

Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur Air Pendingin dan Temperatur Uap Masuk Kondensor Terhadap Kinerja Kondensor Unit 4 PT Bintan Alumina Indonesia

Daniel Jaka Pegos Simbolon¹, Muhammad Veven², Lalu Kaisar Wisnu Kita³, Ir.Irwanto Zarma Putra⁴

Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam

jacksimbolon101004@gmail.com¹

Article Info

Article history:

Received Juni 2026

Revised Agustus 2026

Accepted Agustus 2026

Keyword:

Condenser, Cooling Water Temperature, Condenser Effectiveness, Heat Transfer, LMTD, NTU.

ABSTRACT

The condenser is a critical heat exchanger in a steam power plant that condenses turbine exhaust steam into condensate while maintaining the vacuum required for efficient plant operation. This study aims to analyze the effects of cooling water temperature and inlet steam temperature on the performance of the Unit 4 condenser at PT Bintan Alumina Indonesia. A quantitative approach was employed using actual operating data collected from October 2025 to February 2026 through the Distributed Control System (DCS) and operator log sheets under steady-state conditions. The performance evaluation was conducted using the Log Mean Temperature Difference (LMTD), Number of Transfer Units (NTU), capacity ratio, heat transfer rate (Q), and condenser effectiveness. The results indicate that an increase in inlet cooling water temperature reduces condenser effectiveness, whereas a higher inlet steam temperature improves the heat transfer driving force and condenser performance. The optimum operating condition was observed on 10 October 2025, with an inlet cooling water temperature of 27.42°C, an inlet steam temperature of 41.80°C, an LMTD of 7.70°C, an NTU of 0.85, a heat transfer rate of 174.09 kW, and a condenser effectiveness of 0.57. In contrast, the effectiveness decreased to approximately 0.32–0.34 when the inlet cooling water temperature exceeded 28°C. These findings demonstrate that simultaneous control of cooling water temperature and inlet steam temperature is essential for maintaining optimum condenser performance and improving the operational efficiency of the power plant.

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik melalui siklus termodinamika yang dikenal sebagai siklus *Rankine* [1]. Air dipanaskan di dalam boiler hingga menjadi uap bertekanan tinggi, dialirkan ke turbin untuk menghasilkan energi mekanik, lalu dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Setelah kehilangan sebagian besar energinya, uap tersebut perlu dikondensasikan kembali menjadi air di dalam kondensor sebelum dipompakan ke boiler, sehingga siklus dapat berjalan terus-menerus.

PLTU PT Bintan Alumina Indonesia (BAI) memiliki kapasitas daya total 180 MW dengan 6 unit turbin, di mana Unit 1 dan Unit 4 merupakan turbin utama yang dilengkapi kondensor bertipe *shell-and-tube* dengan sistem pendingin air laut sirkulasi terbuka; sementara Unit 2, 3, 5, dan 6 berfungsi sebagai *gland seal turbine*. Kondensor menjadi komponen yang cukup krusial di sini karena tugasnya bukan hanya mengubah uap buang turbin menjadi air, tetapi juga

menjaga tekanan vakum agar ekspansi uap pada turbin dapat berlangsung optimal [2].

Persoalannya, kinerja kondensor sangat bergantung pada dua hal: temperatur air pendingin dan temperatur uap yang masuk. Ketika temperatur air pendingin naik, kemampuan kondensor menyerap panas dari uap ikut menurun, sehingga tekanan di dalam kondensor cenderung naik dan efektivitas kondensasi menurun. Kondisi termal kondensor sangat menentukan efisiensi keseluruhan sistem PLTU, terutama lewat pengaruh temperatur air pendingin terhadap proses perpindahan panas dan kondensasi [3]. Karena PLTU BAI mengandalkan air laut bersirkulasi terbuka sebagai media pendingin, temperatur air pendingin praktis mengikuti kondisi lingkungan sekitar-suhu air laut dan beban operasi pembangkit ikut menentukan-sehingga selalu ada kesenjangan antara kondisi ideal di atas kertas dengan apa yang terjadi di lapangan.

Dari persoalan tersebut, penelitian ini disusun untuk menjawab tiga pertanyaan: bagaimana pengaruh temperatur air pendingin terhadap kinerja kondensor, bagaimana pengaruh kondisi uap masuk, dan bagaimana interaksi

keduanya membentuk performa kondensor Unit 4 PT BAI. Tujuannya adalah menganalisis pengaruh kedua variabel tersebut berdasarkan data operasi aktual periode Oktober 2025-Februari 2026, dengan pendekatan LMTD, NTU, *capacity ratio*, laju perpindahan panas, dan efektivitas. Harapannya, hasil penelitian ini bisa menjadi masukan teknis bagi perusahaan untuk meningkatkan efisiensi operasi unit pembangkit, sekaligus menjadi referensi tambahan bagi sivitas akademika di bidang teknik energi.

Perlu digarisbawahi bahwa analisis dalam penelitian ini hanya mencakup komponen kondensor, tanpa membahas performa komponen siklus lain seperti turbin, boiler, atau sistem bahan bakar, dan tidak menghitung efisiensi keseluruhan siklus PLTU. Objek penelitian juga dibatasi pada Kondensor Unit 4 dengan sistem pendingin sirkulasi terbuka, tanpa menyinggung faktor kimiawi air pendingin seperti salinitas, pH, atau *fouling* biologis-kecuali jika berpengaruh langsung terhadap temperatur operasi. Data yang dipakai adalah data historis pada kondisi *steady state*, bukan hasil simulasi, dan tidak membahas kondisi transien seperti *start-up* atau *shut-down* sistem pendingin.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. PLTU dan Peran Kondensor

Siklus *Rankine* sederhana melibatkan empat komponen utama: pompa, boiler, turbin, dan kondensor. Boiler bertugas memanaskan air hingga menjadi uap bertekanan tinggi memakai panas hasil pembakaran bahan bakar [5]. Uap tersebut lalu diarahkan ke turbin, yang mengubah tenaga panasnya menjadi tenaga gerak putar untuk menghasilkan energi mekanik [6]. Setelah melewati turbin, kondensor mengembalikan uap bekas menjadi air melalui proses pendinginan dengan air laut [7], dan pompa mengalirkan air hasil kondensasi tersebut kembali ke boiler sekaligus menjaga tekanannya agar proses pembentukan uap tetap lancar [8].

