



---

## ANALISA EFEKTIVITAS KONDENSOR PADA UNIT 21 DI PLTGU JAWA SATU POWER 2 x 880 MW

Widodo Pinarcahya Putra\*

<sup>1</sup>Universitas Kristen Indonesia, Indonesia

Diterima: 23 Maret 2024 Disetujui: 16 Mei 2024 Diterbitkan: 25 Juni 2024

\*Penulis yang sesuai: [widodo.pinarcahya@gmail.com](mailto:widodo.pinarcahya@gmail.com)

---

### Abstrak

Kondensor merupakan komponen vital dalam siklus *Rankine* PLTGU yang kinerjanya sangat mempengaruhi efisiensi termal keseluruhan pembangkit. Penurunan efektivitas kondensor dapat meningkatkan *back pressure* turbin, yang berujung pada penurunan daya dan peningkatan konsumsi bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja dan mengevaluasi tren penurunan efektivitas kondensor pada Unit 21 PLTGU Jawa Satu Power selama periode operasi awal pasca *Commercial Operation Date* (COD). Penelitian ini menggunakan metode analisis kuantitatif *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) dan *Number of Transfer Units* (NTU). Data operasional primer, meliputi suhu uap, suhu air pendingin (masuk dan keluar), serta laju aliran air pendingin, dikumpulkan pada kondisi beban penuh (100% *load*). Pengambilan data dilakukan pada enam periode berbeda: fase *commissioning* (Desember 2023), Januari 2024, April 2024, September 2024, Mei 2025, dan Agustus 2025. Hasil perhitungan menunjukkan kinerja awal kondensor pada fase *commissioning* memiliki efektivitas sebesar 78,90% (LMTD) dan 77,8% (NTU). Kinerja sempat mencapai puncaknya sesaat setelah operasi (Januari 2024) di angka 85,30% (LMTD) dan 85,1% (NTU), mengindikasikan kondisi permukaan yang bersih. Setelah itu, teramati adanya tren penurunan kinerja yang signifikan dan bertahap. Efektivitas menurun drastis hingga mencapai nilai terendah pada Agustus 2025, yaitu sebesar 52,32% (LMTD) dan 74,1% (NTU). Tren penurunan efektivitas yang tajam ini menegaskan telah terjadinya degradasi performa kondensor, yang diduga kuat disebabkan oleh *fouling* progresif pada pipa, kenaikan suhu air pendingin, dan potensi penurunan performa sistem vakum. Penurunan kinerja di bawah 60% ini memerlukan tindakan pemeliharaan yang intensif dan berkala, seperti pembersihan mekanis *tube* dan inspeksi sistem vakum, untuk memulihkan kinerja perpindahan panas dan menjaga efisiensi termal PLTGU.

**Kata kunci:** Efektivitas kondensor,

### Abstract

The condenser is a vital component in the Rankine cycle of a combined cycle power plant (CCPP), whose performance significantly affects the overall thermal efficiency of the plant. Decreased condenser effectiveness can increase turbine back pressure, leading to decreased power and increased fuel consumption. This study aims to analyze the performance and evaluate the trend of decreasing condenser effectiveness in Unit 21 of the Jawa Satu Power Combined Cycle Power Plant (CCPP) during the initial operating period after the Commercial Operation Date (COD). This study uses quantitative analysis methods Log Mean Temperature Difference (LMTD) and Number of Transfer Units (NTU). Primary operational data, including steam temperature, cooling water temperature (inlet and outlet), and cooling water flow rate, were collected at full load conditions (100% load). Data collection was carried out in six different periods: the commissioning phase (December 2023), January 2024, April 2024, September 2024, May 2025, and August 2025. The calculation results show that the initial condenser performance in the commissioning phase has an effectiveness of 78.90% (LMTD) and 77.8% (NTU). Performance peaked shortly after operation (January 2024) at 85.30% (LMTD) and 85.1% (NTU), indicating clean surface conditions. Afterward, a significant and gradual performance decline was observed. Effectiveness declined drastically, reaching its lowest values in August 2025, at 52.32% (LMTD) and 74.1% (NTU). This sharp decline in effectiveness confirms the degradation of condenser performance, which is strongly suspected to be caused by progressive pipe fouling, rising cooling water temperatures, and potential degradation of the vacuum system. This performance decline below 60% requires intensive and regular maintenance measures, such as mechanical tube cleaning and vacuum system inspections, to restore heat transfer performance and maintain the thermal efficiency of the combined cycle power plant.

**Keywords:** Condenser effectiveness,

### 1. Pendahuluan

Konteks Global: Kebutuhan Efisiensi Energi pada Sektor Pembangkitan

Transisi energi global dan tuntutan untuk mitigasi perubahan iklim telah menempatkan efisiensi energi sebagai pilar sentral dalam strategi ketenagalistrikan modern. Seiring

dengan peningkatan permintaan listrik dunia, sektor pembangkitan menghadapi tantangan ganda: memenuhi permintaan yang terus tumbuh sekaligus mengurangi jejak emisi karbon secara signifikan. Dalam konteks ini, Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) atau *Combined Cycle Power Plant* (CCPP) telah diakui sebagai salah satu teknologi pembangkitan berbahan bakar fosil yang paling efisien dan relatif lebih bersih.

PLTGU, seperti unit PLTGU Jawa Satu Power, mencapai efisiensi termal yang superior seringkali di atas 55-60%—melalui pemanfaatan siklus ganda (*combined cycle*). Siklus ini mengombinasikan siklus *Brayton* (turbin gas) dengan siklus *Rankine* (turbin uap). Gas buang panas dari turbin gas, yang energinya akan terbuang pada pembangkit siklus terbuka, dimanfaatkan kembali dalam *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang kemudian menggerakkan turbin uap. Peningkatan efisiensi ini secara langsung berkorelasi dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah per megawatt-jam (MW/h) yang dihasilkan, yang pada gilirannya mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) seperti CO<sub>2</sub>. Oleh karena itu, menjaga performa setiap komponen dalam siklus PLTGU pada tingkat optimalnya bukan hanya merupakan keharusan operasional, tetapi juga kontribusi strategis terhadap target efisiensi energi nasional dan global.

