SINERGI *Vol. 24, No.2, pp.232-241, Oktober 2026*
DOI : http://dx.doi.org/10.31963/sinergi.v24i2.5970

Karakterisasi dan Diversifikasi Biomassa Sebagai Co-Firing pada PLTU Circulating Fluidized Bed Boiler

Muh. Fajrulmubarak Anshar[1)], Nur Hamzah[2)] dan Sri Swasti[3)]

[1,2,3,4] Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia
[*]E-mail korespondensi: fajrulanshar17@gmail.com

Abstact:*This study aims to characterize biomass materials—rice husk (RH), sawdust (SD), and empty fruit bunches (EFB)—and to analyze the effects of their diversification as co-firing fuels in the Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler of Barru Coal-Fired Power Plant. The research includes proximate, ultimate, and calorific value analyses of the biomass samples and their blends with coal, combined with an evaluation of boiler performance before and after co-firing. Results show that biomass generally has lower calorific value than coal but contains significantly lower ash, sulfur, and nitrogen, making it more environmentally friendly. Diversified mixtures such as SD:EFB:Coal (5:10:85) and SD:EFB:RH:Coal (5:7:5:75) produced calorific values between 4,108 and 4,114 kcal/kg, closely matching actual operating conditions without reducing boiler performance. Co-firing up to 15% biomass remained safe and did not affect steam temperature or pressure stability. Although overall boiler efficiency decreased slightly (±1–2%), significant benefits were observed, including a reduction in coal consumption by approximately 3 tons/hour, a decrease in SO_2/NO_x emissions by 10–30%, and lower ash production. These findings indicate that biomass co-firing is technically feasible, environmentally beneficial, and supports Indonesia's clean energy transition toward achieving the 23% renewable energy target by 2025.*

Keyword: *Characterization, diversification, Co-firing, CFB boiler.*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi biomassa berupa sekam padi (SP), serbuk gergaji (SD), dan tandan kosong sawit (TKS), serta menganalisis pengaruh diversifikasinya sebagai bahan bakar co-firing pada boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) PLTU Barru. Metode penelitian meliputi analisis proximate, ultimate, dan nilai kalor biomassa serta campurannya dengan batubara, disertai evaluasi performa boiler sebelum dan sesudah co-firing. Hasil menunjukkan bahwa biomassa memiliki nilai kalor lebih rendah dibanding batubara, namun kandungan abu, sulfur, dan nitrogen jauh lebih rendah sehingga lebih ramah lingkungan. Diversifikasi campuran SD:TKS:B2 (5:10:85) dan SD:TKS:SP:B2 (5:7:5:75) memberikan nilai kalor 4.108–4.114 kkal/kg, mendekati kondisi operasi aktual dan tidak menurunkan kinerja boiler. Co-firing hingga 15% biomassa terbukti aman dan tidak mempengaruhi kestabilan tekanan serta temperatur uap utama. Walaupun efisiensi boiler menurun sedikit (±1–2%), manfaat signifikan diperoleh berupa penurunan konsumsi batubara sekitar 3 ton/jam, pengurangan emisi SO_2/NO_x hingga 10–30%, dan penurunan abu hasil pembakaran. Temuan ini menunjukkan bahwa co-firing biomassa layak diterapkan sebagai strategi transisi energi bersih di PLTU, serta dapat mendukung pencapaian target bauran energi nasional 23% pada tahun 2025.

Kata kunci: Karakterisasi, Diversifikasi, Co-firing, Boiler CFB

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan sektor industri, dan peningkatan aktivitas ekonomi. Di Indonesia, pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara masih memiliki peranan penting dalam penyediaan energi listrik karena mampu menghasilkan daya dalam jumlah besar secara kontinu. Dominasi batubara juga tercermin dalam bauran energi nasional, sehingga pengurangan ketergantungan terhadap batubara menjadi salah satu tantangan dalam proses transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. [1], [2]

Penggunaan batubara sebagai bahan bakar utama PLTU memiliki konsekuensi terhadap lingkungan karena proses pembakarannya menghasilkan emisi gas seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x), serta menghasilkan abu sebagai residu pembakaran. Kondisi tersebut mendorong perlunya strategi untuk mengurangi penggunaan batubara dan emisi pembangkit tanpa mengabaikan kebutuhan terhadap keandalan pasokan listrik. Dalam konteks tersebut, pemerintah Indonesia telah menetapkan arah transisi energi melalui Kebijakan Energi Nasional dan peta jalan menuju Net Zero Emission (NZE) 2060. Salah satu strategi yang dapat diterapkan pada pembangkit eksisting adalah

peningkatan pemanfaatan energi terbarukan, termasuk biomassa sebagai bahan bakar substitusi batubara. [3], [4]

