

Analisis Co-Firing Jenis Bahan Bakar Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler

¹Suanggoro Legowo, ²Ida Bagus Fery Citarsa, ³Ida Ayu Sri Adnyani
^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram

E-mail: ¹suanggorolegowo@gmail.com, ²ferycitarsa@unram.ac.id,
³adnyani@unram.ac.id

ABSTRAK

Listrik merupakan kebutuhan esensial yang terus meningkat, sementara PLTU berbahan bakar batu bara masih menjadi sumber utama di Indonesia. Penggunaan batu bara menghasilkan emisi gas rumah kaca dan polusi udara, sehingga pemerintah menargetkan bauran energi terbarukan 23% pada 2025, termasuk melalui program Co-firing biomassa. Penelitian ini melakukan analisis Co-firing dengan jenis bahan bakar biomassa terhadap efisiensi boiler di PLTU Jeranjang dengan boiler tipe CFB. Biomassa yang digunakan adalah serbuk dan serpihan kayu. Hasil menunjukkan peningkatan efisiensi boiler dari 73,26% menjadi 75,23% dengan serbuk kayu dan 74,08% dengan serpihan kayu. Efisiensi pembangkit meningkat menjadi 20,18% dan 20,03%, dibandingkan 19,53% saat menggunakan batu bara. Emisi SO₂ dan CO menurun signifikan, sedangkan emisi NO_x meningkat. Emisi CO₂ berkurang dari 12,13 kg/s menjadi 10,29 kg/s, menunjukkan potensi Co-firing dalam mengurangi dampak lingkungan. Dengan demikian, Co-firing biomassa dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi karbon, menjadikannya strategi efektif menuju transisi energi berkelanjutan.

Kata kunci : *Boiler, Co-firing, Efisiensi, Emisi, PLTU*

ABSTRACT

Electricity is an essential need that continues to increase, while coal-fired power plants (PLTU) remain the primary energy source in Indonesia. The use of coal generates greenhouse gas emissions and air pollution, prompting the government to target a 23% renewable energy mix by 2025, including through the biomass co-firing program. This study analyzes co-firing using biomass fuel types on boiler efficiency at the Jeranjang coal-fired power plant (PLTU Jeranjang) with a circulating fluidized bed (CFB) boiler type. The biomass used consists of wood dust and wood chips. The results show an increase in boiler efficiency from 73.26% to 75.23% with wood dust and 74.08% with wood chips. Power plant efficiency improved to 20.18% and 20.03%, compared to 19.53% when using coal alone. SO₂ and CO emissions decreased significantly, while NO_x emissions increased. CO₂ emissions were reduced from 12.13 kg/s to 10.29 kg/s, highlighting the potential of co-firing in mitigating environmental impact. Thus, biomass co-firing can enhance energy efficiency and reduce carbon emissions, making it an effective strategy for a sustainable energy transition.

Keyword : *Boiler, Co-firing, efficiency, emission, coal-fired power plan*

1. PENDAHULUAN

Listrik merupakan kebutuhan dasar yang krusial dalam kehidupan modern dan terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan industri. Di Indonesia, salah satu sumber utama pembangkit listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang bergantung pada batubara sebagai bahan bakar utama. Namun, penggunaan batubara mengakibatkan emisi gas rumah kaca dan polusi udara yang berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Dwi Ariyanto & Mustakim, 2023).

Menanggapi tantangan tersebut, pemerintah Indonesia telah mengimplementasikan kebijakan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sebagai bagian dari strategi energi nasional. Salah satu langkah progresif adalah penerapan *co-firing* biomassa dalam PLTU, dengan target mencapai 23% bauran energi terbarukan pada tahun 2025 (Dwiaji, 2023)(Triani et al., 2022). Program *co-firing* ini bertujuan untuk menggabungkan biomassa terbarukan dengan batubara dalam proses pembangkitan listrik, guna mendukung keberlanjutan energi dan mengurangi dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan *co-firing* terhadap efisiensi boiler serta emisi polutan. Fokus utama penelitian adalah membandingkan efisiensi boiler dengan menggunakan 100% batubara dan saat melakukan *co-firing* dengan biomassa, serta mengevaluasi perubahan emisi gas buang, termasuk CO₂, SO₂, CO, dan NO_x.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai efektivitas *co-firing* biomassa dalam meningkatkan efisiensi boiler dan mengurangi dampak lingkungan, serta peranannya dalam

mendukung keberlanjutan energi (Cahyo et al., 2024).

