



Analisis Performa dan Efisiensi Operasional Boiler Miura SI-2500 GVS di PT XYZ

Bambang Soekarno Gani^{1,*}, Rizal Hanifi¹, Ratna Dewi Anjani¹, Muhammad Azril Rahmaditya¹, Firman Maulana¹

¹ Program Studi S-1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jawa Barat, Indonesia

Kata kunci

Boiler
Efisiensi Energi
Konsumsi Gas
Steam
Utilitas Industri

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa dan efisiensi operasional boiler Miura SI-2500 GVS yang digunakan di PT XYZ pada Plant A-B dan Plant C. Boiler merupakan salah satu komponen utilitas penting yang berfungsi menghasilkan uap untuk berbagai kebutuhan proses seperti pemanasan dan operasi peralatan. Metode penelitian dilakukan dengan analisis data operasional aktual berupa konsumsi gas, running hours, penggunaan air softener, serta hasil uji emisi gas buang. Data dikumpulkan dari logsheet harian selama periode Agustus 2025 dan dianalisis menggunakan metode distribusi konsumsi energi berdasarkan jam operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi gas spesifik rata-rata sebesar 76,54 m³/jam dengan performa yang relatif sama antara Plant A-B dan Plant C. Konsumsi air softener menunjukkan perbedaan signifikan dengan rasio total 1:1,93, yang dipengaruhi oleh intensitas operasi dan kualitas air umpan. Dari sisi emisi, nilai O₂ sebesar 7,4% dan CO₂ sebesar 7,8% menunjukkan pembakaran masih dalam kondisi cukup baik, meskipun masih terdapat potensi optimasi pada excess air. Secara keseluruhan, boiler masih beroperasi dalam kondisi cukup efisien dan memenuhi standar operasional, namun diperlukan optimasi pada penggunaan air softener dan kontrol pembakaran untuk meningkatkan efisiensi energi serta menekan biaya operasional.

* **Corresponding author:**
Bambang Soekarno Gani (email: bambangsgani@gmail.com)

Diterima: 7 Juli 2026

Disetujui: 21 Juli 2026

Dipublikasikan: 12 September 2026

1 Pendahuluan

Dalam industri farmasi, ketersediaan energi panas dalam bentuk uap (steam) merupakan salah satu faktor utama yang menunjang kelancaran proses produksi. Uap dibutuhkan untuk berbagai keperluan, antara lain proses sterilisasi, pemanasan air, pemanasan ruangan, hingga mendukung kinerja peralatan proses yang membutuhkan suplai panas. Oleh karena itu, unit boiler menjadi fasilitas utilitas yang sangat vital dalam menjamin kontinuitas produksi [1].

Efisiensi boiler sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter utama, antara lain konsumsi bahan bakar, rasio udara-bahan bakar dalam proses pembakaran, serta kualitas air umpan yang digunakan. Indikator penelitian ini meliputi konsumsi gas dan running hours (performa energi), air softener (kualitas air umpan), serta O₂/CO₂ dan NO₂/SO₂ (kualitas pembakaran dan emisi). Pembakaran yang tidak optimal, seperti adanya kelebihan udara (excess air), dapat menyebabkan sebagian energi panas terbuang bersama gas buang sehingga menurunkan efisiensi sistem [2]. Selain itu, kualitas air umpan yang tidak memenuhi standar dapat menyebabkan terbentuknya kerak pada permukaan perpindahan panas, yang pada akhirnya menurunkan kinerja boiler dan meningkatkan konsumsi energi [3].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengendalian parameter operasional sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler. Hidayanto (2016) melakukan analisis performa water tube boiler kapasitas 115 ton/jam di PT. Pertamina Refinery Unit VI dan menunjukkan bahwa kandungan O₂ pada flue gas berkisar 2,3–2,43% masih dalam kondisi normal dengan heat loss total sebesar 1287,20 btu/lbs [4]. Talib et al. (2023) menggunakan metode Grey-Taguchi dan validasi ANN untuk optimasi parameter boiler berbahan bakar batu bara, dengan tingkat akurasi prediksi ANN mencapai 86% [5]. Baringbing dan Sinaga (2023) menganalisis efisiensi water tube boiler berbahan bakar campuran biomassa dan menemukan efisiensi tertinggi 60,68% [6]. Wulandari et al. (2023) meneliti pengaruh parameter operasi terhadap kinerja sistem energi termal PLTU dengan efisiensi boiler metode langsung mencapai 90,8% [7]. Pakpahan et al. (2021) meneliti analisis pembakaran pada boiler berbahan bakar LNG dengan efisiensi 78%, menekankan pentingnya faktor 3T (Time, Temperature, Turbulence) dalam proses pembakaran [8]. Studi terdahulu umumnya berfokus pada boiler besar atau sektor pembangkit, sementara evaluasi boiler once-through gas-fired di fasilitas farmasi masih terbatas.

