

# PENGARUH CO-FIRING SERBUK KAYU KEDONDONG TERHADAP PERFORMA DAN EMISI GAS BUANG BRIKET BATU BARA

Edi Nuryanto <sup>1)</sup>, Sudarno <sup>1)</sup> ✉, Yoyok Winardi <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Mesin  
Universitas Muhammadiyah Ponorogo  
edinuryanto@yahoo.com  
darnotec@umpo.ac.id  
yoyok@umpo.ac.id

## Abstract

*Coal is the main fuel in steam power plants (PLTU) whose availability is dwindling. Realizing this, one of the efforts made is to mix coal with other fuels, known as Co-Firing. This is done as an effort to substitute new and renewable energy and is friendly to the environment. The purpose of this study was to find out the effect of a mixture of kedondong sawdust in coal on performance and exhaust emissions at PLTU. This research was conducted using quantitative methods based on experimental data. Kedondong wood powder as co-firing is varied, namely 5%, 10%, 15%, 20% and compared to 100% coal. The combustion process is carried out in the boiler and the data obtained is in the form of operating parameters and exhaust emissions. Based on this research, it was found that all operational parameter data were normal and were within the allowable standard limits. Likewise, exhaust emissions produced by both NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> show better results than the use of 100% coal.*

**Keywords:** Co-Firing of Coal, Kedondong Sawdust, Performance, Emissions.

## 1. PENDAHULUAN

Krisis energi merupakan salah satu krisis yang paling mendapatkan perhatian dunia saat ini. Dengan meningkatnya pemakaian listrik menyebabkan penggunaan sumber daya fosil berupa batu bara sebagai bahan bakar juga meningkat. Diketahui bahwa batu bara merupakan sumber utama untuk penyediaan energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), sehingga jika keadaan ini berlanjut maka dapat mengakibatkan adanya krisis pada sumber daya fosil <sup>[1-2]</sup>. Untuk itu berbagai upaya dilakukan untuk meminimalkan penggunaan sumber daya fosil khususnya batu bara tersebut <sup>[3-4]</sup>. Salah satu upaya yang dilakukan yaitu dengan mengkombinasikan atau mencampurkan bahan bakar biomassa dengan bahan bakar fosil yang disebut *Co-Firing*. *Co-firing* atau *co-combustion* merupakan suatu proses pembakaran dengan menggunakan dua jenis bahan bakar atau lebih yang berbeda, misalnya batu bara dengan biomassa yang dioperasikan secara bersamaan. Pembakaran dengan metode *co-firing* merupakan salah satu upaya mendapatkan energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan guna mengurangi penggunaan energi fosil <sup>[5-6]</sup>.

Keuntungan lain yang dihasilkan dengan dilakukannya *co-firing* yaitu dapat mengurangi kadar emisi gas buang, baik CO, SOX, dan NOX pada bahan bakar fosil khususnya batu bara. Besarnya nilai penurunan emisi gas buang untuk CO sebesar 22,58%, SOX sebesar 2-14,96%, dan NOX sebesar 2-15,2% <sup>[7-9]</sup>. PLTU yang menggunakan bahan

Corresponding Author:

✉ Sudarno

Received on: 2023-03-24

Revised on: 2024-03-20

Accepted on: 2024-03-20

bakar batu bara selain menghasilkan CO<sub>2</sub> juga menghasilkan beberapa gas beracun seperti CO, HCHO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan abu [10–13]. Untuk memperkuat upaya tersebut pemerintah telah diaturnya melalui Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) tahun 2019 hingga 2038 [14, 15]. *Co-firing* pada proses pembakaran pada pembangkit listrik tenaga uap dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu *Direct Co-Firing*, *Indirect Co-Firing*, dan *Paralel Combustion* [16, 17].

