

Terbit online pada laman: <https://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Research Article

Analisis Pengaruh Parameter Operasi Terhadap Efisiensi Isentropik Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Siti Nurkhopipah^{1,*}, Bagus Endriansyah²¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Jl Soekarno-Hatta, Indramayu 45216, Indonesia² Program Studi Teknik Kimia, Jl Soekarno-Hatta, Indramayu 45216, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 16 April 2026
 Diterima : 25 Mei 2026
 Diterbitkan : 12 Juni 2026

KATA KUNCI

Efisiensi isentropik, Laju alir massa,
 Regresi linier, Turbin geothermal.

KORESPONDENSI

*E-mail: sitinurkhopipah70@gmail.com

A B S T R A K

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) memanfaatkan fluida termal untuk menggerakkan turbin uap, di mana kinerja isentropik turbin menjadi indikator utama efisiensi sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi isentropik turbin uap pada PLTP Kamojang dengan membandingkan kondisi desain dan aktual. Metodologi penelitian mencakup pengumpulan data primer melalui observasi lapangan, analisis regresi linier, serta validasi menggunakan analisis ketidakpastian metode Root Sum Square (RSS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi isentropik desain mencapai 89,91%, sedangkan efisiensi aktual pada periode Desember 2024 hanya mencapai 76,93%, menunjukkan adanya degradasi performa sebesar 12,98%. Berdasarkan analisis statistik, laju alir massa uap merupakan parameter paling dominan yang memengaruhi penurunan efisiensi dengan koefisien korelasi (R) sebesar 0,8993. Analisis ketidakpastian memberikan nilai ambang batas $\pm 2,29\%$, yang mengonfirmasi bahwa penurunan efisiensi tersebut signifikan secara ilmiah dan berada di luar batas kesalahan instrumen. Penurunan ini dipicu oleh pengoperasian pada kondisi off-design serta potensi masalah fisik seperti fouling pada sudu turbin. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi upaya optimalisasi pemeliharaan dan peningkatan kinerja turbin guna mendukung pemanfaatan energi panas bumi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

A B S T R A C T

Geothermal Power Plants (PLTP) utilize thermal fluids to drive steam turbines, where the isentropic efficiency of the turbine serves as a primary indicator of system performance. This study aims to analyze the influence of operating parameters on the isentropic efficiency of a steam turbine at PLTP Kamojang by comparing design and actual conditions. The research methodology includes primary data collection through field observations, linear regression analysis, and validation using the Root Sum Square (RSS) uncertainty analysis method. The results indicate that while the design isentropic efficiency reached 89.91%, the actual efficiency during the December 2024 period only achieved 76.93%, representing a performance degradation of 12.98%. Statistical analysis reveals that the steam mass laju alir massa is the most dominant parameter affecting efficiency decline, with a correlation coefficient (R) of 0.8993. Uncertainty analysis yielded a threshold of $\pm 2.29\%$, confirming that the observed efficiency drop is scientifically significant and beyond the limits of instrumental error. This degradation is triggered by off-design operating conditions and potential physical issues such as fouling on turbine blades. This study is expected to serve as a basis for optimizing maintenance strategies and enhancing turbine performance to support more efficient and sustainable geothermal energy utilization.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan sektor industri menuntut ketersediaan sumber energi yang andal, efisien, dan berkelanjutan [1].

Ketergantungan terhadap energi fosil yang semakin menipis serta dampak lingkungan yang ditimbulkan mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai solusi alternatif. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah energi panas bumi, yang pemanfaatannya terus dikembangkan untuk mendukung ketahanan energi nasional [2].

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) memanfaatkan energi panas dari dalam bumi untuk menghasilkan uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin. Dalam sistem ini, turbin uap berperan sebagai komponen utama dalam proses konversi energi termal menjadi energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Oleh karena itu, kinerja turbin uap sangat memengaruhi efisiensi keseluruhan sistem pembangkit [3].

Salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja turbin uap adalah efisiensi isentropik, yaitu perbandingan antara kerja aktual turbin dengan kerja ideal pada proses isentropik [4]. Dalam kondisi operasi nyata, efisiensi ini sering kali mengalami penurunan akibat adanya penyimpangan dari kondisi ideal. Parameter operasi seperti tekanan masuk turbin, temperatur uap, dan laju alir massa uap merupakan faktor utama yang memengaruhi efisiensi tersebut. Perubahan pada parameter-parameter ini dapat menyebabkan terjadinya kerugian energi yang berdampak pada menurunnya performa turbin [5].

PLTP Kamojang sebagai salah satu pembangkit panas bumi di Indonesia menggunakan turbin uap tipe *single casing double flow reaction condensing*, yaitu turbin yang memiliki desain untuk membagi aliran uap ke dua arah secara seimbang dengan sistem kondensasi di akhir prosesnya. Dalam praktiknya, turbin tidak selalu bekerja pada kondisi desain akibat fluktuasi suplai uap, variasi beban, serta kondisi peralatan yang dapat berubah seiring waktu. Hal ini berpotensi menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi isentropik turbin dan berdampak pada kinerja pembangkit secara keseluruhan [6].