## 2. Permasalahan Kritis: Peran Kondensor dan Dampak *Back Pressure*

Dalam arsitektur PLTGU, efisiensi dari siklus *bottoming* (*Rankine cycle*) sangat bergantung pada kinerja salah satu komponen paling vital: kondensor. Kondensor berfungsi sebagai penukar panas (*heat exchanger*) yang memiliki dua tugas utama: Pertama, mengkondensasikan uap bekas bertekanan rendah yang keluar dari turbin uap (*Low Pressure Turbine*) kembali menjadi fasa cair (air kondensat) untuk dipompakan kembali ke HRSG, dan kedua menciptakan dan mempertahankan tekanan vakum yang sangat rendah di sisi keluaran turbin.

Tekanan vakum ini sangat krusial. Efisiensi siklus *Rankine* secara termodinamika ditentukan oleh perbedaan entalpi antara uap masuk dan uap keluar turbin. Semakin rendah tekanan di sisi keluaran (semakin vakum), semakin besar "jatuh" entalpi (*enthalpy drop*) yang dapat diekstraksi dari uap, sehingga memungkinkan ekspansi uap yang lebih besar di dalam sudu-sudu turbin. Hal ini secara langsung diterjemahkan menjadi kerja mekanis (daya) yang lebih besar yang dihasilkan oleh turbin uap untuk input bahan bakar yang sama.

Sebaliknya, setiap penurunan kinerja kondensor akan menyebabkan kegagalan untuk mencapai vakum desain. Kondisi ini dikenal sebagai peningkatan *back pressure* (tekanan balik) turbin. Peningkatan *back pressure* memaksa turbin uap bekerja "melawan" tekanan yang lebih tinggi di sisi keluarnya, yang secara langsung menurunkan efisiensi ekspansi uap, mengurangi daya *output* pembangkit, dan pada akhirnya meningkatkan konsumsi bahan bakar untuk mencapai target beban yang sama.

## 3. Faktor Degradasi Kinerja: *Fouling* sebagai Musuh Utama

Kinerja kondensor yang optimal tidak statis; ia rentan terhadap degradasi seiring waktu operasi. Faktor utama yang menyebabkan penurunan efektivitas kondensor, terutama pada unit *water-cooled* yang menggunakan air laut sebagai media pendingin (seperti pada PLTGU Jawa Satu Power), adalah fenomena *fouling* atau pengotoran. *Fouling* merujuk pada akumulasi material yang tidak diinginkan pada permukaan perpindahan panas, dalam hal ini di dinding bagian dalam *tube-tube* titanium kondensor.

*Fouling* dapat bermanifestasi dalam beberapa bentuk, termasuk:

- Fouling biologis* (*biofouling*), yaitu akumulasi mikroorganisme seperti bakteri dan alga yang membentuk lapisan *biofilm*.
- Fouling kerak* (*scaling*), yakni presipitasi mineral terlarut seperti kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) dari air pendingin.
- Fouling korosi*, meskipun material titanium memiliki resistansi tinggi, sistem terkait bisa mengalami korosi.

Setiap lapisan *fouling* ini, meskipun tipis, bertindak sebagai lapisan isolator termal tambahan. Ia menciptakan resistansi termal (*thermal resistance*) yang signifikan, menghambat laju perpindahan panas dari uap yang terkondensasi di sisi *shell* ke air pendingin yang mengalir di sisi *tube*. Akibatnya, koefisien perpindahan panas keseluruhan (*Overall Heat Transfer Coefficient, U*) menurun drastis. Selain *fouling*, kinerja kondensor juga sensitif terhadap faktor operasional lain seperti kenaikan suhu air pendingin masuk (akibat faktor musiman), laju aliran air pendingin yang tidak optimal, dan penurunan integritas sistem vakum akibat kebocoran udara (*air ingress*).

## 4. Tinjauan Pustaka dan Metode Analisis

Literatur ilmiah di bidang teknik termal telah mengkonfirmasi pentingnya pemantauan kinerja kondensor. Untuk mengevaluasi seberapa baik kondensor beroperasi, dua metode analisis utama telah diterima secara luas dan digunakan sebagai standar industri: metode *Log Mean Temperature*

*Difference* (LMTD) dan metode *Number of Transfer Units* (NTU).

Studi-studi sebelumnya telah memanfaatkan metode ini untuk mendiagnosis masalah kinerja. Sumardiyanto dan Januar [4], dalam penelitian mereka di PLTGU Blok 1-2 Priok, menerapkan metode LMTD dan NTU- $\epsilon$  untuk menentukan efektivitas. Mereka menemukan nilai efektivitas rata-rata 83,72% dan mengidentifikasi tekanan vakum serta  $\Delta T$  LMTD sebagai variabel pengaruh utama, sekaligus menekankan pentingnya perawatan rutin seperti *backwash*.

Demikian pula, Fatkhurrahman dkk. [2] menganalisis kinerja kondensor di PLTGU Cilegon menggunakan metode NTU-*effectiveness*. Studi mereka secara kuantitatif menunjukkan bahwa efektivitas maksimum (93,14%) dicapai pada tekanan vakum optimal (-711,74 mmHg). Temuan kunci mereka adalah bahwa penurunan kevakuman, baik akibat kebocoran maupun *fouling*, secara signifikan menurunkan efektivitas.

Pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) juga telah diterapkan. Wijaya dkk. [3] menggunakan RCA di sebuah PLTGU pabrik semen dan mengidentifikasi penyumbatan oleh material asing (debu dan kerak) sebagai penyebab utama penurunan efektivitas. Setelah pemeliharaan, mereka mencatat peningkatan kinerja dari 73,9% menjadi 75,1%, membuktikan hubungan kausal antara kebersihan *tube* dan efektivitas. Studi lain oleh Sihombing [1], meskipun pada konteks Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), memperkuat prinsip fundamental yang sama: penurunan tekanan kondensor akan mengurangi *back pressure* dan meningkatkan efisiensi turbin.

Sintesis dari literatur *state-of-the-art* ini menegaskan bahwa (a) metode LMTD dan NTU adalah alat diagnostik yang *robust*, (b) *fouling* dan integritas sistem vakum adalah dua vektor masalah paling kritis yang dihadapi operator, dan (c) pemeliharaan yang ditargetkan sangat penting untuk memulihkan kinerja.

