



Analisis water tube boiler dengan metode langsung menggunakan sensor temperature dan differential pressure

Bagus Ricky Fianto^{1*} & Siti Zaenab Nurul Haq²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kahuripan Kediri

ARTICLE INFO

Article history:

Received May 08, 2026

Revised May 11, 2026

Accepted May 15, 2026

Available online May 30, 2026

Kata Kunci:

water tube boiler; biomassa;
efisiensi; thermocouple;
differential pressure

Keywords:

water tube boiler; boiler efficiency;
direct method; k-type
thermocouple; differential pressure
transmitter



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2025 by Author. Published by Pintarologi Media

ABSTRAK

Boiler biomassa menjadi pilihan menarik untuk pembangkit uap karena sumbernya terbarukan, biaya bahan bakar relatif rendah, dan emisi polutan tertentu lebih kecil dibanding batubara. Penelitian ini menganalisis kinerja water tube boiler berbahan bakar campuran biomassa 50% fiber, 20% cangkang sawit, dan 30% kulit kayu. Karakteristik bahan bakar dianalisis melalui pendekatan proximate dan ultimate, nilai kalor dihitung dengan rumus Dulong, kebutuhan udara pembakaran dan komposisi gas buang diperkirakan, sedangkan efisiensi termal dievaluasi menggunakan metode langsung. Suhu ruang bakar diukur dengan thermocouple tipe K dan kestabilan aliran dimonitor menggunakan differential pressure transmitter. Hasil penelitian menunjukkan LHV campuran sebesar 17.444,52 kJ/kg dan efisiensi termal boiler mencapai 87,5%. Pengaturan excess air sekitar 50% menghasilkan pembakaran stabil, emisi SO₂ rendah, dan kondisi ΔP optimum pada 72-75 mmH₂O saat beban penuh. Thermocouple tipe K menunjukkan galat sekitar $\pm 3-5$ °C dengan deviasi standar $\pm 1,8$ °C. Temuan ini menegaskan bahwa karakterisasi bahan bakar, pengendalian excess air, dan pemantauan instrumen merupakan faktor kunci dalam menjaga efisiensi serta keandalan operasi boiler biomassa.

ABSTRACT

Biomass-fired boilers are attractive for steam generation because the fuel is renewable, relatively low cost, and has lower sulfur content than fossil fuels. This study analyzes a water-tube boiler fired by a blended biomass fuel consisting of 50% fiber, 20% palm shell, and 30% bark. Fuel characteristics were assessed through proximate and ultimate approaches; heating value was estimated using the Dulong equation; combustion-air requirement and flue-gas composition were calculated; and boiler efficiency was evaluated using the direct method. Furnace temperature was measured using K-type thermocouples, while flow stability was monitored using a differential-pressure transmitter. The results show a lower heating value of 17,444.52 kJ/kg and a boiler thermal efficiency of 87.5%. Operation at approximately 50% excess air produced stable combustion, low SO₂ emissions, and an optimum differential pressure of 72-75 mmH₂O at full load. The K-type thermocouple showed an error of approximately $\pm 3-5$ °C with a standard deviation of ± 1.8 °C. These findings indicate that fuel characterization, excess-air control, and reliable instrument monitoring are essential for maintaining efficient and dependable biomass boiler operation.

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi pada sektor industri mendorong pemanfaatan boiler sebagai unit utama pembangkit uap. Pada sistem pembangkitan berbasis uap, boiler berperan mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas yang diserap air hingga berubah menjadi uap (Çengel & Boles, 2019; Moran et al., 2018). Efisiensi boiler menjadi indikator penting karena menentukan seberapa besar energi bahan bakar yang berhasil dimanfaatkan dan seberapa besar energi yang hilang melalui gas buang, permukaan perpindahan panas, atau ketidakstabilan operasi (Bathia, 2023).

