Evaluasi Kinerja Menara Pendingin, Kondensor, dan Turbin PLTP Unit 3 Ulubelu

Agus Apriyanto, Muh Thohirin,

Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Lampung, Indonesia

Email: agus.apriyanto89@gmail.com
Email: muhtohirin21@gmail.com

Abstrak. Sistem pendinginan utama pada pembangkit listrik tenaga panas bumi berperan dalam pelepasan panas kondensor dan mendukung kondisi vakum yang diperlukan turbin. Penelitian ini mengevaluasi kinerja menara pendingin, kondensor kontak langsung, dan turbin uap PLTP Unit 3 Ulubelu berdasarkan data operasional Juli–Desember 2023. Efektivitas menara pendingin yang dilaporkan rata-rata 70,91%, lebih rendah 7,09 poin persentase daripada nilai desain 78,00%. Kondensor memiliki efisiensi rata-rata 94,13% dan efektivitas rata-rata 84,43%. Efisiensi turbin berdasarkan spesifikasi tercatat 87,51%, sedangkan nilai aktual hasil perhitungan berada pada rentang 78,83–82,59% pada bulan-bulan yang dilaporkan. Perbedaan antara daya turbin terukur dan hasil perhitungan juga ditemukan, sehingga validasi instrumen dan data operasi menjadi kebutuhan penting. Hasil menunjukkan adanya ruang evaluasi pada sistem pendinginan dan kinerja turbin, tetapi keterkaitan kausal tidak dapat dipastikan hanya dari ringkasan data ini karena data mentah, ketidakpastian pengukuran, dan variabel operasi yang tersinkronisasi belum seluruhnya tersedia.

Kata kunci: pembangkit listrik tenaga panas bumi, menara pendingin, kondensor, efisiensi turbin, kinerja termal.

1 Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) mengubah energi panas fluida geotermal menjadi energi mekanik pada turbin dan selanjutnya menjadi energi listrik. Kinerja siklus ini dipengaruhi oleh kondisi uap masuk turbin, tekanan buang, proses kondensasi, serta kemampuan sistem pendinginan membuang panas ke lingkungan. Menara pendingin dan kondensor karena itu merupakan komponen yang saling berkaitan dengan kondisi operasi turbin, meskipun kinerja satu komponen tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya penjelas perubahan daya pembangkit [1], [2], [6].

Menara pendingin dinilai melalui parameter range, approach, dan efektivitas berdasarkan temperatur air masuk, temperatur air keluar, serta temperatur bola basah. Kondensor dievaluasi melalui besaran efektivitas dan efisiensi termal, sedangkan turbin dianalisis menggunakan efisiensi isentropik dengan membandingkan daya aktual terhadap daya ideal. Penggunaan parameter yang berbeda ini diperlukan karena setiap komponen memiliki fungsi termodinamika dan batas evaluasi yang berbeda [3]–[6].

Naskah penelitian sumber memuat data operasional PLTP Unit 3 Area Ulubelu untuk Juli–Desember 2023, termasuk 184 sampel pengamatan pada pukul 10.00 WIB untuk rangkaian analisis yang dilaporkan. Hasil sumber menyatakan efektivitas rata-rata menara pendingin 70,91%, efisiensi rata-rata kondensor 94,13%, efektivitas rata-rata kondensor 84,43%, dan efisiensi turbin spesifikasi 87,51%. Penelitian ini menyatukan hasil tersebut dalam satu pembahasan agar celah kinerja dan kebutuhan validasi data dapat diidentifikasi secara sistematis.

