



Metode Cogeneration untuk Efisiensi Gas Turbine Generator 3x108 MW pada PLTGU Blok II PT. PLN Indonesia Power UBP Semarang

Firdaus Rizaldi^{1*}, Muhamad Haddin²

¹⁻²Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Email: firdausrizaldi98@gmail.com^{1*}, 30602200015@std.unissula.ac.id²

*Penulis korespondensi: firdausrizaldi98@gmail.com¹

Abstract. The low thermal efficiency of Gas Power Plants (PLTG) due to exhaust gas heat loss drives the implementation of cogeneration at PLTGU Block II PT. PLN Indonesia Power UBP Semarang. This study analyzes the performance of the Gas Turbine Generator (GTG), combined cycle efficiency, and Exergy distribution using a 3-3-1 configuration. The research utilizes actual operational data from January 28, 2026, sampled at 10-minute intervals. Results indicate that cogeneration via a Heat Recovery Steam Generator (HRSG) significantly enhances plant efficiency. The GTG output ranged from 273–283 MW with an efficiency of 30.0–30.2%. Following combined cycle integration, system efficiency increased to 43.9–44.4%, a gain of approximately 14%, with a heat rate of 11,916–11,988 kJ/kWh. Exhaust heat of 665–713 MW was recovered to generate an additional 130 MW through the Steam Turbine Generator (STG). Exergy analysis reveals that the largest irreversibility occurs in the GTG combustion process (285 MW), followed by the HRSG (185 MW) and STG (49 MW).

Keywords: Cogeneration; Combined Cycle; Exergi; Gas Turbine Generator; Thermal Efficiency.

Abstrak. Rendahnya efisiensi termal pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) akibat pembuangan panas gas buang menjadi latar belakang penerapan sistem cogeneration pada PLTGU Blok II PT. PLN Indonesia Power UBP Semarang. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa Gas Turbine Generator (GTG), efisiensi combined cycle, serta distribusi eksergi dengan konfigurasi 3-3-1. Metode penelitian menggunakan data operasional aktual per 28 Januari 2026 yang diambil dengan interval 10 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan cogeneration melalui Heat Recovery Steam Generator (HRSG) secara signifikan meningkatkan efisiensi pembangkit. Daya GTG tercatat pada kisaran 273–283 MW dengan efisiensi 30,0–30,2%. Setelah integrasi combined cycle, efisiensi sistem meningkat menjadi 43,9–44,4%, atau naik sekitar 14%, dengan nilai heat rate 11.916–11.988 kJ/kWh. Panas gas buang sebesar 665–713 MW berhasil dimanfaatkan untuk menghasilkan daya tambahan 130 MW pada STG. Analisis eksergi mengungkap bahwa irreversibility terbesar terjadi pada proses pembakaran GTG (285 MW), diikuti oleh HRSG (185 MW) dan STG (49 MW).

Kata kunci: Cogeneration; Combined Cycle; Efisiensi Termal; Eksergi; Gas Turbine Generator.

1. LATAR BELAKANG

Pembangkit Listrik Gas Uap (PLTGU) Tambak Lorok II Semarang dengan kapasitas 3x108 MW untuk Gas Turbine Generator (GTG) dan 1x188MW untuk Steam Turbine Generator (STG). PLTGU ini mempunyai 3 (tiga) unit GTG, 3 (tiga) unit Heat Recovery Steam Generator dan 1 (satu) unit Steam Turbine Generator. Ketiga unit GTG beroperasi dengan 1 (satu) sumber energi yang menggunakan metode siklus Brayton, dimana ke 3 GTG ini mempunyai efisiensi 30-33 %.

Permasalahannya adalah bagaimana meningkatkan rendahnya efisiensi pada GTG. Rendahnya efisiensi GTG disebabkan oleh Usia GTG, dan faktor beban operasi GTG, hal ini yang berpengaruh pada rendahnya efisiensi. Dampak dari rendahnya efisiensi menyebabkan kerugian dalam proses pembakaran dan banyak terjadi losses pada faktor panas buangnya.

Solusinya adalah bagaimana meningkatkan efisiensi dengan cara memanfaatkan gas panas buang tersebut untuk menjadi energi yang baru untuk menghasilkan uap dan uap tersebut dimanfaatkan lagi untuk menggerakkan Turbin Generator Uap/ Steam Turbine Generator (STG) untuk menghasilkan peningkatan efisiensi (Boyce, 2012). Beberapa penelitian terdahulu tentang GTG telah dilakukan, antara lain: Analisa Unjuk Kerja Heat Recovery Steam Generator (HRSG) menggunakan pendekatan porous (Syarif & Hantoro, 2013), perhitungan pada Heat Recovery Steam Generator (Ganapathy, 2003), dan metode Combine Cycle dengan Steam Turbine (Kehlhofer et al., 2009).