Sebagai alat penukar panas, kondensor mengubah uap keluaran turbin menjadi air lewat tiga mekanisme perpindahan panas yang bekerja berurutan: konveksi dari uap ke permukaan pipa, konduksi melalui material pipa, lalu konveksi lagi dari dinding luar pipa ke air pendingin yang mengalir di dalamnya [9]. Fungsi kondensor sebenarnya tidak berhenti di situ-ia juga menjaga tekanan vakum pada sisi keluaran turbin, sehingga uap bisa berekspansi lebih maksimal sebelum keluar dan energi yang terkonversi menjadi putaran turbin pun lebih besar.

B. Komponen dan Faktor yang Memengaruhi Kinerja Kondensor

Kondensor terdiri atas beberapa komponen yang saling melengkapi: shell dan *tube bundle* sebagai inti penukar panas [10]; *waterbox/hotwell* sebagai penampung kondensat; pompa vakum dan *roots blower* yang menjaga kevakuman dengan membuang gas non-kondensabel [11]; pompa sirkulasi air pendingin (*Circulating Water Pump*) yang mengalirkan air pendingin melalui *tube bundle* [9]; *vacuum breaker* sebagai katup pengaman tekanan; serta *strainer* yang

menyaring kotoran pada saluran masuk air pendingin. Dari berbagai literatur, setidaknya ada lima faktor yang paling menentukan kinerja kondensor: debit dan temperatur air pendingin-semakin memadai debit dan semakin rendah temperatur masuk, semakin baik penyerapan panasnya [9]; kebersihan permukaan tube yang bisa terganggu oleh *fouling* atau *scaling* sehingga menambah resistansi termal [10]; tekanan atau kondisi vakum kondensor, karena semakin rendah tekanannya semakin optimal ekspansi uap pada turbin [11]; desain dan geometri kondensor itu sendiri; dan terakhir, keberadaan gas non-kondensabel akibat kebocoran udara.

C. Metode LMTD dan NTU

Log Mean Temperature Difference (LMTD) dipakai untuk menyatakan *driving force* perpindahan panas rata-rata antara dua fluida pada penukar panas, dengan mempertimbangkan perubahan suhu di sepanjang penukar tersebut. Metode ini cukup praktis karena cukup mengandalkan data temperatur fluida masuk dan keluar [7]. Sementara itu, metode *Number of Transfer Units* (NTU) atau ϵ -NTU dipakai untuk menentukan efektivitas perpindahan panas tanpa harus bergantung pada seluruh variabel temperatur-efektivitas di sini dipahami sebagai rasio antara perpindahan kalor aktual dengan perpindahan kalor maksimum yang mungkin terjadi, dan nilainya dipengaruhi oleh arah aliran fluida, baik *parallel flow* maupun *counter flow* [12]. Semakin besar nilai NTU, semakin baik pula kemampuan perpindahan panas pada kondisi operasi tertentu.

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PLTU PT Bintang Alumina Indonesia yang berlokasi di Gn. Kijang, Kabupaten Bintan, Provinsi Kepulauan Riau. Objek yang diteliti adalah Kondensor Unit 4 bermodel N2500A, berjenis permukaan aliran ganda dua bagian, dengan luas area pendinginan 2500 m², tekanan sisi uap 7,6 kPa, debit air pendingin 6851 t/h, dan jumlah pipa air pendingin sebanyak 4398 buah bermaterial TA1.

B. Variabel Penelitian

Variabel yang diamati langsung dari sistem DCS dan *log sheet* operator mencakup temperatur air pendingin masuk (T_{cin}) dan keluar (T_{cout}), temperatur uap masuk (T_{in}) dan keluar/kondensat (T_{out}), tekanan vakum kondensor (P), laju aliran massa uap ($\dot{m}_s$), serta laju aliran massa air pendingin ($\dot{m}_{cw}$). Dari data tersebut kemudian dihitung LMTD, *capacity ratio* (C), laju perpindahan panas (Q), *Number of Transfer Units* (NTU), dan efektivitas kondensor (ϵ), dengan nilai kalor jenis uap $C_{ps}=1,92$ kJ/kg°C dan kalor jenis air pendingin $C_{pcw}=4,17$ kJ/kg°C.

C. Metode Pengumpulan dan Pengolahan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data operasi aktual periode Oktober 2025-Februari 2026 yang diambil dari Distributed Control System (DCS) dan *log sheet* harian operator pada kondisi operasi normal dan

steady state. Karena sifatnya data historis, pengamatan dilakukan secara tidak langsung tanpa pengukuran lapangan. Secara garis besar, tahapan yang ditempuh meliputi studi literatur mengenai PLTU, kondensor, dan jurnal-jurnal terkait; identifikasi masalah dan penentuan tujuan penelitian; penentuan variabel yang diamati dan dihitung; pengumpulan data operasi harian; validasi serta seleksi data pada kondisi *steady state*; pengolahan data menggunakan Persamaan (1)-(5); dan terakhir, analisis serta pembahasan hasil untuk melihat pengaruh variasi temperatur terhadap kinerja kondensor.

