

Pengaruh Beban *Gas Turbine Generator* terhadap Efisiensi *Heat Recovery Steam Generator* pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU)

BUDI SUGANDI, FAUZUN ATABIQ, RIFKA ADELIA ASTI

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam, Indonesia
Email: budi_sugandi@polibatam.ac.id

Received 4 Mei 2023 | *Revised* 30 Mei 2023 | *Accepted* 5 Juni 2023

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) merupakan kombinasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Kombinasi ini menggunakan sistem combine cycle power plant. Untuk meningkatkan efisiensi pembangkit, PLTGU memanfaatkan panas gas buang turbin untuk memanaskan air pada pipa-pipa Heat Recovery Steam Generator (HRSG) menjadi uap yang digunakan untuk menggerakkan bilah-bilah turbin uap dan memutar generator guna menghasilkan energi listrik. Artikel ini membahas pengaruh beban terhadap efisiensi HRSG. Pengamatan dilakukan selama 24 jam selama beberapa hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata HRSG selama periode tersebut adalah 65% dengan beban rata-rata 28184 kW. Efisiensi tertinggi HRSG dicapai pada saat beban 25957 kW yaitu 75.14%. Sedangkan efisiensi terendah saat beban 30127 kW yaitu 56.77%. Koefisien korelasi diperoleh sebesar -0.7 yang berarti pengaruh beban terhadap efisiensi kuat dan berbanding terbalik. Nilai R Square menunjukkan pengaruh pembebanan terhadap efisiensi HRSG yaitu 48.23 %.

Kata kunci: *PLTGU, efisiensi HRSG, koefisien korelasi, combine cycle power plant*

ABSTRACT

Steam Gas Power Plant (PLTGU) is a combination of Gas Power Plant (PLTG) and Steam Power Plant (PLTU). This combination is called combine cycle power plant. To increase generator efficiency, PLTGU utilizes heat from turbine exhaust gas to heat water in the Heat Recovery Steam Generator (HRSG) tubing into steam, which is used to drive the steam turbine blades and rotate the generator to produce electricity. This research analyzes effect of load on efficiency of HRSG. The results showed that the average HRSG efficiency during that period was 65 % with an average load of 28184 kW. The highest HRSG efficiency is 75.14% when the load is 25957 kW while the lowest is 56.77% when the load 30127 kW. The correlation is obtained -0.7 that showed the effect of load to the efficiency is strong and inversely proportional. The R Square showed effect of load on HRSG efficiency is 48.23%.

Keywords: *PLTGU, efficiency of HRSG, correlation coefficient, combine cycle power plant*

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) merupakan kombinasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Kombinasi ini biasanya disebut dengan *combine cycle power plant*. Siklus ini menggabungkan siklus Brayton dan Rankine (**Jadmiko, 2017**). Penggabungan antara turbin gas dan turbin uap adalah pengembangan di dalam proses pembangkit listrik yang akan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibanding kinerja masing-masing (**Rahardja dan Paryatmo, 2017**). Panas dari gas buang turbin gas akan dimanfaatkan untuk memanaskan air menjadi uap, kemudian uap akan menggerakkan turbin uap. Uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap adalah uap yang berasal dari *High & Low Pressure steam*. Beberapa PLTGU yang dengan siklus *combine cycle* menggunakan beberapa konfigurasi pembangkit gas dan uap. Salah satu konfigurasi yang digunakan di antaranya konfigurasi 2-2-1 yaitu 2 *Gas Turbine Generator* (GTG), 2 *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) dan 1 *Steam Turbine Generator* (STG). HRSG merupakan komponen penting dalam PLTGU karena HRSG berperan dalam menghasilkan uap. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin uap kemudian menghasilkan energi listrik (**Pranata dan Suhanan, 2020**). HRSG bekerja pada temperatur dan tekanan yang tinggi sehingga dapat menghasilkan uap kering. Apabila HRSG mengalami penurunan penyerapan panas maka jumlah uap yang dihasilkan sedikit dan listrik yang dihasilkan oleh STG akan menurun. Sehingga menjaga efisiensi HRSG menjadi sangat krusial agar listrik yang dihasilkan tetap stabil.

HRSG dan *boiler* memiliki prinsip kerja yang sama yaitu mengubah air menjadi uap dengan bantuan panas. Perbedaan yang mendasar antara HRSG dan *boiler* adalah sumber energi panas yang digunakan untuk menghasilkan uap. Pada HRSG, sumber panas untuk menghasilkan uap berasal dari gas buang turbin gas (PLTG), kemudian akan dialirkan ke HRSG untuk memanaskan tabung pemanas. Sedangkan pada *boiler/steam boiler*, sumber panas yang digunakan berasal dari pembakaran bahan bakar di ruang bakar (**Afrianto, dkk, 2015**) (**Syukrillah, dkk, 2019**).

