

Evaluasi Efisiensi Boiler Pulverized Coal pada Co-Firing Sawdust PLTU Pacitan

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Muhammad Sayid Romdhoni³

¹²³Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Email: eriprabowo@itpln.ac.id, Trassanda2410505@ITPLN.AC.ID, m.romdhoni@pln.co.id

Abstract

This study evaluates boiler efficiency in a pulverized-coal steam power plant during direct co-firing of sawdust biomass at PLTU Pacitan Unit 1. The analysis uses operational and performance-test data for coal firing and co-firing schemes with 1%, 2%, and 5% sawdust at approximately 295 MW load. Boiler efficiency was calculated using the indirect heat-loss method based on ASME PTC 4, supported by fuel ultimate and proximate analysis, heat-loss components, fuel rate, air-heater gas temperature, and emission measurements. The results show that increasing sawdust composition changes fuel characteristics, especially lower gross calorific value, lower sulfur and ash content, higher total moisture, and lower Hardgrove Grindability Index. Boiler efficiency on an LHV basis reached 91.96% for 100% coal, 92.61% for 1% sawdust, 92.30% for 2% sawdust, and 91.74% for 5% sawdust. At 5% co-firing, fuel consumption increased by about 1.19% compared with coal firing, while SO₂, NO_x, and particulate emissions decreased and remained below the regulatory limits. The study indicates that sawdust co-firing can support emission reduction, but boiler efficiency and fuel handling require continuous monitoring.

Keywords: boiler efficiency; co-firing; sawdust; pulverized coal; heat loss

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi efisiensi boiler tipe pulverized coal pada penerapan direct co-firing biomassa sawdust di PLTU Pacitan Unit 1. Analisis menggunakan data operasi dan performance test pada skema 100% batubara serta skema co-firing 1%, 2%, dan 5% sawdust pada beban sekitar 295 MW. Efisiensi boiler dihitung dengan metode tidak langsung atau heat-loss method berdasarkan ASME PTC 4, dengan mempertimbangkan analisis ultimate dan proximate bahan bakar, komponen rugi panas, fuel rate, temperatur gas keluar air heater, dan data emisi. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan komposisi sawdust mengubah karakteristik bahan bakar, terutama penurunan nilai kalor, kandungan sulfur, abu, dan Hardgrove Grindability Index, serta kenaikan total moisture. Efisiensi boiler berbasis LHV diperoleh sebesar 91,96% pada 100% batubara, 92,61% pada 1% sawdust, 92,30% pada 2% sawdust, dan 91,74% pada 5% sawdust. Pada co-firing 5%, konsumsi bahan bakar meningkat sekitar 1,19% dibandingkan coal firing, sedangkan emisi SO₂, NO_x, dan partikulat menurun serta tetap berada di bawah baku mutu. Dengan demikian, co-firing sawdust mendukung penurunan emisi, tetapi efisiensi boiler dan sistem penanganan bahan bakar perlu dipantau secara berkelanjutan.

Kata kunci: efisiensi boiler; co-firing; sawdust; pulverized coal; heat loss

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara masih menjadi bagian penting dalam sistem penyediaan energi listrik karena mampu menghasilkan daya besar secara kontinu. Namun, dominasi batubara juga menimbulkan tantangan lingkungan berupa emisi gas rumah kaca, sulfur oksida, nitrogen oksida, dan partikulat. Dalam konteks transisi energi, pembangkit eksisting dituntut mampu mengurangi konsumsi bahan bakar fosil tanpa mengabaikan keandalan operasi dan efisiensi peralatan utama [1,7,9]. Salah satu strategi yang diterapkan pada PLTU batubara adalah co-firing biomassa. Co-firing merupakan proses pembakaran bersama antara batubara dan bahan bakar biomassa dalam sistem pembakaran yang sama. Pada pembangkit pulverized coal, skema direct co-firing relatif banyak digunakan karena dapat memanfaatkan sistem coal handling dan sistem pembakaran eksisting dengan modifikasi yang lebih terbatas dibandingkan skema indirect atau parallel co-firing [3-5,10,17-20,31,35,39].

PLTU Pacitan berkapasitas 2 x 315 MW telah menjalankan program co-firing sejak Desember 2020 dengan menggunakan biomassa jenis sawdust. Komposisi biomassa dinaikkan bertahap dari 1%, 2%, hingga 5% dari total kebutuhan bahan bakar. Implementasi tersebut penting untuk mendukung target bauran energi baru terbarukan, tetapi perubahan karakteristik bahan bakar berpotensi memengaruhi pola operasi boiler, konsumsi bahan bakar, nilai heat loss, dan efisiensi boiler [3,4,9].

