

Analisa Karakteristik Pengujian *Co-Firing Biomassa Sawdust* Pada *Pltu Type Pulverized Coal Boiler* Sebagai Upaya Bauran *Renewable Energy*

Fefria Tanbar¹, Sahrijal Purba¹, Agus Salim Samsudin¹, Eko Supriyanto¹, Indra A. Aditya¹

¹ PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistikan

*Email korespondensi: fefria.t@gmail.com

Abstrak

Pelaksanaan pengujian karakteristik *co-firing* biomassa sawdust dilakukan pada pembangkit listrik jenis *Pulverized Coal* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh *co-firing* terhadap unjuk kerja parameter operasi seperti: *temperature outlet mill (MOT)*, *furnace exit gas temperature (FEGT)*, emisi dan keekonomian. Bahan bakar *co-firing* biomassa dicampurkan pada stockpile dengan komposisi 5% biomassa sawdust dan 95% batubara. Bahan bakar dimasukkan kedalam 6 bunker mill yang beroperasi. Pengambilan data pengujian dilakukan setelah proses stabilisasi beban minimal selama 1 jam dengan menjaga pembebanan tetap konstan pada maximum capacity rate, kemudian dilakukan pengambilan data uji pembakaran *co-firing* minimal selama 2 jam dengan interval pengambilan setiap 15 menit. Hasil pengujian menunjukkan nilai *FEGT* ketika *co-firing* terjadi penurunan temperatur sebesar 4,2°C atau 0,4% lebih rendah dibandingkan saat coal firing. Temperatur outlet mill relative sama pada kedua kondisi saat *co-firing* maupun coal firing dengan arus motor mill pada tiap mill tidak seragam. Emisi gas *NOx* dan *SO2* saat *co-firing* lebih rendah 2% sampai 3% dibandingkan saat coal firing. Pengujian ini juga mempengaruhi konsumsi bahan bakar spesifik saat *co-firing* lebih rendah 1,21% sebesar 0,629 kg/kWh dibandingkan saat coal firing sebesar 0,637 kg/kWh. Hasil perhitungan biaya produksi pada pengujian operasi 100% coal firing didapatkan harga 378,14 Rp/kWh, sedangkan pada operasi *co-firing* 5% sawdust didapatkan harga 369,73 Rp/kWh. Berdasarkan selisih biaya produksi, *co-firing* 5% sawdust menghemat biaya energy primer sebesar 8,41 Rp/kWh atau lebih rendah sebesar 2,22%.

Kata kunci: *co-firing*, biomassa, sawdust, emisi

Abstrak

The testing of the *co-firing* characteristics of sawdust biomass is carried out at a *Pulverized Coal* type power plant which aims to determine the effect of *co-firing* on the performance of operating parameters such as mill outlet temperature (*MOT*), furnace exit gas temperature (*FEGT*), emissions and economy. Biomass *co-firing* fuel is mixed in a stockpile with a composition of 5% sawdust biomass and 95% coal. Fuel is fed into 6 operating bunker mills. The test data was collected after a minimum load stabilization process for 1 hour by keeping the loading constant at the maximum capacity rate, then the *co-firing* combustion test data were collected for a minimum of 2 hours with an interval of every 15 minutes. The test results show the *FEGT* value when the *co-firing* temperature decreases by 4.2°C or 0.4% lower than when coal firing. The mill outlet temperature is relatively the same in both *co-firing* and coal firing conditions with the mill motor current at each mill, not uniform. *NOx* and *SO2* gas emissions during *co-firing* are 2% to 3% lower than when coal firing. This test also affects the specific fuel consumption when *co-firing* is 1.21% lower at 0.629 kg/kWh compared to coal firing at 0.637 kg/kWh. The results of the calculation of production costs in the 100% coal firing operation test obtained a price of 378.14 Rp/kWh, while the *co-firing* operation of 5% sawdust obtained a price of 369.73 Rp/kWh. Based on the difference in production costs, *co-firing* 5% sawdust saves primary energy costs by 8.41 Rp/kWh or lower by 2.22%.

