

Evaluasi Efektivitas Kondensor *Direct Contact* Tipe *Jet Spray* pada PLTP Unit 4 Area Ulubelu

Agus Apriyanto^{1*}, Hafidz Zakiyun Alrasyid²

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Lampung, Kota Bandar Lampung, Lampung, 35141, Indonesia.

²Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Kota Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia.

Received: 07-05-2026

Accepted: 02-09-2026

Keywords:

Geothermal Power Plant;
Condenser Effectiveness;
Direct-Contact Condenser;
Heat Transfer;
Condenser Absolute Pressure

Correspondent Email:

agusapriyanto@polinela.ac.id

Abstrak. Indonesia memiliki potensi panas bumi yang besar dan kinerja sistem kondensasi menjadi salah satu faktor penting dalam mempertahankan efisiensi pembangkit. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas kondensor *direct contact* tipe *jet spray* pada PLTP Unit 4 PT Pertamina Geothermal Energy Tbk Area Ulubelu menggunakan data operasi aktual selama 4–10 Juli 2024 dengan interval enam jam. Efektivitas dihitung melalui pendekatan *effectiveness–NTU* yang diadaptasi untuk *direct-contact condenser* dengan asumsi pencampuran langsung menyebabkan temperatur keluaran fasa terkondensasi mendekati temperatur air pendingin keluar ($T_{ho} = T_{co}$). Hasil menunjukkan efektivitas kondensor sebesar 73,38–79,22% dengan rata-rata 76,61% dan simpangan baku 1,70%, lebih rendah 9,39 poin persentase dibandingkan nilai desain 86%. Gap kinerja tersebut secara teknis dapat berkaitan dengan distribusi *spray* yang tidak ideal, masuknya udara/akumulasi *non-condensable gas*, *scaling* atau *fouling* pada jalur air pendingin dan *nozzle*, serta variasi temperatur dan debit air pendingin. Dibandingkan penelitian pada PLTP Ulubelu Unit 3 yang melaporkan efektivitas kondensor 83,23–86,44%, hasil Unit 4 menunjukkan peluang optimasi yang lebih besar. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan tekanan absolut kondensor, kondisi *nozzle spray*, sistem pembuangan NCG, dan kualitas sistem pendingin untuk mempertahankan performa kondensor.

Abstract. Indonesia has substantial geothermal potential, and condenser performance is an important factor in maintaining plant efficiency. This study evaluates the effectiveness of a *jet-spray direct-contact condenser* at Unit 4 of PT Pertamina Geothermal Energy Tbk, Ulubelu Area, using actual operating data collected from 4 to 10 July 2024 at six-hour intervals. Condenser effectiveness was calculated using an adapted *effectiveness–NTU* approach for a *direct-contact condenser*, assuming that direct mixing makes the condensate outlet temperature approach the cooling-water outlet temperature ($T_{ho} = T_{co}$). The condenser effectiveness ranged from 73.38% to 79.22%, with an average of 76.61% and a standard deviation of 1.70%, which is 9.39 percentage points below the 86% design value. The performance gap may be technically associated with non-uniform *spray* distribution, air in-leakage or non-condensable-gas accumulation, *scaling/fouling* in cooling-water paths and *spray nozzles*, and variations in cooling-water temperature and flow rate. Compared with a previous study at Ulubelu Unit 3 reporting condenser effectiveness of 83.23–86.44%, Unit 4 exhibits a larger optimization margin. The results emphasize the importance of monitoring condenser absolute pressure, *spray-nozzle* condition, NCG removal, and cooling-system performance.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan sektor industri. Hingga saat ini, sebagian besar pasokan listrik masih berasal dari pembangkit berbasis bahan bakar fosil yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan pemanasan global [1]. Laju pertumbuhan kebutuhan energi listrik nasional diperkirakan mencapai sekitar 10% per tahun sehingga diperlukan penambahan kapasitas pembangkit sekitar 6 GW setiap tahunnya. Kondisi ini mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan[2], [3].

Energi panas bumi (*geothermal*) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia. Sekitar 40% potensi panas bumi dunia berada di Indonesia sehingga pemanfaatannya secara optimal dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap ketahanan energi nasional, menurunkan emisi karbon, serta mengurangi ketergantungan terhadap impor bahan bakar fosil[4]. Selain itu, pemanfaatan energi panas bumi juga dapat mendukung stabilitas pasokan energi dan meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya energi nasional[4].

Pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP), kondensor merupakan komponen kunci di sisi hilir turbin karena mengkondensasikan uap buang sekaligus mempertahankan tekanan absolut rendah pada exhaust turbin. Pada *direct-contact condenser* tipe *jet spray*, uap berkontak langsung dengan butiran air pendingin sehingga kualitas atomisasi, luas kontak antarfasa, temperatur dan debit air pendingin, serta kemampuan sistem mengeluarkan non-condensable gas (NCG) menentukan keberhasilan proses kondensasi. Penurunan kualitas vakum atau kenaikan tekanan absolut kondensor meningkatkan back pressure turbin dan dapat menurunkan kerja spesifik serta efisiensi siklus pembangkit [3], [9], [10].

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa performa sistem pendingin primer dan kondisi vakum memiliki hubungan erat dengan kinerja PLTP. Pada Ulubelu Unit 3, Apriyanto et al. [3] melaporkan efektivitas kondensor pada kisaran 83,23–86,44% dan menunjukkan bahwa perubahan efektivitas *cooling tower*

memengaruhi vakum kondensor serta efisiensi turbin. Sementara itu, studi eksergi pada PLTP Kamojang menunjukkan bahwa kondensor menjadi salah satu sumber irreversibilitas penting dalam sistem [2]. Meskipun demikian, evaluasi spesifik *direct-contact jet-spray condenser* pada Unit 4 berdasarkan data operasi aktual, terutama terkait gap efektivitas terhadap desain dan keterkaitannya dengan tekanan absolut kondensor, masih perlu diperjelas.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menentukan efektivitas aktual kondensor *direct contact tipe jet spray* pada PLTP Unit 4 Area Ulubelu; (2) membandingkan efektivitas aktual dengan kondisi desain; (3) menganalisis keterkaitan tekanan absolut kondensor dan kapasitas panas uap terhadap efektivitas; serta (4) mengidentifikasi secara teknis faktor-faktor yang berpotensi menyebabkan gap performa. Hasil evaluasi diharapkan menjadi dasar untuk penentuan prioritas inspeksi dan optimasi operasi kondensor.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) memanfaatkan energi panas dari reservoir geothermal untuk menghasilkan uap yang menggerakkan turbin dan generator [1], [8]. Dibandingkan pembangkit berbasis pembakaran, PLTP memiliki karakteristik emisi langsung yang lebih rendah dan mampu beroperasi sebagai pembangkit beban dasar.

Kondensor mengkondensasikan uap bekas turbin dan mempertahankan tekanan absolut rendah pada sisi keluar turbin. Semakin rendah tekanan absolut kondensor, semakin besar rasio ekspansi turbin yang secara umum menguntungkan kerja turbin, sepanjang kondisi operasi tetap berada dalam batas desain [3], [9]. Keberadaan NCG, *air in-leakage*, dan penurunan kemampuan sistem ekstraksi gas dapat menaikkan tekanan parsial gas di dalam kondensor dan mengurangi intensitas perpindahan panas [2], [13].

Pada *direct-contact condenser*, perpindahan panas berlangsung melalui kontak langsung antara uap dan air pendingin. Berbeda dengan *surface condenser*, tidak terdapat dinding pemisah utama di antara kedua aliran. Oleh karena itu, proses kondensasi sangat dipengaruhi oleh distribusi *spray*, ukuran droplet, waktu kontak, debit air pendingin,

temperatur air masuk, serta kemampuan pembuangan NCG.

Keberadaan *Non-Condensable Gas* (NCG) seperti udara, oksigen, dan karbon dioksida dalam kondensor dapat menurunkan performa sistem karena membentuk lapisan isolator termal pada permukaan perpindahan panas. Selain itu, NCG meningkatkan tekanan dalam kondensor sehingga menurunkan tingkat vakum dan berdampak pada penurunan efisiensi turbin. Oleh karena itu, sistem kondensor dilengkapi dengan *air ejector* atau *vacuum pump* untuk menjaga kondisi vakum tetap optimal[2].

Dalam analisis ini, metode *effectiveness* NTU digunakan sebagai indikator kinerja operasional yang diadaptasi untuk sistem direct-contact. Karena uap dan air pendingin bercampur langsung di dalam kondensor, temperatur uap/hasil kondensasi pada keluaran diasumsikan mencapai kesetimbangan termal lokal dengan air pendingin keluar. Secara matematis digunakan asumsi:

$$T_{ho} = T_{co}$$

Asumsi tersebut berarti temperatur sisi panas keluar (T_{ho}) pada Persamaan (2) direpresentasikan oleh temperatur air pendingin keluar (T_{co}). Asumsi ini diperlukan agar neraca energi dan definisi kapasitas panas dalam Persamaan (2)–(5) konsisten dengan karakter *direct-contact condenser*, dan hasilnya diperlakukan sebagai parameter efektivitas operasional, bukan sebagai model detail perpindahan massa-kalor dua-fasa.

