



Evaluasi Kinerja Efisiensi Heat Recovery Steam Generator (HRSG) di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU): Studi Kasus di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkit Keramasan

Herlin Sumarna^{1,*}, Baiti Hidayati¹, Tri Satya Ramadhoni¹, Muhammad Irfan Dzaky¹, Toni Okviyanto¹, Ahmad Imam Rifa'i¹, Zainuri Anwar¹

¹Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Sriwijaya
Jl.Srijaya Negara Bukit Besar
Palembang 30139
herlin.sumarna@polsri.ac.id

ABSTRAK

Heat Recovery Steam Generator (HRSG) adalah komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) yang memanfaatkan panas sisa dari gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap yang digunakan dalam turbin uap. Efisiensi HRSG berperan signifikan dalam meningkatkan efisiensi termal keseluruhan siklus gabungan (combined cycle) PLTGU. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan efisiensi termal HRSG berdasarkan data operasional harian, serta membandingkannya dengan efisiensi desain dan standar industri. Berdasarkan hasil perhitungan, efisiensi termal aktual rata-rata HRSG adalah sebesar 82,90%, dengan nilai tertinggi sebesar 83,21% pada hari ketiga dan terendah sebesar 82,28% pada hari kelima. Nilai ini masih berada dalam kisaran standar efisiensi HRSG, yaitu 75-85% menurut referensi yang digunakan (V. Ganapathy, 1996), dan hanya berbeda sedikit dari efisiensi desain sebesar 85,91%. Perbedaan efisiensi ini disebabkan oleh fluktuasi laju alir massa bahan bakar serta variasi kondisi operasi lainnya. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi termal HRSG yang dioperasikan masih berada dalam batasan yang diinginkan, meskipun terdapat ruang untuk perbaikan lebih lanjut guna mencapai efisiensi yang mendekati desain. Optimasi operasi dan pemeliharaan rutin direkomendasikan untuk mempertahankan dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Kata kunci: Efisiensi Termal; HRSG; PLTGU; Siklus Gabungan

ABSTRACT

The Heat Recovery Steam Generator (HRSG) is a crucial component in the Gas and Steam Power Plant (PLTGU) system, utilizing residual heat from gas turbine exhaust to produce steam used in the steam turbine. HRSG efficiency plays a significant role in enhancing the overall thermal efficiency of the PLTGU combined cycle. This study aims to evaluate the performance and thermal efficiency of the HRSG based on daily operational data and compare it with design efficiency and industry standards. Based on the calculations, the average actual thermal efficiency of the HRSG is 82.90%, with the highest value of 83.21% on the third day and the lowest value of 82.28% on the fifth day. This efficiency remains within the HRSG efficiency standard range of 75-85%, according to the reference used (V. Ganapathy, 1996), and only slightly differs from the design efficiency of 85.91%. The efficiency discrepancy is due to fluctuations in fuel mass flow rate and variations in other operating conditions. The study concludes that the operated HRSG's thermal efficiency remains within the desired range, though there is room for further improvement to achieve efficiency closer to the design level. Operational optimization and routine maintenance are recommended to sustain and enhance the overall system efficiency.

Keywords: Thermal Efficiency; HRSG, PLTGU; Combined Cycle

Corresponding Author:
✉ Herlin Sumarna
Accepted on: 2023-01-24

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) merupakan inovasi dalam teknologi pembangkit listrik yang memadukan siklus gabungan (combined cycle) antara turbin gas dan turbin uap [4]. PLTGU bekerja dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan oleh turbin gas untuk menggerakkan turbin uap, sehingga menghasilkan energi listrik tambahan [3]. Sistem ini secara efektif mengkombinasikan dua siklus termodinamika: siklus Brayton pada turbin gas dan siklus Rankine pada turbin uap [16].

