

## ANALISA ENERGI DAN EKSERGI TURBIN UAP PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP UNIT 2 TANJUNG AWAR-AWAR

**Muhammad Fauzi Zakaria**

Teknik Mesin Konversi Energi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail: [muhammadzakaria@mhs.unesa.ac.id](mailto:muhammadzakaria@mhs.unesa.ac.id)

**Mohamad Effendy**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail: [mohammadeffendy@unesa.ac.id](mailto:mohammadeffendy@unesa.ac.id)

### Abstrak

Sumber energi sistem pembangkit tenaga listrik berkapasitas besar saat ini masih di dominasi oleh bahan bakar fosil yang semakin menipis ketersediaannya. Setiap peralatan pembangkit yang beroperasi tidak efektif dan efisien merupakan sumber kerugian energi. Penelitian ini menganalisa kerugian energi pada peralatan turbin uap di PLTU Tanjung Awar-Awar. Analisa kerugian energi ini menggunakan konsep Hukum I dan Hukum II Termodinamika. Hukum pertama termodinamika menunjukkan kerugian energi bersifat kuantitatif. Hukum kedua termodinamika menunjukkan keefektifan penggunaan eksergi sebagai batasan potensi energi dalam sistem yang bersifat kualitatif. Batasan keefektifan suatu sistem dipengaruhi oleh parameter temperatur lingkungan. Tujuan pada penelitian ini untuk mengetahui laju kerugian atau kehilangan energi dalam sistem serta mengetahui potensi kerugian energi yang dapat dilakukan perbaikan. Hasil dari penelitian menunjukkan besar efisiensi energi turbin uap rata-rata sebesar 91,48 % dengan laju kerugian energi rata-rata sebesar 31,11 MW dari total energi yang masuk system. Efisiensi eksergi rata-rata pada turbin uap sebesar 94,08 % dengan laju kerusakan eksergi rata-rata pada turbin uap sebesar 25,98 MW dari total eksergi total masuk sistem. Dari total potensi energi yang masuk sistem rata-rata energi yang dimanfaatkan sebesar 93,30 %, kemudian besar peluang energi yang masih bisa ditingkatkan rata-rata 1,33 % dari total potensi energi yang tersedia.

**Kata Kunci:** Efisiensi, Efektifitas, Turbin Uap, Analisis Energi Dan Analisis Eksergi.

### Abstract

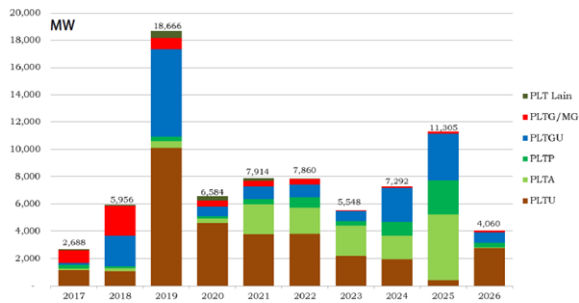
*Energy source system of large-capacity power plants currently in the domination by fossil fuels are depleting for availability. Each operating plant equipment is not effective and efficient source of energy losses. This research analyzes the energy losses on the equipment steam turbine in Tanjung Awar-Awar power plant. Analysis of loss of energy it uses the concept of Law I and II Law of thermodynamics. First law thermodynamika showed losses of energy are quantitative. Second law thermodynamika showed effectiveness the use of exergy as a limitation of the potential energy in the system are purely qualitative. Effectiveness limits a system affected by parameters temperature environment. The purpose of this research to find out the rate of losses or loss of energy in the system as well as knowing the potential loss of energy can do the repairs. The results of the research indicate large steam turbine energy efficiency on average by 91.48% energy loss rate with an average of 31.11 MW of the total energy that enters the system. The efficiency of the average exergy on steam turbine of 94.08% with the rate of damage to exergy on average of 25.98 MW steam turbine of total exergy total entry system. Of the total potential energy of the incoming system average energy dimanfaatkan of 93.30%, then great opportunities of energy that can still be improved an average of 1.33% of total potential energy available.*

**Keywords:** Efficiency, Effectiveness, Steam Turbines, Energy Analysis And Exergy Analysis.

### PENDAHULUAN

Konsumsi listrik setiap negara selalu meningkat di setiap tahunnya. Hal ini disebabkan karena energi listrik merupakan energi yang sangat penting dalam pembangunan suatu negara. Negara indonesia juga mengalaminya, semakin meningkat pertumbuhan perekonomian penduduk berbanding lurus dengan peningkatan konsumsi listrik. Pemerintah indonesia telah berupaya meningkatkan sistem pembangkitan energi listrik. PT PLN (persero) sebagai perusahaan negara yang

mengelola dalam pendistribusian listrik di indonesia sejak tahun 2011 terus membangun infrastruktur ketenagalistrikan di Indonesia. Hal ini dilakukan baik dari penambahan pembangunan berbagai jenis pembangkit, transmisi, dan gardu induk. Pada Gambar 1 menunjukkan data rencana pembangunan pembangkit oleh PT PLN (persero) per tanggal 27 september 2017 menunjukkan kebutuhan listrik yang terus meningkat dari tahun 2017 sampai 2026.



Gambar 1 Rencana pembangunan pembangkit di Indonesia tahun 2017-2026

Berdasarkan data tersebut, pembangkitan listrik tenaga uap (PLTU) menjadi energi primer yang paling besar digunakan. Sedangkan diketahui bahwa saat ini pembangkit listrik berbahan bakar fosil seperti batubara memiliki tantangan dari ketersediaan bahan bakar. Hal ini dikarenakan bahan bakar fosil merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui. Dengan adanya tantangan tersebut harus dilakukan banyak usaha yang dilakukan untuk penggunaan energi pada pembangkit listrik tenaga uap yang lebih efisien.

Dengan menggunakan metode analisa energi dan eksergi dapat digunakan sebagai alternatif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar pada suatu pembangkit. Hilangnya energi dengan jumlah yang besar pada mesin pembangkit listrik dapat terjadi di salah satu atau lebih pada komponen mesin. Untuk mengetahui komponen-komponen tersebut maka perlu dilakukan analisis di setiap komponen sistem pembangkit listrik tersebut. Metode ini telah banyak dilakukan oleh para ilmuwan dan perancang sistem untuk meningkatkan efisiensi pada pembangkit.

