Fouling* pada *tube*
- b. Laju aliran air pendingin
- c. Kondisi vakum
- d. Gas non-kondensabel
- e. Distribusi aliran fluida

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu studi literatur berdasarkan manual *condenser* untuk memahami spesifikasi dan karakteristik alat, dilanjutkan dengan pengumpulan data operasional yang diperlukan selama proses pengamatan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) untuk menentukan karakteristik perpindahan panas pada *condenser*. Selanjutnya dilakukan perhitungan efisiensi *condenser* berdasarkan hasil analisis termal yang diperoleh. Tahap akhir penelitian adalah evaluasi dan optimasi kinerja *condenser* guna mengetahui tingkat performa serta potensi peningkatan efisiensi sistem.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN**Data Operasional**

- a. Temperatur air laut masuk: 30,5°C
- b. Temperatur *steam turbin*: 41°C
- c. Temperatur air laut keluar: 36°C

Perhitungan LMTD

Diketahui:

- Temperatur *steam* = 41°C
- Temperatur air laut masuk = 30,5°C
- Temperatur air laut keluar = 36°C

Selisih Temperatur Sisi Inlet

$$\Delta T_1 = 41 - 30,5 = 10,5^\circ C$$

Selisih Temperatur Sisi Outlet

$$\Delta T_2 = 41 - 36 = 5^\circ C$$

Perhitungan LMTD

$$\Delta T_{lm} = \frac{10,5 - 5}{\ln(10,5/5)}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{5,5}{\ln(2,1)}$$

$$\ln(2,1) \approx 0,741$$

$$\Delta T_{lm} \approx 7,42^\circ C$$

Nilai LMTD sebesar $\pm 7,42^\circ C$ menunjukkan bahwa *driving force* perpindahan panas berada pada kategori sedang.

Interpretasi:

- Perpindahan panas tetap terjadi dengan baik
- Namun belum optimal karena ΔT semakin kecil di sisi outlet

Semakin besar nilai LMTD, maka:

- Laju perpindahan panas meningkat
- Kinerja *condenser* semakin optimal

Sebaliknya, nilai LMTD yang menurun mengindikasikan adanya hambatan perpindahan panas seperti *fouling* atau distribusi aliran yang tidak merata.

Perhitungan Efisiensi

Efisiensi *condenser* dapat dianalisis menggunakan konsep efektivitas *heat exchanger*, yaitu:

$$\eta = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{steam} - T_{in}} \times 100\%$$

Sehingga:

$$\eta = \frac{36 - 30,5}{41 - 30,5} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{5,5}{10,5} \times 100\%$$

$$\eta \approx 52,38\%$$

Nilai efisiensi sebesar $\pm 52,38\%$ menunjukkan bahwa:

- Sistem pendingin masih bekerja dengan cukup baik
- Air laut mampu menyerap panas dari uap secara signifikan

Namun jika dibandingkan dengan kondisi ideal, nilai ini masih dapat ditingkatkan.

Analisis Kinerja Condenser

Nilai efisiensi yang relatif rendah menunjukkan adanya hambatan dalam perpindahan panas. Hambatan tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh *fouling* pada *tube* akibat penggunaan air laut.

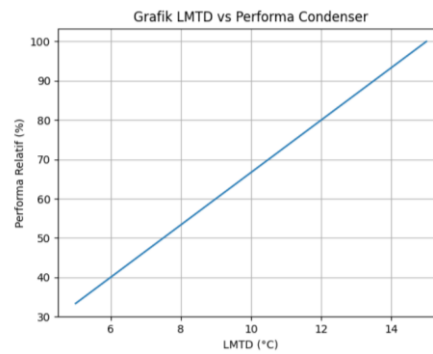
Fouling meningkatkan resistansi termal sehingga menurunkan nilai koefisien perpindahan panas (U). Selain itu, keberadaan gas non-kondensabel juga dapat mengurangi efektivitas perpindahan panas.

Tabel Analisis

Tabel 1. Perbandingan Kinerja *Condenser* Sebelum dan Sesudah Optimasi.

Parameter	Sebelum Optimasi	Sesudah Optimasi	Keterangan
Temperatur Air Laut Masuk (°C)	30,5	30,5	Kondisi lingkungan tetap
Temperatur Air Laut Keluar (°C)	36	33	Pendinginan lebih efektif
Temperatur <i>Steam</i> (°C)	41	41	Tidak berubah
ΔT_1 (°C)	10,5	10,5	<i>Driving force</i> awal sama
ΔT_2 (°C)	5	8	Perbaikan distribusi panas
LMTD (°C)	7,42	9,17	Meningkat
Efisiensi (%)	52,38	± 65	Kinerja meningkat
Kondisi <i>Tube</i>	<i>Fouling</i>	Bersih	Setelah <i>cleaning</i>
Aliran Fluida	Tidak optimal	Optimal	Setelah optimasi

Grafik Analisis



Gambar 1. Grafik Hubungan LMTD terhadap Performa *Condenser*.