2. LANDASAN TEORI

Boiler

Boiler atau ketel uap adalah perangkat tertutup yang berfungsi untuk menghasilkan uap dengan tekanan yang lebih tinggi daripada tekanan atmosfer (Luhur et al., 2025). Efisiensi pada boiler adalah suatu indikator kemampuan kerja dari boiler yang diukur melalui perbandingan antara keluaran panas (*output heat*) dengan masukan panas yang disediakan oleh bahan bakar. Berdasarkan ASME PTC 4 (*American Society of Mechanical Engineers Performance Test Code 4*), terdapat dua metode utama yang digunakan untuk menghitung efisiensi boiler, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Metode langsung lebih sering digunakan dalam perhitungan di PLTU karena hanya membutuhkan beberapa parameter yang mudah diukur, sehingga memberikan cara yang cepat dan efisien untuk mengukur efisiensi boiler. Rumus untuk menghitung efisiensi boiler dengan metode langsung adalah sebagai berikut (Dwiaji, 2023).

$$EB = \frac{m_p \times (h_g - h_f)}{m_{bb} \times GCV} \times 100\% \quad (1)$$

Hukum pertama termodinamika, entalpi terkait dengan perubahan energi yang terjadi saat sistem menerima atau melepaskan panas, yang sering kali tercermin dalam perubahan suhu, sehingga untuk mendapatkan nilai entalpi dapat menggunakan rumus interpolasi (Sahda et al., 2022):

$$\frac{X-X_1}{X_2-X_1} = \frac{Y-Y_1}{Y_2-Y_1} \quad (2)$$

Efisien penggunaan bahan bakar dalam menghasilkan energi listrik dapat dilakukan dengan perhitungan menggunakan rumus *Specific Fuel Consumption* (SFC). Rumus untuk menghitung SFC adalah sebagai berikut (Dwiaji, 2023):

$$SFC = \frac{M_{bb}}{kWhb} \quad (3)$$

Nilai efisiensi pembangkit dapat menggunakan rumus *Net Plant Heat Rate* (NPHR) berdasarkan SPLN nomor 80 pada tahun 1989. SPLN No. 80 tahun 1989 (Tanbar et al., 2021):

$$NPHR = \frac{m_{bb} \times GCV}{kWhb-AP} \quad (4)$$

$$EP = \frac{860}{NPHR} \times 100\% \quad (5)$$

Co-firing

Co-firing adalah praktik penambahan biomassa sebagai bahan bakar pengganti sebagian dalam boiler pembangkit listrik tenaga batu bara. Hingga saat ini terdapat tiga metode *co-firing* yang digunakan dalam pembangkit listrik antara lain (Alberto Manurung, 2020):

1. Direct Co-firing:

Konfigurasi *direct Co-firing*, biomassa (sebagai bahan bakar sekunder) dimasukkan secara bersamaan dengan batubara (sebagai bahan bakar primer) ke dalam boiler. Cara ini lebih sering digunakan karena lebih ekonomis. Namun, ada risiko potensial yang terkait tingkat korosi yang tinggi akibat penumpukan alkali atau aglomerasi pada permukaan boiler.

2. Indirect Co-firing:

Konfigurasi *indirect Co-firing*, biomassa diolah melalui proses gasifikasi untuk menghasilkan gas biomasa. Gas ini selanjutnya

dimasukkan ke dalam pembakar dan dibakar secara bersamaan dengan batu bara. Pendekatan ini memungkinkan pemisahan abu dari biomassa dan batu bara dengan tetap mencapai tingkat *Co-firing* yang tinggi. Akan tetapi, Cara ini memerlukan biaya investasi yang tinggi.

