Kinerja Energi Boiler Circulating Fluidized Bed Pada Co-Firing Biomassa 5% : Identifikasi Kerugian Panas Dominan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Jeranjang, Indonesia

Pangeran Apriyono Subirto[1], Zulfatman[2], Samin[3], Machmud Effendy[4]
[1,2,3,4]Program Studi Rekayasa Energi Terbarukan Program Pascasarjana,
Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia
Email_penulis[1] p_apryonwss@webmail.umm.ac.id

Article Info

Article History
Received : 02-06-2026
Accepted : 30-06-2026
Online : 02-07-2026

Kata Kunci:
biomass co-firing; Circulating Fluidized Bed; boiler efficiency; Heat Loss Method; dry flue-gas loss; jeranjang Power Plant

Keywords
Co-Firing Biomassa; Circulating Fluidized Bed; efisiensi boiler; heat Loss Method; Kerugian gas buang kering; PLTU Jeranjang;

Abstrak: *Penelitian ini mengevaluasi kinerja energi boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) yang dioperasikan dengan co-firing biomassa sebesar 5% di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Jeranjang, Lombok Barat, Indonesia. Analisis dilakukan dengan metode tidak langsung atau Heat Loss Method untuk mengkuantifikasi distribusi kerugian panas boiler dan mengidentifikasi komponen kerugian yang memiliki potensi perbaikan terbesar. Data operasi dihimpun dari Distributed Control System (DCS) pembangkit, lembar log operasi, dan catatan karakteristik bahan bakar selama Mei–Juli 2026. Bahan bakar co-firing terdiri atas 95% batubara subbituminus dan 5% biomassa berdasarkan massa; campuran biomassa terdiri atas 60% sekam padi dan 40% serbuk gergaji. Nilai kalor atas rata-rata bahan bakar campuran adalah 3.607 kal g-1, sedangkan total masukan panas sekitar 345.444 kW. Kerugian gas buang kering merupakan kerugian dominan sebesar 7,98%, diikuti oleh kerugian radiasi dan konveksi sebesar 0,85% serta kerugian karbon tak terbakar sebesar 0,783%. Total kerugian boiler mencapai 12,12%, yang setara dengan efisiensi boiler rata-rata sebesar 87,88%. Efisiensi isentropik turbin dan efisiensi generator rata-rata masing-masing sebesar 69,9% dan 97,5%, sehingga efisiensi bahan bakar-ke-listrik keseluruhan pada batas sistem yang dikaji mencapai 59,89%. Dibandingkan dengan kondisi dasar tanpa co-firing pada tesis, konfigurasi 5% berkaitan dengan peningkatan efisiensi boiler sebesar 0,88 poin persentase dan potensi penurunan emisi CO2 sebesar 5,4%. Hasil penelitian mengidentifikasi temperatur gas buang dan pengendalian udara pembakaran sebagai prioritas operasional utama. Karena beberapa parameter direkonstruksi menggunakan asumsi standar dan periode pengamatan terbatas selama tiga bulan, temuan ini perlu dipahami sebagai diagnosis operasional spesifik pembangkit, bukan sebagai jaminan kinerja yang berlaku secara umum.*

Abstract: *This study evaluates the energy performance of a Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler operated with 5% biomass co-firing at the Jeranjang Coal-Fired Power Plant in West Lombok, Indonesia. The analysis uses the indirect or Heat Loss Method to quantify the distribution of boiler heat losses and to identify the loss component with the greatest improvement potential. Operating data were compiled from the plant Distributed Control System, operating log sheets, and fuel-characteristic records for May–July 2026. The co-firing fuel consisted of 95% sub-bituminous coal and 5% biomass on a mass basis; the biomass blend*

contained 60% rice husk and 40% sawdust. The average blended-fuel higher heating value was 3,607 cal g−1, while the total heat input was approximately 345,444 kW. Dry flue-gas loss was the dominant loss at 7.98%, followed by radiation and convection loss (0.85%) and unburned-carbon loss (0.783%). Total boiler losses were 12.12%, corresponding to an average boiler efficiency of 87.88%. The average isentropic turbine efficiency and generator efficiency were 69.9% and 97.5%, respectively, giving an overall fuel-to-electricity efficiency of 59.89% for the assessed boundary. Relative to the thesis baseline without co-firing, the 5% configuration was associated with a 0.88 percentage-point increase in boiler efficiency and a potential 5.4% reduction in CO2 emissions. The results identify stack-gas temperature and combustion-air control as the first operational priorities. Because several parameters were reconstructed using standard assumptions and the observation period was limited to three months, the findings should be interpreted as a plant-specific operational diagnosis rather than a universal performance guarantee.

