



# ANALISIS PERFORMANSI TURBIN UAP KAPASITAS 1,95 MW DI PT PERKEBUNAN LEMBAH BHAKTI ASTRA AGRO LESTARI TBK

Hendrico Petrus Immanuel Sinaga<sup>a</sup>, Cahyo Trisedyo Utomo<sup>b</sup>, Efrata Tarigan<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

<sup>b</sup>PT. Perkebunan Lembah Bhakti Astra Agro Lestari Tbk, Lembah Bhakti, Rimo, Aceh Selatan, Nangroe Aceh Darussalam, 24477, Indonesia

E-mail: [hendricosinaga@students.polmed.ac.id](mailto:hendricosinaga@students.polmed.ac.id)

## INFO ARTIKEL

### Riwayat artikel:

Diajukan pada 15 Februari 2022

Direvisi pada 04 Maret 2022

Disetujui pada 22 Maret 2022

Tersedia daring pada 05 April 2022

### Kata kunci:

Turbin uap, daya, efisiensi

### Keywords:

Steam Turbine, Power, Efficiency

## ABSTRAK

Turbin uap pada pabrik kelapa sawit merupakan sumber utama pembangkit tenaga listrik. Turbin tersebut dapat berkerja dikarenakan adanya uap yang diperoleh dari *boiler*. Sistem pembangkit tenaga uap merupakan suatu kebutuhan penting untuk keberlangsungan sebuah pabrik kelapa sawit dalam peroses pengolahannya. Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros 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. Bahwa besar kecilnya efisiensi isentropik dipengaruhi oleh selisih dari kerja turbin tiap aliran massa uap terhadap kerja isentropik turbin, semakin kecil selisihnya maka efisiensi akan semakin besar sedangkan jika semakin besar selisihnya maka efisiensi akan semakin kecil dan jika tekanan masuk turbin, suhu masuk turbin dan suhu keluar turbin lebih kecil dari spesifikasi, maka efisiensi dan daya isentropiknya memiliki nilai lebih kecil dari spesifikasinya. Berdasarkan data yang diperoleh dari lapangan dapat diketahui bahwa efisiensi turbin uap adalah sebesar 46,745% serta daya isentropik sebesar 2972,1451kW. Bahwa laju aliran *massa uap*, tekanan masuk, temperatur masuk dan temperatur keluar sangat berpengaruh terhadap performansi turbin uap.

## ABSTRACT

Steam turbines in palm oil plants are a major source of electric power. These turbines can run due to steam from the boiler. A steam-generating system is an essential requirement for the sustainability of a palm oil plant in its programming policies. The steam turbine is an initial drive converting potential energy into kinetic energy, subsequently converted into mechanical energy in turbine rotation. Therefore, the power and efficiency of turbines are needed to identify turbine performance reduction to improve or consider how the turbines operate in maximizing turbine operation. The magnitude of isentropic efficiency is affected by the difference between turbine work of each stream of steam mass, where the smaller the difference between feeding efficiency, the smaller the efficiency and the temperature in turbines. Based on the field data obtained, it is discovered that the steam turbine efficiency is 46,745%, and isentropic power is 2972,1451kW. The flow rate of the steam mass, the input pressure, the input temperature, and the output temperature significantly affect the turbine performance.