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk mengurangi konsumsi batubara pada PLTU adalah co-firing, yaitu penggunaan biomassa bersama batubara dalam proses pembakaran boiler. Penerapan co-firing memiliki keunggulan karena dapat memanfaatkan infrastruktur pembangkit yang telah tersedia sehingga kebutuhan investasi relatif lebih rendah dibandingkan pembangunan pembangkit biomassa baru. Selain itu, pemanfaatan biomassa dapat meningkatkan penggunaan sumber energi terbarukan sekaligus memberikan peluang pemanfaatan limbah pertanian dan kehutanan sebagai sumber energi. [5], [6] Beberapa konfigurasi co-firing yang telah diterapkan meliputi direct co-firing, indirect co-firing, dan parallel co-firing. Pada sistem direct co-firing, biomassa dicampurkan dengan batubara dan digunakan pada boiler yang sama, sehingga metode ini relatif sederhana untuk diterapkan pada pembangkit yang telah beroperasi. [7]

Keberhasilan penerapan co-firing sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar yang digunakan. Parameter seperti nilai kalor, kadar air, kadar abu, kandungan karbon, hidrogen, sulfur, dan nitrogen berpengaruh terhadap proses pembakaran serta kinerja boiler. Biomassa pada umumnya memiliki nilai kalor lebih rendah dan kadar air yang lebih tinggi dibandingkan batubara, tetapi memiliki kandungan abu dan unsur sulfur yang relatif lebih rendah. Oleh karena itu, pemilihan dan pencampuran jenis biomassa perlu dilakukan berdasarkan karakteristik bahan bakarnya agar proses pembakaran tetap stabil dan tidak menurunkan kinerja boiler secara signifikan. [6], [8]

Indonesia memiliki berbagai jenis biomassa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar, termasuk limbah pertanian, perkebunan, dan industri pengolahan kayu. Sekam padi (SP), serbuk gergaji (sawdust, SD), dan tandan kosong kelapa sawit (TKS) merupakan beberapa sumber biomassa yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Penelitian mengenai sekam padi menunjukkan bahwa material tersebut memiliki karakteristik unsur dan termal yang dapat dipertimbangkan untuk pemanfaatan energi [9]. Sementara itu, limbah padat industri kelapa sawit juga memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan karena jumlahnya relatif besar dan mengandung material organik yang dapat dikonversi menjadi energi [10], [11]. Potensi tersebut menjadikan diversifikasi biomassa sebagai salah satu alternatif untuk meningkatkan kontinuitas pasokan bahan bakar co-firing.

Implementasi co-firing pada PLTU Barru menjadi salah satu konteks yang penting untuk dikaji. Berdasarkan kondisi yang dibahas dalam penelitian sebelumnya, PLTU Barru telah memanfaatkan sawdust sebagai bahan bakar co-firing. Namun, keterbatasan pasokan sawdust menjadi kendala dalam meningkatkan pemanfaatan biomassa dan mencapai target co-firing yang lebih tinggi. Kajian mengenai pemanfaatan sekam padi sebagai bahan bakar alternatif di PLTU Barru juga menunjukkan adanya peluang pemanfaatan sumber biomassa lokal tersebut [12]. Dengan demikian, diperlukan diversifikasi sumber biomassa melalui pemanfaatan SP dan TKS sebagai bahan bakar tambahan untuk mengurangi ketergantungan terhadap sawdust.

Permasalahan tersebut tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan biomassa, tetapi juga dengan perbedaan karakteristik masing-masing jenis bahan bakar. Perbedaan nilai kalor, kadar air, kadar abu, serta komposisi unsur dapat memengaruhi karakteristik pembakaran, kebutuhan bahan bakar, pembentukan abu, dan kinerja boiler. Pada boiler Circulating Fluidized Bed (CFB), karakteristik bahan bakar menjadi semakin penting karena proses pembakaran berlangsung melalui interaksi antara bahan bakar, udara, dan material unggun yang bersirkulasi. Oleh karena itu, penggunaan campuran beberapa jenis biomassa perlu dikaji secara eksperimental untuk menentukan komposisi yang sesuai dengan kondisi operasi boiler. [7], [13]

Beberapa penelitian telah membahas karakteristik biomassa dan penerapan co-firing pada pembangkit berbahan bakar batubara. Maskur dan Nugroho [6] mengkaji karakteristik biomassa untuk penerapan co-firing pada pembangkit batubara di Indonesia, sedangkan Nyoman et al. [7] membahas penerapan co-firing pada sistem fluidized bed. Penelitian Anshar et al. [1] juga menunjukkan potensi pemanfaatan biomassa pada PLTU Barru dan industri semen. Namun, masih diperlukan kajian yang secara khusus mengintegrasikan karakterisasi beberapa jenis biomassa, diversifikasi komposisi bahan bakar, serta evaluasi pengaruh campuran tersebut terhadap kinerja boiler CFB PLTU Barru. Kajian

