

Analisis Kinerja Komprehensif Sistem Pendingin Primer terhadap Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Tipe *Flash Steam*

Agus Apriyanto^{1*}, Novia Utami Putri¹, Retno Wahyudi¹, Alexander Sembiring¹, Fauzi Ibrahim¹, Adam Wisnu Murti¹, Bahrul Ilmi²

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

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Kota Bandar Lampung, Lampung, 35154, Indonesia.

Received: 17-07-2025
Accepted: 28-07-2025

Keywords:

Geothermal Power Plant;
Cooling Tower; Condenser;
Thermal Efficiency; Steam
Turbine.

Correspondent Email:

agusapriyanto@polinela.ac.id

Abstrak. Pembangkit listrik tenaga panas bumi sangat bergantung pada efisiensi sistem pendinginnya untuk mengoptimalkan konversi energi secara keseluruhan. Studi ini menyelidiki kinerja sistem pendingin primer yaitu kondensor kontak langsung dan menara pendingin aliran induksi mekanis di Unit 3 PT. Pertamina Geothermal Energy Tbk, Area Ulubelu, Lampung. Metrik kinerja dinilai menggunakan parameter seperti range, approach, dan efektivitas untuk menara pendingin, dan perhitungan efisiensi termal untuk kondensor dan turbin uap. Data operasional harian dikumpulkan dan dianalisis. Hasilnya menunjukkan bahwa fluktuasi efektivitas menara pendingin secara signifikan memengaruhi vakum kondensor dan efisiensi turbin. Rata-rata efektivitas aktual menara pendingin sebesar 70,06%, lebih rendah dari efektivitas desain sebesar 78%. Kondensor menunjukkan rata-rata efisiensi termal sebesar 93,80%, dengan variasi efektivitas antara 83,23% hingga 86,44%. Efisiensi turbin berdasarkan desain sebesar 87,51%, sementara efisiensi aktualnya turun ke kisaran 81,84% hingga 82,48%. Penurunan ini mengindikasikan degradasi kinerja sekitar 0,94% per tahun. Temuan ini menggarisbawahi peran penting pengoptimalan sistem pendingin dalam meningkatkan kinerja pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Abstract. Geothermal power plants rely heavily on the efficiency of their cooling systems to optimize overall energy conversion. This study investigates the performance of the primary cooling systems, namely direct contact condensers and mechanically induced flow cooling towers in Unit 3 of PT. Pertamina Geothermal Energy Tbk, Ulubelu Area, Lampung. Performance metrics are assessed using parameters such as range, approach, and effectiveness for the cooling tower, and thermal efficiency calculations for the condenser and steam turbine. Daily operational data were collected and analyzed. The results show that fluctuations in cooling tower effectiveness significantly affect condenser vacuum and turbine efficiency. The average actual cooling tower effectiveness is 70.06%, lower than the design effectiveness of 78%. The condenser shows an average thermal efficiency of 93.80%, with effectiveness variations between 83.23% to 86.44%. The turbine efficiency based on design is 87.51%, while the actual efficiency drops to the range of 81.84% to 82.48%. This decrease indicates a performance degradation of approximately 0.94% per year. This finding underlines the important role of cooling system optimization in improving the performance of geothermal power plants.

1. PENDAHULUAN

Panas bumi merupakan sumber daya panas alami yang terdapat di dalam bumi, merupakan hasil interaksi antara panas yang dipancarkan batuan panas (magma) dan air tanah yang berada disekitarnya. Cairan yang terpanaskan terperangkap di dalam batuan yang terletak di dekat permukaan sehingga secara ekonomis dapat dimanfaatkan [1]. Energi panas bumi merupakan energi yang tersimpan dalam bentuk air panas atau uap pada kedalaman beberapa kilometer didalam kerak bumi. Daerah panas bumi atau medan panas bumi adalah suatu daerah di permukaan bumi dimana terdapat energi panas bumi dalam suatu kondisi hidrologi-batuan tertentu atau disebut sistem panas bumi [2].

Energi listrik merupakan sumber energi utama yang banyak dimanfaatkan dan dibutuhkan karena merupakan salah satu faktor pendukung yang penting bagi kehidupan manusia. Energi listrik dapat diproduksi dengan berbagai cara, salah satunya adalah dari energi panas bumi. Energi listrik dari panas bumi dapat dihasilkan dari mesin pembangkit listrik, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). PLTP memanfaatkan energi panas bumi dan dikonversi menjadi energi listrik menggunakan dua komponen utama, yaitu turbin uap dan generator [3]. Sistem unit 3 PLTP Area Ulubelu menggunakan turbin jenis silinder tunggal reaksi kondensasi (*Single Casing Condensing Reaction*) yang dapat menghasilkan daya listrik sebesar 58,805 MW Gross dengan putaran 3000 rpm. Turbin uap memanfaatkan energi fluida berupa entalpi uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi. Dalam memproduksi uap menjadi listrik, uap dengan tekanan tertentu masuk ke turbin yang kemudian dikonversi dari energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin untuk memutar generator dan menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dapat mencapai kualitas yang maksimal apabila efisiensi kerja turbin besar. Efisiensi kerja turbin merupakan nilai perbandingan antara kerja aktual yang dihasilkan dan kerja isentropis dari turbin [4].

Beberapa faktor yang memengaruhi efisiensi turbin antara lain performa sistem pendingin dan efektivitas vakum pada kondensor. Semakin optimal performa *cooling tower* dalam menurunkan suhu air, maka

semakin efektif pula proses kondensasi uap dalam kondensor [5].

Melalui analisis perhitungan *cooling tower*, *condenser* dan turbin maka diharapkan dapat diketahui kinerja pembangkit dan efisiensi turbin saat beroperasi secara maksimal berdasarkan nilai efisiensi kerja turbin yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh terhadap performa *cooling tower*, *condenser*, dan turbin, sehingga diperoleh gambaran menyeluruh mengenai efisiensi dan kinerja pembangkit di PLTP Unit 3 Ulubelu.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Proses Produksi Unit 3 Area Ulu Belu

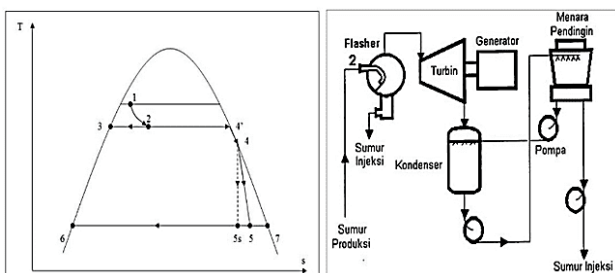
Secara umum PLTP memiliki kemiripan prinsip kerja dengan pembangkit listrik tenaga uap. Panas yang keluar dari perut bumi yang akan digunakan untuk memutar turbin dan generator sehingga menghasilkan listrik. Namun, uap panas yang keluar dari perut bumi ini tidak langsung digunakan karena masih terdapat kandungan lain seperti air, mineral, garam, H₂S, CO₂ dan kandungan lainnya. Oleh karena itu, uap yang dihasilkan perlu dimurnikan terlebih dahulu dan melalui beberapa tahap sebelum digunakan untuk memutar turbin dan generator sehingga dapat menghasilkan listrik yang kemudian didistribusikan [6].