Untuk diluar negeri, metode *co-firing* telah banyak di terapkan di negara-negara Eropa dan Amerika Serikat. Diketahui bahwa proses *co-firing* memiliki dampak positif, baik terhadap lingkungan maupun biaya produksi khususnya untuk jangka panjang [18, 19]. Sedangkan di Indonesia, *co-firing* berhasil dilakukan pertama kalinya di PLTU Paiton. Campuran yang digunakan adalah *wood pellet* dengan besaran skema 1%, 3% dan 5% yang dilakukan secara bertahap. Hasil monitoring di *coal mill* didapatkan hasil yang aman untuk digunakan sebagai campuran batu bara karena mampu menurunkan emisi gas buang untuk SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> masing-masing sebesar 14,5% dan 15,2%. [8, 20, 21].

Pada penelitian ini, peneliti menggunakan *co-firing* serbuk kayu kedondong pada bahan bakar batu bara dan hasilnya dikomparasi dengan bahan bakar konvensional, yaitu 100% batu bara. Dipilihnya kayu kedondong dengan beberapa pertimbangan, diantaranya ketersediaannya disekitar lokasi pabrik sangat melimpah, kandungan sulphur rendah, volatile matter tinggi, abu rendah, dan nilai kalor yang baik. Dengan demikian akan mendukung sistem energi berkelanjutan dan ramah lingkungan.

*Co-firing* serbuk kayu kedondong ini merupakan katagori *woody biomass*, karena bahan kayu kedondong memiliki struktur kayu yang memiliki kandungan lignin yang tinggi [22]. Sedangkan dalam prosesnya perlu dilakukan pengolahan menjadi *woodchips* agar dapat dicampurkan dengan batu bara didalam wadah pembakaran secara bersamaan. Tipe pencampuran yang digunakan adalah *direct combustion* dimana prosesnya menggunakan cara pembakaran secara langsung dalam ruang bakar sama [23].

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan performa dan emisi gas buang yang dihasilkan dari efek *co-firing* serbuk kayu kedondong pada briket batu bara. Performa yang dimaksud mengacu pada parameter operasi *boiler* pada PLTU, yaitu *coal flow*, *furnace exit gas temperature* (FEGT), *bed temperature*, *air chamber pressure*, *total air flow*, *main steam pressure* (MSP), *main steam temperature* (MST), dan *drain bottom ash*. Guna mendapatkan performa *co-firing* terbaik maka persentase serbuk kayu kedondong divariasikan, yaitu 0%-20% dengan interval 5%.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada laboratorium yang ada di PLTU Bolok 2 dengan beban daya 16,5 MW, Desa Bolok Kecamatan Kupang Barat Kabupaten Kupang Nusa Tenggara Timur. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen.

### 2.1. Alat dan Bahan

Peralatan utama yang dipergunakan dalam penelitian ini berupa *boiler* tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB), *steam turbine tipe high pressure* dengan *single-cylinder*, dan *condenser steam turbine*. Beberapa peralatan pendukung lainnya, berupa barometer, *thermometer*, timbangan, *stopwatch*, dan alat uji emisi gas buang (*flue gas analyzer portable*). Sedangkan, bahan utama yang digunakan dalam penelitian yaitu briket batu bara dengan kalori rendah (*low rank coal*) dengan nilai kalor 4.262 kcal/kg dan serbuk kayu kedondong dengan nilai kalor 4.141 kcal/kg.

## 2.2. Metode

*Co-firing* kayu kedondong divariasikan, yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, kemudian masing-masing variasi dilakukan pengujian berupa parameter operasi *boiler* dan emisi gas buang. Pengujian parameter operasi *boiler* terdiri atas delapan parameter sebagaimana disebutkan diatas, sedangkan pengujian emisi gas buang dilakukan dengan cara mengambil data pada *continous emission monitoring systems* (CEMS).

