

Analisis Pengaruh Variasi Beban Operasi PLTGU terhadap Perubahan Heat Rate dan Efisiensi Kinerja Pembangkit Listrik

Dimas Sugiono^{1*}, Hery Irwan²

¹⁻²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Riau Kepulauan, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : dimas_sugiono_pp@yahoo.co.id



e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 09 September, 2026

Page: 5661-5673

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i9.4117>

Article History:

Received: Juli 24, 2026

Revised: Agustus 09, 2026

Accepted: September 19, 2026

Abstract : *Combined Cycle Power Plants (CCPP) are power generation systems with high efficiency because they utilize a combined cycle between gas turbines and steam turbines. The performance of a CCPP is strongly influenced by load variations, which affect gas fuel consumption and the resulting heat rate value. This study aims to analyze the relationship between power plant load, gas consumption, and heat rate in a Combined Cycle Power Plant using daily operational data from April 2026. The research method was carried out by collecting operational data, including gross load, net load, gas consumption, and heat rate. The analysis was conducted using a quantitative descriptive approach and correlation analysis. The results showed that an increase in plant load caused gas consumption to increase linearly, while the heat rate tended to decrease, indicating improved plant efficiency. Based on the data analysis results, the correlation between plant load and gas consumption was 0.905, indicating a very strong positive relationship. Meanwhile, the relationship between plant load and heat rate had a correlation value of -0.910, indicating a very strong negative relationship. The best heat rate value was obtained under high loading conditions with a value approaching 8,100 BTU/kWh.*

Keywords : *Power Plant Efficiency; Heat Rate; Gas Consumption.*

Abstrak : Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) merupakan salah satu jenis pembangkit yang memiliki efisiensi tinggi karena memanfaatkan siklus gabungan antara turbin gas dan turbin uap. Kinerja PLTGU sangat dipengaruhi oleh variasi pembebanan pembangkit terhadap konsumsi bahan bakar gas serta nilai heat rate yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara beban pembangkit terhadap konsumsi gas dan heat rate pada *Combined Cycle Power Plant* menggunakan data operasional harian bulan April 2026. Metode penelitian dilakukan dengan pengumpulan data operasi pembangkit yang meliputi beban gross, beban net, konsumsi gas, dan heat rate. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dan analisis korelasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban pembangkit menyebabkan konsumsi gas meningkat secara linier, namun nilai heat rate cenderung menurun sehingga efisiensi pembangkit meningkat. Berdasarkan hasil pengolahan data, korelasi antara beban pembangkit dan konsumsi gas sebesar 0,905 yang menunjukkan hubungan positif sangat kuat. Sedangkan hubungan antara beban pembangkit dan *heat rate* memiliki korelasi

sebesar -0,910 yang menunjukkan hubungan negatif sangat kuat. Nilai *heat rate* terbaik diperoleh pada kondisi pembebanan tinggi dengan nilai mendekati 8.100 BTU/kWh.

Kata Kunci: Efisiensi Pembangkit; Heat Rate; Konsumsi Gas.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan sektor industri, perkembangan teknologi, dan bertambahnya jumlah penduduk. Kondisi tersebut menuntut tersedianya sistem pembangkit listrik yang mampu beroperasi secara andal, efisien, dan ekonomis agar kontinuitas penyaluran energi listrik tetap terjaga. Salah satu jenis pembangkit yang saat ini banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) atau *Combined Cycle Power Plant (CCPP)*. Menurut Naryono dan Budiono (2023), PLTGU merupakan pembangkit yang memiliki respons cepat terhadap perubahan beban karena memanfaatkan kombinasi turbin gas dan turbin uap sehingga menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan pembangkit konvensional. PLTGU dipilih karena memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan pembangkit konvensional, dimana energi panas buang dari turbin gas masih dapat dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan uap pada *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* sehingga mampu meningkatkan efisiensi termal pembangkit.

Dalam pengoperasiannya, performa PLTGU dipengaruhi oleh kondisi pembebanan pembangkit. Perubahan beban akan berdampak langsung terhadap konsumsi bahan bakar gas, nilai *heat rate*, serta efisiensi pembangkit. Semakin besar daya yang dibangkitkan maka kebutuhan bahan bakar cenderung meningkat. Menurut Soelaiman, Sofyan, dan Priyanto (2024), *heat rate* merupakan perbandingan antara energi panas yang diberikan pada siklus pembangkit dengan energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Nilai *heat rate* digunakan sebagai indikator efisiensi pembangkit, dimana semakin rendah nilai *heat rate* maka semakin baik kinerja pembangkit dalam mengubah energi bahan bakar menjadi energi listrik. Namun demikian, peningkatan pembebanan tidak selalu menyebabkan penurunan performa pembangkit. Pada kondisi tertentu, pembangkit justru bekerja lebih efisien pada beban tinggi yang ditunjukkan dengan menurunnya nilai *heat rate*. Oleh sebab itu, analisis hubungan antara beban pembangkit terhadap konsumsi gas dan *heat rate* menjadi penting untuk mengetahui karakteristik operasi PLTGU serta menentukan kondisi operasi yang optimal.

Secara teoritis, *heat rate* merupakan indikator utama dalam menilai efisiensi pembangkit listrik. Menurut Soelaiman et al. (2024), peningkatan beban operasi turbin menyebabkan *heat rate* cenderung menurun sehingga efisiensi pembangkit meningkat. Pada penelitian tersebut *heat rate* terendah diperoleh saat pembangkit beroperasi pada beban tinggi, sedangkan *heat rate* tertinggi terjadi pada kondisi beban rendah. *Heat rate* menunjukkan jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. Semakin kecil nilai *heat rate*, maka semakin baik kemampuan pembangkit dalam mengkonversi energi bahan bakar menjadi energi listrik. Selain itu, konsumsi bahan bakar juga menjadi parameter penting karena berkaitan langsung dengan biaya operasi pembangkit. Penggunaan bahan bakar yang tidak optimal dapat meningkatkan biaya produksi energi listrik dan menurunkan efisiensi sistem pembangkit.

