

Pengaruh *Co-firing* Menggunakan Variasi Biomassa untuk Menjaga *Feedstock* Biomassa di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara

Enrico Gultom^{a,b}, Dimas Angga Fakhri Muzhoffar^{a,*}, Ervan Ari Prasetyo^b
Email corresponding author: dimas.anggafm@ui.ac.id

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424

^b PT. PLN Nusantara Power, Jalan Surabaya-Situbondo No.Km.142, Kabupaten Probolinggo Indonesia 67291

Article history: Received: 29 Agustus 2024 | Revised: 9 November 2024 | Accepted: 10 November 2024

Abstract. Emissions of carbon dioxide (CO_2) resulting from the burning of coal fuel in power plants are a major contributor to global warming and climate change. Co-firing is employed in Coal-Fired Power Plants (CFPP) as a precautionary measure to decrease reliance on coal as the predominant energy source. The possible deployment of biomass co-firing on a bigger scale and for the long term still requires more identification. Through laboratory testing and direct combustion tests, this project intends to assess the performance, emissions, and costs of several types of biomass as co-firing fuel. Seedust, rice husks, cocopeat, and Solid Refuse Fuel (SRF) are among the biomass materials used. All biomass kinds evaluated were found to be safe in terms of performance, reduce exhaust gas emissions, and lower Basic Production Costs (BPP), according to the test report.

Keywords – Co-firing; Biomass; Decarbonization; Emission; Sustainability

Abstrak. Pembakaran bahan bakar batubara pada pembangkit listrik secara signifikan menyumbang emisi karbon dioksida (CO_2), yang berperan dalam pemanasan global dan perubahan iklim. Metode co-firing digunakan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebagai strategi untuk mengurangi ketergantungan pada batubara sebagai sumber energi utama. Masih diperlukan identifikasi lebih lanjut mengenai potensi penerapan co-firing biomassa dalam skala yang lebih luas dan untuk jangka waktu yang lebih panjang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi berbagai jenis biomassa sebagai bahan bakar co-firing dari segi performance, emisi, dan biaya dengan cara uji laboratorium dan uji bakar langsung. Biomassa yang dipakai adalah sawdust, sekam padi, cocopeat, dan Bahan Bakar Jumputan Padat (BBJP). Hasil dari pengujian didapatkan bahwa seluruh biomassa yang diuji masih aman pada segi performance, serta menurunkan emisi gas buang, dan menghemat Biaya Pokok Produksi (BPP)

Kata Kunci - Co-firing; Biomassa; Dekarbonisasi; Emisi; Keberlanjutan

PENDAHULUAN

Dua masalah berupa emisi gas rumah kaca dan keterbatasan cadangan bahan bakar fosil telah mendorong pergeseran dari penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi. Pembakaran bahan bakar fosil secara signifikan menyumbang emisi karbon dioksida (CO_2), yang berperan dalam pemanasan global dan perubahan iklim yang menyertainya. Batubara merupakan bahan bakar yang bersifat tidak terbarukan, cadangannya diproyeksikan akan habis dalam waktu dekat, beberapa perkiraan menunjukkan bahwa cadangan batubara mungkin habis dalam waktu kurang dari satu abad [1].

Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) target bauran Energi baru Terbarukan (EBT) nasional pada tahun 2025 mencapai 23%. Namun, hingga tahun 2023 target bauran EBT masih berada pada nilai 14,11% [2]. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), cadangan biomassa Indonesia memiliki kapasitas total 32,6 Gigawatt (GW). Indonesia belum dapat melakukan pemanfaatan biomassa dalam skala besar yang membutuhkan investasi besar untuk pembangkit. *Co-firing* biomassa merupakan metode yang melibatkan penggunaan kombinasi bahan bakar batubara dan biomassa dalam rasio tertentu, untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi karbon dalam proses pembangkitan energi [3]. Pemanfaatan biomassa dalam skala besar juga dapat dilakukan dengan melakukan *co-firing* dengan pembangkit batubara yang sudah ada. [4]