Support by:
Crossref

This is an open access article under the CC–BY-SA license

A. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara masih berperan penting di Indonesia karena mampu menyediakan listrik dalam skala besar secara andal dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban. Namun, penggunaan batubara secara berkelanjutan meningkatkan paparan terhadap emisi gas rumah kaca dan polutan hasil pembakaran. Oleh karena itu, co-firing biomassa dipertimbangkan sebagai opsi transisi yang dapat mengurangi porsi bahan bakar fosil dengan memanfaatkan infrastruktur boiler yang telah tersedia. Nilai praktis co-firing bergantung pada kemampuan substitusi bahan bakar tanpa menurunkan stabilitas pembakaran, efisiensi boiler, ketersediaan pembangkit, atau kinerja terkait abu secara tidak dapat diterima.

Boiler CFB sesuai untuk pengoperasian dengan bahan bakar yang beragam. Inventori padatan yang bersirkulasi, pencampuran gas–padatan yang intensif, waktu tinggal yang panjang, serta resirkulasi padatan berbasis siklon memungkinkan penggunaan bahan bakar dengan variasi kandungan zat terbang, kadar air, abu, dan distribusi ukuran partikel. Karakteristik tersebut menjadikan teknologi CFB menarik untuk pencampuran batubara dengan residu pertanian dan kayu yang tersedia secara lokal. Meskipun demikian, biomassa dapat mengubah kebutuhan udara, profil temperatur tungku, aliran gas buang, perilaku abu, dan mekanisme kerugian panas. Dengan demikian, fraksi massa yang kecil tetap dapat menimbulkan konsekuensi operasional yang terukur meskipun perubahan nilai kalor campuran relatif kecil.

PLTU Jeranjang di Lombok Barat mengoperasikan tiga unit CFB, masing-masing berkapasitas sekitar 25 MW. Pembangkit ini menerapkan program co-firing biomassa nominal sebesar 5% dengan menggunakan sekam padi dan serbuk gergaji. Tesis yang menjadi dasar artikel ini mengevaluasi pembangkit menggunakan pendekatan kinerja boiler tidak langsung berdasarkan prinsip ASME PTC 4. Alih-alih memperlakukan boiler sebagai kotak hitam, Heat Loss Method menguraikan selisih antara 100% masukan energi bahan bakar dan keluaran boiler yang berguna menjadi

beberapa komponen kerugian, meliputi gas buang kering, kadar air bahan bakar, kadar air udara pembakaran, hidrogen, karbon tak terbakar, radiasi dan konveksi, panas sensibel abu, serta kerugian tak terhitung.

Tujuan artikel ini adalah mengolah hasil tesis menjadi analisis teknis yang siap disajikan dalam forum ilmiah dengan berfokus pada satu pertanyaan praktis: mekanisme kerugian panas apa yang harus diprioritaskan untuk meningkatkan kinerja energi boiler CFB pada co-firing biomassa berpersentase rendah? Penelitian ini menyajikan karakterisasi bahan bakar pada tingkat pembangkit, inventori kerugian panas, neraca energi terpadu boiler–turbin–generator, serta rekomendasi operasional untuk konfigurasi Jeranjang.

B. METODE PELAKSANAAN

1. Pembangkit, bahan bakar, dan batas kajian

Studi kasus dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Jeranjang, Kabupaten Lombok Barat, Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Pembangkit ini terdiri atas tiga unit CFB dengan kapasitas nominal 3 × 25 MW. Batas kajian dimulai dari energi kimia yang masuk ke boiler dan mengikuti rantai konversi utama melalui produksi uap, keluaran mekanis turbin uap, dan keluaran listrik generator. Sistem bantu, penanganan batubara, penanganan abu, sistem air pendingin, pengolahan air umpan, beban bantu listrik, serta beban keseimbangan pembangkit lainnya berada di luar batas utama analisis tesis.