*Corresponding author

E-mail addresses: bagus.ricky.fianto@students.kahuripan.ac.id

Water tube boiler banyak digunakan pada operasi berkapasitas besar karena mampu menghasilkan uap dalam jumlah tinggi dan bekerja pada tekanan relatif besar (Moran et al., 2018; Kurniawan, 2019). Namun, kinerja boiler sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar, kestabilan pembakaran, pengaturan udara pembakaran, serta keandalan instrumen pengukuran. Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar, seperti fiber kelapa sawit, cangkang sawit, dan kulit kayu, memiliki keunggulan dari sisi ketersediaan dan lingkungan, tetapi juga memiliki tantangan berupa variasi kadar air, abu, ukuran partikel, serta nilai kalor (Arsyad et al., 2024; Mekala & Ishara, 2023).

Dalam praktik operasi, suhu ruang bakar dan tekanan diferensial merupakan parameter yang penting untuk dipantau karena keduanya berhubungan dengan efisiensi pembakaran dan kestabilan operasi boiler (Hidayat & Pratama, 2020; Kurniawan & Sugiharto, 2022). Suhu ruang bakar menggambarkan kualitas pembakaran, sedangkan differential pressure (ΔP) menunjukkan kestabilan aliran fluida dan dapat menjadi indikasi adanya gangguan seperti fouling, kerak, atau ketidakseimbangan suplai udara dan bahan bakar (Raharjo & Setiawan, 2021). Thermocouple tipe K umum digunakan untuk pengukuran suhu tinggi karena responsnya cepat dan rentang kerjanya luas, sedangkan differential pressure transmitter digunakan untuk memantau perbedaan tekanan antar titik proses (Rahman & Santosa, 2018; Sari & Wibowo, 2019).

Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja water tube boiler berbahan bakar biomassa campuran dengan metode langsung, mengevaluasi nilai kalor dan kebutuhan udara pembakaran, serta menilai kinerja thermocouple tipe K dan differential pressure transmitter dalam mendukung pengendalian efisiensi operasi boiler.

2. METODE

Penelitian dilakukan sebagai studi kasus pada water tube boiler berbahan bakar biomassa padat. Bahan bakar yang digunakan merupakan campuran 50% fiber kelapa sawit, 20% cangkang sawit, dan 30% kulit kayu. Boiler yang diamati memiliki kapasitas desain 200 ton/jam dengan kondisi operasi aktual sekitar 130 ton/jam. Pengamatan dilakukan pada kondisi operasi stabil dengan interval pencatatan setiap satu jam selama satu siklus operasi.

2.1. Alat, Bahan, dan Parameter Pengukuran

Parameter utama yang diamati meliputi suhu ruang bakar, suhu air umpan, suhu uap keluar, laju aliran uap, konsumsi bahan bakar, dan differential pressure. Suhu ruang bakar diukur menggunakan thermocouple tipe K, suhu air umpan dan uap keluar dibaca menggunakan sensor PT100, sedangkan kestabilan aliran dianalisis dari differential pressure transmitter. Data entalpi diperoleh dari steam table berdasarkan tekanan dan temperatur operasi.

Tabel 1. Spesifikasi alat ukur dan bahan utama

Komponen/alat	Fungsi	Keterangan
Water tube boiler	Objek penelitian	Kapasitas desain 200 ton/jam; operasi aktual sekitar 130 ton/jam
Thermocouple tipe K	Mengukur suhu ruang bakar	Rentang 0-1000 °C; toleransi $\pm 1\%$
Sensor PT100	Mengukur suhu air umpan dan uap keluar	Akurasi tinggi dan tahan tekanan
Differential pressure transmitter	Mengukur perbedaan tekanan	Digunakan untuk memantau kestabilan aliran
Flowmeter uap	Mengukur laju aliran uap	Output digital dalam kg/jam
Campuran biomassa	Bahan bakar	50% fiber, 20% cangkang sawit, 30% kulit kayu