Sawdust memiliki kandungan sulfur dan abu yang lebih rendah daripada batubara, sehingga berpotensi menurunkan emisi SO₂ dan partikulat. Di sisi lain, nilai kalor sawdust lebih rendah dan total moisture lebih tinggi, sehingga campuran bahan bakar dapat membutuhkan massa bahan bakar lebih besar untuk menghasilkan energi panas yang sama. Perbedaan nilai kalor, moisture, volatile matter, dan grindability perlu dianalisis karena berhubungan dengan pembakaran, kerja pulverizer, temperatur gas buang, dan rugi-rugi panas boiler [2-6,21-25,31-34,38]. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi perubahan efisiensi boiler tipe pulverized coal pada skema co-firing sawdust 1%, 2%, dan 5% di PLTU Pacitan Unit 1. Penilaian dilakukan menggunakan metode tidak langsung berdasarkan komponen heat loss sesuai ASME PTC 4. Selain efisiensi, artikel ini juga membahas perubahan karakteristik bahan bakar, fuel rate, parameter operasi pada co-firing 5%, dan dampak emisi gas buang agar hasil evaluasi tidak hanya dilihat dari satu indikator [1,7].

2. Metode Penelitian

2.1. Data dan Kondisi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis data operasi dan hasil performance test PLTU Pacitan Unit 1. Data yang dianalisis mencakup skema 100% batubara sebagai coal firing dan skema direct co-firing sawdust dengan komposisi 1%, 2%, dan 5%. Pengujian dilakukan pada beban sekitar 295 MW atau mendekati 100% MCR, sehingga perubahan efisiensi dapat dibandingkan pada kondisi operasi yang relatif sebanding. Data utama yang digunakan meliputi karakteristik bahan bakar hasil analisis laboratorium, fuel rate, temperatur gas masuk dan keluar air heater, excess air, moisture, heat credit, power consumption, dan komponen heat loss. Data pembanding juga menggunakan hasil commissioning atau benchmark boiler performance test untuk melihat kedekatan performa operasi aktual dengan kondisi desain awal boiler.

2.2. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah boiler tipe pulverized coal PLTU Pacitan Unit 1 dengan model DG1025/17.4-II13 pabrikan Dongfang Boiler Group Co., Ltd. Boiler ini merupakan drum type sub-critical, natural circulation, single furnace, tangential firing, single reheating, dan balanced draft. Spesifikasi utama yang digunakan sebagai acuan evaluasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi utama boiler PLTU Pacitan

Parameter	Nilai
Pabrikan	Dongfang Boiler Group Co., Ltd.
Tipe/model	Pulverized coal / DG1025/17.4-II13
Karakter umum	Sub-critical, natural circulation, drum type
Main steam flow	1025 ton/jam
Main steam pressure	17,4 MPa.g
Main steam temperature	541 °C
Reheat steam flow	839,4 ton/jam
Feedwater temperature	280,6 °C
AH outlet air temp. (PA/SA)	360 / 351 °C
Thermal efficiency LHV	92,71% (TMCR)

2.3. Parameter dan Persamaan Kinerja

Perhitungan efisiensi boiler mengikuti metode tidak langsung atau heat-loss method. Metode ini digunakan karena mampu menunjukkan sumber rugi panas sehingga lebih informatif dibandingkan metode langsung. Pada penelitian ini, rugi panas yang dianalisis mencakup gas buang kering, moisture dalam bahan bakar, moisture hasil pembakaran hidrogen, moisture udara, combustible in refuse, radiasi dan konveksi, unmeasured losses, sensible heat bottom ash, sensible heat fly ash, serta pembentukan CO [1,2].

$$\eta = 100 - \Sigma HL \quad (1)$$

$$\eta_{LHV} = \{100 - [((\Sigma L - B1) / H_f) \times 100 + L6 + L7]\} \times Q_{ro} / (Q_{ro} - B2) \quad (2)$$

$$L1 = (m \times C_p \times (T_f - T_a) / GCV_{fuel}) \times 100 \quad (3)$$

$$L2 = (9 \times H_2 \times [584 + C_p \times (T_f - T_a)] / GCV_{fuel}) \times 100 \quad (4)$$

Pada Persamaan (1) sampai Persamaan (4), η adalah efisiensi boiler, HL adalah total heat loss, H_f adalah heating value bahan bakar, Q_{ro} adalah boiler heat output, B1 adalah heat credit, B2 adalah power consumption, m adalah massa gas buang kering, C_p adalah kalor spesifik, T_f adalah temperatur gas buang, T_a adalah temperatur ambien, dan H_2 adalah kandungan hidrogen dalam bahan bakar.

2.4. Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan melalui empat tahap. Tahap pertama adalah menyusun data karakteristik bahan bakar untuk coal firing dan co-firing sawdust. Tahap kedua adalah menghitung komponen heat loss dengan basis LHV dan HHV sesuai standar ASME PTC 4. Tahap ketiga adalah membandingkan efisiensi boiler antar skema operasi. Tahap keempat adalah mengevaluasi parameter operasi dan emisi pada komposisi 5% sawdust sebagai komposisi tertinggi yang diuji. Interpretasi hasil dilakukan secara multiparameter agar perubahan efisiensi tidak hanya dikaitkan dengan satu variabel operasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Batubara dan Sawdust

Karakteristik bahan bakar menunjukkan perbedaan yang cukup jelas antara batubara Arutmin dan sawdust. Sawdust memiliki gross calorific value lebih rendah, total moisture lebih tinggi, sulfur lebih rendah, ash content lebih rendah, dan HGI lebih kecil dibandingkan batubara. Perbedaan ini penting karena nilai kalor dan moisture memengaruhi kebutuhan bahan bakar, sedangkan sulfur dan ash content berkaitan dengan emisi serta produk abu pembakaran.