Tujuan artikel adalah mengevaluasi indikator kinerja menara pendingin, kondensor, dan turbin serta menelaah keterbatasan data yang memengaruhi interpretasi hubungan antarkomponen. Kontribusi artikel terletak pada penyajian ringkasan indikator ketiga komponen dalam satu kerangka analisis, bukan pada klaim pembuktian hubungan sebab-akibat. Dengan demikian, rekomendasi perbaikan difokuskan pada pemeriksaan instrumentasi, konsistensi pengukuran, dan pengujian lanjutan berbasis neraca energi.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1 Rancangan penelitian dan sumber data

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis data operasi lapangan. Data yang dianalisis berasal dari dokumen penelitian sumber dan mencakup periode Juli–Desember 2023, dengan pengamatan pada pukul 10.00 WIB setiap hari. Variabel utama adalah temperatur air masuk menara (Tin), temperatur air keluar menara (Tout), dan temperatur bola basah udara (Twb). Data harian lengkap tidak ditranskripsikan ulang pada artikel ini; nilai minimum, maksimum, dan rata-rata bulanan yang digunakan merupakan angka yang dinyatakan dalam pembahasan naskah sumber.

Tabel 1. Variabel dan definisi operasional.

Variabel	Simbol	Definisi / satuan
Temperatur air masuk	Tin	Temperatur air panas menuju menara (°C)
Temperatur air keluar	Tout	Temperatur air setelah didinginkan (°C)
Temperatur bola basah	Twb	Temperatur bola basah udara masuk (°C)
Range	R	Tin − Tout (°C)
Approach	A	Tout − Twb (°C)
Efektivitas	ε	R / (Tin − Twb) × 100%

2.2 Persamaan analisis

Range menunjukkan penurunan temperatur air selama melewati menara pendingin. Approach merupakan selisih antara temperatur air keluar dan temperatur bola basah udara. Efektivitas dihitung dari perbandingan range terhadap beda temperatur air masuk dan temperatur bola basah.

$$R = Tin - Tout \quad (1)$$

$$A = Tout - Twb \quad (2)$$

$$\varepsilon = [\ (Tin - Tout) \ / \ (Tin - Twb)\ ] \times 100\% \quad (3)$$

Efektivitas desain sebesar 78,00% digunakan sebagai nilai pembanding sesuai naskah sumber. Perhitungan ulang harian tidak dilakukan karena tabel data mentah lengkap tidak direkonstruksi pada artikel ini. Oleh karena itu, nilai rata-rata dan rentang bulanan diperlakukan sebagai hasil yang dilaporkan oleh penelitian sumber, bukan sebagai keluaran hitung ulang independen.

Untuk kondensor, sumber penelitian menggunakan laju perpindahan panas aktual dibandingkan dengan laju perpindahan panas maksimum sebagai dasar efektivitas. Efisiensi kondensor dihitung dari perbandingan besaran panas yang dilepas atau diterima sesuai neraca energi yang digunakan dalam naskah sumber. Karena beberapa persamaan sumber tersaji sebagai objek gambar, persamaan berikut dituliskan dalam bentuk ringkas berdasarkan definisi variabelnya; perhitungan numerik perlu diverifikasi terhadap lembar kerja asli.

$$\varepsilon_cond = Q_aktual / Q_maksimum \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta_cond = Q_out / Q_in \times 100\% \quad (5)$$

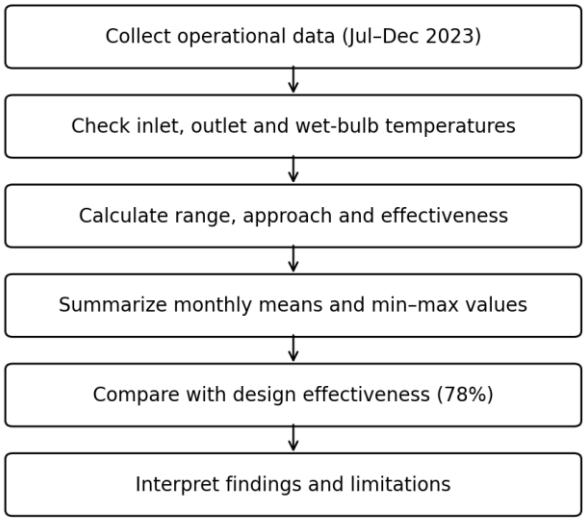
Efisiensi isentropik turbin ditentukan dengan membandingkan daya aktual terhadap daya isentropik ideal. Nilai daya ideal dihitung dari laju aliran massa dan selisih entalpi masuk dengan entalpi ideal keluar turbin.