2.2. Perhitungan Efisiensi Boiler

Efisiensi termal boiler dihitung menggunakan metode langsung, yaitu membandingkan energi panas yang diserap air menjadi uap dengan energi kimia bahan bakar. Pendekatan ini banyak digunakan untuk evaluasi kinerja boiler karena perhitungannya langsung memanfaatkan data input-output operasi (Bathia, 2023; Çengel & Boles, 2019). Persamaan yang digunakan adalah:

$$\eta = [Ws \times (hs - hf)] / [Wf \times LHV] \times 100\%$$

dengan η adalah efisiensi termal boiler (%), Ws adalah laju aliran uap (kg/jam), hs adalah entalpi uap (kJ/kg), hf adalah entalpi air umpan (kJ/kg), Wf adalah laju konsumsi bahan bakar (kg/jam), dan LHV adalah nilai kalor bawah bahan bakar (kJ/kg).

2.3. Analisis Bahan Bakar, Udara Pembakaran, dan Sensor

Nilai kalor bahan bakar dihitung berdasarkan komposisi unsur karbon, hidrogen, oksigen, dan sulfur dengan pendekatan Dulong, sedangkan kebutuhan udara teoritis dihitung dari kebutuhan oksigen stoikiometri untuk pembakaran karbon, hidrogen, dan sulfur (Mishra, 2018; Moran et al., 2018). Dalam operasi aktual diterapkan excess air sekitar 50% untuk memastikan pembakaran berlangsung tuntas, karena pengaturan udara pembakaran berpengaruh terhadap emisi dan kehilangan panas gas buang (Raharjo & Setiawan, 2021).

Kinerja thermocouple dinilai dari hubungan suhu terhadap tegangan keluaran, error pengukuran, dan deviasi standar, sedangkan differential pressure dianalisis berdasarkan perubahan ΔP terhadap beban operasi serta hubungannya dengan efisiensi pembakaran.



Gambar 1 : Diagram Blok Sistem

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik dan Nilai Kalor Bahan Bakar

Bahan bakar biomassa campuran dipilih karena memiliki keseimbangan karakteristik pembakaran. Fiber mudah menyala dan membantu pembakaran awal, cangkang sawit memiliki kandungan karbon lebih tinggi sehingga memberikan panas stabil, sedangkan kulit kayu membantu kestabilan nyala walaupun menghasilkan abu yang perlu dikendalikan. Pemanfaatan biomassa padat pada boiler juga didukung oleh ketersediaan bahan bakar dan potensi pengurangan emisi sulfur dibandingkan bahan bakar fosil (Arsyad et al., 2024; Mekala & Ishara, 2023). Komposisi unsur kimia bahan bakar ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi unsur kimia bahan bakar biomassa

Unsur	Fiber (%)	Cangkang sawit (%)	Kulit kayu (%)
Karbon (C)	45,65	50,70	46,21
Hidrogen (H ₂)	6,12	6,15	5,98
Nitrogen (N ₂)	0,82	1,76	0,91
Oksigen (O ₂)	35,60	34,70	36,84
Sulfur (S)	0,08	0,19	0,11
Abu	11,73	6,50	9,95

Hasil perhitungan menunjukkan nilai kalor atas (HHV) campuran sebesar 18.673,56 kJ/kg dan nilai kalor bawah (LHV) sebesar 17.444,52 kJ/kg. Nilai LHV digunakan dalam evaluasi efisiensi karena menggambarkan energi bersih yang tersedia setelah memperhitungkan kehilangan panas akibat pembentukan uap air dari pembakaran hidrogen (Mishra, 2018; Çengel & Boles, 2019). Walaupun nilai

kalor biomassa lebih rendah daripada batubara, nilai tersebut masih memadai untuk aplikasi boiler industri.

3.2. Kebutuhan Udara Pembakaran dan Gas Buang

Berdasarkan komposisi rata-rata campuran bahan bakar, kebutuhan oksigen teoritis diperoleh sebesar 1,269 kg O₂/kg bahan bakar. Dengan kandungan oksigen udara sekitar 21%, kebutuhan udara teoritis sebesar 5,52 kg udara/kg bahan bakar. Pada operasi aktual digunakan excess air 50%, sehingga udara aktual menjadi 8,28 kg udara/kg bahan bakar. Pengaturan ini diperlukan untuk menekan pembentukan CO, namun tetap harus dikendalikan agar panas tidak banyak terbawa gas buang (Mishra, 2018; Raharjo & Setiawan, 2021).