Metode pengambilan data parameter operasi *boiler* dilakukan dengan alur sebagai berikut: 1) memastikan alat dan bahan yang digunakan sesuai standart, 2) menyiapkan bahan biomassa serbuk kayu kedondong yang telah melalui proses pengeringan, 3) proses mixing biomass dan batu bara sesuai variasi yang telah ditentukan, 4) proses pembakaran bahan bakar yang telah di *co-firing*, 5) proses pengambilan data. Pengambilan data dilakukan terhadap delapan parameter operasi yang masing-masing parameter diulang sebanyak 8 kali dengan rentang waktu setiap 30 menit. Delapan parameter operasi tersebut terdiri atas *coal flow*, *Furnace Exit Gas Temperature* (FEGT), *bed temperature*, *air chamber pressure*, *total air flow*, *Main Steam Pressure* (MSP), *Main Steam Temperature* (MST), dan *drain bottom ash*.

Sedangkan proses pengukuran emisi gas buang juga dilakukan sesuai dengan variasi *co-firing* kayu kedondong yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Pengukuran pada masing-masing variasi dilakukan sebanyak 6 kali dengan rentang waktu pengukuran setiap 30 menit sekali. Persentase *co-firing* dan masa masing-masing bahan bakar, sebagaimana yang di tunjukkan pada tabel 1 di bawah ini:

**Table 1.** Persentase *co-firing* dan massa masing-masing bahan bakar

No	Variasi <i>co-firing</i>	Massa batu bara (x 10 <sup>3</sup> kg)	Massa serbuk kayu kedondong (x 10 <sup>3</sup> kg)	Massa total bahan bakar (x 10 <sup>3</sup> kg)
1.	0%	60	-	60
2.	5%	57	3	60
3.	10%	54	6	60
4.	15%	51	9	60
5.	20%	48	12	60

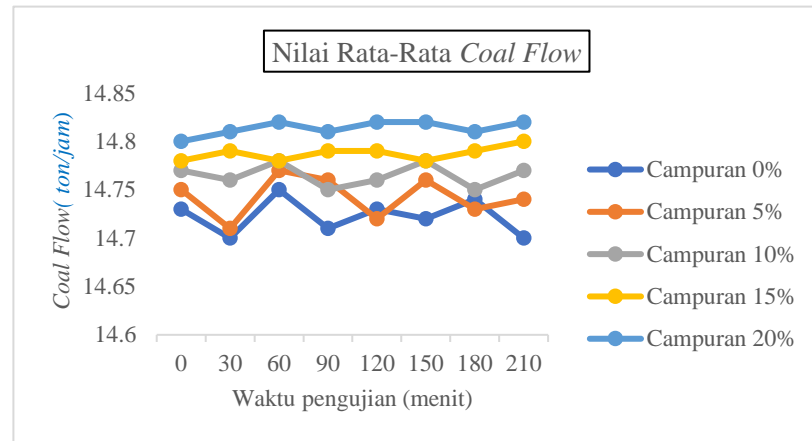
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Hasil Pengujian Parameter Operasi

#### a. *Coal flow*

Hasil pengujian *coal flow* ditunjukkan pada gambar 1. Dengan variasi campuran serbuk kayu kedondong 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% diperoleh nilai rata-rata *coal flow* masing-masing sebesar 14.72 ton/jam, 14.74 ton/jam, 14.76 ton/jam, 14.78 ton/jam, dan 14.81 ton/jam. Berdasarkan data tersebut, semakin besar persentase campuran serbuk kayu kedondong maka semakin besar pula rata-rata *coal flow* terpakai meskipun dengan peningkatan yang relatif kecil. Hal ini disebabkan oleh perbedaan nilai kalor antara bahan bakar batu bara dengan bahan bakar campuran serbuk kayu kedondong, semakin rendah nilai kalor maka semakin banyak pula konsumsi bahan bakar yang diperlukan pada saat proses pembakaran di *furnace*. Hasil ini diperkuat oleh temuan bahwa perbedaan komposisi dan jenis bahan

berpengaruh terhadap karakteristiknya yang meliputi nilai kalor, lama pembakaran, dan kecepatan pembakaran [24].