Keywords: *co-firing*, biomassa, sawdust, emisi

I. Pendahuluan

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mencatat realisasi konsumsi listrik nasional sampai dengan akhir tahun 2019 sebesar 245.518,57 GWh, sedangkan kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik di Indonesia mencapai 69.678,85 MW, dibandingkan dengan tahun 2018 sebesar 64.924,80 MW (ESDM, 2020). Dari data tersebut menyebutkan sebagian besar pembangkit yang ada di Indonesia masih didominasi pembangkit listrik *thermal* berbahan bakar batubara, baik yang menggunakan batubara dengan nilai kalor tinggi maupun nilai kalor rendah

(*low rank coal*). Dalam jangka panjang, ketersediaan batu bara akan semakin menipis, sehingga perlu adanya langkah konkrit dalam mereduksi pemakaian bahan bakar tersebut dan menggantikannya dengan bahan bakar alternatif yang ramah terhadap lingkungan.

Pemerintah menargetkan pencapaian Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional yang tertuang pada Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) mencapai 23% pada tahun 2025 yang di *break down* menjadi listrik dan non listrik (Peraturan Presiden RI, 2017). Pada tahun 2020, penerapan EBT masih jauh dari target yaitu sebesar 9,15 %, terdapat deviasi sebesar 13,75% yang harus diimplementasikan dalam 5

Analisa Karakteristik Pengujian *Co-Firing Biomassa Sawdust* Pada *Pltu Type Pulverized Coal Boiler* Sebagai Upaya Bauran *Renewable Energy*

tahun kedepan. Dari beberapa program EBT yang digagas dan diusulkan ke PLN, salah satu programnya adalah penerapan *co-firing* pada pembangkit listrik berbahan bakar batubara eksisting (Pribadi, 2020). *Co-firing* dijadikan sebagai salah satu *green booster* dalam program percepatan peningkatan penggunaan energi terbarukan dengan minimum investasi dikarenakan menggunakan fasilitas yang ada pada PLTU eksisting (PT PLN, 2021).

Bahan bakar *co-firing* biomassa dapat berasal dari potongan kayu, reruntuhan pohon, jenis tanaman energi, beberapa jenis limbah tertentu, ataupun sampah yang sudah diolah dengan prosentase campuran sebesar 1% sampai dengan 5% (Pribadi, 2020).

Sejauh ini substitusi bahan bakar alternatif dalam sistem *co-firing* sebanyak 3% sampai dengan 10%, semakin tinggi komposisi bahan bakar alternatif berarti semakin rendah gas rumah kaca yang dihasilkan (N Cahyo et al., 2021). Biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara. Oleh karena itu, *co-firing* batubara dan biomassa berpotensi menurunkan emisi CO_2 , NO_x dan SO_x (Nur Cahyo et al., 2020).

II. Metodologi

Pengujian ini dilakukan dengan cara pengujian secara eksperimental di PLTU eksisting tipe *pulverized coal boiler*. Adapun tipe pembakarannya *direct firing coal pulverizing system* dengan *primary cold air* pada kecepatan medium. Boiler yang didukung oleh Pemanas Udara Primer (PAH) dan Pemanas Udara Sekunder (SAH). Bahan bakar 5% biomassa *sawdust* dan 95% batubara dicampur pada *coal yard* dan dimasukkan ke dalam *bunker* batubara oleh *stacker reclaimer* untuk diteruskan ke tungku melalui lima feeder batubara. Peralatan yang digunakan untuk pengambilan data ditunjukkan dalam Gambar 1.

