JURNAL TELISKA **P-ISSN: 2085-0786**
Volume 19 No II Juli 2026 Page 56-67 **E-ISSN: 2654-2765**

PENGARUH TEKANAN SEALING TURBIN TERHADAP KEVAKUMAN KONDENSOR PADA TURBIN UAP UNIT 4 PLTU PT BINTAN ALUMINA INDONESIA

Fajar Masdiantoro[1], Didi Istardi[2]*
Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam[1,2]
istardi@polibatam.ac.id

ABSTRAK

PLTU PT Bintan Alumina Indonesia (PT BAI) Unit 4 menunjukkan karakteristik operasi berbeda dari unit sejenis, karena kevakuman kondensornya sensitif terhadap perubahan tekanan sealing turbin. Sebagai kontribusi dan kebaruan utama, penelitian ini secara spesifik mengidentifikasi rentang tekanan sealing optimal untuk Unit 4 yang memiliki karakteristik operasi unik tersebut, sebuah pendekatan yang belum banyak dibahas pada kajian unit sejenis. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi korelasi antara tekanan sealing dan kevakuman kondensor, menetapkan rentang tekanan sealing optimal untuk mempertahankan target vakum −94 hingga −95 kPa, serta memetakan pola fluktuasinya. Pendekatan kuantitatif diterapkan menggunakan 32 titik data mingguan (kelompok maksimum dan minimum) yang direkam Distributed Control System pada beban turbin 14–15 MW selama Agustus–November 2025. Data diolah melalui perhitungan rata-rata, korelasi Pearson, regresi linear sederhana, dan koefisien determinasi menggunakan Microsoft Excel. Hasil menunjukkan korelasi Pearson r = −0,8395 (sangat kuat, negatif) dengan R^2 = 0,7048, serta persamaan regresi $\hat{y} = -0{,}3853x - 79{,}8294$. Berdasarkan persamaan tersebut, rentang tekanan sealing optimal adalah 36,77–39,37 kPa, dengan rata-rata aktual sebesar 37,16 kPa berada di dalam rentang tersebut. Kajian tambahan terhadap spesifikasi desain pabrikan turbin (tekanan buang 6,1 kPa absolut) menunjukkan kesesuaian konseptual dengan target vakum operasional, meskipun konversi ini masih mengasumsikan tekanan atmosfer standar karena keterbatasan data barometrik aktual di lokasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa tekanan sealing berpengaruh signifikan terhadap kevakuman kondensor sehingga pengaturan setpoint pada rentang tersebut direkomendasikan untuk menjaga efisiensi operasional PLTU.

***Kata Kunci**: tekanan sealing, kevakuman kondensor, turbin uap, korelasi Pearson, regresi linear*

ABSTRACT

The condenser vacuum of Unit 4 at the PT Bintan Alumina Indonesia (PT BAI) steam power plant exhibits an unusually high sensitivity to turbine gland sealing pressure, resulting in operational challenges that are not observed in comparable generating units. As a primary contribution and novelty, this study specifically identifies the optimal sealing pressure range for Unit 4, addressing its unique operational characteristics that differ from similar power generation units. This study investigates the relationship between sealing pressure and condenser vacuum, identifies the optimal sealing-pressure range required to maintain the target condenser vacuum of −94 to −95 kPa, and characterizes the associated operating fluctuations. Operational data comprising 32 weekly observations collected from the Distributed Control System during August–November 2025 at a turbine load of 14–15 MW were analyzed using descriptive statistics, Pearson correlation, and linear regression. The results reveal a strong negative correlation between sealing pressure and condenser vacuum ($r = -0.8395$), with a coefficient of determination of $R^2 = 0.7048$, indicating that approximately 70.5% of the variation in condenser vacuum is explained by changes in sealing pressure. The resulting regression model, $\hat{y} = -0.3853x - 79.8294$, predicts an optimal sealing-pressure range of 36.77–39.37 kPa for maintaining the desired condenser vacuum. The observed average operating pressure of 37.16 kPa lies within this optimal range, confirming the suitability of current operating practice. A comparison with the manufacturer's design exhaust pressure (6.1 kPa absolute) further supports the consistency of the identified operating range, although the comparison is based on standard atmospheric pressure because site-specific barometric data were unavailable. These findings demonstrate that effective control of turbine gland sealing pressure is essential for maintaining condenser vacuum and improving the operational efficiency and stability of the steam power plant.

***Keywords**: sealing pressure, condenser vacuum, steam turbine, Pearson correlation, linear regression*

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) mengonversi energi panas hasil pembakaran bahan bakar menjadi energi listrik melalui siklus boiler–turbin–kondensor–generator [1]. Pada rangkaian tersebut, tekanan sealing berperan menjaga integritas sisi poros turbin agar uap bertekanan tinggi tidak bocor ke atmosfer

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

sekaligus mencegah udara luar masuk ke sisi tekanan rendah yang terhubung dengan kondensor; apabila fungsi ini terganggu, udara non-kondensabel dapat tersusup ke dalam kondensor dan menurunkan tingkat kevakumannya, sehingga tekanan balik turbin meningkat dan efisiensi konversi energi menurun [2]. Secara umum, tekanan sealing turbin uap dijaga pada kisaran 34–37 kPa absolut agar sistem gland sealing bekerja andal. Namun pada Unit 4 PLTU PT Bintan Alumina Indonesia (PT BAI), nilai tersebut justru terbukti menurunkan kevakuman kondensor; unit ini memerlukan tekanan sealing yang lebih tinggi, yaitu sekitar 38–40 kPa, untuk menjaga vakum tetap pada rentang target operasional −94 hingga −95 kPa. Karakteristik khas ini membedakan Unit 4 dari unit sejenis dan menuntut pemantauan yang lebih ketat terhadap sistem sealing-nya.

Berbagai literatur terdahulu telah banyak mengkaji performa kondensor, seperti pengaruh tekanan vakum terhadap efisiensi turbin [3],[4], pemodelan vakum berskala kecil [5],[6], serta dampak *fouling tube* dan laju alir air pendingin [7-9]. Namun, studi-studi tersebut umumnya memposisikan tekanan sealing sebatas faktor pendukung. Belum ada kajian yang secara spesifik mengkuantifikasi hubungan tekanan sealing dan tingkat vakum yang terjadi, khususnya pada Unit 4 PT BAI yang memiliki karakteristik anomali operasi tersebut.