PT XYZ mengoperasikan boiler tipe once-through berbahan bakar gas (Miura SI-2500 GVS) pada dua unit operasi, yaitu Plant A-B dan Plant C. Boiler jenis ini dipilih karena memiliki keunggulan efisiensi tinggi, waktu start-up singkat, serta mampu beroperasi stabil pada beban fluktuatif yang umum terjadi di industri farmasi. Meskipun sistem ini dirancang untuk menghasilkan uap secara cepat dengan efisiensi tinggi, evaluasi performa tetap diperlukan untuk memastikan kondisi operasional berada pada tingkat optimal [9]. Perbedaan beban operasi antara Plant A-B dan Plant C menimbulkan pertanyaan apakah hal ini berdampak pada efisiensi dan konsumsi utilitas boiler.

Permasalahan yang sering muncul pada pengoperasian boiler adalah tingginya konsumsi bahan bakar yang berbanding lurus dengan biaya energi, potensi penurunan efisiensi akibat kondisi air umpan yang tidak sesuai standar, serta emisi gas buang yang harus memenuhi baku mutu lingkungan. Secara spesifik, penelitian ini mengevaluasi apakah konsumsi bahan bakar, air softener, dan emisi boiler PT XYZ masih efisien dan terkendali. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengestimasi produksi steam berdasarkan konsumsi gas dan load factor operasional, (2) menganalisis pemakaian air softener dan pengaruhnya terhadap operasional boiler, (3) menghitung efisiensi operasional boiler berdasarkan perbandingan energi input terhadap output dalam bentuk steam, serta (4) mengevaluasi hasil uji emisi terhadap standar baku mutu lingkungan. mengevaluasi NO₂ dan SO₂ terhadap baku mutu yang berlaku, serta menafsirkan kadar O₂ dan CO₂ sebagai indikasi kondisi excess air.

2 Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT XYZ pada periode Minggu ke-31 hingga Minggu ke-35 tahun 2025 (mencakup akhir Agustus hingga awal September 2025) dengan objek penelitian berupa sistem boiler tipe once-through berbahan bakar gas (Miura SI-2500 GVS) yang beroperasi pada dua unit, yaitu Plant A-B (unit MU-SI25/01) dengan tekanan operasi 5–7 bar, dan Plant C (unit MU-S25/C1.01) dengan tekanan operasi 3,5–5 bar. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan memanfaatkan data operasional aktual untuk menganalisis performa dan efisiensi sistem boiler.

Data primer diperoleh dari logsheet harian operasional boiler selama lima minggu pengamatan (Minggu ke-31 hingga Minggu ke-35). Data yang dikumpulkan meliputi konsumsi bahan bakar gas (m³), waktu operasi atau running hours (jam), penggunaan air softener (liter), serta data emisi gas buang berupa NO₂ dan SO₂, ditambah O₂ dan CO₂ dari hasil gas analyzer. Spesifikasi teknis boiler berdasarkan manual Miura SI-2500 GVS adalah: rated steam output 2.500 kg/jam, rated gas consumption 141,8 m³/jam, dan target efisiensi 98% (dengan economizer). Bahan bakar yang digunakan adalah Liquefied Natural Gas (LNG) dengan Lower Heating Value (LHV) sebesar 48.000 kJ/m³. Nilai LHV merupakan asumsi tetap dari spesifikasi pemasok, sehingga efisiensi yang dihasilkan bersifat estimasi [10].