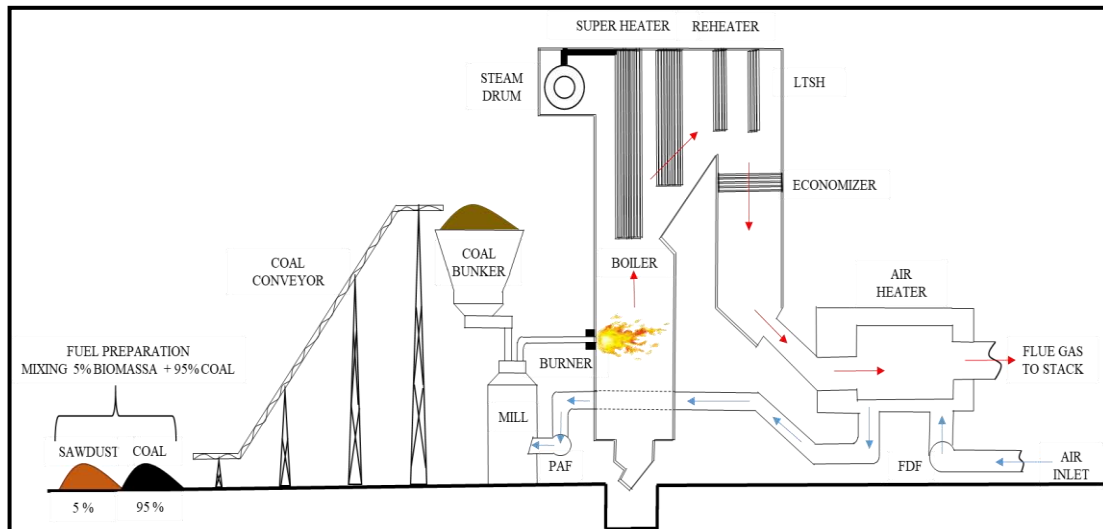
Ada beberapa metode *co-firing* yang digunakan untuk membakar campuran biomassa dengan batubara, antara lain *direct co-firing*, *indirect co-firing* dan *parallel Co-firing* (Brem &

Koppejan, 2005). Namun, metode yang murah yang digunakan dalam uji *co-firing* adalah *Direct co-firing*. Secara umum, tidak ada biaya investasi untuk peralatan khusus dengan metode ini, tetapi memiliki risiko mengganggu kemampuan pembakaran unit boiler. Penyebab gangguan tersebut adalah tingkat korosi yang tinggi akibat penumpukan alkali atau aglomerasi pada permukaan boiler yang menyebabkan berkurangnya keluaran panas dan waktu kerja (Basu et al., 2011). Selain itu, perbedaan karakteristik pembakaran batubara dan biomassa dapat mempengaruhi stabilitas dan karakteristik perpindahan panas nyala api

Bahan bakar Biomassa *sawdust* dan batubara dicampur ditempat penampungan batubara. Setelah mendapatkan campuran bahan bakar yang seragam, maka campuran bahan bakar dimasukan kedalam pengumpan batubara untuk dialirkan ke *coal bunker* kemudian masuk ke *mill*. Sebelum memasuki boiler, campuran bahan bakar dilakukan proses penggerusan didalam *mill pulverized* untuk mendapatkan ukuran *fineness* sebesar 200 mesh dengan presentase lebih dari 70%. Pemeriksaan sampel *fineness* dapat diambil pada pipa *outlet mill*.

Pembebanan pembangkit dikontrol pada kondisi steady state (Beban Maksimum) selama enam jam. Data operasi diambil empat jam setelah periode stabilisasi, secara otomatis dicatat oleh sistem akuisisi data. Parameter utama atau critical point yang diamati, yaitu: *furnace exit gas temperature (FEGT)*, *mill outlet temperature* dan *emision*.

Selama pengujian, *furnace exit gas temperature (FEGT)* diambil dengan kamera infra merah portabel. Data FEGT diambil sembilan kali untuk setiap pengujian pada empat pengukuran tapping di bagian atas tungku. Setiap perubahan dalam parameter operasi pabrik, terutama suhu keluaran pabrik terus diamati. Pengambilan sampel bahan bakar dilakukan di feeder batubara. Selain itu, emisi gas buang diukur dengan alat analisis gas buang portabel di lokasi tapping point.