D. Persamaan Perhitungan

Beda temperatur rata-rata logaritmik (LMTD) pada kondensor dengan aliran berlawanan (*counter flow*) dapat dihitung dengan:

$$LMTD = [(Thin - T_{cout}) - (Thout - T_{cin})] / \ln[(Thin - T_{cout}) / (Thout - T_{cin})] \quad (1)$$

Laju perpindahan panas (Q) ditinjau dari sisi fluida panas, yaitu uap:

$$Q = \dot{m}_s \cdot C_{ps} \cdot (Thin - Thout) \quad (2)$$

Capacity ratio (C) menggambarkan perbandingan kapasitas panas fluida panas terhadap fluida dingin:

$$C = (\dot{m}_s \cdot C_{ps}) / (\dot{m}_{cw} \cdot C_{pcw}) \quad (3)$$

Sementara itu, *Number of Transfer Units* (NTU) menjadi ukuran seberapa mampu kondensor memindahkan panas:

$$NTU = Q / (C_{min} \cdot LMTD), \quad C_{min} = \dot{m}_s \cdot C_{ps} \quad (4)$$

dan efektivitas kondensor (ϵ) dihitung dengan persamaan efektivitas-NTU untuk penukar panas kondensasi berikut:

$$\epsilon = [1 - e^{(-NTU(1-C))}] / [1 - C \cdot e^{(-NTU(1-C))}] \quad (5)$$

dengan Thin dan Thout berturut-turut adalah temperatur uap masuk dan temperatur air kondensat keluar (°C); Tcin dan Tcout adalah temperatur air pendingin masuk dan keluar (°C); Cps dan Cpcw adalah kalor jenis uap dan air pendingin (kJ/kg°C); serta $\dot{m}_s$ dan $\dot{m}_{cw}$ adalah laju aliran massa uap dan air pendingin (kg/s).

E. Contoh Perhitungan

Agar lebih mudah dipahami, berikut ditampilkan satu contoh perhitungan lengkap memakai data operasi tanggal 03 Oktober 2025, mengikuti tahapan yang sama dengan yang dilakukan pada penelitian Tugas Akhir.

Diketahui: Tcin = 27,56°C; Tcout = 35,4°C; Thin = 38,27°C; Thout = 35,2°C; P = 0,06733 bar; $\dot{m}_{cw}$ = 1903,06 kg/s; $\dot{m}_s$ = 17,35 kg/s.

1) Menentukan LMTD

$$LMTD = [(Thin - T_{cout}) - (Thout - T_{cin})] / \ln[(Thin - T_{cout}) / (Thout - T_{cin})]$$

$$LMTD = [(38,27 - 35,4) - (35,2 - 27,56)] / \ln[(38,27 - 35,2) / (35,2 - 27,56)]$$

$$LMTD = (2,84 - 7,64) / \ln(2,87 / 7,64) = -4,77 / \ln(0,375)$$

$$\ln(0,375) = -0,981$$

$$LMTD = -4,77 / -0,981$$

$$LMTD = 4,87^\circ\text{C}$$

2) Menentukan Capacity Ratio

$$C = (\dot{m}_s \cdot C_{ps}) / (\dot{m}_{cw} \cdot C_{pcw})$$

$$C = (17,35 \cdot 1,92) / (1903,06 \cdot 4,17)$$

$$C = 33,312 / 7.935,7602$$

$$C = 0,0041977$$

3) Menentukan Laju Perpindahan Panas (Q)

$$Q = \dot{m}_s \cdot C_{ps} (Thin - Thout)$$

$$Q = 17,35 \cdot 1,92 (38,27 - 35,2)$$

$$Q = 33,312 (3,07)$$

$$Q = 102,27 \text{ kW}$$

4) Menentukan Number of Transfer Units (NTU)

$$NTU = (U \cdot A) / C_{min} \text{ atau } NTU = Q / (C_{min} \cdot LMTD)$$

$$C_{min} = 17,35 \cdot 1,92 = 33,312 \text{ kW}/^\circ\text{C}$$

$$NTU = 102,27 / (33,312 \cdot 4,871)$$

$$NTU = 0,63$$

5) Menentukan Efektivitas Kondensor (ϵ)

$$\epsilon = [1 - e^{(-NTU(1-C))}] / [1 - C \cdot e^{(-NTU(1-C))}]$$

$$1 - C = 1 - 0,0041977 = 0,9958023$$

$$NTU(1-C) = 0,63 \cdot 0,9958023 = 0,627355449$$

$$e^{(-0,627355449)} = 0,534$$

$$\epsilon = (1 - 0,534) / (1 - 0,0041977 \cdot 0,534)$$

$$\epsilon = 0,466 / 0,9973284282$$

$$\epsilon = 0,46$$

Dari perhitungan di atas terlihat bahwa pada kondisi operasi 03 Oktober 2025, Kondensor Unit 4 memiliki LMTD sebesar 4,87°C, *capacity ratio* 0,0041977, laju perpindahan panas 102,27 kW, NTU 0,63, dan efektivitas 0,46-angka yang sesuai dengan hasil perhitungan pada Tugas Akhir. Langkah yang sama kemudian diulang untuk seluruh data operasi bulan Oktober 2025 hingga Februari 2026, dan hasilnya dirangkum pada Tabel II, IV, VI, dan VIII.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Operasi dan Hasil Perhitungan Bulan Oktober 2025

Tabel I memuat data operasi aktual Kondensor Unit 4 pada bulan Oktober 2025, sedangkan Tabel II adalah hasil perhitungan parameter kinerjanya mengikuti prosedur pada Bagian III.E. Baris pertama Tabel II, yaitu data 03 Oktober 2025, memang persis merupakan hasil dari contoh perhitungan tersebut: LMTD=4,87°C, Q=102,26 kW, C=0,0042, NTU=0,63, dan ϵ =0,46.

TABEL I. DATA OPERASI KONDENSOR BULAN OKTOBER 2025

Tanggal	Tcin (°C)	Tcout (°C)	Thin (°C)	Thout (°C)	P (bar)	$\dot{m}_s$ (kg/s)
03-10-25	27.56	35.4	38.27	35.2	0.06733	17.35
07-10-25	27.67	35.1	38.08	35.43	0.06665	15.56
10-10-25	27.42	34.2	41.8	34.22	0.08125	13.78

Tanggal	T _{cin} (°C)	T _{cout} (°C)	Thin (°C)	Thout (°C)	P (bar)	m _s (kg/s)
14-10-25	27.81	34.7	38.7	34.81	0.06925	17.67
17-10-25	28.13	34.4	37.97	35.66	0.06625	20.12
21-10-25	27.62	34.1	39.32	34.71	0.07125	17.88
30-10-25	28.01	33.7	39.06	36	0.07025	19.2