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, pembagian konsumsi gas ke masing-masing plant dilakukan berdasarkan proporsi running hours menggunakan persamaan berikut:

$$G_p = \frac{Hr_p}{Hr_t} \times G_t \quad (1)$$

di mana G_p adalah konsumsi gas plant p (m³), Hr_p adalah running hours plant p (jam), Hr_t adalah total running hours semua plant (jam), dan G_t adalah total konsumsi gas (m³).

Kedua, load factor dihitung untuk mengetahui seberapa besar kapasitas boiler yang digunakan:

$$LF = \frac{G_a}{(H_r \times G_t)} \quad (2)$$

di mana LF adalah load factor, G_a adalah konsumsi gas aktual (m^3), H_r adalah running hours (jam), dan G_t adalah gas consumption rated (m^3/jam).

Ketiga, efisiensi termal boiler dihitung menggunakan metode langsung (direct method) dengan membandingkan energi output terhadap energi input:

$$\eta = \left(\frac{E_o}{E_i} \right) \times 100\% \quad (3)$$

di mana η adalah efisiensi boiler (%), E_o adalah energi output steam (MJ), dan E_i adalah energi input bahan bakar (MJ). Energi input dihitung sebagai $E_i = G_a \times LHV$, sedangkan energi output dihitung sebagai $E_o = W_s \times \Delta h$, di mana W_s adalah massa steam estimasi (kg) dan Δh adalah selisih entalpi antara steam (h_3) dan feedwater (h_1) [11].

Keempat, emisi gas buang dianalisis dan dibandingkan dengan baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap yang Menggunakan Bahan Bakar Gas.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Konsumsi Gas dan Running Hours

Data operasional selama lima minggu pengamatan (W31–W35) menunjukkan karakteristik konsumsi yang konsisten antara kedua plant. Tabel 1 merangkum konsumsi gas dan running hours masing-masing plant.

Tabel 1. Ringkasan Konsumsi Gas dan Running Hours

Minggu	Run.Hrs AB (jam)	Gas AB (m^3)	Run.Hrs C (jam)	Gas C (m^3)	Total Gas (m^3)	LF (%)
W31	12,08	1.081,7	10,58	947,43	2.030,08	63,14
W32	61,36	4.039,4	31,82	2.094,7	6.133,48	46,40
W33	55,98	3.977,67	20,55	1.460,18	5.437,86	50,10
W34	56,24	3.913,25	26,48	1.842,51	5.755,77	49,10
W35	55,28	4.793,52	20,08	1.741,20	5.634,73	61,10

Pada Tabel 1 terlihat bahwa Plant A-B memiliki running hours dan konsumsi gas yang jauh lebih tinggi dibandingkan Plant C. Hal ini disebabkan Plant A-B melayani kebutuhan dua unit produksi sekaligus. Konsumsi gas spesifik per jam operasi tercatat sama untuk kedua plant, yaitu rata-rata $76,54 m^3/jam$, yang mengindikasikan bahwa kedua unit boiler memiliki spesifikasi dan karakteristik pembakaran yang identik [12].

Load factor berkisar antara 46,4% pada W32 hingga 63,14% pada W31. Variasi ini disebabkan perbedaan kebutuhan produksi uap dari minggu ke minggu, yang kemungkinan terkait pola startup pada W31, meski data pendukung rinci belum tersedia. Nilai load factor yang tidak mencapai 100% menunjukkan bahwa boiler dioperasikan sesuai kebutuhan aktual produksi farmasi, yang memang bersifat fluktuatif [13].