terpadu tersebut penting untuk memastikan bahwa diversifikasi biomassa tidak hanya mampu mengatasi keterbatasan pasokan bahan bakar, tetapi juga tetap mempertahankan kestabilan operasi boiler.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi sekam padi, sawdust, dan tandan kosong kelapa sawit berdasarkan parameter proximate analysis, ultimate analysis, dan nilai kalor, serta menganalisis pengaruh diversifikasi ketiga jenis biomassa tersebut sebagai bahan bakar co-firing dengan batubara. Selanjutnya, penelitian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penerapan co-firing terhadap kinerja boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) PLTU Barru. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar teknis dalam menentukan kombinasi biomassa yang sesuai untuk meningkatkan pemanfaatan bahan bakar terbarukan, mengurangi konsumsi batubara, dan mendukung implementasi co-firing yang berkelanjutan pada PLTU.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini ilakukan di Laboratorium Teknik Konversi Energi dan di PLN Indonesia Power UBP Barru selama bulan Mei s.d Agustus 2025. Alat yang dugunakan yaitu neraca analitik, timbangan kasar, ayakan, sendok, blender, bom kalorimeter, moisture analyzer, dan furnace. Sedangkan bahan yang digunakan yaitu batubara lignit atau sub bituminous (law grade), SD, SP, dan TKS. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan studi literatur dengan mengumpulkan informasi dari berbagai sumber, dokumen resmi dari Kementerian ESDM tentang bauran energi dan kebijakan pemanfaatan biomassa, serta penelitian terdahulu terkait karakteristik biomassa dan batu bara, dengan urutan proses sebagai berikut:

a) Pengambilan dan persiapan sampel biomassa

Proses pengambilan sampel dilakukan untuk memperoleh biomassa yang akan diuji dalam penelitian ini.

b) Serbuk gergaji diperoleh dari industri pengolahan kayu, kemudian dikeringkan dan dihaluskan serta diayak untuk memastikan ukuran partikel yang seragam yang diperlukan untuk pengujian karakteristik.
c) Sekam padi dikumpulkan dari penggilingan padi, dikeringkan, dan dihalusskan serta diayak untuk memastikan ukuran partikel yang seragam yang diperlukan untuk pengujian karakteristik.
d) Tandan kosong sawit (TKS) diperoleh dari industri kelapa sawit, kemudian dicacah, dikeringkan dan dihaluskan, serta diayak untuk memastikan ukuran partikel yang seragam yang diperlukan untuk pengujian karakteristik.
e) Batubara diperoleh dari industri PLTU Barru, dikeringkan dan dihaluskan, serta diayak untuk memastikan ukuran partikel yang seragam yang diperlukan untuk pengujian karakteristik.
f) Pembuatan sampel uji co-firing *sawdust* dan batu bara dengan perbandingan (5% :95%), (10% : 90%), dan (15% : 85%).
g) Pengambilan data di lokasi PLTU Barru berupadata operasi PLTU Barru (tekanan dan temperature uap masuk dan keluar boiler, massaa aliran uap.

Pengujian karakteriktik dilakukan dengan uji Proximate dan Ultimate untuk mengetahui nilai kalor, kandungan air, dan unsur kimia yang terkandung dalam bahan bakar. Pengujian karakterstik dilakukan dengan mengucu pada hasil penelitian sebelumnya [1] dengan langkah-langkah sebagai berikut:

a) Penyediaan sampel dilakukan UP dengan menghaluskan sampai mencapai ukuran partikel sekitar 0.125 - 0. 3 mm. Sampel dikeringkan dalam oven pada temperature sekitar 105ºC selama 7 jam untuk menghilangkan kandungan air [2]. Sampel dicampur sesuai komposisi yang telah ditetapkan dan diaduk sampai homogen.
b) Pengujian proximate akan dilakukan untuk menentukan *moisture content* (MC), *volatile matter* (VM), *fixed carbon* (FC), dan *ash content*. Penentuan *moisture content* dilakukan dengan oven pengering berdasarkan standard methods ASTM D. 3173, penentuan *volatile matter* dilakukan dengan furnace berdasarkan standard methods ISO 565 atau ASTM D3175. dan penentuan *ash content* dilakukan dengan furnace berdasarkan standard methods ASTM D. 3174.
c) Pengujian ultimate untuk menentukan komposisi kimia sampel. Penentuan kandungan karbon, hydrogen, nitrogen dilakukan dengan Leco CHN-2000 berdasarkan standard methods ASTM D.

5373, penentuan kandungan oxigen dilakukan berdasarkan standard methods ASTM D. 3176, penentuan kandungan sulphur dilakukan dengan *Sulfur Determinator* berdasarkan standard methods ASTM D. 4239, dan penentuan kandungan abu dilakukan berdasarkan standard methods ASTM D. 3173.

d). Pengujian nilai kalor sampel akan dilakukan di Lab. Teknik Kimia dengan menggunakan Bomb calorimeter berdasarkan standard methods ASTM D.5865.

e). Pengujian kandungan air untuk menentukan kadar air dalam biomassa dilakukan dengan menggunakan Moisture Analyzer.