3. Parallel Co-firing:

Parallel Co-firing melibatkan pemakain pembakar dan boiler terpisah khusus untuk biomasa, sehingga cara ini memerlukan investasi yang lebih tinggi dari pada *direct Co-firing*, tetapi memungkinkan penggunaan bahan bakar dengan kandungan logam alkali dan klorin yang tinggi, dan abu dari hasil pembakaran batu bara serta penggunaan biomassa akan lebih fleksibel.

Gas buang

Proses pembakaran menghasilkan berbagai macam zat sisa yang menjadi polusi udara melalui gas buang yang dapat mengganggu lingkungan. Untuk mendeteksi emisi tersebut, maka di cerobong uap PLTU dipasang *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS),

Beberapa gas buang yang umum dimonitor meliputi (Dwi Ariyanto & Mustakim, 2023) (PERMEN L.H. & KEHUTANAN RI, 2019):

1. Nitrogen Oksida (NOx).

Nitrogen oksida terbentuk dari hasil reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara selama pembakaran pada suhu tinggi. Kadar maksimum kandung NOx dari MENLHK yaitu berdasarkan PM No. 15 Tahun 2019 tentang baku mutu emisi pembangkit listrik tenaga uap yaitu 550 mg/Nm³ atau 292,34 ppm.

2. Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida adalah gas beracun yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Kadar maksimum konsentrasi gas karbon monoksida dengan kapasitas >1001 Kw menurut MENLHK adalah 550 mg/Nm³ atau 218.226 ppm.

3. Sulfur Dioksida (SO₂)

Sulfur dioksida adalah gas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur, seperti batu bara. Kadar maksimum kandung SO₂ berdasarkan peraturan MENLHK tentang kandungan baku mutu emisi pembangkit listrik termal yaitu 550 mg/Nm³ atau 209.920 ppm.

4. Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida adalah gas yang terlepas ke atmosfer selama pembakaran bahan bakar organik, seperti batu bara atau minyak bumi. Karbon dioksida merupakan salah satu gas rumah kaca (GRK) dengan konsentrasi tertinggi di atmosfer.

Dampak gas buang terhadap kesehatan manusia, dapat dilakukan konversi dari mg/Nm³ ke Part per Million (ppm)(Darmawan et al., 2023):

$$ppm = Gt \times \frac{22,4}{MW} \quad (6)$$

Konversi CO₂ dari persen (%) ke kilogram (kg) dapat dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$MCO_2 = \frac{KCO_2}{100\%} \times \text{Flow rate} \times 1,98 \quad (7)$$

3. METODOLOGI

Penelitian dilakukan pada PLTU Jeranjang OMU dengan kapasitas 3x25

MW, khususnya Unit 3 yang menggunakan boiler tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) dan telah melakukan *co-firing* batu bara dan biomassa sejak akhir 2020. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis dampak *co-firing* batu bara dan biomassa (serbuk kayu dan serpihan kayu) terhadap efisiensi boiler di PLTU Jeranjang OMU, dengan cara membandingkan efisiensi boiler saat menggunakan 100% batu bara dan saat *co-firing* menggunakan biomassa. Penilaian dilakukan dengan menggunakan rumus metode langsung untuk menentukan efisiensi boiler dan NPHR untuk mengukur efisiensi keseluruhan pembangkit dan dikonversi untuk melihat efisiensi termalnya. Selain itu, penelitian ini juga membandingkan komposisi gas buang (SO₂, CO₂, CO, dan NO_x) sebelum dan sesudah penerapan *co-firing*.

