

Analisa Pengaruh Jenis Bahan Bakar Terhadap Efisiensi Boiler Type Chain Grate Stoker

Muhammad Aditya Fitra Firmansyah^{1*}, Mohammad Effendi²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Yudharta Pasuruan

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Yudharta Pasuruan

Jl. Yudharta No. 07, Sengonagung, Purwosari, Pasuruan, Jawa Timur, Indonesia

Corresponding author:

*muhammadadityafitra@gmail.com



This is an open access article under the CC BY license

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

ABSTRAK

Boiler merupakan komponen penting dalam industri yang berfungsi menghasilkan uap untuk proses produksi, sehingga efisiensinya sangat berpengaruh terhadap efektivitas energi dan biaya operasional. Salah satu faktor utama yang menentukan efisiensi adalah jenis bahan bakar yang digunakan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi bahan bakar terhadap efisiensi boiler tipe Chain Grate Stoker di salah satu industri tekstil di Pandaan, Kabupaten Pasuruan. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan pengujian lima jenis bahan bakar, yaitu batubara, wood pellet, cangkang kemiri, cangkang sawit, serta campuran batubara-wood pellet (80:20). Data diperoleh melalui pencatatan variabel operasional boiler meliputi tekanan uap, suhu ruang bakar, suhu air umpan, serta debit uap. Efisiensi dihitung dengan metode neraca panas (heat balance method) melalui perbandingan energi input bahan bakar dengan energi keluaran berupa uap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wood pellet menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 57% dengan suhu ruang bakar rata-rata 415 °C, namun membutuhkan konsumsi bahan bakar lebih besar (1.800 kg/jam). Cangkang kemiri memiliki efisiensi terendah sebesar 39% akibat kadar air tinggi. Batubara murni menunjukkan efisiensi moderat 46% dengan residu abu tinggi. Campuran batubara-wood pellet memberikan keseimbangan terbaik dengan efisiensi 51%, konsumsi bahan bakar lebih rendah (1.300 kg/jam), serta residu abu sedang. Penelitian ini menegaskan bahwa jenis bahan bakar berpengaruh signifikan terhadap efisiensi dan keberlanjutan operasi boiler. Kombinasi batubara-wood pellet direkomendasikan sebagai strategi co-firing yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan penggunaan bahan bakar tunggal

Kata Kunci: *Efisiensi Boiler, Chain Grate Stoker, Bahan Bakar, Biomassa, Co-firing*

ABSTRACT

Boilers are essential components in industry, functioning to generate steam for production processes, and their efficiency greatly affects both energy effectiveness and operational costs. One of the main factors influencing efficiency is the type of fuel used. This study aims to analyze the effect of fuel variations on the efficiency of a Chain Grate Stoker boiler in a textile industry located in Pandaan, Pasuruan Regency. The research employed a quantitative approach by testing five types of fuel, namely coal, wood pellets, candlenut shells, palm shells, and a coal-wood pellet mixture (80:20). Data were collected through direct measurement of boiler operational variables, including steam pressure, furnace temperature, feedwater temperature, and steam flow rate. Boiler efficiency was calculated using the heat balance method by comparing the fuel input energy with the output energy in the form of steam. The results show that wood pellets produced the highest efficiency

at 57% with an average furnace temperature of 415 °C, although requiring higher fuel consumption (1,800 kg/h). Candelnut shells yielded the lowest efficiency at 39% due to their high moisture content. Pure coal demonstrated moderate efficiency of 46% but produced a large amount of ash residue. Meanwhile, the coal–wood pellet mixture provided the best balance, achieving 51% efficiency with lower fuel consumption (1,300 kg/h) and moderate ash residue. This study confirms that fuel type has a significant impact on boiler efficiency and operational sustainability. The coal–wood pellet co-firing strategy is recommended as a more economical and environmentally friendly alternative compared to single-fuel utilization.

Keywords: *Boiler Efficiency, Chain Grate Stoker, Fuel Variation, Biomass, Co-firing*

PENDAHULUAN

Boiler merupakan salah satu komponen vital dalam sistem pembangkit energi yang berfungsi mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran (Sahda et al., 2022). Energi panas tersebut selanjutnya digunakan untuk menghasilkan uap yang menjadi penggerak utama pada berbagai sektor industri, mulai dari tekstil, makanan, hingga pembangkit listrik. Pemilihan jenis boiler sangat menentukan kinerja sistem produksi uap (Prasetyo et al., 2024), salah satunya adalah Chain Grate Stoker Boiler yang banyak diaplikasikan karena mampu membakar bahan bakar padat secara kontinu. Efisiensi boiler menjadi parameter penting yang menunjukkan sejauh mana energi dari bahan bakar dapat dikonversi secara optimal menjadi energi panas yang bermanfaat (Husen, 2022; Laila et al., 2024).