Melihat pentingnya peran HRSG pada PLTGU, maka efisiensi HRSG harus selalu dijaga dalam keadaan optimal. Beberapa studi terkait analisis efisiensi HRSG telah banyak dibahas dalam beberapa artikel. Salah satunya artikel yang membahas analisis perhitungan efisiensi HRSG tipe vertikal tekanan ganda pada PLTGU (**Herlambang, dkk, 2020**). Mereka menganalisa efisiensi HRSG dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah overhaul. Efisiensi HRSG didapat dengan membandingkan manfaat kalor yang keluar dengan kalor gas buang yang masuk HRSG. Mereka mendapatkan peningkatan efisiensi HRSG setelah overhaul sebesar 1,4 % menjadi 79,76 % dengan cara meningkatkan kualitas suhu air umpan, aliran massa gas buang dan aliran massa uap yang dihasilkan. Sementara studi tentang efisiensi pembebanan PLTGU untuk meminimalkan biaya produksi listrik dengan menghitung konsumsi bahan bakar telah dilakukan oleh (**Santosa, dkk, 2015**). Hasil penelitian mereka mendapatkan efisiensi PLTGU pada beban penuh sebesar 46.44%, sedang efisiensi rendah terjadi ketika PLTU (*Steam turbin uap*) tidak diaktifkan yaitu sebesar 28,91%. Pemanfaatan HRSG yang optimal dapat menaikkan efisiensi PLTGU. Sejalan dengan itu, studi lain terkait analisa pengaruh pembebanan terhadap efisiensi generator di PLTGU dilakukan oleh (**Aritonang, 2016**). Dalam studinya, telah dilakukan penghitungan total rugi-rugi yang dihasilkan oleh generator gas turbin yaitu sekitar 0,0486 MW. Efisiensi tertinggi yang dapat dicapai oleh generator gas turbin adalah sebesar 99.85% sementara efisiensi terendah adalah 99.82%. Efisiensi dan rugi-rugi daya dipengaruhi oleh beban yang digunakan. Studi terkait analisa efisiensi pada *low pressure* HRSG PLTGU telah dilakukan dengan tujuan menganalisa efisiensi *low pressure* HRSG dan membandingkannya dengan hasil komisioning. Penurunan efisiensi terjadi sebesar 1.27 %

(Yohana and Herriza, 2016). Peneliti lain mencoba membandingkan efisiensi dua buah HRSG dengan jenis dan merek yang sama akan tetapi mempunyai perbedaan efisiensi sekitar 4 %. Penyebab penurunan nilai efisiensi pada diantaranya yaitu adanya kebocoran pada pipa HRSG, penyerapan panas yang tidak maksimal pada salah satu HRSG dan *heat losses* antara *exhaust* gas turbine dengan *inlet* HRSG **(Maulana, dkk, 2018)**. Sementara, **(Elian dan Dwiyantoro, 2017)** melakukan penelitian efisiensi HRSG berdasarkan analisa variasi beban turbin terhadap laju alir massa air/uap. Mereka memperoleh hasil peningkatan beban terhadap laju alir massa air/uap. Peneliti lain mengamati bahwa penyebab penurunan efisiensi HRSG di antaranya karena penurunan massa alir air di dalam pipa pemanas boiler, terhambatnya perpindahan panas dari pipa pemanas ke *feed water* dan juga terdapat *plug* yang terjadi pada pipa-pipa pemanas boiler. Untuk mengatasi hal tersebut maka dilakukan maintenance dengan melakukan *cleaning* pada peralatan HRSG. Efisiensi HRSG naik secara signifikan mencapai 96 % dari asalnya 89 % **(Yusron dan Saputro 2018)**.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan, pengukuran, dan analisa data pengaruh beban gas turbine generator terhadap efisiensi HRSG. Pengamatan dan pengukuran dilakukan secara langsung pada PLTGU di salah satu pembangkit terhadap beberapa parameter seperti : beban gas turbin generator, laju bahan bakar, laju uap, temperatur air, temperatur dan tekanan uap. Sementara analisa dilakukan terhadap parameter entalpi air, entalpi uap dan nilai efisiensi HRSG. Tujuan akhir dari penelitian ini adalah untuk memperoleh hubungan antara pengaruh beban turbin terdapat nilai efisiensi HRSG sehingga akan diketahui beban optimal untuk mendapat energi listrik yang maksimal.