#### 5. Identifikasi Celah Penelitian (*Research Gap*) dan Kontribusi

Meskipun penelitian sebelumnya telah memberikan kontribusi penting dalam menganalisis kinerja kondensor, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang signifikan. Pertama, sebagian besar studi yang ada cenderung bersifat *cross-sectional*, yaitu menganalisis kinerja pada satu titik waktu tertentu atau dalam rentang waktu yang relatif pendek. Terdapat kelangkaan (*scarcity*) studi *longitudinal* yang melacak (melacak) evolusi degradasi kinerja kondensor secara sistematis sejak kondisi *baseline* murni (fase *commissioning*) hingga periode operasi penuh selama beberapa tahun. Kedua, banyak analisis dilakukan pada unit pembangkit dengan skala yang lebih kecil. Studi yang berfokus secara spesifik pada unit *large scale* (skala besar) modern, seperti unit 880 MW di PLTGU Jawa Satu Power, masih terbatas. Data kinerja dari unit sebesar ini sangat berharga untuk menjadi *benchmark* industri.

Ketiga, studi ini menyajikan kasus degradasi yang sangat jelas. Data yang ada menunjukkan penurunan efektivitas yang dramatis, dari kondisi optimal pasca-*commissioning* (mencapai 85,30%) anjlok ke level 52,32% hanya dalam waktu 20 bulan. Ini memberikan sebuah *case study* yang mendesak dan bernilai tinggi tentang seberapa cepat *fouling* dapat menurunkan kinerja pada instalasi kritikal.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengisi celah tersebut. Kontribusi utama dari studi ini adalah: (1) Menyajikan analisis tren *longitudinal* yang unik dari efektivitas kondensor selama 20 bulan, memetakan degradasi dari *baseline commissioning* hingga kondisi *fouling* berat; (2) Menyediakan data kinerja empiris dan *benchmark* untuk kondensor *water-cooled deaerating type* pada unit PLTGU *large-scale* 880 MW; dan (3) Menggunakan data operasional (LMTD dan NTU) untuk secara kuantitatif mendiagnosis *fouling* sebagai akar penyebab utama penurunan kinerja.

## LANDASAN TEORI

### 1. Tinjauan Umum Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), atau yang secara internasional dikenal sebagai *Combined Cycle Power Plant* (CCPP), merupakan sebuah sistem pembangkitan listrik efisiensi tinggi yang menggabungkan dua siklus termodinamika berbeda: Siklus *Brayton* (yang mendasari turbin gas) dan Siklus *Rankine* (yang mendasari turbin uap). Prinsip fundamental dari PLTGU adalah memanfaatkan kembali energi panas yang terbuang dari gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap.

Kombinasi ini secara dramatis meningkatkan efisiensi termal keseluruhan sistem. Jika pembangkit siklus tunggal (*open cycle*) seperti PLTG mungkin hanya memiliki efisiensi sekitar 35-40%, PLTGU modern dapat mencapai efisiensi termal netto antara 55% hingga lebih dari 60%.

Efisiensi superior inilah yang menjadikan PLTGU sebagai salah satu teknologi pembangkitan berbahan bakar fosil yang paling diandalkan dan relatif lebih bersih, karena mampu memproduksi lebih banyak energi listrik untuk jumlah bahan bakar yang sama, sehingga mengurangi emisi per *megawatt-hour* (MWh) yang dihasilkan.

#### a. Prinsip Kerja Siklus *Combined Cycle*

Sistem *combined cycle* terintegrasi melalui komponen kunci yang disebut *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG).

1. Siklus Brayton (Siklus Atas / Topping Cycle)

Siklus ini adalah siklus kerja dari Turbin Gas (PLTG). Ia beroperasi berdasarkan prinsip siklus Brayton ideal, yang terdiri dari empat proses utama 4:

- Kompresi *Isentropik* (1-2): Udara atmosfer disaring dan ditarik ke dalam kompresor, di mana tekanannya dinaikkan secara signifikan (15-30 kali), yang juga menyebabkan kenaikan suhu.
- Pembakaran *Isobarik* (2-3): Udara bertekanan tinggi ini kemudian dialirkan ke ruang bakar (*combustor*). Di sini, bahan bakar (biasanya gas alam) disuntikkan dan dibakar pada tekanan konstan, menghasilkan gas panas berenergi sangat tinggi (temperatur bisa melebihi 1400°C).
- Ekspansi *Isentropik* (3-4): Gas panas bertekanan tinggi ini kemudian diekspansikan melalui sudu-sudu turbin gas. Ekspansi ini memutar poros turbin, yang digunakan untuk menggerakkan kompresor (memenuhi kebutuhan internal siklus) dan generator (menghasilkan listrik).
- Pembuangan Panas *Isobarik* (4-1): Gas buang yang keluar dari turbin (pada titik 4) masih memiliki temperatur yang sangat tinggi (seringkali di atas 500-600°C). Pada siklus terbuka, gas ini dibuang ke atmosfer. Namun pada *combined cycle*, gas panas ini diarahkan ke.

2. Siklus Rankine (Siklus Bawah / Bottoming Cycle)

Siklus ini adalah siklus kerja dari Turbin Uap (PLTU). Dengan memanfaatkan panas buang dari siklus Brayton sebagai sumber energinya, tanpa memerlukan ruang bakar tambahan. Siklus Rankine ideal terdiri dari empat proses:

- Pompaan *Isentropik* (1-2): Air kondensat (cair jenuh) bertekanan rendah dari kondensor dipompa (*feedwater pump*) ke tekanan tinggi (tekanan kerja HRSG/boiler).
- Pemanasan *Isobarik* (2-3-4): Air bertekanan tinggi ini dialirkan ke HRSG. Di dalam HRSG, air menyerap panas dari gas buang turbin gas. Air akan dipanaskan (*economizer*), kemudian diuapkan (*evaporator*), dan seringkali dipanaskan lebih lanjut menjadi uap super panas (*superheater*).
- Ekspansi *Isentropik* (4-5): Uap super panas bertekanan tinggi ini dialirkan ke turbin uap, di mana ia berekspansi dan mendingin, memutar poros turbin uap yang terhubung ke generator kedua.
- Kondensasi *Isobarik* (5-1): Uap bekas (uap saturasi bertekanan sangat rendah) yang keluar dari turbin uap (titik 5) kemudian dialirkan ke kondensor. Di sini, uap melepaskan panas latennya ke media pendingin (seperti air laut) dan terkondensasi kembali menjadi air cair (kondensat), untuk kemudian dihisap kembali oleh pompa, menutup siklus.