Kekosongan literatur (*research gap*) inilah yang coba diisi oleh penelitian ini. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemosisian tekanan sealing sebagai variabel independen utama yang dianalisis secara kuantitatif untuk menyelesaikan masalah operasional spesifik pada unit PLTU. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh tekanan *sealing* turbin terhadap kondisi vakum kondensor pada saat unit pembangkit beroperasi dengan beban konstan sebesar 14–15 MW. Kajian dilakukan untuk mengidentifikasi tingkat korelasi antara kedua parameter tersebut, menentukan kisaran tekanan *sealing* yang paling optimal dalam menjaga tekanan vakum kondensor tetap berada pada rentang −94 hingga −95 kPa, serta menganalisis pola perubahan dan fluktuasi hubungan tekanan *sealing* turbin dengan tekanan vakum kondensor berdasarkan data operasi selama periode Agustus hingga November 2025. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar rekomendasi setpoint operasional yang lebih terukur bagi tim operasi, sekaligus menyumbangkan studi kasus kuantitatif yang jarang dibahas pada literatur PLTU captive power berskala kecil-menengah.

Penelitian ini menggunakan data berupa nilai rata-rata mingguan yang merepresentasikan kondisi tertinggi dan terendah pada setiap parameter yang diamati, bukan data rata-rata harian. Pemilihan pendekatan tersebut bertujuan untuk menggambarkan karakteristik respons sistem pada kondisi operasi yang paling berpengaruh terhadap kinerja turbin dan kondensor. Oleh karena itu, analisis dalam penelitian ini difokuskan pada hubungan antara tekanan *sealing* turbin dan tekanan vakum kondensor pada batas-batas kondisi operasi (*boundary conditions*), sehingga diperoleh gambaran mengenai rentang operasi yang mampu mempertahankan kinerja sistem secara optimal. Dengan pendekatan ini, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik hubungan kedua parameter sebagai dasar dalam evaluasi dan pengendalian kondisi operasi turbin uap.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam siklus PLTU, uap bertekanan tinggi hasil pemanasan di boiler diekspansikan melalui turbin untuk menghasilkan energi mekanik, kemudian diembunkan kembali menjadi air di kondensor sebelum dipompa kembali ke boiler [1],[4]. Siklus termodinamika ini dikenal sebagai siklus Rankine; efisiensi keseluruhannya sangat dipengaruhi oleh selisih tekanan antara sisi masuk dan sisi keluar turbin semakin dalam vakum kondensor, semakin besar kerja yang dapat diekstraksi dari uap per satuan massa. Tekanan sealing berfungsi sebagai penghalang fluida (*pressure barrier*) pada poros turbin: ketika tekanan ini turun di bawah ambang aman, perbedaan tekanan terhadap atmosfer memicu air in-leakage ke dalam kondensor, sedangkan tekanan sealing yang berlebih dapat memicu kebocoran uap

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

serta kondensasi pada sistem pelumasan bearing [5].

Tingkat kevakuman kondensor dipengaruhi oleh temperatur dan laju alir air pendingin, beban turbin, fouling tube, serta kebocoran udara [6], [13]; beberapa metode pengujian kebocoran seperti Helium Gas Tracer Test telah dikembangkan untuk memastikan ketatnya sistem vakum kondensor [12], sementara sistem ejektor atau pompa vakum bertugas menghilangkan gas non-kondensabel secara kontinu agar tekanan rendah tetap terjaga [8]. Pemantauan parameter operasi seperti tekanan sealing dan vakum kondensor umumnya dilakukan melalui *Distributed Control System* (DCS) yang merekam data secara kontinu setiap detik, sehingga perubahan tajam (spike) tetap tercatat dan dapat ditelusuri melalui fitur historian atau trend tanpa memerlukan instrumentasi tambahan [15].

Penelitian terdahulu yang relevan umumnya berfokus pada hubungan vakum kondensor dengan efisiensi atau heat rate turbin [9], [10], pemodelan vakum kondensor berbasis data operasi berskala kecil [7], maupun evaluasi kinerja komponen pendukung vakum seperti steam jet ejector [8], dengan sebagian besar memperlakukan tekanan sealing hanya sebagai salah satu faktor pendukung. Ringkasan posisi beberapa penelitian terdahulu terhadap penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terdahulu yang Relevan

Peneliti (Tahun)	Fokus Kajian	Temuan Utama
Alber [9] (2021)	Vakum kondensor vs efisiensi & heat rate turbin	Penurunan vakum menaikkan heat rate turbin
Maulidayanti dkk. [10] (2026)	Efisiensi isentropik turbin uap	Vakum kondensor salah satu faktor penentu efisiensi turbin
Mursadin & Iriyanto [7] (2024)	Pemodelan vakum kondensor skala kecil	Data historian dapat memodelkan vakum secara akurat
Yuanditra dkk. [13] (2026)	Efisiensi kondensor	Fouling dan laju alir air pendingin menurunkan efisiensi
Penelitian ini (2026)	Tekanan sealing vs vakum kondensor	Tekanan sealing berkorelasi kuat-negatif terhadap vakum

Berbeda dari penelitian sebelumnya, penelitian ini memposisikan tekanan sealing sebagai variabel independen utama yang dianalisis secara kuantitatif terhadap vakum kondensor pada studi kasus Unit 4 PT BAI, sekaligus melengkapi analisis dengan verifikasi terhadap spesifikasi desain pabrikan turbin — posisi yang melengkapi kekosongan pada penelitian terdahulu yang umumnya memperlakukan tekanan sealing sebagai faktor pendukung, bukan fokus utama.

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan menganalisis data hasil pengukuran operasional secara statistik untuk mengidentifikasi hubungan antara tekanan *sealing* turbin dan tekanan vakum kondensor. Penelitian dilaksanakan pada Turbin Uap Unit 4 PLTU PT Bintan Alumina Indonesia yang berlokasi di Gunung Kijang, Kabupaten Bintan, Kepulauan Riau. Data penelitian diperoleh dari sistem *Distributed Control System* (DCS) di control room selama periode Agustus hingga November 2025.

