



UNJUK KERJA TURBIN UAP *JIENENG* DENGAN DAYA 15 MW DI PLTU *GROWTH ASIA*

James Stephen Ezekiel Manullang^{a*}, Dikki Lumbantobing^b

^aProgram Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

^bPT. Global Inovasi Prima (PLTU KIM 3) Jl. Pulau Tidore Kav. B-5, Kawasan Industri Medan, Medan, Sumatera Utara 20525, Indonesia

*Corresponding authors at: jamesezekiel@students.polmed.ac.id (J.S.E.Manullang) Tel: +62-857-676-07346

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 18 Mei 2023

Direvisi pada 27 Juni 2023

Disetujui pada 19 Juli 2023

Tersedia daring pada 15 Agustus 2023

Kata kunci: Turbin uap, daya, efisiensi, performansi, energi terbarukan

Keywords:

Steam Turbine, power, efficiency, performance, renewable energy

ABSTRAK

Turbin uap adalah mesin yang mengekstrak energi panas dari uap bertekanan dan menggunakannya untuk melakukan kerja mekanis pada poros keluaran yang berputar, sumber panas dapat bersumber dari energi terbarukan. Karena turbin menghasilkan gerakan putar, turbin sangat cocok digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Turbin uap terdiri dari sebuah cakram yang dikelilingi sudu-sudu. Daya yang dihasilkan turbin dipengaruhi oleh laju aliran massa uap dan entalpi. Untuk memperbesar daya yang dihasilkan turbin uap dapat dilakukan dengan memperbesar tekanan uap masuk turbin. Perhitungan daya dan efisiensi turbin dalam hal ini sangat diperlukan untuk mengetahui penurunan performa kinerja turbin sebagai dasar perbaikan atau bahan dasar pertimbangan dalam pengoperasian turbin sehingga turbin dapat berkerja secara maksimal. Metode yang digunakan adalah studi literatur. Dengan parameter tekanan uap masuk turbin 3,35 MPa dan temperatur uap masuk 380°C berdasarkan data spesifikasi turbin uap kapasitas 15 MW dihasilkan efisiensi total turbin uap 76,56%; efisiensi isentropik sebesar 57,29%; daya aktual 11,27 MW; daya isentropik 19,59 MW sedangkan berdasarkan data operasional dengan parameter tekanan uap masuk 3,38 MPa serta temperatur uap masuk 398,5°C dihasilkan efisiensi total turbin uap 42,87%; efisiensi isentropik sebesar 59,65%; daya aktual 11,13 MW; daya isentropik 18,66 MW.

ABSTRACT

A steam turbine is a machine that extracts thermal energy from pressurized steam and uses it to perform mechanical work on a rotating output shaft, the heat source can be sourced from renewable energy. Because the turbine produces rotary motion, the turbine is very suitable for driving an electric generator. The steam turbine consists of a disk surrounded by blades. The power generated by the turbine is affected by the mass flow rate of steam and enthalpy. To enlarge the power generated by the steam turbine can be done by enlarging the pressure of the incoming steam of the turbine. The calculation of turbine power and efficiency in this case is very necessary to determine the decrease in turbine performance performance as a basis for improvement or the basic material for consideration in turbine operation so that the turbine can work optimally. The method used is the study of literature. With a turbine inlet steam pressure parameter of 3.35 MPa and an inlet steam temperature of 380°C based on steam turbine specification data of 15 MW capacity, the total efficiency of the steam turbine is 76.56%; isentropic efficiency of 57.29%; actual power 11.27 MW; isentropic power of 19.59 MW while based on operational data with a vapor inlet pressure parameter of 3.38 MPa and an inlet steam temperature of 398.5 °C resulted in a total efficiency of 42.87% steam turbine; isentropic efficiency of 59.65%; actual power 11.13 MW; isentropic power of 18.66 MW.

1. PENGANTAR

Energi adalah sesuatu yang bersifat abstrak yang sukar dibuktikan namun dapat dirasakan adanya. Energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja dan segala sesuatu yang dilakukan memerlukan energi. Hukum Termodinamika pertama bahwa energi bersifat kekal. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, tetapi dapat dikonversikan dari satu bentuk energi ke bentuk energi lain (Michael A Boles dan Yunus A Cengel, 2002; M.M. El-Wakil, 1992). Kebutuhan terhadap energi merupakan hal mendasar yang dibutuhkan dalam usaha meningkatkan taraf hidup masyarakat. Seiring dengan meningkatnya taraf hidup serta kuantitas dari masyarakat, maka semakin meningkat juga kebutuhan energi. Pada saat ini kebutuhan energi berhubungan langsung dengan tingkat kehidupan masyarakat serta kemajuan industri di suatu negara. Dalam hal ini, energi listrik yang menjadi salah satu bentuk energi yang paling banyak digunakan oleh masyarakat dalam kehidupan, karena energi listrik dapat dengan mudah dan efisien diubah ke bentuk energi yang lainnya. Untuk membangkitkan energi listrik digunakanlah mesin-mesin konversi energi misalnya mesin fluida yang mengubah energi fluida menjadi energi listrik. Turbin merupakan sebuah alat yang salah satunya digunakan untuk membangkitkan suatu energi. Di Indonesia telah tersebar berbagai macam turbin, mulai dari turbin gas, turbin air dan turbin uap. Turbin sangat membantu dalam kehidupan sehari-hari kita, salah satunya untuk memenuhi kebutuhan kita yang tidak lepas dari sebuah alat, yaitu listrik. Berdasarkan jenis energi yang dikonversikan menjadi tenaga listrik, maka pembangkit energi listrik dibagi menjadi beberapa jenis, antara lain: Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), PLTP Pembangkit Listrik Tenaga Panas (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Selain itu, ada juga gabungan dari dua jenis pembangkit PLTG dan PLTU yang biasa dikenal dengan nama Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015). PLTU merupakan salah satu pembangkit yang menggunakan energi termal untuk membangkitkan listrik. Pembangkit listrik tenaga uap mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin yang digerakkan oleh energi kinetik dari uap panas yang dihasilkan oleh proses pembakaran pada ketel uap (boiler) (Hendrico Petrus Immanuel dkk., 2022; Riyki Apriandi dan Aqli Mursadin, 2016).

1.1 Pengertian Turbin Uap

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung pada jenis mekanisme yang digerakkan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik, dan untuk transportasi. Pengubahan energi potensial uap menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara. Pada dasarnya turbin uap terdiri dari sudu (*nozzle*) yang digunakan untuk memutar generator melalui bantuan uap kering yang masuk dari ketel uap yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian di tambah komponen lainnya yang meliputi pendukungnya seperti bantalan, kopling dan sistem bantu lainnya agar kerja turbin dapat lebih baik (Erna Rahayu Eko Wiriani, 2019). Turbin uap ditunjukkan pada gambar 1 memanfaatkan energi kinetik dari fluida kerjanya yang bertambah akibat penambahan energi termal. Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengkonversi energi panas yang terkandung oleh uap menjadi energi putar (energi mekanis). Poros turbin yang dikopel dengan poros generator sehingga ketika turbin berputar generator juga ikut berputar. Turbin secara umum diklasifikasikan kedalam tiga jenis yaitu: turbin impuls, turbin reaksi dan turbin gabungan (impuls reaksi), yang tergantung pada cara perolehan perubahan energi potensial menjadi energi kinetik semburan uap (Nurul Wahidah dkk., 2019; Sagita Firza Nur dan I Gede Eka Lesmana, 2021).