## 1. PENGANTAR

Energi merupakan unsur yang sangat penting dalam usaha meningkatkan kuantitas hidup masyarakat. Seiring dengan meningkatkan taraf hidup atau kuantitas dari masyarakat, kebutuhan terhadap energi sangat diperlukan, sekarang ini konsumsi energi sangat berhubungan langsung dengan tingkat kuantitas kehidupan penduduk serta derajat industrilisasi suatu negara. Salah satunya energi yang paling banyak digunakan oleh manusia dalam sehari-hari adalah energi listrik, sebab sumber energi sangat efektif atau efisien untuk dikonversikan menjadi bentuk energi yang lain seperti suatu pembangkit tenaga listrik yaitu turbin uap penggerak generator. Energi listrik merupakan suatu unsur yang sangat penting bagi masyarakat, karena energi listrik bisa menyangkut hampir semua aspek kehidupan yang selalu dibutuhkan setiap harinya. Didalam pabrik, energi listrik dimanfaatkan untuk mengoperasikan peralatan-peralatan mesin yang ada di pabrik. Salah satu mesin konversi energi yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik adalah turbin uap. Turbin uap tersebut digerakkan oleh suatu tenaga mula yang menggunakan tenaga uap. Dimana uap yang dari boiler dimanfaatkan untuk memutar sudu-sudu turbin yang dihubungkan dengan poros untuk memutar generator (Siska Andini, 2017). Pada pabrik kelapa sawit PT. Perkebunan Lembah Bhakti menggunakan sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) untuk memenuhi kebutuhan listrik yang dibutuhkan pabrik khususnya dalam pengolahan kelapa sawit (TBS) menjadi minyak mentah (*Crude Palm Oil*) dan *Palm Kernel Oil* (PKO) dan kebutuhan listrik perumahan-perumahan yang ada diperkebunan. Turbin uap pada pabrik kelapa sawit merupakan sumber utama pembangkit tenaga listrik. Turbin tersebut dapat berkerja dikarenakan adanya uap yang diperoleh dari boiler. Bahan bakar boiler yang digunakan untuk menghasilkan uap seperti serabut (*fiber*) dan cangkang (*chell*). Dimana bahan bakar tersebut sangat mudah diperoleh karena merupakan limbah dari pengolahan sawit sehingga instalasi ini sangat mudah dan hemat biaya operasionalnya. Dari pemamparan diatas jelas bahwa sistem pembangkit tenaga uap merupakan suatu kebutuhan penting untuk keberlangsungan sebuah pabrik kelapa sawit dalam proses pengolahannya memproduksi CPO dan PKO. Dalam setiap stasiun proses pengolahan kelapa sawit, turbin uap memiliki peran penting dan berpengaruh terhadap kinerja dari keseluruhan sistem.

### 1.1. Pengertian turbin uap

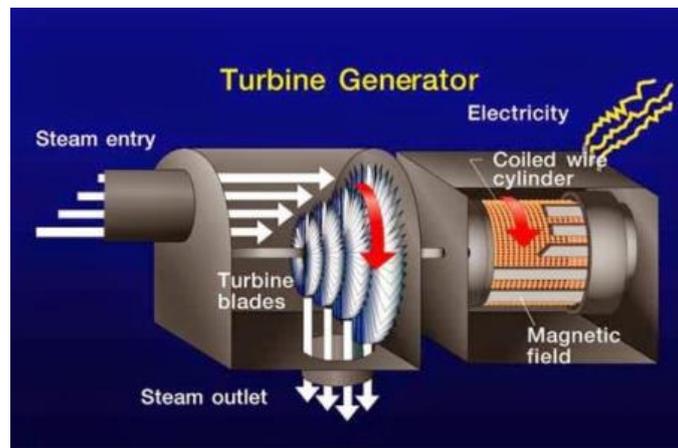
Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Sebelum dijadikan energi mekanik energi potensial uap terlebih dahulu dikonversikan menjadi energi kinetik dalam *nozel* (pada turbin implus) dan sudu-sudu gerak (pada turbin reaksi) pada Gambar 1 (PT Perkebunan Lembah Bhakti, 2021). Energi mekanik yang dihasilkan dalam bentuk putaran poros turbin dapat secara langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan yaitu poros generator. Dimana energi mekanik yang diteruskan pada poros generator diubah menjadi energi listrik untuk pembangkit tenaga listrik. 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 (Shlyakhin, P., 2015).



Gambar 1: Turbin uap PT Perkebunan Lembah Bhakti. (PT Perkebunan Lembah Bhakti, 2021)

### 1.2. Prinsip Kerja Turbin Uap

Prinsip kerja dari turbin uap yaitu uap masuk ke dalam turbin melalui *nozel*. *Nozel* tersebut berfungsi mengubah energi panas dari uap menjadi energi kinetik. 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. Perubahan kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong dan kemudian memutar poros turbin yang menghasilkan energi mekanik pada Gambar 2 (Karmana, G.G., 2017).



Gambar 2: Sistem Kerja Turbin Uap. (Karmana, G.G. 2017)

### 1.3. Kerugian Energi pada Turbin Uap

Kerugian energi yang terjadi pada turbin uap ketika beroperasi adalah (Shalyakin, P., 2015):

a. Kerugian Internal

Kerugian *internal* adalah kerugian energi panas pada saat uap mengalir masuk ke dalam turbin, yang termasuk dalam kerugian ini antara lain:

- 1) Kerugian pada katup pengatur uap masuk *nozel*.
- 2) Kerugian pada *nozel* atau sudu pengarah.
- 3) Kerugian pada sudu gerak turbin.
- 4) Kerugian kecepatan uap keluar *nozel*.
- 5) Kerugian akibat kebasahan uap.
- 6) Kerugian pada pipa buang.

b. Kerugian Eksternal

Kerugian *eksternal* adalah kerugian yang tidak mempengaruhi kondisi uap, yang termasuk dalam kerugian ini adalah:

- 1) Kerugian gesekan (kerugian mekanis).
- 2) Kerugian ventilasi.
- 3) Kerugian akibat kebocoran uap pada perapat labirin.