3.3. Efisiensi Termal Boiler

Perhitungan metode langsung menggunakan data operasi berupa laju aliran uap 46.000 kg/jam, tekanan uap 24 bar, suhu uap superheated 259 °C, entalpi uap 2.930 kJ/kg, suhu feedwater 105 °C, entalpi feedwater 439 kJ/kg, konsumsi bahan bakar 7.500 kg/jam, dan LHV 17.444,52 kJ/kg. Selisih entalpi yang diserap uap sebesar 2.491 kJ/kg.

$$\eta = [46.000 \times (2.930 - 439)] / [7.500 \times 17.444,52] \times 100\% = 87,5\%$$

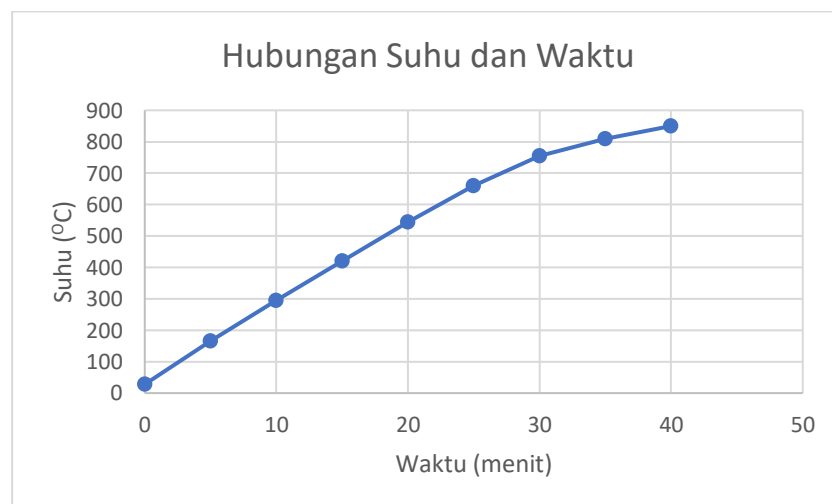
Efisiensi termal sebesar 87,5% menunjukkan bahwa proses pembakaran biomassa berlangsung cukup optimal. Nilai ini didukung oleh nilai kalor bahan bakar yang memadai, penggunaan air umpan yang telah dipanaskan, serta pengendalian udara pembakaran pada kisaran excess air 50%. Hasil ini sejalan dengan prinsip bahwa peningkatan pemanfaatan panas dan pengendalian rugi-rugi operasi akan meningkatkan kinerja boiler (Bathia, 2023; Kurniawan, 2019). Efisiensi tersebut dapat dipertahankan apabila kebersihan permukaan perpindahan panas dan kestabilan aliran dijaga secara rutin.

3.4. Kinerja Thermocouple Tipe K

Pada pengujian kenaikan suhu, thermocouple tipe K mencatat peningkatan suhu ruang bakar dari 28 °C pada menit ke-0 menjadi 850 °C pada menit ke-40. Tegangan keluaran meningkat sebanding dengan suhu, dari 1,09 mV menjadi 33,25 mV. Pada proses pendinginan, tegangan keluaran menurun secara proporsional mengikuti penurunan suhu dari 850 °C menjadi 60 °C. Hubungan linier antara suhu dan tegangan menunjukkan bahwa sensor bekerja sesuai karakteristik dasar thermocouple tipe K, sebagaimana digunakan pada pengukuran suhu tinggi dalam sistem boiler (Rahman & Santosa, 2018; Sari & Wibowo, 2019).