b. Komponen Utama PLTGU

Sistem PLTGU terintegrasi dari beberapa komponen utama yang bekerja serempak:

- Turbin Gas (*Gas Turbine*, GT): Komponen siklus *Brayton* yang berfungsi sebagai penghasil daya utama dan sumber gas panas.
- *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG): Komponen penukar panas kritis yang menjembatani kedua siklus. Ia memindahkan energi panas dari gas buang GT ke siklus air-uap *Rankine*.
- Turbin Uap (*Steam Turbine*, ST): Komponen siklus *Rankine* yang mengekstraksi energi dari uap yang dihasilkan oleh HRSG untuk menghasilkan daya tambahan.
- Kondensor (*Condenser*): Komponen vital di akhir siklus *Rankine* yang mengembunkan uap bekas turbin kembali menjadi air dan menciptakan tekanan vakum.
- Pompa Air Umpan (*Feedwater Pump*): Berfungsi memompa air kondensat dari kondensor kembali ke HRSG dengan tekanan tinggi.
- Generator: Komponen yang mengubah energi mekanik putaran dari poros turbin (baik GT maupun ST) menjadi energi listrik.

2. Peran Sentral Kondensor dalam Siklus *Rankine*

Dalam siklus PLTGU, kondensor memegang peran yang sangat penting bagi efisiensi keseluruhan siklus *Rankine*. Ia adalah alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi mengkondensasikan uap *exhaust* (uap bekas) dari turbin tekanan rendah (*Low Pressure Turbine*) menjadi air kondensat, yang

kemudian ditampung di *hotwell* sebelum disirkulasikan kembali ke HRSG.

**a. Fungsi dan Prinsip Kerja Kondensor**

Fungsi utama kondensor lebih dari sekadar mengubah fasa uap menjadi air. Fungsi termodinamikanya yang paling krusial adalah untuk menciptakan dan mempertahankan tekanan operasional yang sangat rendah (vakum) di sisi keluaran turbin uap. Semakin rendah tekanan ini (semakin vakum), semakin besar perbedaan tekanan (*pressure drop*) yang dialami uap saat berekspansi di dalam turbin. Perbedaan tekanan yang besar ini memungkinkan ekstraksi energi (kerja) yang lebih besar dari uap, sehingga secara langsung meningkatkan daya *output* dan efisiensi termal turbin.

Prinsip kerja kondensor yang paling umum digunakan di PLTGU (dan yang menjadi objek studi ini) adalah tipe *surface condenser* (kondensor permukaan). Prinsip kerjanya adalah sebagai berikut:

1. Sisi *Shell* (Uap Panas): Uap bekas dari turbin mengalir di luar bundel pipa-pipa (*tubes*) dan memenuhi ruangan cangkang (*shell*) kondensor.
2. Sisi *Tube* (Air Pendingin): Media pendingin (dalam studi ini, air laut) mengalir di dalam pipa-pipa tersebut.
3. Perpindahan Panas: Dinding pipa (*tube wall*) menjadi media perpindahan panas. Uap panas bersentuhan dengan permukaan luar pipa yang dingin, melepaskan panas latennya (energi perubahan fasa), dan mengembun menjadi air (kondensat) yang menetes ke bawah menuju *hotwell*. Air pendingin di dalam *tube* menyerap panas ini, sehingga suhunya meningkat dari *inlet* ke *outlet*.

**b. Tipe dan Klasifikasi Kondensor**

Kondensor secara umum dapat diklasifikasikan berdasarkan metode kontak antara fluida panas (uap) dan fluida dingin (pendingin).

1. Kondensor Permukaan (Surface Condenser)

Ini adalah tipe yang paling umum di pembangkit listrik. Uap dan pendingin tidak bercampur; mereka dipisahkan oleh permukaan perpindahan panas (dinding tube). Keuntungan utamanya adalah air kondensat tetap murni (bebas dari kontaminan air pendingin), sehingga dapat langsung digunakan kembali sebagai air umpan boiler/HRSG berkualitas tinggi. Kondensor permukaan dapat diklasifikasi lebih lanjut:

- Berdasarkan Orientasi:
  - *Horizontal Condenser*: Tipe paling umum, dengan *tube* dipasang horizontal. Mudah untuk instalasi dan pemeliharaan.
  - *Vertical Condenser*: *Tube* dipasang vertikal. Menghemat ruang lantai tetapi membutuhkan *headroom* yang.
- Berdasarkan Aliran Pendingin (*Pass*):
  - *Single Flow/Pass*: Air pendingin mengalir dalam satu arah melalui *tube* dan keluar di sisi lain. Desainnya sederhana namun efisiensi transfer panasnya lebih rendah.
  - *Double Flow/Pass*: Air pendingin masuk, mengalir ke ujung, lalu berbalik arah melalui bundel *tube* yang lain, dan keluar di sisi yang sama dengan sisi masuk. Ini meningkatkan efisiensi perpindahan panas karena waktu kontak lebih lama dan kecepatan fluida lebih tinggi, meskipun dengan *pressure drop* yang lebih tinggi.

2. Kondensor Kontak Langsung (Direct Contact Condenser)

Pada tipe ini, uap dan cairan pendingin bersentuhan dan bercampur secara langsung. Perpindahan panas terjadi secara sangat efisien karena tidak ada resistansi termal dari dinding tube. Namun, kekurangannya adalah kondensat dan pendingin menjadi satu (tercampur), sehingga kondensat tidak murni dan tidak cocok untuk siklus tertutup PLTGU kecuali air pendinginnya memiliki kualitas demineralisasi.

Tipe-tipe kondensor kontak langsung meliputi:

- *Spray Condenser*: Uap dikondensasikan dengan menyemprotkan air pendingin dalam bentuk butiran halus (*droplets*) langsung ke aliran uap.
- *Barometric Condenser*: Menggunakan prinsip *barometric leg* (pipa vertikal tinggi) untuk menciptakan vakum dan mengalirkan campuran kondensat-pendingin menggunakan gravitasi, tanpa perlu pompa ekstraksi.
- *Jet Condenser*: Menggunakan *jet* air pendingin berkecepatan tinggi yang diinjeksikan ke uap, menciptakan efek venturi yang membantu menarik uap dan mempertahankan vakum.