Selain itu, faktor operasional lainnya seperti ketidakstabilan tekanan dan temperatur uap, serta perubahan laju alir massa uap juga turut berkontribusi terhadap penurunan efisiensi turbin. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang komprehensif untuk memahami hubungan antara parameter operasi dan efisiensi isentropik turbin. Dengan memahami pengaruh parameter-parameter tersebut, dapat dilakukan evaluasi serta upaya optimasi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit [7].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi isentropik turbin uap pada PLTP Kamojang. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya peningkatan kinerja turbin serta mendukung optimalisasi pemanfaatan energi panas bumi secara lebih efisien.

2. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan analisis performansi turbin uap di PT Pertamina Geothermal Energi Area Kamojang. Cara pengambilan data yang dilakukan pada penelitian ini adalah:

2.1. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan setelah melakukan observasi lapangan. Data yang diambil pada tanggal 1 – 30 Desember 2024 di PLTP Geothermal Area Kamojang. Untuk memastikan validitas data, tidak hanya digunakan data dari operator (control room), tetapi juga dilakukan pencatatan langsung pada peralatan, sehingga diperoleh data aktual serta data dari control room.

2.2. Analisa Data

Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi isentropik turbin uap. Efisiensi isentropik digunakan untuk mengetahui performansi dari segi efisiensi ataupun energi loss yang terjadi. Data dianalisis menggunakan regresi linier serta validasi menggunakan analisis ketidakpastian metode *Root Sum Square* (RSS). Data yang dibutuhkan untuk menentukan nilai efisiensi isentropik dan daya turbin yaitu temperatur, tekanan, desain alat, entalpi, kualitas uap, dan laju alir massa uap. Langkah-langkah untuk menghitung efisiensi turbin yaitu [4] :

- a. Menghitung kualitas uap (x)

Untuk mencari nilai dari kualitas uap dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$x = \frac{s_1 - s_f}{s_g - s_f} \tag{1}$$

b. Menghitung entalpi

Untuk mencari nilai entalpi keluaran turbin dalam kondisi isentropik dapat menggunakan persamaan berikut:

$$h_{2s} = h_f + x(h_g - h_f) \tag{2}$$

c. Menghitung daya isentropik turbin

Nilai daya isentropik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P_s = \dot{m}(h_1 - h_{2s}) \tag{3}$$

d. Menghitung entalpi uap keluar turbin

Untuk mencari nilai entalpi uap keluar turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$h_2 = h_f + (x \cdot h_{fg}) \tag{4}$$

e. Menghitung daya ideal turbin

Nilai daya ideal turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$WT_{ideal} = \dot{m}(h_1 - h_2) \tag{5}$$

f. Menghitung daya aktual turbin

Nilai daya aktual turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$WT_{actual} = \frac{P_{gen}}{\eta_{gen}} \times 100\% \tag{6}$$

g. Menghitung efisiensi isentropik turbin

Nilai efisiensi isentropik turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_{turbin} = \frac{WT_{actual}}{WT_{ideal}} \times 100\% \tag{7}$$

h. Rumus interpolasi

Rumus interpolasi digunakan untuk mencari nilai $h_1, h_f, h_g, h_{fg}, s_1, s_f, s_g$ dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$y = \frac{(y_1 - y_0)(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} + y_0 \tag{8}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data Kondisi Operasi

Berikut data desain turbin uap yang digunakan pada Unit IV PT. Pertamina Geothermal Energy – Area Kamojang. Data ini menjadi dasar dalam melakukan perhitungan kinerja turbin uap, khususnya dalam menghitung efisiensi serta membandingkan antara kondisi operasi aktual terhadap data desain turbin.

Tabel 1.
Data desain

| Parameter | Nilai |
|-------------------------|-------------|
| Rated output | 63000 KW |
| Inlet steam pressure | 11 bar |
| Inlet steam temperature | 184, 07°C |
| Exhaust pressure | 0,16 bar |
| Rated speed | 3000 rpm |
| Number od blading stage | 12 x 2 flow |
| Generator output | 55 MW |

Berikut data aktual operasi turbin uap selama bulan Desember 2024 di Unit IV PT. Pertamina Geothermal Energy – Area Kamojang. Data ini digunakan untuk membandingkan kondisi operasi aktual terhadap data desain, serta untuk mengevaluasi kinerja turbin dalam kondisi nyata.

