

**ANALISIS PENGARUH KAPASITAS PEMBEBANAN PADA EFISIENSI
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) PT. INDONESIA POWER
JERANJANG OPERATION AND MAINTENANCE UNIT (OMU) 3x25 MW**
*Analysis of the Effect of Load Capacity on the Efficiency of the Steam Power Plant (PLTU) of
PT. Indonesia Power Janjang Operation and Maintenance Unit (OMU) 3x25 MW*

Afi Sepiyandi¹, Agung Budi Muljono², I Nyoman Wahyu S.³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram

¹afi.sepiyandii@gmail.com, ²agungbm@yahoo.com, ³nwahyus@unram.ac.id

ABSTRAK

Pertumbuhan ekonomi dan pembangunan di Indonesia secara langsung berdampak pada meningkatnya kebutuhan energi listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara merupakan jenis pembangkit terbesar yang dikembangkan oleh Pemerintah Indonesia, salah satunya PLTU Jeranjang Operation and Maintenance Unit (OMU) 3x25 MW sebagai bagian dari sistem kelistrikan Lombok yang mulai beroperasi pada tahun 2010. Hal tersebut perlu dilakukan evaluasi terhadap kinerja dari PLTU, terutama pada komponen *boiler*, turbin, generator, dan pembangkitan PLTU. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh perubahan kapasitas pembebanan terhadap efisiensi *boiler*, turbin, generator, sistem PLTU. Penelitian ini dilakukan dengan variasi kapasitas pembebanan 36, 48, 71, dan 100%. Hasil data operasi dihitung secara teoritis dan matematis dengan metode efisiensi daya termal input-output menggunakan aplikasi ChemicalLogic SteamTab. Hasil Penelitian menunjukkan, peningkatan kapasitas pembebanan pada *boiler* dan turbin menyebabkan nilai efisiensi semakin meningkat, dengan nilai koefisien korelasi (R) masing-masing didapatkan sebesar 0,9179 dan 0,8969, sehingga hubungan antar variabel sangat tinggi. Peningkatan kapasitas pembebanan pada generator terhadap nilai efisiensi berpengaruh sangat kecil, dengan nilai koefisien korelasi (R) didapatkan sebesar 0,0008, sehingga hubungan antar variabel dapat dianggap tidak ada. Pengaruh peningkatan kapasitas pembebanan terhadap efisiensi pembangkitan PLTU Jeranjang Unit 3 semakin meningkat, dengan nilai koefisien korelasi (R) didapatkan sebesar 0,8879, sehingga hubungan antar variabel tinggi. Nilai efisiensi pembangkitan PLTU tertinggi didapat pada pembebanan 25% pada beban 25,46 MW.

Kata Kunci: *Boiler*, Turbin, Generator, Kapasitas Pembebanan, *ChemicalLogic SteamTab*.

ABSTRACT

Economic growth and development in Indonesia directly have an impact on increasing electricity needs. Coal Steam Power Plant (PLTU) is the largest type of plant developed by the Indonesian government, one of which is PLTU Jeranjang Operation and Maintenance Unit (OMU) 3x25 MW as part of the Lombok electricity system which began operating in 2010. This is necessary to evaluate the performance of the PLTU, especially in the components of boiler, turbine, generator, and power plant systems. The purpose of this research is to know the influence of the change of load capacity on the efficiency of boiler, turbine, generator, and PLTU systems. This research was doing with variations in load capacity 36, 48, 71, and 100%. Operating data results are calculated theoretically and mathematical with the input-output thermal power efficiency method using the ChemicalLogic SteamTab application. The results showed, increasing the load capacity of the boiler and turbine causes the efficiency value to increase, with the correlation coefficient (R) value each obtained by 0.9179 and 0.8969, so that the relationship between variables is very high. Increasing the load capacity on the generator on the efficiency value has a very small effect, with the correlation coefficient (R) value obtained at 0.0008, so that the relationship between variables can be considered non-existent. The effect of increase load capacity on the efficiency of PLTU Jeranjang Unit 3 is increasing, with the correlation coefficient value (R) obtained by 0.8879, so that the relationship between variables high. The highest PLTU efficiency value was obtained at 25% at load 25.46 MW.

Keywords: *Boiler*, Turbine, Generator, Load capacity, *ChemicalLogic SteamTab*

PENDAHULUAN

PLTU Jeranjang dibangun pada tahun 2009 dan mulai beroperasi pada tahun 2010 dengan kapasitas 3x25 MW. Melihat berbagai permasalahan yang timbul pada banyak pembangkit, maka dirasa penting untuk melakukan evaluasi terhadap kinerja dari PLTU tersebut, khususnya efisiensinya. Untuk menjaga nilai efisiensi, dan menghitung kesetimbangan daya pada seluruh sistem PLTU dengan menggunakan metode perhitungan analisis distribusi daya termal dengan kondisi kapasitas pembebanan yang berbeda. Maksud dari distribusi daya disini adalah bagaimana daya input dari bahan bakar terdistribusi di komponen-komponen PLTU. Penelitian ini menggunakan aplikasi *ChemicalLogic SteamTab*. Aplikasi *ChemicalLogic SteamTab* menyediakan data akurat dari daftar lengkap sifat termodinamika dan fisik untuk air dan uap sehingga dapat mempermudah perhitungan efisiensi. Perhitungan efisiensi ini diharapkan memperoleh efisiensi pembangkit dari PLTU serta kinerja dari masing-masing komponen utamanya sehingga terlihat kontribusi masing-masing komponen.