Penentuan pengaruh diversifikasi biomassa sebagai bahan bakar cofiring pada PLTU Barru dilakukan dengan langkah-langkah sebagi berikut:

a) Melakukan pencapuran SP dan TK dalam campuran SD dan BB sebagai kondisi actual dengan perbadingan SD:TKS:B2 (5:10:85) dan (SD:TKS:SP:B2 (5:7:5:75).
b) Melakukan analisis proximate dan ultimate campuran hasildiversifikasi kemudian dibandingkan dengan kondisi actual saat ini di PLTU Barru yang menggunakan co-firing SD dan BB, terutama kandungan sulfur dan nilai kalor yang merupakan energi input boiler.
c) Menganalisis kinerja boiler dengan menggunakan nilai kalor tersebut, kemudian dibandingkan karakteristik penggunaan co-firing saat ini.
d) Membandikan hasil analisi data dan kinerja boiler yang diperoleh sebelum co-firing dan setelah co-firing.

Data hasil pengujian karakteristik bahan bakar dinalaisis dengan prosedur sebagai berikut:

1. Menentukan karakteristik sawdust, sekam padi, dan tandan kosong sawit yang diperoleh dari hasil pengujian. Selanjutnya karakteristik sekam padi dan tandan kosong sawit dilakukan komparasi dengan karanteristik sawdust untuk menetukan nilai kalor, kandungan air, abu yang dihasilkan, serta potensi dampak polusi yang dihasilkan.
2. Melakukan analisis kelayakan diversivikasi bahan bakar SP dan TKS sebagai bahan bakar alternatif pendamping untuk melengkapi kekurangan pasokan sawdust yang diperlukan meningkatkantarget cofiring di PLTU Barru.
3. Melakukan Analisis Proximate (Proximate Analysis) dengan beracuan pada hasil penelitian sebelumnya (Kementerian ESDM RI, 2021) dengan beracuan pada: interpretasi analisis:
   a) Moisture dan ash cukup rendah berarti kualitas bahan bakar cukup baik.
   b) VM tinggi berarti batubara dan atau biomassa, mudah terbakar.
   c) FC sedang berarti panas stabil.
   d) C dan H cukup tinggi berarti nilai kalor tinggi, efisien.
   e) S rendah (< 1%) berarti masih sesuai batas aman untuk lingkungan.

4. Menentukan efisiensi pembakaran boiler CFB

$$\text{Efisiensi Pembakaran (\%)} = (\text{Energi Output}) / \text{total Energi Input Bahan Bakar} \times 100\% \quad (4)$$

Energi Output = Energi panas yang digunakan untuk menghasilkan uap (steam) atau energi listrik (MJ atau kJ).
Energi Input = Jumlah energi dari seluruh bahan bakar yang dibakar, dihitung Berdasarkan nilai kalor masing-masing bahan bakar (MJ atau kJ).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Karakteristik biomassa (RH, SD, TKS) sebagai bahan bakar co-firing pada PLTU Barru

Untuk memperoleh karakterristik biomassa (RH, SD, TKS) sebagai bahan bakar co-firing pada PLTU Barru dilakukan pengujian atau analisis proximate dan ultimate (proximate and ultimate analysis) biomassa SP, SD, TKS, dan BB. Hasil analisis proximate, ultimate, dan gross calorific value (GCV) yang digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis pengaruh karakteristik biomassa (RH, SD,

TKS) sebagai bahan bakar co-firing pada PLTU Barru adalah data sekunder yang mengacu pada hasil penelitian sebelumnya [1] sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji Proximate dan Ultimate Bahan bakar Batu bara, Biomassa, dan Campuran [1]

No	Kode Sampel	MC (%)	Ash (%)	VM (%)	FC (%)	GCV (kcal/ kg)	S (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
1	Batu bara (B2) PLTU Barru	30,18	4,46	34,72	30,64	4.164	0,12	45,30	6,50	0,67	42,59
2	Sekam Padi (SP)	8,98	15,10	61,46	14,46	3.398	0,05	37,39	5,69	0,42	41,35
3	Sawdust (SD)	10,82	1,04	72,57	15,57	4.066	0,03	46,17	6,59	0,23	45,94
4	TKS (Tandan kosong sawit)	10,16	7,76	64,31	17,77	3,860	0,10	41,88	6,24	0,95	43,07
5	SD:B2 (5:95)	30,18	4,94	34,68	30,20	4.122	0,11	44,96	6,54	0,66	42,78
6	SD:B2 (10:90)	29,91	4,62	36,88	28,59	4.124	0,10	44,54	6,56	0,56	43,62
7	SD:B2 (15:85)	26,80	4,75	40,58	27,87	4.136	0,07	44,88	6,17	0.60	43,53
8	SD:TKS:B2 (5:10:85)	29,88	4,42	35,02	30,68	4.114	0,10	45,16	6,50	0,67	43,14
9	SD:TKS:SP:B2 (5:7:5:75)	29,80	5,66	42,32	27,22	4.108	0,09	45,16	6,17	0,70	42,22
	Standard Methode	ASTM D3173-D3173M-17A	ASTM D 3174-12 (2018)	ASTM D3175-20	ASTM D3172-2021	ASTM D 586-5865M-19	ASTM D 4392-18	ASTM D5373-21 (Metode A)	ASTM D3136-24	Standard Methode	ASTM D3173-D3173M-17A