Mekanisme pembangkitan listrik tenaga panas bumi terbagi menjadi dua yaitu dengan satu fasa dan dua fasa. Uap yang sudah terpisah akan masuk ke *scrubber* terlebih dahulu untuk memastikan bahwa uap yang akan masuk ke turbin benar-benar dalam keadaan kering, lalu uap tersebut akan masuk ke turbin dan digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator. Uap sisa dari turbin akan dikondensasikan di dalam *Condenser*. Kondensasi sendiri merupakan perubahan keadaan materi ke keadaan yang lebih padat.

Pada PLTP, uap lah yang akan diubah menjadi bentuk cair. Kondensasi terjadi ketika uap didinginkan menjadi cairan, tetapi juga dapat terjadi ketika uap dikompresi (tekanan dinaikkan) menjadi cairan atau mengalami kombinasi pendinginan dan kompresi. Uap yang berhasil dikondensasikan disebut dengan kondensat akan didinginkan di *cooling tower* dengan bantuan *Hot Well Pump* (HWP) dan yang tidak berhasil terkondensasi disebut

dengan NCG (*NonCondensable Gas*). NCG dapat menghambat laju uap yang masuk ke *condenser* sehingga dapat mengakibatkan tidak maksimalnya panas yang didapatkan, oleh karena itu NCG akan diolah kembali di *intercondenser*. *Intercondenser* sendiri memiliki fungsi yang sama dengan *condenser* dan akan menghasilkan kondensat dan kembali lagi ke *condenser* utama sedangkan yang tidak berhasil terkondensasi akan di olah oleh *Liquid Ring Vacuum Pump* (LRVP) dan ditransfer ke *cooling tower* dan akan dilepas ke atmosfer [7].

Proses pembangkitan listrik menggunakan teknologi *single flash* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Unit 3 Ulubelu. dimulai dari sumur produksi, dimana fluida panas bumi yang terdiri dari campuran air dan uap (dua fasa) dialirkan ke permukaan. Fluida ini kemudian masuk ke dalam *flasher*, sebuah alat pemisah yang memanfaatkan penurunan tekanan untuk memisahkan uap dari cairan panas (*brine*). Uap yang dihasilkan dari proses ini dialirkan menuju turbin. Di dalam turbin, energi termal dari uap diubah menjadi energi mekanik untuk memutar generator, yang selanjutnya menghasilkan listrik. Secara termodinamika, diagram T-S (Temperatur vs Entropi) dan siklus *single flash* PLTP Ulubelu dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram T-S dan Siklus *Single Flash* pada PLTP [9]

Titik 1 merupakan kondisi fluida di kepala sumur (2 fasa). Titik 2 merupakan kondisi fluida di Separator. Pada titik ini dilakukan pemisahan fasa antara uap dan air (*brine*). Air akan dibawa ke titik 3 untuk di injeksikan ke sumur injeksi, sedangkan uap dibawa ke titik 4 untuk selanjutnya masuk ke turbin. Titik 3 merupakan kondisi air yang akan di injeksikan ke sumur injeksi yang sebelumnya di tampung pada satu header reinjeksi. Titik 4 merupakan titik masuk turbin. Adanya

penurunan tekanan (*pressure losses*) sepanjang pipa dari separator ke turbin menyebabkan titik 4 jatuh tidak segaris dengan titik 2. Titik 4' adalah kondisi ideal jika tidak ada *pressure losses*. Titik 5 merupakan titik keluar turbin sekaligus titik masuk *condenser*. Jika proses ideal, entropi keluar turbin akan sama dengan entropi masuk turbin (*isentropic*) dan jatuh pada titik 5s. Titik 6 merupakan titik keluar *condenser*. Titik 7 merupakan titik keluar NCG pada *cooling tower*.

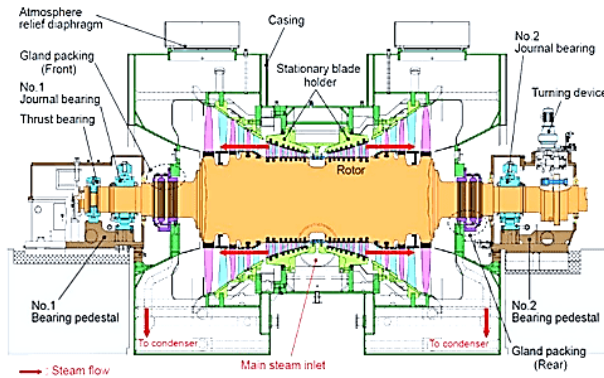
Pembangkit listrik tenaga panas bumi terbagi atas beberapa jenis berdasarkan prinsip kerjanya dan fluida yang digunakan, antara lain: *single flash steam power plant*, *double flash steam power plant*, *dry steam power plant* dan *binary power plant*. Fluida kerja tersebut dipanaskan dengan menggunakan prinsip *heat exchanger* sehingga melalui proses tersebut dihasilkan uap yang digunakan sebagai fluida untuk memutar turbin dan generator. Fluida panas bumi hanya digunakan sebagai pemanas, sehingga tidak ada kontak langsung dengan peralatan PLTP [10].

2.2 Turbin Uap

Turbin uap merupakan peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung dalam uap (entalpi) menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros turbin. Saat uap kecepatan tinggi mengalir melalui sudu gerak yang terpasang pada rotor turbin, maka terjadilah perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik [11]. Prinsip kerja turbin uap adalah menerima energi kinetik dari *superheated vapor* (uap kering) yang dikeluarkan oleh nosel sehingga sudu-sudu turbin bergerak memutar. Secara singkat prinsip kerja turbin uap yaitu uap masuk ke dalam turbin melalui nosel.

Di dalam nosel energi panas dari uap diubah menjadi energi kinetik dan uap mengalami pengembangan [12]. Tekanan uap pada saat keluar dari nosel lebih kecil dari pada saat masuk ke dalam nosel, akan tetapi sebaliknya kecepatan uap keluar nosel lebih besar dari pada saat masuk ke dalam nosel. Uap yang memancar keluar dari nosel diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkungan dan dipasang di sekeliling roda turbin. Uap yang mengalir melalui celah-celah antara sudu turbin itu dibelokkan ke arah mengikuti lengkungan dari sudu turbin, perubahan

kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong dan kemudian memutar roda dan poros turbin [12].



Gambar 2. Design Turbin Unit 3 Ulubelu [8].

Untuk memanfaatkan energi kinetik yang tersisa, maka pada turbin dipasang lebih dari satu baris sudu gerak. Sebelum memasuki baris kedua sudu gerak, maka antara baris pertama dan baris kedua sudu gerak dipasang satu baris sudu tetap (*guide blade*) untuk mengubah arah kecepatan uap, supaya uap dapat masuk ke baris kedua sudu gerak dengan arah yang tepat [12].

Uap yang masih mempunyai kecepatan saat meninggalkan sudu turbin berarti hanya sebagian yang energi kinetik dari uap yang diambil oleh sudu-sudu turbin yang berjalan. Kecepatan uap saat meninggalkan sudu gerak yang terakhir harus dapat dibuat sekecil mungkin, agar energi kinetik yang tersedia dapat dimanfaatkan sebanyak mungkin. Dengan demikian efisiensi turbin menjadi lebih tinggi karena kehilangan energi relatif kecil [12].