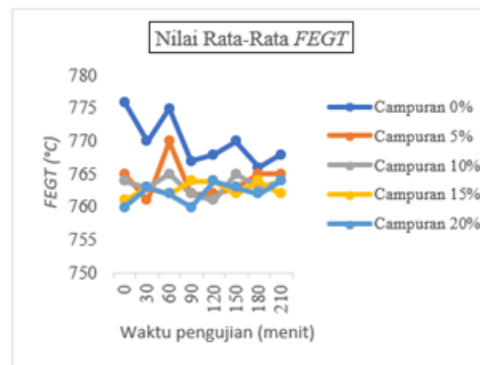
Gambar 1. Grafik hubungan antara nilai *coal flow* dengan waktu pengujian

### b. Furnace Exit Gas Temperature (FEGT)

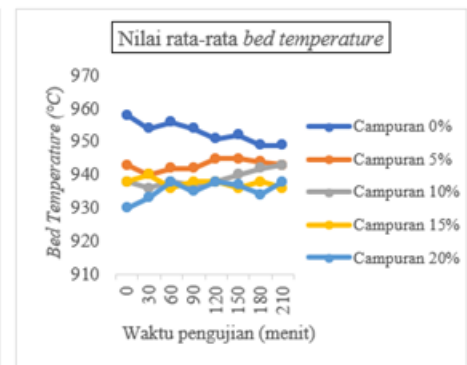
Gambar 2 menunjukkan, hasil bahwa parameter FEGT semakin kecil dengan peningkatan persentase serbuk kayu kedondong. Hal ini karena kandungan *volatile matter* serbuk kayu kedondong lebih besar dibandingkan batu bara sehingga serbuk kayu kedondong terbakar lebih dahulu. Penyebab lainnya adalah bahwa nilai kalor batu bara lebih tinggi dibandingkan nilai kalori serbuk kayu kedondong.

### c. Bed temperature

Berdasarkan Gambar 3, diperoleh bahwa semakin besar prosentase serbuk kayu kedondong maka *bed temperature* semakin kecil. Pada saat proses *co-firing*, *temperature furnace* semakin rendah seiring dengan kenaikan prosentase serbuk kayu kedondong, sehingga penyerapan energi panas oleh *bed material* juga lebih rendah. Hal tersebut terjadi akibat adanya nilai kalor bahan bakar *co-firing* yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai kalor batu bara. Namun penurunan yang terjadi masih dalam batasan normal, dimana batas normal operasi antara 850-970 °C sesuai dengan manual *book boiler* PLTU Bolok.



Gambar 2. Grafik hubungan FEGT dengan waktu pengujian



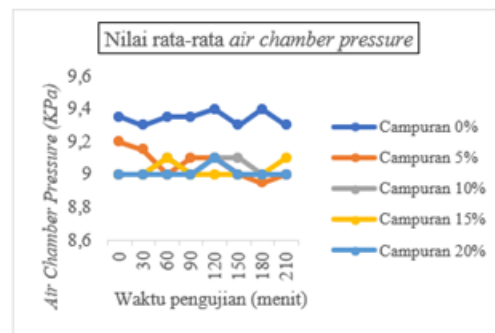
Gambar 3. Grafik hubungan *bed temperature* dengan waktu pengujian

#### d. Air chamber pressure

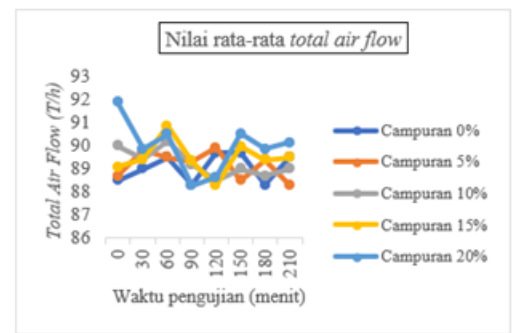
Gambar 4 menunjukkan, bahwa pola air chamber pressure saat operasi *co-firing* masih dalam rentang batasan untuk kondisi normal operasi yang berkisar diantara 8,9 kPa - 9,7 kPa, sesuai dengan manual *book boiler* PLTU Bolok Kupang. Dengan demikian maka pada setiap variasi *co-firing* masih dalam batas standar yang diijinkan.