Ahmadi dan Toghraie (2016) melakukan analisa energi dan eksergi pembangkit listrik tenaga uap di Montazeri Iran kapasitas unit 200 MW. Hasil dari analisa energi menunjukkan kehilangan energi terbesar terdapat pada kondensor sebesar 296,8 MW mencakup 69,8% energi total didalam system, kemudian besar kerugian energi dialami oleh peralatan turbin uap dan boiler. Analisa eksergi menunjukkan boiler membuang eksergi terbesar 315,39 MW mencakup 85,66% dari total eksergi memasuki sistem pembangkit, kemudian besar kerusakan eksergi dialami oleh peralatan turbin uap dan kondensor.

Priambodo dan Dewita (2015), melakukan analisis energi dan eksergi pada sistem HTGR siklus turbin uap untuk mengetahui kerugian atau kehilangan panas yang terjadi dalam komponen sistem pembangkit, sehingga dapat diketahui potensi-potensi kerugian dan dapat dilakukan perbaikan. Hasil studi analisis menunjukkan reaktor merupakan komponen yang paling tidak efisien, persentase ireversibilitas sebesar 61,8%, diantara seluruh komponen yang ada dalam sistem. Kemudian pembangkit uap, turbin, kondensor, adalah komponen penyumbang kerugian terbesar berikutnya.

Karyadi, A dan Rangkuti, C, (2016) melakukan analisa energi dan eksergi pembangkit listrik tenaga uap banten 3 lontar. Hasil ketidakefisienan tertinggi pada komponen boiler dengan besar eksergi yang musnah sebesar 358,1 MW. Kemudian kerusakan eksergi terbesar diikuti pada peralatan deaerator, turbin uap tekanan rendah, kondensor.

Pada penelitian ini analisa dilakukan pada PLTU Tanjung Awar-Awar pada salah satu komponen utama pada pembangkit tersebut yaitu turbin uap. Pada komponen ini akan dilakukan analisis untuk mengetahui berapa besar kerugian energi dan eksergi yang tidak dimanfaatkan oleh komponen turbin uap serta mengetahui potensi kerugian energi yang dapat dilakukan perbaikan oleh peralatan tersebut.

## METODE PENELITIAN

### Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan adalah deskriptif kuantitatif dan deskriptif kualitatif.

### Tempat dan Waktu Penelitian

#### • Tempat penelitian

Penelitian ini akan dilakukan pada ruang CCR (Center Control Room) untuk mendapatkan data operasi yang berisi parameter-parameter turbin uap dan generator di PT PJB-UBJOM PLTU Tanjung Awar-Awar (2x350 MW) yang beralamat di desa Jenu Kecamatan Jenu Kabupaten Tuban

#### • Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama empat bulan, mulai bulan Mei 2018 sampai dengan bulan Agustus 2018.

### Objek Penelitian

Objek penelitian dalam penelitian ini yaitu satu unit turbin uap unit 2 PLTU Tanjung Awar-Awar yang terdiri dari turbin tekanan tinggi (*high pressure turbine*), turbin tekanan menengah (*intermediate pressure turbine*) dan turbin tekanan rendah (*low pressure turbine*).

### Variabel Penelitian

#### • Variabel bebas:

- Data operasi

Adalah data parameter yang ditunjukkan pada layar DCS di ruang CCR, yaitu data temperatur, tekanan dan laju massa setiap *typing point* seperti dijelaskan pada *Heat balance* PLTU di Gambar 2.

- Kondisi temperatur lingkungan

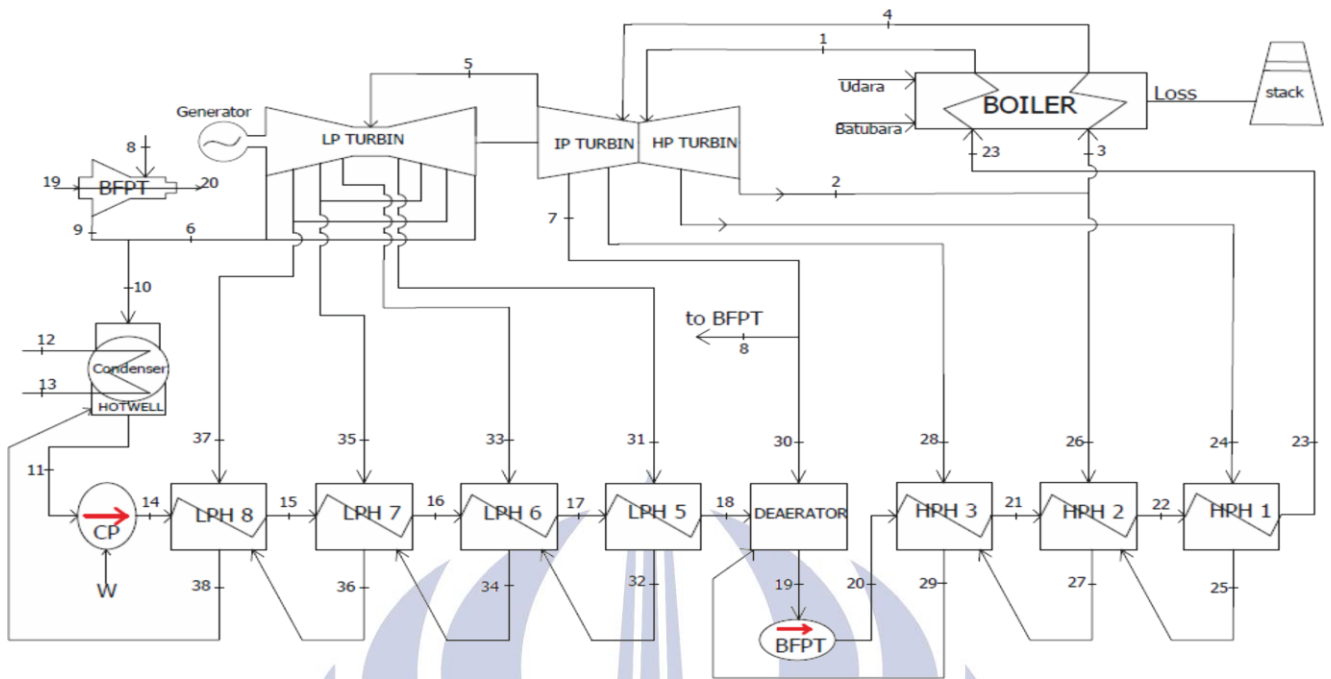
Adalah temperatur di area unit turbin uap unit 2 pembangkit. Data temperatur didapat dengan melakukan survei (observasi) selama 1 hari penuh dengan mengambil data setiap 1 jam untuk mencari perubahan temperatur yang signifikan.