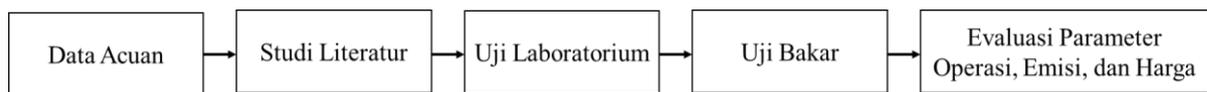
Biomassa memainkan peran yang semakin signifikan dalam campuran energi global karena kemampuannya untuk menyerap CO_2 selama fase pertumbuhannya dan melepaskannya kembali selama proses pembakaran, sehingga memberikan kontribusi yang berkelanjutan terhadap pengurangan emisi karbon [4]. Saat biomassa dibakar di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara (PLTU), sisa karbon dari pohon diubah menjadi energi yang dapat digunakan untuk menggantikan batubara. Selain itu, unit pembangkit yang menggunakan *co-firing* biomassa juga termasuk dalam kategori karbon netral, yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan PLTU yang ada saat ini yang termasuk dalam kategori karbon positif.

Co-firing diidentifikasi sebagai salah satu inisiatif strategis dalam program *green booster* oleh PLN Perusahaan Listrik Negara (PLN), untuk mempercepat pencapaian target bauran Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025. Pendekatan ini memanfaatkan infrastruktur pembangkit listrik yang sudah ada sekaligus berfungsi sebagai solusi pengelolaan limbah yang efisien [5]. *Co-firing* dinilai sebagai metode yang efisien dari segi biaya, karena dapat diimplementasikan tanpa memerlukan investasi besar serta memanfaatkan infrastruktur PLTU yang sudah tersedia [6]. Saat ini, PLTU ENR 400 MW untuk *co-firing* masih menggunakan satu biomassa yaitu *sawdust*. Sedangkan suplai *sawdust* disekitar PLTU ENR tersedia hanya mampu memenuhi kebutuhan *co-firing* $\pm 1\%$ sebesar 107,04 ton/hari.

Kendala utama untuk pembangkit skala besar adalah masalah ketersediaan bahan baku biomassa. Untuk memenuhi kebutuhan biomassa pada PLTU ENR 400 MW diperlukan *feedstock* biomassa dengan memanfaatkan variasi biomassa yang ada. Ragam biomassa yang diproduksi pada tiap wilayah *ring* terdekat pembangkit memiliki variasi lebih dari satu produk, dapat dimanfaatkan untuk meminimalisir biaya transportasi biomassa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan biomassa alternatif selain *sawdust* dari segi *performance*, emisi, dan biaya yang ada di *ring* terdekat dari PLTU ENR 400 MW.

METODE

Co-firing batubara dan biomasa telah mencapai kematangan teknologi dan metodologi yang berarti efisiensi termal pembakaran yang tinggi, nilai investasi peralatan yang rendah, kemudahan dalam teknologi penyimpanan, transportasi, dan pengendalian material. Metodologi di dalam penelitian ini di ilustrasikan pada Gambar 1. Data acuan nilai pada pengujian batubara 100% digunakan sebagai *baseline* untuk membandingkan dengan biomassa yang akan di uji di PLTU ENR 400 MW.



Gambar 1. Metodologi penelitian

Pemilihan jenis batubara merupakan salah satu faktor kunci yang berkontribusi terhadap potensi terjadinya *slagging* dan *fouling* [7]. Hasil dari analisis, dan kadar sulfur dari batubara dapat digunakan untuk menghitung indeks potensi terjadinya *slagging* dan *fouling* [8]. *Slagging* merupakan terbentuknya deposit dari partikel abu lengket, meleleh atau melunak yang menempel pada permukaan *heat transfer* yang terkena radiasi panas [9]. Parameter yang sering digunakan untuk menentukan potensi terbentuknya *slagging* ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter untuk perhitungan *slagging* dan *fouling* [10]

