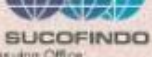


LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil pengujian Batu bara PLTU Bolok dari Sucofindo

To Certificate No. 11157/AOBOAN
Date: September 20, 2020

Page 1 of 1


SUCOFINDO
 Issuing Office
 Jl. Jend. A. Yani, No. 315 Surabaya 60234, Indonesia
 Phone/Fax: +62 31 6470647/8470563
 Email: lab@surabaya@sucofindo.co.id

CERTIFICATE OF SAMPLING AND ANALYSIS

Parameters	Units	Results				Methods
		ARB	ADB	DB	DAFB	
Proximate Analysis						
- Total Moisture	% wt	33.98	---	---	---	ASTM D 3302M-19
- Moisture In Analysis Sample	% wt	---	14.78	---	---	ASTM D 3173-17
- Ash Content	% wt	2.07	2.67	3.13	---	ASTM D 3174-18
- Volatile Matter	% wt	32.84	42.39	49.74	51.35	ASTM D 3175-18
- Fixed Carbon	% wt	31.11	40.16	47.13	48.65	ASTM D 3172-13
Total Sulfur	% wt	0.09	0.11	0.13	0.13	ASTM D 4239-18
Gross Calorific Value	Kcal/Kg	4286	5532	6491	6701	ASTM D 5865-19
Ultimate Analysis:						
- Total Moisture	% wt	33.98	---	---	---	ASTM D 3302M-19
- Moisture In Analysis Sample	% wt	---	14.78	---	---	ASTM D 3173-17
- Ash Content	% wt	2.07	2.67	3.13	---	ASTM D 3174-18
- Carbon	% wt	45.73	59.03	69.27	71.51	ASTM D 5373-16
- Hydrogen (*)	% wt	3.13	4.04	4.74	4.89	ASTM D 5373-16
- Nitrogen	% wt	0.64	0.82	0.95	0.99	ASTM D 5373-16
- Sulfur	% wt	0.09	0.11	0.13	0.13	ASTM D 4239-18
- Oxygen (*)	% wt	14.36	18.65	21.77	22.48	ASTM D 3176-15
HGI	Point index	57				ASTM D 409M-16
Size Distribution						
+ 70 mm	% wt	---				ASTM D 4749-87 (2012)
- 70 mm	% wt	100				
- 50 mm	% wt	95.98				
- 32 mm	% wt	77.73				
- 2.38 mm	% wt	18.81				
Ash Analysis						
- CaO	% wt	39.09				ASTM D 4326-13
- SiO ₂	% wt	20.53				
- MgO	% wt	20.53				
- Fe ₂ O ₃	% wt	16.27				
- Al ₂ O ₃	% wt	6.00				
- Na ₂ O	% wt	2.01				
- K ₂ O	% wt	0.47				
- TiO ₂	% wt	0.43				
- MnO ₂	% wt	0.24				
- P ₂ O ₅	% wt	0.09				
- SO ₃	% wt	5.69				
Ash Classified						
LIGNITIC						
Slagging Factor		2.91				PO - BB - 43
Fouling Factor		2.01	(Medium)			
Ash Fusion Temperature						
		Reducing		Oxidizing		ASTM D 1857M-18
- Initial Deformation	°C	1330		1360		
- Softening	°C	1340		1380		
- Hemisphere	°C	1360		1390		
- Flow	°C	1370		1400		

ARB : As Received Basis DB : Dry Basis (*) Hydrogen and Oxygen do not include H and O₂ sample moisture
ADB : Air Dried Basis DAFB : Dry Ash Free Basis

Lampiran 2. Hasil Pengujian Sample Woodchips Kayu Kedondong dari Sucofindo

{Nomor Sertifikat}
Date: September 21, 2020

Issuing Office:
Jl. Jend. A. Yani, No. 315 Surabaya 60234, Indonesia
Phone/Fax: +62 31 5470547/5470635
Email: labsurabaya@sucfindo.co.id

REPORT OF ANALYSIS

CLIENT : **PT. PEMBANGKIT LISTRIK NEGERA (PLN)**
Jl. Trunojoyo M 1 No.135 Melawai Kebayoran Baru
Jakarta Selatan – DKI Jakarta

THE FOLLOWING SAMPLE (S) WAS/ WERE SUBMITTED AND IDENTIFIED BY CLIENT AS :