#### • Variabel terikat:

- Efisiensi energi - Laju kerugian energi
- Efisiensi eksergi - Laju kerusakan eksergi

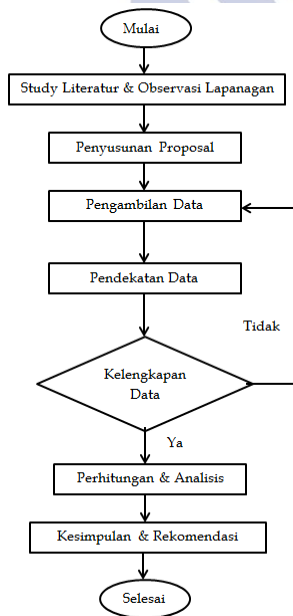
#### • Variabel kontrol:

- Data yang diambil ketika pembangkit beroperasi dipuncak atau beban penuh



Gambar 2. Heat Balance PLTU Tanjung Awar-Awar

**Rancangan penelitian**

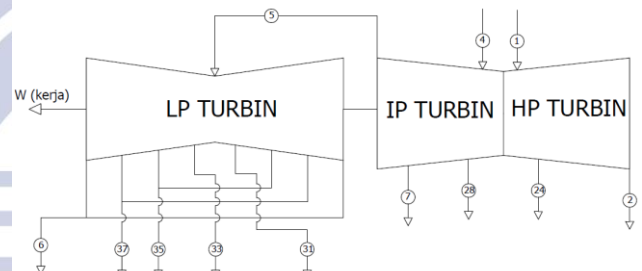


Gambar 3. Flowchart Proses Penelitian

- Tahap mencari entalpi isentropik ( $h_s$ ) satuan  $\text{kJ/kg}$
- Tahap mencari eksergi spesifik ( $e$ ) satuan  $\text{kJ/kg}$
- Menghitung laju massa setiap ekstraksi turbin uap dengan kesetimbangan energi dan massa pada pemanas (*heater*)

**Teknik Analisis Data**

Teknik analisis data dilakukan perhitungan matematis dengan metode analisa hukum I dan hukum II termodinamika dengan keseimbangan massa, energi dan eksergi sesuai dengan skema analisis turbin uap berikut :



Gambar 4. Skema Analisis Turbin Uap

**Instrumen Penelitian**

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini:

- *Pressure Gauge*, *Thermometer*, dan *Mass Flow Rate* yang terpasang di unit pembangkit
- *Thermometer digital* yang digunakan untuk mengukur temperatur lingkungan area turbin uap.
- Fitur *Thermodynamic Tables Add-in 2.0.8* yang diinstall pada komputer dan terpasang di microsoft excel. Fitur ini untuk mencari data properti termodinamika.

**Teknik Pengumpulan Data**

- Mencari data properti termodinamika dengan *Thermodynamic Tables Add-in 2.0.8*
  - Tahap mencari entalpi spesifik ( $h$ ) satuan  $\text{kJ/kg}$
  - Tahap mencari entropi spesifik ( $s$ ) satuan  $\text{kJ/kg.K}$

1. Perhitungan Analisis Energi

a. Total Energi

*High Pressure Turbine*

$$E_{HPT} = \dot{m}_{24} \cdot (h_1 - h_{24}) + \dot{m}_2 \cdot (h_1 - h_2) \quad \dots(1)$$

*Intermediate Pressure Turbine*

$$E_{IPT} = \dot{m}_{28} \cdot (h_4 - h_{28}) + \dot{m}_7 \cdot (h_4 - h_7) + \dot{m}_5 \cdot (h_4 - h_5) \quad \dots(2)$$

*Low Pressure Turbine*

$$E_{LPT} = \dot{m}_{31} \cdot (h_5 - h_{31}) + \dot{m}_{33} \cdot (h_5 - h_{33}) + \dot{m}_{35} \cdot (h_5 - h_{35}) + \dot{m}_{37} \cdot (h_5 - h_{37}) + \dot{m}_6 \cdot (h_5 - h_6) \quad \dots(3)$$

Energi Total

$$E_{total} = E_{HPT} + E_{IPT} + E_{LPT} \quad \dots(4)$$

b. Efisiensi Isentropik

*High Pressure Turbine*



$$\eta_{hpt} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \times 100 \% \quad \dots(5)$$

Intermediate Pressure Turbine

$$\eta_{ipt} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} \times 100 \% \quad \dots(6)$$

Low Pressure Turbine

$$\eta_{lpt} = \frac{h_7 - h_6}{h_7 - h_{6s}} \times 100 \% \quad \dots(7)$$

c. Kerja Total ( $W_{total}$ )

High Pressure Turbine

$$W_{HPT} = E_{HPT} \times \eta_{hpt} \quad \dots(8)$$

Intermediate Pressure Turbine

$$W_{IPT} = E_{IPT} \times \eta_{ipt} \quad \dots(9)$$

Low Pressure Turbine

$$W_{LPT} = E_{LPT} \times \eta_{lpt} \quad \dots(10)$$

Total kerja

$$W_{total} = W_{HPT} + W_{IPT} + W_{LPT} \quad \dots(11)$$

d. Laju kerugian energi ( $\dot{Q}_{LOSS}$ )