TABEL II. HASIL PERHITUNGAN KINERJA KONDENSOR BULAN OKTOBER 2025

Tanggal	LMTD (°C)	NTU	ε	Q (kW)
03-10-25	4.87	0.63	0.46	102.26
07-10-25	4.99	0.53	0.4	79.16
10-10-25	7.7	0.85	0.57	174.09
14-10-25	5.36	0.72	0.51	131.97
17-10-25	5.31	0.43	0.34	89.23
21-10-25	6.11	0.75	0.52	158.25
30-10-25	6.59	0.46	0.36	112.8

Kondisi paling baik pada bulan Oktober 2025 terjadi pada 10 Oktober-tepat ketika T_{cin} berada di titik terendah (27,42°C) dan Thin di titik tertinggi (41,80°C)-yang menghasilkan LMTD 7,70°C, NTU 0,85, Q 174,09 kW, dan efektivitas maksimum ε=0,57. Sebaliknya, cukup dengan T_{cin} naik menjadi 28,13°C pada 17 Oktober 2025, efektivitas langsung turun menjadi ε=0,34, meskipun Thin masih relatif tinggi (37,97°C). Perbedaan ini memperlihatkan betapa sensitifnya kondensor terhadap perubahan temperatur air pendingin, bahkan untuk selisih yang tampak kecil sekalipun.

B. Data Operasi dan Hasil Perhitungan Bulan November 2025

Tabel III dan Tabel IV menampilkan data operasi serta hasil perhitungan kinerja kondensor pada bulan November 2025. Menariknya, pada periode ini temperatur air pendingin justru berada di titik yang lebih rendah dan lebih stabil (27,1-28,13°C) dibandingkan Oktober, sehingga nilai LMTD dan efektivitas kondensor cenderung ikut naik dan lebih konsisten. Efektivitas tertinggi tercatat ε=0,53 pada 15 November 2025, dengan Q=180,90 kW dan NTU=0,77-nilai Q tertinggi di seluruh periode pengamatan.

TABEL III. DATA OPERASI KONDENSOR BULAN NOVEMBER 2025

Tanggal	T _{cin} (°C)	T _{cout} (°C)	Thin (°C)	Thout (°C)	P (bar)	m _s (kg/s)
03-11-25	27.3	32	37.61	33.6	0.05925	19.44
07-11-25	28	31.7	37.12	33.8	0.06325	18.22
11-11-25	27.1	33.3	36.61	33.8	0.06857	17.5
15-11-25	27.6	31.6	38.84	33.7	0.06941	18.33
20-11-25	27.2	32.5	36.63	33.4	0.06158	20.28

Tanggal	T _{cin} (°C)	T _{cout} (°C)	Thin (°C)	Thout (°C)	P (bar)	m _s (kg/s)
26-11-25	27.9	32.2	38.76	34.3	0.06913	16.11
28-11-25	28.13	32.8	36.73	33.8	0.06192	17.23

TABEL IV. HASIL PERHITUNGAN KINERJA KONDENSOR BULAN NOVEMBER 2025

Tanggal	LMTD (°C)	NTU	ε	Q (kW)
03-11-25	5.95	0.67	0.49	149.67
07-11-25	5.61	0.59	0.44	116.14
11-11-25	4.81	0.58	0.44	94.42
15-11-25	6.65	0.77	0.53	180.9
20-11-25	5.1	0.63	0.47	125.77
26-11-25	6.48	0.69	0.49	137.95
28-11-25	4.75	0.62	0.46	96.93

C. Data Operasi dan Hasil Perhitungan Bulan Januari 2026

Memasuki Januari 2026, laju aliran massa uap (m_s) melonjak hingga 23,05 kg/s-nilai tertinggi sepanjang periode penelitian-sehingga beban panas yang harus ditangani kondensor pun ikut bertambah. Sayangnya, peningkatan beban ini tidak sepenuhnya bisa diimbangi oleh kemampuan pendinginan, sehingga rata-rata efektivitas (ε=0,35-0,48) justru turun dibandingkan November, walaupun nilai LMTD-nya sendiri masih tergolong cukup baik (4,53-6,88°C). Data selengkapnya dapat dilihat pada Tabel V dan Tabel VI.

TABEL V. DATA OPERASI KONDENSOR BULAN JANUARI 2026

Tanggal	T _{cin} (°C)	T _{cout} (°C)	Thin (°C)	Thout (°C)	P (bar)	m _s (kg/s)
09-01-26	27.9	33.6	37.41	34.8	0.06425	19.1
11-01-26	27.6	33.1	39.06	35.5	0.07025	17.23
14-01-26	27.8	32.2	37.97	35.1	0.06625	21.11
18-01-26	28	32.9	37.12	34.6	0.06325	20.8
22-01-26	27.6	33.3	38.84	35.3	0.06941	23.05
28-01-26	27.9	32.4	39.06	34.6	0.07025	18.67
30-01-26	27.9	33.5	36.83	33.9	0.06225	17.51

TABEL VI. HASIL PERHITUNGAN KINERJA KONDENSOR BULAN JANUARI 2026

Tanggal	LMTD (°C)	NTU	ε	Q (kW)
09-01-26	5.2	0.5	0.39	95.71
11-01-26	6.88	0.52	0.4	117.77
14-01-26	6.51	0.44	0.35	116.32
18-01-26	5.32	0.47	0.37	100.64
22-01-26	6.56	0.54	0.41	156.67

Tanggal	LMTD (°C)	NTU	ϵ	Q (kW)
28-01-26	6.68	0.67	0.48	159.87
30-01-26	4.53	0.65	0.47	98.5

D. Data Operasi dan Hasil Perhitungan Bulan Februari 2026

Temperatur air pendingin dan uap pada Februari 2026 sebenarnya tergolong stabil (Tabel VII), tetapi justru bulan ini yang mencatatkan rata-rata efektivitas terendah sepanjang periode pengamatan ($\epsilon=0,403$). Titik terendahnya terjadi pada 22 Februari 2026 dengan $\epsilon=0,32$, seiring laju perpindahan panas yang anjlok ke $Q=70,13$ kW (Tabel VIII)-menunjukkan bahwa kestabilan temperatur saja belum tentu menjamin performa yang optimal apabila laju alirannya ikut turun.