Permasalahan yang sering terjadi pada pengoperasian PLTGU adalah adanya fluktuasi beban sistem yang menyebabkan perubahan konsumsi gas dan *heat rate* pembangkit. Menurut Naryono dan Budiono (2023), perubahan beban pada PLTGU akan memengaruhi suplai bahan bakar, udara pembakaran, dan gas buang yang digunakan dalam proses pembangkitan. Semakin besar beban pembangkit maka kebutuhan bahan bakar juga akan meningkat untuk mempertahankan daya keluaran yang dihasilkan. pembangkit diharapkan mampu beroperasi dengan efisiensi tinggi pada seluruh variasi pembebanan sehingga konsumsi bahan bakar tetap optimal dan *heat rate* tetap rendah. Namun pada kondisi aktual di lapangan, perubahan beban sering menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar yang tidak sebanding dengan energi listrik yang dihasilkan sehingga nilai *heat rate* meningkat dan efisiensi pembangkit menurun. Kondisi tersebut

menunjukkan adanya kesenjangan antara performa operasi yang diharapkan dengan performa aktual pembangkit.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pengaruh pembebanan terhadap konsumsi bahan bakar dan heat rate pada pembangkit listrik. Penelitian Ariyandi dkk. membahas hubungan variasi pembebanan terhadap konsumsi bahan bakar spesifik dan *heat rate* pada PLTU berbahan bakar batubara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan nilai *heat rate* menurun sehingga efisiensi pembangkit meningkat. Penelitian lain oleh Rizca dkk. juga menunjukkan bahwa perubahan beban generator mempengaruhi nilai *heat rate* dan efisiensi pembangkit listrik tenaga uap. Selain itu, penelitian Alber dkk. menjelaskan bahwa peningkatan pembebanan dapat menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik dan meningkatkan efisiensi pembangkit.

Meskipun penelitian mengenai *heat rate* dan konsumsi bahan bakar telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara. Penelitian yang secara khusus menganalisis hubungan pembebanan terhadap konsumsi gas dan heat rate pada sistem *Combined Cycle Power Plant (CCPP)* menggunakan data aktual operasi harian PLTGU masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan (*state of the art*) berupa analisis hubungan pembebanan terhadap konsumsi gas dan *heat rate* pada PLTGU menggunakan data operasional aktual periode April 2026 dengan pendekatan analisis korelasi dan evaluasi performa pembangkit. Penelitian ini menggunakan data operasi harian yang meliputi beban gross, beban net, konsumsi gas, dan heat rate untuk mengetahui karakteristik hubungan antar parameter operasi pembangkit. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi dalam pengoperasian PLTGU agar diperoleh kondisi operasi yang lebih efisien dan ekonomis. Berdasarkan uraian tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis hubungan antara beban pembangkit terhadap konsumsi gas dan heat rate pada *Combined Cycle Power Plant (PLTGU)*, serta mengetahui pengaruh variasi pembebanan terhadap efisiensi operasi pembangkit listrik.

TINJAUAN PUSTAKA

Pada proses pembangkit listrik tenaga gas ini mempunyai ciri khas dari pembangkit listrik lainnya yaitu dapat menjadi proses gas saja (PLTG) atau dapat juga dikombinasikan sehingga menjadi pembangkit listrik tenaga uap (PLTGU), dengan cara combine ini proses dari pembangkitan listrik ini menjadi efisien. Hal ini dapat dilihat pada gambar sebagai berikut.

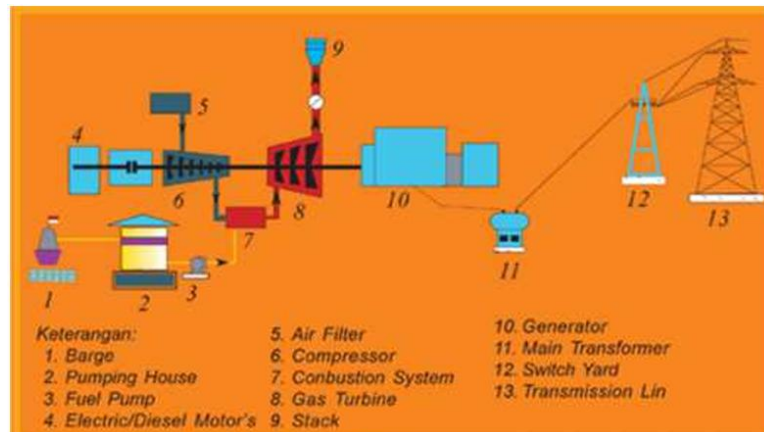


Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU)

Pembangkit listrik ini biasanya menjadi penopang tambahan pada saat beban listrik mengalami beban puncak. Pada PLTGU ini dapat langsung online ke sistem transmisi dengan cepat selama 15 menit, ini merupakan salah satu kelebihan dari PLTGU suyitno (2021)

Proses Pembangkit Listrik Tenaga Gas

Umumnya negara-negara maju mengonsumsi berbagai energi dengan jumlah yang cukup besar. Oleh karena itu, berkembang beberapa jenis pembangkit energi yang mampu menyuplai energi untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Salah satu pembangkit energi listrik yang kita kenal yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Gas yang sering disebut dengan PLTG. Menurut (Suyitno,2021), PLTGU merupakan pembangkit yang mengombinasikan siklus turbin gas dan turbin uap sehingga energi panas buang dari turbin gas dapat dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan uap dan meningkatkan efisiensi pembangkit. Salah satu keunggulan utama PLTGU adalah kemampuannya merespons perubahan beban dengan cepat sehingga sangat sesuai digunakan untuk memenuhi kebutuhan sistem kelistrikan yang berfluktuasi (Naryono dan Budiono,2023).