High Pressure Turbine

$$\dot{Q}_{LOSS.HPT} = E_{HPT} - W_{hpt} \quad \dots(12)$$

Intermediate Pressure Turbine

$$\dot{Q}_{LOSS.IPT} = E_{IPT} - W_{ipt} \quad \dots(13)$$

Low Pressure Turbine

$$\dot{Q}_{LOSS.LPT} = E_{LPT} - W_{lpt} \quad \dots(14)$$

Total laju kerugian energi

$$\dot{Q}_{LOSS.Tot} = \dot{Q}_{LOSS.HPT} + \dot{Q}_{LOSS.IPT} + \dot{Q}_{LOSS.LPT} \quad \dots(15)$$

Efisiensi energi turbin uap dicari dengan membagi total

$\dot{Q}_{LOSS}$  dengan total energi (E) yang masuk

$$\eta_{total} = \frac{W_{total}}{E_{total}} \quad \dots(16)$$

2. Perhitungan Analisis Eksergi

a. Total eksergi ( $E_x$ )

High Pressure Turbine

$$E_{x.HPT} = m_2 \cdot (e_1 - e_2) + m_{24} \cdot (e_1 - e_{24}) \quad \dots(17)$$

Intermediate Pressure Turbine

$$E_{x.IPT} = m_{28} \cdot (e_4 - e_{28}) + m_7 \cdot (e_4 - e_7) + m_5 \cdot (e_4 - e_5) \quad \dots(18)$$

Low Pressure Turbine

$$E_{x.LPT} = m_{31} \cdot (e_5 - e_{31}) + m_{33} \cdot (e_5 - e_{33}) + m_{35} \cdot (e_5 - e_{35}) + m_{37} \cdot (e_5 - e_{37}) + m_6 \cdot (e_5 - e_6) \quad \dots(19)$$

Total eksergi ( $E_{x.Total}$ ) masuk turbin uap

$$E_{x.Total} = E_{x.HPT} + E_{x.IPT} + E_{x.LPT} \quad \dots(20)$$

b. Total laju kerusakan eksergi ( $\dot{E}_{d.Total}$ )

High Pressure Turbine

$$\dot{E}_{d.HPT} = T_0 [m_{24} \cdot (s_{24} - s_1) + m_2 \cdot (s_2 - s_1)] \quad \dots(21)$$

Intermediate Pressure Turbine

$$\dot{E}_{d.IPT} = T_0 [m_{28} \cdot (s_{28} - s_4) + m_7 \cdot (s_7 - s_4) + m_5 \cdot (s_5 - s_4)] \quad \dots(22)$$

Low Pressure Turbine

$$\dot{E}_{d.LPT} = T_0 [m_{31} \cdot (s_{31} - s_5) + m_{33} \cdot (s_{33} - s_5) + m_{35} \cdot (s_{35} - s_5) + m_{37} \cdot (s_{37} - s_5) + m_6 \cdot (s_6 - s_5)] \quad \dots(23)$$

Total laju kerusakan eksergi ( $\dot{E}_{d.Total}$ ) turbin uap.

$$\dot{E}_{d.Total} = \dot{E}_{d.HPT} + \dot{E}_{d.IPT} + \dot{E}_{d.LPT} \quad \dots(24)$$

c. Total Kerja ( $W_{x.total}$ )

High Pressure Turbine

$$W_{x.HPT} = E_{x.HPT} - E_{d.HPT} \quad \dots(25)$$

Intermediate Pressure Turbine

$$W_{x.IPT} = E_{x.IPT} - E_{d.IPT} \quad \dots(26)$$

Low Pressure Turbine

$$W_{x.LPT} = E_{x.LPT} - E_{d.LPT} \quad \dots(27)$$

Total kerja eksergi turbin uap

$$W_{x.total} = W_{x.HPT} + W_{x.IPT} + W_{x.LPT} \quad \dots(28)$$

d. Efisiensi Eksergi ( $\eta_x$ ) turbin uap.

High Pressure Turbine

$$\eta_{x.HPT} = \frac{W_{x.HPT}}{E_{x.HPT}} \times 100\% \quad \dots(29)$$

Intermediate Pressure Turbine

$$\eta_{x.IPT} = \frac{W_{x.IPT}}{E_{x.IPT}} \times 100\% \quad \dots(30)$$

Low Pressure Turbine

$$\eta_{x.LPT} = \frac{W_{x.LPT}}{E_{x.LPT}} \times 100\% \quad \dots(31)$$

Total efisiensi eksergi turbin uap dapat dicari membagi kerja total ( $W_{x.total}$ ) dengan total eksergi ( $E_{x.Total}$ ) yang masuk turbin uap.

$$\eta_{x.total} = \frac{W_{x.total}}{E_{x.Total}} \quad \dots(32)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Penelitian

Data pengelompokan dari hasil observasi temperatur lingkungan area turbin uap terdapat empat variasi data yaitu data jam 01.00 beban 329,74 MW pada temperatur lingkungan 28°C, data jam 06.00 beban 327,69 MW pada temperatur lingkungan 29°C, data jam 13.00 beban 330,61 MW pada temperatur lingkungan 31°C dan data jam 17.00 beban 332,87 MW pada temperatur lingkungan 30°C. Berikut keempat data operasi dari layar DCS di ruang CCR PLTU serta properti termodinamika dari hasil perhitungan.

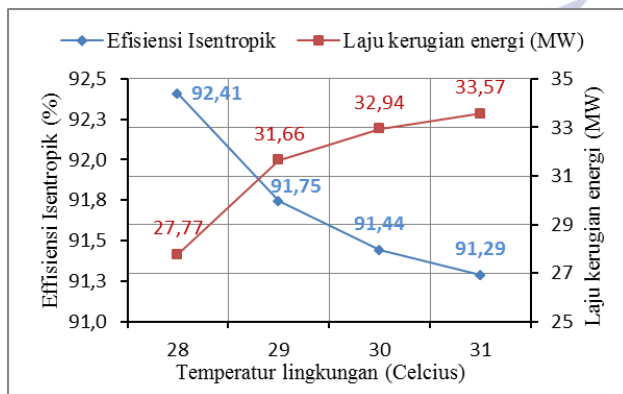
Dari keempat data tersebut dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan 1 s/d 32. Perhitungan ini menggunakan data operasi dengan variasi temperatur kondisi lingkungan sistem yang berbeda-beda. Variabel lain yang mempengaruhi perubahan data operasi seperti perubahan *heating value* bahan bakar, kebocoran sistem, kehandalan *equipment* lainnya diabaikan.