Pengambilan data dilakukan menggunakan komputer dan software PI Data Link yang mengakses data dari server PI Vision di kantor pusat yang terhubung dengan parameter instrumentasi di *control room*. Penelitian ini menggunakan data sekunder dari PLTU Jeranjang OMU. Adapun data yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Data historical untuk pemakaian bahan bakar, energi yang dihasilkan generator, pemakaian sendiri, *main steam flow* (aliran uap utama), *main steam pressure* (tekanan uap utama), *feedwater pressure* (tekanan air umpan), *main steam temprature* (suhu uap utama) dan *feedwater temprature* (suhu air umpan).
2. Data karakteristik bahan bakar berupa kalori dan kandungan air (*moisture*).
3. Data tingkat emisi sebelum dan setelah penerapan *co-firing*, yaitu SO₂, CO₂, CO dan NO_x serta laju aliran gas pada PLTU Jeranjang OMU.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode *co-firing* yang digunakan di PLTU Jeranjang OMU adalah *direct co-firing*, yaitu dengan mencampurkan batubara dan biomassa secara langsung sebelum dimasukkan ke dalam *coal bunker*. *Direct co-firing* dipilih karena lebih ekonomis (Triani et al., 2022) dibandingkan metode *indirect* dan *parallel co-firing* yang memerlukan pembangunan fasilitas baru. Metode ini memungkinkan PLTU untuk memanfaatkan peralatan yang sudah ada, sehingga tidak memerlukan investasi tambahan yang signifikan. Jenis biomassa yang digunakan untuk *co-firing* di PLTU Jeranjang OMU adalah serbuk kayu (*sawdust*) dan serpihan kayu (*woodchip*). Serbuk kayu memiliki kandungan kalori sebesar 3561 kCal/kg dengan kandungan air 18,48%, sementara serpihan kayu memiliki kandungan kalori sebesar 2931 kCal/kg dengan kandungan air 37,67%. Biomassa ini dicampur dengan batu bara sub-bituminus yang memiliki kandungan kalori 4081 kCal/kg dan kandungan air 37,6%, dengan rasio biomassa antara 2% hingga 5% yang digunakan langsung dalam pembakaran tanpa pengolahan tambahan seperti pembuatan pellet.

Hasil Perhitungan

Berdasarkan data sekunder yang telah diperoleh, dapat dilakukan perhitungan menggunakan parameter-parameter tersebut. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 1.

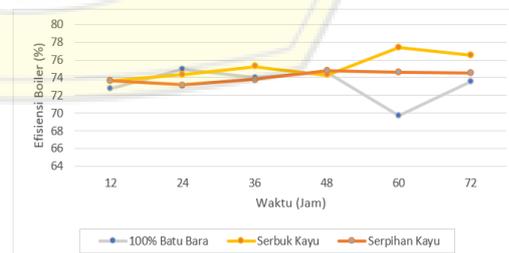
Tabel 1. Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler

Jam	Efisiensi Boiler (%)				
	Batu bara (100%)	Serbuk kayu		serpihan	
		efisiensi	% <i>co-firing</i>	efisiensi	% <i>co-firing</i>
12	72,76	73,61	2,84	73,68	2,81
24	74,95	74,33	2,88	73,16	2,78
36	74,03	75,25	3,28	73,79	2,79
48	74,59	74,27	3,18	74,82	2,82
60	69,74	77,43	2,96	74,59	2,83
72	73,52	76,52	2,91	74,48	2,83
mean	73,27	75,23	-	74,09	-

Berdasarkan hasil perhitungan, dapat dilakukan perbandingan antara kondisi sebelum dan setelah penerapan *co-firing*, sehingga dapat diketahui dampaknya terhadap efisiensi boiler dan emisi yang dihasilkan.

Tabel 1 menunjukkan bahwa rata-rata efisiensi boiler yang diperoleh selama pengukuran tiga hari meningkat dari 73,27% menjadi 75,23% saat *co-firing* dengan serbuk kayu dan 74,09% saat menggunakan serpihan kayu. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tekanan dan suhu pada *main steam* dan *feedwater* sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler. Nilai-nilai ini berkaitan dengan kandungan air dalam bahan bakar, di mana semakin tinggi kandungan air dalam bahan bakar, semakin banyak energi yang diperlukan untuk menguapkannya. Hal ini juga dapat menyebabkan penurunan suhu pembakaran, yang pada gilirannya mengakibatkan pembakaran yang kurang sempurna.