#### e. Total Air Flow

Berdasarkan gambar 5, diperoleh bahwa nilai total air flow mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan prosentase campuran serbuk kayu kedondong. Namun kenaikan tersebut masih dalam kondisi normal operasi. Kenaikan total air flow tersebut disebabkan oleh rendahnya nilai kalor serbuk kayu kedondong dibandingkan dengan batu bara. Semakin rendah nilai kalor bahan bakar pada saat *co-firing* maka diperlukan juga penambahan jumlah bahan bakar, sehingga semakin banyak pula udara yang diperlukan untuk proses pembakaran.



**Gambar 4.** Grafik hubungan Air chamber pressure dengan waktu pengukuran

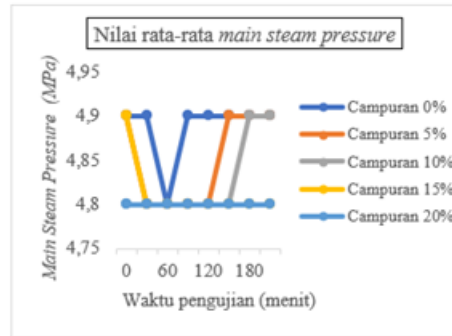


**Gambar 5.** Grafik hubungan total air flow pressure dengan waktu pengukuran

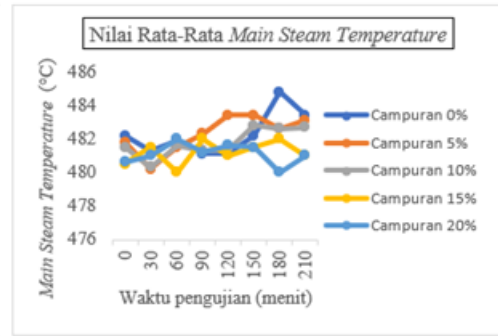
#### f. Main Steam Pressure (MSP) dan Main Steam Temperature (MST)

Pada gambar 6, ditemukan bahwa main steam pressure pada saat operasi masih dalam kondisi normal karena nilai hasil *co-firing* masih berada pada rentang tekanan ijin yaitu 4,80-4,90 MPa, sesuai dengan manual *book boiler* PLTU Bolok Kupang. Hal yang sama juga pada nilai main steam temperature, ditemukan bahwa hasil *co-firing* masih berada pada rentang temperature ijin yaitu pada rentang 480°C-485 °C. Hal ini sesuai dengan ketentuan yang ada pada manual *book boiler* pada PLTU Bolok Kupang, data tersebut sebagaimana ditunjukkan pada gambar 7.

Terjadinya sedikit ketidakstabilan data hasil pengujian khususnya untuk main steam pressure dimungkinkan disebabkan oleh beberapa *factor*, diantaranya: perbedaan nilai kalor yang ada pada batu bara dan *biomassa*; proses *mixing* yang kurang merata, sehingga menyebabkan kurang homogenya campuran bahan bakar, dan operasi boiler yang masih secara manual dalam mengatur jumlah aliran bahan bakar dan udara pada *furnace*.