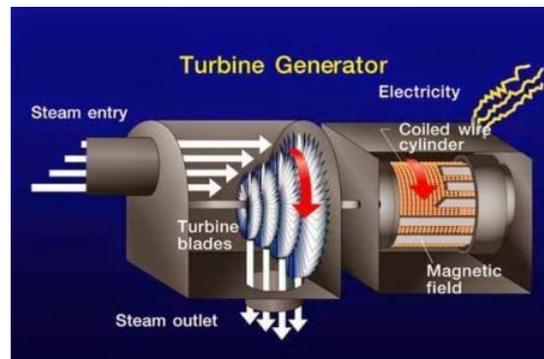
Gambar 1: Turbin uap PT. Global Inovasi Prima (PLTU KIM 3 cabang Growth Asia) Kota Medan

1.2 Prinsip Kerja Turbin Uap

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung kepada jenis mekanisme yang digerakkan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik, dan untuk transportasi. Untuk mengubah energi potensial uap menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara, sehingga turbin uap secara umum terdiri dari tiga

jenis utama, yaitu: turbin uap impuls, reaksi, dan gabungan (impuls-reaksi). Selama proses ekspansi uap di dalam turbin juga terjadi beberapa kerugian utama yang dikelompokkan menjadi dua jenis kerugian utama, yaitu kerugian dalam dan kerugian luar. Hal ini akan menyebabkan terjadinya kehilangan energi, penurunan kecepatan dan penurunan tekanan dari uap tersebut yang pada akhirnya akan mengurangi efisiensi siklus dan penurunan daya generator yang akan dihasilkan oleh generator listrik.

Prinsip kerja dari turbin uap yaitu uap masuk ke dalam turbin melalui *nozel*. *Nozel* tersebut berfungsi mengubah energi panas dari uap menjadi energi kinetis. Tekanan uap pada saat keluar dari *nozel* lebih kecil dari pada saat masuk ke dalam *nozel*, akan tetapi sebaliknya kecepatan uap keluar *nozel* lebih besar dari pada saat masuk ke dalam *nozel*. Uap yang memancar keluar dari *nozel* diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkungan yang dipasang disekeliling rotor turbin. Uap yang mengalir melalui celah antara sudu turbin itu dibelokkan mengikuti arah lengkungan dari sudu turbin (Ahmad Yusron & Danang Dwi Saputro, 2018). Perubahan kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong dan kemudian memutar poros turbin yang menghasilkan energi mekanik pada gambar 2 (Linda dkk., 2016).



Gambar 2: Sistem Kerja Turbin Uap

1.3 Kerugian Energi pada Turbin Uap

Kerugian energi pada turbin adalah pertambahan energi kalor yang dibutuhkan untuk melakukan kerja mekanis pada praktek aktual dibandingkan dengan nilai teoritis yang proses ekspansinya terjadi benar-benar sesuai dengan proses adiabatik. Pada suatu tingkat turbin, jumlah penurunan kalor yang benar-benar dikonversi menjadi kerja mekanis pada poros turbin adalah lebih kecil daripada nilai-nilai yang dihitung untuk tingkat turbin yang ideal. Semua kerugian energi yang timbul pada turbin uap ketika beroperasi adalah (Sinan Karakurt dan Ümit Güneş 2017):

- a. Kerugian-kerugian dalam (*Internal losses*)
Kerugian *internal* adalah kerugian energi panas pada saat uap mengalir masuk ke dalam turbin, yang termasuk dalam kerugian ini antara lain: kerugian pada katup pengatur uap masuk *nozel*, kerugian pada *nozel* atau sudu pengarah, kerugian pada sudu gerak turbin, kerugian kecepatan uap keluar *nozel*, kerugian akibat kebasahan uap dan kerugian pada pipa buang.
- b. Kerugian-kerugian luar (*external losses*)
Kerugian mekanis disebabkan oleh energi yang digunakan untuk mengatasi tahanan yang diberikan oleh bantalan luncur dan dorong termasuk bantalan luncur generator atau mesin yang dihubungkan dengan poros turbin. Untuk tujuan perancangan, kerugian mekanis, generator dan turbin dapat ditentukan dengan mempergunakan grafik efisiensi mekanis turbin. Kerugian *external* adalah kerugian yang tidak mempengaruhi kondisi uap, yang termasuk dalam kerugian ini adalah: kerugian gesekan (kerugian mekanis), kerugian ventilasi, kerugian akibat kebocoran uap pada perapat labirin.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Spesifikasi Turbin uap pada PT. Global Inovasi Prima

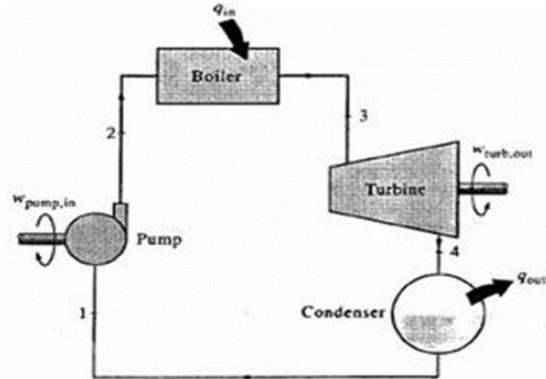
Data spesifikasi turbin uap pada PT. Global Inovasi Prima dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1: Spesifikasi Turbin Jieneng pada Global Inovasi Prima

Deskripsi	Spesifikasi
<i>Model</i>	N15-3,53
<i>Merk</i>	JIENENG
<i>Rated-power</i>	15 MW
<i>Inlet pressure</i>	3,53 Mpa
<i>Exhaust pressure</i>	0,011 Mpa
<i>Delivery</i>	KD 26-24
<i>Rated-speed</i>	3000 rpm
<i>Inlet temperature</i>	380°C
<i>Cooling water temp</i>	33°C ; 35°C (max)
<i>Rated inlet flow</i>	76 ton/jam

2.2 Proses Termodinamika Turbin Uap

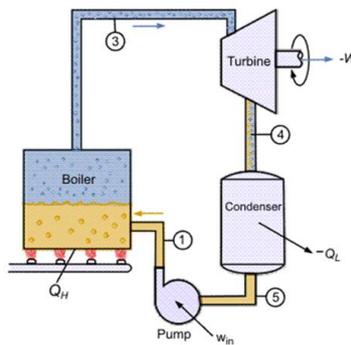
Siklus pada turbin uap adalah siklus *rankine* yang terdiri dari dua jenis siklus yaitu *superheated vapor*. Diagram alir siklus rankine dapat dilihat gambar 3 (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015).



