

ANALISIS EFISIENSI TERMAL *BOILER* A DAN B MENGUNAKAN METODE LANGSUNG DI PGT REJOWINANGUN

Izzatul Aulia Azahra¹, Mufid¹, Andik Iswarayudha²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

² Pabrik Gondorukem dan Terpentin Rejowinangun, Jl. Kanjeng Jimat, Trenggalek, Indonesia

izzatulauliaazahraa@gmail.com ; [mufidpolinema@gmail.com]

ABSTRAK

Boiler merupakan salah satu komponen penting dalam sistem utilitas industri karena berfungsi menghasilkan uap untuk keperluan proses produksi. Pabrik Gondorukem dan Terpentin (PGT) Rejowinangun memiliki dua unit *boiler*, yaitu *Boiler* A berbahan bakar CNG dan *Boiler* B berbahan bakar MFO. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kedua *boiler* dengan menghitung efisiensinya menggunakan metode langsung. Metode ini membandingkan antara energi panas yang dibawa oleh uap hasil pembakaran dengan energi yang diberikan oleh bahan bakar. Variabel yang diamati meliputi suhu dan tekanan uap, debit bahan bakar, serta nilai kalor bahan bakar (*Gross Calorific Value*). Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi *Boiler* A mencapai 81,58%, sedangkan *Boiler* B memiliki efisiensi sebesar 79,62%. Efisiensi *Boiler* A lebih tinggi dibandingkan *Boiler* B karena bahan bakar CNG memiliki karakteristik pembakaran yang lebih bersih dan efisien. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan CNG sebagai bahan bakar pada *Boiler* A memberikan kinerja yang lebih optimal dalam hal efisiensi energi dibandingkan dengan penggunaan MFO pada *Boiler* B. Temuan ini dapat menjadi acuan dalam upaya optimalisasi sistem energi pada industri pengolahan hasil hutan.

Kata kunci: *Compressed Natural Gas (CNG)*, *efisiensi boiler*, *Marine Fuel Oil (MFO)*, *metode langsung*, *utilitas*

ABSTRACT

Boiler is one of the important components in the industrial utility system because it functions to produce steam for the purposes of the production process. Rejowinangun Gondorukem and Turpentine Factory (PGT) has two boiler units, namely CNG-fueled Boiler A and MFO-fueled Boiler B. This study aims to evaluate the performance of both boilers by calculating their efficiency using the direct method. This study aims to evaluate the performance of both boilers by calculating their efficiency using the direct method. This method compares the heat energy carried by the combustion vapor with the energy provided by the fuel. The observed variables include steam temperature and pressure, fuel discharge, and fuel gross calorific value. The analysis shows that the efficiency of Boiler A reaches 81.58%, while Boiler B has an efficiency of 79.62%. The efficiency of Boiler A is higher than Boiler B because CNG fuel has cleaner and more efficient combustion characteristics. The conclusion of this study is that the use of CNG as fuel in Boiler A provides more optimal performance in terms of energy efficiency compared to the use of MFO in Boiler B. This finding can be a reference in efforts to optimize energy systems in the forest products processing industry.

Keywords: *boiler efficiency*, *Compressed Natural Gas (CNG)*, *direct method*, *Marine Fuel Oil (MFO)*, *utilities*

1. PENDAHULUAN

Pabrik Gondorukem dan Terpentin (PGT) Rejowinangun Trenggalek merupakan pabrik pengolahan getah pinus yang berada di bawah naungan Perum Perhutani Unit II Jawa