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan konversi energi bahan bakar menjadi energi panas uap yang dimanfaatkan menjadi energi mekanik pada turbin yang terintegrasi dengan generator [15]. Sedangkan pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan jenis pembangkit listrik yang menggunakan turbin gas untuk menghasilkan energi Listrik [12]. Karena memanfaatkan kedua siklus ini, PLTGU mampu mencapai tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan pembangkit listrik konvensional [6].

Salah satu komponen inti yang memungkinkan penggabungan kedua siklus ini adalah Heat Recovery Steam Generator (HRSG). HRSG berfungsi untuk menangkap panas sisa dari gas buang turbin gas yang seharusnya hilang ke atmosfer dan menggunakannya untuk memanaskan air sehingga menjadi uap [10] [13]. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang menghasilkan listrik tambahan. Dengan cara ini, energi dari gas buang dimanfaatkan secara optimal, meningkatkan efisiensi total sistem pembangkit Listrik [5].

Dalam pembangkit listrik berbasis siklus tunggal (single cycle), seperti pembangkit listrik tenaga gas saja, efisiensi umumnya lebih rendah karena panas dari gas buang langsung dilepaskan ke atmosfer tanpa pemanfaatan lebih lanjut. Namun, dalam PLTGU, melalui HRSG, panas ini dimanfaatkan untuk menghasilkan energi tambahan, sehingga efisiensi termal bisa mencapai 50-60% atau lebih [11]. Ini jauh lebih tinggi dibandingkan efisiensi pembangkit listrik siklus tunggal yang umumnya berkisar di bawah 40% untuk pembangkit tenaga uap dan 30% untuk pembangkit tenaga gas.

Dengan memanfaatkan HRSG, PLTGU menjadi salah satu teknologi pembangkit listrik yang sangat diandalkan untuk menghasilkan energi yang lebih bersih dan efisien, terutama dalam menghadapi kebutuhan energi yang terus meningkat di dunia saat ini [14]. Keuntungan penggunaan HRSG dibanding boiler umum (yang menggunakan burner) adalah peningkatan efisiensi karena HRSG memanfaatkan gas buang dari Turbin Gas sebagai sumber kalor sehingga tidak memerlukan bahan bakar dan udara sebagai pemanas [7].

Penelitian mengenai Heat Recovery Steam Generator (HRSG) telah dilakukan oleh banyak peneliti di berbagai bidang, khususnya di sektor pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU). Studi-studi ini umumnya fokus pada peningkatan efisiensi, analisis termodinamika, dan pemeliharaan HRSG untuk mengoptimalkan kinerja keseluruhan pembangkit.

Penelitian oleh Muchlis [8] mengevaluasi kinerja HRSG akibat perubahan beban turbin di pembangkit listrik. Fokus utamanya adalah menghitung efisiensi HRSG sebelum dan sesudah pembersihan serta mengoptimalkan kinerja sistem.

Efisiensi dinilai dengan membandingkan laju energi untuk menguapkan air pada tekanan rendah dan tinggi dengan energi gas buang. Hasil menunjukkan penurunan performa HRSG hingga 38,32% dari desain awal dan penghematan fuel gas, yang dipengaruhi oleh penurunan penggunaan steam dan set value PIC-9270.

Dalam penelitian Nadir & Ghenaiet [9] bagi efisiensi siklus gabungan pada pembangkit listrik. Studi ini membandingkan termodinamika tiga konfigurasi HRSG pada suhu gas buang 350 °C hingga 650 °C. Hasil optimasi dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) menunjukkan bahwa penambahan level tekanan meningkatkan tekanan di inlet turbin tekanan tinggi, menghasilkan lebih banyak uap, mengurangi kerusakan eksergi, dan meningkatkan kerja spesifik. Pada 600 °C, penambahan level tekanan meningkatkan kerja spesifik sekitar 17 kJ/kg (10% pada siklus uap), sementara penambahan level tekanan ketiga meningkatkan 8 kJ/kg (4% pada siklus uap). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan temperature gas buang dapat memperbaiki efisiensi HRSG.