Fokus penelitian ini fokus pada Analisa Efisiensi Gas Turbin Generator Pada PLTGU. Metode Cogeneration digunakan untuk meningkatkan efisiensi PLTGU dengan memanfaatkan gas buang tersebut untuk menghasilkan uap. Sebagai obyek penelitian ditentukan pada GTG Blok II PT. PLN Indonesia Power UBP Semarang.

2. KAJIAN TEORITIS

Tinjauan Penelitian Relevan

Beberapa studi terdahulu telah memberikan landasan kuat mengenai efektivitas sistem siklus gabungan dan pemanfaatan panas buang. Penelitian pada PLTG Belawan menunjukkan bahwa integrasi Heat Recovery Steam Generator (HRSG) dan turbin uap mampu meningkatkan efisiensi pembangkit dari 31,30% menjadi 48,34% pada konsumsi bahan bakar yang sama (Saputra et al., 2025). Hal ini sejalan dengan evaluasi di PLTGU Tanjung Uncang yang menekankan pentingnya pemeliharaan operasional untuk memulihkan heat rate dan efisiensi termal (Purba, 2024). Lebih lanjut, analisis pada PLTGU Cilegon mengonfirmasi bahwa beban operasional berpengaruh signifikan terhadap efisiensi, di mana kondisi beban tinggi umumnya menghasilkan performa yang lebih optimal dibandingkan beban parsial (Antariksa et al., 2023). Integrasi analisis eksergi juga telah diterapkan dalam studi waste heat recovery, yang membuktikan bahwa pemanfaatan panas buang tidak hanya meningkatkan daya output tetapi juga memperbaiki efisiensi eksergetik sistem dengan mengurangi *Exergy* destruction pada setiap komponen (Kareem et al., 2023). Berbagai studi ini menjadi basis bagi penelitian ini untuk mengevaluasi sistem PLTGU Blok II Tambak Lorok melalui pendekatan cogeneration.

Landasan Teoritis Pembangkitan Energi

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) pada dasarnya merupakan integrasi dua siklus termodinamika utama: siklus Brayton pada turbin gas dan siklus Rankine pada turbin uap. Prinsip kerja utama sistem ini adalah memanfaatkan gas buang hasil pembakaran di turbin gas yang masih memiliki temperatur tinggi (527–554°C) sebagai sumber panas untuk

menghasilkan uap di HRSG. Pemanfaatan energi yang seharusnya terbuang ini memungkinkan efisiensi total sistem mencapai 50–60%, jauh di atas efisiensi open cycle yang hanya berkisar 30–35%. Cogeneration atau Combined Heat and Power (CHP) adalah metode pemanfaatan energi primer untuk menghasilkan dua bentuk energi berguna (listrik dan panas) secara simultan. Dalam operasional PLTGU, cogeneration diwujudkan melalui konfigurasi multi-train, seperti sistem 3-3-1 (tiga GTG, tiga HRSG, dan satu STG). Karena pada model penelitian ini menggunakan konfigurasi 3-3-1 (tiga GTG, tiga HRSG, dan satu STG. Konfigurasi ini memberikan fleksibilitas operasional dan memastikan pasokan uap yang stabil untuk menggerakkan STG, sehingga meminimalkan kerugian termal (exhaust losses) yang menjadi kelemahan utama pada sistem GTG tunggal.

Evaluasi kinerja sistem dilakukan melalui dua parameter utama: efisiensi termal dan heat rate. Efisiensi termal mengukur sejauh mana energi kimia bahan bakar dikonversi menjadi daya listrik, sementara heat rate (kJ/kWh) menyatakan jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik. Keduanya memiliki hubungan terbalik, di mana penurunan nilai heat rate menjadi indikator langsung dari peningkatan efisiensi sistem.

Berbeda dengan analisis energi konvensional, analisis eksergi memberikan gambaran mengenai kualitas energi dan lokasi terjadinya ketidakterbalikan proses (irreversibility). Eksergi didefinisikan sebagai potensi kerja maksimum yang dapat diperoleh sistem terhadap lingkungan acuan.

Kerugian eksergi terbesar umumnya ditemukan pada proses pembakaran dan perpindahan panas di HRSG. Dengan mengidentifikasi titik-titik irreversibility ini, potensi optimalisasi sistem dapat ditentukan secara lebih akurat dan objektif.

