

Analisis Pengaruh Nilai Kalor Batubara dan Laju *Feed Water* terhadap Efisiensi Boiler Fire Tube 10 Ton Menggunakan Metode Langsung

Rachmat Firdaus¹⁾, A'rasy Fahrudin²⁾, Iswanto³⁾, Ali Akbar⁴⁾,
Muhammad Ibrahim⁵⁾

^{1), 2), 3), 4)} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia.

*E-mail:*²⁾ arasy.fahrudin@umsida.ac.id.

Abstrak

Boiler adalah alat konversi energi yang mengubah energi bakar menjadi energi panas untuk menghasilkan uap. Dalam proses produksi minyak kelapa, PT. XXX menggunakan boiler tabung api berbahan bakar batubara sebagai uap. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh nilai kalor batubara dan laju *feed water* terhadap efisiensi boiler tabung api 10 ton menggunakan teknik langsung. Data penelitian berasal dari lembar catatan operasi boiler untuk tiga periode pengamatan yaitu 3 Februari, 6 Februari, dan 9 Februari 2025, dengan durasi pengamatan 24 jam. Nilai batubara yang digunakan sekitar 24.001 kJ/kg, 22.644 kJ/kg, dan 23.121 kJ/kg. Menurut hasil penelitian, batubara dengan nilai kalor 24.001 kJ/kg menghasilkan efisiensi rata-rata tertinggi sebesar 78%, sedangkan batubara dengan nilai kalor 23.121 kJ/kg menghasilkan efisiensi rata-rata terendah sebesar 72%. Suhu udara rata-rata berkisar antara 83,0°C, 77,4°C, dan 73,4°C selama berbagai periode pengamatan. Temuan analisis menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan suhu batubara *feed water* dapat meningkatkan efisiensi boiler, sedangkan peningkatan laju *feed water* berpotensi menurunkan efisiensi boiler. Akibatnya, efisiensi boiler tidak hanya dipengaruhi oleh kualitas bakar tetapi juga oleh kondisi operasi sistem. Oleh karena itu, perlu dilakukan penyesuaian terhadap kedua faktor tersebut untuk mencapai kinerja boiler yang optimal.

Kata Kunci: *Boiler Fire Tube*; Efisiensi Boiler; *Feed Water*; Metode Langsung; Nilai Kalor Batubara.

Abstract

A boiler is an energy conversion device that converts fuel energy into heat energy to produce steam. In the coconut oil production process, PT. XXX uses a coal-fired fire tube boiler as steam. The purpose of this study was to analyze the effect of the calorific value of coal and the feed water rate on the efficiency of a 10-ton fire tube boiler using direct techniques. The research data came from boiler operation log sheets for three observation periods, namely February 3, February 6, and February 9, 2025, with a 24-hour observation duration. The coal values used were approximately 24,001 kJ/kg, 22,644 kJ/kg, and 23,121 kJ/kg. According to the research results, coal with a calorific value of 24,001 kJ/kg produced the highest average efficiency of 78%, while coal with a calorific value of 23,121 kJ/kg produced the lowest average efficiency of 72%. Average air temperatures ranged between 83.0°C, 77.4°C, and 73.4°C during various observation periods. The analysis findings indicate that increasing coal temperature and feedwater temperature can increase boiler efficiency, while increasing feedwater flow rate can potentially decrease boiler efficiency. Consequently, boiler efficiency is influenced not only by fuel quality but also by system operating conditions. Therefore, adjustments to both factors are necessary to achieve optimal boiler performance.

Keywords: *Boiler Fire Tube*; Boiler Efficiency; Calorific Value of Coal; Direct Method; Feed Water.