$$\eta_t = P_aktual / P_isentropik \times 100\% \quad (6)$$

Untuk evaluasi turbin, naskah sumber menggunakan efisiensi spesifikasi 87,51% sebagai pembanding dan menghitung efisiensi aktual dari data operasi. Karena terdapat perbedaan antara daya terukur dan daya hasil perhitungan, hasil turbin dibahas sebagai rentang yang dilaporkan, bukan sebagai satu nilai pasti.

2.3 Alur pengolahan data

Tahapan pengolahan meliputi pengumpulan data operasi, pemeriksaan variabel temperatur, perhitungan range dan approach, penentuan efektivitas, peringkasan nilai bulanan, serta perbandingan terhadap nilai desain. Alur ini digunakan untuk memastikan bahwa interpretasi berangkat dari variabel yang memang tersedia dalam dokumen sumber.



Gambar 1. Alur pengolahan data efektivitas menara pendingin.

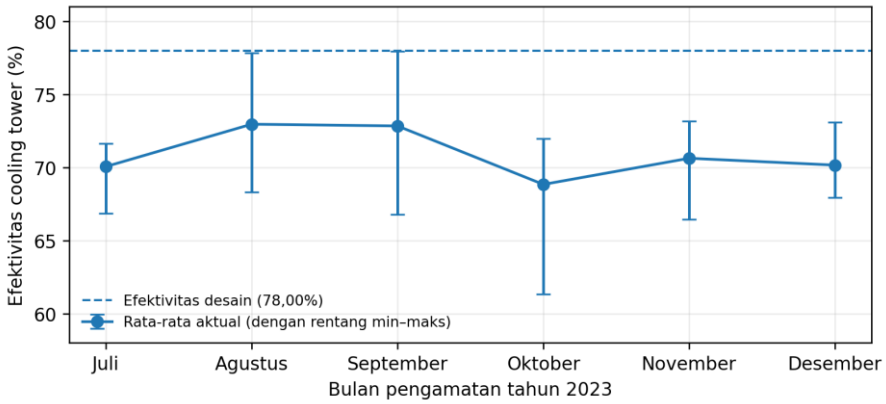
3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Efektivitas bulanan dibandingkan dengan desain

Dokumen sumber melaporkan efektivitas desain menara pendingin sebesar 78,00% dan rata-rata efektivitas aktual Juli–Desember 2023 sebesar 70,91%. Seluruh rata-rata bulanan yang dilaporkan berada di bawah nilai desain. Rata-rata tertinggi terjadi pada Agustus sebesar 72,96%, sedangkan rata-rata terendah terjadi pada Oktober sebesar 68,84%. Pola ini menunjukkan fluktuasi efektivitas sepanjang periode pengamatan, dengan penurunan paling nyata pada Oktober.

Tabel 2. Ringkasan efektivitas menara pendingin per bulan

Bulan	Rata-rata (%)	Minimum (%)	Maksi-mum (%)	Desain (%)
Juli	70,06	66,86	71,62	78,00
Agustus	72,96	68,30	77,83	78,00
September	72,84	66,80	77,94	78,00
Oktober	68,84	61,34	71,97	78,00
November	70,63	66,45	73,16	78,00
Desember	70,16	67,95	73,10	78,00



Gambar 2. Rata-rata efektivitas bulanan beserta rentang minimum–maksimum yang dilaporkan.