2. METODE

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan, pengukuran, dan analisis data pengaruh beban gas turbine generator terhadap efisiensi HRSG. Pengamatan dilakukan secara langsung di unit PLTGU terhadap beberapa parameter PLTGU seperti beban turbin, laju bahan bakar dan sebagainya. Sementara pengolahan data dilakukan untuk mendapatkan nilai efisiensi HRSG pada setiap data pengamatan.

2.1 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk menghitung efisiensi HRSG yang dilakukan dengan 5 tahapan sebagai berikut:

- a) Menghitung nilai rugi-rugi generator (*LGN*) dengan menggunakan Persamaan (1)

$$LGN = 1.69 \% * KWG \quad (1)$$

dengan *KWG* adalah keluaran beban generator dalam kW.

- b) Menghitung nilai entalpi pada *high pressure steam* (h_{hp}) dengan menggunakan interpolasi di antara dua buah entalpi pada *high pressure* pada temperatur masing-masing dengan Persamaan (2) **(Ilmar dan Sandra, 2012)**

$$h_{hp} = \frac{(T-T_1)}{(T_2-T_1)}(h_2 - h_1) + h_1 \quad (2)$$

dengan h_{hp} adalah entalpi pada *high pressure*, T adalah temperatur saat pengamatan, T_1 adalah temperatur rendah dan T_2 adalah temperatur tinggi, h_2 adalah entalpi pada saat T_2 dan h_1 adalah entalpi pada saat T_1 .

- c) Menghitung nilai entalpi pada *low pressure steam* (h_{lp}) dengan menggunakan interpolasi di antara dua buah entalpi pada *low pressure* pada temperatur masing-masing dengan Persamaan (3)

$$h_{lp} = \frac{(T-T_1)}{(T_2-T_1)}(h_2 - h_1) + h_1 \quad (3)$$

dengan h_{lp} adalah entalpi pada *low pressure*, T adalah temperatur saat pengamatan, T_1 adalah temperatur rendah dan T_2 adalah temperatur tinggi, h_2 adalah entalpi pada saat T_2 dan h_1 adalah entalpi pada saat T_1 .

- d) Menghitung nilai entalpi air (h_w) dengan interpolasi di antara dua buah entalpi air pada temperatur masing-masing dengan Persamaan (4)

$$h_w = \frac{(T-T_1)}{(T_2-T_1)}(h_2 - h_1) + h_1 \quad (4)$$

dengan h_w adalah entalpi air, T adalah temperatur saat pengamatan, T_1 adalah temperatur rendah dan T_2 adalah temperatur tinggi, h_2 adalah entalpi pada saat T_2 dan h_1 adalah entalpi pada saat T_1 .

- e) Menghitung nilai efisiensi HRSG dengan menggunakan Persamaan (5) (Yohana & Priambodo, 2012)

$$\eta_{HRSG} = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{\text{energi yang dibutuhkan air menjadi uap panas}}{\text{energi gas buang pada HRSG}} \quad (5)$$

$$\eta_{HRSG} = \frac{(m_{hp} h_{hp} + m_{lp} h_{lp}) - (m_{hp} + m_{lp} h_w)}{m_{fg} \cdot LHV \cdot LP - KWG - LT - LGN}$$

Di mana m_{hp} adalah laju uap tekanan tinggi (kg/s), m_{lp} adalah laju uap tekanan rendah (kg/s), h_{hp} adalah enthalpi uap tekanan tinggi (kJ/s), h_{lp} adalah enthalpi uap tekanan rendah (kJ/s), h_w adalah enthalpi air dari HRSG (kJ/s), m_{fg} adalah laju bahan bakar turbin gas (kg/s), LHV adalah nilai pemanasan bahan bakar rendah, LGN adalah nilai rugi-rugi generator (1.69% KWG), KWG adalah beban generator (kW), LP adalah nilai rugi-rugi konsumsi panas besarnya 0.9835 dan LT adalah nilai rugi-rugi turbin gas besarnya 987.13.

2.2 Analisis Data

Analisis data digunakan untuk melihat pengaruh dari beban terhadap efisiensi HRSG. Pada penelitian ini digunakan hubungan korelasi antara beban dengan efisiensi HRSG. Uji korelasi **(Purba dan Purba, 2022) (Safitri, 2014)** dilakukan menggunakan koefisien korelasi *Pearson Product Moment* (r) yang dirumuskan dalam Persamaan (6).