Tabel 2. Komparasi karakteristik batubara dan sawdust

Parameter	Unit	Batubara Arutmin	Sawdust
Carbon	%	45,22	28,06
Hydrogen	%	3,17	3,17
Nitrogen	%	0,56	0,15
Oxygen	%	12,89	24,80
Total moisture	%	35,20	41,74
Ash content	%	2,84	2,01
Volatile matter	%	35,20	46,25
Total sulphur	%	0,12	0,07
Gross calorific value	kCal/kg	4212	2694
HGI	-	57	<32

Nilai kalor sawdust yang lebih rendah menyebabkan campuran co-firing membutuhkan volume atau massa bahan bakar lebih besar untuk menghasilkan energi yang sama. Namun, kandungan sulfur dan ash yang lebih rendah memberi keuntungan lingkungan karena potensi pembentukan SO₂ dan abu pembakaran dapat ditekan. Kandungan volatile matter sawdust yang lebih tinggi juga menunjukkan bahan lebih mudah terbakar, tetapi moisture tinggi dapat mengurangi manfaat tersebut karena sebagian panas digunakan untuk menguapkan air dalam bahan bakar [3-6].

3.2. Perubahan Karakteristik Campuran Bahan Bakar

Peningkatan komposisi biomassa dari 1% sampai 5% mengubah karakteristik campuran bahan bakar. Perubahan yang paling terlihat adalah penurunan gross calorific value dan HGI, serta kenaikan total moisture. Pada komposisi 5% sawdust, nilai kalor campuran masih berada dalam rentang desain bahan bakar boiler PLTU Pacitan, tetapi HGI turun menjadi 37 sehingga perhatian terhadap kerja coal mill atau pulverizer menjadi penting.

Tabel 3. Perbandingan karakteristik campuran bahan bakar

Parameter	100% Coal	1% Sawdust	2% Sawdust	5% Sawdust
Carbon (%wt)	48,90	47,35	44,26	44,75
Hydrogen (%wt)	3,46	3,49	3,19	3,13
Oxygen (%wt)	11,14	14,59	14,30	18,84
Nitrogen (%wt)	0,71	0,79	0,69	0,35
Sulphur (%wt)	0,43	0,39	0,26	0,17
Ash content (%wt)	5,55	4,14	3,81	3,78
Total moisture (%wt)	29,81	34,18	35,25	38,47
Volatile matter (%wt)	32,01	31,89	33,24	36,85
GCV (kCal/kg)	4.641,50	4.221	4.150	4.082
HGI	42	41	39	37

3.3. Evaluasi Efisiensi Boiler

Hasil perhitungan heat loss menunjukkan bahwa efisiensi boiler tidak meningkat secara linier terhadap kenaikan persentase biomassa. Pada basis LHV, efisiensi 100% coal firing adalah 91,96%. Efisiensi meningkat pada komposisi 1% sawdust menjadi 92,61%, kemudian menurun menjadi 92,30% pada 2% sawdust dan 91,74% pada 5% sawdust. Jika dibandingkan dengan commissioning, seluruh kondisi operasi aktual berada di bawah efisiensi commissioning 92,72%.

Tabel 4. Ringkasan efisiensi boiler dan parameter operasi

Parameter	Comm.	100% Coal	1% Sawdust	2% Sawdust	5% Sawdust
Fuel rate (t/h)	151,58	181,02	179,97	186,66	197,63
AH outlet gas (°C)	144,6	177,91	155,16	173,18	175,92
Excess air (%)	26,73	17,46	14,37	10,13	8,32
HHV fuel (kJ/kg-f)	-	19.433,03	16.835,12	17.375,22	17.090,52
LHV fuel (kJ/kg-f)	-	17.958,34	15.220,99	15.852,10	15.476,39
η fuel basis HHV (%)	86,01	84,89	83,63	84,11	82,98
η fuel basis LHV (%)	92,72	91,96	92,61	92,30	91,74
η gross basis LHV (%)	92,14	91,38	92,03	91,69	91,15

Pada komposisi 5% sawdust, penurunan efisiensi terutama berkaitan dengan penurunan nilai kalor campuran dan kenaikan moisture. Nilai moisture yang lebih tinggi meningkatkan rugi panas untuk penguapan air dalam bahan bakar. Selain itu, penurunan HGI dapat memengaruhi kualitas penggerusan, distribusi ukuran partikel, dan stabilitas pembakaran. Karena sistem mixing masih bersifat manual, keseragaman campuran juga menjadi faktor penting yang dapat memengaruhi hasil pengujian.