Efektivitas kondensor dihitung menggunakan persamaan berikut [9], [10]:

$$\varepsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_{actual} = C_h(T_{hi} - T_{ho}) = C_h(T_{hi} - T_{co}) \quad (2)$$

$$Q_{max} = C_{min}(T_{hi} - T_{ci}) \quad (3)$$

$$C_h = \dot{m}_h C_{ph} \quad (4)$$

$$C_c = \frac{Q_{actual}}{T_{co} - T_{ci}} \quad (5)$$

dengan ε adalah efektivitas kondensor, Q_{actual} adalah laju perpindahan panas aktual, Q_{max} adalah laju perpindahan panas maksimum, C_h dan C_c masing-masing adalah kapasitas panas sisi uap dan sisi air pendingin,

serta C_{min} adalah nilai minimum antara C_h dan C_c .

Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi performa perpindahan panas pada kondensor serta hubungannya terhadap efisiensi sistem turbin uap pada pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Laju perpindahan panas aktual pada sisi fluida panas dihitung berdasarkan perubahan temperatur fluida selama proses perpindahan panas berlangsung. Hubungan ini dinyatakan pada Persamaan (2), yang menunjukkan bahwa laju perpindahan panas aktual bergantung pada kapasitas panas fluida panas serta selisih temperatur masuk dan keluar fluida panas[10].

Selanjutnya, laju perpindahan panas maksimum ditentukan menggunakan kapasitas panas minimum dari kedua fluida yang terlibat, yaitu fluida panas dan fluida dingin. Hubungan ini dinyatakan pada Persamaan (3), yang merepresentasikan batas maksimum energi panas yang secara teoritis dapat dipindahkan dalam penukar panas[9], [10].

Kapasitas panas fluida panas dihitung dari hasil perkalian antara laju aliran massa fluida panas dan panas spesifiknya sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4). Sementara itu, kapasitas panas fluida dingin diperoleh berdasarkan keseimbangan energi antara fluida panas dan fluida dingin selama proses perpindahan panas berlangsung, yang dinyatakan pada Persamaan (5)[9].

Dengan menggunakan Persamaan (1) hingga Persamaan (5), nilai efektivitas kondensor dapat dihitung dan digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja sistem perpindahan panas pada penelitian ini[9].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan metode kuantitatif berbasis evaluasi kinerja kondensor pada PLTP Unit 4 PT Pertamina Geothermal Energy Tbk Area Ulubelu. Tahapan penelitian meliputi pengambilan data operasi, pemeriksaan konsistensi data, perhitungan parameter perpindahan panas, dan analisis deskriptif serta korelasional terhadap efektivitas kondensor.

3.1 Lokasi dan Sumber Data

Data diperoleh dari Divisi Operation PT Pertamina Geothermal Energy (Tbk) Area Ulubelu. Data terdiri atas spesifikasi desain

kondensor dan data aktual dari sistem monitoring operasi pembangkit selama tujuh hari, 4–10 Juli 2024, dengan interval pengamatan enam jam (00.00, 06.00, 12.00, dan 18.00).

Table 1. Spesifikasi Kondensor

Spesifikasi Kondesor		
Spesifikasi Utama		
1	Tipe	<i>Direct Contact Spray Kondensor</i>
2	Tekanan	0,08 bar(abs)
3	Temperatur Air Pendingin	28 °C
4	Laju Aliran Pendingin	4583,333 kg/s
5	Laju Aliran Uap	102,141 kg/s
6	Temperatur Uap Sisa Turbin	41 °C

Parameter aktual meliputi temperatur uap masuk kondensor (T_{hi}), temperatur air pendingin masuk (T_{ci}), temperatur air pendingin keluar (T_{co}), laju aliran massa uap (m_h), panas spesifik uap (C_{ph}), dan tekanan absolut kondensor. Istilah “tekanan absolut kondensor” digunakan secara konsisten karena nilai 0,078–0,088 bar merupakan tekanan absolut; kondisi vakum yang lebih kuat secara fisik berkaitan dengan tekanan absolut yang lebih rendah.