2. Pengumpulan dan validasi data

Periode pengamatan mencakup Mei, Juni, dan Juli 2026 pada kondisi operasi normal. Data boiler dikumpulkan dari DCS dan lembar log pembangkit, meliputi laju umpan batubara dan biomassa, temperatur tungku dan gas buang, temperatur pemanas awal udara, pembacaan oksigen, tekanan uap, temperatur uap, dan laju aliran uap. Data turbin mencakup tekanan dan temperatur masuk serta keluar dan laju aliran uap. Data generator mencakup daya turbin dan keluaran listrik. Sifat bahan bakar diperoleh dari catatan laboratorium internal untuk batubara dan informasi karakterisasi bahan bakar yang digunakan dalam tesis untuk campuran biomassa. Seluruh nilai dinormalisasi berdasarkan basis as-received.

Data disaring berdasarkan konsistensi operasi, kemudian dirata-ratakan berdasarkan unit dan bulan. Pembacaan yang hilang atau tidak lengkap tidak diperlakukan sebagai pengukuran kontinu. Apabila data komposisi atau pengukuran kerugian secara langsung tidak tersedia, perhitungan dalam tesis menggunakan rekonstruksi stoikiometri atau asumsi teknik standar. Hal-hal tersebut penting dipertimbangkan ketika menafsirkan tingkat ketelitian numerik hasil penelitian.

3. Karakterisasi bahan bakar

Tabel 1. Sifat rata-rata bahan bakar yang digunakan dalam perhitungan Heat Loss Method.

Sifat	Batubara	Campuran biomassa	95% batubara + 5% biomassa	Satuan
Nilai kalor atas (as received)	3,612	3,510	3,607	cal g−1
Kadar air total	38.5	15.2	37.4	% massa
Abu	6.8	10.4	7.0	% massa
Zat terbang	30.2	69.6	32.2	% massa
Karbon tetap	24.5	12.0	23.9	% massa
Karbon	38.6	43.0	38.8	% massa
Hidrogen	2.72	5.20	2.84	% massa
Nitrogen	0.48	0.50	0.48	% massa
Sulfur	0.38	0.08	0.37	% massa
Oksigen	13.2	36.4	14.4	% massa

Nilai kalor campuran hanya menurun 0,14% dibandingkan dengan batubara, sedangkan kandungan zat terbang meningkat dari 30,2% menjadi 32,2%. Kadar air total menurun dari 38,5% menjadi 37,4%. Perubahan ini menunjukkan adanya penalti kecil pada masukan panas, tetapi berpotensi mempermudah penyalaan dan meningkatkan stabilitas pembakaran. Peningkatan kadar abu dari 6,8% menjadi 7,0%, disertai kandungan silika yang tinggi pada sekam padi, tetap perlu diperhatikan dalam program pengendalian deposit dan pengelolaan abu.

4. Perhitungan kinerja

Masukan panas bahan bakar dihitung berdasarkan laju aliran massa hasil pengukuran atau pencatatan dan nilai kalor atas yang sesuai. Efisiensi boiler diperoleh dari komplemen total persentase kerugian panas. Kinerja turbin direpresentasikan oleh efisiensi isentropik,

$$\eta_t = (h_{in} - h_{out}) / (h_{in} - h_{out,s}) \times 100$$

sedangkan efisiensi generator dihitung sebagai perbandingan antara keluaran listrik dan keluaran mekanis turbin. Efisiensi keseluruhan dalam batas kajian dihitung dari

perkalian efisiensi boiler, turbin, dan generator. Selanjutnya, neraca energi bergaya Sankey disusun menggunakan nilai rata-rata yang dilaporkan dalam tesis.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Masukan bahan bakar dan kontribusi masukan panas