Tabel 1 merupakan hasil pengujian di Lab. Tekmira Bandung (Sertifikat Nomor: 0901/LBB/VII/2024 dan No. 1457/LBB/XI/2024), yang menunjukkan bahwa karakteristik batu bara yang digunakan PLTU Barru memiliki nilai kalor (GCV) sebesar 4.164 kkal/kg atau 17.422,18 kJ/kg (17,42 MJ/kg) dengan kandungan abu sekitar 4.46% serta MC sebesar 30,18%, serta kandungan sulfur 0,12%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa jenis batu bara yang digunakan PLTU Barru adalah jenis batubara rendah (Lignit) dengan nilai kalor rendah < 4.400 kkal/kg dengan kadar air >30% berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2011. Sementara hasil analisis *sawdust* diperoleh nilai kalor (GCV) sebesar 4,046 kkal/kg atau 16.928,46 kJ/kg (16,93 MJ/kg) dengan kandungan abu sekitar 1,04% serta MC sebesar 10,82%, serta kandungan sulfur 0,03%. Bila dilakukan komparasi antara karakteristik kedua jenis bahan bakar tersebut, tampak bahwa nilai kalor batu bara sedikit lebih tinggi dibandingkan *sawdust*, namun kandungan abu, kandungan sulfur dan MC sawdust lebih kecil dari pada batu bara sehingga penggunaan sawdust lebih aman terhadap lingkungan. Perbedaan nilai kalor tersebut sangat kecil, hanya selish sekitar 118 kk/kg atau 494 kJ (0,494 MJ), tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja boiler. Bila kedua bahan bakar tersebut dilakukan co-firing yaitu *sawdust* dan batubara dengan komposisi 5% SP cofiring 95% batubara (SD:B2 = 5%:95%) atau 10% *sawdust* cofiring batubara 90% (SD:B2 = 10%:90%). Hasil analisis menunjukkan kedua komposisi perbandingan tersebut memiliki karakteristik yang hampir sama terutama nilai kalornya, masing-masing 4.124 kkal/kg dan 4.122 kkal/kg dengan kandungan sulfur masing-masing 0,10% dan 0,12%. Perbandingan komposisi co-firing tersebut merupakan kondisi actual PLT Barru. Kondisi actual tersebut akan dikembangkan penambahan biomassa atau co-firing hingga mencapai 23 % s.d 25% pada Tahun 2025 dan 31% Tahun 2050 (PP No. 79 Tahun 2014).

Analisis pengaruh diversifikasi biomassa (RH, SD, TKS) sebagai bahan bakar cofiring pada PLTU Barru

Untuk menentukan pengaruh diversifikasi biomassa (RH, SD, TKS) sebagai bahan bakar cofiring pada PLTU Barru, dilakukan penambahan dan analisis komposisi campuran berbagai jenis biomassa atau cofiring hingga 15% biomassa (sawdust) dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 di atas pada No. 7. Hasil pengujian dan analisis menunjukkan bahwa penambahan biomassa atau cofiring 15% sawdust

dengan 85% batubara menunjukkan bahwa karakteristik pembakarannya mendekati karakteristik cofiring actual saat ini yaitu nilai kalor bahan bakar diperoleh sekitar 4.136 kkal/kg dengan kandungan sulfur sekitar 0,07% mendekati karakteristik nilai kalor cofiring kondisi aktualnya. Hal ini berarti bahwa dengan penambahan persentase campuran sawdust hingga 15% masih layak dan belum mempengaruhi kinerja PLTU Barru. Selanjutnya dengan melakukan pengembangan diversifikafi bahan bakar co-firing PLTU Barru dengan menambahkan TKS sebesar 10% dalam campuran SD dan batubara dengan komposisi SD:TKS:B2 (5:10:85) sebagaimana pada Tabel 1 No.8, diperoleh nilai kalor sebesar 4114 kk/kg dengan kandungan sulfur 0,10%. Nilai tersebut mendekati nilai pengoperasion actual (data No.5 dan No.6 Tabel 1). Hal ini berarti bahwa dengan penambahan TKS sebanyak10% sebagai langkah diversifikasi, belum mempengaruhi kinerja boiler. Demikian pula pengembangan diversifikasi bahan dengan penambahan sekam adi 5% dengan komposisi SD:TKS:SP:B2 (5:7:5:75) memberikan hasil GCV sebesar 4108 kkal/kg dngan sulfur 0,09%. Nilai tersebut mendekati nilai pengoperasian actual saat ini SD:BB= 5:95 (data No.5 dan No.6 pada Tabel 1). Hal ini berarti bahwa dengan penambahan TKS sebanyak 7 % dan SP sebanyak 5% sebagai langkah diversifikasi, belum mempengaruhi kinerja boiler.