Gambar 2. Proses Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dimulai dari proses pemasukan udara melalui *air filter* untuk menyaring partikel debu agar tidak masuk ke dalam kompresor. Udara yang telah disaring kemudian dikompresi sehingga mengalami peningkatan tekanan sebelum dialirkan menuju ruang bakar dan dicampurkan dengan bahan bakar. Jenis bahan bakar yang digunakan, baik berupa gas alam maupun bahan bakar minyak (BBM), akan memengaruhi proses pembakaran dan tingkat efisiensi sistem. Pada penggunaan bahan bakar gas, bahan bakar dapat langsung dicampurkan dengan udara untuk proses pembakaran, sedangkan bahan bakar minyak harus melalui proses pengabutan (*atomisasi*) terlebih dahulu melalui *burner* sebelum bercampur dengan udara. Proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar menghasilkan gas bertekanan serta bersuhu tinggi yang memiliki energi kinetik untuk memutar turbin gas. Putaran turbin tersebut kemudian diteruskan ke generator yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Setelah melewati turbin, gas panas sisa pembakaran dialirkan keluar melalui cerobong (*stack*) dan sebagian udara digunakan sebagai pendingin untuk menjaga temperatur komponen turbin. Untuk mencegah terjadinya korosi pada turbin akibat gas bersuhu tinggi, bahan bakar yang digunakan harus memenuhi standar kualitas dengan kandungan logam seperti kalium, vanadium, dan natrium tidak melebihi batas tertentu, yaitu kurang dari 1 ppm (Suyitno, 2021).

Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Gas dan minyak biasanya ditemukan bersama-sama. Gas alam, merupakan hidrokarbon timbunan minyak, kadangkala keduanya bercampur dalam satu larutan. Gas yang dihasilkan bersama dengan minyak, baik dalam bentuk gas bebas ataupun dalam bentuk larutan, disebut *Associated gas*. Gas alam seperti udara merupakan campuran dari beragam gas, umumnya metana (CH_4), komponen lainnya termasuk *etana* (C_2H_6), *propana* (C_3H_8), *butana* (C_4H_{10}), *pentana* (C_5H_{12}), karbondioksida dan nitrogen. Kadangkala campuran tersebut mengandung sejumlah kecil senyawa tak murni, seperti merkuri dari hidrogen (H_2S), beberapa di antara kandungan tersebut sangat korosif dan harus dibuang sebelum gas dicairkan. Pembakaran gas akan mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan pembakaran minyak dan batu bara karena paling mudah dan murah melalui saluran pipa dan gas.

Menurut Setiawan, Hidayat, dan Cahyono (2022), nilai *Specific Fuel Consumption (SFC)* digunakan untuk menunjukkan jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan satuan energi listrik. Nilai SFC yang rendah menunjukkan performa pembangkit yang lebih efisien. Gas alam tidak seperti minyak yang harus ditampung dalam sebuah tangki waktu diambil dalam perut bumi, setelah keluar reservoirnya, gas alam cepat menghembus ke udara, karena lebih ringan dari udara jika masih dalam bentuk gas, kecuali ditampung dalam alur pipa atau dicairkan untuk disimpan (Habibah muhamad syahrir, dkk 2022). Menurut Habibah Muhammad Syahrir et al. (2022), konsumsi bahan bakar merupakan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya listrik tertentu dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar serta kondisi operasi pembangkit.

Heat Rate

Menurut Soelaiman, Sofyan, dan Priyanto (2024), heat rate adalah perbandingan antara energi panas yang masuk ke sistem dengan energi listrik yang dihasilkan generator. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi performa dan efisiensi pembangkit listrik. Heat rate merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan besarnya energi panas yang dibutuhkan generator dalam menghasilkan energi listrik. Semakin besar nilai heat rate, maka performa pembangkit dianggap semakin rendah karena kebutuhan energi bahan bakar menjadi lebih besar. Sebaliknya, apabila nilai heat rate semakin kecil maka kinerja pembangkit menjadi lebih baik dan lebih efisien. Heat rate terdiri dari dua jenis, yaitu *Gross Plant Heat Rate (GPHR)* dan *Net Plant Heat Rate (NPHR)*. Perhitungan heat rate mengacu pada SPLN No. 80 Tahun 1989.

Efisiensi Termal

Efisiensi termal merupakan salah satu parameter yang menentukan tingkat kinerja pembangkit listrik. Menurut Naryono dan Budiono (2023), efisiensi termal turbin gas dipengaruhi oleh kondisi pembebanan, temperatur operasi, tekanan udara masuk kompresor, dan laju aliran bahan bakar. Peningkatan beban operasi umumnya meningkatkan efisiensi termal hingga mencapai titik optimum operasi pembangkit. Nilai efisiensi termal diperoleh dari perbandingan energi panas bahan bakar yang digunakan dengan energi listrik yang dihasilkan. Menurut Setiawan et al. (2022), efisiensi termal merupakan perbandingan antara energi bersih yang dihasilkan turbin dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar yang digunakan selama proses pembangkitan. Perhitungan efisiensi termal dilakukan berdasarkan nilai heat rate pada berbagai kondisi pembebanan pembangkit.

Efisiensi Boiler

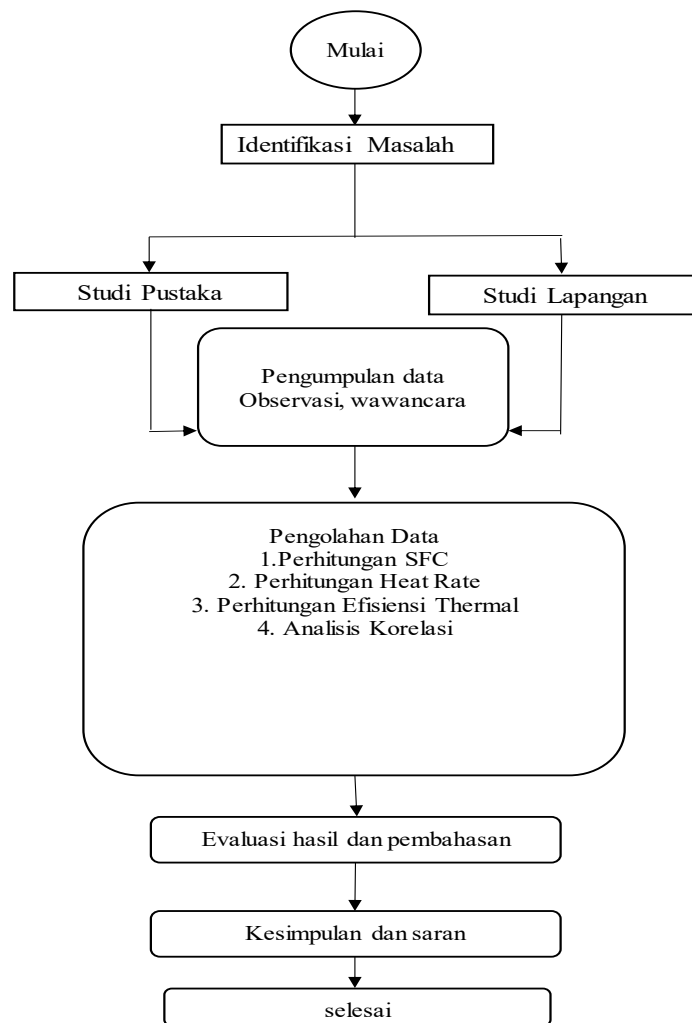
Menurut Moran dan Shapiro (2018), efisiensi boiler merupakan rasio antara energi yang berhasil diserap fluida kerja terhadap energi yang terkandung dalam bahan bakar yang dibakar. Semakin tinggi nilai efisiensi boiler maka semakin optimal proses konversi energi panas yang terjadi. Efisiensi boiler menunjukkan kemampuan boiler dalam mengubah energi panas dari bahan bakar menjadi energi uap. Nilai efisiensi diperoleh dari perbandingan antara energi keluaran (*output*) dengan energi masukan (*input*). Metode yang digunakan disebut metode langsung atau *input-output* karena perhitungan dilakukan dengan membandingkan energi steam yang dihasilkan terhadap energi panas dari bahan bakar.