1. PENDAHULUAN

Banyak perusahaan memanfaatkan teknologi dari mesin konversi energi untuk mengubah suatu bentuk energi ke bentuk energi lain. Pada perusahaan makan, minuman, minyak goreng dan lain – lain, banyak yang memanfaatkan energi panas sebagai proses penunjang produksi, pemanfaatan energi tersebut berupa mesin konversi energi yaitu mesin ketel uap. Boiler adalah perangkat konversi energi menggabungkan berbagai sistem dan peralatan dalam merubah energi kimia dari bahan bakar membentuk energi termal melewati proses oksidasi yang ada di *furnace*. Proses oksidasi yaitu reaksi kimia terjadi pada oksigen dengan bahan terbakar sehingga menghasilkan panas [1]. Proses oksidasi dilakukan didalam ruang bakar terdapat udara panas yang dikombinasikan dengan abu terbang dan terak dasar dihasilkan ketika batu bara dibakar dalam ketel uap, dan panas yang dihasilkan akan mengubah air menjadi uap bertekanan. Boiler dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar, termasuk gas, cair (solar, residu), atau padat (batu bara) untuk menghasilkan uap [2][3].

Boiler yang dipakai oleh PT. XXX berjenis *fire tube chain grate* berbahan bakar batu bara dengan kapasitas 10 ton. Uap (*steam*) yang dihasilkan mesin boiler tersebut nantinya di distribusikan ke beberapa devisi proses pengepresan kelapa dan pemurnian minyak. Batubara merupakan jenis bebatuan sedimen yang bisa terbakar, terbentuk dari endapan bahan organik, terutama sisa – sisa tumbuhan, melalui proses pembatubaraan dan menghasilkan berbagai tipe batu bara yang memiliki nilai kalor yang beragam. Pemilihan kualitas batu bara dengan kandungan kalori tinggi dapat meningkatkan efisiensi boiler serta mempengaruhi kinerja boiler untuk menghasilkan uap secara kontinu [4][5][6].

Efisiensi boiler merupakan indikator kinerja atau tingkat operasional yang diukur dari perbandingan terhadap energi panas yang diserap ke fluida kerja maupun yang diterima oleh fluida dalam boiler dengan energi termal yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar [7]. Beberapa faktor yang dapat memengaruhi efisiensi boiler termasuk laju aliran massa, tingkat tekanan, serta suhu uap yang masuk dan keluar dari boiler [1]. Kualitas bahan bakar, kecukupan feed water, serta pengendalian proses pembakaran merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja boiler *fire tube* pada proses industri [8][9].

Beberapa studi terbaru telah meneliti faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi boiler. Nada (2023) menganalisis dampak kualitas batubara terhadap utilitas efisiensi unit boiler menggunakan metode tidak langsung dan menyimpulkan bahwa peningkatan nilai kalor batubara dapat meningkatkan efisiensi sistem boiler [2]. Muzaki dan Mursadin (2019) mengevaluasi efisiensi boiler menggunakan metode input-output dan menemukan bahwa konsumsi bakar dan kondisi operasional berpengaruh terhadap kinerja uap [3]. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Erbas (2021), kualitas bakar dan panas selama proses pembuatan merupakan faktor dominan yang mempengaruhi efisiensi boiler [10]. Selain itu, Davis dkk. (2022) menyatakan bahwa peningkatan suhu air *input* dapat meningkatkan efisiensi boiler karena mengurangi energi yang dibutuhkan untuk proses pemanasan awal sebelum uap terbentuk [11]. Faizal et al. (2023) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur feedwater melalui pemanfaatan economizer mampu meningkatkan efisiensi boiler karena mengurangi kebutuhan energi pemanasan air umpan sebelum memasuki ruang pembentukan uap [12]. Berdasarkan hasil penelitian yang disebutkan di atas, dapat disimpulkan bahwa

efisiensi boiler dipengaruhi oleh kualitas bakar dan kondisi operasi sistem. Namun, banyak penelitian masih berfokus pada satu faktor tertentu, seperti kualitas bakar atau parameter operasi boiler.