Pengambilan data dilakukan selama 16 minggu menggunakan teknik *purposive sampling*, yaitu dengan memilih nilai rata-rata maksimum dan rata-rata minimum mingguan pada setiap parameter yang diamati. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi batas (*boundary conditions*) operasi turbin karena unit pembangkit umumnya beroperasi pada kondisi yang relatif stabil dengan beban konstan 14–15 MW. Penggunaan data rata-rata harian cenderung menghasilkan variasi yang sempit, sehingga kurang mampu menggambarkan pengaruh perubahan tekanan *sealing* terhadap tekanan vakum kondensor secara jelas. Dengan menggunakan nilai rata-rata maksimum dan minimum setiap minggu, rentang tekanan *sealing* yang dianalisis menjadi lebih luas, yaitu 33,84–41,96 kPa, sehingga karakteristik respons sistem terhadap perubahan parameter operasi dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

Dari setiap minggu diperoleh dua kelompok data, yaitu kondisi maksimum dan kondisi minimum, sehingga terkumpul sebanyak 32 pasang data yang terdiri atas 16 data maksimum

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

dan 16 data minimum. Parameter yang diamati meliputi beban turbin, tekanan *sealing* turbin, tekanan vakum kondensor, dan arus pompa vakum. Data diekstraksi melalui fitur *trend* atau *historian* pada sistem DCS dengan mengidentifikasi nilai tertinggi dan terendah setiap parameter pada setiap minggu pengamatan. Selanjutnya, data diverifikasi melalui pencocokan dengan *operator log* untuk memastikan bahwa nilai yang digunakan tidak dipengaruhi oleh anomali instrumentasi maupun gangguan operasi selama periode pengamatan.

Dalam penelitian ini, tekanan *sealing* turbin (kPa) ditetapkan sebagai variabel independen, sedangkan tekanan vakum kondensor (kPa) dan arus pompa vakum (A) merupakan variabel dependen. Beban turbin dipertahankan pada kisaran 14–15 MW sebagai variabel kontrol agar pengaruh perubahan tekanan *sealing* terhadap tekanan vakum kondensor dapat dianalisis tanpa dipengaruhi oleh variasi beban operasi. Agar pengukuran setiap variabel konsisten dan dapat direplikasi, definisi operasional masing-masing variabel disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Definisi Operasional Variabel Penelitian

Variabel	Definisi Operasional	Satuan	Instrumen
Tekanan sealing (independen)	Tekanan uap perapat pada gland packing sisi poros turbin	kPa	Sensor tekanan DCS
Vakum kondensor (dependen)	Tekanan absolut sisi shell kondensor, dibaca sebagai nilai negatif terhadap atmosfer	kPa	Sensor tekanan DCS
Arus pompa vakum (dependen sekunder)	Arus listrik motor pompa vakum saat beroperasi	A	Sensor arus DCS
Beban turbin (kontrol)	Daya listrik keluaran generator turbin	MW	Sensor daya DCS

Analisis korelasi *Pearson* (r) digunakan untuk mengetahui kekuatan dan arah hubungan linear antara tekanan sealing (x) dan vakum kondensor (y), regresi linear sederhana ($\hat{y} = a + bx$) untuk memperoleh model prediktif, serta koefisien determinasi ($R^2 = r^2$) untuk mengukur proporsi variasi y yang dijelaskan oleh x [14]. Koefisien korelasi Pearson dihitung dengan persamaan:

$$r = \frac{n\Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{\sqrt{[n\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2][n\Sigma y_i^2 - (\Sigma y_i)^2]}} \quad (1)$$

sedangkan koefisien slope (b) dan intersep (a) pada persamaan regresi dihitung dengan:

$$b = \frac{n\Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{n\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2} \;\; ; \;\; a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2)$$

Signifikansi koefisien korelasi diuji dengan statistik uji-t pada derajat bebas df = n − 2, dibandingkan dengan t tabel pada taraf signifikansi α = 0,05 (dua sisi):

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

Seluruh perhitungan dilakukan dengan Microsoft Excel; interpretasi kekuatan korelasi mengacu pada kriteria Guilford (1956) yang dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria Interpretasi Koefisien Korelasi (Guilford, 1956)

Rentang |r|	Interpretasi
0,00 – 0,19	Sangat lemah
0,20 – 0,39	Lemah
0,40 – 0,69	Sedang
0,70 – 0,89	Kuat
0,90 – 1,00	Sangat kuat

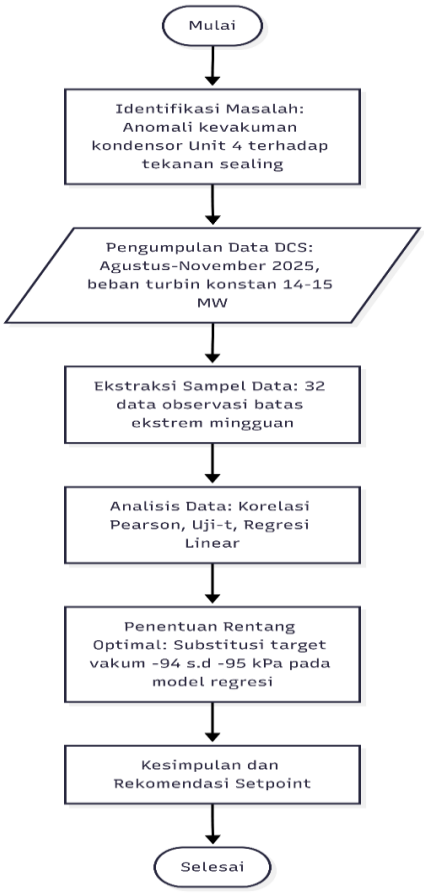
Data maksimum (*Max*) dan minimum (*Min*) dianalisis secara gabungan sehingga diperoleh 32 pasang data, yang terdiri atas 16 data maksimum dan 16 data minimum. Penggabungan kedua kelompok data dilakukan karena rentang tekanan *sealing* pada masing-masing kelompok secara terpisah relatif sempit, sehingga variasi data belum memadai untuk mengidentifikasi hubungan statistik secara andal. Dengan menggabungkan data *Max* dan *Min*, rentang tekanan *sealing* yang dianalisis menjadi lebih luas, yaitu 33,84–41,96 kPa, sehingga hubungan antara tekanan *sealing* dan tekanan vakum kondensor dapat diamati secara lebih jelas pada kondisi operasi ekstrem (*boundary conditions*).