Parameter	Kriteria Resiko			
	Rendah	Sedang	Tinggi	Parah
Rasio B/A	< 0,4 atau > 0,7		0,4 – 0,7	
Indeks Slagging	< 0,6	0,6 – 2,0	2,0 – 2,6	>2,6
Fusibilitas	>1343	1232 – 1343	1149 – 1232	<1149
Silika/Alumina	2,0 – 3,0	4,5 – 5,5	1,0 – 1,5	

a) *Base to Acid Ratio*

Komponen penting dalam abu batubara dapat diklasifikasikan sebagai unsur basa dan asam. Unsur basa meliputi besi, logam alkali tanah seperti kalsium dan magnesium, serta logam alkali seperti natrium dan kalium. Di sisi lain, unsur asam terdiri dari silikon, aluminium, dan titanium. Ketika unsur basa dan asam berinteraksi, mereka membentuk senyawa yang memiliki titik leleh lebih rendah. Rasio antara unsur basa dan asam ini dapat memberikan gambaran mengenai perilaku leleh dan karakteristik viskositas abu batubara [8]. Rasio B/A dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$B/A \text{ Ratio} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O, K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad (1)$$

Dimana:

- B/A = *Base to acid ratio*
- $Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O$ = Konsentrasi oksida basa
- SiO_2, Al_2O_3, TiO_2 = Konsentrasi oksida asam

b) Indeks *Slagging*

Perhitungan Indeks *Slagging* untuk abu batubara *bituminous* mempertimbangkan rasio basa/asam dan persentase berat belerang dalam batubara, berdasarkan kondisi kering. Rasio basa/asam memberikan indikasi kecenderungan abu untuk membentuk senyawa yang mempengaruhi *Ash Fusion Temperature* (AFT). Kandungan belerang mencerminkan jumlah besi yang terdapat dalam bentuk pirit (FeS_2). Kehadiran pirit yang signifikan dalam batubara *bituminous* merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan tingginya indeks *slagging* [9]. Persamaan 2 digunakan untuk menghitung indeks *slagging*.

$$\text{Indeks Slagging} = B/A \text{ Ratio} \times S \quad (2)$$

Dimana:

B/A = Base to acid ratio
S = Sulphur

c) *Fouling*

Perhitungan indeks *fouling* untuk abu batubara *bituminous* melibatkan analisis rasio basa/asam serta persentase berat sodium dalam abu, berdasarkan kondisi kering. Berikut ini adalah persamaan untuk menentukan faktor *fouling*

$$\text{Indeks fouling} = B/A \text{ Ratio} \times S \quad (3)$$

Dimana:

B/A = Base to acid ratio
 Na_2O = Berat (%) sodium pada *dry coal basis*

d) *Cl Induced Active Oxidation*

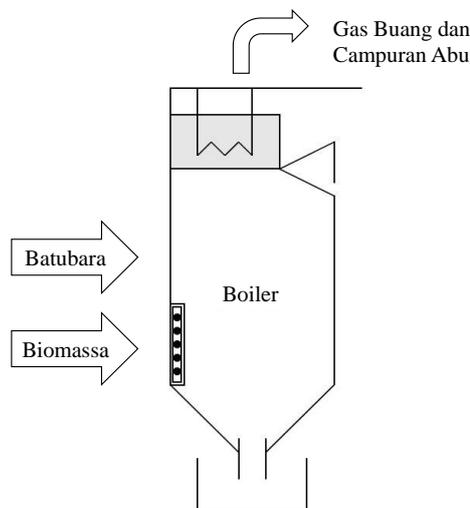
Bahan bakar dengan kandungan biomassa yang tinggi memiliki kemungkinan untuk menyebabkan korosi klorin pada boiler. Ini dapat dilakukan dengan menganalisis komposisi bahan bakar untuk mengetahui jumlah natrium dan klorin. Kemudian, kita dapat menggunakan rumus berikut untuk menghitung rasio 2S/Cl berdasarkan molar [11]:

$$\text{Rasio } 2S/Cl = \frac{2 \times \left(\frac{\% \text{Bahan Bakar} \times S}{\text{Massa atom sulfur}} \right)}{\left(\frac{\% \text{Bahan Bakar} \times Cl}{\text{Massa atom karbon}} \right)} \quad (4)$$

Dimana:

S = Sulphur
Cl = Chloride

Pada uji bakar biomassa, biomassa yang di digunakan *direct co-firing* seperti diilustrasikan pada **Gambar 2**. Di mana biomassa dicampur melalui peralatan penggiling, *grinding*, dan pengumpan atau feeder yang sama, kemudian dicampur dengan batubara ke dalam boiler yang sama untuk dibakar. Metode ini biasanya tidak memerlukan investasi dalam peralatan khusus, dan merupakan metode pembakaran bersama yang hemat biaya dan langsung [4].