Penelitian ini disusun berdasarkan kerangka logika bahwa integrasi sistem cogeneration pada unit pembangkit yang mengalami degradasi performa akibat usia akan memulihkan efisiensi total melalui pemanfaatan energi panas neto. Berdasarkan teori siklus gabungan, diperkirakan bahwa pemanfaatan gas buang pada kondisi base load yang stabil akan secara signifikan menurunkan heat rate sistem dan meningkatkan efisiensi termal keseluruhan.

Perhitungan Efisiensi GTG

Efisiensi Gas Turbine Generator dihitung dengan Persamaan (1).

$$\eta_{GTG\ total} = \frac{P_{GTG\ total}}{\dot{m}_{bb\ total} \times LHV_{total}} \quad (1)$$

dengan: $\eta_{GTG\ total}$ = total efisiensi turbin gas (%), $P_{GTG\ total}$ = total daya listrik keluaran turbin gas (kW atau MW), $\dot{m}_{bb\ total}$ = total laju aliran massa bahan bakar (kg/s), LHV_{total} = total lower heating value gas alam (kJ/kg).

Perhitungan Efisiensi Sistem Cogeneration

Dengan memanfaatkan $Q_{exhaust}$ untuk keperluan termal (misalnya pemanasan air atau proses industri), efisiensi total sistem menjadi Persamaan (2).

$$\eta_{cogen} = \frac{P_{GTG\ total} + P_{STG}}{Q_{fuel\ total}} \quad (2)$$

dengan: η_{cogen} = efisiensi *Cogeneration* (%), $P_{GTG\ total}$ = total daya listrik keluaran turbin gas (kW atau MW), $Q_{thermal}$ = energi panas termanfaatkan (panas proses/uap dari HRSG) (kW), \dot{m}_{bb} = laju aliran massa bahan bakar (kg/s), LHV = lower heating value gas alam (kJ/kg).

Peningkatan Efisiensi Sistem

Untuk meningkatkan efisiensi sistem, dibutuhkan Persamaan (3).

$$\Delta\eta = \eta_{cc} - \eta_{GTG} \quad (3)$$

dengan: $\Delta\eta$ = delta Efisiensi, η_{cc} = hasil Efisiensi *Combined Cycle / Cogeneration* (%), η_{GTG} = hasil Efisiensi GTG.

Faktor Exergy

Analisis *Exergy* dilakukan untuk mengetahui kualitas energi dan besarnya *irreversibilitas* pada sistem PLTGU. *Exergy* menunjukkan kemampuan energi untuk menghasilkan kerja berguna berdasarkan kondisi referensi lingkungan. Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi potensi kehilangan energi pada GTG, HRSG, dan sistem *cogeneration*. *Exergy* gas buang dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$Ex = \dot{m} \times C_p \times \left[(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (4)$$

dengan: Ex = *Exergy* gas buang (kW), \dot{m} = laju aliran massa gas buang (kg/s), C_p = kalor spesifik gas (kJ/kg. K), T = temperatur gas buang (K), T_0 = temperatur lingkungan referensi (K).

Faktor *Exergy* dapat dihitung dengan Persamaan (5).

$$\Psi = 1 - \frac{T_{inlet}}{T_{exhaust}} \quad (5)$$

dengan: Ψ = Faktor eksergi atau koefisien kualitas energi (tanpa satuan), T_{inlet} = laju aliran massa gas buang (kg/s), $T_{exhaust}$ = kalor spesifik gas (kJ/kg. K), Analisis *Exergy* digunakan untuk mengevaluasi kualitas energi *exhaust* gas, potensi pemanfaatan energi panas, *irreversibilitas* sistem, dan peningkatan performa *cogeneration*.

Faktor Irreversibility

Untuk memperoleh nilai *irreversibility* GTG, HRSG, STG ditunjukkan pada Persamaan (6).

$$I_x = E_{in} - E_{out} \quad (6)$$

dengan: $I_x = irreversibility$ atau energi yang hilang pada x “X ini adalah faktor yang perlu dihitung dalam keseluruhan unit yang mencakup keberlangsungan *Exergy*, yaitu GTG, HRSG, dan STG” (MW), E_{in} = total input eksergi atau energi bahan bakar yang masuk (MW), E_{out} = total eksergi keluaran atau energi bahan bakar yang keluar (MW),

Perhitungan total Irreversibility, diperlukan Persamaan (7).

$$I_{total} = I_{combuster\ GT} + I_{HRSG} + I_{STG} \quad (7)$$

dengan: $I_{total} = irreversibility$ atau total energi yang hilang (MW), $I_{combuster\ GT} = irreversibility$ atau energi yang hilang pada combuster GT unit 2.1 sampai unit 2.3 (MW), $I_{HRSG} = irreversibility$ atau energi yang hilang pada combuster GT unit 2.1 sampai unit 2.3 (MW), $I_{STG} = irreversibility$ atau energi yang hilang pada STG 2.0 (MW).