3.2 Perhitungan Efisiensi Termal

Efisiensi termal dihitung menggunakan metode langsung (direct method) berdasarkan data steam tables untuk menentukan entalpi steam dan feedwater. Entalpi steam diasumsikan kondisi jenuh (saturated) pada tekanan

operasi rata-rata tiap plant. Untuk Plant A-B dengan tekanan operasi rata-rata 6 bar, entalpi steam (h_3) = 2.755,5 kJ/kg. Untuk Plant C dengan tekanan 4,25 bar, entalpi steam (h_3) = 2.739,0 kJ/kg. Entalpi feedwater (h_1) pada suhu 30°C = 125,7 kJ/kg [14].

Contoh perhitungan untuk Minggu ke-31 pada Plant A-B: Load factor = $89,54/141,8 = 0,6314$; Steam output estimasi (W_s) = $12,08 \times 0,6314 \times 2,5 = 19,06$ ton; Energi input (E_i) = $1.081,7 \times 48.000 = 51.921$ MJ; Energi output (E_o) = $19.060 \times 2.629,8 = 50.124$ MJ; Efisiensi (η) = $50.124/51.921 \times 100\% = 96,5\%$. Nilai ini merupakan estimasi dari hubungan linear load factor terhadap rated steam output, bukan pengukuran steam flow aktual. Hasil perhitungan efisiensi selengkapnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Efisiensi Termal Boiler

Minggu	Steam AB (ton)	Gas AB (m ³)	Ef. AB (%)	Steam C (ton)	Gas C (m ³)	Ef. C (%)	SGC (m ³ /ton)
W31	19,06	1.081,7	96,5	16,70	947,43	96,9	56,75
W32	71,20	4.039,4	96,6	36,90	2.094,7	95,9	56,75
W33	70,10	3.977,67	96,6	25,70	1.460,18	95,8	56,77
W34	69,00	3.913,25	96,6	32,50	1.842,51	96,3	56,70
W35	84,30	4.793,52	96,4	30,60	1.741,20	95,7	56,82

Berdasarkan Tabel 2, efisiensi termal Plant A-B menunjukkan kestabilan yang sangat baik pada rentang 96,4–96,6% di seluruh minggu pengamatan. Stabilitas ini disebabkan jam operasi yang tinggi memungkinkan boiler mencapai steady state optimal. Stabilitas ini merupakan hasil estimasi dari load factor, sehingga verifikasi dengan data steam flow aktual masih diperlukan. Sebaliknya, Plant C menunjukkan fluktuasi efisiensi antara 95,7–96,9%, yang berkorelasi dengan perubahan load factor [15]. Pada W31 efisiensi Plant C tertinggi (96,9%) tercapai saat load factor sekitar 63%, sementara pada W32 terjadi penurunan ke 95,9% saat load factor rendah (46,4%).

Penurunan efisiensi pada beban rendah sesuai dengan prinsip dasar termodinamika operasi boiler: pada beban rendah, heat losses tetap ada sementara output menurun, sehingga rasio heat loss terhadap output meningkat. Nilai specific gas consumption (SGC) yang sangat stabil pada kisaran 56,70–56,82 m³/ton (variasi <0,3%) menunjukkan kestabilan konsumsi gas spesifik selama pengamatan, namun belum cukup menyimpulkan tidak adanya degradasi jangka panjang [16].

3.3 Analisis Konsumsi Air Softener

Kualitas air umpan merupakan faktor kritis dalam menjaga performa dan umur pakai boiler. Air softener berfungsi mengurangi ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) penyebab kesadahan yang dapat menimbulkan kerak pada pipa boiler. Hasil analisis konsumsi air softener disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konsumsi Air Softener per Ton Steam

Minggu	Air AB (L)	Air AB (L/ton)	Air C (L)	Air C (L/ton)	Total (L)	Rasio C:AB	Ket.
W31	20	1,05	27	1,61	47	1:0,74	Startup