2.3. Sistem Pendinginan Utama PLTP

2.3.1. Condenser

Condenser berfungsi mengubah uap bekas turbin menjadi air (kondensat) melalui proses kondensasi, yaitu penurunan suhu uap hingga berubah fasa menjadi cair karena perpindahan panas ke media pendingin. Proses ini melibatkan konduksi, konveksi, dan radiasi. Air kondensat dapat digunakan kembali atau diinjeksi ke dalam bumi. Kinerja *condenser* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kevakuman, kinerja ejector, suhu dan tekanan uap, serta kinerja *cooling tower*. Kestabilan kinerja *condenser* akan sangat berpengaruh terhadap efisiensi pembangkit [13]. Keberadaan

non-condensable gas (NCG) dapat menurunkan efisiensi, sehingga perlu dikeluarkan melalui sistem intercondenser dan *cooling tower*. Terdapat dua jenis *condenser* berdasarkan prinsip kerjanya, yaitu *direct contact* dan *surface condenser* [14].



Gambar 3. Direct Contact Condenser Unit 3 Ulubelu [8].

Condenser yang digunakan di Area 3 Ulubelu adalah tipe *direct contact*. *Condenser* jenis ini memiliki prinsip kerja dengan air pendingin (*cooled water*) akan kontak secara langsung dengan *exhaust steam*, dimana perpindahan panas antara *exhaust steam* dengan air akan maksimal karena terjadi secara kontak langsung.

2.3.2. Cooling Tower

Cooling tower adalah alat pada PLTP yang berfungsi menurunkan suhu air kondensat dengan melepaskan panas ke atmosfer melalui perpindahan panas antara air dan udara secara berlawanan arah [15].



Gambar 4. Cooling Tower Unit 3 Ulubelu [8]

Air kondensat panas dari *condenser* disemprotkan melalui nosel dan *spray* di *cooling tower*, kemudian sebagian diuapkan dan sebagian lagi jatuh ke *water basin* setelah

melewati *drift eliminator* [16]. Air yang telah didinginkan dikumpulkan dan digunakan kembali sebagai media pendingin. *Cooling tower* lebih efisien dibanding sistem pendingin udara karena mampu menurunkan suhu kondensat lebih efektif dan hemat energi untuk skala besar [17].

2.3.3. Hotwell Pump

Hotwell pump atau HWP merupakan salah satu pompa yang berperan dalam proses PLTP, pompa HWP digunakan untuk memompa air kondensat dari *condenser* menuju ke *cooling tower* untuk di dinginkan. Berdasarkan fungsinya HWP memiliki kapasitas dan ukuran besar, karena selain untuk memompa air kondensat HWP juga berfungsi untuk menjaga level pada *condenser* agar tetap pada batas kestabilan. Proses pengaturan level *condenser* sangat berpengaruh terhadap kinerja *condenser* [18].



Gambar 5. Hotwell Pump Unit 3 Ulubelu [8]

3. METODE PENELITIAN

3.1. Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini dilaksanakan di Department Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Unit 3 Area Ulubelu PT. Pertamina Geothermal Energy, Kecamatan Ulubelu, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Waktu pengumpulan data dilakukan pada tanggal 1 Juli sampai dengan 31 Juli 2023. Parameter yang diukur terdiri dari data tekanan uap masuk, suhu masuk turbin, suhu keluaran turbin, laju alir uap, *vacum condenser*, suhu air masuk *cooling tower*, suhu air masuk *cooling tower* dan suhu air keluar *cooling tower* dan data spesifikasi turbin. Proses pengamatan dilakukan melalui DCS (*Distribution Control System*).

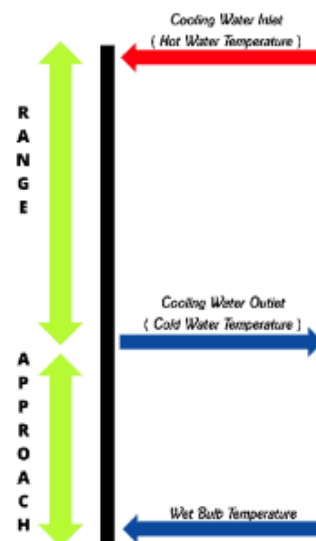
Data pengamatan digunakan untuk menghitung daya isentropis turbin dan efisiensi

kerja turbin. Setelah itu dilakukan analisis pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi kerja turbin dan mengetahui nilai efisiensi kerja turbin. Pendalaman juga dilakukan terhadap sistem yang ada mulai dari proses menghasilkan uap untuk kerja sistem hingga mendapatkan hasil yaitu listrik (MW).

3.2. Metode Analisis Data

3.2.1. Menghitung Efektivitas Cooling Tower

Nilai efektivitas dari *cooling tower* yaitu dengan mencari nilai *range* dan *approach* [20] [21]. Nilai *range* dan *approach* dapat dicari dengan data temperatur masuk *cooling tower* (T_{in}), Temperatur air keluar *cooling tower* (T_{out}) dan temperatur *wet bulb* (T_{wb}). Hubungan antara aktual tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 6. Range and Approach [19].

Range merupakan selisih temperatur air yang masuk dan air yang keluar *cooling tower*. Sehingga untuk mendapat suatu nilai *range cooling tower*, terlebih dahulu harus mengetahui nilai dari temperatur air masuk (T_{in}) dan temperatur air keluar (T_{out}). *Range cooling water* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Range = T_{in} - T_{out} \quad (1)$$

Dimana:

$Range$ = Range cooling tower ($^{\circ}C$)

T_{in} = Temperatur air masuk ($^{\circ}C$)

T_{out} = Temperatur air keluar ($^{\circ}C$)

Approach merupakan rasio perbandingan antara temperatur air dingin yang keluar dari *cooling tower* dengan temperatur *wet bulb*. Untuk menghitung nilai *approach* pada *cooling tower* dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Approach = T_{out} - T_{wb} \quad (2)$$

Dimana:

Approach = Perbandingan T_{out} dengan T_{wb} (°C)

T_{out} = Temperatur air keluar (°C)

T_{wb} = Temperatur *wet bulb* (°C)

Efektivitas merupakan perbandingan antara nilai *range* dengan *range* ideal, dengan hasil nilai berupa persentase. Untuk mencari nilai dari efektivitas dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{Range}{Approach + Range} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

ε = Efektifitas *Cooling Tower* (%)

Range = Perbandingan T_{in} dengan T_{out} (°C)

Approach = Perbandingan T_{out} dengan T_{wb} (°C)

3.2.2. Menghitung Efektivitas Condenser

Laju perpindahan panas aktual dibanding dengan laju perpindahan panas maksimal pada *condenser* merupakan variable hitung yang digunakan untuk menentukan nilai efektivitas. Efektivitas *condenser* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [22]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cond} &= \frac{q_{aktual}}{q_{maksimum}} \\ &= \frac{T_{c,0} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,1}} \times 100\% \end{aligned} \quad (4)$$

3.2.3. Menghitung Efisiensi Condenser

Efisiensi termal menunjukkan kinerja suatu alat termal atau alat penukar kalor dengan ukuran tanpa dimensi. Efisiensi termal *condenser* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [22]:

$$\eta_{cond} = \frac{Q_{air}}{Q_{kond}} \quad (5)$$

$$\eta_{cond} = \frac{m \cdot cp (T_{co} - T_{ci})}{m \cdot (h_1 - h_2)} \quad (6)$$

Dimana:

η_{cond} = Efisiensi *Condenser* (%)

m = massa jenis air (kg/jam)

cp = kapasitas kalor air pendingin (kJ/kg)

h_1 = entalpi uap (kJ/kg)

h_2 = entalpi water (kJ/kg)

3.2.4. Menghitung Efisiensi Turbin

Efisiensi merupakan persamaan penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik proses konversi energi terjadi. Energi dalam suatu sistem bertambah atau berkurang karena perubahan bentuk energi dalam sistem tersebut [23]. Untuk mencari nilai dari kekeringan uap (*dryness factor*) dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$x = \frac{S_2 - S_f}{S_{fg\ out}} \quad (7)$$

Dimana:

x = fraksi uap (%)

S_2 = entropi uap keluaran turbin (kJ/kg. K)

S_f = entropi uap dalam keadaan saturasi cair (liquid) (kJ/kg. K)

$S_{fg\ out}$ = entropi perubahan dari air ke uap (kJ/kg. K)

Mencari nilai dari h_{2s} didapat dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$h_{2s} = h_f + (x \cdot h_{fg\ out}) \quad (8)$$

Dimana:

h_{2s} = entalpi uap isentropis pada temperatur keluaran turbin (kJ/Kg)

h_f = entalpi uap dalam keadaan saturasi cair (liquid) (kJ/kg)

x = fraksi uap (%)

$h_{fg\ out}$ = entalpi perubahan dari cair ke uap (kJ/kg).