Meskipun demikian, permasalahan utama yang sering muncul adalah penurunan efisiensi akibat penggunaan bahan bakar dengan kualitas yang bervariasi. Perbedaan karakteristik bahan bakar, seperti nilai kalor, kadar air, dan kandungan abu, dapat memengaruhi proses pembakaran di dalam boiler (Fibarzi & Rahayu, 2023; Harnowo & Yunaidi, 2021). Efisiensi yang rendah tidak hanya berdampak pada meningkatnya konsumsi bahan bakar, tetapi juga memperbesar biaya operasional dan menghasilkan emisi yang lebih tinggi (Ruhyat, 2025; Sidiq, 2022). Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan bakar yang tepat sangat menentukan keberhasilan dalam menjaga efisiensi dan keberlanjutan operasi boiler (Fakhrizi & Mulyadi, 2024).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan analisis kuantitatif dengan metode perhitungan efisiensi boiler berdasarkan perbedaan jenis bahan bakar yang digunakan. Perhitungan dilakukan dengan mengacu pada metode heat loss yang mempertimbangkan energi masuk dan energi hilang pada proses pembakaran. Melalui pendekatan ini, dapat diketahui sejauh mana kontribusi tiap jenis bahan bakar dalam memengaruhi efisiensi kerja boiler Chain Grate Stoker, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara jenis bahan bakar dan efisiensi sistem.

Sejumlah penelitian terdahulu telah menyoroti pentingnya pemilihan bahan bakar terhadap kinerja boiler. Misalnya, penelitian oleh Syalsabila et al (2023) menunjukkan bahwa penggunaan batubara dengan nilai kalor tinggi menghasilkan tingkat efisiensi lebih besar dibandingkan dengan batubara dengan nilai kalor rendah. Sementara itu, studi oleh Kawiwarso et al (2023) menemukan bahwa pencampuran batubara dengan biomassa dapat meningkatkan efisiensi sekaligus menurunkan emisi gas buang. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Narputro et al (2025), yang menyatakan bahwa penggunaan co-firing dengan rasio 5% dan 95% batubara dapat meningkatkan efisiensi melalui penurunan heat rate sebesar 8,3%.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis bahan bakar terhadap efisiensi boiler Chain Grate Stoker. Fokus utama penelitian adalah membandingkan hasil efisiensi yang diperoleh dari penggunaan beberapa jenis bahan bakar dengan karakteristik yang berbeda. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam pengambilan keputusan penggunaan bahan bakar yang lebih tepat guna menekan biaya produksi. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan memberi sumbangan teoretis bagi pengembangan ilmu terkait pengendalian efisiensi energi di sektor industri.

METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret 2025 di salah satu pabrik tekstil di Pandaan, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur. Lokasi ini dipilih karena unit boilernya menggunakan tipe Chain Grate Stoker yang beroperasi dengan beragam jenis bahan bakar, baik batubara maupun biomassa (wood pellet, cangkang kemiri, dan cangkang sawit). Pemilihan lokasi tersebut memungkinkan dilakukan analisis komparatif terhadap efisiensi boiler berdasarkan variasi bahan bakar yang digunakan.

Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah kuantitatif dengan pendekatan eksperimental-deskriptif. Pendekatan kuantitatif dipilih karena fokus penelitian terletak pada analisis numerik berupa perhitungan efisiensi boiler. Metode eksperimental dilakukan melalui uji karakteristik bahan bakar untuk memperoleh data nilai kalor, kadar air, dan kadar abu. Sedangkan pendekatan deskriptif digunakan untuk menjelaskan perbandingan performa boiler, meliputi konsumsi bahan bakar, debit uap, suhu ruang bakar, hingga sisa abu yang dihasilkan dari setiap jenis bahan bakar.

Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh melalui dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer mencakup hasil uji laboratorium bahan bakar seperti nilai kalor, kadar air dan kadar abu. Selain itu, dilakukan pencatatan variabel operasional boiler meliputi tekanan uap, suhu ruang bakar, suhu air umpan, serta debit uap. Data primer juga diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan instrumen pendukung, antara lain sensor suhu RTD PT100, flowmeter air dan uap, serta pressure gauge. Sementara itu, data sekunder dikumpulkan dari dokumen perusahaan, seperti laporan efisiensi harian, catatan konsumsi bahan bakar, dan data pemeliharaan boiler.

Pengumpulan data dilakukan secara sistematis melalui observasi langsung terhadap kondisi operasional boiler saat menggunakan bahan bakar tunggal maupun campuran, wawancara dengan operator untuk mendapatkan informasi teknis mengenai kestabilan pembakaran, praktik pencampuran bahan bakar, serta kendala operasional, dan pengukuran lapangan terkait konsumsi bahan bakar (kg/jam), debit uap (kg/jam), suhu ruang bakar (°C), tekanan uap (bar), serta volume air umpan (m³).

Teknik Pengolahan Data

Data dianalisis menggunakan metode neraca panas (heat balance method), dengan membandingkan energi masuk dari bahan bakar dengan energi keluaran berupa uap yang dihasilkan. Efisiensi boiler dihitung dengan metode neraca energi menggunakan persamaan berikut:

$$n = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times \text{GCV}} \times 100\%$$

dengan keterangan:

Q = laju aliran uap (kg/jam)
h_g = entalpi uap jenuh pada tekanan tertentu (kkal/kg)
h_f = entalpi air pada suhu air umpan (kkal/kg)
q = konsumsi bahan bakar (kg/jam)
GCV = nilai kalor kotor bahan bakar (kkal/kg)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap lima variasi bahan bakar, yaitu batubara, wood pellet, cangkang kemiri, cangkang sawit, serta campuran batubara dan wood pellet dengan rasio 80:20. Masing-masing bahan bakar diuji pada boiler tipe chain grate stoker selama 9 jam dengan kondisi operasi yang dijaga konstan. Variabel yang diamati meliputi tekanan uap, laju aliran uap (flow steam), suhu ruang bakar, suhu input air umpan, konsumsi bahan bakar, serta sisa abu pembakaran.

Pengujian Bahan Bakar Batubara

Batubara merupakan bahan bakar konvensional yang paling banyak digunakan pada industri karena nilai kalor yang tinggi. Dalam penelitian ini, uji performa boiler dengan bahan bakar batubara dilakukan untuk memperoleh parameter operasi berupa tekanan uap, laju aliran uap, suhu ruang bakar, suhu input air, dan konsumsi bahan bakar. Data hasil pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Boiler Menggunakan Bahan Bakar Batubara

Jam	Tekanan Steam (Bar)	Flow Steam (kg/jam)	Temp. Furnace (°C)	Suhu Input Air (°C)	Total Bahan Bakar (ton)	Total Air Umpan (m ³)
06.00	8,3	5.992	353	42	-	6,04
07.00	7,5	4.961	404	44	-	5,00
08.00	7,4	7.855	432	44	-	7,92

Jam	Tekanan Steam (Bar)	Flow Steam (kg/jam)	Temp. Furnace (°C)	Suhu Input Air (°C)	Total Bahan Bakar (ton)	Total Air Uman (m ³)
09.00	7,3	7.640	403	45	-	7,70
10.00	8,2	6.699	435	40	-	6,76
11.00	8,1	7.740	402	42	-	7,80
12.00	8,0	6.986	320	42	-	7,04
13.00	7,4	7.164	357	50	-	7,22
14.00	7,6	7.549	388	44	-	7,61
Total	70,2	61.986	3.593	437	12	63,09
Rata-rata	7,8	6.887	399,2	48	1,3	7,01

Hasil perhitungan menunjukkan rata-rata tekanan uap sebesar 7,8 bar, laju aliran uap 6.887 kg/jam, serta suhu ruang bakar 399,2 °C. Konsumsi bahan bakar tercatat 1.300 kg/jam dengan efisiensi termal sebesar 46%. Nilai ini relatif rendah dibandingkan bahan bakar lain karena kualitas batubara yang digunakan bervariasi. Efisiensi rendah tersebut dipengaruhi oleh kandungan air dan abu yang cukup tinggi, sehingga proses pembakaran tidak berjalan sempurna. Kondisi ini mengakibatkan penurunan temperatur ruang bakar dan laju aliran uap yang fluktuatif.