3. Prinsip Dasar Perpindahan Panas pada Kondensor

Kinerja kondensor permukaan diatur oleh tiga mekanisme perpindahan panas yang terjadi secara simultan dan berurutan:

1. Konveksi (Uap ke Dinding *Tube*): Panas berpindah dari *bulk* uap panas di sisi *shell* ke permukaan luar dinding *tube*.
2. Kondensasi (Perubahan Fasa): Ini adalah mekanisme dominan. Saat uap menyentuh permukaan *tube* yang lebih dingin, ia melepaskan sejumlah besar energi (panas laten penguapan) saat berubah fasa dari gas menjadi cair.
3. Konduksi (Melalui Dinding *Tube*): Panas yang dilepaskan tadi harus "menembus" dinding *tube*. Perpindahan panas ini melalui material padat *tube* (misalnya Titanium) terjadi secara konduksi.
4. Konveksi (Dinding *Tube* ke Air): Panas kemudian berpindah dari permukaan dalam dinding *tube* ke *bulk* fluida pendingin (air laut) yang mengalir di dalam *tube*.

Efisiensi keseluruhan proses ini sangat bergantung pada seberapa bersih permukaan perpindahan panas tersebut.

c. Parameter Kinerja Kritis Kondensor

Untuk mengevaluasi seberapa baik kondensor bekerja, beberapa parameter operasional kunci harus dipantau secara ketat.

1. Tekanan Vakum dan *Back Pressure*

Ini adalah parameter kinerja paling vital. Kondensor dirancang untuk beroperasi pada tekanan absolut yang sangat rendah, jauh di bawah tekanan atmosfer. Nilai ini biasanya dinyatakan sebagai "vakum" (misalnya, -700 mmHg, di mana 0 mmHg adalah tekanan atmosfer dan -760 mmHg adalah vakum absolut).

Tekanan absolut di dalam kondensor inilah yang disebut sebagai *back pressure* (tekanan balik) turbin. Semakin rendah *back pressure* (semakin tinggi vakum), semakin besar efisiensi turbin.

2. Sistem Pendukung Vakum (Pompa Vakum)

Tekanan vakum tidak terjadi secara alami. Ia harus diciptakan dan dipertahankan. Saat uap mengembun, volumenya berkurang drastis (lebih dari 1000 kali), yang secara alami menciptakan vakum. Namun, sistem tidak pernah sempurna. Selalu ada gas-gas non-kondensabel (*non-condensable gases*) seperti udara yang masuk ke sistem (kebocoran air ingress) atau terlarut dalam air umpan. Gas-gas ini tidak bisa mengembun dan akan terakumulasi di dalam *shell*, "menyelimuti" *tube*, menghalangi uap mencapai permukaan *tube* dingin, dan merusak vakum.

Di sinilah peran pompa vakum (*vacuum pump*) atau *ejector* sangat penting. Sistem ini memiliki dua mode operasi:

- *Hogging Operation*: Digunakan saat *start-up* unit. Pompa vakum bekerja dengan kapasitas penuh untuk "menarik" (mengevakuasi) sebagian besar udara dari dalam *shell* kondensor yang awalnya berisi udara atmosfer, untuk menciptakan vakum awal.
- *Holding Operation*: Selama operasi normal, pompa vakum beralih ke mode *holding*. Ia bekerja terus-menerus dengan kapasitas lebih rendah, yang didesain hanya untuk menghisap gas-gas non kondensabel yang masuk akibat kebocoran, sehingga mempertahankan level vakum yang diinginkan.

3. Efektivitas Kondensor (Effectiveness)

Efektivitas ( $\epsilon$ ) adalah ukuran kuantitatif dari kinerja termal kondensor. Ia didefinisikan sebagai rasio antara laju perpindahan panas aktual ( $Q_{actual}$ ) yang terjadi, dibandingkan dengan laju perpindahan panas maksimum yang secara teoretis mungkin terjadi ( $Q_{max}$ ).

$$\epsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$$

Nilai efektivitas (berkisar antara 0 hingga 1, atau 0% hingga 100%) menunjukkan seberapa dekat kondensor beroperasi dengan kondisi idealnya. ( $Q_{actual}$ ) adalah jumlah panas yang benar-benar diserap oleh air pendingin. ( $Q_{max}$ ) adalah jumlah panas yang akan diserap jika air pendingin dipanaskan hingga mencapai suhu uap masuk (perpindahan panas tak terhingga).

d. Faktor Degradasi Kinerja: *Fouling*

Dalam operasi jangka panjang, faktor utama yang menyebabkan penurunan efektivitas dan peningkatan *back pressure* adalah *fouling*.

1. Definisi dan Tipe Fouling

*Fouling* adalah akumulasi lapisan deposit yang tidak diinginkan pada permukaan perpindahan panas. Lapisan ini bertindak sebagai isolator termal, menambah resistansi terhadap perpindahan panas. Dalam kondensor yang menggunakan air laut (bahkan yang dari *cooling tower*), beberapa jenis *fouling* sangat umum terjadi:

- **Fouling Biologis (Biofouling):** Pertumbuhan mikroorganisme (bakteri, alga) di permukaan *tube* yang membentuk lapisan *biofilm*. *Biofilm* ini sangat menghambat perpindahan panas.
- **Fouling Kerak (Scaling):** Presipitasi mineral terlarut (terutama kalsium karbonat,  $\text{CaCO}_3$ ) dari air pendingin saat dipanaskan, membentuk lapisan kerak keras di dinding *tube*.
- **Fouling Korosi:** Meskipun *tube* Titanium sangat tahan korosi, komponen lain dalam sistem air pendingin bisa berkarat dan produk korosinya terdeposit di *tube*.