Efisiensi *Exergy* sistem dihitung dengan Persamaan (8)

$$\eta_{ex\ X} = \frac{Ex_{output\ X}}{Ex_{input\ X}} \times 100\% \quad (8)$$

dengan: $\eta_{ex\ X} =$ efisiensi eksergi atau efisiensi hukum kedua termodinamika “X ini adalah faktor yang perlu dihitung dalam keseluruhan unit yang mencakup keberlangsungan *Exergy*, yaitu GTG, HRSG, dan STG” (%), $Ex_{output\ X} =$ total eksergi yang dihasilkan atau dimanfaatkan oleh system “X ini adalah faktor yang perlu dihitung dalam keseluruhan unit yang mencakup keberlangsungan *Exergy*, yaitu GTG, HRSG, dan STG” (MW), $Ex_{input\ X} =$ total eksergi yang masuk ke dalam sistem atau bahan bakar “X ini adalah faktor yang perlu dihitung dalam keseluruhan unit yang mencakup keberlangsungan *Exergy*, yaitu GTG, HRSG, dan STG” (MW).

Perbandingan Open Cycle vs Combined Cycle

Perbandingan ini dilakukan untuk memperoleh peningkatan efisiensi Pembangkit Listrik Gas Uap (PLTGU), dan mengetahui apa saja faktor yang menyebabkan peningkatan efisiensi pada cogeneration, dan kelemahan efisiensi GTG pada Open Cycle karena energi panas langsung dibuang ke atmosfer.

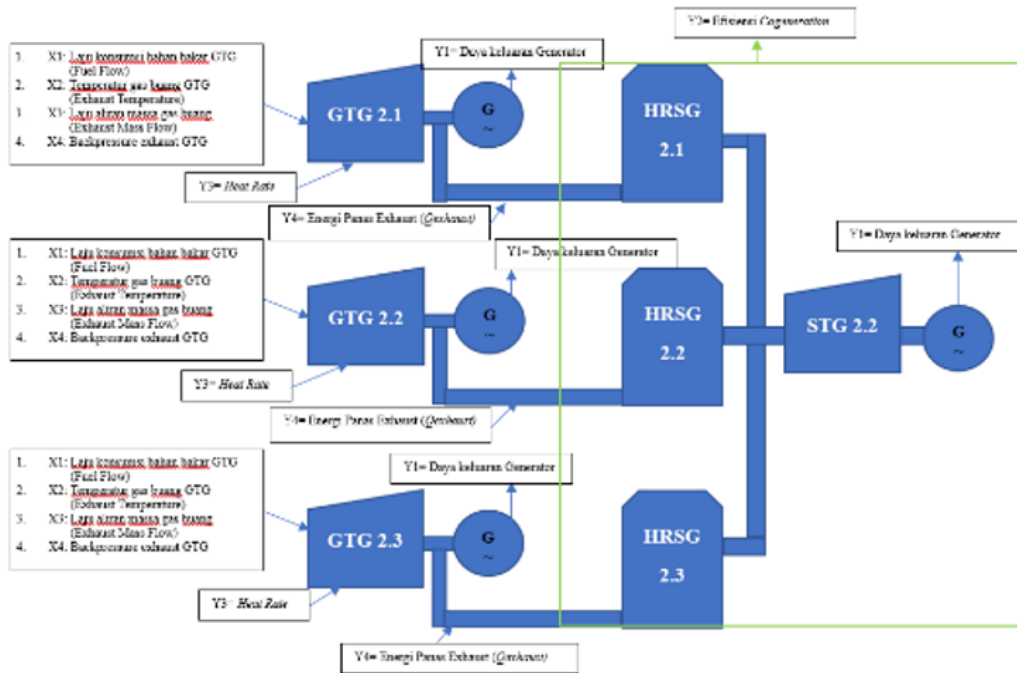
Validasi Hasil Perhitungan

Validasi hasil perhitungan dilakukan untuk memastikan bahwa nilai-nilai performa yang diperoleh dari analisis berada dalam rentang yang sesuai dengan teori, literatur, serta standar industri pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU). Parameter yang divalidasi meliputi efisiensi Gas Turbine Generator (GTG), efisiensi combined cycle (cogeneration), serta heat rate sistem.