Gambar 2. Metode *direct co-firing*

Beberapa tahap yang penting untuk dilakukan adalah pengumpulan data baik data *benchmark* maupun *feedstock*. Biomassa yang digunakan pada penelitian ini adalah *sawdust*, sekam padi, *cocopeat*, dan Bahan Bakar Jumpitan Padat (BBJP). Data operasi diambil setelah beban stabil atau *steady state*. Lokasi pengujian berada di PLTU ENR 400 MW untuk detail dan tanggal pengujian sebagai berikut:

- *Sawdust* : 20 Mei 2022 Pukul 13.00-16.00
- Sekam padi : 30 Mei 2022 Pukul 13.00-16.00
- *Cocopeat* : 29 September 2022 Pukul 08.00-11.00
- BBJP : 12 September 2022 Pukul 08.00-11.00

Karakteristik bahan bakar diuji di laboratorium yang sudah terakreditasi untuk mengetahui kemungkinan *slagging*, *fouling*, dan korosi pada pipa boiler. Pada penelitian mengetahui pengaruh *Nett Plant Heat Rate* (NPHR), efisiensi termal, *Specific Fuel Consumption* (SFC), emisi, dan Biaya Pokok Produksi (BPP).

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perhitungan

Uji laboratorium analisa biomassa dilakukan di laboratorium terakreditasi, hasil dari uji laboratorium dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji laboratorium

Parameter	Unit	<i>Blending</i> Batubara (20% MRC + 80%LRC)	<i>Co-firing</i> <i>Sawdust</i> 5%	<i>Co-firing</i> <i>Rice</i> <i>Husk</i> 5%	<i>Co-firing</i> <i>Cocopeat</i> 5%	<i>Co-Firing</i> BBJP 5%
Total <i>Moistures</i>	%wt	34.56	34.83	33.2	34.89	33.44
<i>Proximate Analysis</i>						
<i>Ash Content</i>	%wt	3.77	3.71	4.48	3.72	5.56
<i>Volatile Matter</i>	%wt	31.76	32.49	33.13	32	32.21
<i>Fixed Carbon</i>	%wt	29.92	28.97	29.19	29.4	28.8
<i>Hardgrove</i> <i>Grindability Index</i>		58.4	56.95	56.95	56.75	55.75
<i>Chloride (Cl)</i>	%wt	0	0.01	0.03	0.05	0.05
<i>Ultimate Analysis</i>						
<i>Carbon</i>	%wt	45.73	44.9	45.35	45.12	44.62
<i>Hydrogen</i>	%wt	3.02	3.03	3.11	3.01	3.02
<i>Nitrogen</i>	%wt	0.75	0.72	0.73	0.73	0.79
<i>Sulphur</i>	%wt	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19
<i>Oxygen</i>	%wt	11.99	12.63	12.94	12.34	12.38

Setelah mengetahui analisa *proximate* dan *analysis* dari masing-masing biomassa maka didapatkan hasil perhitungan potensi *slagging* dan *fouling* biomassa yang dapat di lihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter potensi *slaaging* dan *fouling*

Parameter	<i>Blending</i> Batubara (20% MRC + 80% LRC)	<i>Co-firing</i> <i>Sawdust</i> 5%	<i>Co-firing</i> Sekam Padi 5%	<i>Co-firing</i> <i>Cocopeat</i> 5%	<i>Co-Firing</i> BBJP 5%
B/A Ratio	19.43	18.90	18.43	18.85	19.13
<i>Fouling</i>	13.13	13.97	12.00	12.33	12.59
Indeks Slagging	3.54	3.37	3.29	3.38	3.60
<i>Cl Inducted</i> <i>Active Carbon</i>	-	71.40	14.28	7.98	7.52