TABEL VII. DATA OPERASI KONDENSOR BULAN FEBRUARI 2026

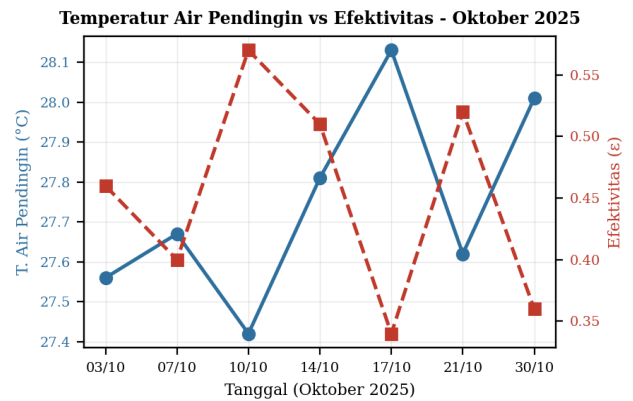
Tanggal	T _{cin} (°C)	T _{cout} (°C)	Thin (°C)	Thout (°C)	P (bar)	m _s (kg/s)
01-02-26	27.6	32.8	37.12	34.4	0.06325	18.63
04-02-26	27.9	33.6	37.21	34.6	0.06355	20.82
08-02-26	27.6	32.4	38.47	35.2	0.06805	21.34
12-02-26	27.7	33.1	37.38	34.1	0.06415	17.49
17-02-26	27.8	33.7	37.86	34.5	0.06585	22.86
22-02-26	27.6	33.5	37.21	35.1	0.06355	17.31
28-02-26	27.9	32.7	37.41	34.4	0.06425	20.55

TABEL VIII. HASIL PERHITUNGAN KINERJA KONDENSOR BULAN FEBRUARI 2026

Tanggal	LMTD (°C)	NTU	ϵ	Q (kW)
01-02-26	5.47	0.5	0.39	97.29
04-02-26	5	0.52	0.4	104.33
08-02-26	6.81	0.48	0.38	133.98
12-02-26	5.27	0.62	0.46	110.15
17-02-26	5.33	0.63	0.46	147.47
22-02-26	5.38	0.39	0.32	70.13
28-02-26	5.56	0.54	0.41	118.76

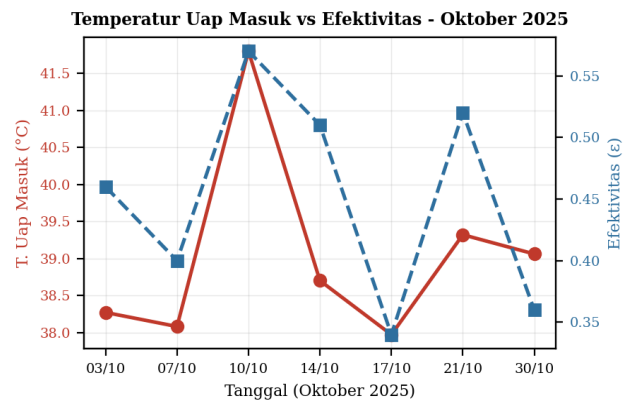
E. Pengaruh Temperatur Air Pendingin dan Uap Masuk Terhadap Efektivitas

Untuk melihat pola hubungan ini secara visual, Gambar 1 dan Gambar 2 membandingkan temperatur air pendingin (T_{cin}) serta temperatur uap masuk (Thin) terhadap efektivitas kondensor (ϵ) pada bulan Oktober 2025.



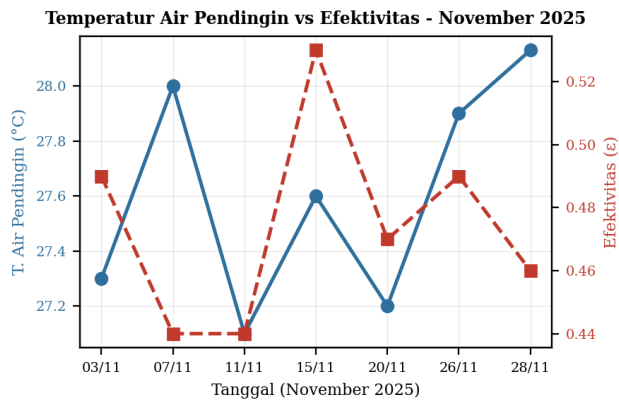
Gambar 1. Pengaruh Temperatur Air Pendingin Terhadap Efektivitas Kondensor - Oktober 2025

Pada Gambar 1 terlihat jelas hubungan yang berbanding terbalik antara T_{cin} dan efektivitas kondensor. Logikanya cukup sederhana: semakin tinggi temperatur air pendingin masuk, semakin kecil selisih temperaturnya terhadap uap, sehingga LMTD ikut mengecil dan efektivitas pun menurun. Titik efektivitas tertinggi (0,57) justru muncul saat T_{cin} berada di titik terendah (27,42°C), sementara efektivitas terendah (0,34) terjadi tepat ketika T_{cin} mencapai puncaknya (28,13°C).