## 2. METODE

### 2.1 Spesifikasi Turbin uap pada PT. Perkebunan Lembah Bhakti

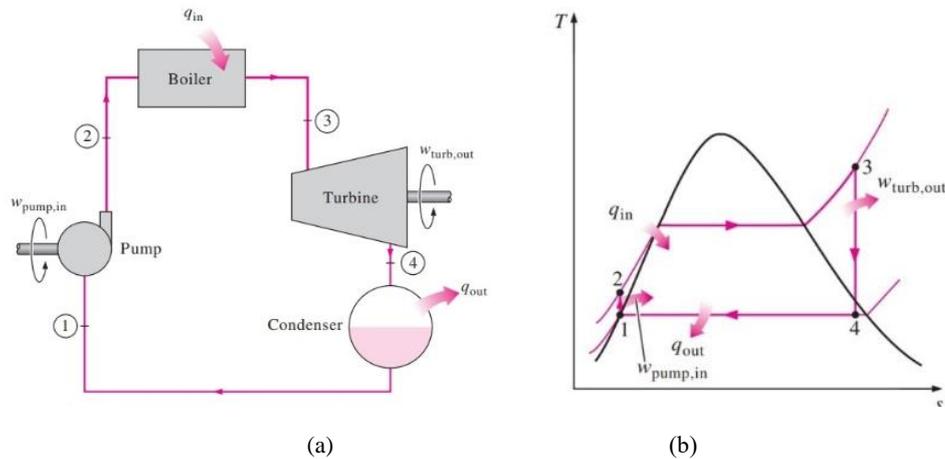
Berikut ini adalah data spesifikasi turbin uap pada PT. Perkebunan Lembah Bhakti dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1: Spesifikasi Turbin Triveni pada PT. Perkebunan Lembah Bhakti

Turbine Type	Multistage, Back Pressure
Power	1950 KW
Inlet Steam Pressure	27 bar
Inlet Steam Temperature	295 °C
Exhaust Steam Pressure	4,5 bar
Turbine Rotor Speed	7500 rpm
Turbine Output Speed	1500 rpm
First Critical Speed	14000 rpm
Tripping Speed Range	8250-8625 rpm
Steam inlet Pipe Size	10" NB ANSI # 600 RF
Steam Exhaust Pipe Size	16" NB ANSI # 150 RF
Total Turbine Weight	1250 KGS
Driven Equipment	Alternator Drive

### 2.2 Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus ideal untuk sistem pusat listrik tenaga uap. Gambar 3 (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).



**Gambar 3:** (a) Diagram alir siklus Rankine Sederhana (b) Diagram T-s siklus Rankine Sederhana (Boles, M. A., dan Cengel Y. A., 2014)

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 oleh yaitu:

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

Persamaan 1 merupakan penyederhanaan dari *steady-flow energy equation* persamaan satuan 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:

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

$$w_{pump,in} = v(P_2 - P_1) \quad (3)$$

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:

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

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:

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

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:

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

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:

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

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

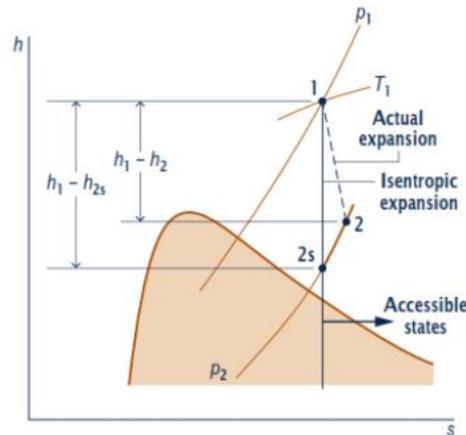
### 2.3 Efisiensi Isentropik

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, kerja disetiap aliran *massa* melalui turbin pada persamaan 9 adalah:

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

Keadaan yang ditandai dengan  $2_s$  pada Gambar 4 Diagram Mollier hanya dapat dicapai jika tidak ada *irreversibilitas internal*, keadaan ini disebut ekspansi isentropik turbin pada persamaan 10 adalah:

$$\left(\frac{W_t}{\dot{m}}\right)_s = h_1 - h_{2s} \quad (10)$$



**Gambar 4:** Diagram Mollier (Pudjanarsa, A., dan Nursuhud., D. 2006.)

Dalam ekspansi aktual melalui turbin  $h_2 > h_{2s}$  dan demikian kerja lebih kecil dari kerja maksimum. Perbedaan ini bisa diukur dengan efisiensi isentropik turbin yang didefinisikan pada persamaan 11:

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

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:

a. Entropi *outlet* (kondisi 2)

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

b. Fraksi Uap

$$x_{2s} = \frac{s_2 - s_f}{s_g - s_f} = \frac{s_2 - s_f}{s_{fg}} \quad (13)$$

c. Entalpi isentropik (Kondisi 2)

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

Di mana:

$\eta_t$  = 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)

$s_1$  = Entropi *Inlet* Turbin

$s_2$  = Entropi *Outlet* Turbin

$x_{2s}$  = Fraksi Uap

$h_f$  = Entalpi cairan jenuh (kJ/Kg)

$h_{fg}$  = Entalpi evaporasi (kJ/Kg)

$h_g$  = Entalpi uap (kJ/Kg)

$w_t$  = Daya Turbin (MW)

$\dot{m}_s$  = Laju Aliran Massa Uap (kg/s)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Parameter kinerja mesin

Data-data yang diperlukan dalam melakukan analisis performansi turbin uap pada Tabel 1 dan Tabel 2.

**Tabel 2:** Data spesifikasi turbin uap berdasarkan *nameplate*

<i>Power</i>	1950 kW
Tekanan uap masuk turbin	27 Bar
Temperatur uap masuk turbin	295 °C
Tekanan uap keluar turbin	4,5 bar
Putaran	7500 rpm
Laju aliran uap	30 ton/jam

**Tabel 3:** Data operasional turbin uap berdasarkan *logsheet*

<i>Power</i>	1000 kW
Tekanan uap masuk turbin	25 Bar
Temperatur uap masuk turbin	267 °C
Tekanan uap keluar turbin	2,9 bar
Putaran	7589 rpm
Laju aliran uap	26 ton/jam

#### 3.2. Analisis Data Turbin Uap Berdasarkan Data Spesifikasi Turbin Uap

Untuk mencari nilai efisiensi isentropik turbin uap berdasarkan spesifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan parameter sesuai data spesifikasi yang tertera pada *nameplate* 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* ( $P_1$ ) = 27 bar dan temperatur *inlet* ( $T_1$ ) = 295°C, maka akan didapat harga ( $h_1$ ) dan ( $s_1$ ) dengan melakukan interpolasi sebagai berikut:

$$\frac{295^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}}{300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}} = \frac{h - 2880,9\text{kJ/kg}}{3009,6\text{kJ/kg} - 2880,9\text{kJ/kg}}$$

$$\frac{45^\circ\text{C}}{50^\circ\text{C}} = \frac{h - 2880,9\text{kJ/kg}}{128,7\text{kJ/kg}}$$

$$h = 2996,73\text{kJ/kg}$$

Pada tekanan 30 bar dan suhu 295°C

$$\frac{295^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}}{300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}} = \frac{h - 2856,25\text{kJ/kg}}{2994,3\text{kJ/kg} - 2856,25\text{kJ/kg}}$$

$$\frac{45^\circ\text{C}}{50^\circ\text{C}} = \frac{h - 2856,25\text{ kJ/kg}}{138,05\text{ kJ/kg}}$$

$$h = 2980,495\text{kJ/kg}$$

Maka pada tekanan 27 bar dan temperatur 295°C

$$\frac{2700\text{kPa} - 2500\text{kPa}}{3000\text{kPa} - 2500\text{kPa}} = \frac{h_1 - 2996,73\text{kJ/kg}}{2980,495\text{ kJ/kg} - 2996,73\text{kJ/kg}}$$

$$\frac{200\text{kPa}}{500\text{kPa}} = \frac{h_1 - 2996,73\text{kJ/kg}}{-16,235\text{kJ/kg}}$$

$$h_1 = 2990,236\text{kJ/kg}$$

Pada tekanan 25 bar dan suhu 295°C

$$\frac{295^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}}{300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}} = \frac{S - 6,4107\text{kJ/kgK}}{6,6459\text{kJ/kgK} - 6,4107\text{kJ/kgK}}$$

$$\frac{45^\circ\text{C}}{50^\circ\text{C}} = \frac{S - 6,4107\text{kJ/kgK}}{0,2352\text{kJ/kgK}}$$