Tabel 2.
Data aktual

| | Flow in (ton/h) | T In (°C) | T Out (°C) | P In (Bar) | P Out (Bar) | P gen | Eff gen (%) |
|----|-----------------|-----------|------------|------------|-------------|-------|-------------|
| 1 | 411,79 | 182,20 | 52,17 | 10,19 | 0,13 | 53,65 | 98 |
| 2 | 407,35 | 182,18 | 51,23 | 10,18 | 0,13 | 53,37 | 98 |
| 3 | 405,46 | 182,21 | 51,00 | 10,20 | 0,13 | 53,58 | 98 |
| 4 | 406,60 | 182,23 | 51,28 | 10,20 | 0,13 | 53,63 | 98 |
| 5 | 407,21 | 182,19 | 51,71 | 10,19 | 0,13 | 53,56 | 98 |
| 6 | 403,97 | 182,16 | 51,57 | 10,20 | 0,13 | 53,56 | 98 |
| 7 | 403,75 | 182,17 | 51,48 | 10,19 | 0,13 | 53,56 | 98 |
| 8 | 404,78 | 182,17 | 51,89 | 10,20 | 0,13 | 53,62 | 98 |
| 9 | 402,88 | 182,22 | 51,39 | 10,20 | 0,13 | 53,57 | 98 |
| 10 | 408,89 | 181,70 | 52,59 | 10,07 | 0,14 | 53,57 | 98 |
| 11 | 402,20 | 182,07 | 51,19 | 10,15 | 0,13 | 53,67 | 98 |
| 12 | 401,85 | 182,19 | 51,12 | 10,20 | 0,13 | 53,60 | 98 |
| 13 | 400,25 | 182,19 | 51,06 | 10,21 | 0,13 | 53,69 | 98 |
| 14 | 397,54 | 182,26 | 51,06 | 10,22 | 0,13 | 53,56 | 98 |
| 15 | 392,84 | 182,08 | 51,02 | 10,18 | 0,13 | 53,63 | 98 |

| | | | | | | | |
|---|--------|--------|-------|-------|------|-------|----|
| 1 | 391,98 | 182,18 | 51,23 | 10,20 | 0,13 | 53,69 | 98 |
| 6 | | | | | | | |
| 1 | 389,08 | 182,12 | 50,93 | 10,17 | 0,13 | 53,48 | 98 |
| 7 | | | | | | | |
| 1 | 382,87 | 182,28 | 50,64 | 10,20 | 0,12 | 53,72 | 98 |
| 8 | | | | | | | |
| 1 | 387,25 | 182,19 | 51,04 | 10,19 | 0,13 | 53,66 | 98 |
| 9 | | | | | | | |
| 2 | 386,61 | 182,12 | 51,19 | 10,19 | 0,13 | 53,51 | 98 |
| 0 | | | | | | | |
| 2 | 385,06 | 182,32 | 50,69 | 10,23 | 0,12 | 53,66 | 98 |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | 385,01 | 182,22 | 50,70 | 10,20 | 0,13 | 53,57 | 98 |
| 2 | | | | | | | |
| 2 | 385,03 | 182,20 | 51,06 | 10,20 | 0,13 | 53,65 | 98 |
| 3 | | | | | | | |
| 2 | 385,30 | 182,15 | 51,10 | 10,18 | 0,13 | 53,62 | 98 |
| 4 | | | | | | | |
| 2 | 383,56 | 182,24 | 50,62 | 10,20 | 0,12 | 53,66 | 98 |
| 5 | | | | | | | |
| 2 | 383,82 | 182,24 | 50,89 | 10,20 | 0,13 | 53,58 | 98 |
| 6 | | | | | | | |
| 2 | 386,77 | 182,00 | 50,42 | 10,14 | 0,12 | 53,73 | 98 |
| 7 | | | | | | | |
| 2 | 383,43 | 182,47 | 50,86 | 10,26 | 0,13 | 53,76 | 98 |
| 8 | | | | | | | |
| 2 | 379,42 | 182,23 | 49,14 | 10,20 | 0,11 | 53,85 | 98 |
| 9 | | | | | | | |
| 3 | 381,99 | 182,42 | 50,23 | 10,24 | 0,12 | 53,75 | 98 |
| 0 | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|----|-----|---------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 8 | 0.8 | 2120.70 | 74.46 | 2120.67 | 74.46 | 54.71 | 73.48 |
| 9 | 0.8 | 2117.88 | 74.44 | 2117.86 | 74.44 | 54.66 | 73.43 |
| 10 | 0.8 | 2125.51 | 74.82 | 2125.48 | 74.83 | 54.66 | 73.05 |
| 11 | 0.8 | 2115.68 | 74.52 | 2115.66 | 74.52 | 54.77 | 73.49 |
| 12 | 0.8 | 2115.91 | 74.46 | 2115.89 | 74.47 | 54.69 | 73.45 |
| 13 | 0.8 | 2115.91 | 74.14 | 2115.89 | 74.17 | 54.79 | 73.87 |
| 14 | 0.8 | 2115.06 | 73.78 | 2115.04 | 73.78 | 54.65 | 74.08 |
| 15 | 0.8 | 2114.75 | 72.89 | 2114.73 | 72.89 | 54.72 | 75.08 |
| 16 | 0.8 | 2115.89 | 72.63 | 2115.86 | 72.64 | 54.79 | 75.43 |
| 17 | 0.8 | 2114.82 | 72.19 | 2114.79 | 72.20 | 54.57 | 75.59 |
| 18 | 0.8 | 2113.18 | 71.26 | 2113.16 | 71.26 | 54.82 | 76.92 |
| 19 | 0.8 | 2115.90 | 71.76 | 2115.88 | 71.76 | 54.76 | 76.30 |
| 20 | 0.8 | 2115.78 | 71.63 | 2115.76 | 71.63 | 54.60 | 76.22 |
| 21 | 0.8 | 2112.29 | 71.77 | 2112.27 | 71.78 | 54.76 | 76.29 |
| 22 | 0.8 | 2113.07 | 71.65 | 2113.05 | 71.66 | 54.66 | 76.29 |
| 23 | 0.8 | 2114.97 | 71.45 | 2114.94 | 71.45 | 54.75 | 76.62 |
| 24 | 0.8 | 2115.83 | 71.39 | 2115.81 | 71.39 | 54.71 | 76.64 |
| 25 | 0.8 | 2112.15 | 71.49 | 2112.13 | 71.49 | 54.76 | 76.59 |
| 26 | 0.8 | 2114.07 | 71.33 | 2114.05 | 71.33 | 54.67 | 76.65 |
| 27 | 0.8 | 2110.77 | 72.17 | 2110.75 | 72.17 | 54.83 | 75.97 |
| 28 | 0.8 | 2113.15 | 71.38 | 2113.49 | 71.38 | 54.86 | 76.85 |
| 29 | 0.8 | 2103.51 | 71.62 | 2103.50 | 71.63 | 54.95 | 76.72 |
| 30 | 0.8 | 2110.55 | 71.41 | 2110.53 | 71.42 | 54.85 | 76.80 |