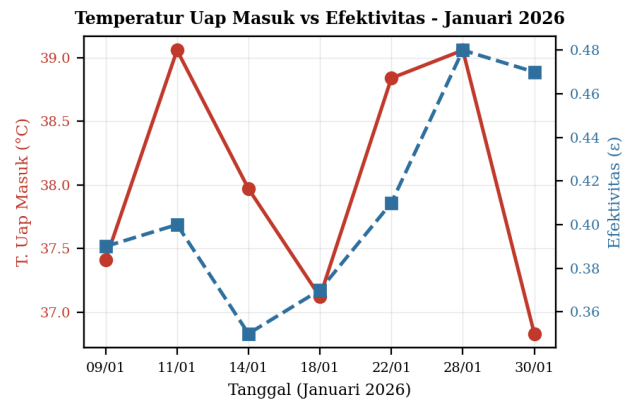


Gambar 2. Pengaruh Temperatur Uap Masuk Terhadap Efektivitas Kondensor - Oktober 2025

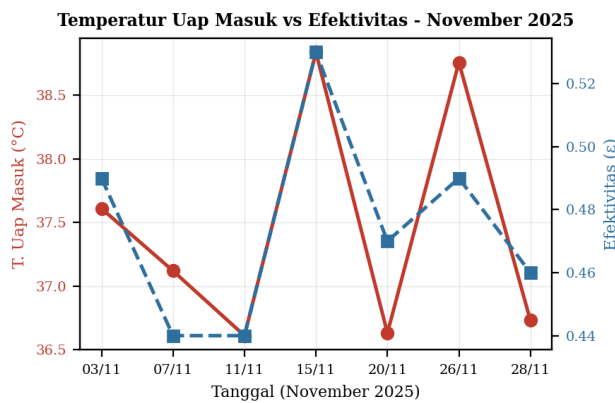
Pola yang berlawanan justru muncul pada Gambar 2: temperatur uap masuk (Thin) dan efektivitas kondensor bergerak searah. Ini masuk akal karena semakin tinggi Thin, semakin besar energi termal yang bisa dipindahkan ke air pendingin, sehingga kondensasi berlangsung lebih efektif-tentu saja selama temperatur air pendingin tetap terjaga rendah. Namun pengaruh Thin ini tidak bisa berdiri sendiri; begitu T_{cin} ikut naik, kenaikan Thin pun tidak banyak membantu karena selisih temperatur (*driving force*) antara keduanya sudah keburu mengecil.



Gambar 3. Pengaruh Temperatur Air Pendingin Terhadap Efektivitas Kondensor - November 2025



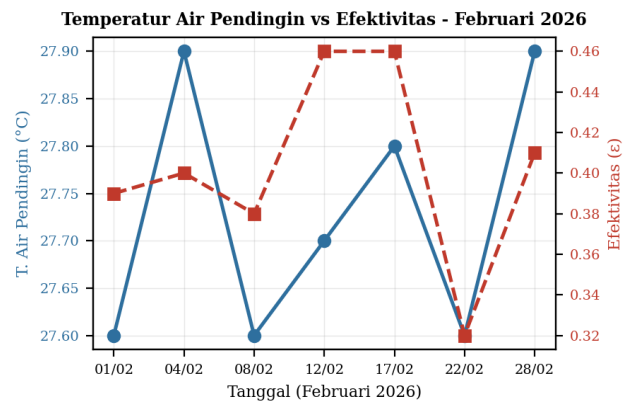
Gambar 6. Pengaruh Temperatur Uap Masuk Terhadap Efektivitas Kondensor - Januari 2026



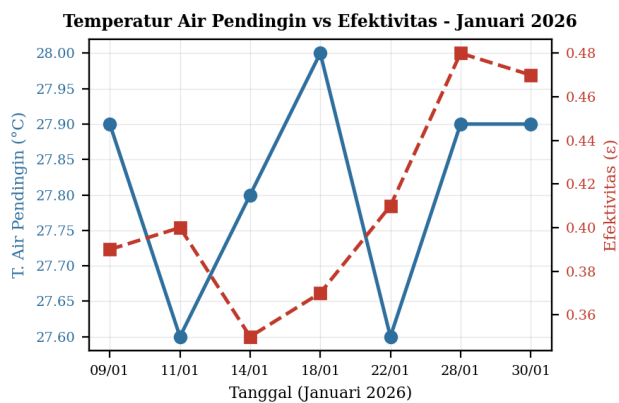
Gambar 4. Pengaruh Temperatur Uap Masuk Terhadap Efektivitas Kondensor - November 2025

Gambar 3 dan Gambar 4 memperlihatkan pola serupa untuk bulan November 2025, hanya saja lebih landai. Temperatur air pendingin yang lebih rendah dan stabil dibandingkan Oktober membuat selisih temperaturnya terhadap uap masuk menjadi lebih besar, sehingga LMTD naik dan efektivitas kondensor pun ikut lebih stabil-bahkan cenderung lebih tinggi-walaupun laju aliran uap masih tergolong besar.

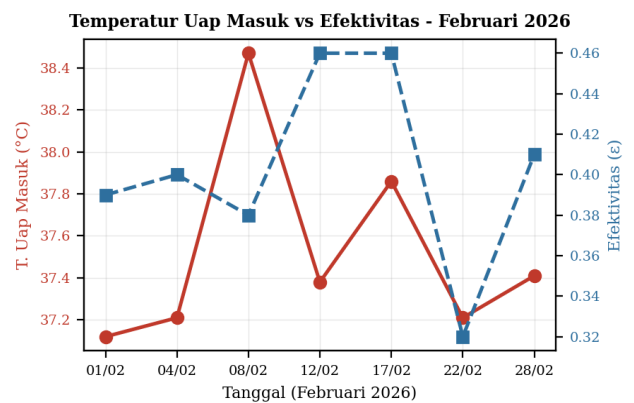
Situasinya sedikit berbeda pada Januari 2026 (Gambar 5 dan Gambar 6). Temperatur air pendingin dan uap relatif tidak banyak berubah, sehingga LMTD pun cenderung datar-tetapi efektivitasnya justru naik-turun mengikuti variasi laju aliran uap (ms). Begitu ms naik, beban panas kondensor ikut bertambah, dan sayangnya tidak selalu bisa diimbangi kemampuan perpindahan panasnya, sehingga di beberapa titik data efektivitas malah menurun.