Timur. Dalam proses produksinya, energi panas menjadi salah satu kebutuhan utama, yang disuplai oleh *boiler*. *Boiler (Steam generator)* atau ketel uap merupakan alat untuk menghasilkan uap. Dalam proses konversi energi untuk menghasilkan uap, *boiler* akan mengubah energi kimia pada bahan bakar menjadi energi panas yang kemudian ditransfer ke fluida kerja. Panas yang diterima fluida di dalam *boiler* berasal dari proses pembakaran bahan bakar di ruang bahan bakar (*furnace*) [1]. Di pabrik ini, terdapat dua jenis *boiler* dengan bahan bakar yang berbeda, yaitu *Boiler A* yang menggunakan *Compressed Natural Gas* (CNG) dan *Boiler B* yang menggunakan *Marine Fuel Oil* (MFO). Dalam operasional sehari-hari, Pemilihan antara kedua *boiler* dilakukan secara bergantian berdasarkan kondisi operasional dan ketersediaan bahan bakar yang ada. *Boiler* menyuplai setiap alat yang membutuhkan *steam* melalui pipa bersistem cabang atau paralel dimana setiap alat memiliki kebutuhan *steam* yang berbeda. Efisiensi *boiler* menjadi faktor penting karena berdampak langsung pada biaya operasional dan keberlanjutan lingkungan. Efisiensi termal *boiler* adalah perbandingan antara energi panas yang diserap oleh air untuk menjadi uap (*output* yang berguna) dengan energi panas yang diberikan ke *boiler* melalui bahan bakar (*input*), dinyatakan dalam bentuk persentase [2]. Tingkat efisiensi *boiler* umumnya 70-90% [3]. Terdapat dua metode perhitungan yang dapat digunakan untuk mencari nilai efisiensi *boiler* antara lain *direct method* dan *indirect method* [4]. Penurunan performa *boiler* dapat berdampak pada menurunnya nilai efisiensi *boiler* [5].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji efisiensi termal pada sistem *boiler* industri. Putri, dkk. (2024) mengidentifikasi bahwa jenis bahan bakar dan laju alirnya sangat berpengaruh terhadap *output* energi *boiler* [6]. Selain itu, tekanan dan suhu operasi yang lebih tinggi juga dilaporkan meningkatkan efisiensi melalui peningkatan entalpi *steam* [7]. Hendri, dkk. (2018) menekankan pentingnya pemeliharaan peralatan, khususnya sistem perpindahan panas, karena *fouling* atau *scaling* dapat menghambat perpindahan panas dan menurunkan efisiensi termal secara drastis [8]. Selain itu, Handoyono (2023) membahas pemanfaatan teknologi ekonomizer dan sistem *recovery* kondensat sebagai strategi untuk meningkatkan efisiensi energi di sektor industri [9].

Penelitian ini memiliki kebaruan dalam hal pendekatan estimasi kebutuhan *steam* menggunakan neraca massa dan neraca panas pada peralatan proses, karena data aktual konsumsi *steam* tidak tercatat secara otomatis. Hal ini menjadi solusi teknis dalam pengukuran efisiensi di pabrik-pabrik kecil hingga menengah yang belum dilengkapi dengan sistem pencatatan energi terintegrasi. Selain itu, perbandingan performa termal dua *boiler* dengan bahan bakar berbeda dalam satu sistem proses terpadu di industri gondorukem dan terpentin masih jarang ditemukan dalam literatur teknis maupun akademik.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja kedua boiler (A dan B) dengan menghitung efisiensinya menggunakan metode langsung. Penelitian ini juga bertujuan untuk memperkirakan kebutuhan *steam* aktual pada proses produksi menggunakan pendekatan neraca massa dan neraca panas. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar evaluasi teknis dan peningkatan efisiensi energi di industri pengolahan gondorukem dan terpentin.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif yang bertujuan untuk mengetahui nilai efisiensi *boiler* dengan metode langsung. Penelitian dilakukan melalui tinjauan literatur dan pengumpulan data operasional di lapangan. Tinjauan literatur bertujuan untuk memahami prinsip kerja *boiler*, efisiensi *boiler*, prinsip aliran massa dan perpindahan panas, perhitungan neraca massa dan neraca energi. Sedangkan pengumpulan

data bertujuan untuk mengumpulkan data kondisi operasi saat proses pengolahan getah pinus dilakukan. Perhitungan dilakukan dengan bantuan Microsoft Excel menggunakan rumus perhitungan dari berbagai literatur, serta data pendukung dari buku "Transport Processes and Unit Operations by Geankoplis", dan buku "Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health Related Properties for Organic and Inorganic".

Nilai entalpi air umpan dan *steam* ditentukan berdasarkan data suhu dan tekanan operasi di lapangan menggunakan *steam table* dari Geankoplis, sedangkan nilai kalor bahan bakar (GCV) diperoleh dari literatur. Data suhu, tekanan, dan laju bahan bakar diperoleh dari pengamatan langsung dan wawancara operator sehingga merepresentasikan kondisi aktual. Namun, data laju alir *steam* tidak tersedia karena keterbatasan instrumen, sehingga ditentukan melalui pendekatan neraca massa dan energi. Oleh karena itu, hasil efisiensi yang diperoleh bersifat estimatif dan digunakan sebagai pendekatan awal dalam evaluasi performa boiler.