$$S = 6,6224\text{kJ/kgK}$$

Pada tekanan 30 bar dan suhu 295°C

$$\frac{295^{\circ}\text{C}}{300^{\circ}\text{C}} - \frac{250^{\circ}\text{C}}{250^{\circ}\text{C}} = \frac{S - 6,2893\text{kJ/kgK}}{6,5412\text{kJ/kgK} - 6,2893\text{kJ/kgK}}$$

$$\frac{45^{\circ}\text{C}}{50^{\circ}\text{C}} = \frac{S - 6,2893\text{kJ/kgK}}{0,2519\text{kJ/kgK}}$$

$$S = 6,5160\text{kJ/kgK}$$

Maka pada tekanan 27 bar dan temperatur 295°C

$$\frac{2700\text{kPa}}{3000\text{kPa}} - \frac{2500\text{kPa}}{2500\text{kPa}} = \frac{S_3 - 6,6224\text{kJ/kgK}}{6,5160\text{kJ/kgK} - 6,6224\text{kJ/kgK}}$$

$$\frac{200\text{kPa}}{500\text{kPa}} = \frac{S_3 - 6,6224\text{kJ/kgK}}{-0,0624\text{kJ/kgK}}$$

$$S_1 = 6,5798\text{kJ/kgK}$$

Pencarian nilai isentropik berdasarkan data spesifikasi dicari menggunakan parameter tekanan *outlet* dengan nilai 4,5 bar yang tersedia menggunakan satuan kPa maka nilai tekanan tersebut dikonversikan menjadi 450 kPa. Nilai yang perlu ditentukan adalah entalpi cair-jenuh ( $h_f$ ) entalpi penguapan ( $h_{fg}$ ), entalpi uap jenuh ( $h_g$ ), entropi cair-jenuh ( $S_f$ ) dan entropi uap jenuh ( $S_g$ ). Data yang diperoleh sebagai berikut:

$$h_f = 623,14\text{kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 2120,3\text{kJ/kg}$$

$$h_g = 2743,4\text{kJ/kg}$$

$$S_f = 1,8205\text{kJ/kg K}$$

$$S_{fg} = 5,0356\text{kJ/kg K}$$

$$S_g = 6,8561\text{kJ/kg}$$

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:

$$\begin{aligned} X_{2s} &= \frac{S_2 - S_f}{S_{fg}} \\ &= \frac{(6,5798 - 1,8205)\text{kJ/kgK}}{5,0356\text{kJ/kgK}} \\ &= 0,945 \end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned} h_{2s} &= h_f + X_{2s} \cdot h_{fg} \\ &= 623,14\text{ kJ/kg} + 0,945 \cdot 2120,3\text{kJ/kg} \\ &= 623,14\text{ kJ/kg} + 2003,6835\text{ kJ/kg} \\ &= 2626,8235\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

Kerja turbin uap ditentukan dengan persamaan 9 dan diperlukan parameter berupa laju aliran *massa* ( $\dot{m}_s$ ) = 30 ton/jam dikonversikan menjadi 8,3 kg/s, entalpi *inlet* ( $h_1$ ) dan nilai entalpi *outlet* ( $h_{2s}$ ) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{isentropik}} &= \dot{m}_s \times (h_1 - h_{2s}) \\ &= 8,33\text{kg/s} \times (2990,236\text{kJ/kg} - 2626,8235\text{kJ/kg}) \\ &= 8,33\text{ kg/s} \times (369,4125\text{kJ/kg}) \\ &= 3027,226\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \eta_{\text{turbin}} &= \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \times 100\% \\ &= \frac{2990,236\text{kJ/kg} - 2743,4\text{kJ/kg}}{2990,236\text{kJ/kg} - 2626,8235\text{kJ/kg}} \times 100\% \\ &= 67,92\% \end{aligned}$$

### 3.3. Analisis Data Turbin Uap Berdasarkan Data Operasional

Untuk mencari nilai efisiensi isentropik turbin uap berdasarkan spesifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan parameter sesuai data operasional yang tertera pada *logsheet* turbin uap berupa tekanan *inlet* ( $P_1$ ), tekanan *outlet* ( $P_2$ ) dan temperatur masuk ( $T_1$ ). 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* ( $P_1$ ) = 25 bar dan temperatur *inlet* ( $T_1$ ) = 267°C, maka akan didapat harga ( $h_1$ ) dan ( $s_1$ ) dengan melakukan interpolasi sebagai berikut:

$$\frac{267^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}}{300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}} = \frac{h_1 - 2880,9\text{kJ/kg}}{3009,6\text{kJ/kg} - 2880,9\text{kJ/kg}}$$