3. METODE PENELITIAN

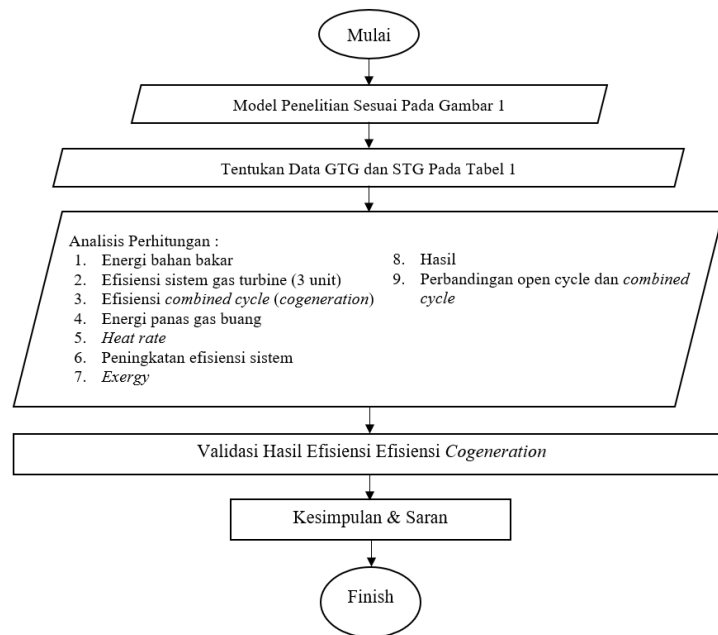
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-analitis dengan jenis penelitian terapan (applied research). Fokus utama adalah evaluasi kinerja termodinamika pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Blok II PT. PLN Indonesia Power UBP Semarang. Populasi dan sampel penelitian mencakup data operasional aktual dari tiga unit Gas Turbine Generator (GTG 2.1, 2.2, 2.3), tiga unit Heat Recovery Steam Generator (HRSG), dan satu unit Steam Turbine Generator (STG) dalam konfigurasi 3-3-1 selama periode pengamatan April hingga Mei 2026. Data penelitian ditentukan melalui observasi langsung dan pengambilan data sekunder dari sistem monitoring operasional Distributed Control System (DCS) atau SCADA. Instrumen utama pengumpulan data meliputi log sheet harian dan data historis sistem kontrol yang mencatat parameter krusial seperti beban pembangkitan, konsumsi bahan bakar gas, temperatur gas buang, serta laju aliran massa. Validasi instrumen dilakukan dengan membandingkan data aktual terhadap dokumen teknis operasional (O&M) untuk memastikan data berada dalam rentang operasional normal yang reliabel sesuai standar pabrikan (OEM).

Model penelitian disusun untuk menganalisis kinerja *Gas Turbin Generator* (GTG) pada PLTGU Blok II PT. PLN Indonesia Power UBP Semarang dengan pendekatan *cogeneration*. Dimana model penelitian yang digunakan itu ada tiga (3) unit Gas Turbine Generator, tiga (3) unit Heat Recovery Steam Generator (HRSG) dan 1 Steam Turbine Generator). Dalam model ini, variabel independen terdiri atas laju konsumsi bahan bakar X_1 , temperatur gas buang GTG X_2 , laju aliran massa gas buang X_3 , dan backpressure exhaust GTG X_4 . Variabel-variabel tersebut memengaruhi variabel dependen yang menjadi indikator kinerja, yaitu daya keluaran total GTG dan STG Y_1 , efisiensi cogeneration Y_1 , heat rate Y_3 , serta energi panas exhaust Y_4 . Variabel kontrol dijaga pada kondisi operasi beban stabil (steady state) dan nilai kalor bahan bakar (LHV) yang konsisten guna meminimalkan fluktuasi data. Analisis data dilakukan secara kuantitatif melalui perhitungan matematis berdasarkan prinsip hukum pertama dan kedua termodinamika. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan Microsoft Excel untuk mengintegrasikan variabel operasional ke dalam Persamaan efisiensi termal dan heat rate. Tahapan analisis dimulai dari penentuan input energi bahan bakar, dilanjutkan dengan evaluasi performa cogeneration, hingga pemetaan distribusi eksergi untuk mengidentifikasi lokasi irreversibility. Model penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Seluruh prosedur perhitungan merujuk pada standar termodinamika teknis guna menjamin konsistensi dan akurasi hasil analisis sebelum dibandingkan dengan standar. efisiensi.



Gambar 1. Model Penelitian konfigurasi sistem PLTGU Tambak Lorok Blok II.