Gambar 1, dapat dianalisis bahwa nilai efisiensi boiler yang diperoleh bersifat fluktuatif, dengan rata-rata efisiensi boiler mengalami peningkatan setelah penerapan *co-firing* (Dwiaji, Y. C., 2023).



Gambar 1. Perbandingan Efisiensi Boiler Sebelum dan Setelah Co-Firing Berdasarkan Durasi Waktu Pengukuran

Tabel 2 menunjukkan bahwa rata-rata nilai SFC yang diperoleh selama

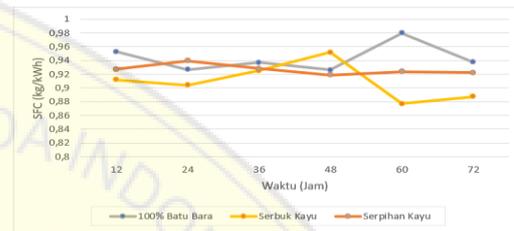
pengukuran tiga hari menurun dari 0,943363 kg/kWh menjadi 0,909744 kg/kWh saat co-firing dengan serbuk kayu dan 0,926758 kg/kWh saat menggunakan serpihan kayu. Penurunan nilai SFC dipengaruhi oleh perubahan dalam konsumsi bahan bakar, dimana penurunan tersebut mencerminkan peningkatan efisiensi pembakaran. Hal ini disebabkan karena lebih sedikit bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan setiap kWh energi listrik.

Tabel 2. Hasil Perhitungan SFC

Jam	SFC (kg/kWh)				
	Batu bara (100%)	Proses <i>co-firing</i>			
		Serbuk kayu		serpihan	
		efisien si	% <i>co-firing</i>	efisien si	% <i>co-firing</i>
12	0,95	0,91	2,84	0,93	2,81
24	0,93	0,90	2,88	0,94	2,78
36	0,94	0,93	3,28	0,93	2,79
48	0,93	0,95	3,18	0,92	2,82
60	0,98	0,88	2,96	0,92	2,83
72	0,94	0,89	2,91	0,92	2,83
mean	0,94	0,91	-	0,93	-

Gambar 2, dapat dianalisis bahwa nilai SFC yang diperoleh bersifat fluktuatif, dengan rata-rata nilai SFC mengalami penurunan setelah dilakukan *co-firing*. Penurunan nilai SFC terjadi karena karakteristik batu bara dan biomassa yang saling melengkapi. Biomassa umumnya memiliki kandungan volatile matter dan abu yang rendah, sementara batu bara memiliki kandungan volatile matter dan abu yang tinggi (Darmawan et al., 2023). Kandungan volatile matter yang tinggi dalam biomassa meningkatkan laju dan inisiasi pembakaran, sehingga memungkinkan pembakaran yang lebih lengkap dan efisien. Selain itu, kandungan abu yang rendah dalam biomassa berarti lebih banyak energi yang dihasilkan karena lebih banyak bahan bakar yang terbakar sepenuhnya tanpa terbuang sebagai abu. Kombinasi ini menghasilkan pembakaran

yang lebih stabil dan efisien, mengurangi kerugian energi dan meningkatkan pemanfaatan energi dari bahan bakar. Biomassa juga memiliki kandungan oksigen yang lebih tinggi, yang membantu proses pembakaran dan mengurangi kebutuhan udara tambahan, sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar keseluruhan.



Gambar 1. SFC sebelum dan setelah *co-firing* berdasarkan durasi waktu pengukuran

Tabel 3, menunjukkan rata-rata nilai efisiensi pembangkit yang diperoleh meningkat dari 19,53% menjadi 20,18% pada saat *co-firing* menggunakan serbuk kayu dan 20,03% saat menggunakan serpihan kayu.