Pengujian Bahan Bakar Wood Pellet

Wood pellet dipilih sebagai alternatif biomassa karena sifatnya ramah lingkungan dan kadar air yang rendah. Uji kinerja boiler menggunakan wood pellet dilakukan dengan kondisi operasi serupa, untuk mengetahui sejauh mana pengaruh bahan bakar ini terhadap efisiensi. Data hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Boiler Menggunakan Bahan Bakar Wood Pellet

Jam	Tekanan Steam (Bar)	Flow Steam (kg/jam)	Temp. Furnace (°C)	Suhu Input Air (°C)	Total Bahan Bakar (ton)	Total Air Uman (m ³)
06.00	8,4	5.245	438	42	-	5,29
07.00	7,5	6.982	404	44	-	7,04
08.00	7,4	6.740	432	44	-	6,80
09.00	7,5	6.845	408	45	-	6,90
10.00	8,2	7.670	432	40	-	7,73
11.00	8,1	7.640	420	42	-	7,70
12.00	8,0	6.986	390	42	-	7,04
13.00	7,4	6.164	410	50	-	6,22
14.00	7,0	6.249	402	44	-	6,30
Total	69,5	60.471	3.736	393	16	61,02
Rata-rata	7,72	6.719	415,1	43	1,8	6,78

Hasil analisis menunjukkan rata-rata tekanan uap 7,72 bar, laju aliran uap 6.719 kg/jam, dan suhu ruang bakar 415 °C. Konsumsi bahan bakar wood pellet sebesar 1.800 kg/jam, menghasilkan efisiensi tertinggi yaitu 57%. Keunggulan ini terutama dipengaruhi oleh kadar air rendah sehingga pembakaran berlangsung lebih sempurna. Walaupun efisiensi tinggi, penggunaan wood pellet membutuhkan konsumsi bahan bakar lebih besar. Hal ini dapat berdampak pada biaya operasional, terutama jika harga wood pellet lebih mahal daripada batubara.

Pengujian Bahan Bakar Cangkang Kemiri

Cangkang kemiri digunakan sebagai salah satu variasi biomassa lokal. Uji kinerja boiler dengan bahan bakar ini dilakukan untuk menilai kelayakan penggunaannya sebagai sumber energi alternatif. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Boiler Menggunakan Bahan Bakar Cangkang Kemiri

Jam	Tekanan Steam (Bar)	Flow Steam (kg/jam)	Temp. Furnace (°C)	Suhu Input Air (°C)	Total Bahan Bakar (ton)	Total Air Umpan (m ³)
06.00	8,1	5,650	420	44	-	5,70
07.00	7,6	5,972	418	44	-	6,02
08.00	7,4	5,453	410	44	-	5,50
09.00	7,5	6,043	424	45	-	6,09
10.00	7,9	7,265	432	40	-	7,32
11.00	7,5	7,186	420	42	-	7,24
12.00	7,2	6,998	390	48	-	7,05
13.00	7,8	7,139	410	50	-	7,20
14.00	7,6	6,846	402	44	-	6,90
Total	68,6	58,552	3726	401	16	59,02
Rata-rata	7,62	6,505	414	44	1,8	6,56

Dari hasil perhitungan diperoleh rata-rata laju aliran uap 6.505 kg/jam dengan suhu ruang bakar 414 °C. Konsumsi bahan bakar tercatat sebesar 1.800 kg/jam, namun efisiensi yang diperoleh hanya 39%, terendah di antara bahan bakar yang diuji. Rendahnya efisiensi disebabkan oleh kadar air tinggi dan nilai kalor yang rendah, sehingga energi panas yang dihasilkan per kilogram bahan bakar relatif kecil. Selain itu, kestabilan pembakaran menurun akibat kesulitan mencapai suhu ruang bakar optimal.

Pengujian Bahan Bakar Cangkang Sawit

Cangkang sawit merupakan salah satu limbah biomassa yang melimpah di Indonesia, sehingga potensial digunakan sebagai bahan bakar boiler. Hasil pengujian boiler dengan bahan bakar ini disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Boiler Menggunakan Bahan Bakar Cangkang Sawit