Dwi dkk. 2019, melakukan analisis perhitungan efisiensi *boiler* kapasitas 55 ton/jam di PT. PJB (Pembangkit Jawa Bali) PLTU Ketapang 2x10 MW. Perhitungan nilai efisiensi *boiler* menggunakan 2 metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*), memperoleh perbandingan metode langsung (*direct Method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*) dalam perhitungan efisiensi *boiler*, memperoleh penyebab terjadinya penurunan dan kenaikan nilai efisiensi *boiler*. Setelah dilakukan perhitungan menggunakan dua metode tersebut, mendapatkan dua nilai yang berbeda, menggunakan metode langsung (*direct method*) sebesar 75% dan metode tidak langsung sebesar 78 %. Namun perhitungan menggunakan kedua metode tersebut tidak sesuai dengan standar efisiensi desain sebesar 80%.

Syukrillah dkk. 2019, melakukan analisis perhitungan efisiensi energi di sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) PT. Harjohn Timber Kubu Raya. PLTBm PT. Harjohn Timber menggunakan generator turbin uap berkapasitas 7,5 MW. Penelitian ini

bertujuan untuk membandingkan nilai spesifikasi efisiensi komponen peralatan utama PLTBm tersebut terhadap nilai rata-rata operasi efisiensi. Metode perhitungan yang dilakukan adalah menggunakan program aplikasi termodinamika *ChemicalLogic SteamTab* dalam mencari parameter nilai entalpi. Setelah dilakukan analisa didapat nilai efisiensi *boiler* sebesar 82%, efisiensi turbin uap dan generator secara teknis sebesar 94,5%. Nilai kerja turbin yang paling tinggi berdasarkan nilai rata-rata operasi, yaitu pada bulan penelitian ke-9, dengan nilai sebesar 5831 kW dari nilai spesifikasi 7088 kW. Sedangkan nilai operasi rata-rata efisiensi generator yang paling tinggi mencapai 93,78 %, terjadi pada bulan penelitian ke-2 dan efisiensi terendah saat penelitian pada bulan ke-8, dengan nilai 81,05%. Apabila nilai operasi rata-rata efisiensi turbin dibandingkan dengan nilai spesifikasi, maka efisiensi turbin di Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) PT. Harjohn Timber turun sebesar $\pm 12\%$. Sedangkan nilai rata-rata operasi generator mengalami penurunan tertinggi sebesar $\pm 13,5\%$ dan terendah $\pm 1,5\%$.

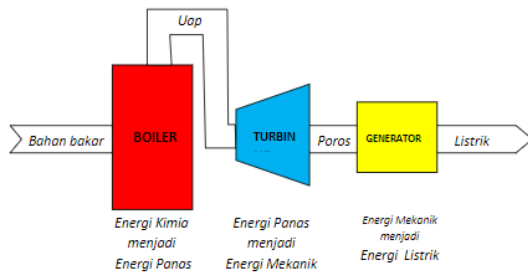
Purnomo & Effendy, 2018, melakukan penelitian dengan memvariasi perubahan kenaikan kapasitas pembebanan saat PLTU sedang beroperasi yaitu kapasitas pembebanan 75%, 85% dan 100%. Hasil data operasi dihitung secara teoritis dan matematis dengan metode analisa termodinamika. Hasil penelitian menunjukkan (1) terdapat pengaruh kenaikan kapasitas pembebanan terhadap efisiensi isentropis turbin, berturut-turut dari kapasitas pembebanan 75, 85 dan 100% memiliki efisiensi sebesar 89,02, 90,42 dan 91,77%. (2) Terdapat pengaruh kapasitas pembebanan terhadap efisiensi turbin generator. Nilai efisiensi turbin generator berturut-turut dari beban 75, 85 dan 100% yaitu 86,02, 87,2 dan 88,64% sedangkan untuk generator, pengaruh kapasitas pembebanan tidak berpengaruh besar terhadap efisiensinya yaitu 95,32 95,45 dan 95,98%.

LANDASAN TEORI

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sistem pembangkit listrik dengan

memanfaatkan energi panas bahan bakar untuk diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan uap sebagai fluida kerjanya. Pada prinsipnya, energi panas batu bara sebagai bahan bakar yang terbakar di *boiler* digunakan untuk memanaskan air menjadi uap panas lanjut. Kemudian oleh turbin, energi panas uap diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran turbin. Karena turbin dan generator di kopel, maka generator ikut berputar sehingga generator dapat menghasilkan listrik. PLTU Jeranjang memiliki 3 Unit Pembangkit dengan kapasitas 25 MW



Gambar 1. Proses konversi energi pada PLTU (Murdani dkk., 2014)

Efisiensi Boiler

Efisiensi *boiler* adalah sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara supply energi masuk ke dalam *boiler* dengan energi keluaran yang dihasilkan oleh *boiler*. Unjuk kerja pada *boiler* mempunyai parameter seperti rasio dan efisiensi yang berkurang terhadap waktu. Hal tersebut terjadi karena buruknya pada proses pembakaran, dan buruknya kinerja *boiler* dipengaruhi oleh buruknya kualitas bahan bakar dan air. Metode yang digunakan dalam melakukan perhitungan efisiensi pada *boiler*, yaitu metode langsung (input–output) karena nilai efisiensinya didapat dari pembagian antara keluaran/output (steam) dengan panas masuk/input (bahan bakar). Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta_{Boiler} = \frac{m_{uap} (h_{main\ steam} - h_{feedwater})}{q \times GCV} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

m_{uap} : Laju aliran massa uap (kg/jam)
 $h_{main\ steam}$: Entalpi main steam (kJ/kg)
 $h_{feedwater}$: Entalpi air umpan masuk (kJ/kg)
 q : Debit kebutuhan bahan bakar (kg/jam)