Grafik menunjukkan bahwa peningkatan LMTD akan meningkatkan performa *condenser* secara signifikan.

Upaya Optimasi

Berdasarkan hasil analisis LMTD sebesar $7,42^{\circ}\text{C}$ dan efisiensi *condenser* sebesar 52,38%, diketahui bahwa kinerja *condenser* masih dapat ditingkatkan. Upaya optimasi dilakukan dengan fokus pada peningkatan perpindahan panas dan pengurangan hambatan termal dalam sistem.

Pembersihan (Cleaning) Tube Secara Berkala

Fouling akibat penggunaan air laut merupakan faktor utama penurunan kinerja *condenser*. Endapan seperti *biofouling*, kerak, dan korosi dapat meningkatkan resistansi termal sehingga menurunkan koefisien perpindahan panas (U).

Upaya:

- Melakukan *mechanical cleaning (brush/ball cleaning system)*
- Chemical cleaning* secara berkala
- Monitoring *fouling factor*

Dampak:

- Nilai U meningkat
- LMTD efektif meningkat
- Efisiensi naik

Optimasi Laju Aliran Air Laut

Laju aliran air pendingin sangat mempengaruhi kemampuan sistem dalam menyerap panas.

Upaya:

- a. Meningkatkan *flow rate* air laut
- b. Memastikan pompa bekerja optimal
- c. Menghindari *dead zone* dalam aliran

Dampak:

- a. ΔT meningkat
- b. *Heat* transfer lebih merata
- c. Temperatur outlet lebih rendah

Peningkatan Sistem Vakum Condenser

Kondisi vakum yang baik akan mempercepat proses kondensasi uap.

Upaya:

- a. Memastikan *ejector/vacuum pump* bekerja optimal
- b. Mengurangi kebocoran udara (*air ingress*)
- c. Monitoring tekanan *condenser*

Dampak:

- a. Proses kondensasi lebih cepat
- b. Efisiensi turbin meningkat
- c. Performa keseluruhan sistem meningkat

Pengurangan Gas Non-Kondensabel

Gas non-kondensabel seperti udara dapat menghambat perpindahan panas karena membentuk lapisan isolasi pada permukaan *tube*.

Upaya:

- a. Optimalisasi *air ejector*
- b. Pembuangan gas secara kontinu
- c. Monitoring kandungan gas

Dampak:

- a. Koefisien perpindahan panas meningkat
- b. Efektivitas *condenser* meningkat

Optimasi Distribusi Aliran Fluida

Distribusi aliran yang tidak merata menyebabkan sebagian area *tube* tidak bekerja optimal.

Upaya:

- a. Perbaiki desain distribusi inlet
- b. Inspeksi *flow path*
- c. Eliminasi *bypass flow*

Dampak:

- a. Perpindahan panas lebih merata
- b. LMTD meningkat
- c. Efisiensi sistem meningkat

Monitoring dan Kontrol Operasional

Pengendalian parameter operasi secara real-time sangat penting untuk menjaga performa *condenser*.

Upaya:

- a. Monitoring temperatur inlet–outlet
- b. Monitoring tekanan dan vakum
- c. Implementasi sistem kontrol otomatis

Dampak:

- a. Deteksi dini penurunan performa
- b. Respon cepat terhadap gangguan
- c. Stabilitas operasi meningkat

Dengan penerapan upaya optimasi di atas, diharapkan terjadi peningkatan kinerja sebagai berikut:

Tabel 2. Peningkatan Kinerja.

Parameter	Kondisi Awal	Target Optimasi
LMTD	7,42°C	>9°C
Efisiensi	52,38%	60–70%
Temperatur Outlet	36°C	±33°C