Tabel 3. Hasil perhitungan efisiensi pembangkit

Jam	Efisiensi Pembangkit (%)				
	Batu bara (100%)	Proses <i>co-firing</i>			
		Serbuk kayu		serpihan	
		efisiensi	% <i>co-firing</i>	efisiensi	% <i>co-firing</i>
12	19,31	20,26	2,84	20,00	2,81
24	19,88	20,42	2,88	19,73	2,78
36	19,67	19,51	3,28	20,00	2,79
48	19,92	18,99	3,18	20,21	2,82
60	18,79	21,06	2,96	20,09	2,83
72	19,64	20,83	2,91	20,14	2,83
mean	19,53	20,18	-	20,03	-

Gambar 3, dapat dianalisis bahwa nilai efisiensi keseluruhan pembangkit yang diperoleh bersifat fluktuatif, dengan rata-rata efisiensi mengalami peningkatan setelah penerapan *co-firing*. Hal ini disebabkan oleh pemakaian bahan bakar

yang semakin sedikit namun menghasilkan daya yang lebih banyak.



Gambar 3. Perbandingan efisiensi pembangkit sebelum dan setelah co-firing berdasarkan durasi waktu pengukuran

Perhitungan konversi emisi sebelum dan setelah co-firing dapat dilihat pada Tabel 4.a dan Tabel 4.b.

Tabel 4.a Hasil perhitungan konversi emisi sebelum *co-firing*

Hari	Sebelum <i>co-firing</i>			
	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (kg/s)
1	12,59	80,33	0,80	11,59
2	10,84	79,84	0,80	10,31
3	71,68	95,91	15,99	15,99
4	71,33	102,24	15,99	14,55
5	10,84	68,65	0,79	10,00
6	10,84	72,05	0,79	10,79
Rerata	31,35	83,17	5,86	12,13

Tabel 4.b Hasil perhitungan konversi emisi setelah *co-firing*

Hari	Setelah <i>co-firing</i>			
	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (kg/s)
1	0,56	68,26	0,29	0,51
2	1,16	160,36	0,55	1,03
3	1,23	162,76	0,56	1,03
4	1,14	187,44	0,54	1,15
5	88,12	32,35	8,67	11,15
6	66,79	131,25	6,89	57,00
Rerata	26,50	123,74	2,92	10,29

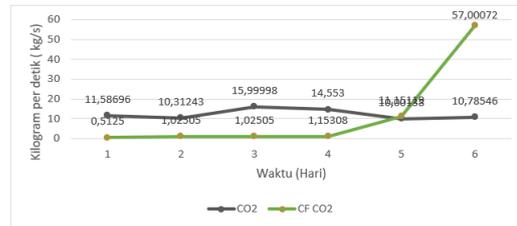
Rata-rata konsentrasi SO₂ mengalami penurunan dari 31,35 ppm menjadi 26,5 ppm, dimana penurunan konsentrasi SO₂ ini disebabkan oleh kandungan sulfur yang lebih rendah dalam biomassa dibandingkan dengan batu bara (Wang et al., 2021). Namun, konsentrasi tertinggi terjadi setelah dilakukan co-firing yaitu pada pengukuran hari ke-lima sebesar 88,1 ppm, di mana peningkatan ini terjadi karena peningkatan rasio batu bara dan penurunan rasio biomassa yang digunakan pada periode tersebut.

Pada Tabel 4.a dan Tabel 4.b, terlihat bahwa rata-rata konsentrasi NO_x mengalami peningkatan dari 83,17 ppm menjadi 123,73 ppm. Peningkatan NO_x ini dapat disebabkan oleh kandungan air dan oksigen dalam biomassa yang lebih tinggi, yang menyebabkan fluktuasi suhu dalam boiler. Fluktuasi suhu ini dapat meningkatkan pembentukan NO_x, karena variasi suhu yang lebih besar dapat meningkatkan reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara, menghasilkan lebih banyak NO_x, meskipun suhu rata-rata pembakaran tidak berubah signifikan.