TYPE OF SAMPLE : **SAWDUST**
DATE OF RECEIVED : September 07, 2020
DATE OF ANALYSIS : September 08 up to 21, 2020
TEST REQUIRED : Proximate & Ultimate analysis
DESCRIPTION OF SAMPLE : Form : Sawdust
Weight / Volume : ± 5 Kg
Packing : Unsealed plastic sack
SAMPLE IDENTIFICATION : **PELLET KOMPOS 4 HARI**
(STATED BY CLIENT)

We have tested the sample (s) submitted and the following results were obtained :

Parameters	Unit	AR (As Received)	DB (Dry Basis)	Test Method
Total Moisture	% wt	9.33	---	ASTM D 2961 – 17
Moisture in the Analysis Sample	% wt	---	---	ASTM D 3173 – 17
Ash Content	% wt	2.05	2.26	ASTM D 3174 – 18
Volatile Matter	% wt	71.33	78.67	ASTM D 3175 – 18
Fixed Carbon	% wt	17.29	19.07	ASTM D 3172 – 13
Total Sulfur	% wt	0.08	0.09	ASTM D 4239 – 18
Gross Calorific Value	Kcal/Kg	4141	4567	ASTM D 5865 – 19

Ultimate Analysis	Unit	AR	DB	Test Method
Carbon	% wt	43.88	48.40	ASTM D 5373 – 16
Hydrogen	% wt	5.34	5.89	ASTM D 5373 – 16
Nitrogen	% wt	0.53	0.58	ASTM D 5373 – 16
Oxygen	% wt	38.79	42.78	ASTM D 3176 – 15

This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucfindo.co.id

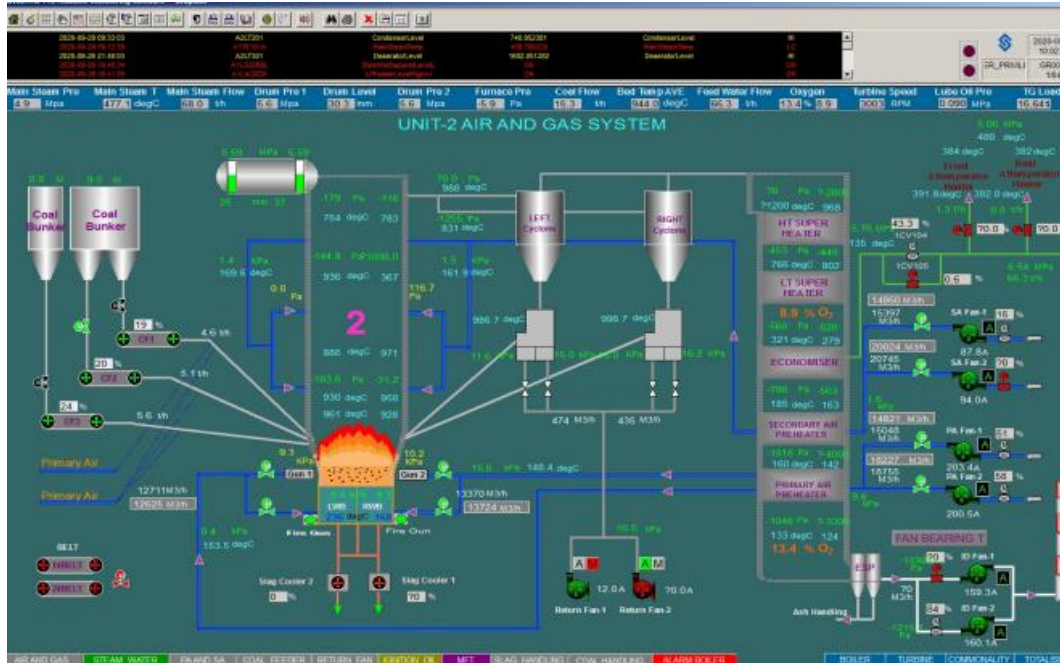
Dept. of Commercial 3 – Coal and Minerals

7103052001939.04

I Gusti Ngurah Arya Wijaya

SBY201400001885

Lampiran 3. Pengamatan *Distributed Control System* (DCS) Boiler



Lampiran 4. Surat Keterangan Plagiarisme



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PONOROGO
LEMBAGA LAYANAN PERPUSTAKAAN
Jalan Budi Utomo 10 Ponorogo 63471 Jawa Timur Indonesia
Telp (0352) 481124, 487662 Fax (0352) 461796,
Website: library.umpo.ac.id
TERAKREDITASI A
(SK Nomor 00137/LAP.PT/III.2020)