Tabel 4. Ringkasan hasil pengamatan thermocouple tipe K

Kondisi	Rentang waktu	Rentang suhu	Rentang tegangan
Kenaikan suhu	0-40 menit	28-850 °C	1,09-33,25 mV
Penurunan suhu	0-40 menit	850-60 °C	33,25-2,34 mV
Akurasi	-	Error $\pm 3-5$ °C	Deviasi standar $\pm 1,8$ °C

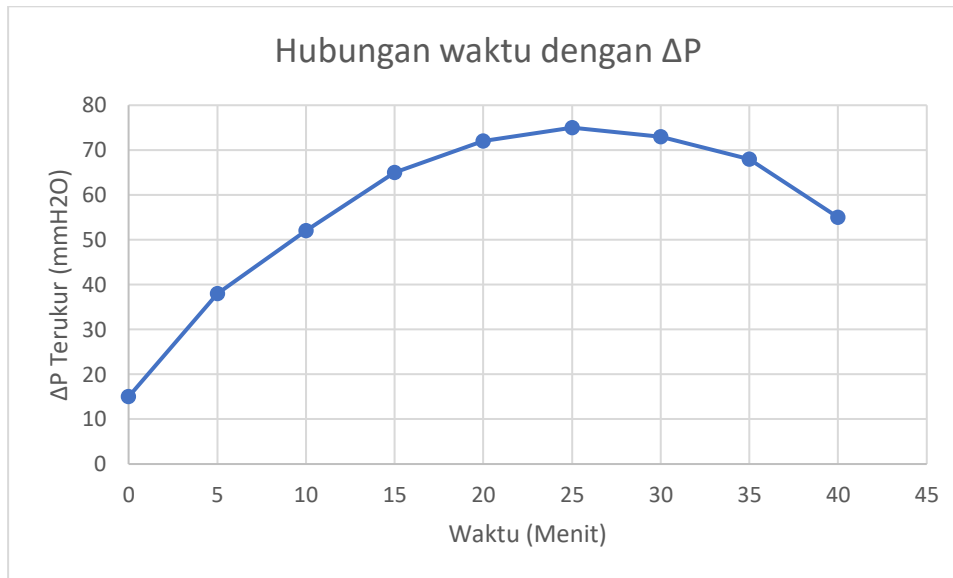


Gambar 1 : Grafik Hubungan Waktu dengan Suhu Hasil Pengukuran Thermocoupe (Kenaikan Suhu)

Error pengukuran berada pada kisaran $\pm 3-5$ °C dan deviasi standar $\pm 1,8$ °C. Nilai tersebut relatif kecil dibandingkan rentang pengukuran hingga lebih dari 800 °C, sehingga thermocouple tipe K dapat dinilai cukup akurat dan andal untuk pemantauan suhu ruang bakar secara real-time. Keandalan pembacaan sensor perlu didukung dengan perawatan dan kalibrasi berkala agar data operasi tetap valid (Widianto & Ardianto, 2021).

3.5. Analisis Differential Pressure

Nilai differential pressure meningkat seiring kenaikan beban boiler dan mencapai kondisi optimum pada kisaran 72-75 mmH₂O saat beban penuh. Pada kondisi tersebut, efisiensi termal boiler berada pada nilai optimum sebesar 87,5%. Ketika ΔP stabil, laju aliran uap dan air lebih terkendali sehingga perpindahan panas berlangsung efektif. Sebaliknya, ΔP yang fluktuatif dapat menunjukkan aliran tidak stabil, potensi fouling, atau ketidakseimbangan suplai bahan bakar dan udara, sehingga pemantauan tekanan dan suhu diperlukan untuk menjaga efisiensi pembakaran (Hidayat & Pratama, 2020; Kurniawan & Sugiharto, 2022).



Gambar 3 : Grafik hubungan waktu dengan ΔP hasil pengukuran

Hasil ini menunjukkan bahwa pemantauan ΔP dapat digunakan sebagai indikator operasional untuk menjaga performa boiler. Pengendalian excess air, pembersihan permukaan perpindahan panas, serta kalibrasi transmitter secara berkala diperlukan agar nilai ΔP tetap berada pada kisaran stabil (Raharjo & Setiawan, 2021; Widiyanto & Ardianto, 2021).