Tahapan penelitian ini disusun dalam diagram alir seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan model penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data dilakukan di PLTGU Blok II PT. PLN Indonesia Power UBP Semarang selama periode April hingga Mei 2026. Fokus pengamatan diambil pada kondisi beban stabil (steady state) tanggal 28 Januari 2026 dengan interval 10 menit selama satu jam. Konfigurasi yang digunakan adalah sistem 3-3-1, yang melibatkan tiga unit Gas Turbine

Generator (GTG), tiga unit Heat Recovery Steam Generator (HRSG), dan satu unit Steam Turbine Generator (STG). Ringkasan rata-rata parameter operasional yang menjadi basis analisis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sumber Data Operasi Terolah (2026).

Parameter	GTG 2.1	GTG 2.2	GTG 2.3	STG 2.0
Daya Output (P) (MW)	93,12	93,15	95,07	130,9
Konsumsi Bahan Bakar (kg/s)	6,93 (HSD)	5,71 (Gas)	6,02 (Gas)	
Temperatur Gas Buang ($^{\circ}\text{C}$)	561	557	554	
Laju Alir Massa Gas Buang (kg/s)	362,05	381,67	444,11	

Analisis Performa Termal dan Efisiensi Cogeneration

Berdasarkan hasil analisis, efisiensi termal sistem Gas Turbin Generator (GTG) pada kondisi open cycle berada pada rentang 30 - 30,2%. Nilai ini merepresentasikan karakteristik siklus Brayton standar, di mana sebagian besar energi input belum terkonversi menjadi energi mekanik. Pada konfigurasi yang digunakan adalah 3 unit GTG, maka hasil efisiensi termal GTG di PLTGU blok-II pada kondisi open cycle dapat dilakukan berdasarkan Persamaan (1).

$$\eta_{GTG} = \frac{279.93 \text{ MW}}{929 \text{ kW}} = 0,301$$

$$\eta_{GTG} = 30,1\%$$

Melalui metode cogeneration, energi panas gas buang bruto sebesar 665–713 MW (rata-rata 690 MW) berhasil dimanfaatkan kembali oleh Heat Recovery Steam Generator (HRSG) untuk menggerakkan unit STG. Penerapan combined cycle ini meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan menjadi 43,9% hingga 44,4%. Pada konfigurasi yang digunakan adalah 3 unit GTG - 3 unit HRSG – 1 STG, maka hasil efisiensi cogeneration di PLTGU blok-II pada kondisi combined cycle dapat dilakukan berdasarkan Persamaan (2).

$$\eta_{Cogen} = \frac{279.93 + 128.08}{929} = \frac{408.01}{929} = 0.439$$

$$\eta_{Cogen} = 43.9\%$$

Sehingga peningkatan efisiensi (Δ_{η}) rata-rata sebesar 14%. Peningkatan Efisiensi ini diperoleh berdasarkan Persamaan (3)

$$\Delta_{\eta} = 44.44\% - 30.03\% = 14.41\%$$

Hal ini membuktikan hipotesis bahwa pemanfaatan exhaust gas mampu mengoptimalkan output tanpa penambahan bahan bakar. Nilai heat rate sistem tercatat pada kisaran 11.916 hingga 11.988 kJ/kWh. Secara teknis, terlihat adanya tren di mana peningkatan beban operasional diikuti dengan penurunan nilai heat rate. Hal ini mengonfirmasi bahwa turbin gas

mencapai titik operasi paling optimal dan ekonomis saat berada pada kondisi beban tinggi (*base load*), karena konsumsi bahan bakar per kWh listrik yang dihasilkan menjadi lebih rendah..

Analisis Eksergi dan Distribusi Irreversibilitas

Analisis hukum kedua termodinamika menunjukkan bahwa total irreversibility sistem mencapai 519 MW. Irreversibility ini dapat diperoleh dari GTG, HRSG, dan STG berdasarkan Persamaan (6)

$$I_{GTG} = 930 - (280 + 365) = 285 \text{ MW}$$

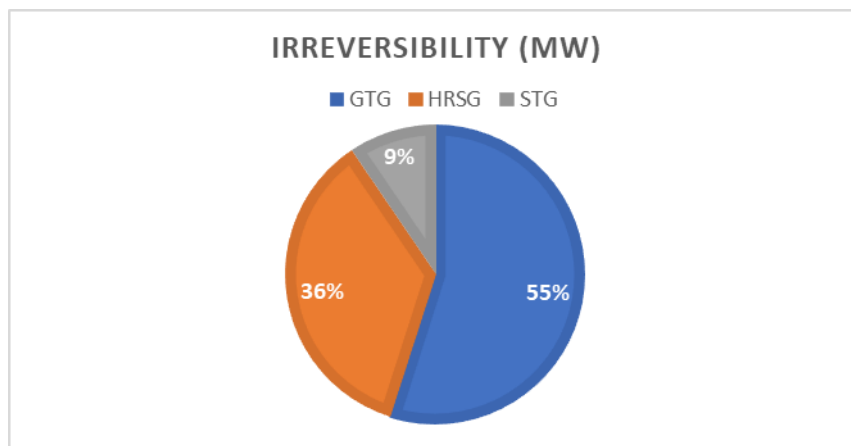
$$I_{HRSG} = 365 - 180 = 185 \text{ MW}$$