Perhitungan efisiensi *boiler* dilakukan menggunakan *direct method* atau yang biasa disebut metode *input-output* merupakan metode untuk evaluasi efisiensi yang hanya memerlukan keluaran (*output*) berupa *steam* dan panas masuk (*input*) berupa bahan bakar. Efisiensi ini dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan berikut [10].

$$\text{efisiensi boiler } (\eta) = \frac{\text{panas keluar (fluida kerja)}}{\text{panas masuk (bahan bakar)}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{efisiensi boiler } (\eta) = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times \text{CGV}} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

- Q = jumlah *steam* yang dihasilkan (kg/jam)
- q = Jumlah bahan bakar yang digunakan (kg/jam)
- H_g = Entalpi *steam* jenuh (kJ/kg)
- h_f = Entalpi air umpan *boiler* (kJ/kg)
- GCV = *Gross Calorific Value* (kJ/kg)

Nilai entalpi air umpan dan *steam* ditentukan berdasarkan data suhu dan tekanan dengan menggunakan *steam table* dari Geankoplis. Sedangkan nilai kalor bahan bakar (CGV) diperoleh dari data literatur. Nilai kalor bahan bakar gas alam (CNG) berada pada kisaran 50.000–56.000 kJ/kg dan nilai kalor bahan bakar MFO berada pada kisaran 40.000–42.000 kJ/kg [11][12]. Dalam penelitian ini, data laju alir *steam* tidak tersedia karena keterbatasan instrumen (tidak adanya *steam flowmeter*). Oleh karena itu, laju alir *steam* ditentukan melalui pendekatan neraca massa dan energi berdasarkan kebutuhan panas proses. Hasil perhitungan efisiensi yang diperoleh bersifat estimatif dan bergantung pada asumsi kondisi *steady state*. Nilai kebutuhan *steam* dapat dihitung dari perhitungan neraca massa dan neraca panas. Neraca massa untuk proses dianggap *steady state* sehingga dapat dituliskan :

$$\text{Rate of mass in} = \text{rate of mass out} \quad (3)$$

Pada perpindahan panas yang terjadi terdapat 2 jenis kalor yaitu kalor sensibel (*sensible heat*) dan kalor laten (*latent heat*). Kalor sensibel adalah kalor yang digunakan untuk mengubah temperatur suatu komponen tanpa mengubah fase komponen tersebut. Rumus yang digunakan yaitu :

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (4)$$

Keterangan :

Q = kalor sensibel (kJ)

m = massa zat (kg)

c_p = kapasitas panas spesifik (*specific heat*) (kJ/kg·°C)

ΔT = perubahan temperatur ($T_{akhir} - T_{awal}$) (°C atau K)

Berkebalikan dengan kalor sensibel, kalor laten adalah kalor yang digunakan untuk mengubah fase dari suatu komponen yang secara teoritis tidak mengubah temperatur komponen, dalam perhitungannya temperatur yang digunakan adalah saat tepat komponen tersebut menguap [13].

Rumus yang digunakan yaitu:

$$Q = m \times \lambda \quad (5)$$

Keterangan :

Q = kalor laten (kJ)

m = massa zat (kg)

λ = *latent heat of vaporization* (kJ/kg)

Kebutuhan *Steam* dapat dicari dengan rumus

$$Q_s = Q_{out} - Q_{in} \quad (6)$$

Keterangan :

Q_s = kebutuhan panas dari *steam* (kJ)

Q_{out} = total panas yang dibutuhkan proses (kJ)

Q_{in} = panas yang sudah dimiliki bahan awal (kJ)

$$Q = H_v - H_l \quad (7)$$

Keterangan :

Q = kalor yang dilepas oleh *steam* per satuan massa (kJ/kg)

H_v = *enthalpy of vapor/steam* (kJ/kg)

H_l = *enthalpy of liquid* (kJ/kg)

$$M_{steam} = \frac{Q_s}{Q}$$

(8)

Keterangan :

M_{steam} = kebutuhan massa *steam* (kg)

Q_s = kebutuhan panas dari *steam* (kJ)