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X \sum Y)}{\sqrt{\{n \sum X^2 - (\sum X)^2\} \{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \quad (6)$$

dengan r adalah koefisien korelasi, n adalah jumlah data, X adalah variabel pertama dalam hal ini nilai beban dan Y adalah variabel kedua dalam hal ini adalah efisiensi HRSG.

Nilai koefisien korelasi (r) berkisar antara -1 sampai 1, apabila nilai semakin mendekati 1 atau -1 berarti hubungan antara dua variabel semakin kuat, apabila nilai koefisien korelasi (r) mendekati 0 berarti hubungan antara dua variabel semakin lemah. Nilai koefisien korelasi positif menunjukkan hubungan berbanding lurus (jika X naik maka Y naik) sedangkan nilai

koefisien korelasi negatif menunjukkan hubungan berbanding terbalik (jika X naik maka Y turun). Interpretasi koefisien korelasi nilai r dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Interval Koefisien Korelasi

Interval Koefisien Korelasi	Tingkat Hubungan
0.00 - 0.199	Sangat rendah
0.20 - 0.399	Rendah
0.40 - 0.599	Cukup
0.60 - 0.799	Kuat
0.80 - 1.00	Sangat Kuat

Untuk menyatakan besar atau kecil pengaruh variabel X (beban) terhadap variabel Y (efisiensi HRSG) dapat ditentukan dengan rumus koefisien determinan (r^2) yang disajikan pada Persamaan (7).

$$KP = r^2 * 100 \% \quad (7)$$

dengan KP adalah pengaruh variabel X terhadap variabel Y dan r^2 (*R square*) adalah koefisien determinan yang digunakan untuk mengukur proporsi atau persentase variasi total dalam variabel Y yang dijelaskan oleh variabel X (Subandriyo, 2020).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan di salah satu Unit PLTGU di Batam. Data yang digunakan dalam analisis merupakan data harian PLTGU yang diamati selama 24 jam. Salah satu data harian hasil pengamatan ditampilkan pada Tabel 2. Sementara Tabel 3 menunjukkan data rata-rata serta hasil pengamatan minimum dan maksimum yang dilakukan dalam 5 kali pengamatan masing-masing selama 24 jam. Dari Tabel 3 diperoleh beban minimum adalah 20129.4 kW dan beban maksimum adalah 30610.9 kW dengan rata-rata beban adalah 28184.75 kW. Temperatur air yang masuk ke HRSG berada pada 102.3 °C sampai dengan 105.93 °C dengan rata-rata 104.05 °C. Temperatur uap tekanan tinggi berada pada 466.21 °C sampai dengan 484.49 °C dengan rata-rata temperatur 480.38 °C. Tekanan uap tekanan tinggi berada pada 4.57 MPa sampai dengan 5.72 Mpa dengan rata-rata 5.44 MPa. Sedangkan temperatur uap tekanan rendah berada pada 226.90 °C sampai dengan 254.66 °C dengan rata-rata temperatur 247.18 °C. Tekanan uap tekanan rendah berada pada 610.90 kPa sampai dengan 624.60 kPa dengan rata-rata 617.82 kPa.