Penelitian oleh Ahmad Yusron [2] berfokus pada evaluasi kinerja HRSG berdasarkan data operasional dari PLTGU yang sudah beroperasi. Mereka menggunakan pendekatan statistik untuk menganalisis hubungan antara variabel-variabel seperti suhu gas buang, tekanan uap, dan aliran massa, serta efisiensi HRSG. Studi ini memberikan wawasan praktis tentang bagaimana optimasi pengaturan operasional dapat meningkatkan kinerja HRSG di lapangan. Penelitian terdahulu di atas memberikan dasar kuat bagi evaluasi dan pengembangan lebih lanjut dalam meningkatkan efisiensi HRSG di PLTGU.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja efisiensi HRSG di PLTGU di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Keramasan melalui analisis data operasional, dengan fokus pada identifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi, seperti suhu gas buang, tekanan uap, serta tingkat kehilangan panas. Hasil evaluasi ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang bermanfaat untuk meningkatkan performa PLTGU dan mengoptimalkan penggunaan energi dalam proses pembangkitan listrik.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode pengolahan data operasional yang diambil dari PLTGU di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Keramasan di Provinsi Sumatera Selatan. Data diambil selama lima hari masa operasi untuk mengevaluasi kinerja dan efisiensi Heat Recovery Steam Generator (HRSG). Proses analisis dilakukan dalam tiga tahapan utama, yaitu:

a. Perhitungan Neraca Massa pada Combustor

Tahapan ini bertujuan untuk menghitung aliran massa bahan bakar dan udara yang masuk ke combustor serta gas buang yang dihasilkan. Neraca massa penting untuk memahami proporsi material yang masuk dan keluar dari sistem, termasuk aliran gas yang dimanfaatkan oleh HRSG.

b. Perhitungan Neraca Energi pada Combustor

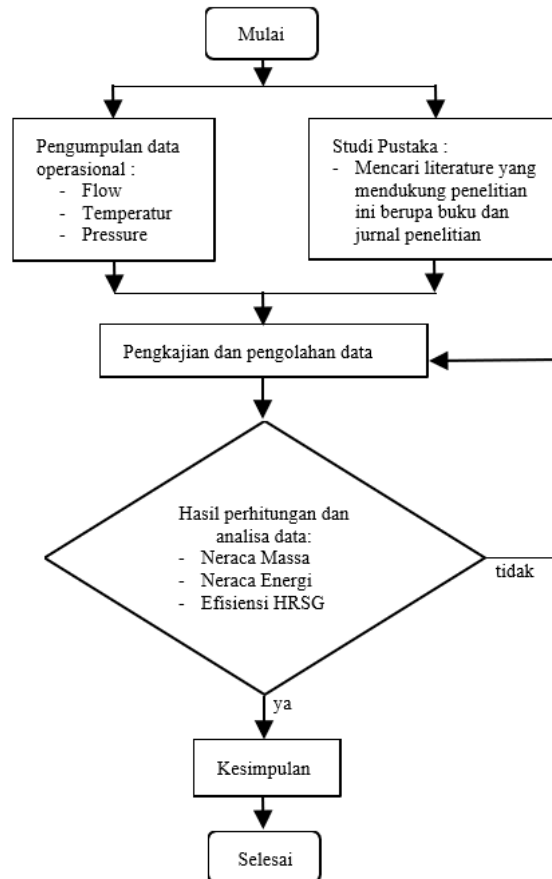
Pada tahap ini, dilakukan analisis energi untuk menghitung total energi yang masuk ke combustor melalui bahan bakar, energi yang dilepaskan melalui gas buang, dan energi yang diserap oleh HRSG. Ini mencakup perhitungan efisiensi proses pembakaran dan seberapa banyak energi dari bahan bakar yang benar-benar dimanfaatkan untuk menghasilkan uap.

c. Perhitungan Efisiensi HRSG

Tahap ini melibatkan penghitungan efisiensi termal HRSG dengan membandingkan energi panas yang dihasilkan oleh HRSG dengan energi panas yang tersedia dari gas buang turbin gas. Perhitungan ini memberikan gambaran tentang seberapa baik HRSG memanfaatkan panas dari gas buang untuk menghasilkan uap.