Rata-rata konsentrasi CO mengalami penurunan dari 5,86 ppm menjadi 2,91 ppm, dimana penurunan konsentrasi CO disebabkan oleh kandungan karbon yang lebih rendah dalam biomassa dibandingkan batu bara, sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih bersih.

Rata-rata konsentrasi CO₂ sebelum co-firing adalah 12,13 kg/s kemudian setelah dilakukan co-firing menjadi 10,29 kg/s. Hal ini terjadi karena biomassa yang digunakan dalam co-firing berasal dari bahan organik yang menyerap CO₂ dari atmosfer selama pertumbuhannya. Oleh karena itu, ketika biomassa dibakar, CO₂ yang dilepaskan lebih sedikit dibandingkan dengan pembakaran batu bara yang mengeluarkan

CO₂ yang terperangkap dalam bumi selama jutaan tahun. Namun, konsentrasi tertinggi terjadi setelah dilakukan *co-firing* yaitu pada pengukuran hari keenam sebesar 57 kg/s, dimana peningkatan ini terjadi karena peningkatan rasio batu bara yang digunakan pada periode tersebut.



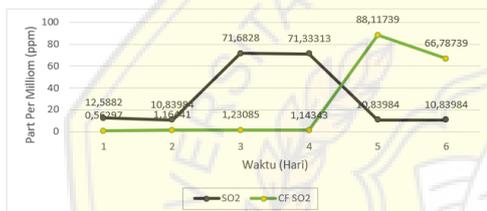
Gambar 7. Perbandingan CO₂ sebelum dan sesudah *co-firing*

Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7, menunjukkan perubahan konsentrasi gas buang pada PLTU dalam perbandingan SO₂, NO_x, CO, dan CO₂ sebelum dan setelah penerapan *co-firing*.

5. KESIMPULAN

Pengaruh *co-firing* dengan variasi jenis biomassa terhadap efisiensi boiler pada PLTU Jeranjang, dapat disimpulkan bahwa:

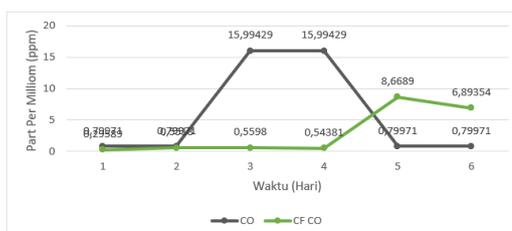
1. PLTU Jeranjang OMU menggunakan metode *direct co-firing*, yaitu mencampurkan langsung batubara dan biomassa sebelum dikirim ke *coal bunker*. Kekurangan metode ini adalah risiko *aglomerasi* yang bisa menyebabkan korosi pada peralatan *boiler* karena kandungan air dalam biomassa. Namun, kelebihanannya adalah lebih ekonomis karena tidak memerlukan investasi tambahan untuk peralatan khusus, sehingga dianggap efisien dan rasional dalam jangka pendek.
2. Data menunjukkan peningkatan rata-rata efisiensi *boiler* setelah *co-firing*, dari 73,26% menjadi 75,23% dengan serbuk kayu dan 72,08% dengan serpihan kayu. Rata-rata efisiensi pembangkit juga meningkat, menjadi 20,18% dengan serbuk kayu dan 20,03% dengan serpihan kayu, dibandingkan 19,53% dengan 100% batubara. SFC turun dari 0,94 kg/kWh menjadi 0,909 kg/kWh dengan serbuk kayu dan 0,926 kg/kWh dengan serpihan kayu. Ini menunjukkan bahwa *co-firing* meningkatkan efisiensi *boiler* dan pembangkit,



Gambar 4. Perbandingan SO₂ sebelum dan sesudah *co-firing*



Gambar 5. Perbandingan NO_x sebelum dan sesudah *co-firing*



Gambar 6. Perbandingan CO sebelum dan sesudah *co-firing*

dengan pembakaran yang lebih baik, terutama dengan serbuk kayu.