GCV : Gross Calorific Value atau nilai kalor spesifik bahan bakar (kKal/kg)

Efisiensi Turbin Uap

Efisiensi merupakan rasio antara energi yang dibutuhkan (*Inlet*) dengan energi yang dihasilkan (*Outlet*). Pada turbin uap PLTU dalam perhitungan efisiensi menggunakan perbandingan kerja turbin aktual dan kerja turbin isentropik yang dinamakan dengan efisiensi isentropik turbin (Samosir et al., 2019).

$$\eta_{Turbin} = \frac{W_{TA}}{W_{TS}} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

$$W_{TA} = (h_1 - h_{2a}) \quad (3)$$

$$W_{TS} = (h_1 - h_{2s}) \quad (4)$$

Nilai entalpi *inlet* (h_1) dan Entalpi aktual (h_{2a}) dapat diperoleh secara langsung melalui tekanan dan temperatur yang telah diperoleh dari data lapangan dan dicari didalam tabel termodinamika, namun untuk entalpi isentropik (h_{2s}) dipengaruhi oleh fraksi uap (x). Rumus untuk mencari h_{2s} yaitu:

Entropi outlet:

$$s_1 = s_2$$

Fraksi uap (x):

$$x = \frac{s_2 - s_f}{s_g - s_f} \quad (5)$$

Entalpi isentropik (h_{2s}):

$$h_s = h_f + x(h_g - h_f) \quad (6)$$

Keterangan:

η_{Turbin} : Efisiensi turbin (%)

W_{TA} : Kerja turbin aktual (kJ/kg)

W_{TS} : Kerja turbin isentropik atau ideal (kJ/kg)

h_1 : Entalpi *steam inlet* turbin (kJ/kg)

h_{2a} : Entalpi *steam outlet* aktual turbin (kJ/kg)

h_{2s} : Entalpi *steam outlet* isentropik turbin (kJ/kg)

s_1 : Entropi *inlet* turbin

s_2 : Entropi *outlet* turbin

x : Fraksi uap

h_f : Entalpi cairan jenuh (kJ/Kg)

h_{fg} : Entalpi evaporasi (kJ/Kg)

h_g : Entalpi uap (kJ/Kg)

s_f : Entropi cairan jenuh (kJ/kg.K)

s_g : Entropi uap (kJ/kg.K)

s_f : Entropi evaporasi (kJ/kg.K)

Efisiensi Generator

Efisiensi generator merupakan perbandingan antara daya keluaran atau daya yang dibangkitkan generator dengan daya masukan generator. Daya masukan generator sama dengan daya yang dihasilkan oleh turbin uap karena turbin uap dengan generator dikopel dan bekerja 4emperu. Untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh turbin dapat dihitung dengan perhitungan entalpi.

$$P_{Tactual} = (W_{TA} \times m) \times (1 + a) \quad (7)$$

$$\eta_{Generator} = \frac{\text{beban}}{P_{Tactual}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan:

- $\eta_{Generator}$: Efisiensi generator (%)
- Beban : Daya generator (MW)
- $P_{Tactual}$: Daya aktual turbin (MW)
- W_{TA} : Kerja turbin aktual (kJ/Kg)
- m : Laju aliran *Steam flow* (Kg/jam)
- a : Losses

Interpolasi Linear

Interpolasi merupakan suatu metode untuk menentukan nilai antara dua nilai yang telah diketahui. Interpolasi *Linear* merupakan metode yang digunakan untuk menentukan nilai antar dua Persamaan *linear*. Interpolasi *Linear* digunakan untuk mencari nilai parameter (*Properties*) yang tersedia pada tabel suhu dan tabel tekanan. Interpolasi dua titik menggunakan garis lurus dengan titik (x_0, y_0) dan (x_1, y_1) . Teknik interpolasi *linear* digunakan untuk mencari nilai dalam tabel termodinamika diantara dua parameter. Interpolasi *Linear* bisa digunakan untuk mencari suhu (T), Tekanan (P), entalpi fluida jenuh (h_f), entalpi penguapan/evaporasi (h_{fg}), entalpi uap jenuh (h_g), entropi (s). Selain itu interpolasi linr digunakan mencari nilai entalpi uap kondisi aktual (h_{2a}) karena entalpi uap $h_g = h_{2a}$ (Munir, 2003). Rumus Interpolasi *Linear*:

$$P(x) = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \times (x - x_0) + y_0 \quad (9)$$

Analisis Regresi

Analisis regresi dapat didefinisikan sebagai metode statistika yang digunakan untuk mengetahui hubungan fungsional linear antara satu variabel respon dengan satu variabel 4emperu. Kata variabel didefinisikan

sebagai karakteristik dari objek yang diteliti. Terdapat dua jenis variabel dalam analisis regresi yaitu variabel respon atau disebut dengan variabel dependen (Y) dan variabel 4emperu atau disebut variabel independent (X). Variabel respon (Y) dinyatakan juga sebagai variabel yang dipengaruhi dan variabel 4emperu (X) dinyatakan juga sebagai variabel yang mempengaruhi. (Suyono, 2015)

$$Y = a + bx$$

Keterangan:

Y = Garis regresi atau variabel response

x = Variabel bebas atau predictor

a = Konstanta

b = Koefisien regresi

Koefisien Korelasi

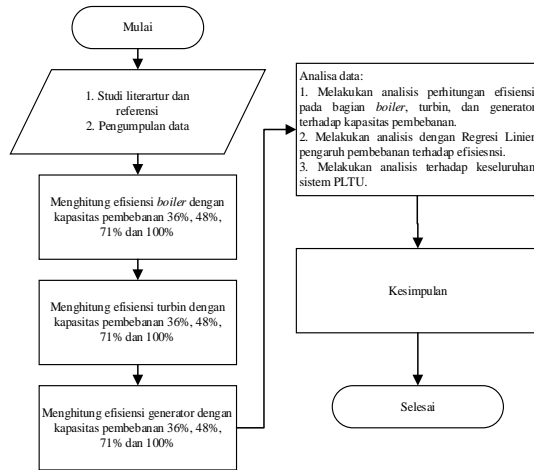
Koefisien korelasi adalah nilai yang menunjukkan kuat atau tidaknya hubungan linier antar dua variabel. Korelasi ini biasa dilambangkan dengan huruf r, yang nilainya berada di rentang -1 sampai +1. Nilai r yang mendekati -1 atau +1 menunjukkan hubungan yang kuat di antara dua variabel tersebut, sementara nilai r yang mendekati 0 mengindikasikan hubungan yang lemah. Jika koefisien korelasi menunjukkan hasil positif, maka kedua variabel mempunyai hubungan searah. (Sarwono, 2006)

Tabel 1 Kondisi Koefisien Korelasi

Kondisi	Keterangan
<0,20	Hubungan dapat dianggap tidak ada
0,20 – 0,40	Hubungan ada tetapi rendah
>0,40 – 0,70	Hubungan cukup
>0,70 – 0,90	Hubungan tinggi
>0,90 – 1,00	Hubungan sangat tinggi

METODOLOGI

Metodologi penelitian merupakan tahapan-tahapan dalam menyelesaikan penelitian, Adapun tahapan-tahapan penelitian dapat dilihat pada flowchart Gambar 2:



Gambar 2 Flowchart Penelitian

1. Studi Literatur

Untuk memperoleh data dan informasi tentang efisiensi pada komponen utama PLTU yaitu *boiler*, turbin, dan generator baik berupa ebook, jurnal dan sebagainya untuk membantu penyelesaian tugas akhir.
2. Pengumpulan Data

Mengumpulkan data-data yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Data-data diperoleh di DCS PLTU Jeranjang OMU Unit 3 dengan kondisi kapasitas pembebanan yang telah ditentukan.
3. Pengolahan Data

Pengolahan data yang dilakukan untuk mencapai tujuan yang direncanakan:

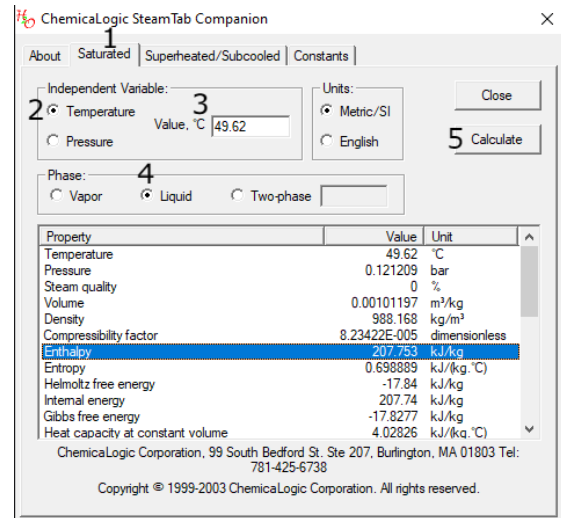
 - a. Menghitung nilai efisiensi dari *boiler* dengan kapasitas pembebanan.
 - b. Menghitung nilai efisiensi dari turbin dengan kapasitas pembebanan.
 - c. Menghitung nilai efisiensi dari generator dengan kapasitas pembebanan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perhitungan Efisiensi *Boiler* Dengan Kapasitas Pembebanan

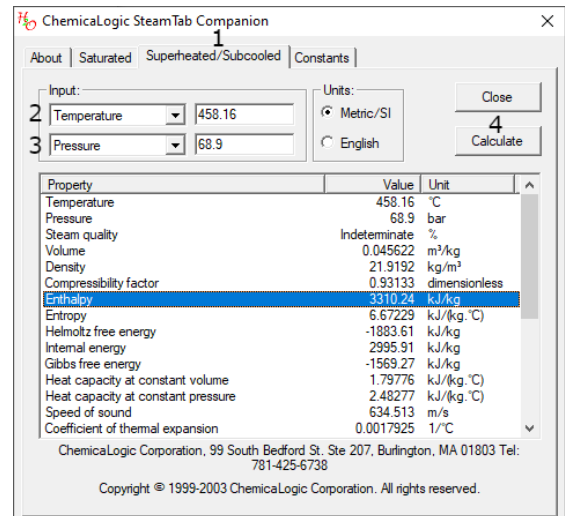
Menghitung nilai entalpi feedwater dengan menggunakan aplikasi ChemicalLogic SteamTab berdasarkan nilai 5emperature

feedwater yang diketahui sebesar 49,62°C pada Gambar 3.