Analisis Pengaruh Co-firing terhadap Kinerja Boiler PC di PLTU Barru

Data operasional PLTU Barru adalah data yang diperoleh di PLTU Barru pada kondisi actual, baik data sebelum co-firing maupun data setelah co-firing, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komparasi data kondisi operasi Boiler PLTU Barru sebelum dan sesudah Co-firing.

Parameter	Sebelum Co-Firing	Setelah Co-Firing	**Manfaa/ dampak**
Komsumsi Batu bara	600-768 ton/hati atau 25-32 ton/jam atau 30 ton/jm (data Analisi)	648 ton/hari atau 27 ton/jam	
Komsumsi sawdust	0	3,072 ton/jam ton/hari atau 3.072 kg/jam	
Suhu Udara Pembakaran (Furnace)	± 850-900 °C	±1.150–1.300 °C (Sedikit turun karena nilai kalor biomassa lebih rendah)	Diversifikasi energi Penghematan biaya bahan bakar Efisiensi menurun sedikit ±1-2 Penurunan Emisi SO_2/NO ±10-30 % Kapasitas Stabil, tidak menurun Penghematan biaya produksi energi ±10% Mendukung ekonomi sirkular Peningkatan citra hijau perusahaan TSR meningkat signifikan Tidak menurunkan produktivitas
Tekanan Uap Utama	± 4–6 MPa (40-60 bar)	4–6 MPa (40-60 bar) (Relatif stabil dan terkontrol)	
Temperatur Uap Utama	± 540 °C	±540 °C (stabil dan terkontrol)	
Aliran Uap (Steam Flow)	320–340 ton/jam	320–340 ton/jam (tetap stabil dan terkontrol)	
Excess Air (kelebihan udara)	15–20%	Sedikit meningkat (hingga 20–25%) karena biomassa butuh udara lebih banyak untuk pembakaran sempurna	
Efisiensi Boiler	80–90%	Sedikit menurun (sekitar 1–2%) akibat kelembapan biomassa 78 - 88%	
Kandungan Abu (Fly Ash + Bottom Ash)	Tinggi (karena batubara mengandung mineral)	Menurun signifikan (biomassa rendah mineral)	
Kandungan SO_2/NO_x	Relatif tinggi karena sulfur dan nitrogen batubara	Turun 10–30% tergantung jenis biomassa	
Fouling/Slagging Potensi	Sangat memengaruhi potensi fouling dan slagging terutama batubara kualitas rendah	Bisa meningkat jika biomassa mengandung alkali tinggi (K, Na, Cl)	

Sumber: Data diperoleh dari PLN Nusantara Power. (2021).

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa penambahan sawdust 5-10% tidak berpengaruh terhadap penurunan kinerja atau produktivitas boiler, walaupun efisiensi menurun sedikit ±1-2%, namun terjadi penurunan Emisi SO_2/NO ±10-30 %, penghematan biaya produksi energi ±10%. Untuk mengetahui pengaruh co-firing terhadap kinerja boiler CFB di PLTU Barru, ada beberapa parameter yang harus dihitung, diantanya:

1) Energi input boiler sebelum co-firing (energi dari batubara 100%)

a. Energi input sebelum co-firing (Qin) = mbb x GCV bb = 30 ton/jam x 17,42 MJ/kg
Qin = 30.000 kg/jam x 17,42 MJ/kg = 525.600 MJ/jam

b. Energi output sebelum cofiring (Qout) = η_{before} x Qin
Qout = 0,85 x 525.600 MJ/jam = 446.760 MJ/jam
Efisiensi Boiler sebelum co-firing yang digunakan (η_{before}) = 85%= 0,85.