3.2 Metode Pengolahan Data

Kapasitas panas sisi uap (Ch) dihitung dengan Persamaan (4), laju perpindahan panas aktual dengan Persamaan (2), kapasitas panas sisi air pendingin (Cc) dengan Persamaan (5), dan Q_{max} dengan Persamaan (3). Nilai C_{min} dipilih sebagai nilai yang lebih kecil antara Ch dan C_c . Efektivitas kemudian dihitung dengan Persamaan (1). Untuk seluruh perhitungan direct-contact condenser digunakan asumsi $T_{ho} = T_{co}$ sebagaimana dijelaskan pada Tinjauan Pustaka.

3.3 Metode Analisis Data

Analisis dilakukan melalui: (1) perbandingan efektivitas aktual dengan efektivitas desain; (2) evaluasi keterkaitan tekanan absolut kondensor dengan efektivitas; (3) evaluasi keterkaitan kapasitas panas uap dengan efektivitas; dan (4) interpretasi kausalitas teknis berdasarkan karakter *direct-contact condenser* serta literatur. Koefisien korelasi Pearson digunakan sebagai indikator

hubungan linear eksploratif, tanpa dimaknai sebagai bukti kausalitas karena periode pengamatan relatif singkat.

Tabel 2. Data Aktual Kondensor

Waktu	Th in (°C)	Tc out (°C)	Tc in (°C)	mh (Kg/s)	Cph (kJ/kg . K)	Vakum Cond (bar)
07/04/2024 00:00:00	43.892	39.186	25.948	99.698	1.8723	0.079
07/04/2024 06:00:00	43.037	38.905	25.593	101.507	1.8723	0.078
07/04/2024 12:00:00	44.452	40.657	27.326	218.312	1.8723	0.085
07/04/2024 18:00:00	44.358	40.657	27.326	100.903	1.8723	0.085
07/05/2024 00:00:00	43.69	39.802	26.459	101.294	1.8723	0.081
07/05/2024 06:00:00	43.596	39.717	26.381	100.396	1.8723	0.081
07/05/2024 12:00:00	44.001	40.144	26.775	100.443	1.8723	0.082
07/05/2024 18:00:00	43.557	39.546	26.263	94.593	1.8723	0.08
07/06/2024 00:00:00	43.137	39.29	25.908	95.229	1.8723	0.079
07/06/2024 06:00:00	43.238	39.381	26.144	95.746	1.8723	0.08
07/06/2024 12:00:00	44.257	40.199	26.971	95.630	1.8723	0.083
07/06/2024 18:00:00	43.985	40.284	26.971	94.679	1.8723	0.083
07/07/2024 00:00:00	43.986	39.174	25.908	95.218	1.8723	0.079
07/07/2024 06:00:00	43.496	39.088	25.711	95.228	1.8723	0.078
07/07/2024 12:00:00	44.475	40.712	27.326	95.393	1.8723	0.085
07/07/2024 18:00:00	44.009	40.352	27.011	95.643	1.8723	0.084
07/08/2024 00:00:00	43.659	39.229	25.908	95.036	1.8723	0.079
07/08/2024 06:00:00	43.574	38.801	25.396	95.946	1.8723	0.078
07/08/2024 12:00:00	44.762	40.681	27.208	96.454	1.8723	0.085
07/08/2024 18:00:00	44.436	40.425	26.971	96.511	1.8723	0.084
07/09/2024 00:00:00	44.762	40.065	26.617	96.641	1.8723	0.082
07/09/2024 06:00:00	43.978	39.497	26.066	96.369	1.8723	0.08
07/09/2024 12:00:00	44.701	41.139	27.562	97.121	1.8723	0.086
07/09/2024 18:00:00	44.901	41.224	27.681	96.402	1.8723	0.088
07/10/2024 00:00:00	44.956	40.248	26.735	96.450	1.8723	0.083
07/10/2024 06:00:00	44.001	39.65	26.184	96.502	1.8723	0.08
07/10/2024 12:00:00	44.063	40.248	26.775	96.994	1.8723	0.083
07/10/2024 18:00:00	44.84	40.889	27.365	96.447	1.8723	0.086

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan 28 titik pengamatan menunjukkan efektivitas kondensor antara 73,38% dan 79,22%, dengan rata-rata 76,61% dan simpangan baku 1,70%. Nilai tersebut

berada 9,39 poin persentase atau sekitar 10,92% lebih rendah secara relatif dibandingkan efektivitas desain 86%. Dengan demikian, isu utama bukan ketidakstabilan ekstrem antartitik, melainkan adanya performance gap yang relatif persisten terhadap kondisi desain.