Kinerja turbin didapatkan melalui perhitungan entalpi uap masuk turbin (h_1) dengan entalpi uap isentropic keluaran turbin (h_{2s}). Kerja turbin dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$W_t = h_1 - h_{2s} \quad (9)$$

Dimana:

W_t = kinerja turbin (MW)

h_1 = entalpi uap pada temperatur uap masuk (kJ/kg)

h_{2s} = entalpi uap isentropis pada temperatur keluaran turbin (kJ/kg).

Daya masuk turbin (P_{in}) didapatkan dengan mengetahui nilai dari laju alir massa uap dan kinerja turbin yang dirumuskan secara sistematis melalui persamaan:

$$W_i \text{ turbin} = \dot{m} \times (h_1 - h_{2s}) \quad (10)$$

Dimana:

W_i turbin = daya input turbin (kW)

$\dot{m}$ = laju alir massa uap (kg/s)

h_1 = entalpi uap pada temperature uap masuk (kJ/kg)

h_{2s} = entalpi uap isentropis pada temperatur keluaran turbin (kJ/kg).

Sedangkan untuk menghitung efisiensi kerja turbin menggunakan persamaan berikut:

$$\eta \text{ turbin} = \frac{W_{ta}}{W_{ts}} \times 100\% \quad (11)$$

Dimana:

η turbin = Efisiensi turbin (%)

W_{ta} = Daya aktual keluaran turbin spesifikasi (MW)

W_{ts} = Daya insentropis turbin (MW)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Kinerja Cooling Tower

Kegiatan monitoring dalam studi ini bertujuan untuk memperoleh data temperatur yang relevan sebagai dasar analisis kinerja *cooling tower*. Parameter yang diamati meliputi temperatur *inlet*, temperatur *outlet cooling tower*, serta temperatur *wet bulb*.

Tabel 1. Data *design* temperatur *inlet*, *outlet* dan *wetbulb cooling tower*

Temperatur Air Inlet (°C)	Temperatur Air Outlet (°C)	Temperatur Wetbulb (°C)
38,80	28,00	25,00

Data diatas merupakan data *design* yang sudah terlampir pada spesifikasi *cooling tower*. Data *design* ini adalah data awal alat atau data yang didapat ketika perancangan awal alat.

1) Range

$$T_{\text{Range}} = T_{in} - T_{out} = 38,80 - 28,00 = 10,90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Approach

$$T_{\text{Approach}} = T_{out} - T_{wb} = 28,00 - 25,00 = 3,00 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3) Efektivitas

$$\varepsilon = \frac{\text{Range}}{\text{Approach} + \text{Range}} \times 100\% \\ = \frac{10,9}{10,9 + 3} \times 100\% = 78,40\%$$

Tabel 2. Data Aktual temperatur *inlet*, *outlet* dan *wetbulb cooling tower* (Sumber: DCS)

No	Date Time	Temperature Water Outlet	Temperat ure Water Inlet	Wet Bulb
1	7/1/23 10:00	26,97	39,96	21,68
2	7/2/23 10:00	26,07	39,17	20,51
3	7/3/23 10:00	26,89	40,00	21,70
4	7/4/23 10:00	26,62	39,89	21,28
5	7/5/23 10:00	26,46	39,70	21,00
6	7/6/23 10:00	26,74	40,04	21,25
7	7/7/23 10:00	26,46	39,51	20,95
8	7/8/23 10:00	26,74	39,79	21,13
9	7/9/23 10:00	26,66	39,70	21,43
10	7/10/23 10:00	26,62	39,90	21,08
11	7/11/23 10:00	26,46	39,44	21,08
12	7/12/23 10:00	26,66	39,71	21,18
13	7/13/23 10:00	25,87	38,91	20,07
14	7/14/23 10:00	26,38	39,44	21,18
15	7/15/23 10:00	26,18	39,14	20,65
16	7/16/23 10:00	26,30	39,36	21,03
17	7/17/23 10:00	26,30	39,34	20,83
18	7/18/23 10:00	26,26	39,27	20,03
19	7/19/23 10:00	25,59	38,59	19,47
20	7/20/23 10:00	24,22	37,36	17,70
21	7/21/23 10:00	25,67	38,81	19,92
22	7/22/23 10:00	25,91	39,04	19,75
23	7/23/23 10:00	26,11	39,17	20,90
24	7/24/23 10:00	26,11	39,09	20,63
25	7/25/23 10:00	26,50	39,41	20,80
26	7/26/23 10:00	25,79	38,70	20,19
27	7/27/23 10:00	25,36	38,36	19,61
28	7/28/23 10:00	26,11	39,14	20,63
29	7/29/23 10:00	26,22	39,22	20,75
30	7/30/23 10:00	25,51	38,53	19,97
31	7/31/23 10:00	25,91	39,02	20,06

Data Tabel 2 menjadi dasar perhitungan nilai *range*, *approach* dan *efektivitas cooling tower* menggunakan persamaan 1, 2 dan 3. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan *Range*, *Approach* dan Efektifitas Aktual *Cooling Tower*

No	Date Time	Range	Approch	Efektivitas Aktual
1	7/1/23 10:00	12,98	5,30	71,03
2	7/2/23 10:00	13,10	5,56	70,21
3	7/3/23 10:00	13,11	5,19	71,62
4	7/4/23 10:00	13,27	5,33	71,33
5	7/5/23 10:00	13,24	5,46	70,80
6	7/6/23 10:00	13,31	5,49	70,81
7	7/7/23 10:00	13,05	5,51	70,32
8	7/8/23 10:00	13,06	5,61	69,94
9	7/9/23 10:00	13,04	5,22	71,40
10	7/10/23 10:00	13,28	5,54	70,56
11	7/11/23 10:00	12,98	5,38	70,69
12	7/12/23 10:00	13,06	5,48	70,43
13	7/13/23 10:00	13,04	5,80	69,20
14	7/14/23 10:00	13,06	5,21	71,50
15	7/15/23 10:00	12,95	5,53	70,07
16	7/16/23 10:00	13,06	5,27	71,25
17	7/17/23 10:00	13,04	5,48	70,42
18	7/18/23 10:00	13,00	6,24	67,58
19	7/19/23 10:00	13,00	6,13	67,97
20	7/20/23 10:00	13,15	6,52	66,86
21	7/21/23 10:00	13,14	5,76	69,54
22	7/22/23 10:00	13,13	6,16	68,08
23	7/23/23 10:00	13,06	5,21	71,51
24	7/24/23 10:00	12,98	5,48	70,32
25	7/25/23 10:00	12,91	5,70	69,38
26	7/26/23 10:00	12,91	5,60	69,75
27	7/27/23 10:00	13,00	5,75	69,34
28	7/28/23 10:00	13,04	5,47	70,44
29	7/29/23 10:00	13,00	5,47	70,37
30	7/30/23 10:00	13,01	5,55	70,11
31	7/31/23 10:00	13,11	5,85	69,15
Total Seluruh		405,07	173,23	2171,98
Nilai Maksimal		13,31	6,52	71,62
Nilai Minimal		12,91	5,19	66,86
Nilai Rata-rata		13,07	5,59	70,06