Pada analisa numerik nilai *Cl Inducted active oxidation* biomassa yang di uji yaitu sawdust, sekam padi, cocopeat, dan BBJP masuk dalam kategori minor karena nilai rasio lebih dari 4. Terjadi penurunan untuk nilai *B/A ratio* dibandingkan dengan *blending* batu bara tidak menggunakan biomassa. Pada indeks *fouling* biomassa *sawdust* terjadi peningkatan yang kecil sebesar 0,84. Sedangkan pada sekam padi, cocopeat, dan BBJP menunjukkan penurunan dibandingkan dengan *blending* batubara tidak menggunakan biomassa. Pada rasio silika juga tidak menunjukkan perubahan signifikan pada keempat biomassa dan masih dalam kriteria resiko rendah karena berada dalam range 72-80. Sama halnya pada total alkali yang masih dalam kriteria aman pada semua biomassa karena berada dalam range <0,3.

Dari hasil perhitungan variasi jenis biomassa diatas, dapat di ambil kesimpulan bahwa parameter operasi dan resiko diatas masih dapat terkendali dan tergolong aman untuk peralatan dengan bauran *co-firing* 5% pada masing-masing biomassa.

B. Hasil Pengujian Aktual Uji Bakar Biomassa

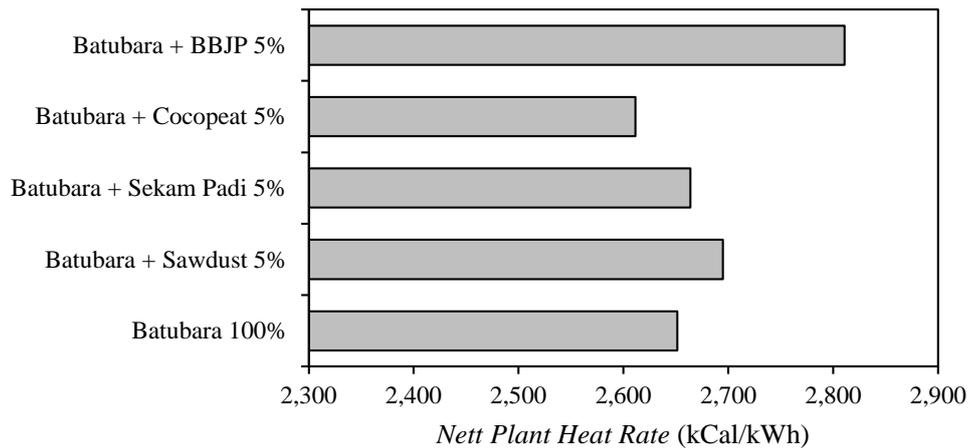
Pengujian dilakukan pada beberapa waktu mulai dari Mei 2022 sampai dengan September 2022 di mana hasil dari pengujian secara rata rata memiliki *performance* peralatan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan bahan bakar batubara, hal ini dikarenakan kalori bahan bakar biomassa cenderung lebih rendah dari batubara. Selain itu terdapat hasil dari pembakaran pada masing masing biomassa terdapat beberapa hal yang perlu jadi pertimbangan pasca pengujian variasi biomassa. *Performance* variasi biomassa dapat di lihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter operasi dan *performance*

Parameter	Satuan	Batubara (MRC & LRC)	Sawdust	Sekam Padi	Cocopeat	BBJP
<i>Gross Generator Output</i>	kW	396,500.00	396,500.00	397,500.00	396,000.00	392,000.00
<i>kWh Netto</i>	kW	366,336.00	368,448.00	368,976.00	368,752.00	363,872.00
Nilai Kalor HHV	kCal/kg	4,421.48	4,126.52	4,261.03	4,448.08	4,476.97
<i>Coal Flow</i>	kg/h	219,682.50	240,617.00	230,659.50	216,502.50	228,470.00
<i>Nett Plant Heat Rate (NPHR)</i>	kCal/kWh	2,651.45	2,694.85	2,663.72	2,611.57	2,811.03
<i>Gross SFC</i>	kg/kWh	0.55	0.61	0.58	0.55	0.58
<i>Thermal Efficiency</i>	%	32.43	31.74	32.28	32.92	30.59
Boiler Efisiensi	%	85.24	84.01	83.43	84.58	85.04

Pengujian menggunakan biomassa *sawdust* dan sekam padi memiliki data paling mendekati normal dikarenakan *performance* menurun sesuai dengan penurunan kalori bahan bakar. Nilai kalori bahan bakar dengan penambahan *sawdust* merupakan terkecil diantara variasi biomasa lainnya. Semakin kecil nilai kalori pada suatu bahan bakar, semakin susah terbakar juga bahan bakar tersebut.