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

Pemilihan data dilakukan menggunakan teknik *purposive sampling*, yaitu dengan mengambil nilai rata-rata maksimum dan minimum mingguan selama 16 minggu pengamatan (Agustus–November 2025). Pendekatan ini dipilih karena unit pembangkit beroperasi relatif stabil pada beban konstan 14–15 MW, sehingga penggunaan data rata-rata harian cenderung menghasilkan variasi yang sempit dan didominasi oleh data yang berulang (*redundant*). Sebelum dilakukan analisis korelasi dan regresi, seluruh data terlebih dahulu diverifikasi melalui pencocokan dengan *operator log* untuk memastikan tidak terdapat anomali instrumentasi maupun gangguan operasi. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa seluruh data memenuhi kriteria analisis sehingga tidak ada data yang dieliminasi dan jumlah sampel akhir tetap sebanyak 32 pasang data.

Secara keseluruhan, tahapan penelitian yang meliputi proses pengumpulan data, verifikasi, analisis, hingga penarikan kesimpulan disajikan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Sistem

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Operasional Mingguan

Data operasional yang direkam melalui sistem *Distributed Control System* (DCS) selama periode pengamatan Agustus–November 2025 (16 minggu) dikelompokkan menjadi dua kategori pada setiap minggu, yaitu kondisi *Sealing Max* (nilai rata-rata maksimum) dan *Sealing Min* (nilai rata-rata minimum) untuk parameter tekanan *sealing*, tekanan vakum kondensor, dan arus pompa vakum. Data granular dengan resolusi menit-ke-menit tidak disajikan karena merupakan data operasional internal PT Bintan Alumina Indonesia (PT BAI). Oleh karena itu, hasil pengamatan pada penelitian ini disajikan dalam bentuk statistik ringkasan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4 serta divisualisasikan melalui grafik hubungan antarvariabel pada Gambar 1.

Tabel 4. Statistik Ringkasan Data Operasional Mingguan Turbin Uap Unit 4

Parameter	Sealing Max (n = 16)	Sealing Min (n = 16)	Satuan
Rentang tekanan *sealing*	37,23 – 41,96	33,84 – 36,16	kPa
Rata-rata tekanan *sealing*	39,080	35,246	kPa
Rentang vakum kondensor	−95,40 – −94,69	−93,76 – −92,49	kPa
Rata-rata vakum kondensor	−95,133	−93,171	kPa
Rentang arus pompa vakum	7,51 – 7,89	8,82 – 11,12	A
Rata-rata arus pompa vakum	7,70	10,04	A
Beban turbin	14–15	14–15	MW

Berdasarkan Tabel 4, kelompok *Sealing Max* memiliki tekanan *sealing* pada rentang 37,23–41,96 kPa dengan nilai rata-rata 39,08 kPa. Pada kondisi tersebut, tekanan vakum kondensor berada pada rentang −95,40 hingga −94,69 kPa dengan nilai rata-rata −95,133 kPa, sedangkan arus pompa vakum relatif rendah, yaitu 7,51–7,89 A dengan rata-rata 7,70 A. Sebaliknya, kelompok *Sealing Min* menunjukkan tekanan *sealing* yang lebih

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

rendah, yaitu 33,84–36,16 kPa dengan rata-rata 35,246 kPa. Kondisi ini diikuti oleh melemahnya tekanan vakum kondensor menjadi −93,76 hingga −92,49 kPa dengan rata-rata −93,171 kPa serta meningkatnya arus pompa vakum menjadi 8,82–11,12 A dengan rata-rata 10,04 A.

Perbedaan karakteristik kedua kelompok tersebut menunjukkan adanya kecenderungan bahwa penurunan tekanan *sealing* diikuti oleh penurunan kualitas vakum kondensor dan peningkatan arus pompa vakum. Fenomena ini mengindikasikan bahwa ketika tekanan *sealing* tidak berada pada kondisi optimal, potensi masuknya udara non-kondensabel ke dalam kondensor meningkat sehingga pompa vakum harus bekerja lebih keras untuk mempertahankan kondisi vakum yang diinginkan. Temuan ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut menggunakan metode korelasi dan regresi guna mengukur kekuatan hubungan antara tekanan *sealing* turbin dan tekanan vakum kondensor.

4.2. Statistik Deskriptif

Sebelum dilakukan analisis korelasi dan regresi, terlebih dahulu dilakukan analisis statistik deskriptif terhadap seluruh data penelitian yang merupakan gabungan data Sealing Max dan Sealing Min (n = 32). Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum mengenai karakteristik data, meliputi nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan simpangan baku dari setiap variabel yang diamati. Statistik deskriptif juga digunakan untuk menilai sebaran data serta memastikan bahwa variasi data yang diperoleh cukup representatif sebagai dasar dalam analisis hubungan antara tekanan sealing turbin, tekanan vakum kondensor, dan arus pompa vakum. Ringkasan hasil statistik deskriptif disajikan pada Tabel 5 berikut:

Tabel 5. Statistik Deskriptif Data Operasional (n = 32)

Parameter	Min	Maks	Rata-rata	Simpangan Baku
Tekanan sealing (kPa)	33,84	41,96	37,17	2,26
Vakum kondensor (kPa)	−95,40	−92,49	−94,15	1,04
Arus pompa vakum (A)	7,51	11,12	8,87	1,30

Pemilihan 32 data yang terdiri atas nilai rata-rata maksimum dan minimum mingguan dilakukan secara sengaja (*purposive sampling*) untuk merepresentasikan kondisi batas (*boundary conditions*) operasi turbin selama periode pengamatan Agustus–November 2025. Pendekatan ini dipilih karena unit pembangkit beroperasi relatif stabil pada beban konstan 14–15 MW, sehingga penggunaan data rata-rata harian cenderung menghasilkan variasi yang sempit dan kurang memadai untuk mengidentifikasi hubungan statistik antarvariabel. Dengan menggunakan nilai rata-rata maksimum dan minimum setiap minggu, rentang tekanan *sealing* yang dianalisis menjadi lebih luas, yaitu 33,84–41,96 kPa, sehingga variasi data lebih representatif dalam menggambarkan respons sistem terhadap perubahan tekanan *sealing* serta mengurangi dominasi data yang bersifat berulang (*redundant*) akibat kondisi operasi yang relatif konstan.