Tabel 2. Hasil Pengamatan Parameter PLTGU dalam 24 Jam

Tanggal	Jam	laju uap LP (kg/s)	laju uap HP (kg/s)	laju bahan bakar (kg/s)	keluaran turbin (kW)	LHV	Nilai rugi-rugi turbin gas	Nilai rugi-rugi konsumsi panas	Temperatur air yang masuk ke sistem HRSG	Pressure HP Steam (MPa)	Temperatur HP Steam (°C)	Pressure LP Steam (KPa)	Temperatur LP Steam (°C)
01-Nov-22	00:00	2.46	8.94	1.63	24683.72	44193.90	967.13	0.99	103.81	4.99	482.21	614.80	242.64
	01:00	2.47	9.09	1.71	25682.30	44193.90	967.13	0.99	103.21	5.05	479.64	614.70	245.05
	02:00	2.59	9.55	1.78	27548.10	44193.90	967.13	0.99	104.42	5.18	481.92	614.60	245.66
	03:00	2.45	8.84	1.67	25016.90	44193.90	967.13	0.99	104.42	4.98	480.21	612.00	243.24
	04:00	2.29	8.16	1.54	22840.80	44193.90	967.13	0.99	103.21	4.77	469.07	611.40	243.84
	05:00	2.57	9.13	1.59	23439.30	44193.90	967.13	0.99	103.81	5.03	483.06	615.80	243.84
	06:00	2.51	8.88	1.78	27254.00	44193.90	967.13	0.99	105.03	5.19	475.07	613.20	244.45
	07:00	2.35	8.25	1.47	21559.90	44193.90	967.13	0.99	104.42	4.65	470.21	613.40	245.05
	08:00	2.60	9.21	1.77	26964.00	44193.90	967.13	0.99	103.81	5.24	479.35	613.60	248.07
	09:00	2.87	10.09	2.20	30204.00	44193.90	967.13	0.99	102.60	5.68	482.21	620.50	248.07
	10:00	2.85	10.14	2.20	30377.70	44193.90	967.13	0.99	104.72	5.71	481.92	620.20	245.66
	11:00	2.86	10.19	2.20	30120.90	44193.90	967.13	0.99	103.51	5.71	481.92	621.30	247.47
	12:00	2.85	10.16	2.10	29803.80	44193.90	967.13	0.99	104.12	5.70	482.21	618.90	246.87
	13:00	2.83	10.13	2.12	29379.40	44193.90	967.13	0.99	104.12	5.69	482.21	619.10	248.68
	14:00	2.84	10.15	2.11	29824.20	44193.90	967.13	0.99	104.12	5.70	481.92	620.20	249.28
	15:00	2.83	10.14	2.00	29461.40	44193.90	967.13	0.99	104.12	5.69	482.21	620.90	252.28
	16:00	2.72	9.82	2.00	29452.00	44193.90	967.13	0.99	104.72	5.42	479.64	613.90	249.88
	17:00	2.70	9.50	1.81	28128.80	44193.90	967.13	0.99	104.12	5.28	482.49	616.50	244.45
	18:00	2.78	9.88	1.80	27539.60	44193.90	967.13	0.99	103.51	5.51	483.06	619.00	246.87
	19:00	2.76	9.88	2.00	29129.90	44193.90	967.13	0.99	103.51	5.50	481.92	618.90	250.48
	20:00	2.78	10.00	1.87	28840.90	44193.90	967.13	0.99	104.12	5.54	482.78	620.60	250.48
	21:00	2.79	9.89	2.00	29166.40	44193.90	967.13	0.99	104.72	5.50	482.49	618.40	248.68
	22:00	2.78	9.84	2.00	29130.80	44193.90	967.13	0.99	103.51	5.49	481.64	619.50	250.48
	23:00	2.80	9.89	2.00	29134.20	44193.90	967.13	0.99	103.51	5.51	482.21	619.90	250.48

Tabel 3. Hasil Rata-Rata Serta Nilai Minimum dan Maksimum dalam Lima Kali Pengamatan

	keluaran turbin (kW)	LHV	Nilai rugi-rugi turbin gas	Nilai rugi-rugi konsumsi panas	Temperatur air yang masuk ke sistem HRSG	Pressure HP Steam (MPa)	Temperatur HP Steam (°C)	Pressure LP Steam (KPa)	Temperatur LP Steam (°C)
Min	20129.40	44193.90	967.13	0.99	102.30	4.57	466.21	610.90	226.90
Max	30610.90	44193.90	967.13	0.99	105.93	5.72	484.49	624.60	254.66
Average	28184.75	44193.90	967.13	0.99	104.05	5.44	480.36	617.82	247.18

Pengaruh Beban *Gas Turbine Generator* terhadap Efisiensi *Heat Recovery Steam Generator* pada PLTGU

Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan entalpi HP *Steam*, LP *Steam* dan air serta efisiensi HRSG berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 2. Pengamatan dilakukan setiap jam selama 24 jam. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan Persamaan 1 sampai Persamaan 5. Hasil yang didapat menunjukkan variasi entalpi terhadap efisiensi HRSG. Efisiensi HRSG tertinggi dicapai pada pengamatan pukul 5 pagi sebesar 75 % sedangkan efisiensi terendah dicapai pada pengamatan pukul 11 siang sebesar 56%.

Sementara Tabel 5 menunjukkan data rata-rata perhitungan entalpi dan efisiensi HRSG selama pengamatan 24 jam. Dari Tabel 5 diperoleh efisiensi HRSG minimum adalah 56 % yang dicapai ketika entalpi HP *steam* 3354.25, entalpi LP *steam* 3354.25 dan entalpi air 428.73. Efisiensi HRSG maksimum adalah 75% yang dicapai ketika entalpi HP *steam* 3453.98 , entalpi LP *steam* 2967.21 dan entalpi air 444.07. Dari data pengamatan seluruh variable PLTGU didapatkan efisiensi rata-rata HRSG sebesar 65%.