SURAT KETERANGAN
HASIL SIMILARITY CHECK KARYA ILMIAH MAHASISWA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PONOROGO

Dengan ini kami nyatakan bahwa karya ilmiah dengan rincian sebagai berikut:

Nama : Edi Nuryanto

NIM : 18511243

Prodi : S1 Teknik Mesin

Judul : Pengaruh Co-Firing Serbuk Kayu Kedondong Terhadap Performa Dan Emisi Gas Buang Briket Batu Bara

Dosen pembimbing :

1. Dr. Sudarno, S. T., M. T.,

2. Yoyok Winardi, S. T., M. T.,

Telah dilakukan check plagiasi berupa Skripsi di L2P Universitas Muhammadiyah Ponorogo dengan prosentase kesamaan sebesar 12 %

Demikian keterangan ini dibuat untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Ponorogo, 16 Desember 2022

Petugas pemeriksa



(Mohamad Ulil Albab, SIP)

NIK.1989092720150322

Nb: Dosen pembimbing dimohon untuk mengecek kembali keaslian soft file karya ilmiah yang telah diperiksa melalui Turnitin perpustakaan

REKAYASA MESIN

eISSN xxxx-xxxx artikel xx, pp. xxx-xxx, 2022

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

Abstrak

Batu bara merupakan bahan bakar utama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang ketersediaan semakin menipis. Menyadari hal tersebut maka salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan mencampur batu bara dengan bahan bakar lain yang dikenal dengan istilah Co-Firing. Hal ini dilakukan sebagai upaya substitusi energi baru dan terbarukan serta ramah terhadap lingkungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan pengaruh campuran serbuk kayu kedondong pada batu bara terhadap performa dan emisi gas buang pada PLTU. Penelitian ini dilakukan dengan metode kuantitatif berdasarkan data eksperimen. Serbuk kayu kedondong sebagai co-firing di variasikan yaitu 5%, 10%, 15%, 20% dan dikomparasikan dengan 100% batu bara. Proses pembakaran dilakukan dalam boiler dan data yang diperoleh berupa data peramater operasi dan emisi gas buang. Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa semua data peramater operasi normal dan berada pada batas standar yang diijinkan. Demikian juga emisi gas buang yang dihasilkan baik NO_x maupun SO₂ menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan 100% batu bara

Edi Nuryanto

Program Studi Teknik Mesin.
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jawa Timur, Indonesia
edinyanto@vahoo.com

Sudarno

Program Studi Teknik Mesin.
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jawa Timur, Indonesia
damoteco@umma.ac.id

Yoyok Winardi

Program Studi Teknik Mesin.
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jawa Timur, Indonesia
Yoyok@umpo.ac.id

Edi Nuryanto

Program Studi Teknik Mesin.
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jawa Timur, Indonesia
edinyanto@yahoo.com

Sudarno

Program Studi Teknik Mesin.
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jawa Timur, Indonesia
damofes@umpo.ac.id

Yoyok Winardi

Program Studi Teknik Mesin.
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jawa Timur, Indonesia
Yoyok@umpo.ac.id

*Kata kunci: Co-Firing Batu Bara, Serbuk Kayu
Kedondong, Performa, Emisi.*

I. 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 PLTU, sehingga jika keadaan ini berlanjut maka dapat mengakibatkan adanya krisis pada sumber daya fosil [1][2]. Untuk itu berbagai upaya dilakukan untuk meminimalkan penggunaan sumber daya fosil khususnya batu bara tersebut.[3][4] 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 [5][6].

Keuntungan lain yang dihasilkan dengan dilakukannya *co-firing* yaitu dapat mengurangi kadar emisi gas buang, baik CO₂, SO_x, dan NO_x pada bahan bakar fosil. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), yang menggunakan bahan bakar batu bara selain menghasilkan CO₂ juga menghasilkan beberapa gas beracun seperti CO, HCHO, CH₄, NO₂, SO₂, dan abu [7][8][9][10]. Untuk memperkuat upaya tersebut pemerintah telah diaturnya melalui Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) tahun 2019 hingga 2038 [11][12]. *Co-firing* pada proses pembakaran pada pembangkit listrik tenaga uap dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu *Direct Co-Firing*, *Indirect Co-Firing*, dan *Parallel Combustion* [13][14].

Untuk di luar 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 [15][16]. 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 aman untuk digunakan sebagai campuran batu bara untuk pemasok energi listrik dan juga emisi gas yang dihasilkan memiliki penurunan dibandingkan menggunakan 100% batubara sebagai bahan bakar [17][18].