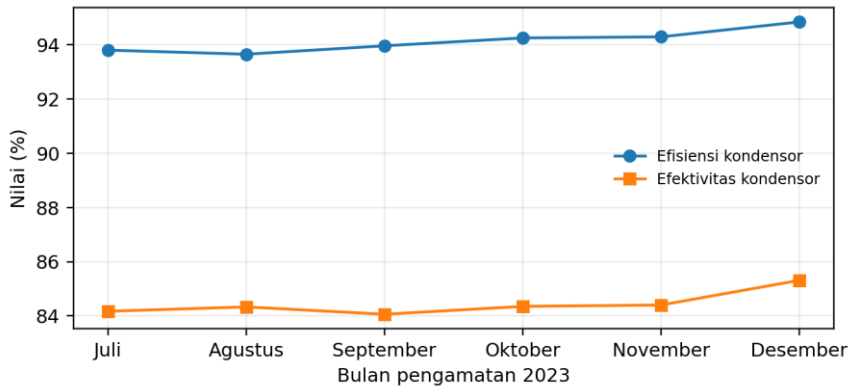
Nilai maksimum harian tertinggi dalam periode tersebut adalah 77,94% pada September, mendekati tetapi masih di bawah nilai desain 78,00%. Nilai minimum terendah adalah 61,34% pada Oktober. Rentang minimum–maksimum yang cukup lebar mengindikasikan variasi kondisi operasi harian; namun, tanpa data meteorologi, debit air, beban kondensor, dan catatan pemeliharaan yang disejajarkan berdasarkan waktu, penyebab variasi tersebut tidak dapat dipastikan.

3.2 Kinerja kondensor

Ringkasan data bulanan pada naskah sumber menunjukkan bahwa efisiensi kondensor berada pada 93,65–94,84%, sedangkan efektivitasnya berada pada 84,06–85,31%. Rata-rata yang dilaporkan untuk keseluruhan periode masing-masing adalah 94,13% dan 84,43%. Keduanya memperlihatkan kecenderungan perubahan yang searah dalam pembahasan sumber, tetapi hubungan ini belum diuji secara statistik dan tidak dengan sendirinya membuktikan bahwa satu indikator menyebabkan perubahan indikator lainnya.

Tabel 3. Ringkasan efisiensi dan efektivitas kondensor per bulan.

Bulan	Efisiensi kondensor	Efektivitas kondensor
Juli	93.80%	84.17%
Agustus	93.65%	84.33%
September	93.96%	84.06%
Oktober	94.25%	84.35%
November	94.29%	84.40%
Desember	94.84%	85.31%



Gambar 3. Perubahan efisiensi dan efektivitas kondensor selama Juli–Desember 2023.

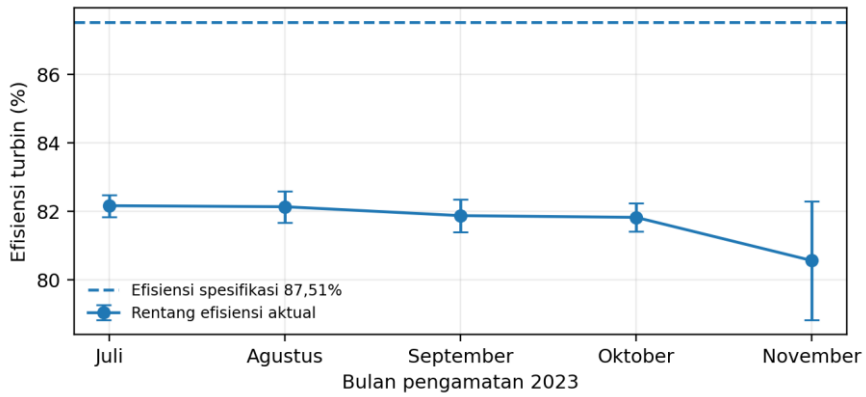
Efisiensi kondensor tertinggi yang dilaporkan terjadi pada Desember sebesar 94,84%, sedangkan terendah pada Agustus sebesar 93,65%. Efektivitas tertinggi juga terjadi pada Desember sebesar 85,31%, dan terendah pada September sebesar 84,06%. Data sumber menyebutkan satu nilai efisiensi harian mencapai 102,32% pada Desember. Nilai di atas 100% perlu diverifikasi karena dapat menunjukkan ketidaksesuaian definisi besaran panas, satuan, basis perhitungan, atau pengukuran; nilai tersebut tidak boleh langsung dianggap sebagai efisiensi fisik yang valid.