3.2. Hasil Perhitungan

Berdasarkan data desain dan data aktual yang diperoleh, hasil perhitungan pada Tabel 3. menunjukkan efisiensi isentropik dari data desain diperoleh 89,81%. Sedangkan pada Tabel 4, efisiensi isentropik dari data aktual menunjukkan pola yang tidak linier. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa parameter kondisi operasi yang menyebabkan kinerja turbin aktual tidak sama dengan turbin ideal.

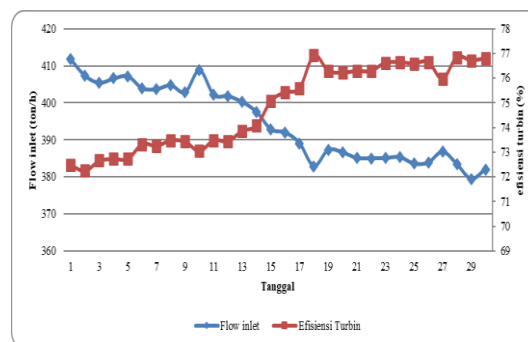
Tabel 3. Efisiensi isentropik data desain

| x (%) | h_{2s} (kJ/kg) | P_s (MW) | h_2 (kJ/kg) | WT ideal (MW) | WT aktual (MW) | Eff (%) |
|-------|------------------|------------|---------------|---------------|----------------|---------|
| 0,81 | 2147,69 | 70,39 | 2147,65 | 70,39 | 63 | 89,81 |

Tabel 4. Efisiensi isentropik data aktual

| x (%) | h_{2s} (kJ/kg) | P_s (MW) | h_2 (kJ/kg) | WT ideal (MW) | WT aktual (MW) | Eff (%) | |
|-------|------------------|------------|---------------|---------------|----------------|---------|-------|
| 1 | 0.8 | 2122.69 | 73.53 | 2122.66 | 75.54 | 54.75 | 72.48 |
| 2 | 0.8 | 2116.85 | 75.37 | 2116.83 | 75.37 | 54.46 | 72.25 |
| 3 | 0.8 | 2114.98 | 75.24 | 2114.96 | 75.24 | 54.67 | 72.66 |
| 4 | 0.8 | 2116.95 | 75.24 | 2116.92 | 75.24 | 54.72 | 72.73 |
| 5 | 0.8 | 2118.79 | 75.13 | 2118.77 | 75.13 | 54.65 | 72.74 |
| 6 | 0.8 | 2118.75 | 74.53 | 2118.73 | 74.53 | 54.65 | 73.33 |
| 7 | 0.8 | 2117.80 | 74.60 | 2117.78 | 74.60 | 54.65 | 73.26 |