Q = kalor yang dilepas oleh *steam* per satuan massa (kJ/kg)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa dan neraca energi pada setiap peralatan proses, diperoleh total kebutuhan *steam* di PGT Rejowinangun yang disajikan pada Tabel 1. Data operasional *Boiler A* dan *Boiler B* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Total kebutuhan *steam*

Nama Alat	Kebutuhan <i>Steam</i> (kg/jam)
Bak Getah	80,8072
Talang Getah	80,8072
<i>Melter</i>	143,1068
<i>Mixer</i>	68,6166
<i>Scrubber</i>	61,4173
Tangki Pemasak	503,8802
<i>Canning</i>	46,2447
Total	984,8799

Tabel 2. Data operasional *Boiler A* dan *Boiler B*

Parameter	<i>Boiler A</i> (CNG)	<i>Boiler B</i> (MFO)	Satuan
Suhu air umpan	40	40	°C
Tekanan air umpan	1	1	atm
Laju bahan bakar	60	77	kg/jam
Tekanan uap	11	9	bar
Suhu <i>steam</i>	183,88	175,363	°C

Nilai entalpi air umpan dan *steam* yang digunakan dalam perhitungan efisiensi *boiler* diperoleh dari *steam table* dan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai entalpi air dan *steam Boiler A*

Parameter	<i>Boiler A</i> (CNG)	<i>Boiler B</i> (MFO)	Satuan
Entalpi air	167,57	167,57	kJ/kg
Entalpi <i>steam</i>	2781,38	2773,93	kJ/kg

Berdasarkan data operasional dan nilai kalor bahan bakar, diperoleh hasil perhitungan efisiensi *boiler* yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan efisiensi *boiler*

Parameter	<i>Boiler A</i> (CNG)	<i>Boiler B</i> (MFO)	Satuan
Nilai kalor	52590	41868	kJ/kg
Efisiensi	81,58	79,62	%

3.2. Pembahasan

Hasil perhitungan memperkirakan bahwa efisiensi termal *Boiler A* sebesar 81,58%, sedangkan *Boiler B* memiliki efisiensi sebesar 79,62%. Perbedaan efisiensi antara kedua *boiler* dapat disebabkan beberapa aspek operasional. Pertama, efisiensi yang lebih tinggi pada *Boiler A* dapat dikaitkan dengan nilai Calorific Gas Value (CGV) bahan bakar CNG yang lebih besar dibandingkan MFO, yaitu masing-masing 52.590 kJ/kg untuk CNG dan 41.868 kJ/kg untuk MFO. Nilai kalor yang lebih tinggi menunjukkan bahwa CNG mampu menghasilkan energi panas yang lebih besar per satuan massa bahan bakar, sehingga kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan jumlah *steam* yang sama menjadi lebih rendah. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa bahan bakar gas cenderung menghasilkan pembakaran yang lebih bersih dan efisien dibandingkan bahan bakar minyak [14].

Selain itu, suhu *steam* dan tekanan uap dari *Boiler A* juga lebih tinggi, yaitu 183,88°C dan 11 bar, dibandingkan dengan 175,36°C dan 9 bar pada *Boiler B*. Hal ini berpengaruh terhadap nilai entalpi *steam*, yaitu 2781,38 kJ/kg untuk *Boiler A* dan 2773,93 kJ/kg untuk *Boiler B*. Peningkatan suhu dan tekanan uap diketahui dapat meningkatkan efisiensi termal karena meningkatkan energi yang dibawa oleh *steam*, sehingga proses perpindahan panas menjadi lebih optimal.

Secara umum, efisiensi kedua *boiler* telah berada dalam rentang efisiensi termal sistem *boiler* industri, yaitu antara 70–90% yang menunjukkan bahwa kedua unit *boiler* masih beroperasi dengan baik secara teknis [15]. Meskipun perbedaan efisiensi relatif kecil, yaitu sebesar 1,96%, selisih ini tetap signifikan dalam konteks konsumsi energi dan biaya operasional jangka panjang.