3.3 Kinerja turbin uap

Efisiensi turbin berdasarkan data spesifikasi atau komisioning dilaporkan sebesar 87,51%. Berdasarkan perhitungan dari data operasi, rentang efisiensi aktual yang dilaporkan adalah 81,84–82,48% pada Juli, 81,67–82,59% pada Agustus, 81,39–82,35% pada September, 81,41–82,23% pada Oktober, dan 78,83–82,29% pada November. Ringkasan untuk Desember tidak tersedia secara jelas pada bagian hasil turbin yang diekstraksi, sehingga tidak ditambahkan ke tabel untuk menghindari pengisian data yang tidak didukung.

Tabel 4. Rentang efisiensi turbin aktual dan nilai spesifikasi.

Bulan	Efisiensi aktual yang dilaporkan	Efisiensi spesifikasi
Juli	81.84–82.48%	87,51%
Agustus	81.67–82.59%	87,51%
September	81.39–82.35%	87,51%
Oktober	81.41–82.23%	87,51%
November	78.83–82.29%	87,51%



Gambar 4. Rentang efisiensi turbin aktual dibandingkan nilai spesifikasi.

Selain perbedaan efisiensi, daya aktual turbin terukur dan daya hasil perhitungan juga tidak konsisten. Sebagai contoh, pada Juli daya terukur dilaporkan 64,55–66,61 MW, sedangkan daya hasil perhitungan 52,99–54,74 MW. Pada November, daya terukur dilaporkan 55,41–66,49 MW dan daya hasil perhitungan 43,68–54,51 MW. Selisih ini menguatkan rekomendasi sumber agar instrumen, pembacaan DCS, basis laju aliran massa, tekanan, dan temperatur diverifikasi sebelum menarik kesimpulan kuantitatif tentang penurunan performa.

Perbandingan antarperalatan perlu dilakukan secara hati-hati. Menara pendingin memengaruhi temperatur air pendingin yang disirkulasikan, kondensor membuang panas dari uap buang turbin, sedangkan turbin mengubah penurunan entalpi uap menjadi kerja poros. Ketiganya saling terhubung melalui kondisi termodinamika siklus, tetapi data ringkasan yang tidak tersinkronisasi dan ketidakpastian pengukuran belum cukup untuk menetapkan besarnya pengaruh satu komponen terhadap komponen lain.

3.4 Pembahasan

Efektivitas rata-rata menara pendingin sebesar 70,91% berada 7,09 poin persentase di bawah nilai desain 78,00%. Celah ini menunjukkan perlunya pemeriksaan kondisi operasi, tetapi bukan bukti tunggal bahwa menara mengalami kerusakan. Temperatur bola basah, distribusi air, kondisi fill pack, kinerja kipas, beban panas, dan kebersihan basin dapat memengaruhi performa; namun, variabel-variabel tersebut tidak semuanya diuji secara terpisah dalam data yang tersedia.

Oktober menjadi prioritas penelaahan karena memiliki rata-rata efektivitas menara pendingin terendah yang dilaporkan, yaitu 68,84%, dengan minimum harian 61,34%. Tindak lanjut yang relevan mencakup verifikasi sensor temperatur, pemeriksaan kipas dan distribusi air, inspeksi fill pack, serta pembersihan basin dan saringan. Setiap tindakan sebaiknya dievaluasi melalui pengukuran sebelum dan sesudah pemeliharaan dengan kondisi beban dan waktu pengamatan yang sebanding.