$$I_{STG} = 180 - 131 = 49 \text{ MW}$$

, dan total irreversibility diperoleh pada Persamaan (7)

$$I_{total} = 285 + 185 + 49 = 519 \text{ MW}$$

Distribusi kehilangan eksergi pada PLTGU, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Grafik Distribusi *Exergy*.

Hasil analisis mengungkapkan bahwa kerugian eksergi terbesar terjadi pada unit GTG sebesar 285 MW (55%), yang disebabkan oleh reaksi kimia pembakaran yang tidak reversibel dan perbedaan temperatur ekstrem. Unit HRSG menyumbang kerugian sebesar 185 MW (36%) akibat degradasi panas selama proses perpindahan energi, sementara STG memiliki kerugian terkecil sebesar 49 MW (9%). Efisiensi *Exergy* ini dapat diperoleh dari GTG, HRSG, dan STG berdasarkan Persamaan (8)

$$\eta_{exergyGTG} = \frac{280}{930} \times 100\% = 30,1\%$$

$$\eta_{exergyHRSG} = \frac{180}{365} \times 100\% = 49,3\%$$

$$\eta_{exergySTG} = \frac{131}{180} \times 100\% = 72,7\%$$

Hal ini menunjukkan bahwa STG beroperasi paling mendekati kondisi ideal dibandingkan komponen lainnya.

Interpretasi dan Validasi Hasil

Hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan konsep dasar termodinamika di mana siklus gabungan secara teoritis mampu memperbaiki efisiensi siklus tunggal. Efisiensi GTG sebesar 30% valid terhadap literatur *Thermodynamics: An Engineering Approach* yang menetapkan rentang 30-35% untuk unit actual (Çengel et al., 2019). Demikian pula, efisiensi combined cycle sebesar 44% sejalan dengan standar industri pembangkit eksisting yang berkisar antara 40-45%. Temuan ini memiliki implikasi terapan penting bagi operator pembangkit; meskipun sistem saat ini beroperasi stabil sesuai desain, terdapat potensi peningkatan efisiensi lebih lanjut melalui optimasi proses pembakaran di combustor dan penurunan temperatur gas buang pada stack. Penggunaan metode cogeneration tidak hanya memberikan keuntungan ekonomi melalui penghematan bahan bakar, tetapi juga mengurangi dampak termal terhadap lingkungan dengan menurunkan temperatur gas buang dari $>500^{\circ}\text{C}$ menjadi kisaran $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ setelah melalui HRSG.

3. KESIMPULAN DAN SARAN

Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi GTG adalah parameter daya output, lalu ada konsumsi bahan bakar (kg/s), dan yang terpenting adalah temperatur gas buang ($^{\circ}\text{C}$), dan Laju Alir Massa Gas Buang (kg/s). Hal ini disebabkan karena adanya faktor heatloss dan faktor irreversibility pada proses pembakaran GTG yang menyebabkan rendahnya efisiensi GTG.

Metode cogeneration mampu meningkatkan efisiensi GTG dari 30,0%–30,2% menjadi 43,9%–44,4%, Peningkatan efisiensi sebesar kurang lebih 14% ini dicapai melalui pemanfaatan energi panas gas buang sebesar 665–713 MW yang dikonversi menjadi daya tambahan sebesar 130 MW pada unit STG.

Secara keseluruhan, kinerja sistem saat ini telah memenuhi standar teoritis dan industri eksisting, meskipun terdapat potensi optimasi lebih lanjut pada pengurangan nilai irreversibility dalam proses pembakaran dan perpindahan panas.