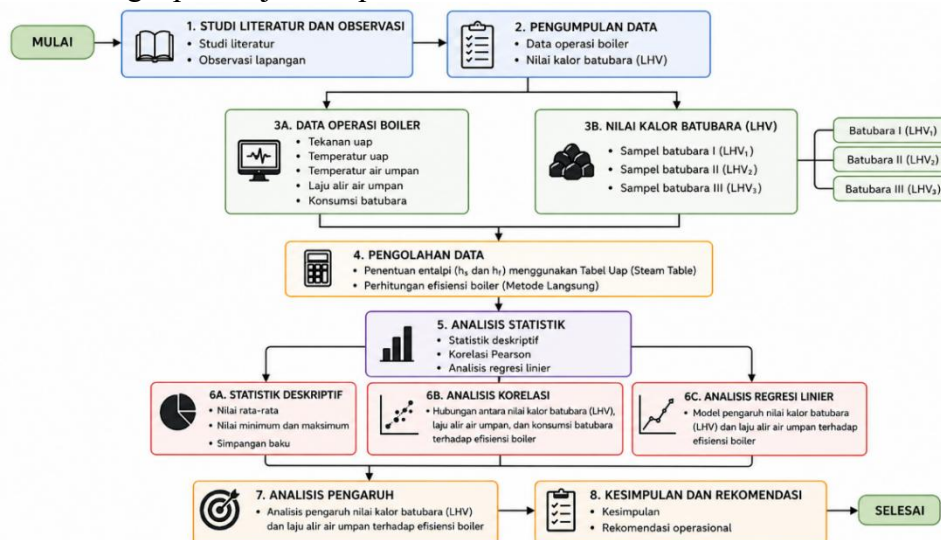
PT XXX menggunakan boiler tipe *fire tube* kapasitas 10 ton berbahan bakar batubara untuk memenuhi kebutuhan uap pada proses produksi minyak kelapa. Selama operasi, perusahaan menggunakan batubara dengan kualitas yang bervariasi, ditunjukkan oleh nilai kalor yang berbeda pada setiap periode penggunaan. Selain itu, kondisi operasi boiler seperti laju *feed water* juga mengalami perubahan sesuai kebutuhan produksi. Variasi kualitas bahan bakar dan parameter operasi tersebut diduga memengaruhi efisiensi boiler [13]. Namun demikian, hubungan antara nilai kalor batubara, laju *feed water*, dan efisiensi boiler pada kondisi operasi aktual belum pernah dievaluasi secara kuantitatif pada sistem boiler yang digunakan di perusahaan tersebut.

Penelitian terdahulu umumnya hanya mengevaluasi efisiensi boiler berdasarkan kualitas bahan bakar atau menggunakan metode *indirect*. Penelitian ini mengintegrasikan analisis nilai kalor batubara dan laju *feed water* terhadap efisiensi boiler *fire tube* kapasitas 10 ton pada kondisi operasi aktual industri minyak kelapa menggunakan metode *direct method*.

2. METODE PENELITIAN

a. Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi studi literatur, pengumpulan data operasional boiler, pengolahan data, perhitungan efisiensi boiler menggunakan metode langsung, serta analisis hasil penelitian. Tahapan penelitian secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

b. Material dan Peralatan

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah batubara dengan tiga variasi nilai kalor rendah (LHV) yaitu 24.001 kJ/kg, 22.644 kJ/kg, dan 23.121 kJ/kg. Peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fire tube chain grate* boiler berkapasitas 10 ton yang digunakan pada proses produksi minyak kelapa di PT. XXX. Data pengoperasian boiler diperoleh dari sistem pencatatan

harian *logsheet* yang mencakup tekanan uap, suhu uap, suhu umpan udara, konsumsi batubara, dan laju udara umpan.

c. Variabel Penelitian

Variabel independen dalam penelitian ini meliputi nilai kalor batubara (LHV), laju *feed water*, suhu *feed water*, tekanan boiler, dan konsumsi bahan bakar. Variabel dependennya adalah efisiensi boiler yang dihitung menggunakan metode langsung. Variabel kontrol meliputi jenis boiler, kapasitas boiler sebesar 10 ton, dan kondisi operasi sistem selama pengamatan.

d. Teknik Pengambilan Data

Data penelitian diperoleh dari *logsheet* operasi boiler selama tiga periode pengamatan, yaitu tanggal 3 Februari 2025, 6 Februari 2025, dan 9 Februari 2025 dengan durasi pengamatan selama 24 jam pada masing-masing periode. Data kandungan LHV (nilai kalor pembakaran rendah) adalah jumlah panas yang diperoleh dari proses pembakaran bahan bakar tanpa memperhitungkan energi berasal dari kondensasi uap air yang terbentuk selama proses tersebut pada batubara yang digunakan [14].