**Pembahasan**

**a. Analisa Energi**

Analisa energi turbin uap penelitian ini menggunakan perhitungan efisiensi isentropik yaitu perbandingan antara kinerja aktual sebuah peralatan dan kinerja yang dapat dicapai dibawah keadaan ideal. Keadaan ideal dicapai ketika nilai entropi masuk sama dengan keluar.

Turbin uap yang terdiri dari tiga tingkat tekanan yaitu *High Pressure Turbine*, *Intermediate Pressue Turbine* dan *Low Pressure Turbine* pada pembahasan awal evaluasi analisa energi turbin uap dilihat secara keseluruhan (*overall*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



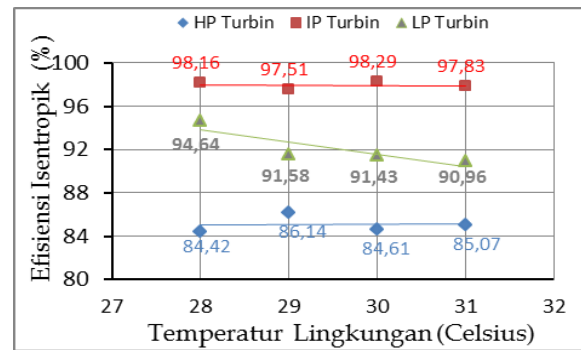
Gambar 5. Analisa Energi Turbin uap

Berdasarkan Gambar 5 diketahui efisiensi isentropik turbin uap tertinggi pada temperatur lingkungan 28°C dengan efisiensi 92,41% dan nilai terendah pada temperatur lingkungan 31°C dengan efisiensi 91,29%. Nilai rata-rata efisiensi isentropik turbin uap sebesar 91,86%.

Kemudian laju kerugian energi tertinggi terdapat pada temperatur lingkungan 31°C sebesar 33,57 MW dan terendah pada temperatur lingkungan 28°C sebesar 27,77 MW. Rata-rata laju kerugian energi turbin uap sebesar 31,11 MW.

Berdasarkan Gambar 5. dapat diketahui temperatur lingkungan mempengaruhi efisiensi isentropik turbin uap. Semakin besar temperatur kondisi lingkungan pada sistem terjadi penurunan efisiensi isentropik turbin uap. Besar penurunan efisiensi isentropik mempengaruhi besar laju kerugian energi. Semakin kecil nilai efisiensi isentropik maka laju kerugian energi turbin uap yang dihasilkan akan semakin besar.

Dalam pembahasan ini perubahan nilai efisiensi isentropik turbin uap dilakukan evaluasi lebih lanjut dengan melihat performa turbin uap dari masing-masing tingkat tekanan turbin uap, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

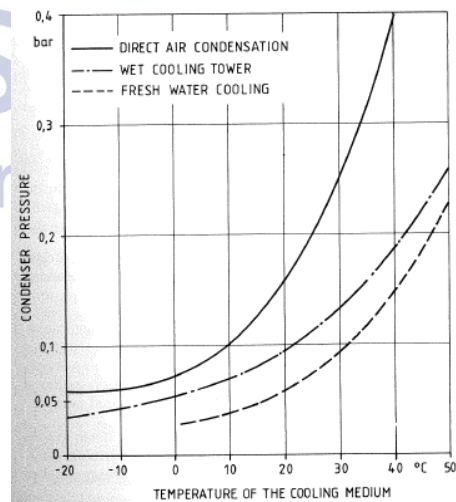


Gambar 6. Efisiensi Isentropik setiap Turbin Uap

Berdasarkan Gambar 6 diketahui bahwa nilai efisiensi isentropik HP Turbin dan IP Turbin memiliki perubahan yang cenderung konstan terhadap pengaruh temperatur lingkungan, sedangkan perubahan efisiensi isentropik pada LP Turbin mengalami penurunan signifikan.

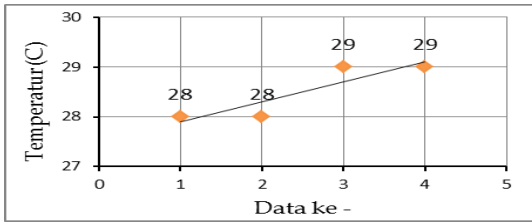
Secara teori termodinamika besar energi yang masuk kedalam sebuah sistem dipengaruhi oleh kondisi reservoir panas dan reservoir dingin. Pada HP dan IP Turbin reservoir dingin berada pada dalam sistem sedangkan pada LP Turbin reservoir dingin berada pada kondensor. Perubahan kondisi kondensor inilah yang kemudian secara tidak langsung mempengaruhi terjadinya perubahan signifikan pada performa LP Turbin.

Perubahan kondisi yang terjadi pada kondensor yaitu kevakuman. Perubahan kevakuman ini dipengaruhi oleh naik turunnya temperatur lingkungan air laut sebagai pendingin kondensor. Hal ini seperti penjelasan pada buku *Combined-cycle gas and steam turbine power plants* oleh Rolf Kehlhofer. Semakin rendah temperatur pendingin kondensor maka akan membuat tekanan vakum kondensor lebih besar dan sebaliknya, seperti penjelasan Gambar 7.