Biaya Produksi Listrik (BPL)

Biaya Produksi Listrik (BPL) merupakan besarnya biaya bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. Menurut Setiawan et al. (2022), biaya produksi listrik sangat dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar spesifik. Semakin rendah konsumsi bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik, maka biaya produksi listrik akan semakin ekonomis. Nilai BPL dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar spesifik dan harga bahan bakar yang digunakan. Semakin kecil nilai konsumsi bahan bakar spesifik, maka biaya produksi listrik yang dihasilkan akan semakin rendah sehingga operasi pembangkit menjadi lebih ekonomis.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada PLTGU Combined Cycle PT Energi Listrik Batam. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis data operasi pembangkit. Data yang digunakan merupakan data operasional PLTGU bulan April 2026.



Gambar 3. Alur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan SFC

Berikut merupakan perhitungan *Specific Fuel Consumption (SFC)* menggunakan persamaan (2.1) dan persamaan (2.2) berdasarkan data operasi harian *PLTGU (Combined Cycle Power Plant)* periode April 2026. Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui besarnya konsumsi bahan bakar gas yang digunakan dalam menghasilkan energi listrik pada kondisi pembebanan tertentu.

Tabel 1. Hasil Perhitungan SFC Bruto dan SFC Netto

No	Beban (MW)	Gross	Beban Netto (mw)	Konsumsi Gas (Qf)	SFC Bruto	SFC Netto
1	27.38		22.47	19.99	0.73	0.89
2	27.02		22.13	20.01	0.74	0.9
3	26.68		21.83	20.02	0.75	0.92
4	27.02		22.16	20.02	0.74	0.9
5	26.83		21.95	20.02	0.75	0.91
6	34.15		28.69	26.13	0.77	0.91
7	34.29		28.81	26.14	0.76	0.91
8	34.27		28.82	26.13	0.76	0.91
9	34.3		28.85	26.14	0.76	0.91
10	34.19		28.75	26.13	0.76	0.91

11	47.65	41.89	33.64	0.71	0.8
12	47.5	41.75	33.64	0.71	0.81
13	47.4	41.67	33.63	0.71	0.81
14	47.3	41.57	33.64	0.71	0.81
15	47.65	41.89	33.62	0.71	0.8
16	60.81	54.72	41.41	0.68	0.76
17	60.88	54.79	41.39	0.68	0.76
18	60.84	54.76	41.38	0.68	0.76
19	60.45	54.38	41.39	0.68	0.76
20	60.81	54.72	41.39	0.68	0.76

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1, nilai SFC bruto dan SFC netto mengalami penurunan seiring meningkatnya pembebanan pembangkit. Nilai SFC bruto tertinggi diperoleh pada pembebanan rendah sebesar 0,75, sedangkan nilai terendah diperoleh pada pembebanan tinggi sebesar 0,68. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar menjadi lebih efisien pada kondisi beban tinggi. Selain itu, nilai SFC netto juga menunjukkan tren yang sama, dimana nilai tertinggi berada pada kisaran 0,92 saat beban rendah dan menurun hingga 0,76 pada kondisi pembebanan tinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pembangkit combined cycle bekerja lebih optimal ketika dioperasikan pada beban yang lebih besar karena energi listrik yang dihasilkan meningkat lebih signifikan dibandingkan konsumsi bahan bakar gas yang digunakan.

Perhitungan *Heat Rate*

Berdasarkan data operasi harian PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*) periode April 2026, diperoleh nilai Gross Plant Heat Rate (GPHR) sebesar 2881,85 kcal/kWh. Nilai tersebut menunjukkan besarnya energi panas dari bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan setiap satu kilowatt-jam energi listrik pada sisi keluaran generator (*gross output*). Hasil perhitungan ini menggambarkan karakteristik kinerja termal pembangkit pada kondisi operasi dan pembebanan tertentu, di mana nilai GPHR menjadi salah satu parameter evaluasi untuk mengetahui tingkat efisiensi pemanfaatan energi bahan bakar pada unit PLTGU.

Net Plant Heat Rate (NPHR)

Berdasarkan data operasi harian PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*) periode April 2026, diperoleh nilai Net Plant Heat Rate (NPHR) sebesar 3202,58 kcal/kWh. Nilai tersebut menunjukkan jumlah energi panas bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan setiap satu kilowatt-jam energi listrik bersih setelah memperhitungkan kebutuhan energi internal pembangkit (*auxiliary load*). Hasil ini menunjukkan bahwa nilai *heat rate* dipengaruhi oleh kondisi pembebanan unit, di mana pengoperasian pada tingkat beban yang lebih tinggi memungkinkan pemanfaatan energi bahan bakar secara lebih optimal sehingga meningkatkan efisiensi termal pembangkit. Nilai NPHR tersebut menjadi salah satu indikator dalam mengevaluasi kinerja PLTGU berdasarkan kemampuan sistem dalam mengonversi energi panas bahan bakar menjadi energi listrik bersih.