Gambar 3: Siklus rankine sederhana

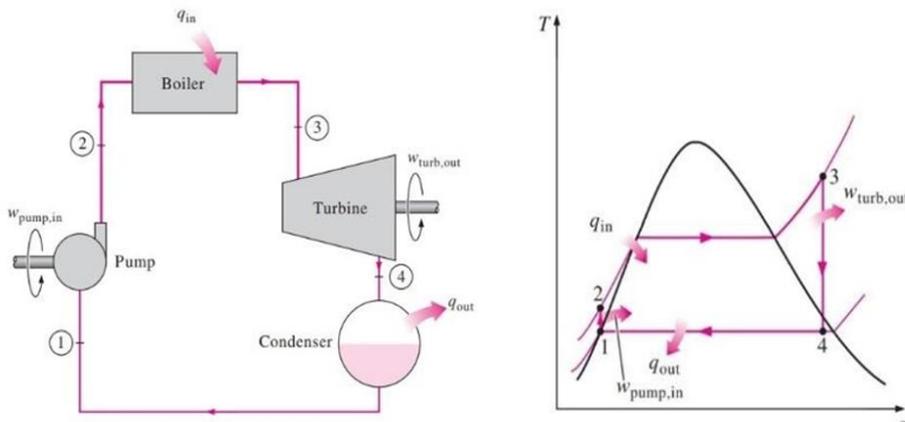
2.2.1 Siklus Rankine

Siklus yang digunakan pada sistem fluida uap yang efektif ialah siklus *rankine*. Siklus *rankine* merupakan siklus yang paling banyak digunakan untuk pembangkit daya listrik sekarang ini. Oleh karena siklus rankine merupakan siklus uap cair maka siklus ini digambarkan dalam diagram T-S dengan garis yang menunjukkan uap jenuh dan cair jenuh. Fluida kerjanya ialah H₂O (air) dan siklus ideal yang terjadi di PLTU adalah siklus *rankine*. Cara kerja siklus *rankine* adalah air pada siklus 1 dipompakan dimana kondisinya ialah isentropik ($S_1=S_2$) masuk ketel uap dengan tekanan yang sama dengan tekanan di kondensor tetapi di ketel uap menyerap panas namun kondensor melepaskan panas, kemudian dari ketel uap masuk ke turbin dengan kondisi super panas ($S_3=S_4$) dan keluaran dari turbin berbentuk uap basah dimana laju aliran massa yang masuk ke turbin sama dengan laju massa keluar dari turbin seperti pada gambar 4 (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015; M.M. El-Wakil, 1992).



Gambar 4: Diagram alur siklus rankine

Siklus *rankine* merupakan siklus ideal untuk sistem pusat listrik tenaga uap. Gambar 5 (a) dan (b) menunjukkan diagram untuk proses-proses yang terjadi pada siklus *rankine* ideal sederhana untuk teknologi *subcritical boiler* (Boles, M. A., dan Cengel Y. A., 2014).



a) (b)
Gambar 5: (a) Diagram alir siklus *Rankine* Sederhana (b) Diagram T-s siklus *Rankine* Sederhana

- 1.– 2 Kompresi isentropis pada pompa
 2.– 3 Penambahan kalor pada tekanan konstan di boiler
 3.– 4 Ekspansi isentropis pada turbin
 4 – 1 Pelepasan kalor pada tekanan konstan pada kondensor

Selanjutnya, siklus *Rankine* sederhana dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan 1 yang dikemukakan yaitu (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$(q_{in} - q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) = h_e - h_i \quad (1)$$

Persamaan 1 merupakan penyederhanaan dari *steady-flow energy equation* persatuan *massa* dengan menganggap bahwa perubahan energi kinetik dan potensial dari uap sangat kecil dan dapat diabaikan. Pada kondisi 1, air masuk ke pompa sebagai cairan jenuh yang kemudian dikompresi secara isentropis hingga tekanannya naik menjadi tekanan kerja boiler. Penambahan tekanan tersebut menyebabkan volume spesifik dan temperatur air naik, seperti ditunjukkan pada diagram T-s persamaan 2 dan 3 (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$W_{pump,in} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

$$W_{pump,in} = V(P_2 - P_1) \quad (3)$$

Pada kondisi 2, air masuk ke boiler masih dalam kondisi cair jenuh. Boiler merupakan tempat berpindahnya kalor dari reaksi pembakaran *boiler* ke air, dimana air akan berubah fasanya dari kondisi cair jenuh menjadi *superheated vapor* (uap jenuh). Kalor tersebut berasal dari reaksi pembakaran bahan bakar yang biasanya berupa batubara, gas, minyak, atau *biomassa* pada persamaan 4 (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$q_{in} = h_3 - h_2 \text{ (ketel uap)} \quad (4)$$

Pada kondisi 3, air keluar dari boiler dan menuju ke turbin dalam kondisi *superheated*. Pada turbin, uap akan berekspansi secara isentropis dan menabrak sudu-sudu turbin hingga berputar sehingga menghasilkan kerja. Kerja tersebut dapat digunakan untuk membangkitkan listrik dengan menghubungkannya dengan generator. Ketika berekspansi dan memutar turbin, tekanan uap akan turun dan kondisi uap berubah dari uap jenuh menjadi fasa campuran (dengan kualitas yang masih cukup tinggi) persamaan 5 (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$W_{turbine,out} = h_3 - h_4 \text{ (turbin)} \quad (5)$$

Pada kondisi 4, uap masuk ke kondensor. Pada kondensor, terjadi pelepasan kalor dari uap menuju ke media pendingin pada tekanan konstan. Pelepasan panas tersebut menyebabkan fasa uap berubah menjadi air dengan kondisi cair jenuh. Air tersebut kemudian akan masuk kembali ke pompa pada kondisi 1 dan melengkapi siklus persamaan 6 (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$q_{out} = h_4 - h_1 \text{ (kondensor)} \quad (6)$$

Pada diagram T-s, kurva kondisi 2 – 3 merupakan daerah penambahan kalor ke air pada boiler dan kurva kondisi titik 4 – 1 merupakan daerah pelepasan kalor pada kondensor. Selisih antara keduanya (daerah yang dilingkupi kurva siklus) merupakan kerja bersih atau *netto* yang dihasilkan dari siklus. Efisiensi *thermal* siklus *Rankine* pada persamaan 7 dan 8 adalah (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \quad (7)$$

$$W_{net} = q_{in} - q_{out} = W_{turbine,out} - W_{pump,in} \quad (8)$$

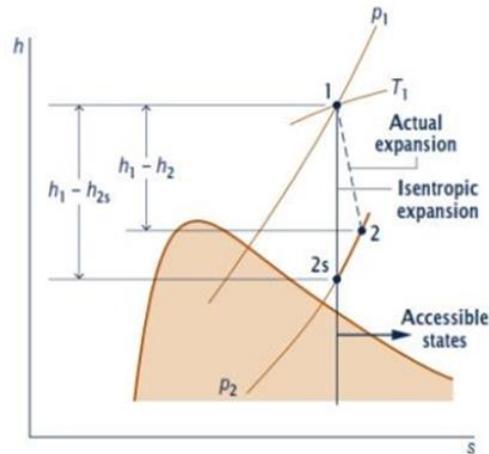
2.2.2 Efisiensi Isentropik

Efisiensi isentropik merupakan kerja aktual dan ideal dari suatu peralatan. Perpindahan panas antara turbin dan lingkungan diabaikan termasuk efek energi kinetik dan potensial. Berdasarkan asumsi ini maka kerja disetiap aliran *massa* melalui turbin pada persamaan 9 adalah (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \quad (9)$$