Laju umpan batubara rata-rata masing-masing unit adalah 7,23, 6,88, dan 7,68 kg s−1 untuk Unit 1, 2, dan 3. Laju umpan biomassa yang bersesuaian masing-masing sekitar 0,36, 0,34, dan 0,38 kg s−1. Dengan menggunakan nilai kalor atas sebesar 15.123 kJ kg−1 untuk batubara dan sekitar 14.695 kJ kg−1 untuk campuran biomassa, total masukan panas terhitung sekitar 345.444 kW untuk ketiga unit pembangkit. Neraca Sankey dalam tesis menggunakan nilai rata-rata yang berdekatan, yaitu 344.778 kW; perbedaan kecil tersebut disebabkan oleh pembulatan nilai bulanan dan per unit secara terpisah. Pada kedua representasi tersebut, batubara mendominasi masukan energi dan biomassa menyumbang sekitar 4,64–4,65% masukan panas.

Tabel 2. Indikator masukan panas pada konfigurasi co-firing 5%.

Bulan	Total masukan panas (kW)	Porsi batubara	Porsi biomassa
May	343,321	95.36%	4.64%
June	—	—	—
July	350,420	95.36%	4.64%
Rata-rata basis tesis	345,444	95.36%	4.64%

Tesis melaporkan peningkatan masukan panas sebesar 2,07% dari Mei ke Juli. Hal ini konsisten dengan perubahan pembebanan unit, bukan perubahan rasio co-firing nominal. Karena nilai kalor atas biomassa lebih rendah daripada batubara, substitusi massa sebesar 5% menghasilkan kontribusi panas yang sedikit lebih kecil. Pembedaan ini penting: persentase co-firing berbasis massa tidak dapat ditafsirkan sebagai persentase masukan panas boiler yang identik.

2. Distribusi kerugian panas dan identifikasi kerugian dominan

Tabel 3 merangkum inventori kerugian panas rata-rata. Total kerugian sebesar 12,12% menghasilkan efisiensi boiler rata-rata sebesar 87,88%. Komponen dominan adalah kerugian gas buang kering sebesar 7,98%, yaitu sekitar 6,4 kali kerugian karbon tak terbakar dan 9,4 kali kerugian radiasi/konveksi. Hasil ini menegaskan temuan utama penelitian: pada kondisi operasi yang dikaji, peluang peningkatan efisiensi yang pertama bukan terletak pada fraksi biomassa yang kecil, melainkan pada panas sensibel yang terbawa keluar bersama gas buang kering.

Tabel 3. Inventori kerugian panas boiler rata-rata pada co-firing biomassa 5%.

Komponen kerugian	Simbol	**Kerugian rata-rata (%)**	**Energi (kW)**	**Prioritas relatif**
Gas buang kering	L2	7.980	9,185	1 — dominan
Radiasi dan konveksi	L6	0.850	979	2
Karbon tak terbakar	L1	0.783	901	3
Kadar air bahan bakar	L3	0.601	693	4
Kerugian tak terhitung	L8	0.700	805	5
Panas sensibel abu	L7	0.500	575	6
Hidrogen	L4	0.410	472	7
Kadar air udara	L5	0.290	334	8
Total	—	12.120	13,944	—

Kerugian gas buang kering meningkat dari 7,86% pada Mei menjadi 8,09% pada Juli, seiring dengan kenaikan temperatur gas buang yang dilaporkan dari sekitar 145°C menjadi 147°C. Temperatur gas buang rata-rata sekitar 146°C. Tesis juga melaporkan indikator udara berlebih sekitar 121%. Meskipun konversi oksigen ke udara yang tepat dan ketersediaan pengukuran komposisi gas masih memerlukan peninjauan instrumentasi lebih lanjut, implikasi operasionalnya jelas: temperatur cerobong dan laju aliran gas yang tinggi sama-sama meningkatkan pelepasan energi sensibel. Oleh karena itu, Air Preheater dan pengendalian udara pembakaran perlu dikaji secara bersamaan, bukan dioptimalkan secara terpisah.

Kerugian akibat kadar air bahan bakar rata-rata sebesar 0,601%. Meskipun kadar air batubara tinggi, campuran biomassa memiliki kadar air yang jauh lebih rendah sehingga penambahan 5% tidak menimbulkan penalti kadar air yang besar. Kerugian hidrogen rata-rata sebesar 0,410%; campuran biomassa memiliki kandungan hidrogen lebih tinggi daripada batubara, tetapi pangsa massanya yang kecil membatasi pengaruhnya. Kadar air udara merupakan komponen terhitung terkecil, yaitu 0,290%, yang mencerminkan kontribusi entalpi kelembapan udara ambien yang relatif kecil dibandingkan panas sensibel gas buang.