Pada pengujian BBJP di dapatkan *performance* menurun signifikan meskipun kalori bahan bakar sama, hal ini dapat dilihat dari kenaikan NPHR seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3. Hal ini dikarenakan terdapat banyak material pengotor yang ikut pada BBJP, BBJP merupakan sampah campuran sampah organik dan non organik. Sampah non organik dapat menjadi pengotor yang dapat mempengaruhi efisiensi boiler karena dapat menempel pada *walltube* boiler. *Performance* membaik pada pengujian *cocopeat* dengan naiknya efisiensi.



Gambar 3. Nilai *Net Plant Heat Rate* (NPHR) dari masing-masing biomassa

Selanjutnya, seluruh biomassa yang di uji terbukti dapat menurunkan emisi gas CO₂ dan SO₂, seperti ditunjukkan pada Tabel 5. Hal ini dikarenakan seluruh biomassa merupakan karbon netral. Emisi gas buang di PLTU ENR 400 MW juga masih memenuhi batas baku mutu peraturan menteri P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 [12]. Karena biomassa mengandung sulfur lebih rendah dibandingkan batubara, pembakaran campuran batubara dengan biomassa menghasilkan emisi SO₂ yang lebih sedikit dibandingkan pembakaran batubara murni [13].

Tabel 5. Perbandingan emisi dan biaya pada masing-masing biomassa

Parameter Pemantauan	Satuan	Batubara 20% MRC + 80% LRC	<i>Co-firing</i> <i>sawdust</i> 5%	<i>Co-firing</i> <i>sekam</i> <i>padi</i> 5%	<i>Co-firing</i> <i>cocopeat</i> 5%	<i>Co-firing</i> BBJP 5%
Emisi CO ₂	t CO ₂	19,965.94	19,301.34	19,445.5	19,586.32	19,185.21
Emisi SO ₂	ppm	476.63	412.06	426.55	426.24	429.02
<i>Cost</i> Biomassa	Rp/kg	831	450	550	432.9	800

Dari sisi biaya juga didapatkan bahwa penggunaan biomassa dapat menurunkan Biaya Pokok Produksi (BPP) karena harga dari biomassa tersebut dibawah dari harga batubara. Penggunaan variasi biomassa juga dapat meningkatkan ekonomi kerakyatan atau ekonomi sirkular (*circular economy*) dengan memakai potensi biomassa yang ada di daerah sekitar PLTU. Dengan mengimplementasikan metode ini di Indonesia, peluang untuk menciptakan lapangan kerja baru dan peluang bisnis dalam industri biomassa dapat terbuka, terutama di sektor industri yang memanfaatkan sampah dan limbah sebagai sumber daya utama [14]. Kedepannya diharapkan setiap PLTU Batubara di Indonesia dapat menggunakan potensi biomassa yang ada di sekitar PLTU tersebut dan mampu menurunkan biaya pokok produksi dari biomassa tersebut. Pemerintah Indonesia juga dapat menerbitkan peraturan harga khusus untuk listrik yang di bangkitkan dari biomassa seperti di Australia, menurut [15] insentif seperti harga karbon dapat menjadikan *co-firing* sebagai solusi yang efektif untuk mengurangi emisi CO₂ di Australia.

KESIMPULAN

Implementasi variasi berbagai jenis biomassa di PLTU ENR 400 MW dari segi emisi, didapat bahwa setiap biomassa yang di uji dapat mengurangi emisi CO₂ (Karbon dioksida) penurunan tertinggi terdapat pada komposisi BBJP 5% dan penurunan terendah terdapat pada komposisi cocopeat 5%, selain itu sumber biomassa sudah termasuk pemanfaatan *waste biomass* dengan *co-firing* BBJP. Dari data implementasi didapat bahwa seluruh biomassa yang di uji bakar menunjukkan *performance* yang masih aman dalam parameter operasi dan *safety*. Dari sisi harga, keekonomisan yang paling mahal adalah BBJP, sedangkan untuk *cost* yang paling murah menggunakan sekam padi. Dengan variasi jenis biomassa dapat membuka pasar baru dalam peningkatan *feedstock* biomassa. Untuk pengujian berikutnya dapat dilakukan dengan rentang waktu yang lebih lama untuk mengetahui efek jangka panjang dari penggunaan biomassa tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PLN (Persero) atas beasiswa yang diberikan dan Kepada Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.