Berdasarkan temuan tersebut, direkomendasikan agar operasional pembangkit senantiasa dijaga pada kondisi beban optimal guna mempertahankan efisiensi sistem yang tinggi serta melakukan inspeksi rutin pada komponen utama untuk meminimalkan kerugian energi. Selain itu, optimasi berkelanjutan pada sistem HRSG perlu diperhatikan untuk memaksimalkan efektivitas penyerapan panas gas buang. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada cakupan parameter operasional yang dianalisis, sehingga untuk pengembangan penelitian selanjutnya,

sangat disarankan untuk mengintegrasikan variabel tambahan seperti tekanan, kelembaban udara ambien, serta evaluasi efisiensi kompresor secara mendalam. Pendekatan yang lebih komprehensif tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran utuh mengenai performa termodinamika sistem pembangkitan dalam berbagai kondisi lingkungan yang dinamis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Haddin, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta ulasan naskah yang sangat berharga dalam penyempurnaan artikel ini. Apresiasi tinggi juga ditujukan kepada Engineer Efisiensi PLTGU Blok-II serta seluruh manajemen dan staf PT. PLN Indonesia Power Services UBP Semarang atas izin, dukungan fasilitas, dan pendampingan selama proses pengambilan data di lapangan.

DAFTAR REFERENSI

- Arifin, M., Nugroho, A., & Setiawan, B. (2022). Analisis performa heat recovery steam generator pada pembangkit listrik tenaga gas dan uap menggunakan metode energi dan eksergi. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 17(2), 85–94. <https://jurnal.polines.ac.id>
- Fauzi, A., Prasetyo, H., & Firmansyah, D. (2021). Evaluasi efisiensi termal PLTGU berdasarkan variasi beban operasi turbin gas. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 16(1), 45–53. <https://journal.unnes.ac.id>
- Kurniawan, R., Hidayat, T., & Santoso, E. (2023). Analisis kinerja combined cycle power plant untuk meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 16(2), 101–109. <https://ojs.unud.ac.id>
- Prabowo, A., Siregar, M., & Wibisono, G. (2020). Kajian eksergi pada sistem pembangkit listrik tenaga gas dan uap untuk optimasi konsumsi bahan bakar. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), B156–B161. <https://journal.its.ac.id>
- Yuliana, D., Hadi, S., & Nugraha, F. (2022). Pengaruh temperatur gas buang terhadap performa heat recovery steam generator pada PLTGU. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Energi*, 5(1), 27–35. <https://ejournal.brin.go.id>
- Antariksa, A. A., et al. (2023). Optimisasi performa gas turbine generator (GTG) unit PLTGU Cilegon PGU melalui analisis performa pada variabel beban berbeda dan strategi peningkatan efisiensi. *Jurnal Teknik Energi*, 11(2), 39–48.
- Boyce, M. P. (2012). *Gas turbine engineering handbook* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Elwardany, M., Kumar, Y. S., & Nassif, N. (2026). Thermodynamic and exergy analysis of high-temperature heat pump systems for sustainable industrial heating. *Progress in Engineering Science*, 3(2), Article 100287. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2026.100287>

- Ganapathy, V. (2003). *Industrial boilers and heat recovery steam generators: Design, applications, and calculations*. Marcel Dekker.
- Kaushik, S. C., Reddy, V. S., & Tyagi, S. K. (2011). Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1857–1872. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.007>
- Kareem, A. F., Akroot, A., Wahhab, H. A. A., Talal, W., Ghazal, R. M., & Alfaris, A. (2023). Exergo-economic and parametric analysis of waste heat recovery from Taji gas turbines power plant using Rankine cycle and organic Rankine cycle.
- Kehlhofer, R., Rukes, B., Hannemann, F., & Stirnimann, F. (2009). *Combined-cycle gas & steam turbine power plants* (3rd ed.). PennWell Books.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2014). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (8th ed.). Wiley.
- Purba, J. H. N. B. (2024). Analisis efisiensi gas turbine unit 2 sebelum dan sesudah overhaul di PLTGU Tanjung Uncang. *Jurnal Teknik Energi*, 6(1), 2–7.
- Rasooli, M., Ali, H., & Safari, S. (2023). Investigation of a set of novel heat exchanger configurations of a heat recovery steam generator to improve the energy efficiency of combined cycle power plant. *Journal of Renewable Energy*, 10(1), 68–82.
- Rezaei, R. A. (2023). Energy and exergy evaluation of a dual fuel combined cycle power plant: An optimization case study of the Khoy plant (pp. 97–109).
- Saputra, A. D., Wibowo, P., & Anisah, S. (2025). Analysis of exhaust gas utilization at Belawan gas turbine power plant (PLTG) lot 3 to improve efficiency through a combined cycle system with a steam turbine (pp. 2933–2945).
- Syarif, M. J., & Hantoro, R. (2013). Analisa unjuk kerja heat recovery steam generator (HRSG) dengan pendekatan media porous. *Jurnal Teknik POMITS*, 2(1), 1–6.
- Wuryanti, S., & Jadmiko, R. D. (2021). Design of heat-recovery steam generator components in gas turbine (70 MW) combined cycle power plants (105 MW). *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 10(11), 612–619. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.11.612-619>