Perhitungan Efisiensi Thermal

Berdasarkan data operasi harian PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*) periode April 2026, diperoleh nilai efisiensi thermal bruto sebesar 29,84%. Nilai tersebut menunjukkan kemampuan pembangkit dalam mengonversi energi panas yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi listrik pada sisi keluaran generator sebelum dikurangi kebutuhan energi internal pembangkit. Hasil efisiensi thermal bruto ini menggambarkan performa termal unit PLTGU dalam memanfaatkan energi bahan bakar selama proses pembangkitan listrik, di mana semakin tinggi nilai efisiensi menunjukkan semakin optimal proses konversi energi yang berlangsung pada sistem pembangkit.

Efisiensi Thermal Netto

Berdasarkan data operasi harian PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*) periode April 2026, diperoleh nilai efisiensi thermal netto sebesar 26,85%. Nilai tersebut menunjukkan kemampuan pembangkit dalam mengubah energi panas bahan bakar menjadi energi listrik bersih setelah memperhitungkan penggunaan energi untuk kebutuhan internal pembangkit (*auxiliary load*). Hasil efisiensi thermal netto ini menggambarkan kinerja aktual PLTGU dalam proses konversi energi, karena mempertimbangkan energi listrik yang benar-benar tersedia untuk disalurkan. Nilai

efisiensi tersebut menjadi parameter penting dalam evaluasi performa termal pembangkit, di mana peningkatan efisiensi menunjukkan pemanfaatan energi bahan bakar yang semakin optimal.

Tabel 2. Hasil Perhitungan *Heat Rate* dan Efisiensi Thermal

No	Beban (MW)	Konsumsi gas (Qf)	GPfHR (kcal/kwh)	N thermal Bruto (%)	N thermal netto (%)
1	27.38	19.99	3766.7	27.82	22.83
2	27.02	20.01	3828.39	27.42	22.46
3	26.68	20.02	3882.94	27.06	22.14
4	27.02	20.02	3825.12	27.41	22.48
5	26.83	20.02	3861.72	27.22	22.27
6	34.15	26.13	3856.2	26.54	22.3
7	34.29	26.14	3841.61	26.64	22.38
8	34.27	26.13	3838.81	26.63	22.4
9	34.3	26.14	3836.28	26.65	22.41
10	34.19	26.13	3848.15	26.57	22.34
11	47.65	33.64	3400.14	28.77	25.29
12	47.5	33.64	3411.54	28.68	25.2
13	47.4	33.63	3417.17	28.62	25.166
14	47.3	33.64	3426.31	28.55	25.1
15	47.65	33.62	3398.12	28.78	25.3
16	60.81	41.41	3204.13	29.82	26.84
17	60.88	41.39	3198.49	29.87	26.88
18	60.84	41.38	3199.47	29.86	26.87
19	60.45	41.39	3222.61	29.66	26.68
20	60.81	41.39	3202.58	29.84	26.85

Perhitungan Efisiensi Boiler:

Berdasarkan data operasi harian PLTGU (Combined Cycle Power Plant) periode April 2026, diperoleh nilai efisiensi boiler atau Heat Recovery Steam Generator (HRSG) sebesar 84,32%. Nilai tersebut menunjukkan kemampuan HRSG dalam memanfaatkan energi panas dari gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang digunakan dalam proses pembangkitan listrik. Hasil efisiensi ini menggambarkan tingkat efektivitas perpindahan energi panas dari sumber panas menuju fluida kerja, di mana semakin tinggi nilai efisiensi menunjukkan semakin optimal proses konversi energi panas menjadi energi uap pada sistem HRSG. Nilai efisiensi boiler sebesar 84,32% menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja termal PLTGU, khususnya pada sistem pemanfaatan panas sisa (waste heat recovery) untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan pembangkit.

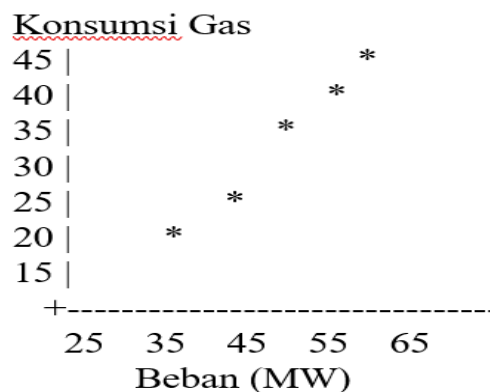
Tabel 3. Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler

No	Beban (MW)	Produksi steam (kg/jam)	Konsumsi Gas (Kg/jam)	Hg (kcal/kg)	Hf (kcal/kg)	Efisiensi Boiler (%)
1	27.38	168.420	19.990	812.34	221.14	74.11
2	27.02	167.985	20.010	812.28	221.08	73.82
3	26.68	167.410	20.020	812.15	221.04	73.45
4	27.02	167.950	20.020	812.31	221.1	73.77
5	26.83	167.620	20.020	812.24	221.07	73.58
6	34.15	188.520	26.130	817.52	222.43	77.36
7	34.29	188.910	26.140	817.68	222.48	77.48
8	34.27	188.860	26.130	817.61	222.45	77.44
9	34.3	188.940	26.140	817.7	222.49	77.49
10	34.19	188.650	26.130	817.55	222.44	77.38
11	47.65	221.450	33.640	822.84	223.51	81.92
12	47.5	221.120	33.640	822.77	223.48	81.75

13	47.4	220.980	33.630	822.71	223.45	81.68
14	47.3	220.720	33.640	822.65	223.42	81.54
15	47.65	221.470	33.620	822.88	223.53	81.95
16	60.81	245.620	41.410	825.64	224.18	84.32
17	60.88	245.910	41.390	825.71	224.22	84.45
18	60.84	245.860	41.380	825.69	224.21	84.47
19	60.45	244.980	41.390	825.51	224.15	84.08
20	60.81	245.620	41.390	825.64	224.18	84.32