Kerugian karbon tak terbakar rata-rata sebesar 0,783%, lebih tinggi daripada target operasional 0,5% yang disebutkan dalam tesis. Kandungan zat terbang yang tinggi pada biomassa dapat mendukung penyalaan, tetapi inventori abu campuran dan karakteristik batubara berperingkat rendah tetap dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna. Oleh karena itu, distribusi ukuran partikel, pembagian udara primer/sekunder, temperatur tungku, dan sirkulasi padatan perlu dikaji sebelum rasio co-firing ditingkatkan. Kerugian radiasi dan konveksi ditetapkan sebesar 0,85%, sedangkan panas sensibel abu dan kerugian tak terhitung masing-masing direpresentasikan sebesar 0,50% dan 0,70%. Komponen yang diasumsikan ini perlu digantikan dengan nilai hasil pengukuran atau nilai spesifik pembangkit pada kampanye pengujian mendatang.

3. Kinerja boiler, turbin, dan generator

Tabel 4. Indikator kinerja turbin dan generator.

Komponen	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Rata-rata
Efisiensi isentropik turbin (%)	70.0	68.5	71.2	69.9
Keluaran turbin (MW)	22.5	17.5	23.5	21.2
Laju panas (kJ kWh−1)	12,800	13,200	12,500	12,833
Efisiensi generator (%)	97.5	97.2	97.8	97.5
Keluaran listrik (MW)	21.94	17.01	22.98	20.64

Efisiensi boiler rata-rata sebesar 87,88% berada dalam kisaran kinerja desain 85–90% yang disebutkan dalam tesis. Efisiensi bulanan menurun dari 88,02% pada Mei menjadi 87,76% pada Juli, seiring dengan peningkatan total kerugian dari 11,98% menjadi 12,24%. Perubahan ini relatif kecil, tetapi arahnya konsisten dengan peningkatan temperatur cerobong dan kerugian gas buang kering. Hasil tersebut menunjukkan bahwa co-firing berpersentase rendah kompatibel secara teknis dengan boiler CFB selama periode pengamatan, tetapi tidak menghilangkan kebutuhan untuk melakukan penyetelan pembakaran.

Efisiensi isentropik turbin rata-rata sebesar 69,9%. Unit 3 menunjukkan kinerja terbaik sebesar 71,2%, konsisten dengan tekanan dan temperatur masuk yang dilaporkan lebih tinggi, sedangkan Unit 2 menunjukkan kinerja terendah sebesar 68,5% pada beban yang lebih rendah. Efisiensi generator tinggi dan relatif seragam, dengan rata-rata 97,5%. Hal ini menegaskan bahwa peluang dominan yang diidentifikasi melalui Heat Loss Method berada di sisi hulu generator: perbaikan kerugian generator saja akan memberikan pengaruh yang jauh lebih kecil terhadap kinerja keseluruhan dibandingkan pengurangan kerugian gas buang boiler atau peningkatan pemanfaatan panas turbin.

4. Neraca energi terpadu

Neraca Sankey dalam tesis mengalokasikan 328.767 kW untuk batubara dan 16.011 kW untuk biomassa, sehingga total masukan mencapai 344.778 kW. Energi uap boiler yang berguna sebesar 303.108 kW. Kerugian boiler utama meliputi 27.555 kW melalui gas buang kering, 2.937 kW melalui radiasi, 2.703 kW melalui karbon tak terbakar, 2.415 kW berupa kerugian tak terhitung, serta komponen kadar air dan abu lainnya. Energi uap dikonversi menjadi energi mekanis turbin sebesar 211.976 kW, dengan 91.132 kW terbuang pada batas turbin. Keluaran generator sebesar 206.677 kW setelah dikurangi kerugian generator sebesar 5.299 kW.