Keadaan yang ditandai dengan *2s* pada gambar 6 *Diagram mollier* hanya dapat dicapai jika tidak ada *irreversibilitas internal*, keadaan ini disebut ekspansi isentropik turbin pada persamaan 10 adalah (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)_S = h_1 - h_{2S} \quad (10)$$



Gambar 6: Diagram Mollier

Dalam ekspansi aktual melalui turbin $h_1 < h_{2s}$ dan demikian kerja lebih kecil dari kerja maksimum. Perbedaan ini bisa diukur dengan efisiensi isentropik turbin yang didefinisikan pada persamaan 11 (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$\eta_{\text{isentropik}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \times 100\% \quad (11)$$

Pembilang dan penyebut dalam rumus ini dievaluasi dalam keadaan *inlet* dan *outlet* yang sama. Entalpi Isentropik h_{2s} ditentukan dengan persamaan 12-14 sebagai berikut (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

1. Entropi *outlet* (kondisi 2)

$$s_1 = s_2 \quad (12)$$

2. Fraksi Uap

$$x_2 = \frac{s_2 - s_f}{s_g - s_f} = \frac{s_2 - s_f}{s_{fg}} \quad (13)$$

3. Entalpi Isentropik (Kondisi 2)

$$h_{2s} = h_f + x_2 h_{fg} \quad (14)$$

2.2.3 Efisiensi Unit Turbin Generator

Perhitungan efisiensi turbin generator menggunakan persamaan 15 sebagai berikut (Yunus A Cengel. dan Michael A Boles, 2015):

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{\text{Beban (Power)}}{\dot{W}_t \text{ isentropik}} \times 100\% \quad (15)$$

η_t = efisiensi isentropik turbin (%)

h_1 = entalpi uap masuk (kJ/kg)

h_2 = entalpi uap keluar saat kondisi aktual (kJ/kg)

h_{2s} = entalpi uap keluar ideal (kJ/kg g)

s_1 = entropi *inlet* turbin

s_2 = entropi *outlet* turbin

x_2 = fraksi uap

h_f = entalpi cairan jenuh (kJ/kg)

h_{fg} = entalpi evaporasi (kJ/kg)

h_g = entalpi uap (kJ/kg)

\dot{W}_t = daya turbin (mw)

\dot{m}_s = laju aliran massa uap (kg/s)

$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}$ = daya turbin aktual per laju aliran massa (kJ/kg)

$\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)$ = daya turbin isentropik per laju aliran massa (kJ/kg)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data Spesifikasi Turbin

Data spesifikasi turbin digunakan untuk data energi listrik yang dioperasikan di PLTU diberikan pada tabel 2.

Tabel 2: Data spesifikasi turbin

Deskripsi	Spesifikasi
Power	15 MW

Tekanan uap masuk turbin	3,53 MPa
Temperatur uap masuk turbin	380°C
Tekanan uap keluar turbin	0,011 MPa
Putaran	3000 rpm
Laju aliran uap	76 ton/jam

3.2. Analisis Turbin

Untuk mencari nilai efisiensi isentropik turbin uap berdasarkan spesifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan parameter sesuai data spesifikasi yang tertera pada *name plate* turbin atau *manual book* turbin uap berupa tekanan inlet (P_1), tekanan outlet (P_2) dan temperature inlet (T_1). Efisiensi isentropik turbin dapat ditentukan dengan mencari nilai entalpi inlet (h_1) terlebih dahulu. Nilai entalpi inlet (h_1) dicari menggunakan parameter tekanan inlet (P_1) dan temperatur inlet (T_1). Pada tekanan inlet (P_1) = 3,53 MPa dan temperatur inlet (T_1) = 380°C, maka akan didapat harga (h_1) dan (s_1) dengan melakukan interpolasi sebagai berikut:

Titik 1: Uap Masuk Turbin

$P = 3,53 \text{ MPa}$

$T = 380^\circ\text{C}$

Nilai h dan s untuk nilai dapat diperoleh dengan melakukan interpolasi dengan kondisi uap turbin masuk seperti pada tabel 3 dan tabel 4.

Tabel 3: Superhead water $P = 3,50 \text{ Mpa}$

Saturasi	$h \text{ (kJ/kg)}$	$s \text{ (kJ/kgK)}$
350°C	3104,9	66,601
400°C	3223,2	68,428

Tabel 4: Superhead water $P = 4,0 \text{ Mpa}$

Saturasi	$h \text{ (kJ/kg)}$	$s \text{ (kJ/kgK)}$
350°C	3093,3	65,843
400°C	3214,5	67,714

Pada $P = 3,50 \text{ MPa}$ dan temperatur 380°C

$$h_{380} = \frac{T_{380} - T_{350}}{T_{400} - T_{350}} (h_{400} - h_{350}) + h_{350}$$

$$h_{380} = \frac{380^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}} \left(3223,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3104,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 3104,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{380} = 3175,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Pada $P = 4,0 \text{ MPa}$ dan temperatur 380°C

$$h'_{380} = \frac{T'_{380} - T'_{350}}{T'_{400} - T'_{350}} (h'_{400} - h'_{350}) + h'_{350}$$

$$h'_{380} = \frac{380^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}} \left(3214,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3093,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 3093,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h'_{380} = 3166,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Maka, entalpi pada $P = 3.53 \text{ MPa} = 3530 \text{ KPa}$ dan temperatur 380°C adalah:

$$h_1 = \frac{P_{3,53 \text{ MPa}} - P_{3,50 \text{ MPa}}}{P_{4,0 \text{ MPa}} - P_{3,50 \text{ MPa}}} (h'_{380} - h_{380}) + h_{380}$$

$$h_1 = \frac{3530 \text{ KPa} - 3500 \text{ KPa}}{4000 \text{ KPa} - 3500 \text{ KPa}} \left(3166,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3175,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 3175,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = 3175,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Entropi pada $P = 3,50 \text{ MPa}$ dan temperatur 380°C

$$s_{380} = \frac{T_{380} - T_{350}}{T_{400} - T_{350}} (s_{400} - s_{350}) + s_{350}$$

$$s_{380} = \frac{380^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}} \left(6,8428 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 6,6601 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 6,6601 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$s_{380} = 6,76972 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Entropi pada $P = 4,0 \text{ MPa}$ dan temperatur 380°C

$$s'_{380} = \frac{T'_{380} - T'_{350}}{T'_{400} - T'_{350}} (s'_{400} - s'_{350}) + s'_{350}$$

$$s'_{380} = \frac{380^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}}{400^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}} \left(6,7714 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 6,5843 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 6,5843 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$s'_{380} = 6,69656 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Maka, entropi pada $P = 3,53 \text{ MPa} = 3530 \text{ KPa}$ dan temperatur 380°C adalah:

$$s_1 = \frac{P_{3,53 \text{ MPa}} - P_{3,50 \text{ MPa}}}{P_{4,0 \text{ MPa}} - P_{3,50 \text{ MPa}}} (s'_{380} - s_{380}) + s_{380}$$

$$s_1 = \frac{3530 \text{ KPa} - 3500 \text{ kPa}}{4000 \text{ KPa} - 3500 \text{ kPa}} \left(6,69656 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 6,76972 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 6,76972 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = 6,7653 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Titik 2: uap keluar (isentropi)

Pencarian nilai isentropik berdasarkan data spesifikasi dicari menggunakan parameter tekanan *outlet* dengan nilai $0,011 \text{ MPa}$ yang tersedia menggunakan satuan kPa maka nilai tekanan tersebut dikonversikan menjadi 11 kPa .