2) Energi input boiler setelah co-firing dengan batu bara (efisiensi turun jadi 83%)
η_{after} = 83% = 0,83. Komsumsi batu bara = 27 ton/jam

a. Energi input setelah co-firing (Qin) = mbb x GCV bb = 27 ton/jam x 17,42 MJ/kg
Qin = 270.000 kg/jam x 17,42 MJ/kg = 470.340 MJ/jam

b. Energi output setelah cofiring (Qout) = η_{after} x Qin
Qout = 0,83 x 470.340 MJ/jam = 390.382 MJ/jam

3) Energi input boiler setelah co-firing dengan sawdust (efisiensi turun jadi 83%)
η_{after} = 83% = 0,83. Komsumsi sawdust = 27 ton/jam

4) Komsumsi sawdust dengan TSR 10%:
mbb x GCVbb = msd x GCVsd = 3 ton/jam x 17,42 MJ/kg = msd x 17,01 MJ/kg
msd =(3 ton/jam x 17,42 MJ/kg) ÷ 17,01 MJ/kg = 3,072 ton/jam
jadi massa aliran sawdust (msd) = 3.072 kg/jam

5) Jadi energi input bahan bakar setelah co-firing terdiri dari:
- Energi dari biomassa 10% = 3.072 kg/jam x 17,01 MJ/kg = 52.254,72 MJ/jam
- Energi dari batu bara 90% = 27.000 kg/jam x 17,42 MJ/kg = 470.340 MJ/jam

Jadi total energi input setelah co-firing = 522.592,72 MJ/jam

6) Energi output setelah cofiring (Qout) = η x Qin
Qout = 0,83 x 522.592,72 MJ/jam = 433,751,96 MJ/jam

7) Penghematan batu bara setelah co-firing 10% biomassa (sawdust)
= 30 ton/jam – 27 ton/jam = 3 ton/jam. Berarti dalam sehari dapat menghemat
= 24 x 3 ton/jam = 72 ton.

8) Efisiensi boiler sebelum co-firing (η_{BCF}) = 466.760 MJ/jam ÷ 525.600 MJ/jam x 100%
η_{BCF} = 85%.

9) Efisiensi boiler setelah co-firing(η_{SCF}) =433.760 MJ/jam ÷ 522.592,72 MJ/jam x 100%
η_{SCF} = 83%.

Berdasarkan Tabel 3, perbandingan kondisi PLTU Barru sebelum Co-firing dan setelah Co-firing biomassa dengan batubara menunjukkan sejumlah perubahan penting pada parameter operasi boiler, baik dari sisi teknis, ekonomi, maupun lingkungan. Secara umum, data memperlihatkan bahwa co-firing dapat dilakukan tanpa menurunkan kapasitas pembangkit, meskipun terdapat beberapa konsekuensi pada kinerja termal boiler.

1. Suhu Udara Pembakaran

Terjadi sedikit penurunan suhu pembakaran dari sekitar 1.200–1.350 °C menjadi 1.150–1.300 °C. Hal ini wajar karena biomassa memiliki nilai kalor lebih rendah dibanding batubara. Penurunan ini masih dalam batas aman sehingga tidak mengganggu stabilitas operasi furnace, namun berkontribusi pada penurunan ringan efisiensi termal.

2. Tekanan dan Temperatur Uap Utama

Data menunjukkan tekanan (16–17 MPa) dan temperatur uap utama (±540 °C) tetap stabil**.** Ini berarti sistem control melalui pengaturan attemperator mampu menjaga kualitas uap sehingga co-firing tidak berdampak negatif pada kinerja turbin maupun output listrik.

3. Excess Air

Kenaikan excess air hingga 20–25% merupakan karakteristik umum dalam pembakaran biomassa. Biomassa mengandung volatil tinggi dan kadar oksigen internal yang menyebabkan kebutuhan udara berlebih untuk memastikan pembakaran sempurna. Kenaikan excess air dapat mengurangi efisiensi, tetapi tetap bisa dikelola melalui optimasi sistem udara primer-sekunder.

4. Efisiensi Boiler

Efisiensi menurun sekitar 1–2%, terutama disebabkan oleh kadar air biomassa yang lebih tinggi, kebutuhan excess air lebih besar,dan fluktuasi nilai kalor.

Meskipun demikian, penurunan efisiensi ini masih dikompensasi oleh manfaat ekonomi dari pengurangan konsumsi batubara.

5. Kandungan Abu

Co-firing menurunkan kandungan abu secara signifikan karena biomassa pada umumnya memiliki kadar mineral rendah dibanding batubara. Efek positifnya adalah pengurangan beban sistem penanganan abu, penurunan biaya pembuangan abu, dan berkurangnya potensi emisi partikulat.

6. Emisi SO_2 dan NO_x

Penurunan emisi SO_2/NO_x sebesar 10–30% sangat signifikan. Biomassa memiliki kandungan sulfur dan nitrogen lebih rendah, sehingga co-firing memberi manfaat lingkungan nyata: pembangkit menjadi lebih ramah lingkungan tanpa membangun peralatan kontrol emisi tambahan.

7. Fouling dan Slagging

Batubara kualitas rendah biasanya meningkatkan risiko deposit. Biomassa dapat memperbaiki kondisi tersebut, namun risiko dapat meningkat bila biomassa mengandung unsur alkali (K, Na, Cl). Perlu pemilihan jenis biomassa yang tepat untuk menjaga keandalan permukaan perpindahan panas.