e. Analisis Data

Perhitungan efisiensi boiler dilakukan menggunakan metode langsung (*direct method*). Metode ini membandingkan energi yang diserap air hingga menjadi uap dengan energi yang tersedia dari pembakaran bahan bakar [15]. Persamaan efisiensi boiler dituliskan sebagai berikut [7]:

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_w (h_s - h_f)}{\dot{m}_f \times LHV \text{ rata-rata}} \times 100\% \dots\dots\dots [16]$$

dimana:

- η_b = Efisiensi Boiler
- \dot{m}_w = Produksi *feed water* (kg/Jam)
- \dot{m}_f = Penggunaan bahan bakar (*fuel*) (kg/Jam)
- h_f = Entalpy *feed water* (kJ/kg)
- h_s = Entalpy uap (*steam*) (kJ/kg)
- $LHV \text{ rata-rata}$ = Nilai kalor pembakaran rendah (kJ/kg)

Nilai entalpi uap dan entalpi *feed water* diperoleh dari *Steam Table* berdasarkan tekanan dan suhu operasi boiler.

f. Analisis Statistik

Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk mendapatkan nilai rata-rata parameter operasi boiler dan efisiensi boiler pada setiap kondisi pengamatan. Analisis deskriptif terkait hubungan antara nilai kalor batubara, suhu *feed water*, laju aliran *feed water*, dan efisiensi boiler dilakukan menggunakan tabel dan grafik untuk menentukan tren perubahan efisiensi akibat variasi kondisi operasi dan kualitas bahan bakar.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Penelitian

1) Karakteristik Operasi Boiler

Karakteristik operasi boiler pada tiga periode pengamatan ditunjukkan pada Tabel 1. Tekanan operasi dan suhu uap relatif stabil selama periode pengamatan, tetapi suhu *feed water*, laju *feed water*, dan konsumsi batubara menunjukkan variabilitas yang lebih besar. Perbedaan kondisi operasi tersebut dapat mempengaruhi efisiensi boiler yang dihasilkan.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Parameter Operasi Boiler

Parameter	3 Feb	6 Feb	9 Feb
Tekanan rata-rata (bar)	12,6	12,6	12,8
Suhu uap rata-rata (°C)	193,8	193,7	194,2
Suhu <i>feed water</i> rata-rata (°C)	83,0	77,4	73,4
<i>Feed water</i> rata-rata (kg/jam)	5,03	3,36	4,38
Konsumsi batubara rata-rata (ton/jam)	0,56	0,41	0,59

2) Hasil Perhitungan Entalpi

Nilai entalpi uap dan entalpi *feed water* diperoleh berdasarkan *Steam Table* menggunakan data tekanan dan suhu operasi boiler. Nilai entalpi uap relatif konstan, sedangkan entalpi *feed water* mengalami perubahan mengikuti suhu *feed water* pada masing-masing periode pengamatan sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Rata-rata Nilai Entalpi

Parameter	3 Februari	6 Februari	9 Februari
Entalpi uap (hs) (kJ/kg)	2591	2591	2591
Entalpi <i>feed water</i> (hf) (kJ/kg)	348	321	304

3) Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler

Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 3, bahwa efisiensi boiler rata-rata tertinggi diperoleh pada penggunaan batubara dengan nilai kalor 24.001 kJ/kg sebesar 78%, sedangkan efisiensi terendah diperoleh pada penggunaan batubara dengan nilai kalor 23.121 kJ/kg sebesar 72%.