3.4. Perbandingan Komponen Heat Loss

Komponen heat loss yang paling dominan adalah rugi panas gas buang kering dan rugi panas akibat moisture bahan bakar. Pada co-firing 5%, heat loss gas buang kering berbasis LHV mencapai 6,92%, lebih tinggi dibandingkan 6,56% pada 2% sawdust dan 6,27% pada 1% sawdust. Heat loss akibat moisture dalam bahan bakar juga meningkat seiring kenaikan komposisi sawdust, yaitu 0,57% pada 1%, 0,63% pada 2%, dan 0,67% pada 5%.

Tabel 5. Perbandingan heat loss utama berbasis LHV

Komponen	Comm.	100% Coal	1% Sawdust	2% Sawdust	5% Sawdust
HL1 dry gas (%)	5,93	6,96	6,27	6,56	6,92
HL2 moisture fuel (%)	0,37	0,49	0,57	0,63	0,67
HL3 moisture H2 (%)	0,38	0,51	0,51	0,53	0,60
HL4 moisture air (%)	0,22	0,23	0,20	0,20	0,22
HL5 combustible refuse (%)	0,07	0,01	0,02	0,08	0,02
HL6 radiation convection (%)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
HL7 unmeasured losses (%)	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
HL8 bottom ash (%)	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
HL9 fly ash (%)	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04
HL10 CO formation (%)	0,62	0,00	0,00	0,00	0,02

Pola tersebut menunjukkan bahwa kenaikan komposisi sawdust tidak cukup hanya dilihat dari sisi pengurangan batubara. Penurunan nilai kalor dan kenaikan moisture dapat meningkatkan rugi panas tertentu sehingga efisiensi boiler menurun pada komposisi yang lebih tinggi. Dengan demikian, kualitas biomassa, proses pengeringan, homogenitas pencampuran, dan pengaturan excess air menjadi faktor pengendali yang menentukan apakah co-firing mampu menjaga performa boiler [17-20].

3.5. Pengamatan Operasi Co-Firing 5%

Pengamatan operasi pada co-firing 5% sawdust dilakukan pada beban sekitar 295 MW. Beberapa parameter utama seperti load, coal-biomass flow, total air flow, main steam pressure, main steam temperature, main steam flow, mill current, dan mill outlet temperature menunjukkan kondisi yang masih dapat dikendalikan. Rata-rata total coal-biomass flow berada sekitar 183 ton/jam, namun lebih tinggi dibandingkan data commissioning. Kenaikan ini sejalan dengan penurunan nilai kalor campuran bahan bakar.

Tabel 6. Parameter operasi utama pada co-firing 5% sawdust

Parameter	Satuan	Nilai acuan/hasil
Load	MW	sekitar 295-296
Coal-biomass flow	t/h	sekitar 182-186
Total air flow	t/h	sekitar 1222-1282
Main steam pressure	MPa	sekitar 15,09-15,22
Main steam temperature	°C	sekitar 539-540
Main steam flow	t/h	sekitar 922-931
Mill outlet temperature	°C	sekitar 57-58

Secara operasional, penurunan HGI pada campuran 5% perlu diperhatikan karena dapat meningkatkan beban kerja pulverizer dan memengaruhi ukuran partikel bahan bakar. Jika distribusi ukuran partikel tidak seragam, pembakaran di furnace dapat menjadi kurang stabil. Oleh sebab itu, peningkatan persentase biomassa perlu disertai evaluasi mill current, mill outlet temperature, particle size distribution, dan pola aliran udara primer maupun sekunder.

3.6. Evaluasi Emisi Gas Buang

Meskipun efisiensi boiler cenderung menurun pada komposisi sawdust yang lebih tinggi, hasil pengujian emisi menunjukkan kecenderungan positif. Pada co-firing 5%, rata-rata SO₂ turun dari 414,818 mg/Nm³ menjadi 400,456 mg/Nm³, NO_x turun dari 269,21 mg/Nm³ menjadi 256,826 mg/Nm³, dan partikulat turun dari 36,464 mg/Nm³ menjadi 33,814 mg/Nm³. Seluruh nilai tersebut masih berada di bawah baku mutu emisi PLTU batubara [7].

Tabel 7. Perbandingan emisi 0% dan 5% sawdust

Parameter	Baku mutu	0% Sawdust	5% Sawdust	Arah perubahan
SO ₂ (mg/Nm ³)	550	414,818	400,456	Turun
CO ₂ (%)	-	15,384	15,340	Relatif turun
NO _x (mg/Nm ³)	550	269,21	256,826	Turun
Partikulat (mg/Nm ³)	100	36,464	33,814	Turun

Penurunan emisi dapat dikaitkan dengan karakteristik sawdust yang memiliki sulfur dan ash content lebih rendah daripada batubara. Namun, keputusan operasi tidak dapat hanya didasarkan pada emisi. Pengelola unit tetap perlu menyeimbangkan target lingkungan dengan efisiensi boiler, keandalan pulverizer, potensi slagging-fouling, potensi korosi, dan kestabilan pembakaran jangka panjang [4-7,23-25].