Data pada Tabel. 3 menunjukkan kinerja perpindahan panas di *cooling tower* terpantau stabil dengan nilai *range* yang konsisten di kisaran 12,91–13,31°C. Hal ini mengindikasikan proses kondensasi berjalan optimal tanpa hambatan signifikan pada sisi uap. Sebaliknya, nilai *approach* menunjukkan fluktuasi yang lebih besar, dengan lonjakan signifikan pada 19–21 Juli (maksimum 6,52°C), yang mencerminkan penurunan efisiensi pendinginan akibat kemungkinan *fouling*, penurunan laju alir air pendingin, atau gangguan sistem *cooling tower*. Pasca 23 Juli, nilai *approach* kembali stabil, menandakan pemulihan performa.

Secara keseluruhan, kinerja *cooling tower* PLTP berada dalam kondisi baik, dengan indikasi gangguan sementara pada sistem pendingin di pertengahan bulan, namun memerlukan perhatian pada sistem pendingin untuk menjaga efisiensi termal. Fenomena tersebut juga menunjukkan hubungan *invers* antara nilai efektivitas dan *approach cooling tower* PLTP selama Juli 2023. Efektivitas berkisar antara 66,86%–71,62%, dengan penurunan signifikan terjadi pada 17–20 Juli, seiring lonjakan nilai *approach*. Hal ini mengindikasikan menurunnya kinerja perpindahan panas akibat degradasi sistem pendingin, seperti *fouling* atau penurunan aliran air. Setelah 21 Juli, efektivitas kembali meningkat dan *approach* menurun, menunjukkan pemulihan performa. Secara umum, *cooling tower* beroperasi dengan baik, namun diperlukan pengawasan ketat pada sistem pendingin untuk menjaga stabilitas efisiensi termal.

Secara umum, nilai efektivitas aktual berkisar antara 66% hingga 72%, dengan mayoritas data berada sedikit di bawah garis desain ($\pm 71\%$), yang direpresentasikan oleh garis linear. Dari nilai tersebut dapat dikatakan bahwa temperatur *approach* merupakan indikator yang lebih menentukan efektivitas *cooling tower*. Dapat kita lihat hubungan nilai efektivitas data aktual dan data design. Nilai efektivitas untuk data design yaitu sebesar 78.00% dan rata-rata untuk nilai efektivitas data aktual yaitu sebesar 70.06%. Terdapat beberapa penurunan signifikan pada pertengahan bulan, terutama antara tanggal 17–21 Juli, mengindikasikan penurunan performa *cooling tower*, kemungkinan akibat gangguan sistem

pendingin atau akumulasi *fouling*. Meskipun terjadi fluktuasi, tren linear menunjukkan penurunan bertahap efektivitas aktual, yang mengindikasikan degradasi kinerja seiring waktu. Kesimpulannya, kinerja *cooling tower* selama Juli 2023 masih berada dalam batas operasional, namun terdapat indikasi penurunan bertahap dibanding nilai desain, sehingga disarankan dilakukan inspeksi dan pembersihan rutin untuk menjaga efisiensi termal.

4.2. Analisis Kinerja Condenser

Condenser kontak langsung (*direct contact condenser*) berperan penting dalam sistem PLTP Ulu Belu, khususnya dalam proses kondensasi uap buang dari turbin menjadi air. Dalam sistem ini, uap buang dari turbin yang masih mengandung energi panas dialirkan ke dalam *condenser* dan secara langsung bersentuhan dengan air pendingin yang berasal dari *cooling tower*. Secara neraca massa, massa total yang masuk ke *condenser* yang terdiri dari uap buang dari turbin dan air pendingin harus sama dengan massa yang keluar dari *condenser*, yaitu dalam bentuk air kondensat dan sejumlah kecil gas *non-condensabel* (NCG) seperti karbon dioksida atau hidrogen sulfida yang tidak ikut terkondensasi. Dari sisi neraca energi, energi panas yang dibawa oleh uap buang dan air pendingin akan diserap oleh air kondensat yang terbentuk. Secara keseluruhan, sistem *condenser* memungkinkan daur ulang air pendingin dalam siklus tertutup, di mana air kondensat dikembalikan ke *cooling tower* untuk didinginkan dan digunakan kembali dalam proses pendinginan berikutnya.

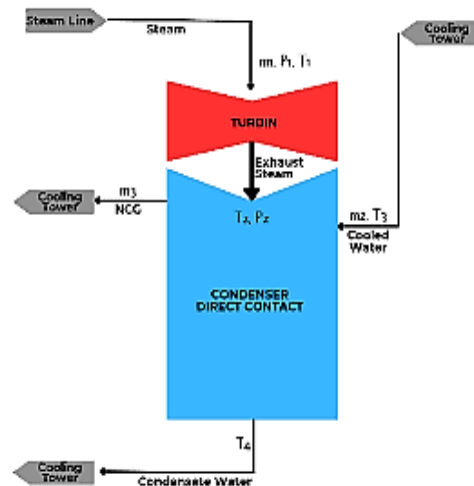
Analisis kinerja *condenser* melibatkan beberapa perhitungan diantaranya perhitungan fraksi uap (x), entalpi isentropis *outlet* turbin (h_{2s}), daya output turbin isentropis (P_s), faktor A , entalpi *outlet* turbin (h_2), daya output aktual (P_a), efektivitas *condenser* ($\epsilon_{condenser}$), dan efisiensi *condenser* ($\eta_{condenser}$). Rumus yang digunakan menggunakan persamaan 4 s.d persamaan 8 [24]. Fraksi uap (x) menunjukkan proporsi uap dalam campuran dua fase (cair dan uap) pada kondisi saturasi.

$$\text{fraksi uap } (x) = \frac{s_1 - s_f}{s_g - s_f}$$

Menghitung entalpi teoretis (ideal) di outlet turbin jika ekspansi berlangsung secara

isentropik (tanpa entropi berubah). Nilai entalpi isentropis *outlet* turbin (h_{2s}):

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



Gambar 7. Neraca Massa dan Energi Condenser

Menentukan daya teoritis yang dihasilkan turbin jika proses ekspansi berlangsung secara isentropik. Nilai daya output turbin isentropis (P_s):

$$P_s = (m_1 - m_3) \times (h_1 - h_{2s})$$

Menghitung total energi panas yang masuk ke sistem (input energi ke turbin). Menentukan *Heat Load* (Q_{in}):

$$Q_{in} = ((m_1 - m_3) \times (h_1 - h_4)) + (m_3 \times c_p \text{ CO}_2 \times (T_4 - T_3)) + (m_7 \times (h_7 - h_4))$$