Analisis hubungan beban terhadap konsumsi energi

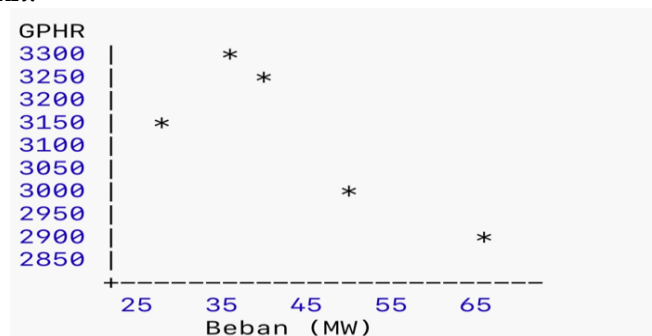
Untuk memperjelas hubungan antara beban pembangkit dan konsumsi gas, data hasil pengamatan diolah dalam bentuk grafik. Grafik ini menunjukkan perubahan konsumsi gas pada berbagai tingkat pembebanan pembangkit selama periode pengamatan. Melalui visualisasi tersebut dapat diketahui kecenderungan peningkatan atau penurunan konsumsi bahan bakar seiring perubahan daya yang dihasilkan oleh pembangkit. Hubungan antara kedua variabel ini penting untuk dianalisis karena konsumsi bahan bakar merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi biaya operasi dan efisiensi pembangkit listrik. Berdasarkan data operasional yang diperoleh, terlihat bahwa semakin besar beban pembangkit maka konsumsi gas yang dibutuhkan juga semakin meningkat.



Gambar 4. Hubungan beban pembangkit terhadap konsumsi gas

Analisis Hubungan Beban terhadap Heat Rate

Selain mempengaruhi konsumsi bahan bakar, perubahan beban pembangkit juga berpengaruh terhadap nilai heat rate. Heat rate merupakan indikator yang digunakan untuk menilai tingkat efisiensi pembangkit dalam mengubah energi panas bahan bakar menjadi energi listrik. Untuk melihat pola hubungan tersebut secara lebih jelas, data heat rate pada berbagai kondisi pembebanan disajikan dalam bentuk grafik. Grafik ini memberikan gambaran mengenai perubahan kebutuhan energi panas per satuan energi listrik yang dihasilkan pada setiap tingkat pembebanan pembangkit.



Gambar 5. Analisis Hubungan Beban terhadap Heat Rate

Hasil Analisis

Berdasarkan hasil pengolahan data operasi harian PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*) periode April 2026, diketahui bahwa variasi pembebanan pembangkit memiliki keterkaitan terhadap perubahan konsumsi bahan bakar, *heat rate*, efisiensi thermal, dan efisiensi boiler. Peningkatan beban pembangkit menyebabkan konsumsi gas mengalami kenaikan akibat meningkatnya kebutuhan energi pembakaran pada turbin gas. Pada kondisi beban rendah sekitar 26–27 MW, konsumsi gas berada pada kisaran 20 MMSCFD, sedangkan pada pembebanan tinggi sekitar 60 MW konsumsi gas meningkat hingga mencapai 41 MMSCFD. Hubungan antara pembebanan dan konsumsi gas menunjukkan korelasi positif yang sangat kuat dengan nilai $r = 0,905$, yang menunjukkan bahwa peningkatan daya keluaran pembangkit diikuti oleh peningkatan kebutuhan bahan bakar secara linier.

Selain memengaruhi konsumsi bahan bakar, peningkatan pembebanan juga berpengaruh terhadap nilai *heat rate* pembangkit. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *Gross Plant Heat Rate* (GPHR) dan *Net Plant Heat Rate* (NPHR) mengalami penurunan seiring meningkatnya beban operasi. Nilai GPHR menurun dari sekitar 3177,09 kcal/kWh pada beban rendah menjadi 2878,54 kcal/kWh pada beban tinggi, sedangkan nilai NPHR mengalami penurunan dari 3882,94 kcal/kWh menjadi 3198,49 kcal/kWh. Hubungan antara pembebanan dan *heat rate* memiliki korelasi negatif yang sangat kuat dengan nilai $r = -0,910$, yang menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan mampu meningkatkan efektivitas pemanfaatan energi bahan bakar sehingga kebutuhan energi panas per satuan energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih rendah.

Peningkatan pembebanan juga memberikan pengaruh terhadap performa efisiensi thermal pembangkit. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa efisiensi thermal bruto dan netto meningkat ketika unit beroperasi pada tingkat pembebanan yang lebih tinggi. Pada kondisi beban rendah, efisiensi thermal bruto berada pada kisaran 26–27%, kemudian meningkat hingga mencapai 29,87% pada pembebanan tinggi. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses konversi energi panas bahan bakar menjadi energi listrik berlangsung lebih optimal pada kondisi operasi dengan beban yang lebih besar. Penurunan nilai *heat rate* turut berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi thermal karena energi bahan bakar dapat dimanfaatkan secara lebih efektif dalam sistem *combined cycle*.

Hasil evaluasi terhadap efisiensi boiler atau *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) menunjukkan pola peningkatan kinerja pada kondisi pembebanan tinggi. Efisiensi boiler meningkat dari sekitar 73% pada beban rendah menjadi 84% pada pembebanan tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan energi panas dari gas buang turbin gas oleh HRSG berlangsung lebih efektif ketika jumlah energi yang tersedia meningkat. Peningkatan efisiensi HRSG berpengaruh terhadap kemampuan sistem dalam menghasilkan uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap sehingga mendukung peningkatan efisiensi keseluruhan PLTGU.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*) memberikan pengaruh terhadap perubahan karakteristik konsumsi bahan bakar, *heat rate*, efisiensi thermal, dan efisiensi *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Berdasarkan hasil pengolahan data operasi periode April 2026, peningkatan beban dari kisaran 26–27 MW hingga mendekati 60 MW menyebabkan konsumsi gas meningkat dari sekitar 20 MMSCFD menjadi 41 MMSCFD dengan nilai korelasi positif yang sangat kuat ($r = 0,905$). Peningkatan konsumsi bahan bakar pada kondisi beban tinggi merupakan fenomena yang umum terjadi karena peningkatan daya keluaran membutuhkan energi pembakaran yang lebih besar pada turbin gas. Namun, peningkatan konsumsi bahan bakar tersebut diikuti oleh peningkatan produktivitas energi listrik yang lebih besar sehingga menghasilkan pemanfaatan bahan bakar yang lebih efektif. Temuan ini sejalan dengan penelitian Khan et al. (2021) yang menjelaskan bahwa konsumsi bahan bakar pada pembangkit siklus gabungan meningkat seiring kenaikan beban, tetapi efisiensi operasi cenderung meningkat karena komponen utama pembangkit bekerja mendekati kondisi desainnya.