3.7. Implikasi Operasional dan Keterbatasan

Implikasi utama dari penelitian ini adalah bahwa co-firing sawdust dapat dilanjutkan sebagai strategi pengurangan emisi, tetapi perlu pengendalian kualitas bahan bakar [41,42]. Nilai kalor sawdust yang terlalu rendah dan moisture yang terlalu tinggi akan meningkatkan kebutuhan bahan bakar dan menurunkan efisiensi. Oleh karena itu, pasokan sawdust perlu memiliki standar kualitas minimal, terutama nilai kalor, moisture, ukuran partikel, dan kandungan klorin untuk mengurangi risiko operasi. Penelitian ini memiliki keterbatasan karena evaluasi dilakukan pada beberapa titik skema operasi dan belum merepresentasikan pengujian durability jangka panjang. Analisis juga belum memasukkan evaluasi ekonomi secara rinci, pengaruh terhadap heat rate unit secara keseluruhan, slagging index,

fouling index, dan corrosion index. Selain itu, karena proses pencampuran dilakukan secara manual, variasi homogenitas fuel mixing masih mungkin memengaruhi hasil operasi.

3.8. Rekomendasi Monitoring Performansi

Berdasarkan hasil evaluasi, monitoring performansi perlu difokuskan pada parameter yang sensitif terhadap perubahan komposisi biomassa. Parameter tersebut mencakup nilai kalor dan moisture bahan bakar, HGI, fuel rate, excess air, temperatur gas keluar air heater, mill outlet temperature, total heat loss, dan emisi gas buang. Monitoring ini penting agar co-firing tetap mendukung pengurangan emisi tanpa menimbulkan penurunan efisiensi dan risiko keandalan yang tidak terkendali.

Tabel 8. Rekomendasi monitoring co-firing sawdust

Parameter	Makna teknis	Arah evaluasi
GCV dan moisture	Menentukan energi masuk dan rugi penguapan	GCV dijaga tinggi, moisture ditekan
HGI dan particle size	Menentukan kemudahan penggerusan	Dikaitkan dengan kerja pulverizer
Fuel rate	Menunjukkan kebutuhan bahan bakar	Tidak naik berlebihan pada beban setara
Excess air	Menentukan kualitas pembakaran	Dijaga agar tidak menambah dry gas loss
Temperatur gas keluar AH	Indikasi panas terbuang	Dibaca bersama heat loss
Emisi SO ₂ , NO _x , partikulat	Dampak lingkungan	Tetap di bawah baku mutu

Pada praktik operasi, peningkatan persentase sawdust sebaiknya dilakukan bertahap dan disertai pengujian performa secara periodik. Pemeriksaan visual pada furnace waterwall, superheater, dan air heater perlu dilakukan setelah periode operasi tertentu untuk mengidentifikasi potensi deposit, slagging, fouling, dan korosi. Dengan cara tersebut, co-firing tidak hanya dinilai sebagai substitusi bahan bakar, tetapi juga sebagai perubahan pola operasi yang harus dikendalikan melalui data performansi.

3.9. Pembahasan Kritis Indikator Kinerja

Perbedaan antara efisiensi berbasis HHV dan LHV perlu diperhatikan karena bahan bakar biomassa memiliki moisture yang relatif tinggi. Efisiensi berbasis LHV terlihat lebih tinggi karena tidak memasukkan panas laten kondensasi uap air sebagai energi yang dapat dimanfaatkan kembali. Dalam evaluasi operasional PLTU, basis yang dipakai harus konsisten dengan performance guarantee agar perbandingan tidak menimbulkan interpretasi yang keliru. Pada data ini, basis LHV digunakan sebagai acuan utama karena sesuai dengan pembandingan commissioning yang digunakan dalam penelitian. Efisiensi 1% sawdust yang lebih tinggi daripada 100% coal firing tidak berarti kenaikan biomassa selalu meningkatkan efisiensi. Pada komposisi yang lebih tinggi, terutama 5%, efisiensi turun karena efek penurunan nilai kalor dan kenaikan moisture mulai lebih dominan. Hal ini menunjukkan adanya titik operasi optimum yang perlu ditentukan melalui pengujian lebih panjang dan kondisi bahan bakar yang lebih terkendali. Dengan kata lain, co-firing memerlukan optimasi, bukan sekadar peningkatan persentase biomassa.

Dari sisi pembakaran, penurunan excess air pada co-firing 5% dapat membantu menekan dry gas loss, tetapi jika terlalu rendah dapat meningkatkan risiko pembakaran tidak sempurna. Karena itu, pengaturan udara pembakaran perlu dibaca bersama O₂ flue gas, CO, temperatur furnace, dan stabilitas nyala [46,47]. Jika kualitas sawdust berubah atau ukuran partikel tidak seragam, setelan yang sama belum tentu menghasilkan kondisi pembakaran yang identik. Kondisi ini memperkuat pentingnya pemantauan real-time dan penyesuaian operasi berdasarkan kualitas bahan bakar aktual.