Mennghitung Jumlah panas yang dibuang ke air pendingin (kondensor) atau mencari *Cooling Water Duty* (Q_{out}):

$$Q_{out} = m_2 \times (h_4 - h_3)$$

Persentase panas yang berhasil dibuang oleh kondensor dibandingkan dengan total panas masuk ke sistem atau menghitung nilai efektivitas *condenser* ($\epsilon_{condenser}$):

$$\epsilon_{cond} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\%$$

Perbandingan antara panas yang diserap air pendingin dengan energi yang dibawa oleh uap

ke kondensor atau menghitung nilai efisiensi condenser ($\eta_{\text{condenser}}$):

$$\eta_{\text{cond}} = \frac{m_2 \times C_p \times (T_4 - T_3)}{m_1(h_1 - h_4)} \times 100\%$$

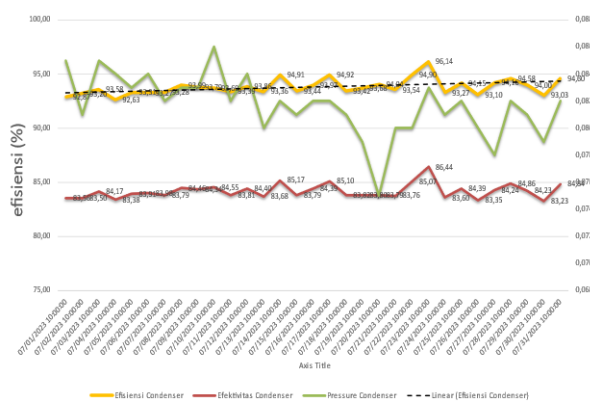
Data aktual kondensor berdasarkan pengamatan dilapangan untuk menghitung efisiensi condencer dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel. 4. Data Aktual Condenser (Sumber DCS)

	Date Time	Main Steam Temperature	Temperature Condenser	Temperature Water Inlet	Temperature Water Outlet	Turbine Inlet Pressure	Pressure Condenser	Temperature Steam Outlet Turbin	Gross	Nett	Wetbulb
1	07/01/2023 10:00:00	160,271	42,054	27,444	40,052	6,213	0,085	36,263	53,613	49,900	21,675
2	07/02/2023 10:00:00	160,921	41,183	26,538	39,143	6,175	0,081	36,066	53,827	50,255	20,508
3	07/03/2023 10:00:00	161,345	42,133	27,484	40,120	6,178	0,085	36,616	53,270	49,380	21,700
4	07/04/2023 10:00:00	161,564	41,935	27,287	39,961	6,252	0,084	37,157	54,117	50,183	21,283
5	07/05/2023 10:00:00	162,084	41,737	27,050	39,790	6,245	0,083	37,674	54,025	50,098	21,000
6	07/06/2023 10:00:00	162,187	42,014	27,287	40,040	6,270	0,084	37,541	54,117	50,332	21,250
7	07/07/2023 10:00:00	161,229	41,460	26,853	39,564	6,220	0,082	36,184	54,079	50,122	20,950
8	07/08/2023 10:00:00	160,579	41,777	27,287	39,955	6,167	0,083	36,223	53,377	49,818	21,125
9	07/09/2023 10:00:00	161,072	41,856	27,326	40,016	6,191	0,083	36,514	53,468	49,668	21,433
10	07/10/2023 10:00:00	162,891	42,489	27,602	40,468	6,299	0,086	37,933	54,208	50,219	21,075
11	07/11/2023 10:00:00	161,140	41,500	27,090	39,662	6,167	0,082	36,592	53,400	49,982	21,075
12	07/12/2023 10:00:00	160,271	41,896	27,365	40,052	6,189	0,084	35,988	53,430	49,457	21,175
13	07/13/2023 10:00:00	161,373	41,065	26,459	39,137	6,188	0,080	36,506	53,926	50,021	20,067
14	07/14/2023 10:00:00	161,852	41,460	26,814	39,613	6,163	0,082	36,804	53,613	50,020	21,175
15	07/15/2023 10:00:00	160,784	41,262	26,735	39,375	6,170	0,081	35,423	53,804	48,735	20,650
16	07/16/2023 10:00:00	162,481	41,579	27,011	39,717	6,201	0,082	37,541	53,766	49,815	21,033
17	07/17/2023 10:00:00	160,880	41,460	26,893	39,595	6,150	0,082	36,451	53,300	49,794	20,825
18	07/18/2023 10:00:00	161,092	41,302	26,775	39,442	6,211	0,081	36,145	53,804	49,434	20,025
19	07/19/2023 10:00:00	160,730	40,788	26,223	38,856	6,151	0,079	35,651	53,804	49,288	19,467
20	07/20/2023 10:00:00	161,428	39,799	24,884	37,678	6,198	0,075	35,313	54,735	50,291	17,700
21	07/21/2023 10:00:00	161,906	40,906	26,184	38,899	6,209	0,080	36,726	54,185	49,778	19,917
22	07/22/2023 10:00:00	161,900	41,223	26,381	39,235	6,201	0,080	36,585	53,987	49,935	19,750
23	07/23/2023 10:00:00	162,529	41,777	26,735	39,821	6,265	0,083	37,345	53,957	50,261	20,900
24	07/24/2023 10:00:00	162,392	41,223	26,696	39,296	6,177	0,081	37,949	53,789	49,894	20,625
25	07/25/2023 10:00:00	159,812	41,421	26,971	39,564	6,127	0,082	35,108	52,988	49,366	20,800
26	07/26/2023 10:00:00	161,838	40,906	26,302	38,929	6,187	0,080	37,000	53,926	50,271	20,192
27	07/27/2023 10:00:00	160,818	40,669	25,908	38,704	6,198	0,078	35,399	54,384	50,675	19,608
28	07/28/2023 10:00:00	161,345	41,381	26,578	39,412	6,210	0,082	35,949	53,987	49,791	20,633
29	07/29/2023 10:00:00	161,612	41,262	26,814	39,424	6,140	0,081	36,663	53,362	49,645	20,750
30	07/30/2023 10:00:00	162,207	40,709	26,223	38,807	6,188	0,079	36,914	54,117	50,212	19,967
31	07/31/2023 10:00:00	161,503	41,421	26,656	39,430	6,250	0,082	36,341	53,896	50,263	20,058

Parameter termal dan operasional turbin uap dan sistem kondensasi diamati selama periode satu bulan. Data yang tercatat meliputi temperatur uap utama, temperatur kondensor, temperatur air masuk dan keluar, tekanan masuk turbin, tekanan *condenser*, temperatur uap keluar turbin, *output* daya turbin (*gross* dan *nett*), suhu wetbulb.

Semua variabel saling terkait dalam keseimbangan termodinamika. Variabel suhu dan tekanan menentukan kerja turbin, sementara parameter pendingin (temperatur air dan *wetbulb*) menentukan efektivitas *condenser* dan *cooling tower*. Dengan data ini, analisis mendalam terhadap penurunan efisiensi, pengaruh suhu lingkungan terhadap performa sistem, serta potensi *fouling* atau hambatan pada *cooling tower* dapat dilakukan secara komprehensif.