Gambar 7. Pengaruh temperatur pendingin terhadap tekanan vakum kondensor

Berikut data pengamatan di lapangan menunjukkan terjadi kenaikan temperatur air laut sebagai pendingin kondensor akibat dari kenaikan temperatur lingkungan :



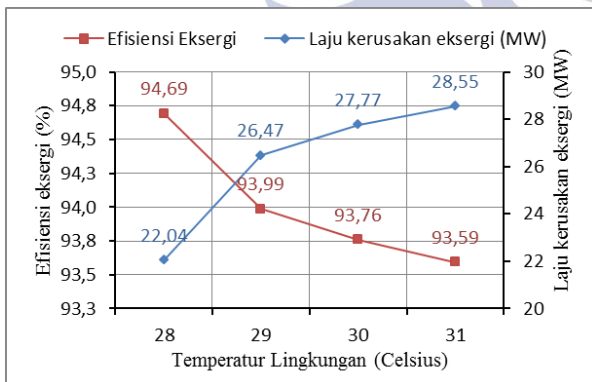
Gambar 8. Data temperatur pendingin masuk kondensor

Berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 8 dapat diketahui bahwa semakin tinggi temperatur lingkungan maka efisiensi isentropik LP Turbin semakin turun. Hal ini yang menjadi hubungan antara perubahan temperatur lingkungan dengan efisiensi isentropik Turbin Uap khususnya pada LP Turbin.

### b. Analisa Eksergi

Analisa efisiensi eksergi turbin uap pada penelitian ini dihasilkan dari perbandingan antara kerja eksergi yang dihasilkan dengan total eksergi yang masuk pada turbin uap.

Turbin uap yang terdiri dari tiga tingkat tekanan yaitu *High Pressure Turbine*, *Intermediate Pressue Turbine* dan *Low Pressure Turbine* pada pembahasan awal evaluasi analisa eksergi turbin uap dilihat secara keseluruhan (*overall*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Analisa Eksergi

Berdasarkan Gambar 9. menunjukkan pada turbin uap efisiensi eksergi tertinggi terjadi pada temperatur lingkungan 28°C dengan efisiensi 94,69% dan terendah terjadi pada temperatur lingkungan 31°C dengan efisiensi 93,60 %. Nilai rata-rata efisiensi eksergi dari turbin uap yaitu 94,08%.

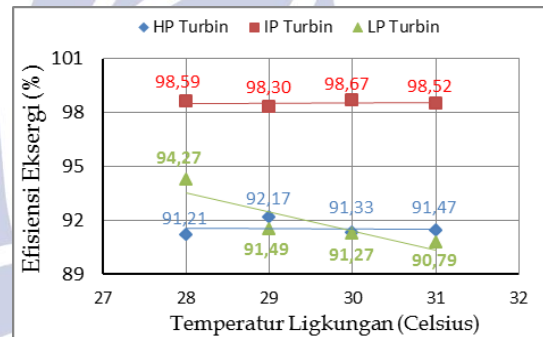
Kemudian diketahui bahwa laju kerusakan eksergi turbin uap tertinggi pada temperatur lingkungan 31°C sebesar 28,53 MW dan terendah pada temperatur lingkungan 28°C sebesar 22,04 MW. Dari data

perhitungan rata-rata total kerusakan eksergi pada turbin uap yaitu 25,98 MW.

Dari penjelasan Gambar 9. analisa eksergi dapat diketahui bahwa semakin besar temperatur lingkungan maka efisiensi eksergi semakin turun. Hal ini dikarenakan naiknya temperatur lingkungan membuat nilai batas sistem menjadi lebih kecil. Sehingga besar eksergi yang dimanfaatkan masuk dalam sistem menjadi berkurang. Sedangkan pengaruh perubahan kenaikan temperatur lingkungan berbanding lurus dengan besar laju kerusakan eksergi. Semakin besar temperatur lingkungan maka laju kerusakan eksergi semakin besar.

Kedua penjelasan diatas sama halnya dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan Ahmadi G.R dan Toghraie D (2016) dalam penelitiannya menyatakan semakin tinggi temperatur lingkungan membuat efisiensi eksergi turbin uap menjadi turun sedangkan pengaruh kenaikan temperatur lingkungan menyebabkan nilai laju kerusakan eksergi semakin besar.

Pembahasan lebih lanjut performa efisiensi eksergi turbin uap dilihat dari masing-masing tingkat tekanan turbin uap seperti yang dijelaskan pada Gambar 10.

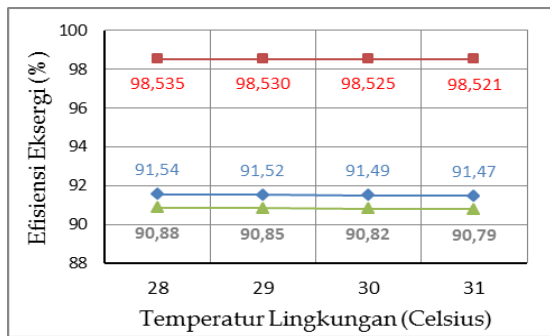


Gambar 10 Grafik efisiensi eksergi setiap turbin uap

Berdasarkan Gambar 10 diketahui efisiensi eksergi pada HP Turbin dan IP turbin mengalami naik turun berurutan yang cenderung konstan. Berbeda dengan LP Turbin efisiensi eksergi mengalami penurunan signifikan. Hal ini disebabkan eksergi keluar LP Turbin dipengaruhi oleh temperatur lingkungan dalam kondensor yang kondisinya juga berubah-ubah.

Evaluasi besar pengaruh temperatur lingkungan terhadap efisiensi eksergi penelitian ini dilakukan dengan cara menghitung efisiensi eksergi turbin uap pada data operasi yang sama dengan kondisi temperatur lingkungan yang berbeda. Hasil perhitungan evaluasi ini merupakan data ideal yang sebenarnya terjadi besar pengaruh temperatur lingkungan terhadap efisiensi eksergi turbin uap. Gambar 11 menunjukkan hasil perhitungan efisiensi eksergi setiap tingkat tekanan turbin uap pada data operasi temperatur lingkungan 31°C (data jam 12.00) dengan variasi kondisi temperatur yang berbeda.