Jam	Tekanan Steam (Bar)	Flow Steam (kg/jam)	Temp. Furnace (°C)	Suhu Input Air (°C)	Total Bahan Bakar (ton)	Total Air Umpan (m ³)
06.00	7,8	6,982	420	46	-	7,04
07.00	7,6	6,570	415	44	-	6,63
08.00	7,3	6,448	427	42	-	6,50
09.00	7,4	6,005	423	45	-	6,05
10.00	6,9	6,821	437	40	-	6,88
11.00	7,2	6,176	421	48	-	6,23
12.00	7,4	6,988	396	48	-	7,04
13.00	7,8	7,139	417	50	-	7,20
14.00	8,0	6,846	426	45	-	6,90
Total	67,4	59,975	3782	408	16	60,47
Rata-rata	7,49	6,664	420,22	45	1,8	6,72

Dari hasil perhitungan, diperoleh rata-rata tekanan uap 7,49 bar dengan laju aliran uap 6.664 kg/jam dan suhu ruang bakar 420 °C. Konsumsi bahan bakar sebesar 1.800 kg/jam menghasilkan efisiensi 43%. Nilai ini lebih tinggi dibanding cangkang kemiri, namun masih di bawah wood pellet. Faktor penyebab efisiensi tidak maksimal adalah tingginya kadar air dalam cangkang sawit yang memengaruhi kualitas pembakaran. Meskipun nilai kalor cukup baik, kestabilan nyala api sering terganggu oleh uap air.

Pengujian Bahan Bakar Batubara Mix Wood Pellet

Untuk memperoleh keseimbangan antara efisiensi dan konsumsi bahan bakar, dilakukan pengujian campuran batubara 80% dan wood pellet 20%. Hasil pengujian boiler ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Boiler Menggunakan Campuran Batubara-Wood Pellet

Jam	Tekanan Steam (Bar)	Flow Steam (kg/jam)	Temp. Furnace (°C)	Suhu Input Air (°C)	Total Bahan Bakar (ton)	Total Air Umpan (m ³)
06.00	8,5	6,980	454	42	-	6,13
07.00	8,2	6,699	437	44	-	5,75
08.00	7,8	7,185	443	44	-	6,91
09.00	8,2	6,910	451	45	-	6,97
10.00	7,9	7,421	445	40	-	5,77
11.00	8,5	7,148	457	42	-	6,20
12.00	7,6	6,990	439	42	-	6,04
13.00	7,7	7,249	448	50	-	6,30
14.00	8	6,798	443	44	-	6,25
Total	72,4	63,560	4017	393	12	56,32
Rata-rata	8,04	7,062	446,33	43	1,3	6,26

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh rata-rata tekanan uap sebesar 8,04 bar dengan laju aliran uap 7.062 kg/jam. Suhu furnace tercatat cukup tinggi yaitu 446,33 °C, dengan suhu input air rata-rata 43 °C. Kondisi ini menunjukkan bahwa pencampuran wood pellet mampu meningkatkan stabilitas pembakaran dibandingkan dengan penggunaan batubara murni. Perhitungan efisiensi menunjukkan nilai sebesar 51%, lebih tinggi dari efisiensi batubara murni yang hanya mencapai 46%. Kombinasi ini menggabungkan nilai kalor tinggi batubara dan sifat pembakaran cepat wood pellet. Efisiensi cukup tinggi dengan konsumsi bahan bakar relatif seimbang menjadikan kombinasi ini lebih ekonomis untuk operasi jangka panjang. Selain itu, residu abu lebih rendah dibanding penggunaan batubara murni.

Perbandingan Efisiensi dan Konsumsi Bahan Bakar

Untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kinerja boiler, dilakukan perbandingan efisiensi, debit uap, suhu ruang bakar, konsumsi bahan bakar, dan sisa abu dari berbagai jenis bahan bakar yang diuji. Data hasil perhitungan efisiensi boiler pada penggunaan batubara, wood pellet, cangkang kemiri, cangkang sawit, serta campuran batubara-wood pellet ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perbandingan Kinerja Boiler Berdasarkan Jenis Bahan Bakar

Bahan Bakar	Efisiensi (%)	Debit Uap (kg/jam)	Suhu Ruang Bakar (°C)	Konsumsi Bahan Bakar (kg/jam)	Sisa Abu
Batubara	46	6.887	399	1.300	Tinggi
Wood Pellet	57	6.719	415	1.800	Rendah
Cangkang Kemiri	39	6.505	414	1.800	Rendah
Cangkang Sawit	43	6.664	420	1.800	Rendah
Batubara Mix Wood Pellet	51	7.062	446	1.300	Sedang

Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa penggunaan wood pellet menghasilkan efisiensi tertinggi yaitu 57% dengan suhu furnace rata-rata 415 °C. Namun, tingginya efisiensi tersebut disertai dengan konsumsi bahan bakar yang juga tinggi, yaitu 1.800 kg/jam. Sebaliknya, cangkang kemiri menunjukkan efisiensi terendah sebesar 39%, meskipun debit uapnya relatif mendekati bahan bakar lain. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun biomassa dapat menjadi alternatif ramah lingkungan, tidak semua jenis biomassa mampu memberikan performa optimal dalam sistem pembakaran boiler tipe chain grate stoker.