Hasil statistik deskriptif menunjukkan bahwa tekanan *sealing* memiliki simpangan baku sebesar 2,26 kPa, lebih besar dibandingkan simpangan baku tekanan vakum kondensor sebesar 1,04 kPa. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi tekanan *sealing* pada data gabungan cukup lebar, sesuai dengan tujuan penggabungan kelompok *Sealing Max* dan *Sealing Min,* sedangkan tekanan vakum kondensor tetap berada pada rentang yang relatif sempit di sekitar nilai operasi yang ditetapkan dalam standar operasional (*Standard Operating Procedure*/SOP). Selain itu, arus pompa vakum memiliki simpangan baku sebesar 1,30 A dengan nilai rata-rata 8,87 A, yang menunjukkan adanya perubahan beban kerja pompa sebagai respons terhadap perubahan

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

tekanan *sealing*. Temuan ini mengindikasikan bahwa kondisi *sealing* turbin berpengaruh terhadap kebutuhan kerja pompa vakum dalam mempertahankan kondisi vakum kondensor dan menjadi dasar untuk analisis korelasi serta regresi pada subbab berikutnya.

4.3. Korelasi Tekanan *Sealing* terhadap Kevakuman Kondensor

Setelah karakteristik data dianalisis melalui statistik deskriptif, tahap berikutnya adalah menguji hubungan antara tekanan sealing turbin dan tekanan vakum kondensor menggunakan analisis korelasi Pearson dan regresi linear sederhana. Analisis dilakukan terhadap 32 pasang data hasil penggabungan kelompok Sealing Max dan Sealing Min, dengan tekanan sealing sebagai variabel independen (x) dan tekanan vakum kondensor sebagai variabel dependen (y). Nilai-nilai agregat yang digunakan dalam perhitungan, meliputi Σx, Σy, Σxy, Σx^2, Σy^2, serta nilai rata-rata masing-masing variabel ($\bar{x}$ dan $\bar{y}$), disajikan pada Tabel 6 sebagai dasar perhitungan koefisien korelasi Pearson, persamaan regresi linear, dan koefisien determinasi.

Tabel 6. Nilai Agregat Perhitungan Korelasi dan Regresi (n = 32)

Komponen	Nilai
Σx_i	1.189,52
Σy_i	−3.012,86
$\Sigma x_i y_i$	−112.056,79
Σx_i^2	44.376,39
Σy_i^2	283.699,91
$\bar{x}$; $\bar{y}$	37,1725 ; −94,1519

Berdasarkan data pada Tabel 6, diperoleh koefisien korelasi Pearson sebesar r = −0,8395 dengan p-value = 0,0000 (p < 0,05). Berdasarkan kriteria Guilford, nilai tersebut menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan arah korelasi negatif. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin rendah tekanan sealing, tekanan vakum kondensor cenderung melemah atau bergerak mendekati nol (kurang negatif), sedangkan peningkatan tekanan sealing diikuti oleh kondisi vakum yang semakin baik.

Koefisien determinasi yang diperoleh sebesar R^2 = 0,7048, yang menunjukkan bahwa 70,48% variasi tekanan vakum kondensor dapat dijelaskan oleh variasi tekanan sealing. Sementara itu, 29,52% variasi sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dianalisis dalam penelitian ini, seperti temperatur dan laju alir air pendingin, kondisi fouling pada kondensor, serta parameter operasional lainnya.

Hasil penelitian ini memperkuat temuan penelitian sebelumnya mengenai pentingnya menjaga kondisi vakum kondensor terhadap performa turbin uap. Alber (2021) dan Maulidayanti dkk. (2026) melaporkan bahwa penurunan kevakuman kondensor dapat menurunkan efisiensi isentropik turbin serta meningkatkan heat rate pembangkit [9], [10]. Berbeda dengan penelitian tersebut yang berfokus pada dampak penurunan vakum terhadap performa turbin, penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan sealing memiliki hubungan yang sangat kuat dengan kondisi vakum kondensor. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengendalian tekanan sealing merupakan salah satu faktor operasional yang berperan penting dalam menjaga kestabilan kevakuman kondensor, sekaligus melengkapi penelitian sebelumnya yang lebih banyak membahas pengaruh *fouling* kondensor dan sistem pendingin terhadap penurunan vakum [12].

Untuk memastikan bahwa hubungan yang diperoleh tidak terjadi secara kebetulan, signifikansi koefisien korelasi selanjutnya diuji menggunakan uji-*t* dengan derajat bebas (*degree of freedom*) sebesar df = n − 2 = 30. Ringkasan hasil pengujian disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan Uji Signifikansi Koefisien Korelasi

Parameter	Nilai
n (jumlah data)	32
df (n − 2)	30
r hitung	−0,8395
t hitung	8,462
t tabel (α = 0,05, dua sisi)	2,042
Kesimpulan	t hitung > t tabel → korelasi signifikan

Perlu dicatat bahwa apabila data *Sealing Max* dan *Sealing Min* dianalisis secara terpisah, koefisien korelasi pada masing-masing kelompok tidak signifikan secara statistik

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

(*Sealing Max*: r = 0,0124, p = 0,9637; Sealing Min: r = −0,3137, p = 0,2367). Kondisi ini menunjukkan bahwa rentang variasi tekanan *sealing* pada masing-masing kelompok relatif sempit sehingga hubungan linear sulit teridentifikasi. Sebaliknya, penggabungan kedua kelompok memperluas rentang observasi tekanan *sealing* dari 33,84 hingga 41,96 kPa, sehingga hubungan antara tekanan *sealing* dan tekanan vakum kondensor dapat diamati dengan lebih jelas.

Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kelompok *Sealing Max* dan *Sealing Min* merepresentasikan dua kondisi operasi dengan karakteristik yang berbeda, yaitu kondisi dengan tekanan *sealing* yang relatif tinggi dan kondisi dengan tekanan *sealing* yang relatif rendah. Oleh karena itu, model regresi yang diperoleh lebih tepat diinterpretasikan sebagai representasi hubungan antara tekanan *sealing* dan tekanan vakum kondensor pada rentang kondisi operasi yang lebih luas, bukan sebagai model untuk menggambarkan fluktuasi kecil pada kondisi operasi harian. Dengan demikian, korelasi yang diperoleh dari data gabungan mencerminkan kecenderungan hubungan sistematis antarvariabel dalam rentang operasi yang diamati.

Berdasarkan hasil analisis regresi linear sederhana, diperoleh persamaan:

$$\hat{y} = -0{,}3853x - 79{,}8294 \qquad (4)$$

dimana:
ŷ adalah dugaan vakum kondensor (kPa)
x adalah tekanan sealing (kPa).

Untuk mengukur tingkat akurasi dan validitas prediksi dari model regresi tersebut, dilakukan perhitungan Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Error (MAE). Berdasarkan hasil komputasi terhadap 32 data pengamatan, diperoleh nilai RMSE sebesar 0,556 kPa dan MAE sebesar 0.49 kPa. Nilai kesalahan baku (error) yang sangat kecil ini—hanya menyimpang sekitar 0,5 kPa dari rentang operasional absolutnya—menegaskan bahwa persamaan regresi ŷ = −0,3853x − 79,8294 memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Model ini representatif dan andal untuk digunakan memprediksi tingkat kevakuman kondensor berdasarkan tekanan sealing yang diberikan.

4.4. Rentang Tekanan Sealing Optimal

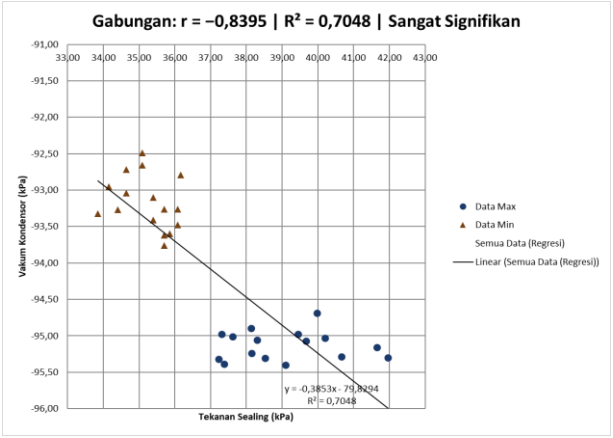
Untuk menentukan rentang tekanan *sealing* yang mampu mempertahankan tekanan vakum kondensor pada kisaran target −94 hingga −95 kPa, nilai (\hat{y}) pada Persamaan (4) disubstitusikan dengan −94 kPa dan −95 kPa, kemudian diselesaikan terhadap variabel (x). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tekanan *sealing* yang diperlukan berada pada rentang 36,77–39,37 kPa**,** dengan batas bawah sebesar 36,77 kPa untuk mempertahankan vakum −94 kPa dan batas atas sebesar 39,37 kPa untuk mencapai vakum −95 kPa. Nilai rata-rata tekanan *sealing* selama periode pengamatan, yaitu 37,16 kPa, berada di dalam rentang tersebut, sehingga menunjukkan bahwa pengoperasian Turbin Uap Unit 4 secara umum telah berada pada kisaran tekanan *sealing* yang mampu mempertahankan kondisi vakum kondensor sesuai target operasi.

Penentuan rentang tersebut didasarkan pada hasil model regresi yang diperoleh dari data penelitian. Dari sisi operasional, rentang tersebut juga sejalan dengan praktik pengoperasian turbin uap yang menuntut keseimbangan antara peningkatan kevakuman kondensor dan keandalan sistem pendukung. Tekanan *sealing* yang terlalu rendah dapat meningkatkan potensi masuknya udara non-kondensabel ke dalam kondensor sehingga kevakuman menurun. Sebaliknya, tekanan *sealing* yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan kebocoran uap ke sistem *gland* dan area sekitar *bearing*, yang dalam jangka panjang dapat memengaruhi kualitas pelumas dan keandalan komponen. Beberapa penelitian dan laporan kasus menunjukkan bahwa kebocoran uap *gland* akibat degradasi *seal strip* dapat menyebabkan kontaminasi air pada pelumas *bearing* dan mempercepat kerusakan komponen *thrust bearing* [16]. Oleh karena itu, rentang tekanan *sealing* sebesar 36,77–39,37 kPa tidak hanya memenuhi target kevakuman kondensor berdasarkan hasil analisis regresi, tetapi juga konsisten dengan pertimbangan operasional untuk menjaga keandalan sistem turbin secara keseluruhan.

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

4.5. Pola Grafik Hubungan Tekanan Sealing dan Vakum Kondensor



Gambar 1. Diagram Pencar Hubungan Tekanan Sealing terhadap Vakum Kondensor (Data Gabungan, n = 32)

Diagram pencar pada Gambar 1 menunjukkan bahwa data cenderung membentuk dua kelompok utama, yaitu *Sealing Min* pada rentang tekanan *sealing* 33–37 kPa dan *Sealing Max* pada rentang 37–42 kPa. Meskipun membentuk dua kelompok, keseluruhan data memperlihatkan kecenderungan hubungan linear negatif yang konsisten, sesuai dengan hasil analisis korelasi Pearson yang menunjukkan hubungan sangat kuat antara tekanan *sealing* dan tekanan vakum kondensor. Pola tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi tekanan *sealing*, kondisi vakum kondensor cenderung semakin baik (nilai vakum menjadi lebih negatif), sedangkan penurunan tekanan *sealing* diikuti oleh penurunan kualitas vakum. Temuan ini mendukung hasil regresi yang menghasilkan rentang tekanan *sealing* optimum sebesar 36,77–39,37 kPa untuk mempertahankan tekanan vakum kondensor pada kisaran target −94 hingga −95 kPa.