Variasi data aktual menunjukkan adanya perubahan kondisi operasi sepanjang periode pengamatan. Perubahan temperatur lingkungan, fluktuasi beban pembangkit, serta performa sistem pendingin menyebabkan nilai temperatur dan tekanan operasi tidak konstan[4], [5], [11]. Variasi ini secara langsung mempengaruhi kemampuan kondensor dalam melepaskan panas[12]. Berdasarkan data tersebut, dilakukan perhitungan kapasitas panas fluida panas (Ch), kapasitas panas fluida pendingin (Cc), laju perpindahan panas aktual (Qactual), laju perpindahan panas maksimum (Qmax), serta efektivitas kondensor menggunakan Persamaan (1)–(5).

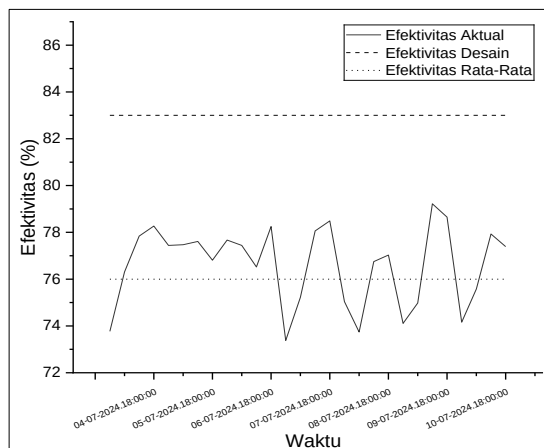
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efektivitas kondensor berada pada kisaran 73–79% dengan nilai rata-rata sekitar 76–77%. Nilai ini masih berada di bawah efektivitas desain sebesar $\pm 86\%$. Selisih tersebut menunjukkan adanya gap performa antara kondisi desain dan kondisi operasi aktual yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan, degradasi peralatan, serta kondisi operasi non-ideal[11], [13].

Secara teknis, gap efektivitas 9,39 poin persentase dapat dijelaskan oleh beberapa mekanisme yang khas pada direct-contact condenser. Pertama, penurunan performa nozzle spray, misalnya akibat penyumbatan, erosi, atau perubahan pola semprotan dapat memperbesar ukuran droplet atau menyebabkan distribusi air tidak merata sehingga luas kontak efektif uap–air menurun. Kedua, air in-leakage dan akumulasi NCG meningkatkan tekanan parsial gas yang tidak terkondensasi, menghambat kontak uap dengan air pendingin, dan menaikkan back pressure kondensor. Ketiga, scaling/fouling pada jalur air dan nozzle dapat menurunkan debit efektif serta mengubah pola distribusi spray. Keempat, kenaikan temperatur air pendingin masuk dan perubahan debit pendingin mengurangi driving force termal.

Table 2. Hasil Perhitungan Efektivitas Kondensor

Waktu	Ch (kJ/s.K)	Cc (kJ/s.K)	Qactual (kW)	Qmax (kW)	Vakum Cond (bar)	Efektivitas (%)
07/04/2024 00:00:00	186.664	66.358	878.441	1190.72	0.079	73.77
07/04/2024 06:00:00	190.051	58.991	785.293	1029.04	0.078	76.31
07/04/2024 12:00:00	408.745	116.359	1551.187	1992.77	0.085	77.84
07/04/2024 18:00:00	188.921	52.449	699.198	893.312	0.085	78.27
07/05/2024 00:00:00	189.652	55.262	737.367	952.228	0.081	77.44
07/05/2024 06:00:00	187.972	54.675	729.142	941.225	0.081	77.47
07/05/2024 12:00:00	188.060	54.256	725.346	934.610	0.082	77.61
07/05/2024 18:00:00	177.107	53.480	710.377	924.885	0.08	76.81
07/06/2024 00:00:00	178.297	51.256	685.909	883.091	0.079	77.67
07/06/2024 06:00:00	179.265	52.234	691.425	892.892	0.08	77.44
07/06/2024 12:00:00	179.048	54.927	726.575	949.469	0.083	76.52
07/06/2024 18:00:00	177.267	49.280	656.066	838.452	0.083	78.25
07/07/2024 00:00:00	178.277	64.667	857.870	1169.04 7	0.079	73.38
07/07/2024 06:00:00	178.294	58.752	785.922	1044.90 0	0.078	75.22
07/07/2024 12:00:00	178.603	50.208	672.085	861.017	0.085	78.06
07/07/2024 18:00:00	179.072	49.087	654.868	834.379	0.084	78.49
07/08/2024 00:00:00	177.936	59.174	788.257	1050.39	0.079	75.04
07/08/2024 06:00:00	179.639	63.963	857.419	1162.71	0.078	73.74
07/08/2024 12:00:00	180.591	54.701	736.992	960.229	0.085	76.75
07/08/2024 18:00:00	180.698	53.871	724.781	940.857	0.084	77.03
07/09/2024 00:00:00	180.941	63.197	849.878	1146.71	0.082	74.11
07/09/2024 06:00:00	180.431	60.197	808.511	1078.25	0.08	74.98
07/09/2024 12:00:00	181.840	47.707	647.714	817.645	0.086	79.22
07/09/2024 18:00:00	180.493	49.005	663.672	843.863	0.088	78.65
07/10/2024 00:00:00	180.583	62.916	850.184	1146.39 2	0.083	74.16
07/10/2024 06:00:00	180.680	58.380	786.139	1040.14 8	0.08	75.58
07/10/2024 12:00:00	181.602	51.422	692.810	888.986	0.083	77.93
07/10/2024 18:00:00	180.578	52.755	713.464	921.901	0.086	77.39