Gambar 3 Tampilan ChemicalLogic SteamTab mencari entalpi feedwater

Menghitung nilai entalpi main steam dengan menggunakan aplikasi ChemicalLogic SteamTab berdasarkan nilai temperature dan pressure main steam pada Gambar 4.



Gambar 4 Tampilan ChemicalLogic SteamTab mencari entalpi main steam

Perhitungan efisiensi *boiler* pada pembebanan 9,19 MW:

Diketahui:

$$m_{\text{uap}} = 39,27 \frac{\text{ton}}{\text{jam}} \times 1.000 = 39.270 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}$$

$$q = 11,87 \text{ ton/jam} \times 1.000 = 11.870 \text{ kg/jam}$$

$$h_{\text{feedwater}} = 207,75 \text{ kJ/kg} \times 0,24 = 49,86 \text{ kKal/kg}$$

$$h_{\text{mainsteam}} = 3.310,24 \text{ kJ/kg} \times 0,24 = 794,46 \text{ kKal/kg}$$

$$\eta_{\text{Boiler}} = \frac{m_{\text{uap}} (h_{\text{main steam}} - h_{\text{feedwater}})}{q \times \text{GCV}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{39.270 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \left(794,46 \frac{\text{kKal}}{\text{kg}} - 49,86 \frac{\text{kKal}}{\text{kg}} \right)}{11.870 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 4.083 \frac{\text{kKal}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

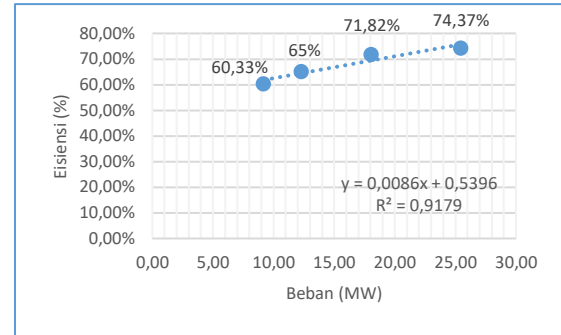
$$\eta = 60,33\%$$

Hasil perhitungan efisiensi boiler dengan Persamaan (1) pada kapasitas pembebanan yang lain dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler

Beban (MW)	Beban (%)	Parameter					Efisiensi (%)
		m_{uap} (ton/jam)	$h_{\text{feed water}}$ (kJ/kg)	$h_{\text{main steam}}$ (kJ/kg)	q (ton/jam)	GCV (kKal/kg)	
9,19	36	39,27	207,75	3.310,24	11,87	4.083	60,33
12,31	48	48,13	356,45	3.406,63	13,27	4.083	65
18,08	71	71,09	736,71	3.450,50	15,79	4.083	71,82
25,46	100	99,35	805,60	3.505,49	21,2	4.083	74,37

Tabel 4.2 dengan nilai kalori batubara (GCV) yang sama yaitu 4.083 kKal/kg, jumlah konsumsi batubara (q) semakin meningkat untuk pembebanan yang diatur semakin meningkat. Pemakaian batubara meningkat menghasilkan steam flow yang akan disalurkan ke turbin disetiap kenaikan beban ikut meningkat. Peningkatan steam flow tersebut menyebabkan nilai entalpi steam flow yang dihasilkan dari pemanasan air umpan (feedwater) ikut meningkat. Nilai efisiensi boiler didapatkan semakin meningkat, hal ini berbanding lurus dengan kenaikan kapasitas beban yang diatur.

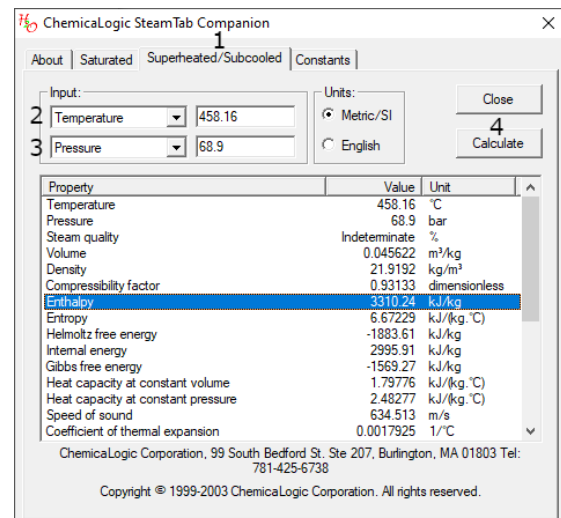


Gambar 5 Grafik hubungan kapasitas pembebanan terhadap efisiensi boiler

Gambar 5 secara matematis dapat dimodelkan dengan persamaan regresi linear yaitu $y = 0,0086x + 0,5396$ dengan $R^2 = 0,9179$. Nilai R-squared sebesar 0,9179 hal ini menunjukkan bahwa hubungan variabel sangat tinggi sehingga dari kenaikan beban mempengaruhi peningkatan efisiensi pada boiler.

2. Perhitungan Efisiensi Turbin Dengan Kapasitas Pembebanan

Menghitung nilai entalpi dan entropi steam inlet turbin dengan menggunakan aplikasi ChemicalLogic SteamTab berdasarkan nilai temperature dan pressure steam inlet turbin yang diketahui masing-masing sebesar 458,16°C dan 68,90 bar pada Gambar 6.