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai kinerja *condenser* pada PLTGU Priok Blok 4 dengan sistem pendingin air laut, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Berdasarkan data operasional, temperatur air laut masuk sebesar $30,5^{\circ}\text{C}$, temperatur air laut keluar sebesar 36°C , dan temperatur uap turbin sebesar 41°C . Data ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas berlangsung antara uap dan media pendingin secara kontinu.
- b. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) sebesar $7,42^{\circ}\text{C}$, yang mengindikasikan bahwa driving force perpindahan panas berada pada kategori sedang dan belum optimal.
- c. Efisiensi *condenser* yang diperoleh sebesar $52,38\%$, yang menunjukkan bahwa sistem pendingin masih mampu menyerap panas dengan cukup baik, namun masih memiliki potensi untuk ditingkatkan.
- d. Perbedaan antara nilai efisiensi yang relatif cukup baik dan nilai LMTD yang cenderung rendah menunjukkan adanya ketidakefisienan dalam distribusi perpindahan panas, yang kemungkinan disebabkan oleh *fouling* pada *tube*, penurunan koefisien perpindahan panas (U), serta aliran fluida yang belum optimal.
- e. Upaya optimasi seperti pembersihan *tube*, peningkatan laju aliran air laut, perbaikan sistem vakum, dan pengurangan gas non-kondensabel dapat meningkatkan kinerja *condenser* secara signifikan, dengan potensi peningkatan efisiensi hingga $60\text{--}70\%$.
- f. Secara keseluruhan, kinerja *condenser* pada kondisi aktual masih berada dalam kategori cukup baik, namun belum mencapai kondisi optimal sehingga diperlukan perbaikan berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkit.

Saran

Berdasarkan hasil analisis kinerja *condenser* pada PLTGU Priok Blok 4, terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan performa sistem secara keseluruhan, yaitu sebagai berikut:

- a. Melakukan pembersihan (*cleaning*) *tube* secara berkala. *Fouling* yang terjadi akibat penggunaan air laut dapat menurunkan koefisien perpindahan panas. Oleh karena itu, perlu dilakukan pembersihan secara rutin, baik secara mekanis maupun kimiawi, untuk menjaga performa *condenser* tetap optimal.

- b. Mengoptimalkan laju aliran air pendingin. Laju aliran air laut perlu dijaga pada kondisi optimal agar mampu menyerap panas secara maksimal. Hal ini dapat dilakukan dengan memastikan pompa bekerja dengan baik serta menghindari terjadinya hambatan aliran.
- c. Meningkatkan kinerja sistem vakum *condenser*. Kondisi vakum yang baik akan mempercepat proses kondensasi uap. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengecekan rutin terhadap sistem vakum, seperti ejector atau *vacuum pump*, serta menghindari kebocoran udara (*air ingress*).
- d. Mengurangi gas non-kondensabel dalam sistem. Keberadaan gas non-kondensabel dapat menghambat perpindahan panas. Disarankan untuk meningkatkan efektivitas sistem pembuangan gas agar tidak terjadi penumpukan pada *condenser*.
- e. Melakukan monitoring parameter operasional secara berkala. Parameter seperti temperatur inlet dan outlet, tekanan, serta vakum perlu dimonitor secara kontinu untuk mendeteksi penurunan performa sejak dini.
- f. Melakukan evaluasi dan optimasi sistem distribusi aliran fluida. Distribusi aliran yang tidak merata dapat menyebabkan sebagian permukaan *tube* tidak bekerja optimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap sistem distribusi fluida di dalam *condenser*.
- g. Pengembangan penelitian lebih lanjut. Disarankan untuk melakukan analisis lanjutan seperti perhitungan koefisien perpindahan panas (U), metode NTU-*effectiveness*, serta simulasi performa *condenser* untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dan komprehensif.

DAFTAR REFERENSI

- American Society of Mechanical Engineers. (2010). *PTC 12.2-2010: Steam surface condensers*. ASME.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Hewitt, G. F., Shires, G. L., & Bott, T. R. (1994). *Process heat transfer*. CRC Press.
- Hidayat, T., & Siregar, I. H. (2019). Studi eksperimen pengaruh debit air pendingin terhadap efektivitas kondensor tipe shell and tube. *Jurnal Teknovasi: Jurnal Penelitian Teknis dan Aplikasi*, 6(2), 12–20.
- Holman, J. P. (2010). *Heat transfer* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., & DeWitt, D. P. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2018). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.

- Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2020). *Heat exchangers: Selection, rating, and thermal design* (4th ed.). CRC Press.
- Kehlhofer, R., Hannemann, F., Rukes, B., & Stirnimann, F. (2009). *Combined-cycle gas & steam turbine power plants* (3rd ed.). PennWell.
- Mitsubishi Hitachi Power Systems. (2017). *Condenser training manual*. Mitsubishi Hitachi Power Systems.
- Nugroho, A. S., & Syuriadi, A. (2020). Analisis performa kondensor terhadap efisiensi termal pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). *Jurnal Teknik Mesin Energi*, 11(2), 85–92.
- Pratama, R. A., & Wibowo, S. (2022). Evaluasi laju perpindahan panas dan faktor pengotoran (*fouling factor*) pada kondensor turbin uap. *Jurnal Rekayasa Proses*, 16(1), 45–54.
- Serth, R. W., & Lestina, T. G. (2014). *Process heat transfer: Principles, applications and rules of thumb* (2nd ed.). Academic Press.
- Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons.
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat exchanger design handbook* (2nd ed.). CRC Press.