Gambar 1. Peralatan Lay Out PLTU Boiler tipe Pulverized Coal

III. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Biomasa Sawdust

Karakteristik bahan bakar yang digunakan dalam *co-firing* dapat dianalisa dengan melihat sifat fisik maupun kandungan kimia dari campuran bahan bakar (campuran batubara dan biomassa) yang dapat diketahui melalui uji laboratorium. Uji laboratorium yang diperlukan antara lain *Proximate analysis*, *Ultimate analysis*, *analisa abu*, *Ash Fusion Temperature* dan *Chlorine analysis*. Pentingnya melakukan uji laboratorium terhadap campuran bahan bakar yang digunakan selain mengetahui nilai kalor, dapat diketahui zat yang terkandung dalam bahan bakar dan zat yang

terbentuk pada hasil pembakaran sehingga dapat diprediksi potensi terbentuknya *slagging*, *fouling* dan *aglomerasi* serta potensi terjadinya korosi di dalam boiler.

Perbandingan karakteristik antara batubara dan *biomassa sawdust* dilakukan dengan membandingkan hasil *Ultimate analysis* dan *Proximate analysis* yang diperoleh dari *supplier* antara batubara tipikal *medium rank coal* (Batubara A) dan batubara tipikal *low rank coal* yang digunakan di PLTU dengan tipikal *biomassa sawdust*. seperti ditunjukkan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Komparasi Karakteristik Batubara dengan Biomasa Sawdust

<i>Analysis</i>	<i>Parameter</i>	<i>Batubara Bituminous*</i>	<i>Batubara Subbituminous*</i>	<i>Biomasa Sawdust**</i>
<i>Proximate Analysis (% wt)</i>	<i>Moisture</i>	24,32	35,84	8,60
	<i>Volatile Matter</i>	34,43	30,97	75,16
	<i>Fixed Carbon</i>	33,59	30,24	15,07
	<i>Ash</i>	7,66	2,96	1,17
<i>Ultimate Analysis (% wt)</i>	<i>Carbon</i>	48,61	43,82	45,7
	<i>Hydrogen</i>	3,75	3,37	5,45
	<i>Oxygen</i>	13,95	13,22	10,75
	<i>Sulfur</i>	0,63	0,11	0,09
	<i>Nitrogen</i>	1,09	0,68	0
<i>Hardgrove Grindability Index</i>		47	55	< 32
<i>Gross Caloric Value (kcal/kg)</i>		4897	4199	4294
<i>Bulk Density (kg/m³)</i>		900	800	-

Keterangan :

* Referensi data pemasok typical batubara ke PLTU

** Referensi data pemasok *sawdust*

Analisa Karakteristik Pengujian *Co-Firing Biomassa Sawdust* Pada *Pltu Type Pulverized Coal Boiler* Sebagai Upaya Bauran *Renewable Energy*

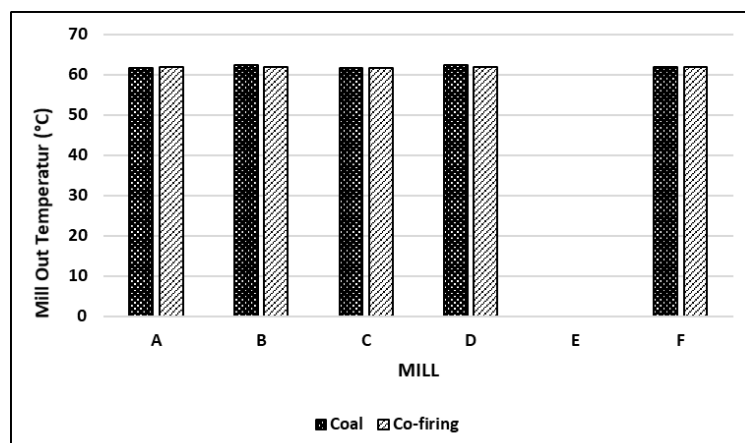
Dari tabel diatas menunjukkan nilai kalor biomassa sawdust dibawah dengan nilai kalor batubara bituminous maupun batubara yang digunakan selama pengujian. Beberapa perbedaan antara batubara dengan biomassa uji adalah:

1. Kandungan nilai sulfur biomasa lebih rendah dibandingkan dengan batubara, sehingga akan menghasilkan emisi pembakaran yang lebih rendah (ramah lingkungan).
2. Kandungan *volatile matter Sawdust* lebih tinggi dibandingkan dengan batubara, sehingga lebih mudah untuk terbakar. Hal ini harus mendapatkan perhatian saat melakukan *co-firing* terutama pada pengontrolan *temperature pulverizer*.
3. Nilai HGI (*Hardgrove Grindability Index*) *sawdust* lebih rendah dibandingkan dengan batubara, sehingga *sawdust* tidak mudah untuk digerus. Hal ini harus mendapatkan perhatian karena rata-rata desain HGI pada pulverizer adalah >45, sehingga perlu dilakukan pemantauan pada *coal mill/ pulverizer*.
4. Tipikal *sawdust* juga mempunyai kandungan *ash* yang lebih rendah dibandingkan dengan tipikal batubara sehingga dapat mengurangi jumlah ash yang terbentuk/yang dihasilkan dari proses pembakaran di boiler baik pada *fly ash* maupun *bottom ash*.

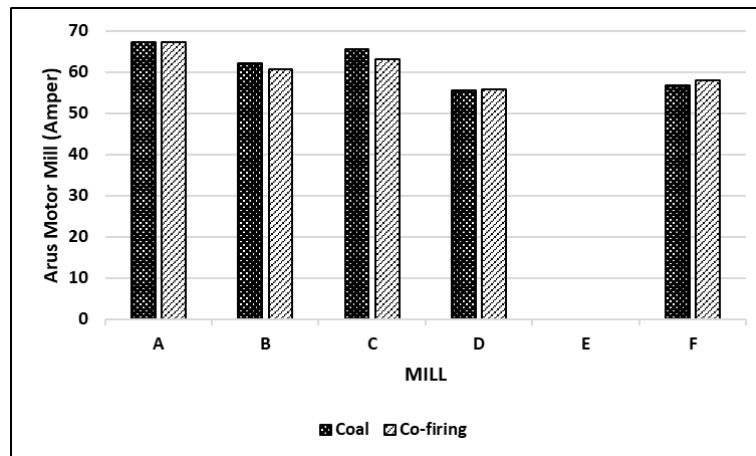
3.2. Karakteristik *Pulverizer Boiler (PC)*

Pada boiler PC, *Mill Outlet Temperature* (MOT) harus selalu dimonitor untuk mengetahui adanya indikasi pembakaran awal atau *earlier combustion* di mill. Karena udara panas yang dialirkan dari *forced draft fan* (FD Fan) melalui *air preheater* untuk proses *drying* bahan bakar pada *pulverized* dapat berpotensi terjadinya ledakan akibat terbakarnya bahan bakar selama proses milling sebelum masuk boiler. Selama pengujian Suhu rata-rata di dalam *Mill Outlet Temperatur* (MOT) saat *co-firing* berkisar antara 61°C – 62°C hanya berbeda dibawah 1% dibandingkan dengan saat operasi menggunakan bahan bakar batubara 100% (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.), hal ini menunjukan bahwa penggunaan bahan bakar *co-firing biomassa sawdust* tidak mempengaruhi *mill outlet temperature* (MOT).