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. *Co-firing* serbuk kayu kedondong ini merupakan kategori *woody biomass*, karena bahan kayu kedondong memiliki struktur kayu yang memiliki kandungan *lignin* yang tinggi [19]. 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 [20].

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 prosentasi 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

Alat yang digunakan dalam penelitian adalah :

- (1) Boiler tipe *Circulating Fluidized Bed (CFB)*
- (2) Steam Turbine, high pressure, single-cylinder, condenser steam turbine
- (3) Peralatan lain, yaitu timbangan, stopwatch, alat ukur emisi gas buang.

Bahan yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut :

- (1) Briket batu bara dengan kalori rendah/ *low rank* dengan nilai kalor 4.262 kcal/kg.
- (2) Serbuk kayu kedondong dengan nilai kalor sekitar 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 *continuous 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. Presentase *co-firing* dan masa masing-masing bahan bakar, sebagaimana di tunjukkan pada table 1 di bawah ini:

Table 1. Presentase *co-firing* dan masa masing-masing bahan bakar

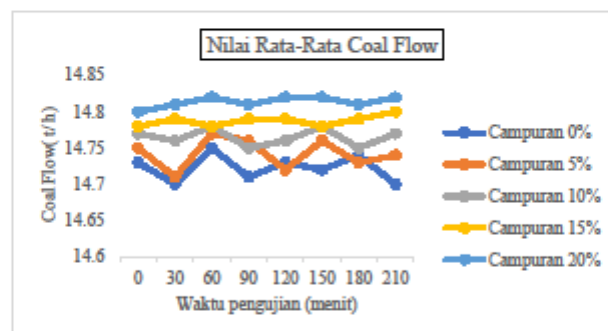
No	Variasi <i>co-firing</i>	Masa batu bara ($\times 10^3$ kg)	Masa serbuk kayu kedondong ($\times 10^3$ kg)	Masa total bahan bakar ($\times 10^3$ kg)
1.	0%	60	-	60
2.	5%	57	3	60
3.	10%	54	6	60
4.	15%	51	9	60
5.	20%	48	12	60

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 presentase 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*.



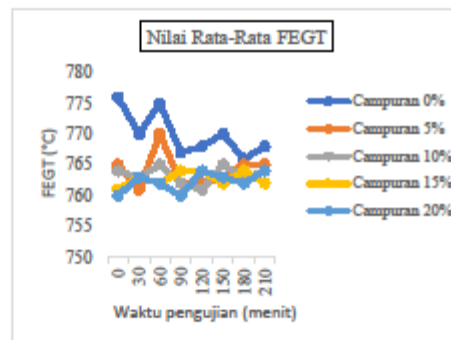
Gambar 1. Grafik hubungan antara nilai *coal flow* dengan waktu pengujian

b. Furnace exit gas temperature (FEGT)

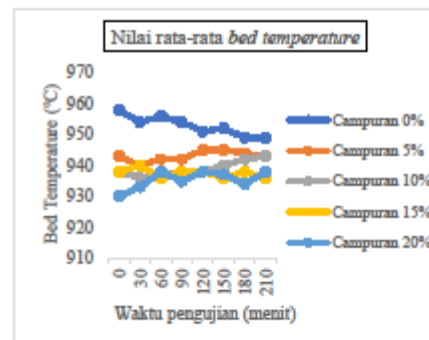
Berdasarkan grafik pada gambar 2, diperoleh hasil bahwa parameter *FEGT* semakin kecil dengan peningkatan prosentase serbuk kayu kedondong. Hal ini karena kandungan *volatile matter* serbuk kayu kedondong lebih besar dibandingkan batu bara sehingga serbuk kayu kedondong terbakar lebih dahulu. Penyebab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

c. Bed temperature

Berdasarkan grafik pada 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

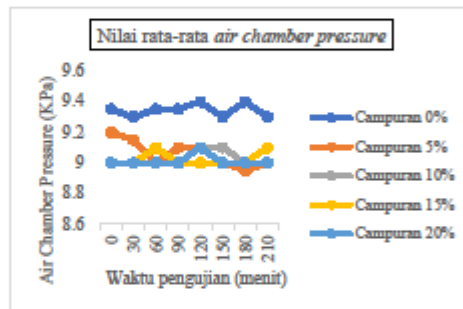
d. Air chamber pressure

Berdasarkan grafik pada gambar 4, terlihat bahwa tren *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.