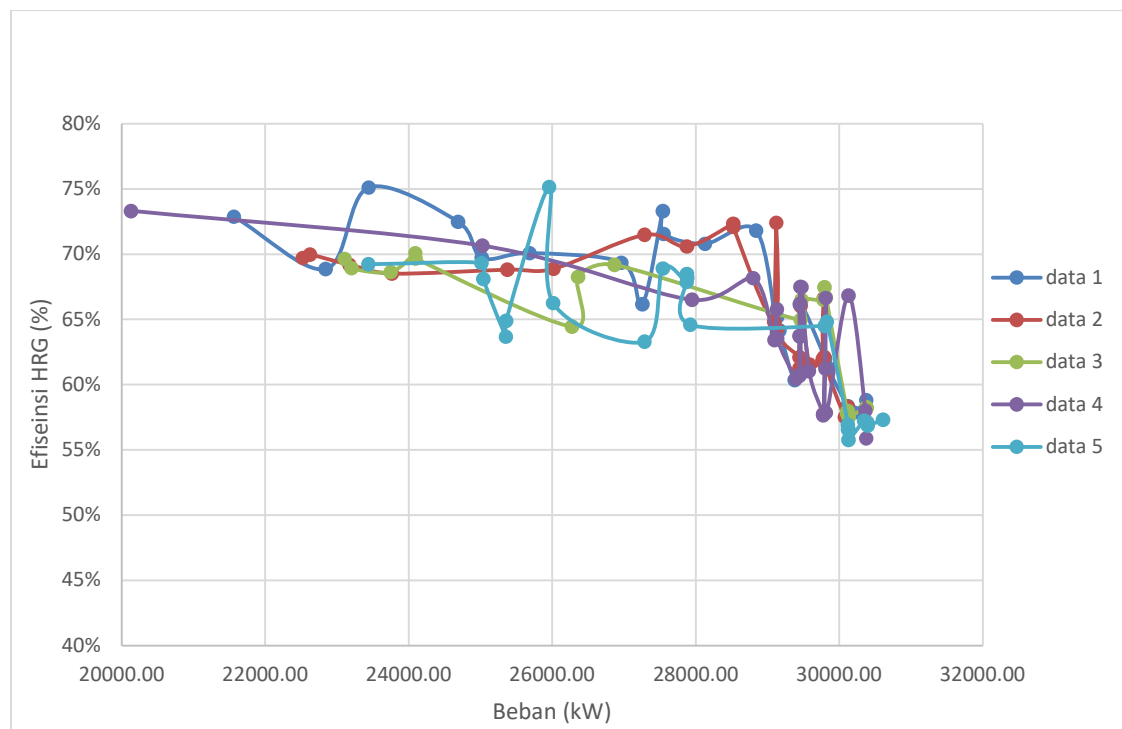
Tabel 4. Hasil Perhitungan Entalpi dan Efisiensi HRSG

Tanggal	Jam	LGN	Entalpi HP Steam	Entalpi LP Steam	Entalpi Air	Efisiensi HRSG
01-Nov-22	00:00	417.15	3391.92	2941.42	435.12	72%
	01:00	434.03	3386.42	2946.87	432.55	70%
	02:00	465.56	3390.67	2948.46	437.68	72%
	03:00	422.79	3387.21	2942.57	437.68	70%
	04:00	386.01	3361.82	2938.37	432.56	69%
	05:00	396.12	3393.34	2923.77	435.12	75%
	06:00	460.59	3375.11	2945.31	440.24	66%
	07:00	364.36	3364.48	2946.87	437.68	73%
	08:00	455.69	3384.67	2953.49	435.11	69%
	09:00	510.45	3391.92	2952.67	430.01	58%
	10:00	513.38	3443.39	2942.22	438.95	59%
	11:00	509.04	3408.03	2931.68	433.84	56%
	12:00	503.68	3399.53	2950.48	436.40	62%
	13:00	496.51	3398.11	2954.44	436.40	60%
	14:00	504.03	3397.74	2956.00	436.39	61%
	15:00	497.90	3396.63	2961.95	436.40	66%
	16:00	497.74	3385.87	2951.20	438.96	64%
	17:00	475.38	3393.06	2925.09	436.40	71%
	18:00	465.42	3393.34	2950.48	433.84	73%
	19:00	492.30	3391.24	2958.21	433.84	64%
	20:00	487.41	3393.72	2958.51	436.40	72%
	21:00	492.91	3392.00	2954.37	438.96	64%
	22:00	492.31	3390.57	2958.21	433.83	64%
	23:00	492.37	3444.17	2958.51	433.84	65%