$$\frac{17^\circ\text{C}}{50^\circ\text{C}} = \frac{h_1 - 2880,9\text{kJ/kg}}{128,7\text{kJ/kg}}$$

$$h_1 = 2924,658\text{kJ/kg}$$

Pada tekanan 25 bar dan suhu 267°C :

$$\frac{267^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}}{300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}} = \frac{S_1 - 6,4107\text{kJ/kgK}}{6,6459\text{kJ/kgK} - 6,4107\text{kJ/kgK}}$$

$$\frac{17^\circ\text{C}}{50^\circ\text{C}} = \frac{S_1 - 6,4107\text{kJ/kgK}}{0,2352\text{kJ/kgK}}$$

$$S_1 = 6,4907\text{kJ/kgK}$$

Pencarian nilai isentropik berdasarkan data spesifikasi dicari menggunakan parameter tekanan *outlet* dengan nilai 2,9 bar yang tersedia menggunakan satuan kPa maka nilai tekanan tersebut dikonversikan menjadi 290 kPa. Nilai yang perlu ditentukan adalah entalpi cair-jenuh ( $h_f$ ) entalpi penguapan ( $h_{fg}$ ), entalpi uap jenuh ( $h_g$ ), entropi cair-jenuh ( $S_f$ ) dan entropi uap jenuh ( $S_g$ ). Pencarian parameter yang diperlukan dapat dicari dengan melakukan interpolasi sebagai berikut:

Mencari nilai  $h_f$  :

$$\frac{290\text{kPa} - 275\text{kPa}}{300\text{kPa} - 275\text{kPa}} = \frac{h_f - 548,86\text{kJ/kg}}{561,43\text{kJ/kg} - 548,86\text{kJ/kg}}$$

$$\frac{15\text{kPa}}{25\text{kPa}} = \frac{h_f - 548,86\text{kJ/kg}}{12,57\text{kJ/kg}}$$

$$h_f = 556,402\text{kJ/kg}$$

Mencari nilai  $h_{fg}$  :

$$\frac{290\text{kPa} - 275\text{kPa}}{300\text{kPa} - 275\text{kPa}} = \frac{h_{fg} - 2172\text{kJ/kg}}{2163,5\text{kJ/kg} - 2172\text{kJ/kg}}$$

$$\frac{15\text{kPa}}{25\text{kPa}} = \frac{h_{fg} - 2172\text{kJ/kg}}{8,5\text{kJ/kg}}$$

$$h_{fg} = 2166,9\text{kJ/kg}$$

Mencari nilai  $h_g$  :

$$\frac{290\text{kPa} - 275\text{kPa}}{300\text{kPa} - 275\text{kPa}} = \frac{h_g - 2720,9\text{kJ/kg}}{2724,9\text{kJ/kg} - 2720,9\text{kJ/kg}}$$

$$\frac{15\text{kPa}}{25\text{kPa}} = \frac{h_g - 2720,9\text{kJ/kg}}{4\text{kJ/kg}}$$

$$h_g = 2723,3\text{kJ/kg}$$

Mencari nilai  $S_f$  :

$$\frac{290\text{kPa} - 275\text{kPa}}{300\text{kPa} - 275\text{kPa}} = \frac{S_f - 1,6408\text{kJ/kgK}}{1,6717\text{kJ/kgK} - 1,6408\text{kJ/kgK}}$$

$$\frac{15\text{kPa}}{25\text{kPa}} = \frac{S_f - 1,6408\text{kJ/kgK}}{0,0309\text{kJ/kgK}}$$

$$S_f = 1,6593\text{kJ/kgK}$$

Mencari nilai  $S_{fg}$  :

$$\frac{290\text{kPa}}{300\text{kPa}} - \frac{275\text{kPa}}{275\text{kPa}} = \frac{S_{fg} - 5,3800\text{kJ/kgK}}{5,3200\text{kJ/kgK} - 5,3800\text{kJ/kgK}}$$

$$\frac{15\text{kPa}}{25\text{kPa}} = \frac{S_{fg} - 5,3800\text{kJ/kgK}}{-0,06\text{kJ/kgK}}$$

$$S_{fg} = 2166,9\text{kJ/kgK}$$

Mencari nilai  $S_g$  :

$$\frac{290\text{kPa}}{300\text{kPa}} - \frac{275\text{kPa}}{275\text{kPa}} = \frac{S_g - 7,0207\text{kJ/kgK}}{6,9917\text{kJ/kgK} - 7,0207\text{kJ/kgK}}$$