Sementara itu, campuran batubara-wood pellet memberikan keseimbangan terbaik dengan efisiensi 51% dan konsumsi bahan bakar relatif lebih rendah, yaitu 1.300 kg/jam. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan batubara murni (46%) namun tetap lebih ekonomis daripada penggunaan biomassa murni. Kondisi ini memperlihatkan adanya trade-off antara efisiensi energi dan tingkat konsumsi bahan bakar. Dengan demikian, penerapan co-firing batubara dan wood pellet dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi boiler tanpa meningkatkan biaya operasional secara signifikan, sekaligus mengurangi residu abu yang dihasilkan.

Analisis Faktor yang Mempengaruhi

Kinerja boiler sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar yang digunakan. Salah satu faktor paling dominan adalah nilai kalor. Batubara memiliki nilai kalor yang relatif tinggi sehingga mampu menghasilkan energi panas lebih besar per kilogram bahan bakar. Sebaliknya, biomassa seperti wood pellet, cangkang sawit, dan cangkang kemiri memiliki nilai kalor lebih rendah sehingga energi yang dihasilkan per satuan massa juga lebih kecil. Perbedaan ini berdampak langsung terhadap efisiensi pembakaran dan total energi uap yang dihasilkan boiler.

Selain itu, kadar air pada bahan bakar turut memengaruhi proses pembakaran. Biomassa umumnya mengandung kadar air lebih tinggi dibanding batubara. Kondisi ini menyebabkan sebagian energi panas terbuang untuk menguapkan air sebelum proses pembakaran berlangsung sempurna. Misalnya, pada penggunaan cangkang sawit dan kemiri, kadar air yang cukup tinggi menurunkan kualitas pembakaran dan berdampak pada rendahnya efisiensi boiler. Oleh karena itu, pengeringan atau perlakuan awal biomassa menjadi penting untuk meningkatkan performa energi yang dihasilkan.

Faktor lain yang berpengaruh adalah kestabilan pembakaran dan residu abu. Campuran batubara dan wood pellet terbukti mampu memberikan nyala api lebih stabil dibanding penggunaan bahan bakar tunggal, sehingga proses konversi energi berjalan lebih optimal. Dari sisi residu, batubara menghasilkan abu dalam jumlah besar yang dapat mengganggu efisiensi operasional jangka panjang. Sebaliknya, wood pellet lebih ramah lingkungan karena menghasilkan abu dalam jumlah lebih sedikit. Secara keseluruhan, meskipun wood pellet memberikan efisiensi tertinggi, kombinasi batubara-wood pellet lebih direkomendasikan untuk penggunaan berkelanjutan karena mampu menyeimbangkan efisiensi, konsumsi bahan bakar, dan kestabilan pembakaran dengan dampak lingkungan yang lebih kecil.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa jenis bahan bakar memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja dan efisiensi boiler tipe Chain Grate Stoker. Hasil pengujian memperlihatkan variasi performa, di mana wood pellet menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 57% karena kadar air rendah yang mendukung pembakaran sempurna. Sebaliknya, cangkang kemiri memberikan efisiensi terendah sebesar 39% akibat kadar air yang tinggi dan nilai kalor rendah, sehingga proses pembakaran tidak optimal. Sementara itu, penggunaan batubara murni menunjukkan efisiensi moderat sebesar 46%, namun dibatasi oleh tingginya kandungan abu yang berdampak pada kestabilan operasi jangka panjang.