4.6. Arus Pompa Vakum sebagai Indikator Sekunder

Selain tekanan vakum kondensor, arus listrik pompa vakum juga diamati sebagai indikator sekunder kondisi sistem. Hasil pengolahan data menunjukkan pola yang berlawanan dengan tekanan vakum kondensor. Pada kelompok *Sealing Max*, arus pompa vakum memiliki nilai rata-rata sebesar 7,70 A, sedangkan pada kelompok *Sealing Min* meningkat menjadi 10,04 A, atau sekitar 30% lebih tinggi dibandingkan kondisi tekanan *sealing* yang optimal.

Secara fisis, peningkatan arus tersebut menunjukkan bahwa pompa vakum memerlukan daya kerja yang lebih besar untuk mengeluarkan udara non-kondensabel (*air in-leakage*) yang masuk ke dalam sistem akibat tekanan *sealing* yang lebih rendah. Kondisi ini menyebabkan pompa vakum bekerja lebih keras untuk mempertahankan tekanan vakum kondensor sesuai kondisi operasi yang diinginkan. Oleh karena itu, selain memantau tekanan vakum kondensor secara langsung, arus pompa vakum dapat dimanfaatkan sebagai indikator operasional pendukung. Pada kondisi beban turbin yang relatif konstan, kenaikan arus pompa vakum yang tidak normal dapat menjadi indikasi awal terjadinya penurunan kinerja sistem *sealing*, sehingga tindakan inspeksi atau penyesuaian dapat dilakukan sebelum tekanan vakum kondensor mengalami penurunan yang lebih signifikan.

4.7. Verifikasi terhadap Spesifikasi Desain Pabrikan

Sebagai pelengkap analisis statistik, dilakukan penelusuran terhadap dasar teoretis rentang target tekanan vakum kondensor sebesar −94 hingga −95 kPa yang digunakan dalam Standar Operasional Prosedur (SOP) PT Bintan Alumina Indonesia. Berdasarkan spesifikasi teknis pabrikan, Turbin Uap Unit 4 (Model C30-8,83/1,1, produksi Shandong Jinan Power Generation Equipment Factory Co., Ltd.) dirancang beroperasi dengan tekanan uap buang menuju kondensor sebesar 6,1 kPa absolut pada kondisi operasi nominal.

Dengan mengasumsikan tekanan atmosfer sebesar 101,3 kPa, karena data tekanan atmosfer aktual di lokasi penelitian tidak tersedia, nilai tersebut dikonversi menjadi tekanan vakum relatif sehingga diperoleh nilai teoritis sekitar −95,2 kPa. Nilai ini berada pada kisaran yang sangat dekat dengan target operasional −94 hingga −95 kPa yang digunakan sebagai acuan SOP PT BAI serta konsisten dengan nilai rata-rata tekanan vakum kondensor hasil pengukuran DCS pada penelitian ini, yaitu −94,15 kPa.

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

Meskipun demikian, hasil verifikasi tersebut perlu diinterpretasikan secara hati-hati. Pertama, proses konversi menggunakan asumsi tekanan atmosfer standar sehingga perbedaan beberapa persepuluh kilopascal terhadap nilai target SOP dapat dipengaruhi oleh variasi tekanan atmosfer aktual di lokasi penelitian. Kedua, nilai 6,1 kPa absolut merupakan kondisi rancangan (*design condition*) pada operasi nominal turbin dan belum tentu identik dengan kondisi operasi beban parsial sebesar 14–15 MW yang menjadi fokus penelitian ini. Oleh karena itu, kesesuaian antara hasil perhitungan teoritis, target SOP, dan hasil pengukuran lapangan memberikan indikasi bahwa rentang tekanan vakum yang digunakan dalam operasi memiliki dasar yang konsisten dengan spesifikasi rancangan turbin. Pengukuran tekanan atmosfer aktual di lokasi disarankan pada penelitian selanjutnya agar proses verifikasi dapat dilakukan dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi.

4.8. Implikasi Praktis dan Keterbatasan Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model regresi yang diperoleh dapat digunakan untuk memperkirakan kecenderungan perubahan tekanan vakum kondensor berdasarkan variasi tekanan *sealing* pada rentang operasi yang diamati. Rentang tekanan *sealing* optimum sebesar 36,77–39,37 kPa dapat dijadikan sebagai referensi operasional untuk membantu mempertahankan tekanan vakum kondensor pada kisaran target −94 hingga −95 kPa. Selain itu, peningkatan arus pompa vakum pada kondisi tekanan *sealing* yang lebih rendah menunjukkan bahwa parameter tersebut berpotensi dimanfaatkan sebagai indikator pendukung dalam pemantauan dini terhadap penurunan kinerja sistem *sealing*.

Di sisi lain, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, model regresi dibangun berdasarkan data kondisi batas (*boundary conditions*), yaitu nilai rata-rata maksimum dan minimum mingguan, sehingga model lebih sesuai untuk menggambarkan hubungan antarvariabel pada rentang operasi yang luas dibandingkan untuk memprediksi fluktuasi vakum pada resolusi waktu harian atau menit-ke-menit. Kedua, data penelitian dibatasi pada kondisi beban turbin yang relatif konstan, yaitu 14–15 MW, sehingga hasil penelitian tidak dapat langsung digeneralisasikan untuk kondisi operasi dengan beban yang berubah-ubah. Ketiga, beberapa faktor lain yang diketahui memengaruhi tekanan vakum kondensor, seperti temperatur air pendingin, laju alir air pendingin, dan kondisi *fouling* kondensor, tidak dianalisis secara terpisah sehingga kemungkinan berkontribusi terhadap 29,52% variasi tekanan vakum yang belum dapat dijelaskan oleh model. Keempat, verifikasi terhadap spesifikasi pabrikan masih menggunakan asumsi tekanan atmosfer standar sehingga hasilnya bersifat indikatif dan masih memerlukan konfirmasi melalui pengukuran tekanan atmosfer aktual pada penelitian selanjutnya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis korelasi Pearson dan regresi linear sederhana terhadap data operasional Turbin Uap Unit 4 PLTU PT Bintan Alumina Indonesia selama periode Agustus–November 2025, dapat disimpulkan bahwa tekanan sealing turbin memiliki hubungan yang sangat kuat dan signifikan secara statistik dengan tekanan vakum kondensor, dengan koefisien korelasi Pearson sebesar $r = -0{,}8395$ ($p < 0{,}05$) dan koefisien determinasi $R^2 = 0{,}7048$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sekitar 70,48% variasi tekanan vakum kondensor dapat dijelaskan oleh variasi tekanan sealing, sedangkan 29,52% sisanya dipengaruhi oleh faktor operasional lain yang tidak dianalisis dalam penelitian ini.