3. Implementasi *co-firing* di PLTU Jeranjang OMU menunjukkan penurunan emisi karbon dan polutan seperti SO₂ dan CO. Rata-rata konsentrasi SO₂ turun dari 31,35 ppm menjadi 26,5 ppm, dan CO dari 5,86 ppm menjadi 2,91 ppm. Namun, rata-rata konsentrasi NO_x meningkat dari 83,17 ppm menjadi 123,738 ppm. Rata-rata konsentrasi CO₂ turun dari 12,13 kg/s menjadi 10,29 kg/s, menunjukkan pengurangan emisi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alberto Manurung, T. (2020). *Studi Numerik Co-Firing Batubara Dan Biomassa Dengan Variasi Persentase Biomassa Terhadap Performa Pembangkit 400 Mw* [Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya]. https://repository.its.ac.id/73450/1/02111540000136-Undergraduate_Thesis.pdf
- Cahyo, N., Sulistiyowati, 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. <https://doi.org/10.61435/IJRED.2024.60234>
- Darmawan, K., Agus Setiawan, A., & Dewayanto, N. (2023). Potensi Perbandingan Pemanfaatan Kaliandra (*Calliandra Calothyrsus*) Dan Gamal (*Gliricidia Sepium*) Sebagai Co-Firing Untuk Pemenuhan Kebutuhan Bahan Bakar Pltu Sudimoro Pacitan. *Journal Altron; Journal of Electronics, Science & Energy Systems*, 2(02), 1–9. <https://doi.org/10.51401/altron.v2i02.2621>
- Dwi Ariyanto, A., & Mustakim, L. (2023). Analisis Pengujian Co-Firing Biomassa Pada Pltu Batubara Dengan Beberapa Bahan Bakar Alternatif Sebagai Upaya Bauran Energi Baru Terbarukan. *MARTABE: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 6, 08–104.
- Dwiwaji, Y. C. (2023). Analisis Pengaruh Co-Firing Biomassa Terhadap Kinerja Peralatan Boiler PLTU Batubara Unit 1 PT. XYZ. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 3(1), 7–15. <https://doi.org/10.52158/jamere.v3i1.445>
- Luhur, D. P. S. A., Partha, C. G. I., & Sukerayasa, I. W. (2025). Analisis nilai kalor serta laju uap dari boiler dengan variasi komposisi berat sampah organik dan anorganik pada pltsa. *SPEKTRUM*, 12(1), 35–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2025.v12.i01.p5>
- PERMEN L.H. & KEHUTANAN RI, Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia 1 (2019). <https://icel.or.id/wp-content/uploads/PERMENLHK-NO-15-TH-2019-ttg-BM-Emisi-Pembangkit-Listrik-Thermal.pdf>
- Sahda, N. T., Sentosa, J. M., & Andhani, L. (2022). Analisis Efisiensi Boiler menggunakan Metode Langsung di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Bantargebang. *Journal of Engineering Environmental Energy and Science*, 1(1), 39–48. <https://doi.org/10.31599/tgptae14>
- Tanbar, F., Purba, S., Samsudin, A. S., Supriyanto, E., Aditya, I. A., Pln, P. T., Penelitian, P., & Ketenagalistikan, P. (2021). Analisa Karakteristik Pengujian Co-Firing Biomassa Sawdust Pada Pltu Type

- Pulverized Coal Boiler Sebagai Upaya Bauran Renewable Energy. *Jurnal Offshore*, 5(2), 2549–8681.
- Triani, M., Tanbar, F., Cahyo, N., Sitanggang, R., Sumiarsa, D., & Lara Utama, G. (2022). The Potential Implementation of Biomass Co-firing with Coal in Power Plant on Emission and Economic Aspects: A Review. *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*, 3(November). <https://doi.org/10.20885/eksakta.vol3.iss2.art4>
- Wang, X., Rahman, Z. U., Lv, Z., Zhu, Y., Ruan, R., Deng, S., Zhang, L., & Tan, H. (2021). Experimental study and design of biomass co-firing in a full-scale coal-fired furnace with storage pulverizing system. *Agronomy*, 11(4), 1–11. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040810>