Gambar 6 Tampilan aplikasi ChemicalLogic SteamTab mencari entalpi dan entropi steam inlet turbin

Perhitung nilai entalpi isentropik dicari menggunakan parameter temperature steam outlet dengan menentukan parameter entalpi cair-jenuh (hf), entalpi penguapan (hfg), entalpi uap jenuh (hg), entropi cair-jenuh (sf) dan entropi uap jenuh (sg) dari tabel termodinamika (lampiran) menggunakan Persamaan (9) dan menentukan nilai fraksi uap (x) dengan Persamaan (5) sehingga didapat nilai entalpi isentropik (hs) menggunakan Persamaan (6).

Berdasarkan $T_{out} = 41,76 \text{ }^\circ\text{C}$

$$h_f = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \times (x - x_0) + y_0$$

$$h_f = 174,92 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 2.402,51 \text{ kJ/kg}$$

$$h_g = 2577,43 \text{ kJ/kg}$$

$$s_f = 0,60 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$s_g = 8,22 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$x = 0,80$$

$$h_s = 2.088,58 \text{ kJ/kg}$$

Perhitungan efisiensi isentropik turbin menggunakan Persamaan (2) dengan menentukan nilai dari Kerja Aktual Turbin (W_{TA}) dan Kerja Isentropis Turbin (W_{TS}) dengan menggunakan Persamaan (3) dan (4).

$$W_{TA} = (h_1 - h_{2a})$$

$$W_{TA} = (3.310,24 \text{ kJ/kg} - 2.577,43 \text{ kJ/kg})$$

$$W_{TA} = 732,81 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{TS} = (h_1 - h_{2s})$$

$$W_{TS} = (3.310,24 \text{ kJ/kg} - 2.088,58 \text{ kJ/kg})$$

$$W_{TS} = 1.221,66 \text{ kJ/kg}$$

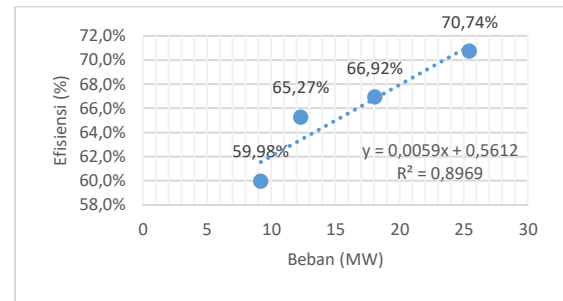
Hasil perhitungan efisiensi turbin dengan Persamaan (2) pada kapasitas pembebanan yang lainnya dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Perhitungan Turbin

Beban (MW)	Beban (%)	Parameter					Efisiensi (%)
		h ₁ (kJ/kg)	h _{2a} (kJ/kg)	h _{2s} (kJ/kg)	W _{TA} (kJ/kg)	W _{TS} (kJ/kg)	
9,19	36	3.310,24	2.577,43	2.088,58	732,81	1.221,66	59,98
12,31	48	3.406,63	2.582,95	2.144,70	823,68	1.261,93	65,27
18,08	71	3.450,55	2.585,35	2.157,70	865,15	1.292,80	66,92
25,46	100	3.505,49	2.593,35	2.216,15	912,14	1.289,34	70,74

Tabel 3 nilai efisiensi turbin meningkat seiring dengan kenaikan kapasitas pembebanan. Beban yang digunakan yaitu sebesar 9,19; 12,31; 18,08; dan 25,46 MW.

Nilai efisiensi yang dihasilkan 59,98; 65,27; 66,92; dan 70,74%. Nilai efisiensi turbin dipengaruhi oleh besar kecilnya perbandingan dari kerja turbin aktual terhadap kerja turbin isentropik. Nilai kerja turbin aktual didapat dari selisih entalpi steam inlet turbin dengan entalpi uap jenuh atau entalpi outlet aktual turbin, sedangkan untuk kerja turbin isentropik selisih antara entalpi steam inlet turbin dengan entalpi outlet isentropik turbin. Nilai entalpi yang masuk semakin besar kedalam turbin maka kerja turbin aktual semakin meningkat, begitupula pada kerja turbin isentropis.



Gambar 7 Grafik Hubungan Kapasitas Pembebanan Terhadap Efisiensi Turbin

Gambar 7 secara matematis dapat dimodelkan dengan persamaan regresi linear yaitu $y = 0,0059x + 0,5612$ dengan $R^2 = 0,8969$. Nilai R-squared sebesar 0,8969 hal ini menunjukkan bahwa hubungan variabel tinggi sehingga dari kenaikan beban mempengaruhi peningkatan efisiensi pada turbin.

3. Perhitungan Efisiensi Generator Dengan Kapasitas Pembebanan

Tabel 4 Hasil Pengamatan Parameter Generator Pada Kapasitas Pembebanan

Parameter	Data			
Beban (MW)	9,19	12,31	18,08	25,46
Steam flow (ton/jam)	39,27	48,13	71,09	99,35
Kerja Aktual Turbin (kJ/kg)	732,81	823,68	865,15	912,14
Losses	0,28	0,60	0,41	0,21

Mencari nilai $P_{Tactual}$ menggunakan Persamaan 7 dengan data pada Tabel 4.