2. Dampak Fouling terhadap Kinerja

Dampak *fouling* adalah rantai domino kegagalan kinerja:

- a. Lapisan *fouling* terbentuk di dalam *tube*.
- b. Resistansi termal total ( $R_{total}$ ) meningkat karena adanya resistansi *fouling* ( $R_f$ ).
- c. Koefisien perpindahan panas keseluruhan (*Overall Heat Transfer Coefficient, U*) menurun drastis.
- d. Dengan *U* yang lebih rendah, laju perpindahan panas aktual  $Q = A \times \Delta T_{LMTD}$  akan menurun.
- e. Untuk membuang jumlah panas laten yang sama dari turbin, sistem harus mengkompensasi. Suhu di sisi uap (sisi *shell*) akan naik.
- f. Kenaikan suhu uap di kondensor berarti kenaikan tekanan saturasi.
- g. Kenaikan tekanan saturasi ini adalah definisi dari peningkatan *back pressure* turbin.
- h. Peningkatan *back pressure* secara langsung menurunkan efisiensi turbin dan efisiensi termal PLTGU, yang berujung pada peningkatan konsumsi bahan bakar untuk *output* daya yang sama.

e. Metodologi Analisis Kinerja Termal

Untuk mengkuantifikasi kinerja dan degradasi ini, dua metode analisis utama digunakan dalam rekayasa termal.

1. Metode Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Metode LMTD adalah pendekatan klasik untuk menganalisis penukar panas. Metode ini paling akurat ketika semua suhu masuk dan keluar dari kedua fluida diketahui, sehingga sangat cocok untuk evaluasi kinerja menggunakan data operasional historis. Metode ini menghitung "rata-rata" perbedaan suhu penggerak di seluruh penukar panas, karena perbedaan suhu antara fluida panas dan dingin tidak konstan di sepanjang *tube*. Perpindahan panas aktual dihitung menggunakan:

$$Q_{actua} = U \times A \times \Delta T_{LMTD}$$

Dimana  $\Delta T_{LMTD}$  dihitung berdasarkan perbedaan suhu di kedua ujung penukar panas. Untuk kondensor, di mana fluida panas (uap) tidak berubah suhu (hanya berubah fasa pada  $T_{steam}$ ), rumusnya menjadi:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{steam} - T_{cold\ in}) - (T_{steam} - T_{cold\ out})}{\ln \frac{(T_{steam} - T_{cold\ in})}{(T_{steam} - T_{cold\ out})}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

Kelebihan metode ini adalah akurasinya untuk operasi *steady-state*. Kekurangannya adalah ia memerlukan semua data suhu *outlet*, sehingga kurang cocok untuk *desain* prediktif di mana suhu *outlet* adalah yang dicari.

2. Metode Number of Transfer Units (NTU)

Metode  $\epsilon$ -NTU (Efektivitas - Number of Transfer Units) adalah pendekatan yang lebih modern, sangat berguna untuk desain dan analisis ketika suhu outlet tidak diketahui. Metode ini berfokus pada dua parameter dimensionless (tanpa dimensi):

1. Efektivitas  $\epsilon$ : Seperti didefinisikan sebelumnya,  $\epsilon = Q_{actual} / Q_{max}$

2. Number of Transfer Units (NTU): Ini adalah parameter yang mengukur "ukuran termal" atau kemampuan perpindahan panas dari heat exchanger. NTU didefinisikan sebagai:

$$NTU = \frac{U A}{C_{min}}$$

Di mana  $U$  adalah koefisien perpindahan panas,  $A$  adalah luas permukaan, dan  $C_{min}$  adalah kapasitas panas laju alir minimum  $C = \dot{m} \times c_p$ . Dalam kondensor, fluida pendingin (air) adalah  $C_{min}$  karena fluida yang mengembun (uap) dianggap memiliki kapasitas panas tak terhingga  $C_{max} \approx 0$ .

Untuk konfigurasi penukar panas tertentu (misal, shell and tube dengan 2 pass), terdapat hubungan matematis tetap antara  $\varepsilon$ , NTU, dan rasio kapasitas panas ( $C_r = C_{min}/C_{max}$ ). Untuk kondensor, di mana  $C_r \approx 0$  hubungannya menjadi lebih sederhana:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$$

Kelebihan metode NTU adalah fleksibilitasnya untuk *desain* dan prediksi kinerja. Kekurangannya adalah perhitungannya bisa lebih kompleks dan membutuhkan pengetahuan tentang  $U$  dan  $A$ .

Dalam penelitian ini, kedua metode (LMTD dan NTU) akan digunakan secara bersamaan. Data operasional (suhu) akan digunakan untuk menghitung  $\Delta T_{LMTD}$  dan  $\varepsilon$  (Efektivitas aktual), yang kemudian dapat digunakan untuk menurunkan nilai NTU dan  $U$  (koefisien perpindahan panas). Tren penurunan nilai  $U$  dari waktu ke waktu akan menjadi indikator kuantitatif langsung dari akumulasi *fouling*.

## METODE PENELITIAN

### 1. Objek dan Lokasi Penelitian

- Objek: Penelitian ini berfokus pada unit Kondensor Utama (*Main Condenser*) pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Jawa Satu Power, Unit 21.
- Lokasi: Pengambilan data dilakukan di PLTGU Jawa Satu Power, Cilamaya, Karawang, Jawa Barat.
- Spesifikasi Kunci:
  - Tipe: *Water-cooled Condenser - Deaerating Type*.
  - Media Pendingin: Air Laut (*Sea Water*) dari *Cooling Tower*.
  - Jumlah *Passes*: 2 (Dua *pass*).
  - Material *Tube*: Titanium (B 338 Gr. 2).
  - Luas Permukaan Desain: 22.228,8 m<sup>2</sup>.

### 2. Metode Pengumpulan Data

- Jenis Data: Data kuantitatif primer (data operasional) dan data sekunder (spesifikasi teknis/manual book).
- Sumber Data: Data operasional diambil dari *Distributed Control System (DCS)* di *Central Control Room (CCR)*.
- Kondisi Pengambilan Data: Data diambil saat unit beroperasi stabil pada beban penuh 100% ( $\pm 880$  MW).
- Parameter yang Dicatat:
  - Suhu uap masuk ( $T_{hot}$ )
  - Suhu air pendingin masuk ( $T_{cold\ in}$ )
  - Suhu air pendingin keluar ( $T_{cold\ out}$ )
  - Laju aliran massa air pendingin ( $\dot{m}_{cw}$ )
- Periode Pengambilan Data: Data diambil pada 6 titik waktu untuk analisis tren:
  - Desember 2023 (*Commissioning*)
  - 6 Januari 2024
  - 4 April 2024
  - 19 September 2024
  - 14 Mei 2025
  - 5 Agustus 2025

### 3. Metode Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis menggunakan dua metode perpindahan panas utama untuk mengevaluasi kinerja kondensor.