Gambar 7. Pengaruh Temperatur Air Pendingin Terhadap Efektivitas Kondensor - Februari 2026



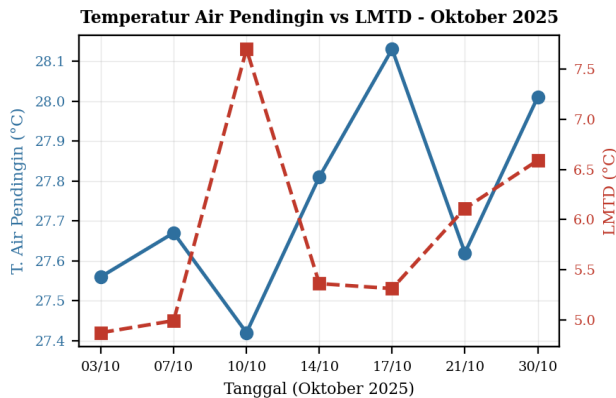
Gambar 5. Pengaruh Temperatur Air Pendingin Terhadap Efektivitas Kondensor - Januari 2026



Gambar 8. Pengaruh Temperatur Uap Masuk Terhadap Efektivitas Kondensor - Februari 2026

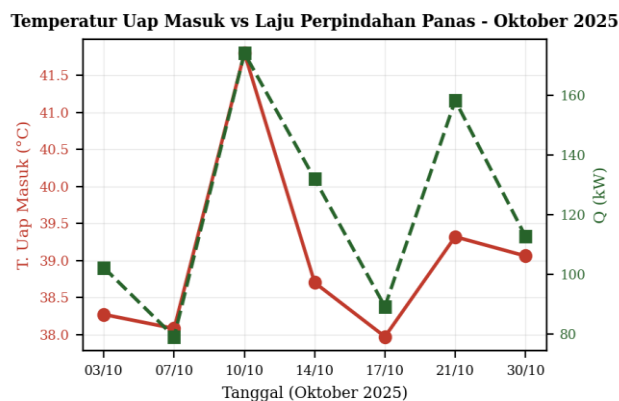
Adapun pada Februari 2026 (Gambar 7 dan Gambar 8), kestabilan temperatur air pendingin maupun uap masuk membuat LMTD relatif konstan sepanjang bulan. Efektivitas kondensor pun bertahan di kisaran menengah, meski tetap ada fluktuasi nilai Q akibat variasi laju aliran uap yang terjadi dari hari ke hari.

F. Analisis LMTD dan Laju Perpindahan Panas



Gambar 9. Pengaruh Temperatur Air Pendingin Terhadap LMTD - Oktober 2025

Secara keseluruhan, nilai LMTD pada seluruh data penelitian berkisar antara $4,53^{\circ}\text{C}$ hingga $7,70^{\circ}\text{C}$, dengan pola yang konsisten: berbanding terbalik terhadap T_{cin} (Gambar 9) dan berbanding lurus terhadap T_{hin} . Ini sejalan dengan perannya sebagai *driving force* utama proses perpindahan panas-semakin besar LMTD, semakin besar pula potensi energi panas yang bisa dipindahkan dari uap ke air pendingin, sebagaimana tercermin pada Persamaan (1) dan (2).



Gambar 10. Pengaruh Temperatur Uap Masuk Terhadap Laju Perpindahan Panas - Oktober 2025

Gambar 10 menegaskan bahwa laju perpindahan panas (Q) naik seiring meningkatnya temperatur uap masuk, dengan nilai tertinggi $174,09 \text{ kW}$ pada $T_{\text{hin}}=41,80^{\circ}\text{C}$. Bila dilihat dari keseluruhan data penelitian, nilai Q berkisar $70,13\text{--}180,90 \text{ kW}$. Menariknya, nilai NTU ($0,39\text{--}0,85$) dan *capacity ratio* ($0,0033\text{--}0,0058$) menunjukkan bahwa uap-sebagai fluida dengan C_{min} -tetap menjadi faktor pembatas utama dalam proses perpindahan panas pada kondensor tipe

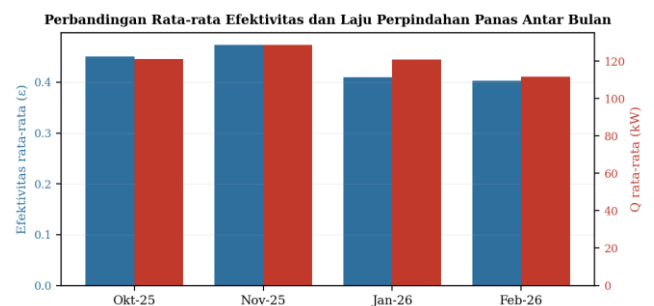
shell-and-tube ini, terlepas dari variasi kondisi operasi yang terjadi.

G. Perbandingan Kinerja Antar Bulan

Untuk melihat gambaran yang lebih luas, Tabel IX merangkum rata-rata parameter kinerja kondensor pada setiap bulan pengamatan, sementara Gambar 11 memvisualisasikan perbandingan efektivitas dan laju perpindahan panas rata-rata antar bulan.

TABEL IX. RATA-RATA KINERJA KONDENSOR PER BULAN

Bulan	LMTD (°C)	NTU	ϵ	Q (kW)
Oktober 2025	5.85	0.624	0.451	121.11
November 2025	5.62	0.65	0.474	128.83
Januari 2026	5.95	0.541	0.41	120.78
Februari 2026	5.55	0.526	0.403	111.73



Gambar 11. Perbandingan Rata-rata Efektivitas dan Laju Perpindahan Panas Antar Bulan

Dari keempat bulan yang diamati, November 2025 tampil sebagai bulan dengan rata-rata efektivitas tertinggi ($\epsilon=0,474$), sejalan dengan temperatur air pendingin yang relatif rendah dan stabil pada periode tersebut. Sebaliknya, Februari 2026 mencatatkan rata-rata efektivitas terendah ($\epsilon=0,403$). Pola yang sama juga terlihat pada laju perpindahan panas rata-rata: tertinggi di November 2025 ($128,83 \text{ kW}$) dan terendah di Februari 2026 ($111,73 \text{ kW}$). Bila ditarik benang merahnya, temuan ini menegaskan bahwa menjaga temperatur air pendingin tetap rendah dan konsisten-diiringi kondisi temperatur uap masuk yang memadai-menjadi kunci utama agar performa kondensor tetap optimal sepanjang periode operasi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari seluruh analisis data operasi Kondensor Unit 4 PT Bintan Alumina Indonesia periode Oktober 2025-Februari 2026, ada tiga hal utama yang bisa disimpulkan. Pertama, temperatur air pendingin masuk (T_{cin}) berbanding terbalik terhadap efektivitas kondensor: efektivitas tertinggi ($\epsilon=0,57$) muncul saat T_{cin} berada di titik terendah ($27,42^{\circ}\text{C}$), sementara efektivitas terendah ($\epsilon=0,32\text{--}0,34$) terjadi saat T_{cin} mendekati $28,13^{\circ}\text{C}$. Kedua, temperatur uap masuk (T_{hin}) justru berbanding lurus terhadap kinerja kondensor-kondisi