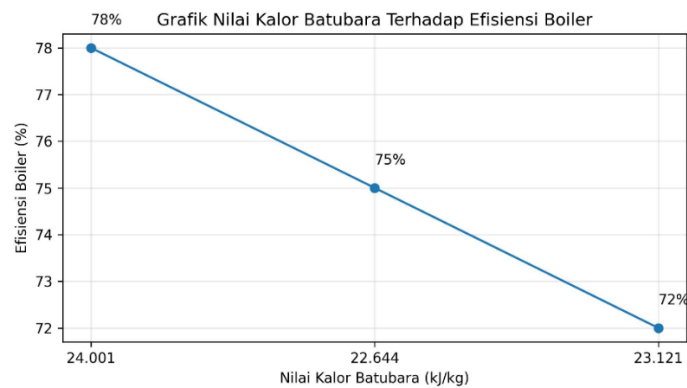
Tabel 3. Ringkasan Efisiensi Boiler

Nilai Kalor Batubara (kJ/kg)	Efisiensi Rata-rata (%)
24.001	78
22.644	75
23.121	72

b. Pembahasan

1) Hubungan Nilai Kalor Batubara terhadap Efisiensi Boiler

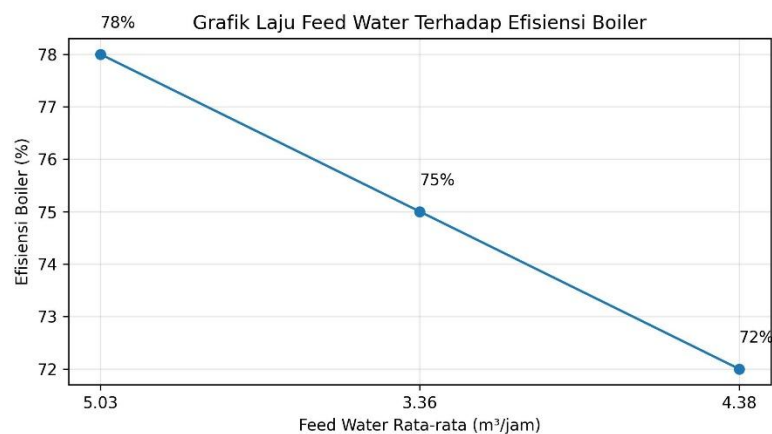
Hubungan antara nilai kalor batubara dan efisiensi boiler ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Nilai Kalor Batubara terhadap Efisiensi Boiler

Seperti terlihat pada Gambar 2, efisiensi boiler meningkat seiring dengan peningkatan nilai kalor batubara. Batubara dengan nilai kalor 24.001 kJ/kg menghasilkan efisiensi tertinggi yaitu 78% sedangkan batubara dengan nilai kalor 23.121 kJ/kg menghasilkan efisiensi terendah yaitu 72%. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin tinggi energi yang terkandung dalam bahan bakar maka semakin tinggi pula energi panas yang dapat dimanfaatkan untuk proses pembentukan uap sehingga efisiensi boiler semakin meningkat [17].

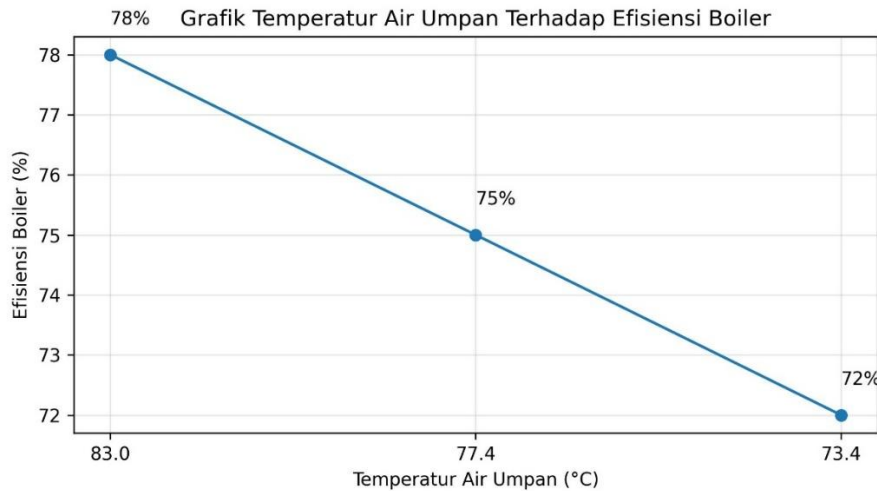
2) Pengaruh *Feed Water* terhadap Efisiensi Boiler



Gambar 3. Hubungan *Feed Water* terhadap Efisiensi Boiler

Selain kualitas bahan bakar, laju *Feed Water* juga mempengaruhi efisiensi boiler sebagaimana dapat dilihat pada gambar 3. Peningkatan laju aliran *Feed Water* meningkatkan kebutuhan energi untuk memanaskan air menjadi uap. Jika suplai energi dari proses pembakaran tidak naik secara proporsional maka efisiensi boiler akan turun. Oleh karena itu, pengendalian laju *Feed Water* menjadi salah satu faktor penting untuk menjaga kinerja boiler [18], [19].