#### a. Perhitungan Efektivitas ( $\varepsilon$ )

Tujuan: Mengukur rasio kinerja aktual terhadap kinerja teoretis maksimum.

Rumus:

$$\varepsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} = \frac{T_{cold,out} - T_{cold,in}}{T_{hot,in} - T_{cold,in}}$$

**b. Perhitungan Log Mean Temperature Difference (LMTD)**

Tujuan: Menghitung rata-rata perbedaan suhu logaritmik sebagai gaya penggerak (*driving force*) perpindahan panas.

Rumus:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{steam} - T_{cold\ in}) - (T_{steam} - T_{cold\ out})}{\ln \left( \frac{T_{steam} - T_{cold\ in}}{T_{steam} - T_{cold\ out}} \right)}$$

**3. Analisis Tren**

- Hasil perhitungan  $\varepsilon$  dan LMTD dari keenam periode data akan ditabulasi dan disajikan dalam bentuk grafik untuk menganalisis tren penurunan kinerja dari waktu ke waktu.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**1. Hasil Pengolahan Data Kinerja**

Data operasional yang diambil dari enam periode berbeda telah diolah menggunakan metode LMTD dan NTU. Data operasional kunci yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Data Kondensor Unit 21 (Ringkas) 1

|                                  | TANGGAL PENGAMBILAN DATA     |                 |               |                   |             |                |
|----------------------------------|------------------------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|----------------|
|                                  | Commisioning (Desember 2023) | 06 Januari 2024 | 04 April 2024 | 19 September 2024 | 14 Mei 2025 | 5 Agustus 2025 |
| $T_{hot,in}$ (uap) (°C)          | 43.19                        | 42.264          | 39.409        | 40.225            | 42.429      | 42.252         |
| $T_{cold,in}$ (Air masuk) (°C)   | 32.4                         | 33.424          | 30.595        | 29.988            | 33.453      | 32.877         |
| $T_{cold,out}$ (Air keluar) (°C) | 40.91                        | 40.958          | 38.019        | 36.49             | 38.553      | 37.769         |

Dari data di atas, nilai LMTD (*Log Mean Temperature Difference*) dan Efektivitas  $\varepsilon$  dihitung. Hasil akhir dari perhitungan kinerja dirangkum di bawah ini.

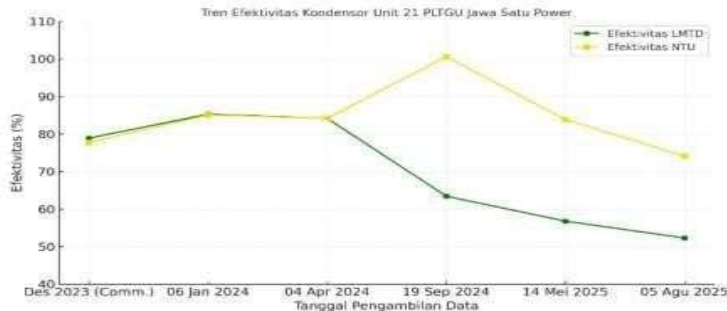
Tabel 2. Hasil Perhitungan LMTD dan Efektivitas

|                    | Commisioning (Desember 2023) | 06 Januari 2024 | 04 April 2024 | 19 September 2024 | 14 Mei 2025 | 5 Agustus 2025 |
|--------------------|------------------------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|----------------|
| LMTD (°C)          | 5.47                         | 3.944           | 4.02          | 6.454             | 6.07        | 6.624          |
| Efektifitas (LMTD) | 78.90%                       | 85.30%          | 84.16%        | 63.44%            | 56.80%      | 52.32%         |
| NTU-efektivitas    | 77.8%                        | 85.1%           | 84.2%         | 100.6%            | 83.9%       | 74.1%          |

Catatan: Nilai 100.6% adalah anomali data. kemungkinan karena error instrumentasi.

**2. Analisis Tren Kinerja dan Pembahasan**

Untuk melihat tren kinerja, hasil efektivitas dari Tabel 4.8 diplot dalam grafik berikut:



Grafik 1. Efektivitas Kondensator Unit 21

### Pembahasan Temuan:

Dari tabel dan grafik di atas, dapat ditarik beberapa poin analisis utama:

- **Kinerja Awal dan Puncak:**
  - Kondensator memulai operasinya (*commissioning*) pada efektivitas 78.90%.
  - Kinerja puncak tercapai sesaat setelah operasi penuh (Januari 2024) di 85.30%, menunjukkan kondisi *tube* yang sangat bersih dan sistem yang optimal.
- **Tren Penurunan Kinerja (Degradasi):**
  - Setelah April 2024, kinerja mulai turun secara drastis, anjlok ke 63.44% pada September 2024.
  - Penurunan terus berlanjut secara progresif hingga mencapai titik terendah pada Agustus 2025, yaitu 52.32%.
  - Ini membuktikan adanya penurunan kinerja yang sangat signifikan, di mana kondensator kehilangan lebih dari 30 poin efektivitas dari puncaknya hanya dalam waktu 19 bulan.
- **Interpretasi Teknis (Penyebab Penurunan):**
  - Penurunan efektivitas yang stabil ini adalah indikator kuat adanya *fouling* (pengotoran atau pengerakan) di dalam *tube* kondensator<sup>9</sup>.
  - *Fouling* bertindak sebagai isolator yang menghambat perpindahan panas.
  - Bukti pendukungnya ada di data LMTD:
    - Saat bersih (Jan 2024), LMTD rendah (3.94°C), artinya perpindahan panas sangat.
    - Saat kotor (Agu 2025), LMTD tinggi (6.62°C), artinya sistem membutuhkan perbedaan suhu yang lebih besar untuk membuang panas yang sama, karena terhalang oleh *fouling*.
  - Penurunan kinerja di bawah 60% ini sangat serius karena dapat meningkatkan *back pressure* turbin, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi pembangkit dan meningkatkan konsumsi bahan bakar.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data operasional dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, penelitian ini menarik beberapa kesimpulan kunci terkait kinerja Kondensator Unit 21 PLTGU Jawa Satu Power:

1. Telah terjadi tren penurunan efektivitas yang signifikan pada Kondensator Unit 21 selama 20 bulan periode observasi. Efektivitas kondensator yang pada awalnya berada pada kinerja puncak 85,30% (LMTD) pada Januari 2024, terdegradasi secara progresif dan signifikan hingga mencapai titik terendah pada 52,32% (LMTD) pada Agustus 2025.
2. Analisis tren menunjukkan laju penurunan efektivitas rata-rata setelah puncak performa awal berkisar  $\pm 2-4\%$  per kuartal. Penurunan kinerja operasional di bawah 60% ini memerlukan perhatian segera karena berpotensi mengganggu kestabilan operasi turbin uap dan menurunkan efisiensi termal PLTGU secara keseluruhan.
3. Faktor-faktor dominan yang teridentifikasi berkontribusi terhadap penurunan efektivitas kondensator adalah:
  - Akumulasi *fouling* atau kerak pada sisi dalam pipa (*tube*) kondensator, yang menambah hambatan perpindahan panas (*thermal resistance*).
  - Kenaikan suhu air pendingin masuk (*cooling water inlet temperature*), yang sangat dipengaruhi oleh faktor musiman dan variasi suhu air laut.
  - Variasi laju aliran air pendingin yang tidak selalu berada pada titik operasi optimal untuk perpindahan panas.
  - Potensi penurunan performa pada sistem vakum (pompa vakum atau *ejector*), yang berdampak pada

peningkatan *back pressure*.

### Saran

Berdasarkan temuan dan kesimpulan penelitian, berikut adalah beberapa saran yang dapat direkomendasikan, baik untuk implikasi praktis di industri maupun untuk pengembangan penelitian di masa depan.

#### a. Rekomendasi Teknis dan Operasional:

1. Perlunya penjadwalan pemeliharaan preventif yang lebih intensif dan rutin pada kondensor. Ini mencakup *backwashing* secara berkala dan pembersihan mekanis *tube* (misalnya dengan *tube cleaning system*) untuk menghilangkan *fouling* dan kerak yang telah terakumulasi.
2. Melakukan inspeksi dan pemeliharaan pada sistem pendukung vakum, termasuk pompa vakum dan *ejector*, untuk memastikan tidak ada kebocoran udara (*air ingress*) dan sistem mampu mempertahankan vakum desain.
3. Sebagai strategi mitigasi *fouling* jangka panjang, disarankan untuk melakukan *treatment* (pengolahan) pada air pendingin sebelum masuk ke kondensor. Pengolahan ini bertujuan untuk mengurangi kadar garam dan mineral, sehingga dapat meminimalkan laju pembentukan *fouling factor* pada *tube*.

#### b. Saran untuk Penelitian Lanjutan

1. Penelitian di masa depan disarankan untuk melakukan analisis *Root Cause Analysis* (RCA) secara mendalam untuk memvalidasi penyebab pasti *fouling* (misalnya, membedakan antara *biofouling* dan *scaling* melalui inspeksi visual *tube*).
2. Studi lebih lanjut dapat mengembangkan model prediktif (model prediksi) laju *fouling* berdasarkan parameter *real-time* (suhu air, kualitas air), sehingga jadwal pembersihan dapat dioptimalkan (*condition-based maintenance*) alih-alih hanya berbasis waktu (*time-based*).

### DAFTAR PUSTAKA

1. C. Sihombing, "Analisa Efisiensi Termal Turbin, Kondensor dan Menara Pendingin pada PLTP," *Majalah Ilmiah Swara Patra*, vol. 10, no. 1, 2020.
2. M. Fatkhurrahman, B. Wiwik, "Analisis Kinerja Kondensor terhadap Perubahan Tekanan Vakum," *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, vol. 10, no. 1, pp. 29-34, 2014.
3. K. C. Wijaya, C. S. Abadi, B. Santoso, "Penyebab Penurunan Efektivitas Kondensor pada PLTGU Menggunakan Metode RCA," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin PNJ*, pp. 7-16, 2023.
4. D. Sumardiyanto, A. Januar, "Penentuan Nilai Efektivitas Kondensor di PLTGU Blok 1-2 PT. Indonesia Power UPJP Priok," *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 99-103, 2020.
5. K. C. Wijaya, G. G. R. Gunadi, "Identifikasi Penyebab Menurunnya Efektivitas Kondensor PLTGU dengan RCA," *Jurnal Mekanik Terapan*, vol. 5, no. 1, pp. 65-70, 2024.
6. Bejan, A., Kraus, A. D., & Incropera, F. P. (2019). *Heat Transfer Handbook*. Wiley.
7. Dutta, P., Roy, S., & Gupta, A. (2021). *Heat Exchanger Fouling: Causes and Mitigation Strategies*. Springer.
8. Garcia, J. R., Kim, S. H., & Lee, Y. J. (2018). "Effect of Fouling on Heat Transfer Performance in Power Plant Condensers." *Applied Thermal Engineering*, 145, 234-245.
9. Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2020). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
10. Kumar, R., Singh, H., & Patel, R. (2020). "Comparative Analysis of Combined Cycle Gas Turbine Power Plants." *Energy Reports*, 6, 120-130.
11. Liu, X., Zhang, T., & Huang, J. (2022). "Numerical Simulation of Condenser Performance in Power Plants." *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 95, 135-148.
12. Patel, H., Shah, K., & Mehta, R. (2021). "Cooling Water Flow Rate Optimization for Condensers in Power Plants." *Journal of Energy Engineering*, 147(3), 112-125.
13. Rahman, M., & Chen, W. (2021). "Back Pressure Influence on Steam Turbine Efficiency: A Thermodynamic Approach." *Journal of Thermal Science*, 30(2), 175-190.
14. Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2019). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Wiley.
15. Yunus, C., & Cengel, A. J. (2022). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
16. Zhang, W., Li, Y., & Wang, X. (2020). "Effects of Condenser Performance on Power Plant Efficiency." *Energy Procedia*, 158, 45-52.
17. Bono, M.F., W. P. Widyaningsih. 2014. Analisis Kinerja Kondensor Terhadap Perubahan Tekanan Vakum di PT PLN(Persero) Sektor Pembangkitan PLTGU Cilegon. *Jurnal Teknik Energi*. 10(1) :29-34.
18. Himmelblau, David M. & James B. Riggs. 1967. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering* (7th ed). United States of America : Prentice Hall Professional Technical Reference.
19. Aprilia Kartiningsih. 2023. Analisis Efisiensi Kinerja Kondensor pada Unit 1 di PT. PLN Nusantara Power Up Indramayu, 55-61.