Tabel 5. Hasil Rata-Rata Perhitungan Entalpi dan Efisiensi HRSG Serta Nilai Minimum Dan Maksimum dalam Lima Kali Pengamatan

	LGN	Entalpi HP Steam	Entalpi LP Steam	Entalpi Air	Efisiensi HRSG
Min	340.19	3354.25	2731.68	428.73	56%
Max	517.32	3453.98	2967.21	444.07	75%
Average	476.32	3388.60	2945.91	436.13	65%

Grafik hubungan efisiensi HRSG terhadap beban yang diukur selama lima kali pengamatan ditampilkan pada Gambar 1. Dari data tersebut diperlihatkan bahwa beban PLTGU bervariasi yaitu dari rentang 20129.40 kW – 30610.90 kW dan beban rata-rata 28184.75 kW. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa secara trend grafik seiring bertambahnya beban, efisiensi HRSG akan mengalami penurunan. Akan tetapi pada perubahan beban tertentu efisiensi akan mengalami kenaikan seperti pada perubahan beban pada saat di antara 26000 kW – 30000 kW, seperti pada data 5 mengalami kenaikan dari 65 % ke 75 %, data 1 terjadi kenaikan dari 66 % ke 73 %, dan data 4 mengalami kenaikan dari 58 % ke 67 %. Pada grafik tersebut juga dapat diketahui efisiensi tertinggi HRSG adalah 75.14% ketika beban 25957 kW, efisiensi terendah adalah 55.77% ketika beban mencapai 30127 kW.

**Gambar 1. Grafik Hubungan Efisiensi HRSG terhadap Beban**

Nilai korelasi (r) berdasarkan Persamaan 6 diperoleh nilai $-0,7$. Nilai negatif menunjukkan variabel beban dengan variabel efisiensi HRSG berbanding terbalik yang artinya semakin besar beban maka efisiensi HRSG akan semakin kecil. Berdasarkan Tabel 1 interval koefisien korelasi, nilai $0,7$ menunjukkan beban dengan efisiensi HRSG mempunyai tingkat hubungan kuat yang berarti nilai beban akan memberikan pengaruh kuat terhadap nilai efisiensi HRSG. Nilai R square (r^2) yang dihitung melalui Persamaan 7 diperoleh nilai $48,23\%$. Ini menunjukkan beban

mempunyai kemampuan 48,23% mempengaruhi efisiensi HRSG atau persentase beban berpengaruh terhadap efisiensi HRSG adalah sekitar 48,23 %.

4. KESIMPULAN

Artikel ini telah membuat pengamatan dan penelitian tentang pengaruh beban *gas turbine generator* terhadap efisiensi HRSG pada PLTGU. Dari pengamatan dan penelitian yang telah dilakukan diperoleh bahwa hubungan antara beban *gas turbine generator* terhadap efisiensi HRSG berbanding terbalik dan hubungannya kuat sesuai dengan nilai koefisien korelasi -0.7, yang mana semakin besar beban maka akan semakin kecil nilai efisiensi. Besarnya pengaruh beban terhadap efisiensi HRSG diperoleh sebesar 48 %, yang menunjukkan bahwasanya persentase beban berpengaruh terhadap efisiensi HRSG adalah sekitar 48,23 %. Beban minimum adalah 20129.4 kW dan beban maksimum adalah 30610.9 kW dengan rata-rata beban adalah 28184.75 kW. Efisiensi tertinggi HRSG diperoleh ketika beban 25957 kW yaitu sebesar 75.14%, sementara efisiensi terendah adalah 55.77% ketika beban mencapai 30127 kW. Efisiensi rata-rata selama pengamatan adalah 65 % dengan beban rata-rata 28184 kW. Penurunan efisiensi HRSG tidak hanya dikarenakan kenaikan beban, akan tetapi ada beberapa hal yang dapat menurunkan efisiensi diantaranya kualitas suhu air umpan, aliran massa gas buang dan aliran massa uap yang dihasilkan. Sehingga untuk menjaga efisiensi HRSG dapat dilakukan dengan meningkatkan kualitas dan menjaga beberapa mesin agar bekerja secara optimal dengan cara melakukan maintenance secara rutin.