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

2.2 Tahapan Perhitungan Efisiensi HRSG

a. Menghitung volume fuel gas alam

- Mengetahui laju alir *fuel gas* alam, sehingga didapatkan volume *fuel gas* alam.

b. Menghitung jumlah mol *exhaust gas*

$$n = \frac{P V}{R T}$$

Dimana:

n = mol total gas (gmol)

P = tekanan gas (atm)

V = volume gas (L)

R = tetapan gas; 0.08205 L.atm/gmol.K

T = temperature gas (K)

- Sehingga mol komponen masing-masing gas alam dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{nk}{nt} = \frac{Vk}{Vt}$$

n_k = mol komponen gas (kmol)

n_t = mol total (kmol)

v_k = volume komponen (%)

v_t = Volume total(%)

- Menentukan reaksi pembakaran sempurna gas alam, sehingga didapat total mol gas O₂ teoritis, CO₂ hasil reaksi dan H₂O hasil reaksi.
- Menghitung udara yang dibutuhkan untuk proses pembakaran, dengan excess sebesar 176 %. Masing-masing mol komponen penyusun udara pembakaran yang terdiri dari 21% O₂ , dan 79% N₂ yang dapat dihitung dengan mengalikan persentase komponen dengan mol udara yang masuk burner.
- Menghitung mol komponen gas alam keluar burner
 - O₂ = O₂ masuk – O₂ teoritis
 - N₂ = N₂ dari udara + N₂ dari gas alam
 - CO₂ = CO₂ hasil reaksi + CO₂ dari gas alam
 - H₂O = H₂O hasil reaksi + H₂O dari udara
 Sehingga diperoleh % mol exhaust gas dan masuk HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*).

c. Menghitung jumlah mol yang masuk HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*).

$$\text{BM campuran gas} = \frac{\text{massa Flue gas dari Combustor}}{\text{mol Flue gas dari Combustor}}$$

$$\text{mol gas} = \frac{\text{massa exhaust gas masuk HRSG}}{\text{BM campuran gas}}$$

d. Menghitung panas *exhaust gas* masuk HRSG

$$Cp = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_1 + T_1^2), \text{ kkal/kmol}^\circ\text{K}$$

$$Q = n Cp (T_{in} - T_{ref}) f$$

Dimana:

Q = jumlah panas (kcal)

n = mol (kmol)

T_{in} = temperatur gas masuk (°C)

T_{ref} = temperatur gas kondisi lingkungan (°C)

e. Menghitung panas air umpan HRSG

$$Q_{air} = \dot{m}_{air} \times h_f$$

Dimana:

Q_{air} = jumlah panas air (kJ)

\dot{m}_{air} = laju alir massa air umpan boiler (kg/jam)

h_f = entalpin cair jenuh (kJ/kg)

f. Menghitung panas *HP steam* keluar HRSG

$$Q_{HP} = \dot{m}_{LP\ steam} \times h_{hp}$$

Dimana:

Q_{HP} = panas *HP steam* (kJ)

$\dot{m}_{HP\ steam}$ = laju alir massa uap (kg/jam)

h_{HP} = entalpi uap (kJ/kg)

g. Menghitung Panas *LP steam* keluar HRSG

$$Q_{LP} = \dot{m}_{LP\ steam} \times h_{lp}$$

Dimana:

Q_{LP} = panas *LP steam* (kJ)

$\dot{m}_{LP\ steam}$ = laju alir massa uap (kg/jam)

h_{LP} = entalpi uap (kJ/kg)

h. Menghitung Panas *stack gas*

$$Cp = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_1 + T_1^2), gcal/gmol^\circ K$$

$$Q = n Cp (T_{in} - T_{ref})$$

Dimana:

Q = jumlah panas (kcal)

n = mol (kmol)

T_{in} = temperatur gas masuk ($^\circ C$)

T_{ref} = temperatur gas kondisi lingkungan

i. Menghitung Panas *Blowdown*

$$Q_{Blowdown} = \dot{m}_{Blowdown} \times h_f$$

Dimana:

$Q_{Blowdown}$ = panas sensible uap (kcal)

$\dot{m}_{Blowdown}$ = laju alir massa uap (kg/jam)

h_f = entalpi air (kJ/kg)

2.3 Tahapan Perhitungan Energi Ruang Bakar

- a. Menghitung panas Sensibel *natural gas dan udara* masuk ruang bakar dan panas Sensibel exhaust gas keluar ruang bakar.

$$Cp = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_1 + T_1^2), kkal/kmol^\circ K$$

$$Q = n Cp (T_{in} - T_{ref})$$

Dikarenakan pada ruang bakar tekanan operasi lebih dari tekanan 1 atm maka menggunakan cp^* dengan persamaan :

$$Cp - Cp^* = Cp^*$$

- b. Menghitung panas sensibel pembakaran standar

- Panas pembakaran bahan bakar

$$Q = V_{bb} \times GHV$$

- Panas reaksi standar bahan bakar

$$Q_n = \Delta H^\circ c \times n$$

- Panas pengupan H_2O standar (λ)

$$\lambda = n H_2O \times \lambda H_2O$$

- $GHV = LHV + \Delta H^\circ + \lambda H_2O$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Di bawah ini terdapat tabel 1 yang menunjukkan komposisi gas masuk combustor selama lima hari operasi, tabel 2 menunjukkan kondisi operasi gas masuk combustor, dan tabel 3 menunjukkan data operasi HRSG.

Tabel 1. Data Komposisi Gas masuk *Combustor*

Komponen	Hari ke 1 s.d 5
CH ₄	84,8785
N ₂	0,9441
CO ₂	5,5692
C ₂ H ₆	6,1459
C ₃ H ₈	1,4926
i-C ₄ H ₁₀	0,2736
n-C ₄ H ₁₀	0,32
i-C ₅ H ₁₂	0,1293
n-C ₅ H ₁₂	0,0749
C ₆ H ₁₄	0,1717

Tabel 2. Data Kondisi Operasi Gas Masuk *Combustor*

Data	Hari ke-				
	1	2	3	4	5
<i>Flow fuel</i> (ton/hr)	7,149	7,014	7,157	7,148	6,906
<i>Fuel temp.</i> (°C)	93,73	93,52	93,26	93,46	93,47
<i>Fuel pressure</i> (Psig)	428,94	425,29	428,08	425,92	410,21
<i>HV</i> (Btu/ft ³)	1044,48	1044,48	1044,48	1044,48	1044,48
<i>Temp. in c.</i> (°C)	29	28	26	29	28
<i>Temp. out c.</i> (°C)	430	402	395	399	398
<i>Pressure out c.</i> (Psig)	1,2	1,19	1,18	1,18	1,19
<i>Flue gas temp.</i> (°C)	970	972	975	973	972
<i>flue gas pressure</i> (MPa)	3,46	3,43	3,40	3,40	3,40
<i>Temp. Lingkungan</i> (°C)	30	31	30	32	31

Ket: *c* = kompresor; HV = Heating Value.