Hubungan laju alir massa dan efisiensi turbin

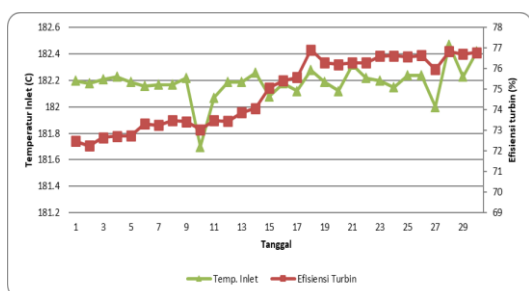


Gambar 1. Hubungan antara laju alir dan efisiensi turbin

Hubungan antara laju alir massa uap masuk dan efisiensi turbin uap menunjukkan pola yang tidak linier, melainkan bergantung pada kondisi operasi dan titik desain turbin. Ketika jumlah uap yang masuk

lebih sedikit, proses ekspansi di dalam turbin berlangsung lebih optimal, sehingga energi panas uap dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara lebih efisien. Sebaliknya, pada laju alir tinggi, energi uap tidak seluruhnya termanfaatkan secara maksimal karena waktu kontak dengan sudu-sudu turbin lebih singkat dan menyebabkan peningkatan kerugian energi yang akhirnya menurunkan efisiensi turbin [8]. Berdasarkan Gambar 1, efisiensi tertinggi diperoleh pada tanggal 18 Desember 2024, yaitu 76,92% dengan laju alir sebesar 382,87 ton/jam. Sedangkan efisiensi terendah diperoleh pada tanggal 2 Desember 2024, yaitu 72,25% dengan laju alir sebesar 411,79 ton/jam. Efisiensi yang tinggi dipengaruhi oleh faktor daya, entalpi, serta laju alir massa yang masuk ke dalam turbin. Semakin besar daya yang dihasilkan turbin disertai dengan nilai entalpi dan laju alir massa yang rendah, maka efisiensi yang diperoleh akan semakin tinggi. Sebaliknya, apabila daya yang dihasilkan besar namun diikuti oleh entalpi dan laju alir massa yang juga tinggi, maka efisiensi yang dihasilkan cenderung lebih rendah [9].

Hubungan temperatur inlet dengan efisiensi turbin

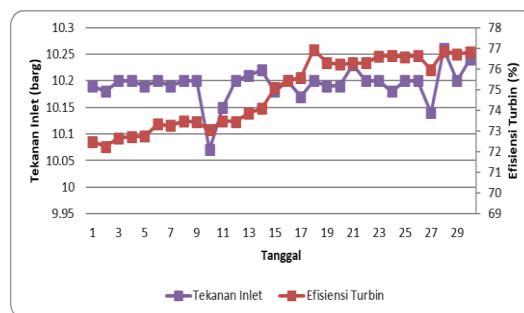


Gambar 2. Hubungan temperatur inlet dan efisiensi turbin

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur inlet, efisiensi yang dihasilkan juga cenderung meningkat. Temperatur inlet terendah terjadi pada tanggal 10 Desember 2024 sebesar 181,70°C dengan efisiensi 73,05%. Sementara itu, temperatur inlet tertinggi tercatat pada tanggal 28 Desember 2024 sebesar 182,47°C dengan efisiensi yang dihasilkan mencapai 76,85%. Kondisi ini terjadi karena semakin tinggi suhu main steam, kualitas uap yang dihasilkan juga semakin baik, yaitu dengan kandungan fase gas yang lebih dominan. Uap dengan kualitas yang lebih tinggi memiliki energi panas yang lebih besar untuk dikonversikan menjadi energi mekanik saat melewati sudu-sudu turbin [10]. Oleh sebab itu, kenaikan suhu uap masuk akan

meningkatkan potensi kerja turbin, sehingga efisiensi isentropik ikut meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa suhu main steam tidak hanya berfungsi dalam menjaga kinerja termal sistem, tetapi juga berperan dalam mengoptimalkan pemanfaatan energi uap secara efektif.

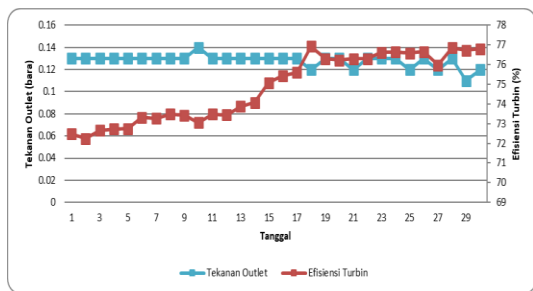
Hubungan tekanan inlet dengan efisiensi turbin