**Gambar 6.** Grafik hubungan *main steam pressure* dengan waktu pengukuran



**Gambar 7.** Grafik hubungan *main steam temperature* dengan waktu pengukuran

**g. Drain Bottom Ash**

Berdasarkan hasil pengujian bahwa tidak ditemukan adanya potensi aglomerasi pada drain *button ash* selama proses *co-firing* , Aglomerasi sendiri merupakan pengumpulan partikel menjadi satu (menggumpal), yang menyebabkan partikel menjadi padat, keras serta dapat menyebabkan tertutupnya saluran drain *button ash*, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 8 dibawah ini.



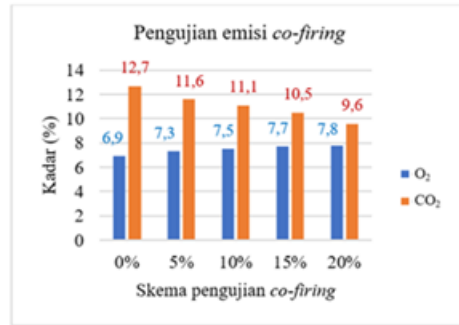
**Gambar 8.** Hasil parameter operasi *drain button ash*

**3.2. Hasil Pengujian Emisi Gas Buang**

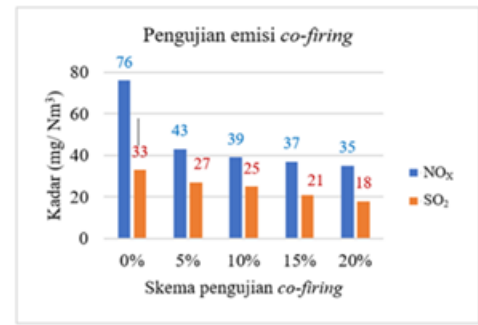
Pengujian emisi gas buang dilakukan pada delapan titik di *area air heater* dengan menggunakan *flue gas analyzer portable*. Lokasi pengambilan dapat dilihat pada gambar 9 dibawah, daerah didalam batas garis merah pada gambar menunjukkan *hole* pengambilan sample pada emisi gas buang.



**Gambar 9.** Pengambilan data emisi gas buang



**Gambar 10.** Grafik Pengujian Emisi Gas Buang O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>



**Gambar 11.** Grafik Pengujian Emisi Gas Buang NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub>

Berdasarkan hasil pengukuran emisi gas buang sebagaimana ditunjukkan pada gambar 10 ditemukan bahwa untuk emisi O<sub>2</sub> menghasilkan nilai rata-rata yang terus meningkat dengan peningkatan *co-firing*, nilai terendah pada campuran serbuk kayu kedondong 0% yaitu sebesar 6,9% dan tertinggi pada campuran 20% yaitu sebesar 7,8%. Peningkatan tersebut terjadi karena nilai kalor pada bahan bakar *co-firing* lebih rendah sehingga diperlukan penambahan jumlah udara untuk dapat memaksimalkan proses pembakaran di dalam *furnace*.

Sedangkan kondisi yang berkebalikan terjadi pada emisi CO<sub>2</sub> dimana semakin besar campuran serbuk kayu kedondong kadar CO<sub>2</sub> semakin turun. Pada campuran serbuk kayu kedondong 0% menghasilkan CO<sub>2</sub> sebesar 12,7% sedangkan pada campuran serbuk kayu kedondong 20% menghasilkan CO<sub>2</sub> sebesar 9,6%. Penurunan tersebut terjadi karena dengan penambahan jumlah udara pada proses pembakaran maka pembakaran menjadi lebih sempurna.