Minggu	Air AB (L)	Air AB (L/ton)	Air C (L)	Air C (L/ton)	Total (L)	Rasio C:AB	Ket.
W32	64	0,90	46	1,25	110	1:1,39	Normal
W33	63	0,90	25	0,97	88	1:2,52	Normal
W34	62	0,90	32	0,99	94	1:1,94	Normal
W35	82	0,97	21	0,69	103	1:3,90	Peak Prod.
Total	291	0,94	151	1,11	442	1:1,93	

Tabel 3 menunjukkan bahwa total konsumsi air softener Plant A-B sebesar 291 liter (rata-rata 0,94 L/ton steam) lebih tinggi dibandingkan Plant C sebesar 151 liter (rata-rata 1,11 L/ton steam). Rasio total konsumsi antara Plant A-B dan Plant C (AB:C) adalah 1,93:1. Tingginya konsumsi air softener Plant A-B secara absolut sejalan dengan intensitas operasi yang lebih tinggi. Namun dari sisi rasio per ton steam, Plant C justru memiliki nilai lebih tinggi, mengindikasikan bahwa plant ini relatif kurang efisien dalam penggunaan air softener [17].

Fluktuasi konsumsi pada Plant C khususnya cukup signifikan, yaitu dari 0,69 L/ton (W35) hingga 1,61 L/ton (W31). Konsumsi tinggi di W31 kemungkinan berkaitan dengan proses purging dan conditioning di awal pengoperasian, sedangkan konsumsi rendah di W35 kemungkinan berkaitan dengan waktu operasi yang singkat dengan minimnya proses blowdown. Data blowdown dan regenerasi softener secara rinci belum tersedia, sehingga penjelasan ini merupakan keterbatasan interpretasi. Kondisi ini menunjukkan perlunya pengaturan jadwal regenerasi softener yang lebih konsisten untuk menjaga kualitas air umpan secara optimal dan mencegah risiko pembentukan kerak.

3.4 Evaluasi Emisi Gas Buang

Pengujian emisi gas buang dilakukan oleh laboratorium terakreditasi menggunakan gas analyzer. Tabel 4 menyajikan hasil uji emisi kedua boiler beserta perbandingannya dengan baku mutu yang berlaku. O₂ dan CO₂ turut tercatat dari alat yang sama, disajikan terpisah dalam persen (%) karena berbeda satuan dari Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Emisi Gas Buang Boiler

Parameter	Hasil Plant A-B (mg/Nm ³)	Hasil Plant C (mg/Nm ³)	Baku Mutu (mg/Nm ³)	% thd Baku Mutu	Status	Standar EU (mg/Nm ³)
NO ₂	18,5	23,9	650	2,85–3,68%	Sangat Baik	<200
SO ₂	5,12	4,26	150	2,84–3,41%	Sangat Baik	<35

Berdasarkan Tabel 4, parameter Nitrogen Oksida (NO₂) menunjukkan hasil pengujian berkisar antara 18,5–23,9 mg/Nm³, sangat jauh di bawah baku mutu yang ditetapkan sebesar 650 mg/Nm³ sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007. Tingkat emisi NO₂ hanya mencapai 2,85–3,68% dari batas maksimum yang diizinkan, memberikan margin keamanan yang sangat besar. Rendahnya emisi NO₂ mengindikasikan bahwa sistem pembakaran beroperasi pada suhu yang terkontrol dengan baik dan kemungkinan mengimplementasikan teknologi Low-NO₂ Burner [18].

Parameter Sulfur Dioksida (SO₂) menunjukkan konsentrasi berkisar antara 4,26–5,12 mg/Nm³ dibandingkan baku mutu 150 mg/Nm³. Nilai sangat rendah ini mengkonfirmasi penggunaan bahan bakar gas berkualitas tinggi (LNG) dengan kandungan sulfur yang sangat rendah. Hasil ini juga memenuhi standar EU Industrial Emissions

Directive yang menetapkan batas $\text{NO}_2 < 200 \text{ mg/Nm}^3$ dan $\text{SO}_2 < 35 \text{ mg/Nm}^3$, menunjukkan performa emisi yang baik untuk parameter NO_2 dan SO_2 dibandingkan standar tersebut [19].