Keterbatasan utama penelitian adalah penggunaan ringkasan hasil yang dilaporkan dalam dokumen sumber, bukan seluruh data mentah harian yang dapat diaudit ulang. Artikel ini tidak menghitung ulang 184 sampel, tidak menyajikan simpangan baku atau

interval kepercayaan, dan belum menguji hubungan statistik antara kinerja menara pendingin, kondensor, serta turbin. Selain itu, nilai efisiensi kondensor di atas 100% dan selisih daya turbin terukur terhadap daya hasil perhitungan memerlukan verifikasi definisi, satuan, instrumentasi, dan neraca energi.

4 Kesimpulan

Analisis data operasional PLTP Unit 3 Ulubelu Juli–Desember 2023 menunjukkan efektivitas rata-rata menara pendingin sebesar 70,91%, atau 7,09 poin persentase di bawah nilai desain 78,00%. Kondensor memiliki efisiensi rata-rata 94,13% dan efektivitas rata-rata 84,43% sebagaimana dilaporkan dalam dokumen sumber. Efisiensi turbin spesifikasi tercatat 87,51%, sedangkan rentang efisiensi aktual pada bulan-bulan yang dilaporkan berada di bawah nilai tersebut dan mencapai 78,83–82,59%. Ketidaksesuaian antara daya turbin terukur dan daya hasil perhitungan serta nilai efisiensi kondensor harian di atas 100% menunjukkan perlunya validasi data dan instrumen. Penelitian lanjutan perlu menggunakan data mentah tersinkronisasi, memeriksa neraca energi, serta menguji keterkaitan antarkomponen sebelum menyimpulkan hubungan sebab-akibat.

5 Daftar Pustaka

[1] H. Ahyadi and A. K. A. Prakoso, “Analisis perubahan sudut blade fan cooling tower terhadap performance cooling tower Unit 3 di PT.X,” Bina Teknika, vol. 15, no. 2, p. 109, 2020, doi: 10.54378/bt.v15i2.1247.

[2] A. Muhsin and Z. Pratama, “Analisis efektivitas mesin cooling tower menggunakan range dan approach,” Jurnal Optimasi Sistem Industri, pp. 120–121, 2018.

[3] M. A. Rahman, “Cooling Tower Performance Analysis Using Range and Approach Methods,” Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Lambung Mangkurat, pp. 134–135, 2022.

[4] E. N. Faizah, “Analisa performa kinerja cooling tower induced draft counter flow dengan bahan pengisi aluminium semicircular arc,” Jurnal UNEJ, 2020.

[5] O. Triyansah et al., “Efektivitas cooling tower fan 6P-4051-GB di PT Pupuk Sriwidjaja sektor STG-BB, Palembang, Sumatera Selatan,” Rekayasa Mekanik, vol. 4, no. 1, pp. 7–12, 2020.

[6] G. G. Adiarte, “Analisis pemodelan sistem pengendalian level air condenser dan optimalisasi performance melalui auto tuning PID controller di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Unit 5,” 2019.

[7] I. K. Jamaludin, “Analisis perhitungan daya turbin yang dihasilkan dan efisiensi turbin uap pada Unit 1 dan Unit 2 di PT Indonesia Power UBOH UJP Banten 3 Lontar,” Jurnal Teknik Mesin, 2017.

[8] A. Karakurt and M. Gunes, “Performance analysis of a steam turbine power plant at part load conditions,” Journal of Thermal Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 1121–1128, 2018.

[9] A. I. Sibarani, “Identifikasi keandalan turbin uap berdasarkan analisa peluang kegagalan dengan metode Failure Mode and Effect Analysis dan distribusi Weibull,” Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, 2019.

[10] A. N. Sidiq and M. Anwar, “Perbandingan efisiensi turbin uap kondisi aktual berbasis data komisioning sesuai standar ASME PTC 6,” KILAT, vol. 10, no. 1, 2021.

[11] H. P. I. Sinaga, C. T. Utomo, and E. Tarigan, “Analisis performance turbin uap kapasitas 1,95 MW di PT Perkebunan Lembah Bhakti Astra Agro Lestari Tbk,” 2022.