DAFTAR RUJUKAN

- Afrianto, Y., Tony Suryo, M. U., & Fajar, B. T. (2015). Analisa Efisiensi Exergi Pada HrsG (Heat Recovery Steam Generator) Di Pltgu. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 4(4), 382–388.
- Aritonang, J. P. (2016). Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator di PLTGU di PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Keramasan. *Pembangkitan Energi Listrik*, 1, 4–31.
- Elian, A., & Dwiyantoro, B. A. (2017). Perancangan Termal Heat Recovery Steam Generator Sistem Tekanan Dua Tingkat Dengan Variasi Beban Gas Turbin. *Jurnal Teknik ITS*, 66–154.
- Herlambang, Y. D., Supriyo, S., & Wibowo, T. A. (2020). Analisis Perhitungan Efisiensi Heat Recovery Steam Generator (HrsG) Tipe Vertikal Tekanan Ganda Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). *Eksergi*, 16(3), 148. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v16i3.2218>
- Ilmar, A., & Sandra, A. (2012). Analisis Unjuk Kerja Heat Recovery Steam Generator (HRSG) pada PLTGU Muara Tawar Blok 5. *Jurnal Saintek*, 7(1), 23–31. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/sintek/article/view/138/120>
- Jadmiko, R. (2017). *Rancangan Heat Recovery Steam Generator pada PLTGU Kapasitas 105 MW*.
- Maulana, F., Riyani, D., Nufus, T. H., Silanegara, I. F., Jakarta, P. N., & Depok, K. (2018).

- Analisa Perbedaan Efisiensi Antara HRSG 1 dan HRSG 2 PLTGU Cilegon. *Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, 2085–2762*, 441–446.
- Pranata, A., & Suhanan. (2020). *Perancangan Komponen Superheater pada Heat Recovery Steam Generator (HRSG) Siklus PLTGU dengan Kapasitas Daya 70 MW*. 5–6. <http://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/190528>
- Purba, D., & Purba, M. (2022). Aplikasi Analisis Korelasi dan Regresi menggunakan Pearson Product Moment dan Simple Linear Regression. *Citra Sains Teknologi, 1(2)*, 97–103.
- Rahardja, I. B., & Paryatmo, W. (2017). Analisa Dan Optimasi Sistem Pltgu Biomassa Gas Metan Dengan Daya 20 Mw. *Jurnal Teknologi, 9(2)*, 65. <https://doi.org/10.24853/jurtek.9.2.65-76>
- Safitri, W, R. (2014). Analisis Korelasi Dalam Menentukan Hubungan Antara Kejadian Demam Berdarah Dengue Dengan Kepadatan Penduduk Di Kota Surabaya Pada Tahun 2012 - 2014. *Jurnal Kesehatan Masyarakat, 1(3)*, 1–9.
- Santosa, B., Qosim, M. N., & Ajiz, F. A. (2015). Efisiensi Pembebanan Pltgu Pt. Krakatau Daya Listrik Dengan Perhitungan Specific Fuel Consumption Untuk Meminimalkan Biaya Produksi Listrik. *Jurnal Sutet, VOL.5*.
- Subandriyo, B. (2020). Analisis Kolerasi dan Regresi. *Diklat Statistisi Tingkat Ahli BPS Angkatan XXI*, 31. [https://pusdiklat.bps.go.id/diklat/bahan_diklat/BA_Analisis Korelasi dan Regresi_Budi Soebandriyo, SST, M. Stat_2123.pdf](https://pusdiklat.bps.go.id/diklat/bahan_diklat/BA_Analisis_Korelasi_dan_Regresi_Budi_Soebandriyo,SST,M.Stat_2123.pdf)
- Syukrillah, M., Khwee, K. H., & Hiendro, A. (2019). Analisis Perhitungan Efisiensi Energi Di Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (Pltbn) Pt. Harjohn Timber Kubu Raya. *Jurnal Teknik Elektro Untan, 5(1)*, 1–11.
- Yohana, E., & Herriza, R. M. (2016). Analisis Efisiensi Siklus Combine Cycle Power Plant (Ccpp) Gas Turbine Generator Terhadap Beban Operasi Pt Krakatau Daya Listrik. *Rotasi, 18(4)*, 106. <https://doi.org/10.14710/rotasi.18.4.106-109>
- Yohana, E., & Priambodo, A. (2012). analisa efisiensi low pressure HRSG pada PLTGU PT.Indonesia Power UBP Semarang. *Rotasi Jurnal Teknik Mesin, 141(1)*, 7–9.
- Yusron, A., & Saputro, D. D. (2018). Analisa Performa Heat Recovery Steam Generator Sebelum Dan Sesudah Cleaning Di Pt Indonesia Power Tambak Lorok Semarang Menggunakan Software Matlab R.12. *Saintekno: Jurnal Sains Dan Teknologi, 16(1)*, 1–12.