$$\frac{15\text{kPa}}{25\text{kPa}} = \frac{S_g - 7,0207\text{kJ/kgK}}{-0,029\text{kJ/kgK}}$$

$$S_g = 7,0033\text{kJ/kgK}$$

Maka dari interpolasi diatas didapatkan nilai-nilai sebagai berikut:

$$h_f = 556,402\text{kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 2166,9\text{kJ/kg}$$

$$h_g = 2723,3\text{kJ/kg}$$

$$S_f = 1,6593\text{kJ/kgK}$$

$$S_{fg} = 5,3440\text{kJ/kgK}$$

$$S_g = 7,0033\text{kJ/kgK}$$

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:

$$\begin{aligned} X_{2s} &= \frac{S_2 - S_f}{S_{fg}} \\ &= \frac{(6,4907 - 1,6593)\text{kJ/kgK}}{5,3440\text{kJ/kgK}} \\ &= 0,904 \end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned} h_{2s} &= h_f + X_{2s} \cdot h_{fg} \\ &= 556,402\text{kJ/kg} + 0,904 \cdot 2166,9\text{kJ/kg} \\ &= 556,402\text{kJ/kg} + 1958,8776\text{kJ/kg} \\ &= 2515,2796\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

Kerja turbin uap ditentukan dengan persamaan 9 dan diperlukan parameter berupa laju aliran massa ( $\dot{m}_s$ ) = 30 ton/jam dikonversikan menjadi 8,3kg/s, entalpi inlet ( $h_1$ ) dan nilai entalpi outlet ( $h_{2s}$ ) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{isentropik}} &= \dot{m}_s \times (h_1 - h_{2s}) \\ &= 7,22\text{kg/s} \times (2924,658\text{kJ/kg} - 2515,2796\text{kJ/kg}) \\ &= 7,22\text{kg/s} \times (409,3784\text{kJ/kg}) \\ &= 2955,7120\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \eta_{\text{turbin}} &= \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \times 100\% \\ &= \frac{2924,658\text{kJ/kg} - 2723,3\text{kJ/kg}}{2924,658\text{kJ/kg} - 2515,2796\text{kJ/kg}} \times 100\% \\ &= 49,18\% \end{aligned}$$

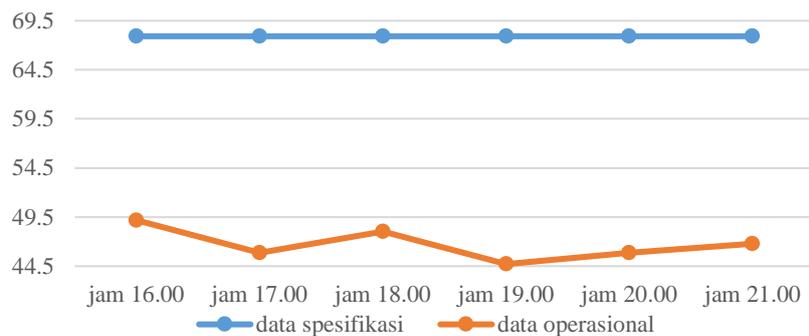
Perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan daya dan efisiensi turbin menggunakan data yang diperoleh setiap 1 jam sekali saat turbin uap beroperasi, maka daya dan efisiensi yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4 sebagai berikut:

**Tabel 4:** Hasil analisis data daya isentropik dan efisiensi isentropik berdasarkan data operasional

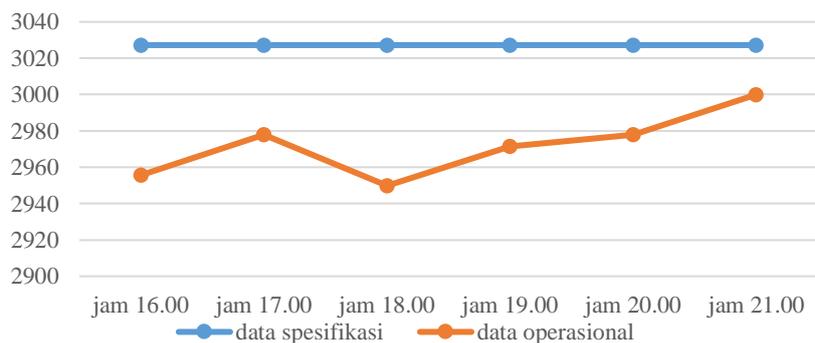
Jam (WIB)	Tekanan uap masuk (bar)	Tekanan uap masuk ( $P_3$ ) (Bar)	Tekanan uap masuk ( $P_4$ ) °C	Daya isentropik (kW)	Efisiensi isentropik (%)
16.00	25	267	2,9	29,557,120	49,18
17.00	26	264	2,9	29,779,200	45,88
18.00	25	265	2,9	29,498,335	48,02
19.00	26	262	2,9	29,715,159	44,71
20.00	26	264	2,9	29,779,200	45,88
21.00	26	266	2,9	29,999,692	46,80