Tabel 3. Data operasi HRSG

Data	Hari ke-				
	1	2	3	4	5
T _{in} HRSG (°C)	584,28	584,35	585,01	584,96	584,08
T _{out} HRSG (°C)	105,58	106,11	107,46	107,46	106,19
<i>Flow</i> (Ton/hr)	330,00	329,00	330,00	330,00	329,00
<i>Temp. air</i> (°C)	48,58	48,67	49,96	50,34	49,24
<i>Tekanan Air</i> (MPa)	1,59	1,65	1,59	1,62	1,66

Data	Hari ke-				
	1	2	3	4	5
<i>Flow Air</i> (Ton/hr)	55,61	53,08	54,54	53,46	53,21
T _{out} <i>Steam LP</i> (°C)	229,73	229,73	230,20	230,20	229,89
Tekanan <i>Steam LP</i> (MPa)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
<i>Flowrate</i> <i>Steam LP</i> (MPa)	8,36	8,35	8,38	8,34	8,34
T _{out} <i>Steam HP</i> (°C)	507,51	507,67	507,98	507,48	507,74
Tekanan <i>Steam HP</i> (MPa)	4,60	4,59	4,66	4,70	4,59
<i>Flowrate</i> <i>Steam HP</i> (Ton/hr)	44,39	44,31	44,39	44,31	44,33
Temp. <i>Blowdown</i> (°C)	45,00	46,00	45,00	46,00	45,00

Ket: *LP* = *Low Pressure*; *HP* = *High Pressure*

Dari ketiga data di atas, dilakukan perhitungan neraca massa dan neraca energi yang terdapat pada Tabel 4 dan tabel 5 di bawah ini.

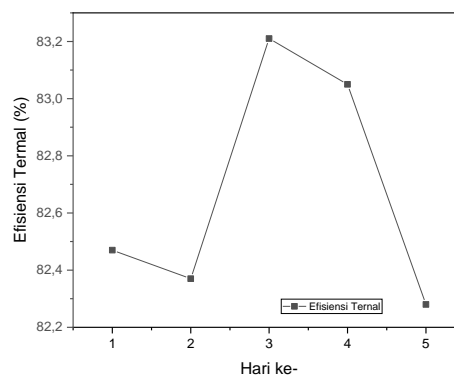
Tabel 4. Neraca Massa hari ke-1

Komponen	Input		Output	
	Mol (kmol)	Massa (kg)	Mol (kmol)	Massa (kg)
CH ₄	318,98	5.103,67	-	-
C ₂ H ₆	23,10	692,90	-	-
C ₃ H ₈	5,61	246,81	-	-
i-C ₄ H ₁₀	1,03	59,64	-	-
n-C ₄ H ₁₀	1,20	69,75	-	-
i-C ₅ H ₁₂	0,49	34,99	-	-
n-C ₅ H ₁₂	0,28	20,27	-	-
C ₆ H ₁₄	0,65	55,49	-	-
N ₂	8.035,86	225.004,10	8.035,86	225.004,10
CO ₂	20,93	920,90	419,56	18.460,72
O ₂	2.135,17	68.325,49	1.361,56	43.569,88
H ₂ O	-	-	749,96	13.499,30
Total		300.534		300.534

Tabel 5. Neraca Energi hari ke-1

No.	Komponen	Input (kJ)	Output (kJ)
1	Panas sensibel bahan bakar	1521116,24117	-
2	Panas sensibel udara	37921486,29790	-
3	Panas reaksi standar	361955406,13763	-
4	Panas sensibel gas hasil pembakaran	-	312156703,832
5	<i>Heat loss</i>	-	89241304,84517
Total		401398008,67670	401398008,67670

Dari data hasil perhitungan neraca massa dan neraca energi pada tabel 4 dan tabel 5 dihasilkan efisiensi termal HRSG unit 2 PLTGU PT PLN (Persero) Pembangkitan Sumbagsel Sektor Pengendalian Pembangkitan Keramasan yang terdapat pada gambar 2 di bawah ini.

**Gambar 2.** Efisiensi HRSG

Berdasarkan hasil perhitungan yang dikutip, terlihat bahwa efisiensi termal HRSG mengalami variasi dari hari ke hari, dengan nilai tertinggi dicapai pada hari ke-3 sebesar 83,21%, dan nilai terendah pada hari ke-5 sebesar 82,28%. Rata-rata efisiensi termal HRSG selama periode tersebut adalah 82,90%. Perubahan efisiensi ini berhubungan langsung dengan laju alir massa bahan bakar yang digunakan.