Hasil penelitian ini sebagian besar sesuai dengan hipotesis awal, yaitu *Boiler A* diperkirakan memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan *Boiler B*. Selain faktor nilai kalor dan tekanan uap, efisiensi termal juga sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis bahan bakar, kondisi operasi, kebersihan sistem perpindahan panas, dan kehilangan panas melalui cerobong (*stack loss*) [16]. CNG selain memiliki nilai kalor yang lebih tinggi, juga memberikan pembakaran yang lebih bersih, menghasilkan lebih sedikit residu dan mengurangi kemungkinan terjadinya fouling pada heat exchanger *boiler*. MFO memiliki kandungan sulfur yang lebih tinggi, yang dapat menyebabkan korosi pada permukaan heat exchanger dan mengurangi efisiensi termal. Jika terjadi fouling atau scaling pada permukaan heat exchanger, maka perpindahan panas akan terganggu dan efisiensi termal *boiler* akan menurun [17].

Oleh karena itu, pemeliharaan rutin sangat penting untuk memastikan peralatan berfungsi dengan baik, seperti pembersihan tube *boiler* dan pengecekan burner untuk memastikan pola nyala api yang optimal. Selain itu, kehilangan panas melalui cerobong atau *stack loss* juga memengaruhi efisiensi *boiler*. Gas buang yang dihasilkan oleh CNG cenderung memiliki suhu yang lebih rendah dibandingkan MFO, yang berarti kehilangan panas lebih rendah, sehingga meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Pemanfaatan sistem recovery kondensat juga dapat membantu mengurangi konsumsi bahan bakar dengan memanfaatkan kembali panas sensibel yang ada pada kondensat, sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan [18].

Temuan dalam penelitian ini juga sejalan dengan hasil studi oleh Victor (2016) yang melakukan analisis kelayakan konversi bahan bakar dari MFO ke CNG pada mesin *boiler* di PT Salim Ivomas Pratama. Dalam studi tersebut, penggunaan CNG terbukti menghasilkan penghematan energi hingga 33,03% serta menyederhanakan sistem operasi karena tidak memerlukan pemanasan awal, separator, dan tidak menghasilkan limbah residu berat seperti MFO. Penelitian Victor juga menyoroti bahwa CNG memberikan dampak lingkungan yang lebih rendah karena tidak menghasilkan limbah cair B3 dan emisi sulfur yang tinggi [14]. Dengan demikian, keunggulan CNG dari sisi teknis dan keberlanjutan yang diungkap Victor turut memperkuat hasil penelitian ini bahwa *Boiler A* menunjukkan performa efisiensi termal yang lebih baik dibandingkan *Boiler B*.

Secara keseluruhan, kedua *boiler* mampu memenuhi kebutuhan *steam* sebesar 984,88 kg/jam menunjukkan bahwa sistem distribusi uap masih bekerja dengan baik secara fungsional. Namun, dari perspektif efisiensi energi dan operasional jangka panjang, penggunaan bahan bakar CNG lebih disarankan karena memiliki efisiensi termal lebih tinggi, menghasilkan lebih sedikit emisi karbon per unit *steam*, dan mendukung tujuan keberlanjutan energi. Hal ini menjadi relevan terutama bagi industri seperti PGT

Rejowinangun, di mana efisiensi energi dan emisi gas rumah kaca menjadi faktor penting dalam operasional yang berkelanjutan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh bahwa efisiensi termal Boiler A dan Boiler B di PGT Rejowinangun diperkirakan masing-masing sebesar 81,58% dan 79,62%. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua boiler masih berada dalam rentang efisiensi termal yang umum untuk sistem boiler industri, yaitu 70–90%. Boiler A cenderung memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan Boiler B, yang dipengaruhi oleh jenis bahan bakar dengan nilai kalor lebih tinggi serta kondisi operasi berupa suhu dan tekanan uap yang lebih besar. Selain itu, pendekatan perhitungan kebutuhan steam menggunakan neraca massa dan neraca energi dapat digunakan untuk memperkirakan konsumsi steam pada sistem yang belum dilengkapi dengan pencatatan data secara otomatis. Namun demikian, hasil yang diperoleh masih bersifat estimatif akibat keterbatasan data operasional, khususnya tidak tersedianya pengukuran langsung laju alir steam.

Hal yang dapat disarankan untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan evaluasi efisiensi *boiler* menggunakan metode tidak langsung (*indirect method*) untuk mengidentifikasi secara lebih rinci sumber kehilangan energi, seperti *stack loss*, radiasi, dan pembakaran tidak sempurna. Selain itu, perlu dipertimbangkan untuk penggunaan instrumen digital seperti flowmeter dan sensor temperatur yang terintegrasi dengan sistem *data logging* untuk meningkatkan akurasi data operasional.