4. SIMPULAN

Water tube boiler berbahan bakar campuran biomassa 50% fiber, 20% cangkang sawit, dan 30% kulit kayu mampu menghasilkan efisiensi termal sebesar 87,5% berdasarkan metode langsung. Nilai ini didukung oleh LHV bahan bakar sebesar 17.444,52 kJ/kg, pemanasan awal air umpan, serta pengaturan excess air sekitar 50%.

Kebutuhan udara teoritis campuran biomassa sebesar 5,52 kg udara/kg bahan bakar, sedangkan udara aktual pada excess air 50% sebesar 8,28 kg udara/kg bahan bakar. Komposisi gas buang didominasi nitrogen dan karbon dioksida, sementara SO₂ sangat rendah karena kadar sulfur biomassa kecil.

Thermocouple tipe K menunjukkan hubungan linier antara suhu dan tegangan keluaran, dengan error sekitar $\pm 3-5$ °C dan deviasi standar $\pm 1,8$ °C. Differential pressure transmitter menunjukkan kondisi aliran optimum pada ΔP 72-75 mmH₂O saat beban penuh, yang berhubungan dengan efisiensi boiler tertinggi.

Kestabilan suhu ruang bakar, pengendalian differential pressure, dan pengaturan excess air merupakan faktor utama dalam mempertahankan efisiensi boiler biomassa. Rekomendasi teknis yang perlu diterapkan adalah menjaga excess air pada kisaran 40-60%, melakukan pembersihan fouling secara rutin, dan mengkalibrasi instrumen secara berkala.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, A., dkk. (2024). Technical analysis using 100 percent palm kernel shell as fuel in circulation fluidized bed boiler type. *International Journal of Electrical, Computer and Biomedical Engineering*, 2(2), 128-140. <https://doi.org/10.62146/ijece.v2i2.44>
- Bathia, A. (2023). *Steam System Basics and Energy Efficiency*. New Jersey: Continuing Education and Development, Inc.

- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Hidayat, D., & Pratama, R. (2020). Efisiensi bahan bakar pada water tube boiler menggunakan sensor thermocouple tipe K dan PT100. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 38(1), 54-60.
- Kurniawan, A. (2019). Analisis efisiensi boiler unit 2 dan 4 di PT PLN (Persero) Wil. Kalselteng Sektor PLTU Asam-Asam. *SJME Kinematika*, 4(1), 77-85.
- Kurniawan, T., & Sugiharto, A. (2022). Pengaruh penggunaan sensor suhu dan tekanan pada water tube boiler terhadap efisiensi bahan bakar. *Journal of Thermal Engineering*, 40(2), 211-220.
- Mekala, K. G. H., & Ishara, G. K. K. (2023). Boiler corrosion and suggestions for better efficiency. *Journal of Research Technology and Engineering*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22532.50566>
- Mishra, D. P. (2018). *Fundamentals of Combustion*. Prentice Hall.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (9th ed.). Wiley.
- Raharjo, T., & Setiawan, B. (2021). Evaluasi kebutuhan udara pembakaran dan dampaknya terhadap emisi gas buang pada boiler industri. *Jurnal Teknologi Termal*, 19(1), 67-82.
- Rahman, F., & Santosa, W. (2018). Analisis penggunaan thermocouple tipe K pada boiler untuk pengukuran suhu yang akurat dalam proses pembakaran. *Journal of Industrial Engineering*, 32(4), 311-318.
- Sari, Y., & Wibowo, D. (2019). Pemanfaatan sensor thermocouple tipe K pada water tube boiler untuk peningkatan kontrol suhu dan efisiensi bahan bakar. *Jurnal Teknologi Energi*, 45(2), 143-150.
- Widianto, P., & Ardianto, A. (2021). Perawatan dan kalibrasi sensor untuk meningkatkan efisiensi pembakaran pada water tube boiler. *Jurnal Teknik Energi*, 26(4), 101-108.