Tabel 9. Interpretasi kritis indikator kinerja co-firing

Indikator	Kecenderungan	Makna operasional
GCV campuran	Menurun pada sawdust tinggi	Meningkatkan kebutuhan fuel rate untuk beban setara
Total moisture	Meningkat pada sawdust tinggi	Menambah rugi panas penguapan air
HGI	Menurun hingga 37 pada 5% sawdust	Memerlukan perhatian pada pulverizer dan ukuran partikel
Efisiensi LHV	Tertinggi pada 1%, turun pada 5%	Menunjukkan perlunya optimasi komposisi
Emisi SO ₂ /NO _x /partikulat	Turun pada 5% sawdust	Mendukung tujuan lingkungan
Fuel mixing	Masih manual	Berpotensi memengaruhi homogenitas pembakaran

3.10. Arah Pengembangan Operasi Co-Firing

Arah pengembangan operasi co-firing di PLTU Pacitan sebaiknya tidak hanya diarahkan pada peningkatan persentase biomassa, tetapi juga pada peningkatan kualitas rantai pasok biomassa. Sawdust yang masuk ke coal yard perlu dikendalikan kadar airnya melalui penyimpanan tertutup, pengeringan awal, dan pemilahan ukuran partikel. Langkah ini penting karena moisture yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor efektif, menambah heat loss, dan meningkatkan kebutuhan bahan bakar. Selain itu, evaluasi teknis sebaiknya diperluas pada aspek keandalan. Peningkatan sawdust dapat memengaruhi karakteristik abu, potensi deposit, dan risiko korosi, terutama jika bahan mengandung klorin atau alkali dalam jumlah tertentu [43-45]. Oleh karena itu, inspeksi periodik pada furnace waterwall, superheater, economizer, dan air heater perlu diselenggarakan dengan riwayat jam operasi co-firing. Data inspeksi tersebut akan membantu menentukan apakah co-firing 5% dapat dilanjutkan secara kontinyu atau perlu dibatasi pada kondisi operasi tertentu. Pengujian lanjutan juga perlu memasukkan analisis ekonomi dan heat rate unit [26,27,36,37,40]. Meskipun emisi turun, kenaikan fuel rate dapat memengaruhi biaya operasi, kebutuhan logistik biomassa, dan beban peralatan handling. Apabila kualitas sawdust dapat ditingkatkan, terutama melalui penurunan moisture dan peningkatan nilai kalor, maka peluang mempertahankan efisiensi mendekati kondisi commissioning akan lebih besar. Dengan demikian, strategi co-firing perlu memadukan aspek performa boiler, emisi, biaya, dan keandalan peralatan.

3.11. Validasi terhadap Batas Desain Boiler

Validasi terhadap desain awal boiler diperlukan karena perubahan bahan bakar dapat menggeser kondisi operasi dari rentang yang dirancang pabrik. Berdasarkan spesifikasi desain, boiler PLTU Pacitan menggunakan batubara low rank dengan LHV sekitar 3900-4500 kCal/kg. Nilai kalor campuran pada 1%, 2%, dan 5% sawdust masih berada dalam rentang tersebut, tetapi kecenderungannya menurun seiring kenaikan biomassa. Hal ini menunjukkan bahwa secara nilai kalor campuran masih dapat diterima, namun margin terhadap batas bawah desain semakin kecil. Parameter lain yang perlu diperhatikan adalah HGI. Pada desain, HGI bahan bakar berada sekitar 45-65, sedangkan campuran 5% sawdust memiliki HGI 37. Kondisi ini berpotensi meningkatkan kebutuhan energi penggerusan, memperbesar risiko ukuran partikel yang tidak seragam, dan memengaruhi distribusi pembakaran di burner. Karena itu, walaupun efisiensi dan emisi masih dapat diterima, kemampuan sistem penggerusan dan feeding perlu menjadi bagian dari evaluasi teknis sebelum persentase sawdust dinaikkan lebih lanjut.

Tabel 10. Validasi ringkas terhadap parameter desain bahan bakar

Parameter	Rentang desain	100% Coal	5% Sawdust	Catatan
LHV/GCV bahan bakar	3900-4500 kCal/kg	4.641,50	4.082	Masih dalam rentang, tetapi menurun
Total moisture	25-35%	29,81	38,47	5% sawdust melewati rentang desain
HGI	45-65	42	37	Perlu perhatian pada pulverizer
Sulphur	0,1-0,23%	0,43	0,17	5% sawdust lebih mendekati rentang desain
Ash content	3-6%	5,55	3,78	Masih dalam rentang desain

Berdasarkan validasi tersebut, batas utama penerapan co-firing bukan hanya pada kemampuan furnace menerima campuran biomassa, tetapi juga pada konsistensi kualitas bahan bakar dan kemampuan peralatan bantu. Jika moisture biomassa dapat dikurangi dan ukuran partikel dapat dikendalikan, maka peluang untuk menjaga efisiensi boiler akan meningkat. Sebaliknya, jika moisture tinggi dan HGI rendah tidak dikendalikan, kenaikan komposisi biomassa dapat memperbesar fuel rate dan menurunkan efisiensi termal.