REFERENSI

- [1] N. M. Pratama, Danial, dan M. Taufiqurrahman, "Analisa Efisiensi Water Tube Boiler dengan Menggunakan Metode Langsung," *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin (JTRAIN)*, vol. 2, no. 2, hal. 105–110, 2021.
- [2] S. Purseth, J. Dansena, dan M. Shyamkant Desai Associate Professor, "Performance Analysis and Efficiency Improvement of Boiler: A Review," *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 5, no. 12, hal. 326–331, 2021.
- [3] N. Fadillah, I. Kemala Dewi, dan R. Nainggolan, "Pengujian Efisiensi Ketel Uap Pipa Air Mini Kapasitas 20 Kg/Jam Tekanan Kerja 3 Bar," 2021.
- [4] G. Tirumala Srinivas, "Efficiency of a Coal Fired Boiler in a Typical Thermal Power Plant," *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 2, no. 1, hal. 32, 2017.
- [5] O. E. K, "A Review of The Significance of Feedwater Temperature on The Health of A Steam Boiler," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 17, no. 8, hal. 893–903, 2022.
- [6] N. A. Z. Putri, I. Yuliani, dan S. Widarti, "Pengaruh Pemakaian Jenis Bahan Bakar Terhadap Kinerja Boiler dengan Metode Langsung dan Tidak Langsung," vol. 11 No. 1, hal. 349–356, 2024.
- [7] S. P. Wicaksana, A. Rahmatulloh, dan R. Subandi, "Analisis Efisiensi Boiler Fire-Tube pada Produksi STPP di PT Petrocentral Gresik Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung," *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 3, hal. 258–265, 2023.
- [8] Hendri, Suhengki, dan A. F. Lubis, "Pengaruh Fouling Terhadap Laju Perpindahan Panas pada Superheater Boiler CFB PLTU Sebalang," *Jurnal Power Plant*, vol. 6 no.1, no. 1, hal. 48–57, 2018.

- [9] Y. Handoyo, "Efektivitas Penggunaan Economizer terhadap Performa Boiler Fire Tube," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 11, no. 2, hal. 108–114, 2023.
- [10] M. Habibuddin, M. Anshar, dan F. Firman, "Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Direct dan Indirect pada PLTU Jeneponto 2×135 MW," *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 22, no. 1, hal. 132–142, 2024.
- [11] F. Danielsson, "Liquefied Natural Gas An Alternative Fuel for Volvo Penta?," 2014.
- [12] R. H. Perry dan D. W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8 ed. McGraw-Hill, 2008.
- [13] Muhsin, "Application of Talking Stick Learning Model to Improve Students' Positive Attitude and Learning Achievement in the Subject of Heat," *Jurnal Pendidikan Fisika, Universitas Muhammadiyah Makassar*, no. 4, hal. 32–48, 2019.
- [14] R. Victor, "Analisis Kelayakan Proyek Konversi Bahan Bakar Marine Fuel Oil (MFO) ke Compressed Natural Gas (CNG) pada Mesin Boiler (Studi Kasus PT Salim Ivomas Pratama Surabaya)," *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Sistem Industri*, vol. 4, no. 7, 2016.
- [15] R. Liu, L. Chen, M. Liu, Q. Ding, dan Y. Zhao, "Status and Analysis on Effects of Energy Efficiency Standards for Industrial Boilers in China," dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, 2017.
- [16] A. A. Kharisma dan A. Budiman, "Perhitungan Efisiensi Mesin Boiler Jenis Fire-Tube Menggunakan Metode Direct dan Indirect untuk Produk Pelet," *UG JURNAL*, vol. 14, no. 12, hal. 1–10, 2020.
- [17] D. S. Widodo, R. Darmawan, dan M. Aldila, "Evaluasi Heat Exchanger dan Boiler di PT Salim Ivomas Pratama Refinery Unit Surabaya," dalam *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2024*, 2024.
- [18] G. U. Megasari, M. D. A. Satria, dan D. H. Prajitno, "Pemulihan Kondensat Sebagai Feedwater Boiler untuk Meningkatkan Efisiensi Boiler pada Pabrik Pakan Ikan dengan Menggunakan Metode Flash Steam," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 13, no. 2, hal. 136–142, 2024.