Data emisi lapangan juga menunjukkan kadar O_2 sebesar 7,4% dan CO_2 sebesar 7,8%. Kadar O_2 yang cukup tinggi ini mengindikasikan adanya excess air yang signifikan dalam proses pembakaran (excess air $\approx 1,55$). Berdasarkan prinsip pembakaran, setiap penambahan 1% excess air akan meningkatkan heat loss melalui gas buang sekitar 0,6%, sehingga pengurangan excess air secara terkendali berpotensi meningkatkan efisiensi boiler [20]. Hal ini menjadi rekomendasi utama untuk optimasi operasional ke depan.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis performa dan efisiensi operasional boiler Miura SI-2500 GVS di PT XYZ selama periode Minggu ke-31 hingga Minggu ke-35 Agustus 2025, dapat disimpulkan beberapa hal berikut.

Pertama, berdasarkan metode alokasi running hours, konsumsi gas spesifik rata-rata terestimasi sebesar $76,54 \text{ m}^3/\text{jam}$ pada kedua plant, yang mencerminkan spesifikasi boiler yang sama. Konsumsi gas cenderung meningkat mengikuti running hours selama periode pengamatan, menandakan sistem pembakaran bekerja secara konsisten tanpa fluktuasi yang berarti. Perbedaan konsumsi gas total antara kedua plant terutama dipengaruhi oleh durasi operasi berdasarkan metode alokasi data yang digunakan.

Kedua, konsumsi air softener menunjukkan perbedaan antara Plant A-B (291 L total, 0,94 L/ton steam) dan Plant C (151 L total, 1,11 L/ton steam) dengan rasio total AB:C sebesar 1,93:1. Fluktuasi pada Plant C yang lebih besar menunjukkan perlunya konsistensi dalam jadwal regenerasi softener agar kualitas air umpan terjaga optimal dan risiko pembentukan kerak dapat diminimalkan.

Ketiga, efisiensi termal boiler berada pada kisaran 95,7% hingga 96,9%, dengan Plant A-B menunjukkan kestabilan lebih baik (96,4–96,6%) dibandingkan Plant C (95,7–96,9%). Selama periode pengamatan, efisiensi lebih tinggi terlihat pada load factor sekitar 60–65%, sedangkan pada beban di bawah 50% efisiensi cenderung lebih rendah akibat heat losses yang tetap ada. Specific gas consumption yang stabil pada $\sim 56,7 \text{ m}^3/\text{ton}$ menunjukkan kestabilan indikator konsumsi gas spesifik selama periode pengamatan.

Keempat, hasil uji emisi menunjukkan NO_2 berkisar $18,5\text{--}23,9 \text{ mg/Nm}^3$ (2,85–3,68% dari baku mutu) dan SO_2 berkisar $4,26\text{--}5,12 \text{ mg/Nm}^3$ (2,84–3,41% dari baku mutu), keduanya jauh di bawah ambang batas Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007. Hasil ini bahkan memenuhi standar EU Industrial Emissions Directive. Namun kadar O_2 7,4% mengindikasikan excess air yang perlu dioptimasi dengan pemantauan O_2 , CO, NO_x , dan stabilitas pembakaran.

5 Ucapan Terima Kasih

Berisi ucapan terima kasih kepada lembaga pemberi dana, dan atau individu yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan manuskrip.