Seperti yang disebutkan dalam penelitian oleh Bambang Setyoko, efisiensi termal HRSG berbanding lurus dengan laju alir massa bahan bakar. Artinya, semakin besar laju alir bahan bakar yang disuplai, semakin besar pula energi yang tersedia untuk diubah menjadi uap dalam HRSG, yang meningkatkan efisiensi termal. Pada hari ke-3, saat laju alir massa bahan bakar mencapai 7,157 ton/h, efisiensi termal mencapai nilai tertinggi. Sebaliknya, pada hari ke-5, ketika laju alir bahan bakar lebih rendah yaitu 6,906 ton/h, efisiensi juga turun ke titik terendah.

Studi oleh Afrianto [1] memperkuat hasil penelitian ini, menyatakan bahwa semakin besar laju alir massa bahan bakar, semakin besar pula efisiensi termal yang dapat dicapai oleh HRSG. Ini mengindikasikan bahwa manajemen dan optimasi laju alir bahan bakar sangat penting untuk memaksimalkan kinerja HRSG dalam siklus gabungan, karena bahan

bakar yang lebih banyak memberikan lebih banyak panas untuk diambil oleh HRSG, meningkatkan konversi energi dan menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi.

Efisiensi termal aktual rata-rata HRSG yang diperoleh sebesar 82,90% menunjukkan kinerja yang sangat mendekati efisiensi desain yang direncanakan, yaitu sebesar 85,91%. Meskipun ada selisih sekitar 3,01%, perbedaan ini dianggap tidak signifikan, terutama karena nilai efisiensi yang dicapai masih berada dalam batasan yang wajar dan sesuai dengan range standar efisiensi HRSG yang umum, yaitu antara 75% hingga 85%, sebagaimana disebutkan dalam *Handbook Heat Recovery Steam Generator* oleh V. Ganapathy (1996).

Hal ini menunjukkan bahwa performa HRSG tersebut masih memenuhi kriteria desain dan standar industri, meskipun terjadi fluktuasi harian yang biasa terjadi dalam operasi. Fluktuasi kecil dalam efisiensi dapat disebabkan oleh berbagai faktor operasional seperti kondisi beban, kualitas bahan bakar, kondisi lingkungan, dan efisiensi perpindahan panas di dalam HRSG. Namun, karena nilai aktual masih berada dalam kisaran efisiensi yang diinginkan, HRSG tersebut dapat dikategorikan beroperasi secara efektif dan optimal.

Dengan demikian, perhitungan aktual ini memberikan keyakinan bahwa kinerja HRSG secara keseluruhan masih berada dalam toleransi kinerja yang baik dan dapat dioptimalkan lebih lanjut jika diperlukan, misalnya dengan peningkatan manajemen operasional atau perawatan yang lebih intensif untuk menjaga efisiensi mendekati nilai desain.

4. KESIMPULAN

Efisiensi termal aktual rata-rata HRSG adalah sebesar 82,90%, dengan nilai tertinggi sebesar 83,21% pada hari ketiga dan terendah sebesar 82,28% pada hari kelima. Nilai ini masih berada dalam kisaran standar efisiensi HRSG, yaitu 75-85% menurut referensi yang digunakan (V. Ganapathy, 1996), dan hanya berbeda sedikit dari efisiensi desain sebesar 85,91%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Afrianto, M. U. Tony Suryo, and B. T. Fajar, "Analisa efisiensi exergi pada HRSG (Heat Recovery Steam Generator) di PLTGU," *J. Teknik Mesin S-1*, vol. 4, no. 4, 2015.
- [2] D. D. S. Ahmad Yusron, "Analisa performa heat recovery steam generator sebelum dan sesudah cleaning di PT Indonesia Power Tambak Lorok Semarang menggunakan software MATLAB R.12," *J. Sains dan Teknologi*, vol. 16, no. 1, pp. 2527–3604, 2018.
- [3] R. Bartnik, Z. Buryn, and A. Hnydiuk-Stefan, "Comparative thermodynamic and economic analysis of a conventional gas-steam power plant with a modified gas-steam power plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 293, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117502.
- [4] Y. Dewantoro Herlambang et al., "Analisis perhitungan efisiensi heat recovery steam generator (HRSG) tipe vertikal tekanan ganda pada pembangkit listrik tenaga gas uap (PLTGU)," *Eks. J. Teknik Energi*, vol. 16, 2020.