Tipikal biomasa sawdust yang digunakan untuk pengujian ini memiliki nilai HGI yang lebih rendah dari HGI batubara, nilai HGI sawdust <32, sedangkan batubara >45 seperti yang ditunjukkan pada Komparasi Karakteristik Batubara dengan Biomassa Sawdust, Namun potensi kenaikan arus mill saat *co-firing* menunjukan tidak adanya peningkatan dibandingkan saat menggunakan bahan bakar batubara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Perbandingan *Mill Outlet Temperatur* (MOT) Saat *Co-Firing* dan *Foal Firing* Menunjukan Nilai Temperatur yang Relatif Sama

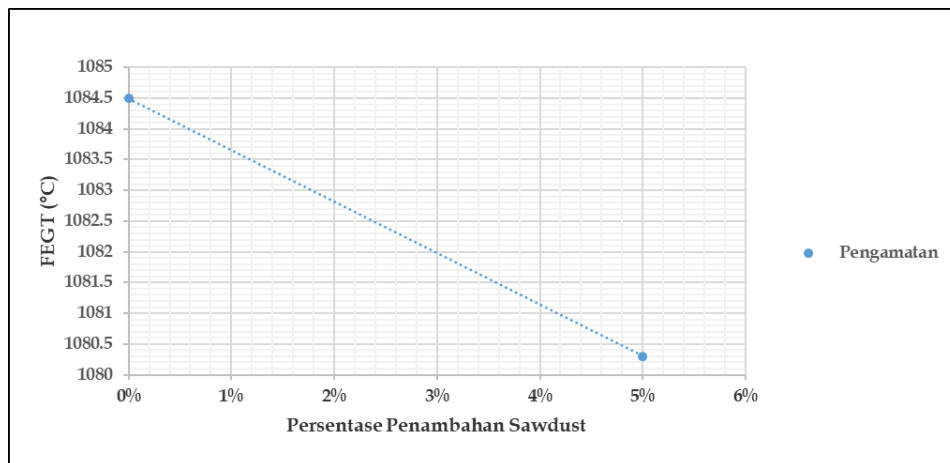


Gambar 3. Perbandingan Arus Motor Mill Saat *Co-Firing* Dan *Coal Firing*

3.3. Karakteristik Temperatur *Furnace*

Pengamatan *Furnace temperature* pada pengujian perlu dilakukan untuk mengetahui perbedaan temperature pada saat coal firing dan cofiring seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Berdasarkan parameter FEGT menunjukkan penurunan suhu rata-rata selama *co-firing* sebesar

4,2 °C dibandingkan dengan kondisi operasi menggunakan 100 % batubara dari 1084,5 °C menjadi 1080,3 °C. Hal ini sebanding dengan kandungan *volatile matter* sawdust yang lebih besar daripada batubara eksisting menyebabkan sawdust lebih dahulu terbakar.



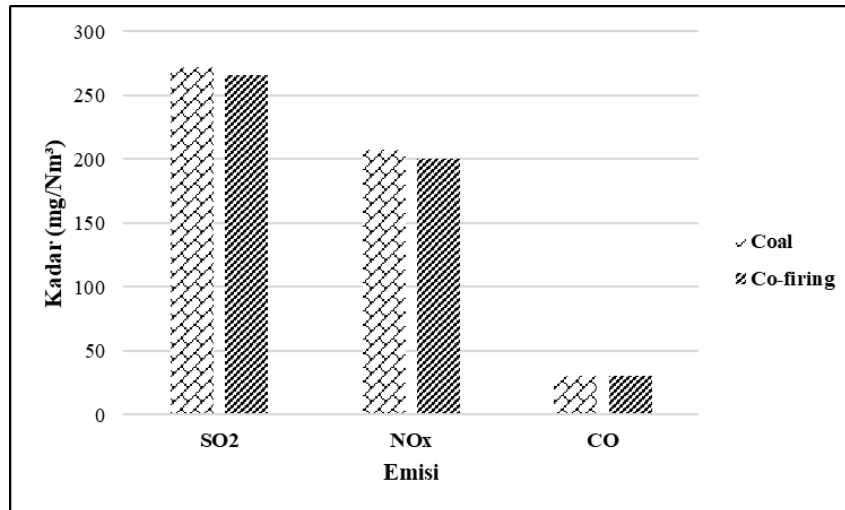
Gambar 4. Perbandingan *Furnace Exit Gas Temperature* (FEGT) Saat *Co-Firing* 5% Sawdust Dan *Coal Firing*