3.12. Sintesis Manfaat dan Risiko Operasi

Sintesis hasil penelitian menunjukkan adanya trade-off antara manfaat lingkungan dan performa termal. Manfaat lingkungan terlihat dari penurunan emisi SO₂, NO_x, dan partikulat pada co-firing 5%. Risiko performa terlihat dari penurunan efisiensi LHV, peningkatan fuel rate, dan penurunan parameter grindability. Oleh karena itu, pengambilan keputusan operasi sebaiknya tidak hanya menargetkan persentase biomassa, tetapi juga menetapkan batas kualitas bahan bakar dan indikator minimum performa boiler.

Dalam konteks operasi harian, co-firing 5% dapat dipandang layak sebagai tahap implementasi awal karena parameter emisi masih aman dan parameter operasi utama masih dapat dikendalikan. Namun, implementasi jangka panjang membutuhkan pengujian durability, validasi terhadap deposit pada permukaan pemanas, dan evaluasi terhadap konsumsi energi auxiliary. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar awal untuk menyusun prosedur operasi yang lebih ketat pada penerimaan bahan bakar biomassa, proses mixing, pengaturan udara pembakaran, dan inspeksi pasca-operasi [28-30].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, peningkatan komposisi biomassa sawdust pada skema co-firing memengaruhi efisiensi boiler PLTU Pacitan Unit 1. Efisiensi boiler berbasis LHV pada 100% coal firing adalah 91,96%, sedangkan pada co-firing 1%, 2%, dan 5% sawdust berturut-turut sebesar 92,61%, 92,30%, dan 91,74%. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi 5% sawdust menghasilkan efisiensi paling rendah di antara variasi co-firing yang diuji. Penurunan efisiensi pada komposisi sawdust yang lebih tinggi terutama berkaitan dengan penurunan nilai kalor bahan bakar, kenaikan total moisture, penurunan HGI, dan perubahan komponen heat loss. Pada co-firing 5%, pemakaian bahan bakar meningkat sekitar 1,19% dibandingkan skema 100% batubara. Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah homogenitas fuel mixing, excess air, rasio primary air dan secondary air, serta kondisi kerja pulverizer.

Meskipun efisiensi boiler menurun pada komposisi 5%, co-firing sawdust memberi manfaat lingkungan karena menurunkan rata-rata emisi SO₂, NO_x, dan partikulat serta tetap berada di bawah baku mutu. Oleh karena itu, penerapan co-firing perlu dilanjutkan dengan monitoring kualitas bahan bakar, fuel rate, heat loss, mill performance, emisi, dan pemeriksaan risiko slagging, fouling, serta korosi agar manfaat lingkungan tetap sejalan dengan keandalan dan efisiensi pembangkit.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT PLN Nusantara Power UP Pacitan atas dukungan data operasi dan kesempatan penelitian, serta kepada pembimbing dan pihak Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi PLN yang telah memberikan arahan dalam penyusunan artikel ini.

Daftar Rujukan

- 1) American Society of Mechanical Engineers. ASME PTC 4.1-2008: Fired Steam Generators Performance Test Code. New York: ASME; 2008.
- 2) Febriani SDA, Purwanto MR. Analysis of boiler engine efficiency Unit 2 PT PJB UP Paiton. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1085:2-12. doi:10.1088/1742-6596/1085/1/012012.
- 3) Ilham MF, Suedy SWA. Pengaruh co-firing menggunakan sawdust terhadap nilai heat rate PLTU. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*. 2022;3(2):121-127.
- 4) Sidiq AN. Pengaruh co-firing biomassa terhadap efisiensi boiler PLTU batubara. *KILAT*. 2022;11(1):1-11.
- 5) Dwiaji YC. Analisis pengaruh co-firing biomassa terhadap kinerja peralatan boiler PLTU batubara Unit 1 PT XYZ. *JAMERE*. 2023;3(1):8-16.