Berdasarkan gambar 11 ditemukan bahwa semakin besar campuran serbuk kayu kedondong maka kadar emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> mengalami penurunan. Emisi tertinggi pada 0% campuran serbuk kayu kedondong, masing-masing sebesar 76 mg/Nm<sup>3</sup> dan 33 mg/Nm<sup>3</sup>. Sedangkan pada 20% campuran serbuk kayu kedondong, masing-masing sebesar 35 mg/Nm<sup>3</sup> dan 18 mg/Nm<sup>3</sup>. Nilai emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> pada masing-masing variasi campuran serbuk kayu kedondong yang dihasilkan masih memenuhi syarat sesuai dengan dengan baku mutu emisi yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia dengan nilai maksimalnya 200 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian terkait parameter operasi, ditemukan bahwa semakin besar prosentase campuran serbuk kayu kedondong maka semakin besar pula nilai rata-rata *coal flow* dan *total air flow* terpakai. Sedangkan FEGT dan *bed temperature* semakin kecil dengan peningkatan prosentase serbuk kayu kedondong. Hal ini karena nilai kalor batu bara lebih tinggi dibandingkan serbuk kayu kedondong. Dengan *volatile matter* yang besar maka serbuk kayu kedondong terbakar lebih dahulu dengan temperatur *furnace* yang lebih rendah, namun penurunan temperatur tersebut masih dalam batas ijin. Ditemukan pula bahwa *main steam pressure* dan *main steam temperature* dari seluruh variasi campuran, masih dalam batas ijin sesuai ketentuan pada manual *book boiler* pada PLTU Bolok Kupang serta tidak ditemukan adanya potensi aglomerasi pada *drain button ash* selama proses *co-firing*.

Berdasarkan hasil pengujian emisi gas buang, ditemukan bahwa emisi O<sub>2</sub> terus meningkat dengan peningkatan *co-firing*. Peningkatan tersebut terjadi karena dengan rendahnya nilai kalor serbuk kayu kedondong maka diperlukan udara lebih untuk optimalisasi pembakaran. Efek dari pembakaran sempurna tersebut maka emisi CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>

dan SO<sub>2</sub> semakin kecil dengan peningkatan serbuk kayu kedondong. Berdasarkan temuan tersebut bahwa emisi gas buang yang dihasilkan masih memenuhi syarat sesuai dengan dengan baku mutu emisi yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Direktur Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) Bolok Unit 2 Desa Bolok Kecamatan Kupang Barat Kabupaten Kupang Nusa Tenggara Timur atas bantuan dan kerjasamanya. Kepala Laboratorium Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Ponorogo atas dukungan dan fasilitasnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Irawan, A., “*Potential and opportunity of co-firing power plant in indonesia through torrefaction of empty fruit bunch (efb) - a review*”, *World Chemical Engineering Journal*, v. 5, n. 1, pp. 25–32, Sept. 2021.
- [2] I. U AND Dewata, I., *Pengelolaan sumber daya alam*, 1 ed., Yogyakarta, CV. Budi Utama, 2020.
- [3] IESR, Simanjunta, U., Menyongsong naiknya emisi pasca pandemi, aksi iklim Indonesia dinilai sangat tidak memadai, Siaran Pers IESR (Institute For Essential Service Reform), Jakarta, 2021, <https://iesr.or.id/menyongsong-naiknya-emisi-pasca-pandemi-aksi-iklim-indonesia-dinilai-sangat-tidak-memadai>. Diakses: Mei 2021.
- [4] Asmarini, W., Kurangi batu bara, PLN berhasil *co-firing* di 17 PLTU 189 MW, CNBC Indonesia, Jakarta, 2021, <https://www.cnbcindonesia.com/news/20210621140752-4-254713/kurangi-batu-bara-pln-berhasil-co-firing-di-17-pltu-189-mw>. Diakses: Januari 2022.
- [5] Wijayapala, W., Mudunkotuwa, S.R.H., “*Co-firing of biomass with coal in pulverized coal fired boilers at Lakvijaya power plant: a case study*”, *The Institution of Engineers*, Sri Lanka, v. 49, n. 3, April 2016.
- [6] Prihandana, R., Hendroko, R., *Energi hijau*, 2 ed., Depok, Penebar Swadaya, 2008.
- [7] Febri, T., Sahrijal, P., Agus, S.S., Eko, S., Indra, A.A., “Analisa karakteristik pengujian *co-firing biomassa sawdust* pada PLTU *type pulverized coal boiler* sebagai upaya bauran *renewable energy*”, *Jurnal Offshare*, v. 5, n. 2, pp. 50-56, Desember 2021.
- [8] Handoyo, “Dampak *co-firing* 5% biomassa terhadap efisiensi boiler PLTU batu bara dan penurunan rumah kaca (studi kasus PLTU Pelabuhan Ratu)”, Thesis, Institut Teknologi Sepuluh November, 2023.
- [9] Andreas, N.D., Marbun, “Karakteristik emisi pembakaran tandan kosong kelapa sawit dengan *co-firing* batu baravariasi *Air Fuel Ratio* (AFR)”, Tugas Akhir, Universitas Lampung, 2023.
- [10] Hamdi., *Energi terbarukan*, 1 ed., Jakarta, Kencana, 2016.
- [11] Winaya, I.N.S., Susila, I.B.A.D., “*Co-firing sistem fluidized bed* berbahan bakar batubara dan ampas tebu”, *Jurnal Energi dan Manufaktur*, v. 4, n. 2, pp. 180-188, Oktober 2010.
- [12] Wihardjo, S.D., Rahmayanti, H., *Pendidikan lingkungan hidup*, 1 ed., Pekalongan, PT. Nasya Expanding Management, 2021.