Gambar 3. Hubungan tekanan inlet dan efisiensi turbin

Berdasarkan Gambar 3, hubungan antara tekanan inlet dan efisiensi turbin juga bersifat tidak linier, namun secara umum menunjukkan kecenderungan meningkat hingga titik optimal. Tekanan inlet terendah terjadi pada 10 Desember 2024 sebesar 10,07 bar dengan efisiensi 73,05%. Sementara itu, tekanan inlet tertinggi tercatat pada 28 Desember 2024 sebesar 10,26 bar dengan efisiensi yang dihasilkan mencapai 76,85%. Ketika tekanan inlet dinaikkan, energi potensial uap bertambah sehingga selisih entalpi selama proses ekspansi di dalam turbin menjadi lebih besar. Hal ini memungkinkan turbin menghasilkan kerja yang lebih tinggi dan biasanya meningkatkan efisiensi isentropik, karena proses konversi energi berlangsung lebih efektif [11]. Selain itu, tekanan yang lebih tinggi pada kondisi temperatur yang sesuai membantu menjaga kualitas uap, sehingga mengurangi kerugian akibat kelembapan pada tahap akhir turbin. Namun demikian, jika tekanan terlalu rendah, efisiensi akan menurun karena energi yang tersedia untuk ekspansi menjadi terbatas dan kerugian relatif seperti gesekan dan kebocoran menjadi lebih dominan. Sebaliknya, jika tekanan terlalu tinggi melebihi desain turbin, dapat timbul kerugian tambahan seperti peningkatan beban mekanis, ketidaksesuaian aliran pada nozzle dan sudu, serta potensi peningkatan losses akibat shock dan turbulensi [12].

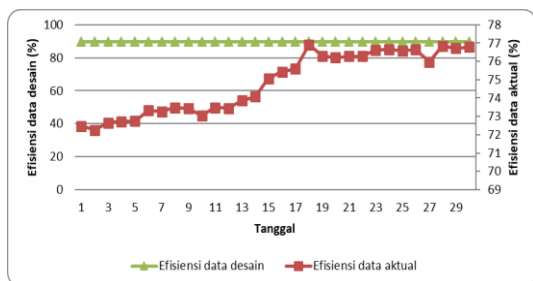
Hubungan tekanan outlet dengan efisiensi turbin



Gambar 4. Hubungan tekanan outlet dan efisiensi turbin

Berdasarkan Gambar 4. hubungan antara tekanan outlet dan efisiensi turbin menunjukkan kecenderungan berbanding terbalik. Tekanan outlet terendah terjadi pada 28 Desember 2024 sebesar 0,11 bar dengan efisiensi sebesar 76,72%. Sementara itu, tekanan outlet tertinggi tercatat pada 10 Desember 2024 sebesar 0,14 bar dengan efisiensi yang dihasilkan mencapai 73,05%. Ketika tekanan outlet menurun (artinya vakum di kondensor semakin baik), selisih tekanan dan entalpi antara inlet dan outlet menjadi lebih besar sehingga proses ekspansi uap di dalam turbin berlangsung lebih maksimal. Hal ini meningkatkan kerja yang dihasilkan turbin dan membuat efisiensi isentropik maupun efisiensi termal sistem cenderung meningkat [10]. Dengan kata lain, semakin rendah tekanan outlet, semakin besar potensi energi yang dapat diekstraksi dari uap. Sebaliknya, jika tekanan outlet meningkat, ekspansi uap menjadi terbatas karena perbedaan tekanan antara inlet dan outlet mengecil. Akibatnya, energi yang dapat dikonversi menjadi kerja berkurang dan efisiensi turbin menurun.

Perbandingan efisiensi data aktual dengan data desain



Gambar 5. Perbandingan efisiensi data aktual dan data desain

Berdasarkan Gambar 5. Perbandingan efisiensi isentropik antara data desain dan data aktual pada umumnya menunjukkan bahwa nilai aktual cenderung lebih rendah dibandingkan dengan nilai desain. Efisiensi data aktual tertinggi terjadi pada 18

Desember 2024 sebesar 76,93%, sedangkan data desain yang didapatkan sebesar 89,91%. Hal ini disebabkan oleh data aktual yang diperoleh merupakan data nyata dari kondisi operasi yang terus berubah, sesuai dengan situasi pada bulan Desember 2024.

Pada tahap desain, efisiensi isentropik ditentukan berdasarkan kondisi ideal atau mendekati ideal, dengan asumsi tidak adanya kerugian signifikan seperti gesekan, kebocoran, fouling, dan degradasi komponen. Selain itu, parameter operasi seperti tekanan, temperatur, dan laju alir massa diasumsikan berada pada titik optimal, sehingga efisiensi yang dihasilkan merupakan nilai maksimum yang dapat dicapai oleh turbin. Sebaliknya, pada kondisi aktual di lapangan, turbin beroperasi dalam berbagai variasi beban dan dipengaruhi oleh banyak faktor non-ideal [13].

Penurunan efisiensi isentropik sebesar 12,98% antara kondisi desain dan aktual menunjukkan adanya degradasi performa turbin selama operasi. Kondisi tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh perubahan parameter operasi, tetapi juga berkaitan dengan kondisi fisik turbin di lapangan. Salah satu faktor utama yang diduga menyebabkan penurunan efisiensi adalah terjadinya fouling dan scaling pada sudu turbin akibat deposisi mineral dari fluida geothermal. Selain itu, umur operasi turbin dan interval overhaul yang panjang dapat menyebabkan keausan komponen internal sehingga meningkatkan rugi-rugi mekanis dan kebocoran internal uap. Faktor lain yang turut memengaruhi adalah kandungan Non-Condensable Gas (NCG) seperti CO₂ dan H₂S yang dapat menurunkan kualitas uap dan mengurangi efektivitas proses ekspansi pada turbin. Selain itu, performa peralatan pendukung seperti kondensor dan sistem pendingin juga turut memengaruhi efisiensi keseluruhan [14].