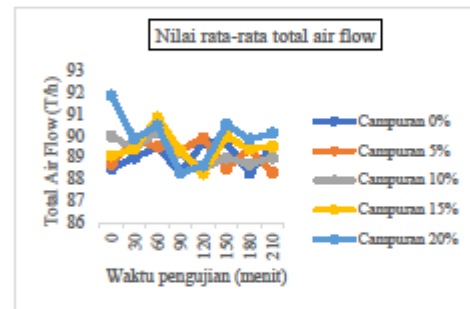
e. Total Air Flow

Berdasarkan grafik pada 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

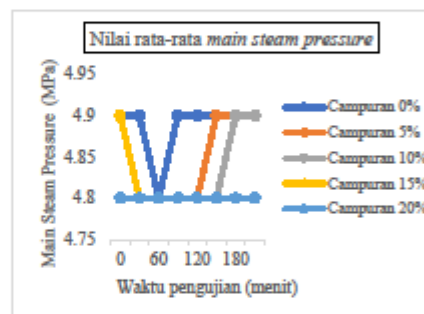


Gambar 5. Grafik hubungan total *air flow* dengan waktu pengukuran

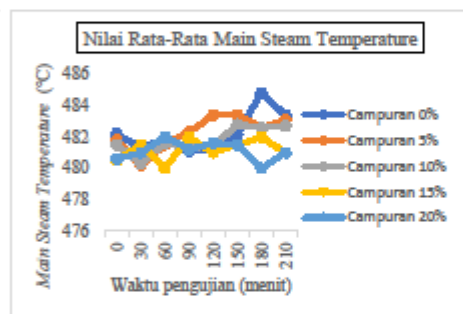
f. *Main Steam Pressure (MSP) dan Main Steam Temperature (MST)*

Berdasarkan grafik 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.



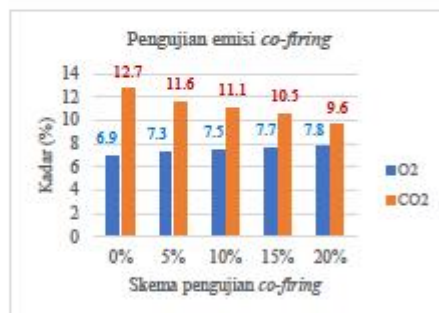
Gambar 8. Hasil parameter operasi *drain button ash*

3.2 Hasil Pengujian Emisi Gas Buang

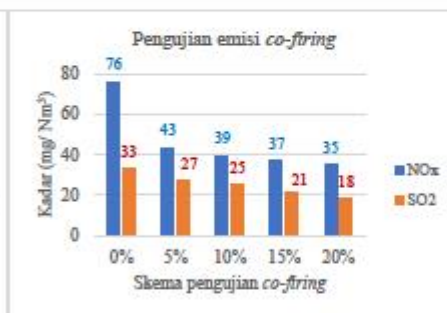
Pengujian emisi gas buang dilakukan pada delapan titik di area *air heater* dengan menggunakan *flue gas analyzer portable*. Lokasi pengambilan dapat dilihat pada gambar 9 dibawah, daerah didalam batas garis merah pada gambar menunjukkan *hole* pengambilan sample pada emisi gas buang.



Gambar 9. Pengambilan data emisi gas buang



Gambar 10. Grafik Pengujian Emisi Gas Buang O₂ dan CO₂



Gambar 11. Grafik Pengujian Emisi Gas Buang NO_x dan SO₂

Berdasarkan hasil pengukuran emisi gas buang sebagaimana ditunjukkan pada gambar 10 ditemukan bahwa untuk emisi O_2 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_2 dimana semakin besar campuran serbuk kayu kedondong kadar CO_2 semakin turun. Pada campuran serbuk kayu kedondong 0% menghasilkan CO_2 sebesar 12,7% sedangkan pada campuran serbuk kayu kedondong 20% menghasilkan CO_2 sebesar 19,6%. 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_x dan SO_2 mengalami penurunan. Emisi tertinggi pada 0% campuran serbuk kayu kedondong, masing-masing sebesar 76 mg/Nm^3 dan 33 mg/Nm^3 . Sedangkan pada 20% campuran serbuk kayu kedondong, masing-masing sebesar 35 mg/Nm^3 dan 18 mg/Nm^3 . Nilai emisi NO_x dan SO_2 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^3 .