3) Pengaruh Suhu *Feed Water* terhadap Efisiensi Boiler



Gambar 4. Grafik Suhu *Feed Water* terhadap Efisiensi Boiler

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara suhu *feed water* rata-rata dengan efisiensi boiler pada masing-masing periode pengamatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu *feed water* cenderung diikuti oleh peningkatan efisiensi boiler. Efisiensi rata-rata maksimum sebesar 78% diperoleh pada suhu *feed water* 83°C sedangkan efisiensi rata-rata minimum sebesar 72% diperoleh pada suhu *feed water* 73,4°C.

Kondisi ini terjadi karena semakin tinggi suhu *feed water* memberikan nilai entalpi awal yang lebih tinggi sehingga energi yang dibutuhkan untuk memanaskan air menjadi uap menjadi lebih kecil. Karena energi pemanasan yang dibutuhkan lebih sedikit, energi pembakaran dapat digunakan lebih efisien, yang berarti efisiensi boiler lebih tinggi. Sebaliknya, suhu *feed water* yang lebih rendah menyebabkan kebutuhan energi pemanasan yang lebih tinggi dan dapat mengurangi efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian suhu *feed water* merupakan salah satu parameter operasional penting dalam meningkatkan efisiensi boiler selain kualitas bahan bakar yang digunakan [19], [20].

4) Analisis Pengaruh Parameter Operasi terhadap Efisiensi Boiler

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi boiler tidak hanya dipengaruhi oleh nilai kalori batubara. Batubara dengan nilai kalor 23.121 kJ/kg mempunyai efisiensi lebih rendah dibandingkan dengan batubara dengan nilai kalor 22.644 kJ/kg. Fenomena ini menunjukkan bahwa kondisi operasi seperti suhu *feed water*, konsumsi bahan bakar dan laju *feed water* berkontribusi terhadap efisiensi boiler. Jadi, setelah kualitas bahan bakar ditingkatkan, parameter operasi harus dikontrol untuk mencapai efisiensi optimal [21].

c. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menyatakan peningkatan kualitas batubara mampu meningkatkan efisiensi boiler karena menghasilkan energi panas yang lebih besar dalam proses pembakaran. Pada penelitian yang telah dilakukan Nada (2023), efisiensi boiler dievaluasi dengan pendekatan tidak langsung, namun pada penelitian ini digunakan metode langsung

Analisis Pengaruh Nilai Kalor Batubara dan Laju *Feed Water* terhadap Efisiensi Boiler Fire Tube 10 Ton Menggunakan Metode Langsung (Rachmat Firdaus, A'rasy Fahrudin, Iswanto, Ali Akbar, Muhammad Ibrahim)

pada kondisi operasi sebenarnya industri minyak kelapa. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa kualitas bahan bakar merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja boiler meskipun dengan menggunakan metode yang berbeda [2].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa selain kualitas bahan bakar, parameter operasional seperti suhu *feed water* dan laju *feed water* juga mempengaruhi efisiensi boiler. Hasil penelitian ini mendukung penelitian Pratama et al. bahwa perubahan kondisi operasi boiler dapat mengakibatkan perubahan nilai efisiensi meskipun jenis bahan bakar yang digunakan relatif sama. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi boiler bergantung pada penggunaan bahan bakar dengan nilai kalor tinggi, tetapi juga membutuhkan pengendalian parameter operasi yang terbaik[11].