### 3.4. Grafik Perbandingan Daya dan Efisiensi Turbin Berdasarkan Data Spesifikasi dan Data Operasional

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka dapat dibuat diagram perbandingan daya dan efisiensi turbin berdasarkan data spesifikasi dengan data operasional pada Gambar 5 dan Gambar 6.

**Gambar 5:** Grafik efisiensi turbin berdasarkan data spesifikasi dan data operasional.

Dari perhitungan efisiensi isentropik turbin berdasarkan data spesifikasi didapatkan efisiensi isentropik sebesar 67,92%, sedangkan berdasarkan data operasional nilai efisiensi isentropik tertinggi pada jam 16.00 yaitu sebesar 49,18% dan nilai efisiensi isentropik terendah pada jam 19.00 sebesar 44,71%.

**Gambar 6:** Grafik daya turbin berdasarkan data spesifikasi dan data operasional.

Dari perhitungan daya isentropik turbin berdasarkan data spesifikasi didapatkan daya isentropik sebesar 3016,3237kW, sedangkan berdasarkan data operasional nilai daya isentropik tertinggi pada jam 21.00 yaitu sebesar 2999,9692kW dan nilai daya isentropik terendah pada jam 18.00 sebesar 2949,8335kW

### 3.5. Pembahasan

Analisis perhitungan daya isentropik dan efisiensi isentropik turbin yang telah dilakukan setiap 1 jam sekali pada PT. Perkebunan Lembah Bahkti didapatkan bahwa besar nilai efisiensi isentropik yang diperoleh sebesar 46,745% dan daya isentropik yang diperoleh sebesar 2972,1451kW. Adapun analisis efisiensi isentropik turbin uap pembangkit listrik tenaga biomassa (PLTBM) didapat besar nilai Efisiensi Isentropik Turbin yang diperoleh adalah 64,60% daya yang diperoleh sebesar 5501,43 kW (Rolando samosir, dkk., 2019). 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, suhu masuk turbin dan suhu keluar turbin lebih kecil dari spesifikasi, maka efisiensi dan daya isentropiknya memiliki nilai lebih kecil dari spesifikasinya. Dapat disimpulkan bahwa 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 Perkebunan Lembah Bhakti dilakukan di pembangkit tenaga listrik yang merupakan pembangkit untuk memenuhi kebutuhan listrik yang dibutuhkan pabrik khususnya dalam proses pengolahan kelapa sawit dan kebutuhan listrik perumahan-perumahan yang ada diperkebunan. Adapun efisiensi turbin uap adalah sebesar 46,745% serta daya isentropik sebesar 2972,1451 kW 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 yang sedalamnya karena dukungan finansial yang diberikan oleh Direktorat Akademik Pendidikan Tinggi Vokasi Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui Pusat Penelitian Pengabdian Masyarakat, Politeknik Negeri Medan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Andini, S. (2017), Analisa Performansi Turbin Uap Dengan Kapasitas 1000 kW Pada Pabrik Kelapa Sawit Ptpn IV Unit Usaha Pabatu, Politeknik Negeri Medan.
- Boles, Michael A., Yunus A. Cengel. (2014). *Thermodynamics: An engineering 8<sup>th</sup> edition. North Carolina. United Stated of America. McGraw-Hill book.*
- El-wakil, M.M. (1992). Instalasi Pembangkit Daya. Jakarta. Erlangga.
- Karmana, G.G. (2017). Rancangan Turbin Uap Penggerak Pompa Air Pengisi Boiler Untuk PLTU kapasitas 689 MW. Politeknik Negeri Bandung.
- Pudjanarsa, A., Djati., N. (2016). Mesin konversi Energi. Andi. Yogyakarta.
- PT Perkebunan Lembah Bhakti. (2021). Dokumen Astra Agro Lestari Tbk. Aceh Singkil.
- Samosir, R., Danial, K., & Eddy. (2019). Analisa Efisiensi Isentropik Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM). *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin* 1, 1-7.
- Shalyakin, P. (2015). Turbin Uap (*Steam Turbines*) Teori dan Rancangan. Jakarta. Erlangga.