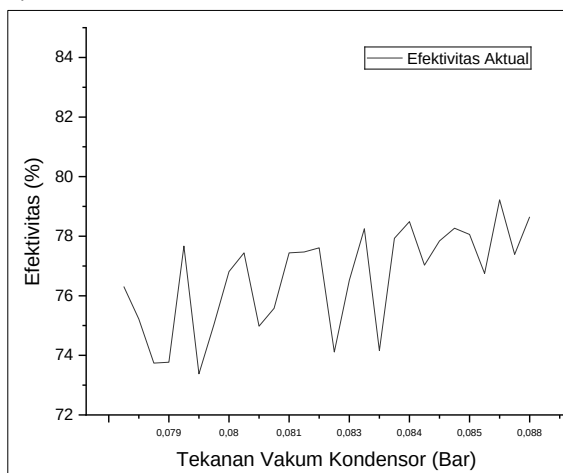
Faktor-faktor tersebut dapat terjadi secara bersamaan, sehingga gap yang stabil tidak dapat ditetapkan berasal dari satu penyebab tanpa data inspeksi nozzle, konsentrasi NCG, debit cooling water, dan kondisi scaling yang lebih rinci [3], [11], [13].



Gambar 1. Perbandingan Efektivitas Aktual dan Efektivitas Desain

Pembandingan dengan penelitian terdahulu memperkuat interpretasi tersebut. Apriyanto et al. [3] pada PLTP Ulubelu Unit 3 melaporkan efektivitas kondensor 83,23–86,44%. Rata-rata Unit 4 sebesar 76,61% pada penelitian ini berarti sekitar 6,62 poin lebih rendah dibanding batas bawah rentang Unit 3 dan 9,83 poin lebih rendah dibanding batas atasnya. Karena lokasi pembangkit dan karakter sistem pendinginnya berdekatan, perbedaan tersebut menjadi indikasi praktis bahwa Unit 4 memiliki margin optimasi yang lebih besar. Namun perbandingan harus tetap hati-hati karena periode pengamatan, beban unit, kondisi lingkungan, serta definisi parameter operasi antarpelitian dapat berbeda.

Hubungan antara tekanan vakum kondensor dan efektivitas menunjukkan tren yang lebih jelas yang dapat dilihat pada Gambar 2.

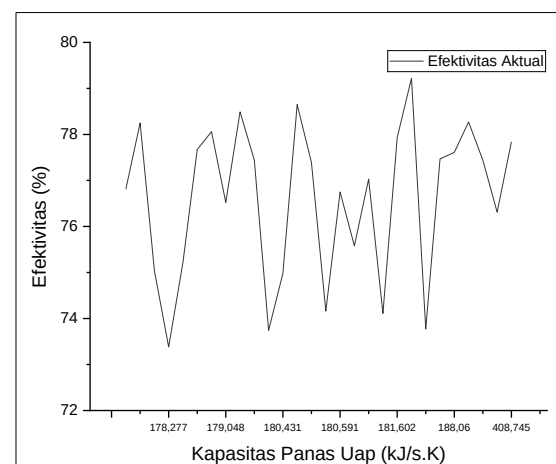


Gambar 2. Hubungan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Efektivitas

Data menunjukkan korelasi yang cenderung meningkat seiring kenaikan tekanan vakum kondensor. Meskipun terdapat fluktuasi titik data, garis rata-rata menunjukkan kecenderungan positif yang konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kualitas vakum berkontribusi langsung terhadap peningkatan efektivitas kondensor[5], [14].