3.4. Karakteristik Emisi

Hasil pembacaan *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS), kandungan emisi NO_x dalam gas buang pada saat *co-firing* adalah 200,7 mg/Nm^3 , lebih rendah 3,3% dibandingkan saat pembakaran batubara sebesar 207,6 mg/Nm^3 , sedangkan kandungan emisi SO_2 dalam gas buang selama *co-firing* adalah 265,9 mg/Nm^3 lebih rendah 2,3 % dibandingkan saat pembakaran batu

bara 272,5 mg/Nm^3 . Nilai emisi gas buang SO_2 maupun NO_x saat *co-firing* maupun *coal firing* masih memenuhi baku mutu Peraturan menteri No.P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 sebesar 550 mg/Nm^3 (Indonesia environment and forestry ministry, 2019). yang ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Analisa Karakteristik Pengujian *Co-Firing Biomassa Sawdust* Pada *Pltu Type Pulverized Coal Boiler* Sebagai Upaya Bauran *Renewable Energy*



Gambar 5. Perbandingan Emisi Gas Buang *Co-Firing* Terhadap Emisi Gas Buang *Coal Firing*

3.5. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Untuk mengetahui pengaruh *co-firing* 5% *biomassa sawdust* pada biaya produksi, dilakukan perbandingan *Specific Fuel Consumption* (SFC) dan biaya produksi pada saat menggunakan batubara dan saat uji *co-firing* 5% sawdust. *Specific Fuel Consumption* (SFC) didapat dengan rumus:

$$SFC = \frac{\text{total fuel}}{\text{kWh terbangkit}} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

SFC = *Specific Fuel Consumption* [kg/kWh]

Total fuel = Total Konsumsi Bahan Bakar [kg]

kWh terbangkit = Total energi listrik yang dihasilkan [kWh]

Sementara untuk biaya produksi (komponen C) diperoleh dengan rumus:

$$\text{Biaya Produksi} = \text{Harga BB} \times \text{SFC} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana :

Biaya Produksi = Biaya Komponen C Pembangkit [Rp/kWh]

Harga BB = Harga Bahan Bakar [Rp/kg]

SFC = *Specific Fuel Consumption* [kg/kWh]

Energi listrik kotor (*Gross*) rata-rata yang dihasilkan selama *co-firing* adalah 2.430.410 kWh. Sebagai perbandingan, pada saat pembakaran batubara sebesar 2.420.293 kWh. Total konsumsi bahan bakar selama uji *co-firing* 5% sawdust

sebesar 1.528,58 Ton sedangkan saat menggunakan 100% bahan bakar batubara sebesar 1.540,65 Ton, maka nilai bruto SFC saat *co-firing* 5% sawdust 0,628 kg/kWh sedangkan saat *coal-firing* 0,637 kg/kWh.

Perhitungan finansial menggunakan data produksi energi dan harga bahan bakar menunjukkan bahwa *co-firing* 5% sawdust didapatkan harga 369,73 Rp/kWh sedangkan biaya produksi saat *coal-firing* sebesar 378,14 Rp/kWh. Selisih biaya produksi saat *co-firing* 5% sawdust terhadap kondisi menggunakan 100% Batubara adalah sebesar 8,41 Rp/kWh atau lebih rendah 2,22% saat *co-firing* 5% sawdust.