$$P_{Tactual} = (W_{TA} \times m) \times (1 + a)$$

$$m_{uap} = 39,27 \text{ ton/jam} \times 1.000 = 39.270 \text{ kg/jam}$$

$$P_{Tactual} = (W_{TA} \times m) \times (1 + a)$$

$$P_{Tactual} = (732,81 \text{ kJ/kg} \times 39.270 \text{ kg/jam}) \times (1 + 0,28)$$

$$P_{Tactual} = 36.834.983,54 \text{ kJ/jam}$$

$$P_{Tactual} = \frac{36.834.983,54 \text{ kJ/jam} \times 2,778 \times 10^{-4}}{1.000}$$

$$P_{Tactual} = 10,23 \text{ MW}$$

Perhitungan efisiensi generator sebagai berikut:

$$\eta_{Generator} = \frac{\text{beban}}{P_{Tactual}} \times 100\%$$

$$\eta_{Generator} = \frac{9,19 \text{ MW}}{10,23 \text{ MW}} \times 100\%$$

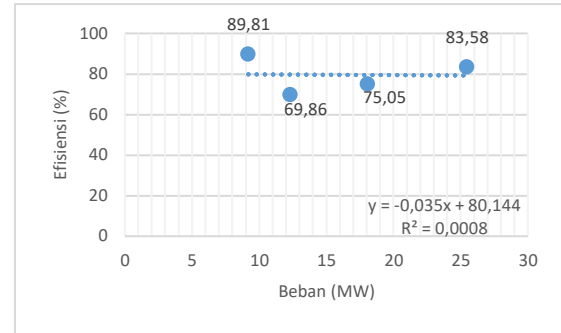
$$\eta_{Generator} = 89,81\%$$

Hasil perhitungan efisiensi generator dengan menggunakan Persamaan (8) pada kapasitas pembebanan yang lainnya dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 5.

Tabel 5 Hasil Perhitungan Efisiensi Generator Pada Kapasitas Pembebanan

Beban (MW)	Beban (%)	Parameter				Efisiensi (%)
		Steam flow (ton/jam)	Kerja turbin aktual (kJ/kg)	Losses	Daya turbin aktual (MW)	
9,19	36	39,27	732,81	0,28	10,23	89,81
12,31	48	48,13	823,68	0,60	17,62	69,86
18,08	71	71,09	865,15	0,41	24,09	75,05
25,46	100	99,35	912,14	0,21	30,46	83,58

Nilai efisiensi generator yang didapatkan dari kapasitas pembebanan yang semakin meningkat mengalami perubahan yang fluktuatif. Efisiensi tertinggi didapatkan pada beban 9,19 MW sebesar 89,81% dan efisiensi terendah pada beban 12,31 MW sebesar 69,86%. Nilai efisiensi generator yang fluktuatif disebabkan oleh losses steam yang terjadi pada sisi turbin yang dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai losses steam yang bernilai fluktuatif dikarenakan perhitungan losses steam yang terjadi menggunakan pendekatan dengan kurva input-output coal flow terhadap beban.



Gambar 8 Grafik Hubungan Kapasitas Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator

Gambar 8 secara matematis dapat dimodelkan dengan persamaan regresi linear yaitu $y = -0,035x + 80,144$ dengan $R^2 = 0,0008$. Nilai R-squared sebesar 0,0008 hal ini menunjukkan bahwa hubungan variabel dapat dianggap tidak ada berdasarkan pada Tabel 1, hal ini dikarenakan turbin dan generator terhubung secara langsung (kopel). Pengaturan governor valve dilakukan untuk mempertahankan frekuensi kerja generator yaitu 50 Hz, dengan mempertahankan putaran turbin sebesar 3.000 rpm seiring meningkatnya kapasitas pembebanan

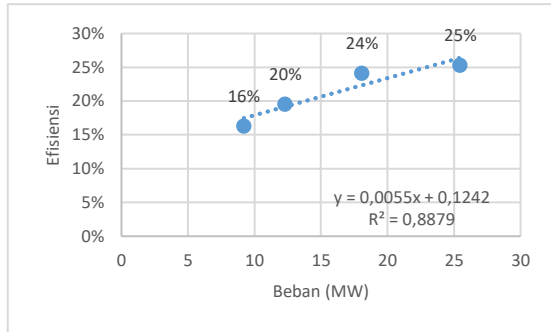
Efisiensi Pembangkitan PLTU Jeranjang Unit 3

Tabel 6 Efisiensi Sistem Pembangkitan PLTU Jeranjang Unit 3

Beban (MW)	Coal Flow (ton/jam)	GCV (kKal/kg)	Energi (kKal/jam)	Energi (kJ/jam)	Daya (kW)	Daya (MW)	Efisiensi (%)
9,19	11,87	4.083	48.465.210	202.584.577,80	56.278,00	56,28	16%
12,31	13,27	4.083	54.181.410	226.478.293,80	62.913,67	62,92	20%
18,08	15,79	4.083	64.470.570	269.486.982,60	74.863,48	74,86	24%
25,46	21,2	4.083	86.559.600	361.819.128,00	100.513,35	100,51	25%

Tabel 6 peningkatan nilai pembebanan dengan nilai kalori batu bara yang konstan sebesar 4.083 kKal/kg mengakibatkan peningkatan jumlah konsumsi batu bara. Pembebanan 9,19 MW membutuhkan 11,87 ton/jam batu bara, 12,31 MW, 12,31 MW membutuhkan 13,27 ton/jam batu bara, 18,08 MW membutuhkan 15,79 ton/jam batu bara, 25,46 MW membutuhkan 21,2 ton/jam batu bara. Meningkatnya nilai coal flow menghasilkan nilai energi dan nilai daya yang semakin meningkat sehingga didapatkan nilai efisiensi yang semakin meningkat pula. Nilai efisiensi tertinggi didapatkan pada pembebanan 25,46 MW sebesar 25% dan terendah pada beban 9,19 MW sebesar 16%.