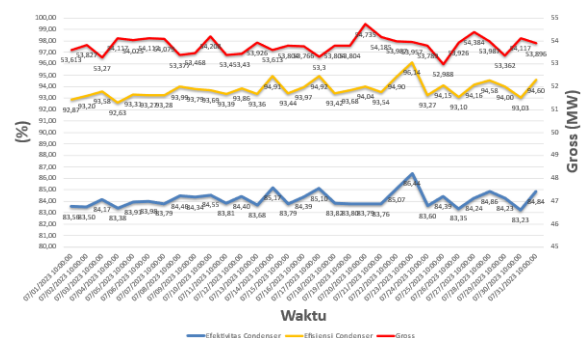


Gambar 8. Grafik Perhitungan Efektivitas terhadap Efisiensi Condenser

Gambar 8. menyajikan hasil analisis efektivitas dan efisiensi *condenser* selama Juli 2023. Efisiensi tertinggi tercatat sebesar 96,13% pada 23 Juli, dan terendah 92,62% pada 4 Juli, dengan rata-rata 93,80%. Sementara itu, efektivitas berkisar antara 83,23% hingga 86,44%, dengan rata-rata 84,17%. Efisiensi tertinggi dicapai saat suhu air pendingin rendah dan performa kondensor optimal, ditandai oleh selisih temperatur kecil (1,9°C) antara uap buang dan kondensat. Selain itu, rendahnya laju aliran massa uap turut meningkatkan efisiensi kondensasi. Sebaliknya, efisiensi terendah disebabkan oleh peningkatan beban kerja kondensor, yang menurunkan performa kondensasi.

Nilai efisiensi dan efektivitas *condenser* berubah seiring waktu dan memiliki

hubungan linier, peningkatan efektivitas diikuti oleh peningkatan efisiensi, dan sebaliknya ditunjukkan pada Gambar 9. Hal ini menunjukkan keterkaitan langsung antara kemampuan *condenser* dalam mengondensasikan uap dan kinerja pendinginan. Ketika daya output turbin meningkat, efisiensi dan efektivitas *condenser* cenderung menurun akibat beban panas yang lebih tinggi. Penurunan ini juga dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti kualitas uap masuk, temperatur uap, laju aliran massa uap, suhu *condenser*, dan tekanan vakum.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Efektivitas, Efisiensi dan Daya Generator

4.3. Analisis Kinerja Turbin

4.3.1. Efisiensi Turbin sesuai Design

Data spesifikasi yang digunakan untuk menentukan efisiensi turbin berdasarkan data spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Komisioning Efisiensi Turbin

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Main steam flow	367,71	ton/h
2	Pressure turbin	7,6	bara
3	Temperature inlet turbin	168	°C
4	Daya terukur (<i>gross</i>)	58,805	MW
5	Main steam flow to ejektor	10,45	ton/h
6	Tekanan Condenser	0,08	bara
7	Temperature steam Condenser	30,8	°C

Nilai entalpi dan entropi dapat dicari dengan menggunakan aplikasi *ChemicaLogic SteamTab Companion*. Data yang diinputkan bisa berupa tekanan atau temperatur. Setelah diinputkan diperoleh nilai entalpi dan entropi yang ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 6. Data Entalpi dan Entropi

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Entalpi masuk turbin	2766,19	(kJ/kg)
2	Entropi uap masuk turbin	6,6791	(kJ/kg°C)
3	Entalpi uap keluar turbin	2576,21	(kJ/kg)
4	Entropi uap masuk <i>Condenser</i>	8,22732	(kJ/kg°C)
5	Entalpi liquid keluar turbin	173,84	(kJ/kg)
6	Entropi liquid masuk <i>Condenser</i>	0,59249	(kJ/kg°C)

Dari data entalpi dan entropi tersebut dapat dicari kualitas uap, entalpi ideal keluar turbin, dan daya isentropis turbin dengan menghitung variable berikut:

Menentukan nilai fraksi uap (x):

$$x = \frac{S_1 - S_f}{S_g - S_f}$$

$$x = \frac{6,6791 - 0,59249}{8,22732 - 0,59249} = 0,797216$$

Menentukan nilai entalpi isentropis outlet turbin (h_{2s}):

$$h_{2s} = hf + (x \times (hg - hf))$$

$$h_{2s} = 173,84 + 0,797216 (2576,21 - 173,84)$$

$$h_{2s} = 2089,04$$

Menentukan nilai daya output turbin isentropis (P_s):

$$W_i = (m_1 - m_2) (h_1 - h_{2s})$$

Dimana m_1 merupakan *main steam flow* yang masuk turbin dan m_2 merupakan *main steam flow to ejector*. Sehingga W_i dapat diperoleh sebagai berikut:

$$W_i = (102,142 - 2,9028) (2766,19 - 2089,048)$$

$$W_i = 67,199 \text{ MW}$$

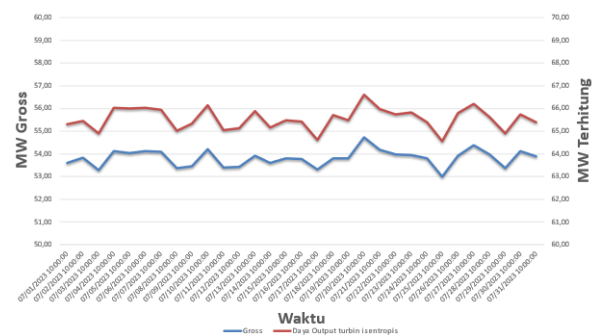
Efisiensi isentropis turbin dapat dicari dengan membagi daya aktual atau daya terukur dengan daya ideal atau daya isentropis. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta_t = W_a / W_i \times 100\% \quad \eta_t = 58,805 / 67,199 \times 100\%$$

$$\eta_t = 87,51\%$$

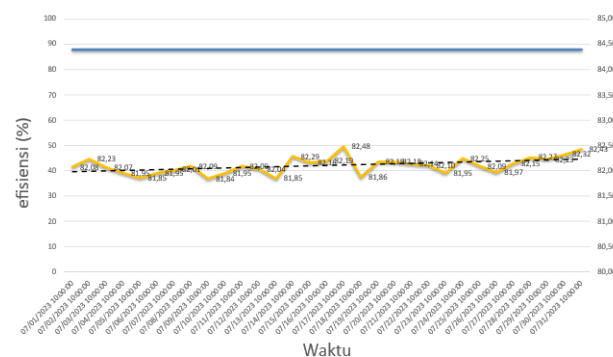
4.3.2. Efisiensi Turbin Aktual

Menentukan nilai efisiensi isentropik turbin uap dilakukan dengan menggunakan parameter data operasi turbin aktual. Data yang digunakan yaitu tekanan *chamber* (P1), suhu inlet (T1), tekanan *outlet* turbin/tekanan kondenser (P2), suhu *outlet condenser* (T2), dan laju aliran massa ($\dot{m}$). Nilai entalpi dan entropi dapat dicari dengan menggunakan aplikasi *ChemicaLogic SteamTab Companion*.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Daya Gross Generator dengan Daya Turbin

Gambar 10. menunjukkan daya aktual turbin terukur dan daya aktual turbin hasil perhitungan memiliki nilai yang berbeda. Daya aktual turbin terukur berada di interval 64,55 MW s.d 66,61 MW, sedangkan daya aktual turbin hasil perhitungan berada di interval 52,99 MW s.d 54,74 MW. Efisiensi turbin berdasarkan data spesifikasi yaitu 87,51% sedangkan berdasarkan data saat ini efisiensi turbin berada diantara rentang 81,84% hingga 82,48% dengan daya aktual hasil perhitungan berada di interval 52,99 MW s.d 54,74 MW.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Efisiensi Design dengan Aktual

Gambar 11. menunjukan performa turbin uap mengalami penurunan sebesar 5,52% hingga

6,16% berdasarkan daya aktual hasil perhitungan. Namun, mengalami penurunan sebesar 0,94% pertahun. Perbedaan antara efisiensi berdasarkan daya aktual hasil perhitungan dengan efisiensi berdasarkan daya aktual terukur bisa disebabkan karena kurang akuratnya alat ukur yang ada. Penurunan efisiensi turbin berdasarkan data spesifikasi dengan data saat ini, bisa diakibatkan karena beberapa faktor, seperti kurangnya pemeliharaan rutin sejak awal atau kondisi operasional yang berubah dari saat pertama kali dioperasikan. Selain itu, kemungkinan adanya kotoran atau endapan pada komponen turbin yang berkontribusi terhadap penurunan efisiensi. Untuk mengatasi permasalahan ini, perlu dilakukan pemeriksaan secara menyeluruh, pemeliharaan teratur, dan pengkalibrasian ulang alat ukur.