- [13] Priyotamtama, P.W., Merawat bumi, rumah kita bersama, Sanata Dharma University Press, 2021.
- [14] Info By PJB., Terdepan di Indonesia PT. PJB menambah co-firing PLTU secara komersil, Surabaya, 2022, <https://www.ptpjb.com/terdepan-di-indonesia-pt-pjb-menambah-co-firing-pltu-secara-komersil/>. Diakses: Nopember 2022.
- [15] Tasrif, A., Direktorat Jenderal EBTKE - Kementerian ESDM, Siaran Pers. HUMAS EBTKE, pp. 1–4, 2020, <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/06/02/2871/indonesia.berkomitmen.capai.net.zer.o.emission>. Diakses: Maret 2022.
- [16] Roni, M.S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M, Lein., W., Johnson, S., “*Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 78, pp. 1089–1101, Oktober 2017.
- [17] Kong, G.T., Peran biomassa bagi energi terbarukan, Elex Media Komputindo, 2013.
- [18] Poerwanto, R., Siregar, I.Z., Suryani, A., Merevolusi revolusi hijau, pemikiran guru besar IPB, 1 ed., Bogor, IPB Press, 2012.
- [19] Sami, M.K., Annamalai., Wooldridge, M., “*Co-firing of coal and biomass fuel blends*”, *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 27, n. 2, pp. 171–214, February 2001.
- [20] Sugiyanto, Abdillah, M., Nugroho, A., Pengujian dan simulasi *co-firing* bahan bakar batubara dengan biomassa pada PLTU Paiton 2x400MW, EBTKE ESDM, 2019.
- [21] Pratiwi, I., Amanda, G., Ini realisasi *co-firing* PLN di 28 PLTU, *Republika.co.id*, Jakarta, 2022, <https://www.republika.co.id/berita/r9jtt5423/ini-realisasi-cofiring-pln-di-28-pltu>. Diakses: Desember 2022.
- [22] Nurika, I., Suhartini, S., Bioenergi dan *biorefinery*, 1 ed., Malang, UB Press, 2019.
- [23] Suganal, S., Hudaya, G.K., “Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa torefaksi dalam bentuk briket (Skala laboratorium)”, *Jurnal. Teknologi Mineral dan Batubara*, v. 15, n. 1, pp. 31–48, Januari 2019.
- [24] Wibowo, R., “Analisis thermal nilai kalor briket ampas batang tebu dan serbuk gergaji”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 10, n. 1, pp. 9–15, Mei 2019.