REFERENSI

- [1] I. E. Agency. (2023). World Energy Outlook 2023, IEA.
- [2] K. E. d. S. D. Alam, 2023. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id>.
- [3] D. F. Umar, G. K. Hudaya, and F. Sulistyohadi, "STUDY ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF COAL-BIOMASS FOR CO-FIRING SYSTEM AS A FEEDSTOCK OF COAL GASIFICATION PROCESS," 2017.
- [4] B. Madanayake, S. Gan, C. Eastwick, and H. K. Ng, "Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques," *Fuel Processing Technology*, vol. 159, pp. 287-305, 05/01 2017, doi: 10.1016/j.fuproc.2017.01.029.
- [5] P. L. Negara, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030," 2021.
- [6] M. S. Roni, S. Chowdhury, S. Mamun, M. Marufuzzaman, W. Lein, and S. Johnson, "Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1089-1101, 2017/10/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.023>.
- [7] H. Hariana, H. Putra, and F. Kuswa, *PEMILIHAN BATUBARA KALIMANTAN UNTUK PLTU DENGAN PC BOILER MENGGUNAKAN TINJAUAN POTENSI SLAGGING DAN FOULING*. 2020.
- [8] M. I. Saputra and I. Yuliyani, "POTENSI KECEPATAN PEMBENTUKAN SLAGGING DAN FOULING PADA BOILER PLTU BERBAHAN BAKAR BATU BARA," *Prosiding Seminar Nasional NCIET*, vol. 1, 2020, doi: <https://doi.org/10.32497/nciet.v1i1.84>.
- [9] J. B. Kitto, S. C. Stultz, Babcock, and W. Company, *Steam: Its Generation and Use*. Babcock & Wilcox, 2005.
- [10] B. Wilcox, *Steam/its generation and use (41st edition)*. Ohio: a McDermott company, 2005.
- [11] I. A. Aditya, F. N. Haryadi, and I. Haryani, "Analisis Pengujian Co-Firing Biomassa Cangkang Kelapa Sawit Pada PLTU Circulating Fluidized Bed (CFB) Sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan," 2022, co-firing; CFB; biomass; palm kernel shell; SFC vol. 24, no. 2, p. 6, 2022-04-30 2022, doi: 10.14710/rotasi.24.2.61-66.
- [12] M. Farras and N. Sinaga, "Pengaruh Cofiring Menggunakan Serbuk Gergaji Terhadap Emisi Gas Buang di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara," *R E M (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, vol. 7, pp. 35-39, 10/05 2022, doi: 10.21070/rem.v7i2.1644.
- [13] I. Al-Naiema, A. D. Estillore, I. A. Mudunkotuwa, V. H. Grassian, and E. A. Stone, "Impacts of co-firing biomass on emissions of particulate matter to the atmosphere," *Fuel*, vol. 162, pp. 111-120, 2015/12/15/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.08.054>.
- [14] D. N. Palupi, S. Sundari, M. I. Syahtaria, and L. Sianipar, "Analisis Dampak Lingkungan dan Keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga Co-firing Biomassa dan Baru bara sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan," *El-Mal: Jurnal Kajian Ekonomi & Bisnis Islam*, vol. 5, no. 3, pp. 1627-1635, 02/07 2024, doi: 10.47467/elmal.v5i3.781.
- [15] Z. Khorshidi, M. Ho, and D. Wiley, "Techno-Economic Study of Biomass Co-Firing with and without CO2 Capture in an Australian Black Coal-Fired Power Plant," *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 6035-6042, 08/10 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.532.

Halaman ini sengaja dikosongkan
(This page is intentionally left blank)