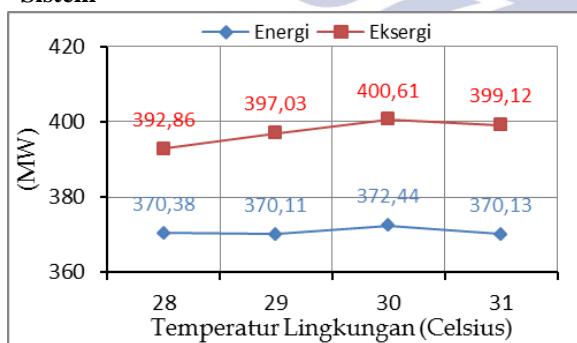


Gambar 11 Efisiensi eksergi data jam 12.00 dengan variasi temperatur lingkungan

Berdasarkan Gambar 10 dan Gambar 11 menjelaskan bahwa perbedaan pengaruh temperatur lingkungan terhadap efisiensi eksergi setiap tingkat tekanan turbin uap pada data aktual dengan data ideal (data operasi tetap). Perubahan efisiensi eksergi akibat temperatur lingkungan tidak terlalu berpengaruh signifikan.

Hal ini menunjukkan pada Gambar 10 adalah data aktual yang sebenarnya terjadi di lapangan. Pengaruh perubahan temperatur lingkungan menyebabkan perubahan yang signifikan pada LP Turbin. Berbeda pada penelitian sebelumnya oleh Ahmadi G.R dan Toghraie D (2016) dalam penelitiannya menggunakan simulasi dengan software EES (*Engineering Equation Solver*) grafik pengaruh temperatur lingkungan pengaruh tidak terlalu signifikan dari ke tiga tingkatan turbin uap. Tetapi ternyata pada penelitian ini tidak sama dengan demikian.

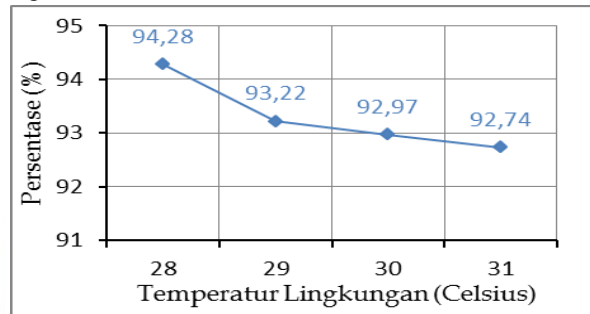
**c. Analisa Perbandingan Energi Dan Eksergi Masuk Sistem**



Gambar 17 Grafik Energi dan Eksergi masuk sistem

Berdasarkan Gambar 17 diketahui bahwa besar energi dan eksergi masuk sistem turbin uap. Nilai tertinggi energi yang masuk sistem terdapat pada temperatur lingkungan 30°C sebesar 372,44 MW dan terendah pada temperatur lingkungan 31°C sebesar 370,13 MW. Nilai rata-rata energi yang masuk sistem sebesar 370,76 MW. Sedangkan nilai tertinggi eksergi yang masuk sistem terdapat pada temperatur lingkungan 30°C sebesar 400,61 MW dan terendah pada temperatur lingkungan 28°C sebesar 392,86 MW. Nilai rata-rata eksergi yang masuk sistem sebesar 397,41 MW.

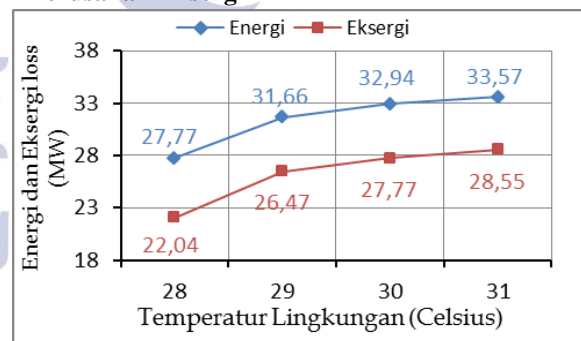
Dari penjelasan ini nilai energi yang masuk sistem selalu dibawah nilai eksergi yang masuk sistem turbin uap. Hal ini menunjukkan bahwa dari keseluruhan potensi energi yang tersedia masih ada yang belum dimanfaatkan. Jadi masih ada potensi energi yang bisa dimanfaatkan. Berikut persentase energi yang telah dimanfaatkan oleh sistem dari keseluruhan potensi energi yang tersedia.



Gambar 18 Grafik energi yang dimanfaatkan sistem

Berdasarkan Gambar 18 terlihat besar persentase energi yang dimanfaatkan oleh sistem selalu menurun. Hal ini sebanding dengan besar efisiensi dimasing-masing nilai energi dan eksergi yang total keseluruhannya juga menurun. Rata-rata energi yang dimanfaatkan masih sebesar 93,30 %. Nilai persentase ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan efisiensi energi juga berhasil ditingkatkan. Dengan diketahuinya penyebab turunya nilai efisiensi baik dari sisi energi dan eksergi maka dapat merubah juga nilai persentase energi dimanfaatkan ini dan membuat mesin pembangkit bisa bekerja secara optimal.

**d. Analisa Perbandingan Kerugian Energi Dan Kerusakan Eksergi**



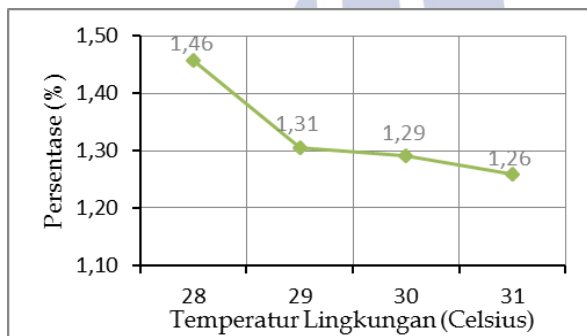
Gambar 19 Grafik Kerugian Energi dan Kerusakan Eksergi

Berdasarkan Gambar 19 diketahui perbandingan besar kerugian energi dan kerusakan eksergi sistem turbin uap. Dari penjelasan tersebut terlihat bahwa nilai kerugian energi selalu lebih tinggi daripada kerusakan eksergi. Hal ini disebabkan nilai energi yang keluar (*losses*) merupakan besar energi yang tidak dimanfaatkan oleh sistem. Besar panas yang keluar ini berasal dari nilai entalpi yang mengalami kerugian akibat dari penurunan

performa turbin. Panas yang keluar ini sesungguhnya masih bisa dimanfaatkan untuk menjadi kerja dengan memperbaiki performa sistem.