Berdasarkan analisis *Specific Fuel Consumption* (SFC), penelitian ini menemukan bahwa nilai SFC bruto mengalami penurunan dari kisaran 0,75 menjadi 0,68, sedangkan SFC netto menurun dari sekitar 0,92 menjadi 0,76 pada peningkatan pembebanan. Penurunan nilai SFC menunjukkan

bahwa jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik menjadi lebih kecil pada kondisi beban tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan adanya peningkatan efisiensi pemanfaatan energi bahan bakar pada sistem *combined cycle*. Menurut Boyce (2019), turbin gas umumnya memiliki efisiensi yang lebih rendah ketika beroperasi pada beban parsial karena adanya peningkatan kehilangan energi relatif terhadap daya keluaran, sedangkan operasi pada beban mendekati kapasitas nominal mampu meningkatkan efisiensi termal akibat berkurangnya pengaruh *part-load losses*. Hal serupa juga dilaporkan oleh Ameri et al. (2020) bahwa pengoperasian pembangkit siklus gabungan pada tingkat beban tinggi dapat meningkatkan performa energi karena proses ekspansi turbin dan pemanfaatan panas buang berlangsung lebih optimal.

Perubahan pembebanan juga memberikan pengaruh terhadap parameter *heat rate* pembangkit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai GPHR dan NPHR mengalami penurunan ketika beban meningkat, dengan hubungan korelasi negatif yang sangat kuat ($r = -0,910$). Nilai GPHR menurun dari sekitar 3177,09 kcal/kWh pada beban rendah menjadi 2878,54 kcal/kWh pada beban tinggi, sedangkan NPHR menurun dari 3882,94 kcal/kWh menjadi 3198,49 kcal/kWh. Penurunan *heat rate* menunjukkan bahwa energi panas bahan bakar dapat dikonversi menjadi energi listrik secara lebih efektif pada kondisi pembebanan tinggi. Hasil ini konsisten dengan penelitian Alobaid et al. (2017) yang menyatakan bahwa peningkatan beban operasi pada pembangkit siklus gabungan mampu menurunkan nilai *heat rate* karena turbin gas dan HRSG bekerja pada kondisi perpindahan panas yang lebih stabil. Selain itu, Moran et al. (2018) menjelaskan bahwa nilai *heat rate* merupakan indikator utama performa pembangkit karena menggambarkan jumlah energi input yang diperlukan untuk menghasilkan energi listrik tertentu, sehingga nilai yang lebih rendah menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi.

Peningkatan efisiensi thermal pada penelitian ini juga memperkuat hubungan antara pembebanan dan performa energi PLTGU. Efisiensi thermal bruto meningkat dari kisaran 26–27% pada beban rendah menjadi sekitar 29,87% pada beban tinggi, sedangkan efisiensi thermal netto meningkat hingga mencapai 26,85%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa sistem *combined cycle* mampu memanfaatkan energi bahan bakar secara lebih optimal ketika jumlah energi yang tersedia meningkat. Pada sistem PLTGU, peningkatan efisiensi tidak hanya dipengaruhi oleh kinerja turbin gas, tetapi juga oleh kemampuan HRSG dalam mengambil kembali energi panas dari gas buang untuk menghasilkan uap pada turbin uap. Menurut Najjar (2019), karakteristik utama pembangkit siklus gabungan adalah kemampuannya memanfaatkan energi panas sisa turbin gas sehingga menghasilkan efisiensi lebih tinggi dibandingkan pembangkit siklus sederhana. Dengan demikian, peningkatan efisiensi thermal pada penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi antara turbin gas dan sistem pemulihan panas berjalan secara efektif.

Hasil evaluasi terhadap efisiensi HRSG menunjukkan peningkatan dari sekitar 73% pada beban rendah menjadi 84% pada beban tinggi. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa jumlah energi panas yang tersedia dari gas buang turbin gas semakin efektif dimanfaatkan untuk menghasilkan uap. Kinerja HRSG sangat dipengaruhi oleh temperatur dan laju aliran gas buang, sehingga peningkatan beban turbin gas akan meningkatkan energi panas yang tersedia untuk proses perpindahan panas. Temuan ini sesuai dengan penelitian Breeze (2021) yang menyatakan bahwa efisiensi HRSG meningkat pada kondisi operasi dengan temperatur gas masuk yang lebih tinggi karena proses pemulihan panas berlangsung lebih maksimal. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi HRSG pada penelitian ini berkontribusi terhadap peningkatan performa keseluruhan PLTGU melalui peningkatan produksi uap dan optimalisasi kerja turbin uap.