Secara termodinamika, peningkatan vakum menyebabkan temperatur kondensasi uap menurun. Penurunan temperatur kondensasi meningkatkan perbedaan temperatur antara uap dan air pendingin (temperature driving force)[9], [15]. Semakin besar beda temperatur, semakin besar laju perpindahan panas yang terjadi. Oleh karena itu, tren garis meningkat pada grafik ini menegaskan bahwa tekanan vakum merupakan salah satu parameter dominan yang mempengaruhi performa kondensor[9].

Fluktuasi titik data di sekitar garis tren menunjukkan bahwa selain tekanan vakum, terdapat faktor lain yang juga mempengaruhi efektivitas, seperti variasi laju aliran air pendingin dan perubahan temperatur lingkungan. Pengaruh kapasitas panas steam terhadap efektivitas kondensor juga menunjukkan tren yang signifikan yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan Kapasitas Panas Steam Terhadap Efektivitas

Hubungan linear antara kapasitas panas uap (Ch) dan efektivitas relatif lemah pada dataset ini ($r = 0.15$). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan Ch tidak secara otomatis meningkatkan efektivitas karena nilai ϵ merupakan rasio antara perpindahan panas

aktual dan maksimum. Dengan kata lain, perubahan beban termal uap perlu diimbangi kemampuan air pendingin, distribusi spray, dan pembuangan NCG. Satu titik Ch yang jauh lebih tinggi dari sebagian besar data juga memperlebar sebaran, sehingga interpretasi hubungan Ch- ε harus bersifat hati-hati dan tidak digunakan sebagai dasar kausalitas tunggal.

Hubungan ini menunjukkan korelasi positif yang cukup jelas. Kapasitas panas steam yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan fluida panas membawa energi termal yang lebih besar[15]. Kondisi ini meningkatkan potensi perpindahan panas menuju fluida pendingin, sehingga nilai laju perpindahan panas aktual meningkat[2].

Walaupun data menunjukkan fluktuasi titik yang cukup besar, kemiringan garis tren yang positif menegaskan bahwa kapasitas panas steam memiliki kontribusi nyata terhadap peningkatan efektivitas kondensor[2], [3], [6]. Penyebaran titik di sekitar garis tren menunjukkan adanya pengaruh faktor eksternal lain seperti variasi temperatur air pendingin, efisiensi distribusi spray, serta kondisi permukaan kontak perpindahan panas[1], [2], [4].

Implikasi operasional dari hasil ini adalah perlunya prioritas pemeriksaan pada kondisi nozzle spray dan pola distribusinya, verifikasi laju aliran air pendingin aktual terhadap desain, pengukuran/kecenderungan kandungan NCG dan kinerja ejector atau vacuum system, inspeksi scaling/fouling, serta trending tekanan absolut kondensor bersama temperatur cooling-water inlet. Strategi ini lebih relevan dibanding hanya mengejar satu parameter karena direct-contact condenser bekerja sebagai sistem perpindahan panas dan massa yang saling berinteraksi.

Secara keseluruhan, analisis tren garis pada ketiga grafik menunjukkan bahwa performa kondensor dipengaruhi oleh kombinasi faktor tekanan vakum, kapasitas panas steam, serta kondisi operasi sistem pendingin. Stabilitas tren rata-rata menunjukkan bahwa sistem masih bekerja dalam kondisi operasional yang baik, namun adanya gap terhadap kondisi desain menunjukkan peluang optimasi melalui peningkatan kualitas vakum, pemeliharaan

sistem pendingin, dan pengendalian kondisi operasi[2], [3].