Persamaan regresi yang diperoleh menghasilkan rentang tekanan sealing optimum sebesar 36,77–39,37 kPa untuk mempertahankan tekanan vakum kondensor pada kisaran target −94 hingga −95 kPa. Selama periode pengamatan, nilai rata-rata tekanan sealing aktual sebesar 37,16 kPa berada dalam rentang tersebut, yang menunjukkan bahwa kondisi operasi Turbin Uap Unit 4 secara umum telah sesuai dengan target operasional yang ditetapkan.

DOI : 10.36257/teliska.v19i2.12387

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

Analisis terhadap data gabungan Sealing Max dan Sealing Min menunjukkan kecenderungan hubungan linear negatif yang konsisten antara tekanan sealing dan tekanan vakum kondensor. Penggabungan kedua kelompok data memperluas rentang observasi sehingga hubungan antarvariabel dapat diidentifikasi dengan lebih jelas dibandingkan apabila masing-masing kelompok dianalisis secara terpisah.

Selain itu, verifikasi konseptual menggunakan spesifikasi desain pabrikan menunjukkan bahwa tekanan uap buang kondensor sebesar 6,1 kPa absolut berkorelasi dengan tekanan vakum teoritis sekitar −95,2 kPa, yang konsisten dengan target operasional −94 hingga −95 kPa serta hasil pengukuran rata-rata pada penelitian ini. Meskipun demikian, hasil verifikasi tersebut masih bersifat indikatif karena menggunakan asumsi tekanan atmosfer standar dan memerlukan validasi lebih lanjut melalui pengukuran tekanan atmosfer aktual di lokasi penelitian.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menambahkan variabel yang berpotensi memengaruhi tekanan vakum kondensor, seperti temperatur dan laju alir air pendingin, kondisi fouling kondensor, serta tekanan atmosfer aktual di lokasi pembangkit. Penggunaan data operasional dengan resolusi waktu yang lebih tinggi dan rentang beban turbin yang lebih bervariasi juga dapat meningkatkan kemampuan model dalam menggambarkan karakteristik operasi turbin secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Abbas and M. Arif, "Analisa Pembangkit Tenaga Listrik dengan Tenaga Uap di PLTU," vol. 14, pp. 3–7, 2024.

[2] S. Halimatu, S. Wuryanti, and A. A. Melkias, "Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Performa Turbin Uap," pp. 24–25, 2024.

[3] L. Sibuea, D. Despa, and R. Widyawati, "Pemodelan dan Simulasi Sistem Automatic Battery Charging pada Emergency Diesel Generator PLTU Sebalang," J. Profesi Ins. Univ. Lampung, vol. 5, no. 2, 2024, doi: 10.23960/jpi.v5n2.133.

[4] K. Komarudin, H. H. Abrianto, A. Multi, and A. P. Utama, "Performance Analysis of Extraction Condensing Turbine – Unit 1 at PLTU X, Bekasi, West Java," vol. 2, no. 1, pp. 130–138, 2023.

[5] N. U. Omenife, D. A. Desai, and R. K. Dunne, "Analysis of Brush Seal Interaction with Steam Turbine Rotor-Shafts," vol. 4, no. 1, pp. 32–44, 2024.

[6] J. C. Bhuana, I. Muh, and A. Maulana, "Analisis Efektivitas Kondensor di PLTU PT. Semen Tonasa Btg Unit I 2×25 MW," PoliGrid, vol. 2, no. 1, p. 20, 2021, doi: 10.46964/poligrid.v2i1.720.

[7] A. Mursadin and A. Y. Iriyanto, "Modeling and Predicting Steam Power Plant Condenser Vacuum based on Small-sized Operation Data," vol. 14, no. 4, pp. 15233–15238, 2024.

[8] A. A. Melkias and S. N. Gomez, "Evaluasi Kinerja Steam Jet Ejector Tingkat Pertama Terhadap Kevakuman Kondensor," 2024.

[9] I. D. Alber, "Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Efisiensi dan Heat Rate Turbin Uap di PLTU Kendari-3 Unit 2," vol. 12, no. 2, pp. 1–8, 2021.

[10] H. I. Maulidayanti, E. N. Dewi, and A. E. Prasetyo, "Kajian Efisiensi Isentropik Turbin Uap pada PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar," DISTILAT: J. Teknologi Separasi, vol. 12, no. 2, pp. 278–288, 2026, doi: 10.33795/distilat.v12i2.7535.

[11] E. Novianarenti et al., "Numerical Study of the Power Plant Surface Condenser to Prevent High Pressure in Critical Areas," 2021, doi: 10.31284/j.jmesi.2021.v1i2.2317.

[12] H. Satyadi and H. T. N., "HG2T Method (Helium Gas Tracer Test) Solution to Increase Condenser Vacuum Tightness," J. Energi dan Ketenagalistrikan, vol. 2, no. 1, pp. 66–77, 2024.
[13] B. M. S. Yuanditra, A. Takwanto, and A. Latif, "Evaluasi Efisiensi Kondensor Unit 1 pada PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar," DISTILAT: J. Teknologi Separasi, vol. 12, no. 1, pp. 24–31, 2026, doi: 10.33795/distilat.v12i1.7360.
[14] R. F. Refiantoro, "Analisis Regresi Sederhana pada Nilai UAS Menggunakan Microsoft Excel dan IBM SPSS," vol. 17, pp. 107–116, 2022.
[15] T. Saputra, "Perancangan Sistem Smart Grid Berbasis Internet of Things untuk Pengelolaan Listrik yang Efisien," Jurnal TELISKA, vol. 18, no. 2, 2025.
[16] I. Mayrini, T. Abdilah, and Supriadi, "Analisa Kerusakan Thrust Bearing Turbin Pengaruh Kinerja Pelumas di PLTU PT. PLN NP UP Belawan," J. Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi, vol. 8, no. 1, pp. 13–22, 2025, doi: 10.30596/rmme.v8i1.21522.