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*. *Agglomerasi sendiri merupakan pengumpulan partikel menjadi satu (menggumpal), yang menyebabkan partikel menjadi padat, keras serta dapat menyebabkan tertutupnya saluran drain button ash.*

Berdasarkan hasil pengujian emisi gas buang, ditemukan bahwa emisi O_2 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_2 , NO_x dan SO_2 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.

5. 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.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Irawan, "Potential and Opportunity of Co-Firing Power Plant in Indonesia Through Torrefaction of Empty Fruit Bunch (EFB) - A Review," *World Chem. Eng. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 25–32, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ>
- [2] I. U and I. Dewata, *Pengelolaan Sumber Daya Alam*, Pertama. Yogyakarta: CV Budi Utama, 2020.
- [3] IESR and U. Simanjuntak, "Menyongsong Naiknya Emisi Pasca Pandemi, Aksi Iklim Indonesia Dinilai Sangat Tidak Memadai," *Siaran Pers IESR (Institute For Essential Service Reform)*, Jakarta, 2021. [Online]. Available: <https://iesr.or.id/menyongsong-naiknya-emisi-pasca-pandemi-aksi-iklim-indonesia-dinilai-sangat-tidak-memadai>
- [4] W. Asmarini, "Kurangi Batu Bara, PLN Berhasil Co-Firing di 17 PLTU 189 MW," *CNBC Indonesia*, Jakarta, 2021. [Online]. Available: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20210621140752-4-254713/kurangi-batu-bara-pln-berhasil-co-firing-di-17-pltu-189-mw>
- [5] W. Wijayapala and S. R. H. Mudunkotuwa, "Co-firing of biomass with coal in pulverized coal fired boilers at Lakvijaya Power Plant: A case study," *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka*, vol. 49, no. 3, 2016.
- [6] R. Prihandana and R. Hendroko, *Energi Hijau*, Kedua. Depok: Penebar Swadaya, 2008.
- [7] Hamdi, *Energi Terbarukan*, Pertama. Jakarta: Kencana, 2016.
- [8] I. N. S. Winaya and I. B. A. D. Susila, "Co-firing sistem fluidized bed berbahan bakar batubara dan ampas tebu," *J. Energi dan Manufaktur*, 2010.
- [9] S. D. Wihardjo and H. Rahmayanti, *Pendidikan Lingkungan Hidup*, Pertama. Pekalongan: PT. Nasya Expanding Management, 2021.
- [10] P. W. Priyotamtama, *Merawat Bumi, Rumah Kita Bersama*. Sanata Dharma University Press, 2021.
- [11] Info by PJB, "Terdepan di Indonesia PT PJB Menambah Co-Firing PLTU Secara Komersil," Surabaya, 2022. [Online]. Available: <https://www.ptjpb.com/terdepan-di-indonesia-pt-pjpb-menambah-co-firing-pltu-secara-komersil/>
- [12] A. Tasrif, "Direktorat Jenderal EBTKE - Kementerian ESDM," *Siaran Pers. HUMAS EBTKE*, pp. 1–4, 2020. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/06/02/2871/indonesia.berkomitmen.capai.net.zero.emission>
- [13] 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," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 1089–1101, 2017.
- [14] G. T. Kong, *Peran biomassa bagi energi terbarukan*. Elex Media Komputindo, 2013.
- [15] R. Poerwanto, I. Z. Siregar, and A. Suryani, "Pemikiran guru besar IPB," 2012.
- [16] M. Sami, K. Annamalai, and M. Wooldridge, "Co-firing of coal and biomass fuel blends," *Prog. energy Combust. Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 171–214, 2001.
- [17] Sugiyanto, M. Abdillah, and A. Nugroho, "Pengujian dan Simulasi Co-Firing Bahan Bakar Batubara dengan Biomassa pada PLTU Paiton 2x400MW," *EBTKE ESDM*, 2019.
- [18] I. Pratiwi and G. Amanda, "Ini Realisasi Co-Firing PLN di 28 PLTU," *Republika.co.id*, Jakarta, 2022. [Online]. Available: <https://www.republika.co.id/berita/t9jtt5423/ini-realisasi-cofiring-pln-di-28-pltu>
- [19] I. Nurika and S. Suhartini, *Bioenergi dan Biorefinery*, Pertama. Malang: UB Press, 2019.
- [20] S. Suganal and G. K. Hudaya, "Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (Skala laboratorium)," *J. Teknol. Miner. dan Batubara*, vol. 15, no. 1, pp. 31–48, 2019.