Sedangkan nilai kerusakan ini berasal dari entalpi dan entropi yang berlangsung dalam sistem saat beroperasi pada batas lingkungan. Kerusakan eksergi ini merupakan besar energi yang sudah tidak dapat kita manfaatkan lagi, sebab nilai eksergi telah hilang yang ditandai dengan terbentuk produksi entropi. Hal yang dapat menyebabkan kerusakan eksergi turbin uap berasal dari perubahan kondisi temperatur lingkungan, perpindahan panas dan gesekan.

Melihat dari perbandingan antara energi dan eksergi yang *losses* maka dapat diketahui besar peluang energi yang bisa ditingkatkan untuk masuk dalam sistem. Besar persentase energi yang masih bisa dimanfaatkan dapat diketahui dengan membagi antara besar jarak kerugian energi dan kerusakan eksergi dengan total potensi energi yang masuk sistem, hasil ini dapat dilihat pada Gambar 20



Gambar 20 Grafik potensi energi yang bisa dimanfaatkan

Berdasarkan Gambar 20 terlihat besar persentase peluang energi *losses* yang bisa dimanfaatkan oleh sistem menurun seperti besar efisiensi energi sistem. Hal ini menunjukkan semakin tinggi temperatur lingkungan besar peluang energi yang masih bisa dimanfaatkan semakin turun. Besar peluang energi yang masih bisa ditingkatkan rata-rata 1,33% dari total potensi energi rata-rata yang tersedia.

#### SIMPULAN

- Hasil analisa energi sebagai berikut :
  - Efisiensi isentropik rata-rata pada turbin uap didapatkan sebesar 91,48 % dengan laju kerugian energi rata-rata pada turbin uap sebesar 31,11 MW.
  - Performa turbin uap dipengaruhi oleh temperatur lingkungan dimana pengaruh lingkungan terbesar pada LP Turbin. Kondisi ini diperoleh pendingin kondensor mengalami kenaikan akibat terjadinya kenaikan temperatur lingkungan sehingga menyebabkan tekanan vakum pada kondensor turun.
- Hasil analisa eksergi sebagai berikut :
  - Efisiensi eksergi rata-rata pada turbin uap didapatkan sebesar 94,08 % dengan laju kerusakan eksergi rata-rata pada turbin uap sebesar 25,98 MW.

- Penurunan efisiensi eksergi disebabkan karena temperatur kenaikan lingkungan dan perubahan data operasi. Perubahan data operasi ini dipengaruhi oleh banyak faktor seperti pembakaran bahan bakar di boiler, *heating value* bahan bakar, peralatan setiap pembangkit.

#### 3. Hasil evaluasi pemanfaatan energi sebagai berikut :

- Besar energi yang masuk sistem rata-rata sebesar 370,76 MW dari total besar eksergi sebagai potensi energi masuk sistem rata-rata sebesar 397,41 MW.
- Persentase energi yang masih termanfaatkan oleh sistem rata-rata sebesar 93,30 % dengan besar peluang energi yang masih bisa ditingkatkan rata-rata 1,33% dari total potensi energi yang tersedia.

#### SARAN

- Perlu kajian lanjutan untuk menjaga agar temperatur pendingin kondensor tidak terpengaruh oleh temperatur lingkungan, seperti mempertimbangan lokasi kedalaman *input* pipa pendingin di laut, mengkaji pengaruh penambahan isolasi pada pipa pendingin yang terpancar oleh sinar matahari.
- Kerusakan eksergi akibat ireversibilitas bisa dikurangi dengan cara mengurangi besar gesekan yang mungkin terjadi pada bantalan dengan memperhatikan sistem pelumasan. Kemudian juga bisa pengecekan kebersihan bagian sudu-sudu turbin.
- Perlu dilakukan pemeriksaan beberapa sensor parameter disetiap peralatan pembangkit, sudah banyak terjadi kesalahan dalam pembacaan dan perlu perbaikan.
- Perlu dilakukan penambahan parameter pengukuran laju massa di setiap masuk keluar komponen, sehingga dalam menganalisis menghasilkan nilai yang lebih akurat.
- Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan analisa *thermoekonomi* tentang penghematan energi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, G. R dan Toghraie, D, (2016). "*Energy And Exergy Analysis Of Montazeri Steam Power Plant In Iran*". *Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.*
- Data Statistik PLN. 2017. "Rencana Pembangunan Pembangkit yang dipenuhi PLN di Indonesia tahun 2017-2026". PT. PLN (PERSERO).
- Ismantoro, A . P, (2016). "Analisis Laju Kerusakan Exergy Dan Efisiensi Exergy Mesin PLTGU PT. Indonesia Power Unit Pembangkitan Semarang". Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Sanata Dharma :Yogyakarta.
- Karyadi , A dan Rangkuti, C, (2016) "Analisa Energi Dan Eksergi Pembangkit Listrik Tenaga Uap Banten 3 Lontar", Jurusan Teknik Mesin,



Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti.

- Kehlhofer, R (1997) “*Combined-cycle gas and steam turbine power plants*”: South Sheridan.
- Moran, M. J. dan Shapiro, H. N, “*Fundamentall of Engineering Thermodynamics 4<sup>th</sup> Edition*”, John Wiley & Sons: New York.
- Manual Book “PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar 2x350 MW Power Plant Turbin Operation”.
- Manual Book “PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar 2x350 MW Power Plant Boiler Operation”
- Priambodo, D dan Dewita, E, (2015). “Analisis Energi Dan Eksergi Pada Sistem HTR-10 Siklus Turbin Uap”. Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710.
- Satrio, Pujo dan Nasruddin (2015). “Analisa Energi, Exergi dan Optimasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Super Kritikal 660 MW”, Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Santoso, D dan Basri, Hasan, (2011). “ Analisis Eksergi Siklus Kombinasi Turbin Gas-Uap Unit PLTGU Inderalaya”. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Jl. Raya Inderalaya Km.32, Inderalaya.
- Yunus A. Cengel and Michael A.Boles. (2002) “*Thermodynamics An Engineering Approach 5<sup>th</sup> Edition*”. McGraw Hill Companies, New York.