Berdasar pada uraiandan pembahasan tersbut,maka co-firing di PLTU Barru terbukti layak secara teknis**,** menguntungkan secara ekonomi, serta bermanfaat bagi lingkungan**.** Walaupun terdapat sedikit penurunan efisiensi boiler, manfaatnya jauh lebih besar, antara lain: pengurangan biaya bahan bakar & produksi energi (±10%), penurunan emisi SO_2/NO_x, diversifikasi energi, peningkatan citra hijau perusahaan, kontribusi pada ekonomi sirkular, dan TSR meningkat tanpa menurunkan produktivitas. Dengan kontrol operasi yang tepat dan pemilihan biomassa yang sesuai, co-firing dapat menjadi strategi transisi energi yang efektif untuk PLTU di Indonesia.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkanhasil analisi data dan mengacu pada tujuan penelitian, makadisimpulkan sebagaiberikut:

1. Karakteristik biomassa seperti SP, SD dan TKS memiliki karakteristik yang berbeda dari batubara, namun tetap memenuhi syarat sebagai bahan bakar co-firing. Biomassa ini umumnya memiliki nilai kalor lebih rendah, kadar air lebih tinggi, kandungan abu rendah, dan kandungan sulfur–nitrogen yang minim, sehingga secara lingkungan lebih ramah dan dapat mengurangi emisi pembakaran.
2. Pengaruh diversifikasi biomassa terhadap co-firing menghasilkan dampak positif berupa penurunan emisi SO_2/NO_x, pengurangan konsumsi batubara, serta efisiensi biaya bahan bakar. Masing-masing jenis biomassa memberi pengaruh berbeda terhadap performa pembakaran, namun secara umum dapat digunakan pada co-firing skala rendah hingga menengah (low–medium blending ratio) tanpa menurunkan kapasitas pembangkit.
3. Pengaruh co-firing terhadap kinerja Boiler CFB PLTU Barru memperlihatkan bahwa kinerja sistem tetap stabil, terutama pada parameter tekanan dan temperatur uap utama. Walau terjadi

sedikit penurunan efisiensi (±1–2%) akibat kelembapan biomassa dan kenaikan excess air, boiler CFB tetap mampu beroperasi optimal. Risiko fouling dapat meningkat pada biomassa berkadar alkali tinggi, namun masih dapat dikelola melalui kontrol operasi dan pemilihan biomassa yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. F. Anshar, N. Hamzah, Firman, and Makhrani, "Optimization analysis of the utilization of biomass and coal cofiring at PT. Tonasa cement and PLTU Barru," AIP Conference Proceedings, vol. 3370, p. 020002, 2025, doi: 10.1063/5.0298020.
[2] P. K. Nag, Power Plant Engineering, 4th ed. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill, 2013.
[3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Co-Firing," 2020. [Online]. Available: https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemerintah-indonesia-sampaikan-terobosan-co-firing-biomassa-indonesia-dalam-clean-energy-ministerial-ke-11. [Accessed: Apr. 18, 2025].
[4] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Roadmap Net Zero Emissions 2060," 2021. [Online]. Available: https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/roadmap-net-zero-emissions-2060-ditargetkan-oleh-kementerian-esdm. [Accessed: Apr. 20, 2025].
[5] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional," 2014.
[6] Z. Maskur and A. Nugroho, "Analisa karakteristik biomasa untuk cofiring pada pembangkit batubara di Indonesia," in Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan I (SENASTITAN I), pp. 394–402, 2021.
[7] I. N. Winaya, I. B. Agung, and D. Susila, "Co-Firing sistem fluidized bed berbahan bakar batubara dan ampas tebu," Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, vol. 4, no. 2, pp. 180–188, 2010.
[8] A. Tajalli, Panduan Penilaian Potensi Biomassa sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia, 2015.
[9] M. Anshar, D. Tahir, F. N. Ani, and A. S. A. Kader, "New composites based on low-density polyethylene and rice husk: Elemental and thermal characteristics," Journal of Environmental Engineering Research, vol. 23, pp. 250–257, 2019.
[10] H. Ibrahim, D. Harun, and M. Saputra, "Analisis pengujian nilai kalor limbah padat kelapa sawit pada PT. Syaukath Sejahtera untuk bahan bakar boiler," Jurnal Teknik Mesin Unsyiah, vol. 3, no. 1, 2015.
[11] J. Susanto, D. A. Santoso, and N. Suwedi, "Perhitungan potensi limbah padat kelapa sawit untuk sumber energi terbaharukan dengan metode LCA," Jurnal Teknologi Lingkungan, vol. 18, no. 2, pp. 165–172, 2017.
[12] U. A. Jamal, "Sekam padi sebagai bahan bakar alternatif pada PT. Indonesia Power UJP PLTU Barru," Politeknik ATI Makassar, 2019.
[13] Y. A. Çengel and M. A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015.