Untuk meningkatkan efisiensi turbin uap, kerugian aerodinamika dan kebocoran uap dalam lintasan uap di turbin harus dikurangi seminimal mungkin, baik pada komponen yang berputar (*rotor, shaft*) maupun yang diam (*stationary*). Daya yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga uap sangat tergantung pada penurunan entalpi dan laju aliran uap, yang merupakan parameter utama untuk menentukan beban suatu pembangkit. Dengan mengoptimalkan kedua faktor ini, efisiensi keseluruhan turbin uap dapat ditingkatkan, sehingga pembangkit listrik dapat beroperasi dengan lebih efisien dan produktif [25].

KESIMPULAN

- a. Rata-rata efektivitas aktual *cooling tower* sebesar 70,06%, lebih rendah dari efektivitas desain sebesar 78%. Nilai range menunjukkan kinerja perpindahan panas yang stabil (12,91–13,31°C), sedangkan nilai *approach* menunjukkan fluktuasi dengan puncak gangguan pada 19–21 Juli. Gangguan ini diduga berasal dari *fouling* dan penurunan laju aliran pendingin. Secara umum, sistem *cooling tower* masih bekerja baik dalam batas efisiensi, namun memerlukan pemeliharaan rutin.
- b. *Condenser* menunjukkan rata-rata efisiensi termal sebesar 93,80%, dengan variasi efektivitas antara 83,23% hingga 86,44%. Efisiensi menurun saat beban panas tinggi, namun menunjukkan hubungan linear

dengan efektivitas. Performa *condenser* masih dalam batas optimal operasional.

- c. Efisiensi turbin berdasarkan *design* sebesar 87,51%, sementara efisiensi aktualnya turun ke kisaran 81,84% hingga 82,48%. Penurunan ini mengindikasikan degradasi kinerja sekitar 0,94% per tahun, sehingga diperlukan pemeliharaan rutin dan pengurangan kebocoran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Management Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Unit 3 PT Pertamina Geothermal Energy Tbk Area Ulubelu yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amstead, H. dan Christopher, H. (2019). *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contribution to the Energy Needs of Man*. New York: E. & F.N Spon.
- [2] Santoso, D. (2018). *Eksplorasi Energi Geothermal*. Bandung: ITB.
- [3] Clinton, S. (2020). *Analisa Efisiensi Termal Turbin, Kondensor dan Menara Pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi: Politeknik Energi dan Mineral Akamigas*.
- [4] Sidiq, A., N dan Anwar, M. (2021). *Perbandingan Efisiensi Turbin Uap Kondisi Aktual Berbasis Data Komisioning Sesuai Standart ASME PTC 6*. KILAT. Vol. 10, No.1.
- [5] Linda., Arman, Y. dan Malino, M.B. (2018). *Aplikasi Interpolasi Lagrange untuk Menentukan Efisiensi Turbin PLTU*. PRISMA FISIKA, Vol. IV, No. 01.
- [6] Suharmanto, P., Fitria, A. N., & Ghaliyah, S. (2018). *Indonesian Geothermal Energy Potential as Source of Alternative Energy Power Plant*. KnE Energy, 1(1), 121.
- [7] Saptadji, N. M. (2019). *Diktat Kuliah Teknik Eksploitasi Panasbumi*. Bandung: Departemen Teknik Perminyakan ITB.
- [8] *Design Proses Heat Mass Balance unit 3 & 4 PLTP Ulubelu tahun 2015*.
- [9] Dickson, M.H. dan Fanelli, M. (2019). *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. India: John Willey & Sons.
- [10] Front Matter. (2021). In *Thermodynamic Analysis and Optimization of Geothermal Power Plants* (pp. i–ii). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821037-6.09991-1>

- [11] Shlyakhin, P. (2018). Turbin Uap. Jakarta: Erlangga.
- [12] Mandyvo, P. (2020). Analisa Performa Pembangkit Listrik Akibat Konsumsi Rumah Tangga di PKS PTPN IV Kebun Adolina. PISTON, Vol. 4, No. 2.
- [13] Hidayat, A. F. (2019). Analisis Efektivitas Condenser Direct Contact Unit 3 Pt Indonesia Power (Upjp) Kamojang.
- [14] Adiarte, G. G. (2019). Analisis Pemodelan Sistem Pengendalian Level Air Condenser Dan Optimalisasi Performance Melalui Auto Tuning Pid Controller Di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Pltp) Unit 5.
- [15] Ahyadi, H., & Prakoso, A. K. A. (2020). Analisis Perubahan Sudut Blade Fan Cooling Tower Terhadap Performance Cooling Tower Unit 3 Di Pt.X. Bina Teknika, 15(2), 109. <https://doi.org/10.54378/bt.v15i2.1247>
- [16] Zulfikar, Z. (2019). Penambahan Water Coolant Pada Cooling Tower Tipe Counter Flow. J. Mesin Nusantara, 86-90
- [17] Muhsin, A., & Pratama, Z. (2018). Analisis Efektivitas Mesin Cooling Tower Menggunakan Range dan Approach. Jurnal Optimasi Sitem Industri, 120- 121.Neny, M.S. (2018). Teknik Geotermal: Institut Teknologi Bandung.
- [18] Azis, A. (2010). Studi Pengaturan Kecepatan Motor Hotwell Pump (HWP) Terhadap Eefisiensi Penggunaan Daya Listrik PT PLN (PERSERO) PLTP Ulubelu. 1(1).
- [19] Nuryadi., Astuti, T.D., Utami, E.S. dan Budiantara, M. (2018). Dasar-Dasar Statistik Penelitian. Yogyakarta: Sibuku Media.
- [20] Rahman, M. A. (2022). Cooling Tower Performance Analysis Using Range And Approach Methods. Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Lambung Mangkurat, 134-135.
- [21] Muhsin, A., & Pratama, Z. (2018). Analisis Efektivitas Mesin Cooling Tower Menggunakan Range dan Approach. Jurnal Optimasi Sitem Industri, 120- 121.Neny, M.S. (2018). Teknik Geotermal: Institut Teknologi Bandung.
- [22] Suarnadwipa, I. (2017). Pengaruh Suhu Terhadap Perpindahan Panas Pada Material Yang Berbeda. Pogram Studi Fisika, Fakultas Sains. Universitas.
- [23] Linda, Arman, Y. dan Malino, M.B. (2018). Aplikasi Interpolasi Lagrange untuk Menentukan Efisiensi Turbin PLTU. PRISMA FISIKA, Vol. IV, No. 01. Sains Universitas.
- [24] Sinaga, H. P. I., Utomo, C. T., & Tarigan, E. (2022). Analisis Performance Turbin Uap Kapasitas 1.95 MW di PT Perkebunan
- Lembah Bhakti Astra Agro Lestari Tbk. 03(01), 23–22.
- [25] Karakurt, A., S and Gunes, M. (2018). Performance Analysis of a System Turbine Power Plant at Part Load Conditions. Journal of Thermal Engineering, Vol.3 No.2, 1121-1128.