Untuk mengetahui parameter operasi yang paling berpengaruh terhadap efisiensi isentropik turbin, dilakukan analisis regresi linier antara tekanan, temperatur, dan laju alir massa terhadap efisiensi turbin. Hasil analisis menunjukkan bahwa laju alir massa memiliki pengaruh paling signifikan terhadap efisiensi isentropik dengan nilai koefisien (R) sebesar 0,8993. Dominasi pengaruh laju alir massa terhadap efisiensi isentropik dalam penelitian ini sejalan dengan temuan [15], yang menyatakan bahwa kuantitas fluida kerja merupakan parameter kunci dalam stabilitas

daya dan efisiensi operasional. Selain itu, nilai korelasi yang tinggi mendukung teori operasional *off-design* sebagaimana dijelaskan dalam studi [16] Perubahan laju alir uap menyebabkan pergeseran titik kerja turbin dari kondisi optimumnya. Kondisi ini menyebabkan turbin harus merespon perubahan beban (*load*) dengan mengatur laju alir massa, yang mengakibatkan penurunan efisiensi isentropik secara signifikan.

Tabel 5.
Perbandingan Nilai Korelasi (R)

| Variabel | Nilai Korelasi (R) |
|------------------|--------------------|
| Laju alir massa | 0,8993 |
| Tekanan inlet | 0,2920 |
| Temperatur inlet | 0,0825 |
| Tekanan outlet | 0,0588 |

Mengingat keterbatasan data spesifik mengenai tingkat akurasi instrumen manufaktur di lapangan, analisis ketidakpastian dalam penelitian ini diestimasi menggunakan pendekatan nilai konservatif yang merujuk pada standar industri dan penelitian sejenis. Berdasarkan penelitian oleh [16,17], ketidakpastian pengukuran untuk parameter operasional pada PLTP umumnya berada pada rentang $\pm 1\%$ hingga $\pm 2\%$. Dalam analisis ini, variabel tekanan dan temperatur diasumsikan memiliki ketidakpastian $\pm 1\%$, sedangkan laju alir massa sebagai variabel dengan korelasi tertinggi ditetapkan sebesar $\pm 2\%$ sesuai dengan karakteristik fluktuasi uap yang lebih tinggi. Melalui metode *Root Sum Square* (RSS) diperoleh nilai ketidakpastian gabungan untuk efisiensi isentropik sebesar $\pm 2,29\%$. Dengan demikian, nilai efisiensi aktual sebesar 76,93% memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi karena deviasi penurunan efisiensi dari kondisi desain jauh melampaui batas ketidakpastian alat ukur, sehingga hasil ini valid untuk mempresentasikan degradasi performa turbin. Selain itu, dalam rentang standar operasional industri yang sehat untuk turbin geothermal (umumnya 70%–85%), meskipun sudah mengalami degradasi performa sebesar 12,98% dari titik desainnya, angka ini menunjukkan bahwa turbin masih layak beroperasi, namun perlu memerlukan perhatian pemeliharaan.

4. SIMPULAN

Parameter operasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi isentropik turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Penelitian ini menyimpulkan bahwa terjadi degradasi

performa pada turbin PLTP yang ditandai dengan penurunan efisiensi isentropik dari nilai desain sebesar 89,91% menjadi 76,93% pada kondisi aktual (selisih 12,98%), sebuah fenomena yang secara teknis dipicu oleh faktor operasional *off-design* serta potensi masalah fisik seperti *fouling* dan *scaling* pada komponen internal. Analisis regresi linier menunjukkan bahwa laju alir massa merupakan parameter kunci yang paling berpengaruh terhadap fluktuasi efisiensi dengan koefisien korelasi $R = 0,8993$, mengungguli variabel tekanan dan temperatur inlet yang memiliki pengaruh jauh lebih rendah. Validitas temuan ini diperkuat oleh analisis ketidakpastian menggunakan metode *Root Sum Square* (RSS) yang menghasilkan nilai ketidakpastian gabungan sebesar $\pm 2,29\%$, yang membuktikan bahwa penurunan efisiensi tersebut signifikan secara ilmiah dan berada di luar batas kesalahan alat ukur. Sebagai langkah tindak lanjut, diperlukan optimasi manajemen laju alir uap dan pemeliharaan berkala untuk mengembalikan performa turbin mendekati titik desainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada PT Pertamina Geothermal Energi Area Kamojang atas dukungan dan bantuan yang diberikan dalam menyelesaikan penelitian ini. Penulis berharap PT Pertamina Geothermal Energi Area Kamojang akan terus berkembang dan sukses dalam semua kegiatannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Ji, J. Xue, and Z. Fu, 'Sustainable Development of Economic Growth, Energy-Intensive Industries and Energy Consumption: Empirical Evidence from China's Provinces', *Sustain.*, vol. 14, no. 12, 2022, doi: 10.3390/su14127009.
- [2] R. D. Utami *et al.*, 'Analisis Dampak Lingkungan Akibat Kegiatan Geothermal: Studi Literatur Hubungan Life Cycle Cost Dengan Kerusakan Lingkungan', *J. jernih*, vol. 3, no. 2, 2025.
- [3] C. M. Sufyana, F. T. Akbar, and W. Srigutomo, 'Thermal modeling and simulation of a single-flash geothermal power plant involving non-condensable gas: a case study of Kamojang geothermal field in Garut, West Java, Indonesia',