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi terhadap pengoperasian PLTGU. Dari sisi operasional, pengoperasian pembangkit pada tingkat beban optimum dapat meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar karena nilai SFC dan *heat rate* menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut dapat menjadi dasar dalam strategi pengaturan beban pembangkit untuk memperoleh konsumsi bahan bakar yang lebih ekonomis tanpa mengurangi keandalan sistem. Dari sisi manajemen energi, parameter GPHR, NPHR, efisiensi thermal, dan efisiensi HRSG dapat digunakan sebagai indikator evaluasi berkala untuk mendeteksi perubahan performa pembangkit akibat faktor operasi maupun degradasi komponen.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada periode pengamatan yang hanya menggunakan data operasi harian selama April 2026, sehingga variasi performa pembangkit dalam kondisi musiman atau perubahan karakteristik operasi jangka panjang belum dapat dievaluasi secara menyeluruh. Selain itu, analisis difokuskan pada hubungan antara pembebanan dan parameter performa utama tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti kondisi lingkungan, temperatur udara masuk kompresor, kualitas bahan bakar, serta tingkat degradasi peralatan. Meskipun demikian, hasil penelitian ini memberikan gambaran empiris mengenai pengaruh pembebanan terhadap performa termal PLTGU dan dapat menjadi dasar untuk penelitian lanjutan dengan cakupan data yang lebih panjang serta mempertimbangkan variabel operasi tambahan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis hubungan pembebanan terhadap konsumsi gas, *heat rate*, efisiensi thermal, dan efisiensi boiler pada PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*) periode April 2026, dapat disimpulkan bahwa perubahan beban operasi memiliki pengaruh terhadap karakteristik kinerja pembangkit. Peningkatan beban menyebabkan konsumsi gas meningkat dengan hubungan korelasi positif yang sangat kuat sebesar $r = 0,905$, namun diikuti oleh penurunan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC) dan *heat rate* dengan korelasi negatif sebesar $r = -0,910$. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa PLTGU mampu memanfaatkan energi bahan bakar secara lebih efektif ketika beroperasi pada tingkat pembebanan yang lebih tinggi. Selain itu, peningkatan pembebanan juga meningkatkan performa termal pembangkit yang ditunjukkan melalui peningkatan efisiensi thermal bruto hingga 29,87% dan efisiensi boiler (*Heat Recovery Steam Generator*/HRSG) hingga 84,47%. Dengan demikian, pengoperasian pada kondisi pembebanan optimum dapat meningkatkan efektivitas konversi energi panas menjadi energi listrik serta mendukung peningkatan kinerja keseluruhan sistem PLTGU.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan analisis dengan menggunakan periode pengamatan yang lebih panjang serta mempertimbangkan variabel operasi tambahan, seperti temperatur lingkungan, kondisi kompresor, kualitas bahan bakar, dan tingkat degradasi komponen pembangkit. Bagi praktisi pengelola PLTGU, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar evaluasi strategi pengoperasian unit melalui pengaturan pembebanan yang mendekati kondisi optimum untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar dan menjaga performa peralatan. Selain itu, bagi pengambil kebijakan di bidang energi, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan strategi operasi pembangkit berbasis efisiensi energi dan pengendalian biaya produksi listrik melalui optimalisasi pemanfaatan sumber energi primer.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini. Terima kasih kepada rekan-rekan sejawat yang telah memberikan saran, dukungan, dan inspirasi selama proses penelitian. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada semua partisipan dan responden yang telah meluangkan waktu untuk berpartisipasi dalam penelitian ini. Tak lupa, kami juga mengucapkan terima kasih kepada lembaga atau institusi yang telah memberikan dukungan dan fasilitas dalam menjalankan penelitian ini. Semua kontribusi dan bantuan yang diberikan sangat berarti bagi kelancaran dan kesuksesan penelitian ini. Terima kasih atas segala kerja keras dan kolaborasi yang telah terjalin.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Farisi, D. I., Rumawan, F. H., & Wirawan, A. P. (2024). Analisis pengaruh perubahan beban terhadap konsumsi batu bara, *heat rate* dan efisiensi termal PLTU Indoeka Unit 1. *ELECTROPS: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 3(2), 10–17. <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TE>
- Alobaid, F., Postler, R., Ströhle, J., Epple, B., & Kim, H. G. (2017). Modeling and investigation of heat recovery steam generator in combined cycle power plants. *Energy Conversion and Management*, 144, 351–365. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.067>

- Ameri, M., Hejazi, S. H., & Montaser Kouhsari, S. M. (2020). Energy and exergy analysis of a combined cycle power plant under different operating conditions. *Energy Reports*, 6, 1146–1157. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.003>
- Ariyandi, R., Prasetyo, H., & Nugroho, A. (2022). Analisis pengaruh pembebanan terhadap *heat rate* dan efisiensi PLTU batubara. *Jurnal Teknik Energi*, 11(2), 45–53. <https://doi.org/10.1234/jte.v11i2.2022>
- Boyce, M. P. (2019). *Gas turbine engineering handbook* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03531-5>
- Breeze, P. (2021). *Power generation technologies* (3rd ed.). Newnes. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04452-5>
- Habibah, M. S., Rahman, A., & Yusuf, M. (2022). Analisis konsumsi bahan bakar gas pada turbin gas pembangkit listrik tenaga gas. *Jurnal Rekayasa Energi*, 8(1), 21–30. <https://doi.org/10.5678/jre.v8i1.2022>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). *Statistik ketenagalistrikan Indonesia 2021*. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. <https://gatrik.esdm.go.id>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). Wiley.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2022). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Najjar, Y. S. H. (2019). Efficient use of energy by utilizing gas turbine combined systems. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114365. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114365>
- Naryono, & Budiono, L. (2023). Analisis efisiensi turbin gas terhadap beban operasi PLTGU Muara Tawar Blok 1. *SINTEK: Jurnal Mesin Teknologi*, 7(2), 78–94.
- PLN. (2021). *Standar operasi pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU)*. PT PLN (Persero).
- Pratama, D., Siregar, R., & Wijaya, F. (2023). Evaluasi performa *combined cycle power plant* berdasarkan nilai *heat rate* dan efisiensi termal. *Jurnal Teknologi Industri*, 14(1), 66–74. <https://doi.org/10.33479/jti.v14i1.2023>
- Rizca, M., Hidayat, T., & Saputra, E. (2021). Pengaruh variasi beban generator terhadap *heat rate* pembangkit listrik tenaga uap. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 9(3), 112–120. <https://doi.org/10.24843/jtei.2021.v09.i03>
- Setiawan, B., Hidayat, G., & Cahyono, S. D. (2022). Analisis pengaruh *compressor washing* terhadap efisiensi kompresor dan efisiensi thermal turbin gas Blok 1.1 PLTG UP Muara Tawar. *SINTEK: Jurnal Mesin Teknologi*, 11(1), 49–54.
- Soelaiman, Sofyan, & Priyanto, N. (2024). Analisa prestasi kerja turbin uap pada beban yang bervariasi. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jakarta*, 1(1), 1–12.
- Suyitno, S. (2021). *Sistem pembangkit listrik tenaga gas dan uap*. Deepublish.
- Wibowo, A., Firmansyah, D., & Kurniawan, I. (2024). Analisis efisiensi boiler HRSG pada *combined cycle power plant*. *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, 15(2), 88–97. <https://doi.org/10.22219/jkem.v15i2.2024>
- Yuliana, N., Putra, B., & Ramadhan, F. (2025). Optimasi konsumsi bahan bakar pada pembangkit listrik *combined cycle* berbasis gas alam. *Jurnal Energi Nasional*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.31289/jen.v17i1.2025>