Nilai yang perlu ditentukan adalah entalpi cair-jenuh (h_f) entalpi penguapan (h_{fg}), entalpi uap jenuh (h_g), entropi cair-jenuh (S_f), entropi uap jenuh (S_g), dan entropi penguapan (S_{fg}) dengan menggunakan interpolasi terdapat pada tabel 5.

Tabel 5: Saturated water-pressure

Tekanan (P Kpa)	Entalpi (kJ/kg)			Entropi (kJ/kg.K)		
	Saturated liquid (h_f)	Evaporate (h_{fg})	Saturated vapor (h_g)	Saturated liquid (S_f)	Evaporate (S_{fg})	Saturated vapor (S_g)
10	191,81	2392,1	2583,9	0,6492	74,996	81,488
15	225,94	2372,3	2598,3	0,7549	72,522	80,071

Pada $P = 11 \text{ kPa}$ maka nilai entalpi cairan jenuh (h_f) adalah:

$$h_f = \frac{P_{11} - P_{10}}{P_{15} - P_{10}} (h_{15} - h_{10}) + h_{10}$$

$$h_f = \frac{11 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}}{15 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}} \left(225,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 191,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 191,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_f = 198,636 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Pada $P = 11 \text{ kPa}$ maka nilai entalpi penguapan (h_{fg}) adalah:

$$h_{fg} = \frac{P_{11} - P_{10}}{P_{15} - P_{10}} (h_{15} - h_{10}) + h_{10}$$

$$h_{fg} = \frac{11 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}}{15 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}} \left(2372,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2392,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 2392,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg} = 2388,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Pada $P = 11 \text{ kPa}$ maka nilai entalpi uap-jenuh (h_g) adalah:

$$h_g = \frac{P_{11} - P_{10}}{P_{15} - P_{10}} (h_{15} - h_{10}) + h_{10}$$

$$h_g = \frac{11 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}}{15 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}} \left(2598,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2583,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 2583,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_g = 2586,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Pada $P = 11 \text{ kPa}$ maka nilai entropi cairan jenuh (S_f) adalah:

$$S_f = \frac{P_{11} - P_{10}}{P_{15} - P_{10}} (S_{15} - S_{10}) + S_{10}$$

$$S_f = \frac{11 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}}{15 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}} \left(0,7549 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 0,6492 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 0,6492 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$S_f = 0,67034 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Pada $P = 11 \text{ kPa}$ maka nilai entropi penguapan (S_{fg}) adalah:

$$S_{fg} = \frac{P_{11} - P_{10}}{P_{15} - P_{10}} (S_{15} - S_{10}) + S_{10}$$

$$S_{fg} = \frac{11 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}}{15 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}} \left(7,2522 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 7,4996 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 7,4996 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$S_{fg} = 7,45012 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Pada $P = 11 \text{ kPa}$ maka nilai entropi uap-jenuh (S_g) adalah:

$$s_g = \frac{P_{11} - P_{10}}{P_{15} - P_{10}} (s_{15} - s_{10}) + s_{10}$$

$$s_g = \frac{11 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}}{15 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa}} \left(8,0071 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 8,1488 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 8,1488 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$s_g = 8,12046 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Dari hasil interpolasi, maka diperoleh data pada $P = 0,011 \text{ MPa} = 11 \text{ kPa}$ sebagai berikut:

$$h_f = 198,636 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_f = 0,67034 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg} = 2388,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_{fg} = 7,45012 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$h_g = 2586,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_g = 8,12046 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Nilai entropi yang digunakan untuk pencarian nilai fraksi uap adalah $S_1 = S_2$ seperti persamaan 12 dapat dicari dengan menggunakan persamaan 13 yaitu sebagai berikut:

$$X_2 = \frac{S_2 - S_f}{S_{fg}}$$

$$X_2 = \frac{6,7653 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 0,67034 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}}{7,45012 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}}$$

$$X_2 = 0,818$$

Entalpi isentropik (h_{2s}) ditentukan dengan menggunakan persamaan 14 dengan menggunakan parameter entalpi cair-jenuh (h_f), fraksi uap (X_{2s}) dan entalpi penguapan (h_{fg}) sebagai berikut:

$$h_{2s} = h_f + X_2 h_{fg}$$

$$h_{2s} = 198,636 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (0,818)(2388,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$h_{2s} = 2152,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Kerja turbin uap/ daya termal aktual ditentukan dengan persamaan 9 dan diperlukan parameter berupa laju aliran massa (\dot{m}_s) = 76 ton/jam dikonversikan menjadi 19,15 kg/s sebagai berikut:

Dengan memasukan ke dalam rumus perhitungan, maka didapatkan energi yang digunakan oleh turbin:

$$q - w = \Delta h + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$q - w = \Delta h + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$-w = h_2 - h_1$$

$$W_{\text{turbin}} = h_1 - h_2$$

Lalu menentukan Daya Turbin dengan mengalikan dengan konsumsi uap/jam.

$$\frac{\dot{W}_t \text{ aktual}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

$$\frac{\dot{W}_t \text{ aktual}}{19,15 \text{ kg/s}} = 3175,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2586,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_t \text{ aktual} = 11269,9665 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 11,27 \text{ MW}$$

Kerja turbin uap/ daya termal teoritis (isentropik) ditentukan dengan persamaan 10 dan diperlukan parameter berupa laju aliran massa (\dot{m}_s) = 76 ton/jam dikonversikan menjadi 19,15 kg/s sebagai berikut:

$$\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} \right)_s = h_1 - h_{2s}$$

$$\dot{W}_t \text{ isentropik} = \dot{m}_s (h_1 - h_{2s})$$

$$\dot{W}_t \text{ isentropik} = 19,15 \text{ kg/s} \left(3175,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2152,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{W}_t \text{ isentropik} = 19593,514 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 19,59 \text{ MW}$$

Efisiensi Isentropik ditentukan menggunakan persamaan 11 dengan parameter entalpi inlet (h_1), nilai entalpi outlet (h_2) dan entalpi isentropik (h_{2s}) sebagai berikut:

$$\eta_{\text{isentropik}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{isentropik}} = \frac{3175,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2586,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3175,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2152,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{isentropik}} = 57,29\%$$

Effisiensi unit turbin-generator (η_{Total}):

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{\text{Beban (Power)}}{\dot{W}_{\text{isentropik}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{15 \text{ MW}}{19,59 \text{ MW}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{Total}} = 76,56\%$$

3.3. Data Operasional Turbin

Data operasional turbin uap pada PT. Global Inovasi Prima dapat dilihat pada Tabel 6 sebagai berikut:

Tabel 6: Data log sheet turbin

Parameter	Data log sheet
Power	9 MW
Tekanan uap masuk turbin	3,38 MPa
Temperatur uap masuk turbin	398,5°C
Tekanan uap keluar turbin	0,0075 MPa
Putaran	3017 rpm
Laju aliran uap	68,2 ton/jam

3.4. Analisis Data Berdasarkan Data Operasional

3.4.1. Efisiensi Turbin Uap

Untuk mencari nilai efisiensi isentropik turbin uap berdasarkan data operasional; dapat dilakukan dengan menggunakan parameter sesuai data yang tertera pada log sheet turbin uap berupa tekanan inlet (P_1), tekanan outlet (P_2) dan temperature inlet (T_1). Efisiensi isentropik turbin dapat ditentukan dengan mencari nilai entalpi inlet (h_1) terlebih dahulu. Nilai entalpi inlet (h_1) dicari menggunakan parameter tekanan inlet (P_1) dan temperatur inlet (T_1). Pada tekanan inlet (P_1) = 3,38 MPa dan temperatur inlet (T_1) = 398,5°C, maka akan didapat harga (h_1) dan (s_1) dengan melakukan interpolasi sebagai berikut:

Titik 1: uap masuk turbin

$P = 3,38 \text{ MPa}$

$T = 398,5^\circ\text{C}$

Nilai h dan s untuk nilai dapat diperoleh dengan melakukan interpolasi dengan kondisi uap turbin panas masuk seperti pada tabel 7 dan tabel 8

Tabel 7: Superhead water $P = 3,00 \text{ MPa}$ ($233,85^\circ\text{C}$)

Saturasi	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
350°C	3116,1	67,450
400°C	3231,7	69,235

Tabel 8: Superhead water $P = 3,50 \text{ MPa}$ ($242,56^\circ\text{C}$)

Saturasi	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
350°C	3104,9	66,601
400°C	3223,2	68,428

Pada $P = 3,00 \text{ MPa}$ dan temperatur $398,5^\circ\text{C}$

$$h_{398,5} = \frac{T_{398,5} - T_{350}}{T_{400} - T_{350}} (h_{400} - h_{350}) + h_{350}$$

$$h_{398,5} = \frac{398,5^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}} \left(3231,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3116,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 3116,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{398,5} = 3228,232 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Pada $P = 3,50 \text{ MPa}$ dan temperatur $398,5^\circ\text{C}$

$$h'_{398,5} = \frac{T'_{398,5} - T'_{350}}{T'_{400} - T'_{350}} (h'_{400} - h'_{350}) + h'_{350}$$

$$h'_{398,5} = \frac{398,5^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}} \left(3223,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3104,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 3104,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h'_{398,5} = 3219,651 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Maka, entalpi pada $P = 3,38 \text{ MPa} = 3380 \text{ KPa}$ dan temperatur $398,5^\circ\text{C}$ adalah:

$$h_1 = \frac{P_{3,38 \text{ MPa}} - P_{3,00 \text{ MPa}}}{P_{3,50 \text{ MPa}} - P_{3,00 \text{ MPa}}} (h'_{398,5} - h_{398,5}) + h_{398,5}$$

$$h_1 = \frac{3380 \text{ KPa} - 3000 \text{ kPa}}{3500 \text{ KPa} - 3000 \text{ kPa}} \left(3219,651 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3228,232 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 3228,232 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = 3221,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Entropi pada $P = 3,00 \text{ MPa}$ dan temperatur $398,5^\circ\text{C}$

$$s_{398,5} = \frac{T_{398,5} - T_{350}}{T_{400} - T_{350}} (s_{400} - s_{350}) + s_{350}$$

$$s_{398,5} = \frac{398,5^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}} \left(6,9235 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 6,7450 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 6,7450 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$s_{398,5} = 6,9181 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Entropi pada $P = 3,50 \text{ MPa}$ dan temperatur $398,5^\circ\text{C}$

$$s'_{398,5} = \frac{T'_{398,5} - T'_{350}}{T'_{400} - T'_{350}} (s'_{400} - s'_{350}) + s'_{350}$$

$$s'_{398,5} = \frac{398,5^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}} \left(6,8428 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 6,6601 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 6,6601 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$s'_{398,5} = 6,8373 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Maka, entropi pada $P = 3,38 \text{ MPa} = 3380 \text{ KPa}$ dan temperatur $398,5^\circ\text{C}$ adalah:

$$s_1 = \frac{P_{3,38 \text{ MPa}} - P_{3,00 \text{ MPa}}}{P_{3,50 \text{ MPa}} - P_{3,00 \text{ MPa}}} (s'_{398,5} - s_{398,5}) + s_{398,5}$$

$$s_1 = \frac{3380 \text{ KPa} - 3000 \text{ kPa}}{3500 \text{ KPa} - 3000 \text{ kPa}} \left(6,8373 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 6,9181 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} \right) + 6,9181 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = 6,8567 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Pencarian nilai isentropik berdasarkan data *log sheet* dicari menggunakan parameter tekanan *outlet* dengan nilai $0,0075 \text{ MPa}$ yang tersedia menggunakan satuan kPa maka nilai tekanan tersebut dikonversikan menjadi $7,5 \text{ kPa}$. Nilai yang perlu ditentukan adalah entalpi cair-jenuh (h_f) entalpi penguapan (h_{fg}), entalpi uap jenuh (h_g), entropi cair-jenuh (s_f), entropi uap jenuh (s_g), dan entropi penguapan (s_{fg}). Data yang diperoleh sebagai berikut:

$$h_f = 168,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_f = 0,5763 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg} = 2405,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_{fg} = 7,6738 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

$$h_g = 2574,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_g = 8,2501 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}$$

Nilai entropi yang digunakan untuk pencarian nilai fraksi uap adalah $S_1 = S_2$ seperti persamaan 12 dapat dicari dengan menggunakan persamaan 13 yaitu sebagai berikut:

$$X_2 = \frac{S_2 - S_f}{S_{fg}}$$

$$X_2 = \frac{6,8567 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}} - 0,5763 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}}{7,6738 \frac{\text{kJ K}}{\text{kg}}}$$

$$X_2 = 0,818$$

Entalpi isentropik (h_{2s}) ditentukan dengan menggunakan persamaan 14 dengan menggunakan parameter entalpi cair-jenuh (h_f), fraksi uap (X_{2s}) dan entalpi penguapan (h_{fg}) sebagai berikut:

$$h_{2s} = h_f + X_{2s} h_{fg}$$

$$h_{2s} = 168,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (0,818)(2405,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$h_{2s} = 2136,28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Kerja turbin uap/ daya termal aktual ditentukan dengan persamaan 9 dan diperlukan parameter berupa laju aliran massa (\dot{m}_s) = $68,2 \text{ ton/jam}$ dikonversikan menjadi $17,19 \text{ kg/s}$ sebagai berikut:

Dengan memasukan ke dalam rumus perhitungan, maka didapatkan energi yang digunakan oleh turbin:

$$q - w = \Delta h + \Delta Ek + \Delta Ep$$

$$q - w = \Delta h + \Delta Ek + \Delta Ep$$

$$-w = h_2 - h_1$$

$$W_{\text{turbin}} = h_1 - h_2$$

Daya Turbin dikalikan dengan konsumsi uap/jam:

$$\frac{\dot{W}_t \text{ aktual}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

$$\frac{\dot{W}_t \text{ aktual}}{17,19 \text{ kg/s}} = 3221,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2574,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_t \text{ aktual} = 11134,1349 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 11,13 \text{ MW}$$

Kerja turbin uap/ daya termal teoritis (isentropik) ditentukan dengan persamaan 10 dan diperlukan parameter berupa laju aliran massa (\dot{m}_s) = 68,2 ton/jam dikonversikan menjadi 17,19 kg/s sebagai berikut:

$$\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)_s = h_1 - h_{2s}$$

$$\dot{W}_t \text{ isentropik} = \dot{m}_s(h_1 - h_{2s})$$

$$\dot{W}_t \text{ isentropik} = 17,19 \text{ kg/s} \left(3221,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2136,28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\dot{W}_t \text{ isentropik} = 18658,5417 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 18,66 \text{ MW}$$

Efisiensi Isentropik ditentukan menggunakan persamaan 11 dengan parameter entalpi inlet (h_1), nilai entalpi outlet (h_2) dan entalpi isentropik (h_{2s}) sebagai berikut:

$$\eta_{\text{isentropik}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{isentropik}} = \frac{3221,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2574,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3221,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2136,28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{isentropik}} = 59,65\%$$

Efisiensi unit turbin-generator (η_{Total}):

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{\text{Beban (Power)}}{\dot{W}_t \text{ isentropik}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{8 \text{ MW}}{18,66 \text{ MW}} \times 100\%$$

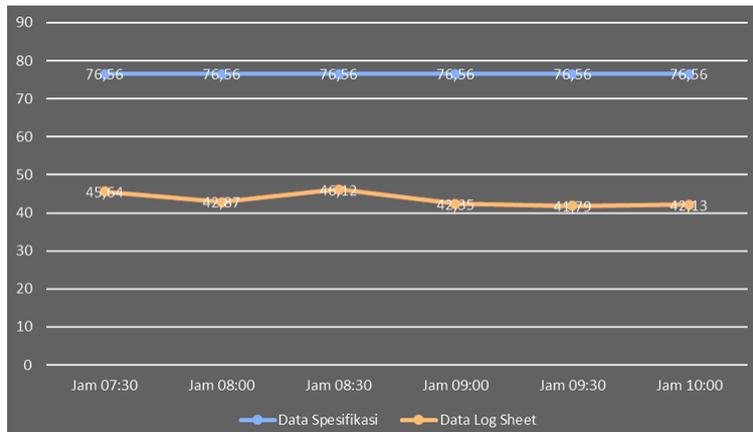
$$\eta_{\text{Total}} = 42,87\%$$

Tabel 9: Analisis data daya isentropik dan efisiensi total berdasarkan *log sheet*

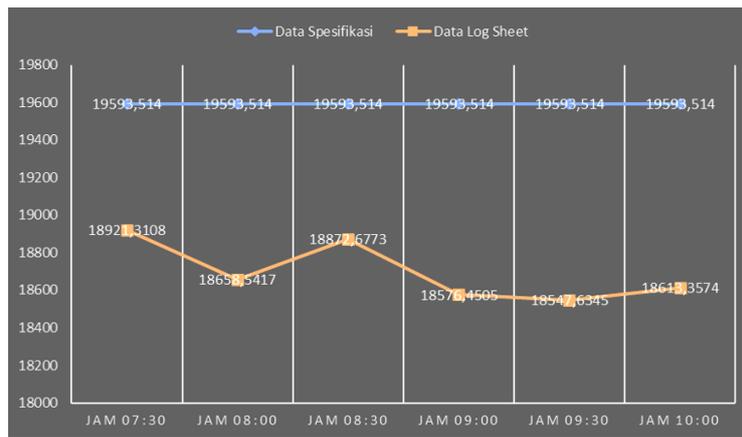
Jam (WIB)	Power (MW)	Tekanan Uap Masuk (MPa)	Temperatur Uap Masuk (°C)	Tekanan Uap Keluar (MPa)	Daya Isentropik (kW)	Efisiensi Total (%)
7:30	8,0	3,44	371,2	0,0083	189,213,108	45,64
8:00	9,0	3,38	398,5	0,0075	186,565,417	42,87
8:30	14,5	3,46	398,1	0,0091	188,726,773	46,12
9:00	14,5	3,32	389,5	0,0072	185,764,505	42,35
9:30	14,5	2,92	375,7	0,00675	185,476,345	41,79
10:00	14,5	3,02	374,2	0,00701	186,133,574	42,13

3.4.2. Perbandingan Daya Isentropik dan Efisiensi Total Berdasarkan Name Plate dan Log Sheet

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka dapat dibuat diagram perbandingan daya dan efisiensi turbin berdasarkan data spesifikasi dengan data operasional pada gambar 7 dan gambar 8. Sumbu-x merupakan pukul permintaan beban dan sumbu-y merupakan efisiensi total turbin. Perhitungan efisiensi isentropik turbin berdasarkan data spesifikasi didapatkan efisiensi isentropik sebesar 76,56%, sedangkan berdasarkan data operasional ataupun *log sheet* nilai efisiensi isentropik tertinggi pada jam 08.30 yaitu sebesar 46,12% dan nilai efisiensi isentropik terendah pada jam 09.30 sebesar 41,79%.



Gambar 7: Perbandingan efisiensi total turbin

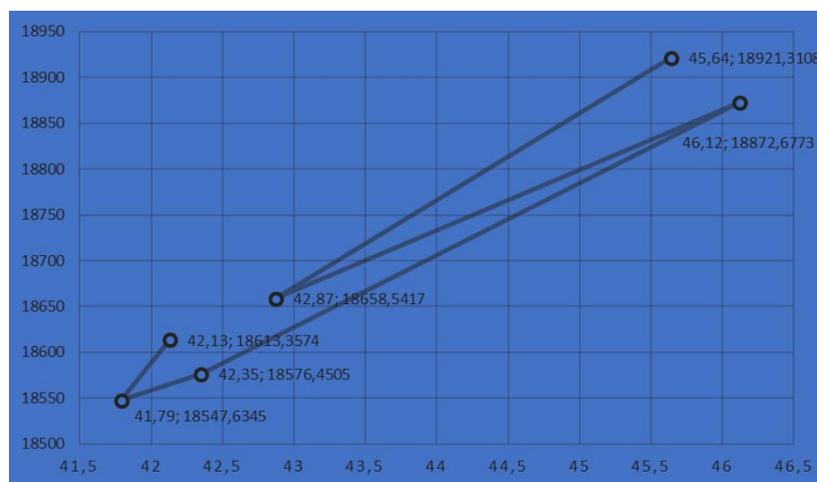


Gambar 8: Perbandingan daya isentropik turbin

Sumbu-x merupakan pukul permintaan beban dan sumbu-y merupakan daya isentropik turbin. Perhitungan daya isentropik turbin berdasarkan data spesifikasi didapatkan daya isentropik sebesar 19593,514 KW, sedangkan berdasarkan data operasional ataupun *log sheet* nilai daya isentropik tertinggi pada jam 07.30 yaitu sebesar 18921,3108 KW dan nilai daya isentropik terendah pada jam 09.30 sebesar 18547,6345 KW.