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan Mubarak et al. (2024) yang melaporkan bahwa efisiensi boiler dipengaruhi oleh kemampuan sistem dalam memanfaatkan energi panas secara efektif selama proses pembangkitan uap. Peningkatan temperatur feed water menyebabkan kebutuhan energi pemanasan menjadi lebih rendah sehingga energi hasil pembakaran dapat dimanfaatkan secara lebih optimal untuk menghasilkan uap[9].

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pengaruh nilai kalor batubara dan laju *feed water* terhadap efisiensi boiler tabung api berkapasitas 10 ton, dapat disimpulkan bahwa kualitas bahan bakar dan kondisi operasi boiler mempengaruhi kinerja sistem pembangkit uap. Batubara dengan nilai kalor tertinggi 24.001 kJ/kg menghasilkan efisiensi rata-rata tertinggi sebesar 78% sedangkan batubara dengan nilai kalor 23.121 kJ/kg menghasilkan efisiensi rata-rata terendah sebesar 72%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi boiler cenderung meningkat seiring dengan peningkatan nilai kalor batubara karena energi panas yang dilepaskan selama proses pembakaran lebih besar. Namun efisiensi boiler tidak hanya dipengaruhi oleh nilai kalor bahan bakar. Parameter operasi seperti suhu *feed water*, laju *feed water*, dan konsumsi bahan bakar juga mempengaruhi perubahan efisiensi boiler.

Hal ini disebabkan oleh suhu *feed water* yang lebih tinggi yang memberikan nilai entalpi awal yang lebih besar sehingga energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap lebih rendah. Oleh karena itu, upaya untuk meningkatkan efisiensi boiler dilakukan dengan memilih batubara dengan nilai kalor tinggi tetapi juga melalui pengendalian kondisi operasi boiler yang ideal.

Disarankan penelitian lebih lanjut untuk menggunakan waktu pengamatan yang lebih lama dan menggunakan analisis statistik yang lebih mendalam untuk mendapatkan model prediksi efisiensi boiler berdasarkan kualitas bahan bakar dan parameter operasi.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Saya menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas pengetahuan dan pemahaman yang telah diberikan, dan kepada seluruh rekan - rekan yang telah memberikan dukungan selama proses penyelesaian penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA :

- [1] M. V. Fadli and A. Fahrudin, "Pengaruh Variasi Diameter Pipa Api Mini Boiler Terhadap Daya Uap Dan Efisiensi," in *Procedia of Engineering and Life Science*, 2021, vol. 1, no. 1.
- [2] F. Q. Nada and I. H. Siregar, "PENGARUH KUALITAS BATU BARA TERHADAP EFISIENSI BOILER UNIT UTILITAS BATU BARA PT PETROKIMIA GRESIK MENGGUNAKAN METODE INDIRECT/HEAT LOSS MENGACU PADA ASME PTC 4," *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 2, pp. 29–38, 2023.
- [3] I. Muzaki and A. Mursadin, "ANALISIS EFISIENSI BOILER DENGAN METODE INPUT– OUTPUT DI PT. JAPFA COMFEED INDONESIA Tbk. UNIT BANJARMASIN," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 4, no. 1, pp. 37–46, 2019, doi: 10.20527/sjmekinematika.v4i1.50.
- [4] S. Dermawan, "Pemanfaatan limbah kulit nanas simplek sebagai bioetanol dengan metode alat destilasi yang digunakan terhadap variasi massa ragi dan waktu fermentasi," Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, 2025.
- [5] M. Bakri, "Penerapan Data Mining untuk Clustering Kualitas Batu Bara dalam Proses Pembakaran di PLTU Sebalang Menggunakan Metode K-Means," *J. Teknoinfo*, vol. 11, no. 1, p. 6, 2017, doi: 10.33365/jti.v11i1.3.
- [6] H. Yudisaputro, M. Nur Yuniarto, Yohanes, and A. Wibawa, "Analysis Study of Performance and Reliability Impact in Boiler Through Differential Coal Calorific Value (Case Study: Pelabuhan Ratu Coal-Fired Power Plant) BT - Recent Advances in Renewable Energy Systems," in *Recent Advances in Renewable Energy Systems - Select Proceedings of ICOM 2021*, 2022, pp. 105–111. doi: 10.1007/978-981-19-1581-9_12.
- [7] I. Santiatma, "Pemodelan dan Analisa Boiler Menggunakan Kesetimbangan Massa dan Energi," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [8] A. Maydana and A. Akbar, "Identifikasi Penurunan Kinerja Boiler di PT . Chemical Industry Tonggorejo," in *Procedia of Engineering and Life Science*, 2024, vol. 7, no. July 2023, pp. 2023–2025.
- [9] H. Mubarak, Mahmuddin, Sungkono, and M. Arham, "Efisiensi Boiler Dan Turbin Uap Untuk PLTU Unit 2 PT . XYZ," *J. Mesin Nusantara*, vol. 7, no. 1, pp. 49–62, 2024, doi: 10.29407/jmn.v7i1.21676.
- [10] O. Erbas, "Case Studies in Thermal Engineering Investigation of factors affecting thermal performance in a coal - fired boiler and determination of thermal losses by energy balance method," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 26, no. April, p. 101047, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101047.
- [11] F. Davis, R. Okwabi, and E. K. Oman, "A REVIEW OF THE SIGNIFICANCE OF FEEDWATER TEMPERATURE ON THE HEALTH OF A STEAM BOILER," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 17, no. 8, pp. 893–903, 2022.
- [12] F. Faizal and N. Ruhyat, "Comparative Analysis of Feed Water Temperature Before and After the Economizer on the Efficiency of a 240 Ton/Hour CFB Boiler," *IJAETech Int. J. Adv. Eng. Technol.*, 2026, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:285022863>
- [13] S. Trikusuma, A. A. P. Susastriawan, and T. Rusianto, "Energy and Exergy Analysis of Coal-Fueled Fire Tube Alstom Boiler Using Direct Method : Case Study at Garment Factory," *J. Eng. Appl. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp.