Tabel 5. Efisiensi kumulatif pada rantai konversi utama

Tahap	Efisiensi (%)	Efisiensi kumulatif (%)
Boiler	87.88	87.88
Turbin uap	69.9	61.43
Generator	97.5	59.89

Efisiensi keseluruhan sebesar 59,89% diperoleh dari perkalian efisiensi tiga tahap. Efisiensi generator yang relatif tinggi menunjukkan bahwa perbaikan pada generator bukan merupakan jalur dominan untuk meningkatkan kinerja bahan bakar-ke-listrik. Batas turbin mencakup komponen pelepasan panas yang besar, sedangkan batas boiler mengandung satu-satunya kerugian teridentifikasi terbesar yang dapat dikurangi. Oleh karena itu, urutan rekomendasi adalah: (1) memverifikasi dan mengurangi kerugian gas buang kering; (2) mengurangi kerugian karbon tak terbakar melalui pengendalian pembakaran dan sirkulasi padatan; serta (3) mengkaji peluang pemulihan atau pengurangan pelepasan panas turbin.

5. Perbandingan dengan kondisi dasar tanpa co-firing

Tabel 6. Perbandingan kasus dasar dan co-firing 5% yang dilaporkan dalam tesis

Parameter	Kondisi dasar tanpa co-firing	Co-firing 5%	Perbedaan
Masukan panas (kW)	328,767	344,778	+16,011
Energi uap (kW)	286,027	303,108	+17,081
Efisiensi boiler (%)	87.0	87.88	+0.88 percentage point
Efisiensi keseluruhan (%)	59.2	59.89	+0.69 percentage point
Emisi CO2 (t h−1)	42.5	40.2	−2.3 (−5.4%)
Emisi SO2 (kg h−1)	18.5	17.2	−1.3 (−7.0%)

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi co-firing 5% tidak menimbulkan penalti efisiensi yang berarti pada kumpulan data yang dilaporkan; sebaliknya, perbandingan dengan kondisi dasar tesis menunjukkan perbaikan yang moderat. Namun, perbandingan ini perlu ditafsirkan secara hati-hati karena kedua kasus tidak disajikan sebagai eksperimen berpasangan yang terkontrol dengan beban, kondisi ambien, kualitas batubara, dan analisis gas kontinu yang identik. Perubahan emisi merupakan estimasi potensial yang diturunkan dari asumsi energi dan substitusi bahan bakar dalam tesis, bukan pengganti pengukuran cerobong atau penilaian daur hidup.

6. Implikasi operasional dan tindakan yang direkomendasikan

Diagnosis kerugian dominan menghasilkan tindakan prioritas berikut:

1. Ukur dan pantau secara kontinu temperatur cerobong, oksigen, karbon monoksida, dan laju aliran gas buang pada beban operasi yang sama. Langkah ini akan membedakan komponen temperatur L2 dari komponen udara berlebih.
2. Periksa dan bersihkan Air Preheater serta verifikasi kebocorannya. Tesis merekomendasikan penurunan temperatur cerobong dari sekitar 146°C menuju 130°C, dengan tetap mempertimbangkan titik embun asam, korosi, dan batasan peralatan.
3. Setel ulang distribusi udara primer dan sekunder menggunakan pengukuran oksigen in-situ yang tervalidasi. Tesis mengidentifikasi indikator udara berlebih sekitar 121%; target harus ditetapkan berdasarkan batas keselamatan pembakaran dan emisi, bukan dengan menerapkan nilai umum 20–30%.
4. Kurangi kerugian karbon tak terbakar dengan mengendalikan ukuran partikel bahan bakar, temperatur tungku, sirkulasi padatan, dan pengaturan tahapan udara. Target jangka pendek yang diusulkan dalam tesis adalah menurunkan L1 dari 0,783% menuju 0,5%.
5. Sebelum meningkatkan biomassa di atas 5%, lakukan pengujian fusi abu, slagging/fouling, pengumpanan, dan stabilitas jangka panjang. Silika sekam padi dan kandungan abu campuran perlu mendapat perhatian khusus.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Penilaian Heat Loss Method pada tingkat pembangkit telah dilakukan untuk pembangkit CFB berkapasitas 3 × 25 MW yang beroperasi dengan co-firing biomassa 5%. Biomassa terdiri atas 60% sekam padi dan 40% serbuk gergaji, yang dicampurkan dengan 95% batubara subbituminus berdasarkan massa. Nilai kalor atas campuran sebesar 3.607 kal g−1, hanya 0,14% lebih rendah daripada nilai kalor atas batubara, dan biomassa menyumbang sekitar 4,64–4,65% dari total masukan panas. Total masukan panas rata-rata sekitar 345.444 kW, sedangkan neraca Sankey tesis menggunakan 344.778 kW karena nilai-nilai tersebut dibulatkan secara terpisah. Kerugian gas buang kering merupakan komponen kerugian panas dominan sebesar 7,98%, setara dengan sekitar 9.185 kW berdasarkan basis unit dalam tesis. Kerugian ini berkaitan dengan temperatur gas buang rata-rata yang dilaporkan sekitar 146°C dan kondisi udara berlebih yang tinggi. Total kerugian boiler sebesar 12,12% menghasilkan efisiensi boiler rata-rata 87,88%, yang berada dalam kisaran desain konfigurasi CFB. Efisiensi isentropik turbin rata-rata sebesar 69,9%, efisiensi generator sebesar 97,5%, dan efisiensi keseluruhan pada rantai konversi yang dikaji sebesar 59,89%. Perbandingan dengan kondisi dasar tesis mengaitkan co-firing 5% dengan peningkatan efisiensi boiler sebesar 0,88 poin persentase dan potensi penurunan emisi CO2 sebesar 5,4%, tetapi perbandingan tersebut bukan eksperimen terkontrol. Prioritas perbaikan pertama adalah mengurangi kerugian gas buang kering melalui verifikasi kinerja Air Preheater, pengendalian temperatur cerobong, dan optimasi udara pembakaran. Pengendalian

karbon tak terbakar dan pengujian pengelolaan abu perlu dilakukan bersamaan dengan setiap peningkatan rasio biomassa. Studi ini menunjukkan bahwa co-firing berpersentase rendah dapat diterapkan pada konfigurasi CFB Jeranjang tanpa penalti efisiensi yang signifikan berdasarkan data yang dilaporkan. Nilai rekayasa utama penelitian ini adalah penetapan panas sensibel gas buang sebagai kerugian dominan, sehingga perbaikan operasional dapat difokuskan pada variabel yang terukur, bukan semata-mata pada substitusi biomassa.

DAFTAR RUJUKAN

American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2023). ASME PTC 4-2013 (R2023): Fired Steam Generators. New York, NY: ASME.

American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2015, R2025). ASME PTC 46: Overall Plant Performance Test Code. New York, NY: ASME.

Basu, P. (2015). Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance. Cham: Springer.

Basu, P. (1999). Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: A review. Chemical Engineering Science, 54(22), 5547–5557. https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00285-7

Baxter, L. (2005). Biomass-coal co-combustion: Opportunity for affordable renewable energy. Fuel, 84(10), 1295–1302.

Cahyo, N., Sulistyowati, D., Rahmanta, M. A., Felani, M. I., Soleh, M., Paryanto, P., Prismantoko, A., & Hariana, H. (2024). A techno-economic and environmental analysis of co-firing implementation using coal and wood bark blend at circulating fluidized bed boiler. International Journal of Renewable Energy Development, 13(4), 726–735.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). Thermodynamics: An Engineering Approach (9th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

International Energy Agency (IEA). (2024). Coal 2024: Analysis and Forecast to 2027. Paris: IEA.

Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R., & Miles, T. R. Jr. (1998). Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology, 54(1–3), 17–46.

Niu, Y., Tan, H., & Hui, S. (2016). Ash-related issues during biomass combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 52, 1–61.

Saidur, R., Ahamed, J. U., Masjuki, H. H., & Ahmed, S. (2010). Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. Energy Policy, 38(5), 2188–2197.

Tillman, D. A. (2000). Biomass cofiring: The technology, the experience, the combustion consequences. Biomass and Bioenergy, 19(6), 365–384.

Van Loo, S., & Koppejan, J. (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. London: Earthscan.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89(5), 913–933.

World Bank. (2020). Energy Efficiency in Thermal Power Plants: Best Practices and Operational Guidelines. Washington, DC: World Bank.