- Geotherm. Energy*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s40517-023-00249-3.
- [4] Y. A. Cengel and M. A. Boles, 'Thermodynamics: An Engineering Approach, 5 ed', *MC Graw Hill*, vol. 7, no. 2, p. 962, 2008.
- [5] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals Of Engineering Energy*, vol. 83, no. 4. 1994.
- [6] P. Mariono, R. N. Palilingan, and A. F. Sompotan, 'Pengaruh Perubahan Temperatur Lingkungan Terhadap Kinerja Dan Efisiensi Turbin Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Pltp) Unit 2 Lahendong', *J. FisTa Fis. dan Ter.*, vol. 3, no. 2, pp. 48–51, 2022, doi: 10.53682/fista.v3i2.214.
- [7] E. Prastyo and I. Dhamayanthie, 'Analisis Kinerja Turbin Uap Sebelum dan Setelah Proses Overhaul di PT PERTAMINA GEOTHERMAL ENERGY Area Kamojang', *J. Ilm. Tek. Kim.*, vol. 6, no. 1, p. 18, 2022, doi: 10.32493/jitk.v6i1.14492.
- [8] S. Aisyah, Z. Effendi, and D. V. Maha, 'Aplikasi Interpolasi Lagrange Terhadap Efisiensi Turbin pada Pabrik Kelapa Sawit Mayang Kapasitas 40 Ton/Jam', *Agrointek J. Teknol. Ind. Pertanian*, vol. 15, no. 1, pp. 171–176, 2021.
- [9] G. Zhao, Z. G. Su, J. Zhan, H. Zhu, and M. Zhao, 'Adaptively receding Galerkin optimal control for a nonlinear boiler-turbine unit', *Complexity*, vol. 2018, pp. 10–13, 2018, doi: 10.1155/2018/8643623.
- [10] I. Darren Alber, B. Fajar Tamtomo Kiono, and U. Harmoko, 'Analisa Efisiensi Isentropik Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap', *J. Syntax Admiration*, vol. 4, no. 8, 2023, doi: 10.46799/jsa.v4i8.679.
- [11] D. D. Risqiawan and A. B. K. Putra, 'Studi Eksperimen Perbandingan Pengaruh Variasi Tekanan Inlet Turbin dan Variasi Pembebanan Terhadap Karakteristik Turbin Pada Organic Rankine Cycle', *J. Tek. Pom Its*, vol. 2, no. 3, pp. 414–418, 2013.
- [12] J. Orović, V. Mrzljak, and I. Poljak, 'Efficiency and losses analysis of steam air heater from marine steam propulsion plant', *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/en11113019.
- [13] E. K. Sitanggang, Z. Effendi, and I. U. P. Rangkuti, 'Analisa Performansi Turbin Uap Kapasitas 1,8 MW pada Pabrik Kelapa Sawit Kapasitas 50 Ton/Jam', *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 2, 2024, doi: 10.24127/trb.v13i2.3496.
- [14] D. Ion, 'Efficiency Assessment of Condensing Steam Turbine', *Adv. Environ. Ecosyst. Sustain. Tour. Effic.*, pp. 203–208, 2013.
- [15] I. Yanti, Z. Effendi, I. Ucha, and P. Rangkuti, 'Pengaruh Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Kerja Turbin Uap Pada Pabrik Kelapa Sawit Kapasitas 50 Ton / Jam', *TURBO*, vol. 13, no. 01, 2024.
- [16] U. Pietro, Ö. Zekeriya, M. Giampaolo, E. Özgür, and T. Lorenzo, 'OFF-DESIGN MODELLING OF ORC TURBINES', *E3S Web Conf.*, vol. 11015, pp. 1–20, 2021.
- [17] C. Yilmaz, 'Improving Performance And Thermoeconomic Optimization Of An Existing Binary Geothermal Power Plant : A Case Study Mevcut Bir Binary Jeotermal Santralin Performans Geliştirmesi Ve Termoeconomik Optimizasyonu : BİR VAKA ÇALIŞMASI', *J. Therm. Sci. Technol.*, pp. 37–51, 2020.