Efisiensi optimal pada PLTU Jeranjang Unit 3 pada pembebanan 25,46 MW dikarenakan pada pembebanan tersebut didapatkan nilai efisiensi yang tinggi. PLTU Jeranjang menggunakan *boiler* jenis CFB secara spesifikasi menggunakan batubara dengan rank 4000-5000 kKal/kg, namun pada PLTU Jeranjang menggunakan batubara dengan nilai kalori 4083 kKal/kg. Peningkatan efisiensi dapat dilakukan dengan cara meningkatkan nilai kalori batubara (GCV) yang digunakan.



Gambar 9 Grafik Hubungan Kapasitas Pembebanan Terhadap Efisiensi Pembangkit

Gambar 9 nilai efisiensi dari sistem PLTU Jeranjang Unit 3 relatif meningkat disaat kapasitas pembebanan ikut meningkat. Nilai efisiensi tertinggi didapatkan pada pembebanan 25,46 MW sebesar 25%. Nilai efisiensi yang optimal didapatkan ketika pembebanan lebih dari 20 MW sehingga efisiensi didapatkan bisa lebih dari 25%, karena pada range 25% merupakan nilai efisiensi PLTU pada umumnya.

Gambar 9 secara matematis dapat dimodelkan dengan persamaan regresi linear yaitu $y = 0,0055x + 0,1242$ dengan $R^2 = 0,8879$. Nilai R-squared sebesar 0,8879, menunjukkan bahwa hubungan variabel tinggi, sehingga dari kenaikan beban mempengaruhi peningkatan efisiensi pembangkitan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dan analisa data yang dilakukan dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan kapasitas pembebanan pada *boiler* menyebabkan nilai efisiensi semakin meningkat. Nilai koefisien korelasi (R) didapatkan sebesar 0,9179,

sehingga hubungan antar variabel sangat tinggi.

2. Peningkatan kapasitas pembebanan pada turbin menyebabkan nilai efisiensi semakin meningkat. Nilai koefisien korelasi (R) didapatkan sebesar 0,8969, sehingga hubungan antar variabel tinggi.
3. Peningkatan kapasitas pembebanan pada generator terhadap nilai efisiensi berpengaruh sangat kecil. Nilai koefisien korelasi (R) didapatkan sebesar 0,0008, sehingga hubungan antar variabel dapat dianggap tidak ada.
4. Peningkatan kapasitas pembebanan menyebabkan nilai efisiensi pembangkitan PLTU Jeranjang Unit 3 semakin meningkat. Nilai koefisien korelasi (R) didapatkan sebesar 0,8879, sehingga hubungan antar variabel tinggi. Nilai efisiensi PLTU tinggi ketika pembebanan lebih dari 20 MW sehingga menghasilkan efisiensi lebih dari 25%.

Daftar Pustaka

- [1] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). Thermodynamics: An Engineering Approach 5th Edition.
- [2] Dwi, W., Hardiansyah, M., & Ivanto, M. (2019). Analisis Perhitungan Efisiensi *Boiler* Kapasitas 55 Ton/Jam di PT.PJB (Pembangkit Jawa Bali) PLTU Ketapang 2X10 MW.
- [3] Kurniasari, B., Handajadi, W., Hani, S. (2017). Analisa Efisiensi Turbin Generator Berdasarkan Kualitas Daya Pada PLTU Pabrik Gula Madukismo.
- [4] Munir, R., (2013). Metode Numerik Revisi Ketiga. Bandung: Penerbit Informatika.
- [5] Murdani, Erwin, Yendri, E., Siregar, H., Aliyani, P., & Mawardi, M. (2014). Pengoperasian PLTU. PLN Corporate University.
- [6] Muzaki, I., Mursadin, A., (2019). Analisis Efisiensi *Boiler* Dengan Metode Input-Output Di PT. JAPFA COMFEED Indonesia Tbk. Unit Banjarmasin (Vol. 4, Issue 1).
- [7] Padang, Y. A., (2010). Diktat Termodinamika 1. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Mataram.
- [8] Purnomo, J., & Effendy, M. (2018). Analisa Pengaruh Kapasitas pembebanan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tanjung

- Awar-Awar 350 MW Terhadap Efisiensi Turbin Generator QFSN-350-2 Unit 1.
- [9] Samosir, R., Kurniawan, E., & Danial. (2019). Analisa Efisiensi Isentropik Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm).
- [10] Sarwono, J. (2006). Metode Penelitian Kuantitatif & Kualitatif. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [11] Siswanto, J. E. (2020). Analisa Pengaruh Perubahan Beban Output Turbin Terhadap Efisiensi *Boiler*. Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA).
- [12] Sukmawan, R. (2018). Turbin Uap Prinsip, Start-up, Perawatan, Penunjangnya. POLTEK LPP Press.
- [13] Suyono. (2015). Analisis Regresi Untuk Penelitian. Surabaya: Deepublish.
- [14] Syukrillah, M., Hie Khwee, K., & Hiendro, A. (2019). Analisis Perhitungan Efisiensi Energi Di Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM) PT. Harjohn Timber Kubu Raya.
- [15] Warokka, A., & Boedi, S. (2020). Termodinamika Teknik. POLIMDO Press.
- [16] Yohana, E., & Romadhon, R. (2017). Analisa Efisiensi Isentropik dan Exergy Destruction Pada Turbin Uap Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap. ROTASI, 19(3), 134-13