3.4.2 Hubungan Daya Isentropik dan Efisiensi Total Turbin

Analisis untuk hubungan daya isentropik dan efisiensi total turbin berdasarkan data operasional ditunjukkan pada gambar 9. Berdasarkan hasil analisis menggunakan data operasional, maka dapat terlihat kondisi turbin yang paling optimal berada pada daya isentropik sebesar 18,9 MW dan 18,87 MW, serta dengan efisiensi sebesar 45,64% dan 46,12%, yang dimana kondisi ini berada pada pukul 07:30 WIB dan 08:30 WIB. Sumbu-x merupakan efisiensi total turbin dan sumbu-y merupakan daya isentropik turbin.



Gambar 9: Grafik hubungan daya isentropik dan efisiensi total turbin

3.5. Pembahasan

Analisis perhitungan daya isentropik, efisiensi isentropik, dan efisiensi total turbin yang telah dilakukan berdasarkan *name plate* pada PT. Global Inovasi Prima (PLTU KIM 3 cabang Growth Asia) Kota Medan didapatkan bahwa besar nilai efisiensi total turbin yang diperoleh sebesar 76,56% , kemudian efisiensi isentropik yang diperoleh sebesar 57,29% dan daya isentropik yang diperoleh sebesar 19,59

MW. Adapun analisis yang didapatkan setiap 1 jam sekali pada PT. Global Inovasi Prima (PLTU KIM 3 cabang Growth Asia) Kota Medan berdasarkan *log sheet* didapatkan bahwa besar nilai efisiensi total turbin yang diperoleh sebesar 42,87%, kemudian efisiensi isentropik yang diperoleh sebesar 59,65% dan daya isentropik yang diperoleh sebesar 18,66 MW. Perbandingan tersebut menyatakan bahwa besar kecilnya efisiensi dan daya isentropik dipengaruhi oleh selisih dari kerja turbin tiap aliran massa uap terhadap kerja isentropik turbin, semakin kecil selisihnya maka efisiensi dan daya isentropik akan semakin besar sedangkan jika semakin besar selisihnya maka efisiensi dan daya isentropik akan semakin kecil dan jika tekanan masuk turbin, temperatur masuk turbin dan temperatur keluar turbin lebih kecil dari spesifikasi, maka efisiensi dan daya isentropiknya memiliki nilai lebih kecil dari spesifikasinya. Laju aliran *massa uap*, tekanan masuk, temperatur masuk dan temperatur keluar sangat berpengaruh terhadap performansi turbin uap.

4. KESIMPULAN

Analisis performansi turbin uap di PT. Global Inovasi Prima (PLTU KIM 3 cabang Growth Asia) Kota Medan dilakukan di pembangkit tenaga listrik yang merupakan pembangkit untuk memenuhi kebutuhan listrik yang dibutuhkan untuk keperluan cabang PT. Global Inovasi Prima atau secara interkoneksi dan kebutuhan listrik pada peralatan-peralatan pembangkit lainnya. Adapun efisiensi total turbin uap adalah sebesar 46,745% serta daya isentropik sebesar 18,66 MW. Dimana laju aliran *massa uap*, tekanan masuk, temperatur masuk dan temperatur keluar sangat berpengaruh terhadap performansi turbin uap. Penulis menyarankan agar melakukan perawatan seperti menutup kebocoran uap pada pipa dan katub serta melakukan perbaikan yang rutin terhadap komponen-komponen turbin seperti *governor*, *bearing* dan lain-lain agar tidak mengurangi performa kerja turbin dan dapat menghasilkan pasokan energi listrik yang maksimal.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur karena berkat dan rahmat Yang Maha Kuasa penulis dapat menyelesaikan artikel ini, serta terima kasih memberikan kesempatan berkolaborasi dengan PT. Global Inovasi Prima (PLTU KIM 3) dalam menyelesaikan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriandi, R. & Mursadin, A. (2016). Analisis Kinerja Turbin Uap berdasarkan Performance Test PLTU PT. Indocement P-12 Tarjun. *SJME Kinematik 1*, 37-46.
- Boles, M. A & Cengel, Y.A. 2002. *Thermodynamics : An Engineering*. McGraw-Hill Education. United Kingdom.
- Cengel, Y. A. & Boles, M. A 2015. *Thermodynamics: an Engineering Approach 8th edition*, 1. McGraw-Hill Education. United Kingdom.
- El-wakil, M.M. (1992). Instalasi Pembangkit Daya. Jakarta. Erlangga.
- Erna Rahayu Eko Wiriani. (2019). Analisa Pengaruh Beban Listrik Terhadap Efisiensi Termal PLTU Payo Selincah Jambi. *Jurnal Inovator* 2, 29-33.
- H. Abbas, J. Jamaluddin, M. Arif, & A. Amiruddin. (2020). Analisa Pembangkit Tenaga Listrik Dengan Tenaga Uap di PLTU. *ILTEK Jurnal Teknologi 15*, 103-106.
- Karakurt, A.S., & Güneş, Ü. (2017). *Performance analysis of a steam turbine power plant at part load conditions*. *Journal of Thermal Engineering 3*, 1121–1128.
- Linda, Arman, Y., & Malino, M.B. (2016). Aplikasi Interpolasi Lagrange untuk Menentukan Efisiensi Turbin PLTU. *Prisma Fisika 4*, 41-44.
- Nur, S.F. & I Gede Eka Lesmana, G.E. (2021). Analisis Pengaruh *Turbine Washing* Terhadap Efisiensi dan Daya Pembangkit Turbin Uap. *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa dan Inovasi 3*, 79-88.
- Priyoatmojo, S & Margana. (2016). Analisa Efisiensi HRSG Unit 1 di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan PLTGU Cilegon. *Eksergi Jurnal Teknik Energi 12*, 44-49.
- Septianto, M.R., Subekti, M., & Daryanto. (2017). Rancang Bangun Turbin Uap Pada Maket Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Journal of Electrical and Vocational Education and Technology 2*, 37-40.
- Sinaga, H.P.I., Utomo, C.T., & Tarigan, E. (2022). Analisis Performansi Turbin Uap Kapasitas 1,95 MW di PT. Perkebunan Lembah Bhakti Astra Agro Lestari TBK. *Sinerji Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin 3*, 23–33.
- Wahidah, N., Ihsan, Zelviani, S., Narti, & Abadi, F.A. (2019). Pengaruh Jenis Fluida Terhadap Unjuk Kerja Miniatur Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *JFT Universitas Islam Negeri Alauddin 2*, 132-138.
- Yusron, A. & Saputro, D.D. (2018). Analisa Performa *Heat Recovery Steam Generator* Sebelum Dan Sesudah *Cleaning* di PT Indonesia Power Tambak Lorok Semarang Menggunakan *Software Matlab R.12* Pirolysis Getah Pinus. *Saintekno 16*, 1-11.