- [5] K. Fajar Adhi Sukra and D. Ismail Permana, "Modifikasi heat recovery steam generator (HRSG) subkritik menjadi superkritik untuk meningkatkan efisiensi sistem PLTGU di Indonesia," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/350823346>
- [6] T. H. Hutapea and J. Windarta, "Pemanfaatan gas buang turbin gas siklus terbuka dengan sistem organic Rankine cycle," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 2, pp. 99–120, 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13332.
- [7] A. Ilmar and A. Sandra, "Analisis unjuk kerja heat recovery steam generator (HRSG) pada PLTGU Muara Tawar Blok 5," vol. 7, no. 1.
- [8] S. Muchlis and Harunsyah, "Analisa kinerja heat recovery steam generation akibat perubahan load turbin power generator untuk proses LNG hub dan efisiensi operasional di perusahaan migas," *J. Teknologi*, vol. 24, pp. 87–91, 2024.
- [9] M. Nadir and A. Ghenaiet, "Thermodynamic optimization of several (heat recovery steam generator) HRSG configurations for a range of exhaust gas temperatures," *Energy*, vol. 86, pp. 685–695, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.04.023.
- [10] A. Paniego-Alday, G. Lopez-Ruiz, Z. Azkorra-Larrinaga, Z. Uriondo-Arrue, and N. Romero-Anton, "Analysis and improvement of gas flow behaviour at the inlet duct of an industrial HRSG boiler through CFD modelling," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 60, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104717.
- [11] R. Prasetyo, P. Bismantolo, and A. Suandi, "Maintenance pada combustion section turbin gas unit 2 PLTGU," vol. 5, no. 2, 2021.
- [12] A. Puspawan, R. Sulthan, A. Suandi, and Y. Witanto, "Pengaruh air fuel ratio (AFR) terhadap efisiensi turbin gas pada PLTGU unit 2 PT PLN (Persero) Keramasan Palembang-Provinsi Sumatera Selatan," vol. 17, no. 1, pp. 56–62. [Online]. Available: <https://ejournal.unib.ac.id/index.php/teknosia>
- [13] A. I. Ramadhan, E. Diniardi, H. Basri, and D. T. Setyawan, "Analisis pengaruh pemakaian bahan bakar terhadap efisiensi HRSG KA13E2 di Muara Tawar combine cycle power plant," *Dinamika J. Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 7, no. 1, 2015.
- [14] B. Sugandi, F. Atabiq, and R. A. Asti, "Pengaruh beban gas turbine generator terhadap efisiensi heat recovery steam generator pada pembangkit listrik tenaga gas uap (PLTGU)," *Elkomika J. Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 11, no. 3, p. 639, 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i3.639.
- [15] H. Sumarna, S. Wulandari, and T. Lestari, "Thermal performance analysis of a shell and tube condenser in steam power plant," pp. 522–531, 2024, doi: 10.2991/978-94-6463-386-3_53.
- [16] A. I. Turja *et al.*, "Machine learning-based multi-objective optimization and thermal assessment of supercritical CO₂ Rankine cycles for gas turbine waste heat recovery," *Energy and AI*, vol. 16, 2024, doi: 10.1016/j.egyai.2024.100372.