- 62–75, 2025.
- [14] L. B. Hartanto, M. Sibarani, and J. V. Tuapetel, “Analisa Teknis dan Biaya Penggunaan Bahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit dan Batu Bara pada Boiler DZL4 di PT. Lautan Luas Tbk .,” *J. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 17–23, 2020.
- [15] Donda, B. Wibowo, and K. Tarigan, “ESTIMATION OF BOILER WATER TUBE EFFICIENCY USING SHELL AND FIBER FUEL AT PT. XYZ,” *J. REPROKIMIA*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2025.
- [16] N. M. Pratama, Danial, and M. Taufiqurrahman, “Analisa Efisiensi Water Tube Boiler Dengan Menggunakan Metode Langsung,” *J. Teknol. Rekayasa Tek. Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 105–110, 2021.
- [17] E. Gultom and A. Rivai, “REAL-TIME PREDICTION OF HIGHER HEATING VALUE OF COAL IN COAL- FIRED POWER PLANTS USING OPERATING PARAMETERS,” *Energy-saving Technol. Equip. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 68–78, 2025, doi: 10.15587/1729-4061.2025.320573.
- [18] E. P. Putro, E. Widodo, A. Fahrudin, and Iswanto, “Analisis head pompa sentrifugal pada rangkaian seri dan paralel,” *Media Mesin Maj. Tek. Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 46–56, 2020.
- [19] N. Ali and I. N. Gusniar, “Analisis Perhitungan Kapasitas Pompa Sentrifugal Di PDAM Tirta Tarum Karawang,” *J. Mesin Nusant.*, vol. 6, no. 2, pp. 193–199, 2023, doi: 10.29407/jmn.v6i2.19638.
- [20] S. Waluyo, A. Akbar, P. H. Tjahjanti, and R. Firdaus, “Pengaruh Aspek Ratio Luasan Sudden Contraction Terhadap Head Loss Aliran Laminar,” *J. Mesin Nusanatara*, vol. 7, no. 2, pp. 269–277, 2024, doi: 10.29407/jmn.v7i2.22530.
- [21] R. Kalicheti and P. Sreenivasulu, “Study Of Improvement Of Boiler Efficiency Using Waste Heat Recovery Techniques In Thermal Power Plants,” *Int. J. Eng. Dev. Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 229–234, 2025.