6 Referensi

- [1] R. N. Firdaus dan B. Soekarno, "Manajemen Utilitas Uap pada Industri Farmasi: Studi Tinjauan," Jurnal Teknik Mesin Indonesia, vol. 18, no. 1, hal. 45–52, 2023.
- [2] A. Kusuma dan M. Hidayat, "Pengaruh Excess Air terhadap Efisiensi Boiler Gas Industri," Jurnal Energi dan Manufaktur, vol. 15, no. 2, hal. 88–94, 2022.
- [3] D. Prasetyo dan S. Utama, "Analisis Kerak Boiler Akibat Kualitas Air Umpan yang Tidak Sesuai Standar," Jurnal Teknik Kimia, vol. 12, no. 3, hal. 110–118, 2021.
- [4] S. Hidayanto, "Analisis Performa Water Tube Boiler Kapasitas 115 Ton/Jam di PT. Pertamina Refinery Unit VI Balongan-Indramayu," Skripsi, Universitas Negeri Semarang, 2016.
- [5] I. Talib, Y. Mustafa et al., "Performance Evaluation and Parametric Optimization of Coal Fired Water Tube Boiler Using the Grey-Taguchi Method," International Journal of Energy Research, vol. 47, no. 5, hal. 2234–2249, 2023.
- [6] M. H. Baringbing dan N. Sinaga, "Analisis Efisiensi Water Tube Boiler Menggunakan Metode Langsung di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk," Jurnal Teknik Mesin, vol. 11, no. 2, hal. 77–85, 2023.
- [7] S. Wulandari, R. Santoso et al., "Analisis Pengaruh Parameter Operasi terhadap Kinerja Sistem Energi Termal pada PLTU Tanjung Enim $3 \times 10 \text{ MW}$," Jurnal Sebatik, vol. 27, no. 1, hal. 45–53, 2023.
- [8] A. Pakpahan, P. Siburian et al., "Analisis Pembakaran pada Boiler Kapasitas 260 Ton/Jam dengan Bahan Bakar Gas di PLTU Unit 4 PT PLN Belawan," Jurnal Rekayasa Mesin, vol. 9, no. 3, hal. 120–129, 2021.

- [9] PT. Miura Indonesia, Operation Manual Small Once-Through Boiler Gas-Fired SI-2500GVS, Karawang: PT. Miura Indonesia, 2024.
- [10] W. Gunawan dan A. G. Ali, "Studi Efisiensi Boiler terhadap Nilai Kalor Batubara pada Boiler Jenis Pulverizer Coal Kapasitas 300 T/H," *Jurnal InTent*, vol. 3, no. 2, hal. 55–64, 2020.
- [11] VDI Gesellschaft, VDI Water Vapour Tables 7th Edition, Dusseldorf: VDI-Verlag, 1968.
- [12] R. Hanifi dan H. Sutanto, "Evaluasi Kinerja Boiler Once-Through Berbahan Bakar Gas pada Industri Farmasi," *Jurnal Flywheel*, vol. 14, no. 1, hal. 22–30, 2023.
- [13] A. Setiawan dan T. Nugroho, "Pengaruh Load Factor terhadap Efisiensi Boiler Industri," *Jurnal Flywheel*, vol. 13, no. 2, hal. 66–74, 2022.
- [14] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, 2nd ed. London: Butterworths, 1985.
- [15] F. Yulianto dan B. Hartono, "Direct Method vs Indirect Method dalam Perhitungan Efisiensi Boiler: Studi Komparatif," *Jurnal Energi Termal*, vol. 8, no. 1, hal. 12–20, 2021.
- [16] P. Basu, C. Kefa, dan L. Jestin, *Boilers and Burners: Design and Theory*. New York: Springer, 2000.
- [17] D. Susanto dan A. Fauzan, "Optimasi Sistem Water Treatment pada Boiler Industri untuk Mencegah Pembentukan Kerak," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 10, no. 1, hal. 35–42, 2020.
- [18] A. Wahyudi dan I. Santosa, "Teknologi Low-NOx Burner untuk Pengendalian Emisi Gas Buang Boiler," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 16, no. 2, hal. 90–98, 2023.
- [19] European Commission, *Directive 2010/75/EU on Industrial Emissions*, Luxembourg: Publications Office of the EU, 2010.
- [20] Ministry of Environment Republic of Indonesia, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap*, Jakarta: KLHK, 2007.