terbaik tercatat pada $T_{in}=41,80^{\circ}\text{C}$ dengan $LMTD=7,70^{\circ}\text{C}$, $NTU=0,85$, dan $Q=174,09\text{ kW}$. Ketiga, kinerja optimal kondensor sebenarnya baru tercapai ketika kedua variabel ini berinteraksi secara bersamaan, yakni saat T_{in} rendah dan T_{in} tinggi terjadi berbarengan-hal ini juga tercermin dari nilai *capacity ratio* yang konsisten berada pada kisaran $0,0033-0,0058$, yang mengindikasikan uap sebagai fluida ber-Cmin tetap menjadi faktor pembatas utama perpindahan panas. Jika dilihat dari rata-rata bulanan, November 2025 mencatatkan performa terbaik ($\epsilon=0,474$) sementara Februari 2026 menjadi yang terendah ($\epsilon=0,403$), sehingga dapat dikatakan bahwa pengendalian temperatur air pendingin dan uap masuk secara terpadu memang diperlukan untuk menjaga efisiensi operasi Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia.

B. Saran

Ada beberapa hal yang bisa dipertimbangkan ke depannya. Pertama, akan sangat membantu bila dikembangkan sistem pemantauan temperatur air laut secara *real-time* yang terintegrasi dengan DCS, sehingga operator memiliki acuan untuk mengantisipasi penurunan kinerja kondensor lebih awal-misalnya dengan menyesuaikan beban turbin atau menaikkan laju alir air pendingin ketika temperatur laut mulai naik. Kedua, inspeksi dan pembersihan *tube bundle* kondensor sebaiknya dijadwalkan berdasarkan tren penurunan nilai $LMTD$ dan NTU dari data historis, bukan semata mengikuti jadwal kalender tetap, mengingat variasi nilai Q dan efektivitas yang cukup lebar pada kondisi operasi yang relatif stabil mengindikasikan kemungkinan adanya pengaruh *fouling*. Ketiga, penelitian selanjutnya dapat diperluas dengan memasukkan variabel salinitas dan *fouling* air laut, menganalisis kondisi transien saat *start-up* dan *shut-down*, serta membandingkan kinerja Kondensor Unit 4 dengan Unit 1 yang memiliki konfigurasi serupa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam, serta manajemen dan karyawan Divisi Turbine PLTU PT Bintang Alumina Indonesia yang telah memberi kesempatan dan bantuan selama proses pengambilan data penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Murti, I. B. G. Manuaba, dan I. G. D. Arjana, "Optimasi unit PLTU berbahan bakar batubara menggunakan metode Lagrange di PT. Indonesia Power UP Suralaya," *J. Spektrum*, vol. 7, no. 1, hlm. 76, 2020.
- [2] A. R. Effendi, "Analisis perubahan tekanan vakum kondensor terhadap kerja turbin dan produksi listrik PLTU Unit 1 Sebalang menggunakan simulasi Cycle Tempo," vol. 8, no. 1, 2020.
- [3] T. D. Cao dan T. N. Khac, "On the impact of cooling water temperature on thermal power plant efficiency," *JP J. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 6, hlm. 887-901, 2024.
- [4] A. Pambudi, I. Sukmana, dan Y. Risano, "Pengaruh nilai spesifik konsumsi bahan bakar (SFC) terhadap jumlah pemakaian batubara di PT Bukit Energi Servis Terpadu PLTU Peltar 2x8 MW," *J. Profesi Ins. Univ. Lampung*, vol. 4, no. 2, hlm. 133-142, 2023.
- [5] M. H. Murtadho, "Analisa pemanas air umpan ketel uap kapasitas 40 ton," Skripsi, Universitas Medan Area, 2020.

- [6] F. Novansyah, L. Hakim, dan D. N. Zulfika, "Analisa efisiensi turbin uap pembangkit listrik tenaga uap kapasitas 7,5 MW," *Majamecha*, vol. 4, no. 2, hlm. 110-115, 2022.
- [7] A. Ghazali dan H. Rusjdi, "Pengaruh overhaul terhadap efektifitas kondensor di PT. Indonesia Power UP Suralaya Unit III," vol. 8, no. 1, 2020.
- [8] F. F. Syah dan E. Permata, "Sistem motor listrik 6 kV condensate extraction pump di PT Indonesia Power PLTU Suralaya (PGU)," *J. Tek. Mesin Ind. Elektro Dan Inform.*, vol. 2, no. 2, hlm. 122-137, 2023.
- [9] B. R. Putra, A. Melkias, dan Maridjo, "Analisis pengaruh temperatur dan laju alir air pendingin terhadap kinerja kondensor di PLTU Cirebon Unit 1," *J. Tek. Energi*, vol. 11, no. 2, hlm. 24-29, 2022.
- [10] R. F. Ahmad, "Analisis pengaruh tube plugging dan *fouling* terhadap performa kondensor Unit 2 di PLTU Ombilin," 2022.
- [11] A. Puspawan, M. A. Pangestu, dan A. Suandi, "Sistem vakum dan pengaruhnya terhadap tekanan kondensor pada turbin uap," *Pros. Semin. Nas. Tek. Mesin*, 2023.
- [12] T. F. Alfani, A. Razak, dan D. Rismawati, "Analisis perpindahan panas pada kondensor dengan kapasitas air pendingin 35860 m³/jam," *SgP*, vol. 2, no. 2, hlm. 62-70, 2021.

Pembimbing



Muhammad Veven