- 6) Ronaldo R, Riza A, Tanujaya H. Pengaruh air fuel ratio terhadap distribusi temperatur pulverized coal boiler. *Indonesian Journal of Applied Science and Technology*. 2021;2(2):44-50.
- 7) Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. Peraturan Menteri LHK Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 tentang baku mutu emisi pembangkit listrik tenaga termal. Jakarta: KLHK; 2019.
- 8) Sudirmanto. Buku Materi Kuliah Teknik Tenaga Uap dan Gas. Jakarta: Institut Teknologi PLN; 2023.
- 9) PT PLN (Persero). Buku Rencana Kerja dan Anggaran Perusahaan Tahun 2024. Jakarta: PT PLN (Persero); 2024.
- 10) Aprilia CA. Analisis Kelayakan Biomass Co-Firing di PLTU Batubara Indonesia. Bandung: Institut Teknologi Bandung; 2022.
- 11) Dongfang Boiler Group Co., Ltd. Boiler performance and design document DG1025/17.4-II13. Dongfang Boiler Group; 2009.
- 12) PLN Puslitbang dan Universitas Gadjah Mada. Studi potensi biomassa untuk co-firing PLTU pada 38 kabupaten/kota. Yogyakarta: UGM; 2020.
- 13) PT PLN Nusantara Power UP Pacitan. Data produksi bahan bakar dan operasi co-firing PLTU Pacitan. Pacitan: PLN NP; 2023.
- 14) Presiden Republik Indonesia. Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional. Jakarta: Sekretariat Negara; 2017.
- 15) Livingston WR. Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities. London: IEA Clean Coal Centre; 2016.
- 16) Putra TS, Prabowo E, Ramadani F. Pengaruh Overhaul Terhadap Kinerja High Pressure Heater Unit 3 PLTU Banten Lontar. *JTM: JURNAL TEKNIK MESIN*. 2026 Feb 1;2(1):10-5.
- 17) Roni MS, Chowdhury S, Mamun S, Marufuzzaman M, Lein W, Johnson S. Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;78:1089-1101.
- 18) Tillman DA. Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and Bioenergy*. 2000;19(6):365-384.
- 19) Baxter L. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*. 2005;84(10):1295-1302.
- 20) Koppejan J, Baxter L. The status of large scale biomass firing: the milling and combustion of biomass materials in large pulverised coal boilers. *IEA Bioenergy Task 32*; 2016.
- 21) Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. 3rd ed. London: Academic Press; 2018.
- 22) Van Loo S, Koppejan J, editors. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. 2nd ed. London: Earthscan; 2008.
- 23) Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. 2010;89(5):913-933.
- 24) Jenkins BM, Baxter LL, Miles TR, Miles TR Jr. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. 1998;54(1-3):17-46.
- 25) Niu Y, Tan H, Hui S. Ash-related issues during biomass combustion: alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging, and ash deposition. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016;52:1-61.
- 26) Arifin Z, Hidayatno A, Susanto H. Techno-economic analysis of co-firing for pulverized coal boiler power plants in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2023;12(2):310-321.
- 27) U.S. Department of Energy. Biomass Cofiring in Coal-Fired Boilers. Washington, DC: Federal Energy Management Program; 2004.
- 28) Cengel YA, Ghajar AJ. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
- 29) El-Wakil MM. *Powerplant Technology*. New York: McGraw-Hill; 1984.
- 30) Cengel YA, Boles MA. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
- 31) McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002;83(1):37-46.

- 32) Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004;30(2):219-230.
- 33) Werther J, Saenger M, Hartge EU, Ogada T, Siagi Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000;26(1):1-27.
- 34) Pronobis M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. *Biomass and Bioenergy*. 2005;28(4):375-383.
- 35) Sami M, Annamalai K, Wooldridge M. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2001;27(2):171-214.
- 36) Vamvuka D, Kakaras E, Kastanaki E, Grammelis P. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite. *Fuel*. 2003;82(15-17):1949-1960.
- 37) Tumuluru JS, Sokhansanj S, Hess JR, Wright CT, Boardman RD. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*. 2011;7(5):384-401.
- 38) Obernberger I, Brunner T, Barnthaler G. Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(11):973-982.
- 39) Yin C. A review on biomass co-firing in pulverized coal fired power plants. *Biomass and Bioenergy*. 2013;52:39-46.
- 40) Spliethoff H. *Power Generation from Solid Fuels*. Berlin: Springer; 2010.
- 41) Saidur R, Abdelaziz EA, Demirbas A, Hossain MS, Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(5):2262-2289.
- 42) Nussbaumer T. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy and Fuels*. 2003;17(6):1510-1521.
- 43) Miles TR, Miles TR Jr, Baxter LL, Bryers RW, Jenkins BM, Oden LL. Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*. 1996;10(2-3):125-138.
- 44) Zevenhoven-Onderwater M, Blomquist JP, Skrifvars BJ, Backman R, Hupa M. The prediction of behaviour of ashes from five different solid fuels in fluidised bed combustion. *Fuel*. 2000;79(11):1353-1361.
- 45) Frandsen FJ. Utilizing biomass and waste for power production - a decade of contributing to the understanding, interpretation and analysis of deposits and corrosion products. *Fuel*. 2005;84(10):1277-1294.
- 46) Munir S, Nimmo W, Gibbs BM. The effect of air staged co-combustion of pulverised coal and biomass blends on NO_x emissions and combustion efficiency. *Fuel*. 2011;90(1):126-135.
- 47) Raveendran K, Ganesh A, Khilar KC. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. *Fuel*. 1996;75(8):987-998.[48] Putra TS, Prabowo E, Ramadani F. Pengaruh Overhaul Terhadap Kinerja High Pressure Heater Unit 3 PLTU Banten Lontar. *JTM: JURNAL TEKNIK MESIN*. 2026 Feb 1;2(1):10-5.
- 48)