Lebih lanjut, analisis perbandingan memperlihatkan bahwa campuran batubara dan wood pellet dengan rasio 80:20 menghasilkan keseimbangan terbaik antara efisiensi dan konsumsi bahan bakar. Kombinasi ini mampu mencapai efisiensi 51% dengan konsumsi bahan bakar relatif rendah (1.300 kg/jam), lebih baik dibandingkan batubara murni maupun biomassa tunggal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa strategi co-firing mampu mengoptimalkan keunggulan nilai kalor tinggi batubara sekaligus memanfaatkan sifat pembakaran cepat wood pellet. Selain itu, residu abu yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan batubara murni, sehingga mendukung keberlanjutan operasional. Oleh karena itu, penerapan co-firing batubara dan wood pellet dapat direkomendasikan sebagai solusi yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Fakhrizi, R. R., & Mulyadi, M. (2024). *Strategies to Boost Boiler Efficiency and Reduce Operational Downtime*. *Procedia of Engineering and Life Science*, 7, 691–695. <https://doi.org/10.21070/pels.v7i0.1554>
- Fibarzi, W. U., & Rahayu, R. (2023). *Pengaruh Rasio Bahan Bakar Boiler dari Serabut dan Cangkang kelapa Sawit Terhadap Efisiensi Sistem*. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 12(2), 254. <https://doi.org/10.29103/jtku.v12i2.13561>
- Harnowo, S., & Yunaidi, Y. (2021). *Kinerja Boiler dengan Sistem Pembakaran Bersama antara Ampas Tebu dengan Sekam Padi dan Cangkang Kelapa Sawit*. *Semesta Teknika*, 24(2), 102–110. <https://doi.org/10.18196/st.v24i2.12937>
- Husen, A. (2022). *Analisis Efisiensi Energi Pada Boiler Industri Tipe Fire-Tube Kapasitas 2Ton/Jam Dengan Bahan Bakar Compressed Natural Gas (CNG) di PT. X*. *SAINSTECH: JURNAL PENELITIAN DAN PENGKAJIAN SAINS DAN TEKNOLOGI*, 32(2), 67–75. <https://doi.org/10.37277/stch.v32i2.1302>
- Kawiarso, K., Nuryoto, N., & Irawan, A. (2023). *Pengaruh Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler Pada Pembangkit CFB Batubara Dalam Sistem Co-firing*. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(3),

- 281–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.7625148>
- Laila, N. S., Nurfatihah, Y., Erlinawati, E., Rusnadi, I., & Ridwan, K. A. (2024). Efisiensi Termal Ruang Bakar Water Tube Boiler Ditinjau dari Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Solar dan Gas pada Produksi Superheated Steam. *Jurnal Penelitian Sains*, 26(3), 298. <https://doi.org/10.56064/jps.v26i3.1070>
- Narputro, P., Artiyasa, M., Putra, C. L. E., Hendrawati, T. D., & Wicaksana, F. A. (2025). Analisis Tekno-Ekonomi Penerapan Co-Firing Biomassa Serbuk Kayu pada PLTU 3× 350 MW. *Scientific Exploration: Journal of Indonesian Academic Research*, 3(1), 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.25134/jiar.v3i1.58>
- Prasetyo, A. W., Widayat, W., & Utomo, M. T. S. (2024). Analisis Efisiensi Eksergi Water Tube Boiler Pada Unit Penyediaan Steam di Salah Satu Plant Gas Processing Aceh, Indonesia. *Eksergi*, 21(3), 209. <https://doi.org/10.31315/e.v21i3.12348>
- Ruhyat, N. (2025). LITERATURE REVIEW: PENGARUH SUHU AIR ECONOMIZER DAN FLOW STEAM TERHADAP EFISIENSI BOILER CFB. *J-ENSITEC (Journal of Engineering and Sustainable Technology)*, 11(02), 102022–102029. <https://doi.org/https://doi.org/10.31949/j-ensitec.v11i02.13607>
- Sahda, N. T., Sentosa, J. M., & Andhani, L. (2022). Analisis Efisiensi Boiler menggunakan Metode Langsung di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Bantargebang. *Journal of Engineering Environmental Energy and Science*, 1(1), 39–48. <https://doi.org/10.31599/tgptae14>
- Sidiq, A. N. (2022). Pengaruh Co-Firing Biomassa terhadap Efisiensi Boiler PLTU Batubara. *KILAT*, 11(1), 21–31. <https://doi.org/10.33322/kilat.v11i1.1553>
- Syalsabila, J., Hendradinata, H., Putri, F., Siproni, S., & HB, I. (2023). ANALISA EFISIENSI THERMAL BOILER TIPE CIRCULATION FLUIDIZED BED DI PLTU 3x10MW. *MACHINERY Jurnal Teknologi Terapan*, 4(3), 159–166. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.10122406>