5. KESIMPULAN

Efektivitas kondensor direct contact tipe jet spray pada PLTP Unit 4 Area Ulubelu selama 4–10 Juli 2024 berada pada rentang 73,38–79,22% dengan rata-rata 76.61%. Nilai tersebut lebih rendah 9.39 poin persentase dibanding efektivitas desain 86%, sehingga menunjukkan performance gap yang persisten. Dibandingkan penelitian pada Ulubelu Unit 3 yang melaporkan efektivitas 83,23–86,44% [3], Unit 4 memiliki margin perbaikan yang lebih besar. Gap ini secara teknis berpotensi berkaitan dengan penurunan kualitas distribusi spray, air in-leakage atau akumulasi NCG, scaling/fouling, dan variasi kondisi cooling water. Korelasi tekanan absolut kondensor dengan efektivitas pada data pengamatan tidak dapat langsung dimaknai sebagai hubungan sebab-akibat, karena secara fisik vakum yang lebih baik berkaitan dengan tekanan absolut yang lebih rendah. Evaluasi lanjutan disarankan menggunakan periode data yang lebih panjang, data debit air pendingin aktual, kandungan NCG, performa sistem ejector/vacuum, inspeksi nozzle, dan indikator scaling sehingga sumber kehilangan performa dapat diidentifikasi secara kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. J. Barasa Kabeyi and O. Akanni. Olanrewaju, "Geothermal Power Generation Options and Technologies," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Michigan, USA: IEOM Society International, Nov. 2023. doi: 10.46254/AU02.20230242.
- [2] R. S. Kusumo, D. Rhakasywi, and F. Fahrudin, "Analysis of Allergies and Optimization in Kamojang Dry Steam Type Geothermal Power Plant With A Capacity of 55 MW," *Eduvest - Journal of Universal Studies*, vol. 4, no. 12, pp. 11695–11707, Dec. 2024, doi: 10.59188/eduvest.v4i12.44733.
- [3] A. Apriyanto *et al.*, "Analisis Kinerja Komprehensif Sistem Pendingin Primer terhadap Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Tipe Flash Steam," *Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai*, vol. 19, no. 03, pp. 2549–3442, 2025, doi: 10.23960/elc.v19n3.2855.

- [4] A. Abdel Rahman and I. Dincer, "Analysis and assessment of a geothermal based cogeneration system and lithium extraction," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 12, pp. 9586–9597, Oct. 2020, doi: 10.1002/er.5356.
- [5] M. Alibaba, R. Pourdarbani, M. Hasan Khoshgoftar Manesh, I. Herrera-Miranda, I. Gallardo-Bernal, and J. L. Hernández-Hernández, "Conventional and Advanced Exergy-Based Analysis of Hybrid Geothermal–Solar Power Plant Based on ORC Cycle," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, p. 5206, Jul. 2020, doi: 10.3390/app10155206.
- [6] M. J. Barasa Kabeyi, "Geothermal Electricity Generation, Challenges, Opportunities and Recommendations," *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, vol. 5, no. 8, pp. 53–95, 2019, doi: 10.31695/IJASRE.2019.33408.
- [7] H. A. Navarro and L. C. Cabezas-Gómez, "Effectiveness-ntu computation with a mathematical model for cross-flow heat exchangers," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 509–521, Dec. 2007, doi: 10.1590/S0104-66322007000400005.
- [8] R. Bertani, "Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report," *Geothermics*, vol. 60, pp. 31–43, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.geothermics.2015.11.003.
- [9] A. Ç. Yunus and A. B. Michael, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [10] P. I. Frank and P. D. David, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 6th. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [11] K. S. Patnaik and M. K. Sahu, "A review on performance of the thermal power plant for optimized design of surface condenser," 2023, p. 020018. doi: 10.1063/5.0164512.
- [12] H. Alimoradi *et al.*, "Experimental Investigation on Improvement of Wet Cooling Tower Efficiency with Diverse Packing Compaction Using ANN-PSO Algorithm," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 1, p. 167, Dec. 2020, doi: 10.3390/en14010167.
- [13] D. Strušnik, "Integration of machine learning to increase steam turbine condenser vacuum and efficiency through gasket resealing and higher heat extraction into the atmosphere," *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 3, pp. 3189–3212, Mar. 2022, doi: 10.1002/er.7375.
- [14] P. Ahluriza and N. Sinaga, "Review Pengaruh Range Dan Approach Terhadap Efektivitas Cooling Tower Unit 2 Di Pt. Indonesia Power Kamojang," *ENERGI & KELISTRIKAN*, vol. 13, no. 2, pp. 141–149, Dec. 2021, doi: 10.33322/energi.v13i2.1267.
- [15] H. H. Cho and V. Strezov, "Comparative analysis of the environmental impacts of Australian thermal power stations using direct emission data and GIS integrated methods," *Energy*, vol. 231, p. 120898, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120898.