IV. Kesimpulan

Co-firing sawdust dengan rasio 5% pada *pulverized coal* boiler berkontribusi terhadap penurunan FEGT sebesar 4,2 °C atau 0,4% lebih rendah dari kondisi menggunakan bahan bakar batubara. *Mill Outlet Temperature* (MOT) relatif sama pada kedua pengujian, namun nilai arus motor pada tiap mill tidak seragam. Kandungan emisi NOx pada gas buang pada saat *co-firing* adalah 200,7 mg/Nm³ lebih rendah 3,3% dibandingkan saat pembakaran batubara sebesar 207,64 mg/Nm³, sedangkan kandungan emisi SO2 dalam gas buang pada saat *co-firing* adalah 265,99 mg/Nm³ lebih rendah 2,4% dibandingkan saat pembakaran batubara sebesar 272,52 mg/Nm³. Biomassa dianggap sebagai CO2-netral, sedangkan kandungan kalium dan klorin yang tinggi dalam biomassa menyebabkan emisi partikulat yang parah, pengendapan abu, dan korosi di fasilitas pembakaran (Wang et al., 2019). Nilai konsumsi

bahan bakar spesifik (SFC) saat co-firing 5% sawdust sebesar 0,629 kg/kWh dibandingkan saat pembakaran batubara sebesar 0,637 kg/kWh. Hasil perhitungan biaya komponen C pada pengujian operasi 100% batubara mendapatkan harga 378,14 Rp/kWh, sedangkan pada operasi co-firing 5% sawdust mendapatkan harga 369,73 Rp/kWh. Berdasarkan selisih biaya produksi, co-firing 5% sawdust menghemat biaya energy primer sebesar 8,41 Rp/kWh. Lebih rendah sebesar 2,22%. Hasil penelitian ini hanya menunjukkan dampak jangka pendek dari co-firing, sehingga perlu dilakukan penelitian lain terkait dampak terhadap daya tahan pembangkit, potensi *slagging*, *fouling* dan korosi pada saat pembangkit beroperasi dengan skenario co-firing untuk waktu yang lebih lama.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan serta semua pihak yang telah membantu dalam penulisan artikel ini dengan baik. Semoga Allah membalas semuanya dengan kebaikan yang sempurna.

V. Daftar Pustaka

- Basu, P., Butler, J., & Leon, M. A. (2011). Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants. *Renewable Energy*, 36(1), 282–288. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.039>
- Brem, G., & Koppejan, J. (2005). Biomass co-firing in coal power plants. *VDI Berichte*, 1891, 183–195.
- Cahyo, N, Alif, H. H., Aditya, I. A., & Saksono, H. D. (2021). Co-firing characteristics of wood pellets on pulverized coal power plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(6), 062088. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1098/6/062088>
- Cahyo, Nur, Alif, H. H., Saksono, H. D., & Paryanto, P. (2020). Performance and emission characteristic of co-firing of wood pellets with sub-bituminous coal in a 330 MWe pulverized coal boiler. *Proceeding - 2nd International Conference on Technology and Policy in Electric Power and Energy, ICT-PEP 2020*, x, 44–47. <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP50916.2020.9249930>
- ESDM, K. (2020). Statistik ketenagalistrikan 2019. https://Gatrik.Esdm.Go.Id/Frontend/Download_Index?Kode_Catagory=Statistik., 33(9), 1689–1699.
- Indonesia environment and forestry ministry. (2019). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. -, 1–36. <https://icel.or.id/wp-content/uploads/PERMENLHK-NO-15-TH-2019-ttg-BM-Emisi-Pembangkit-Listrik-Thermal.pdf>
- Peraturan Presiden RI. (2017). *Perpres No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional*.
- Pribadi, A. (2020). *Terapkan Metode Co-Firing di PLTU, Ini Potensi Biomassa untuk Substitusi Batubara*. <https://Ebtke.Esdm.Go.Id/>. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/02/28/2490/terapkan.metode.co-firing.di.pltu.ini.potensi.biomassa.untuk.substitusi.batubara>
- PT PLN. (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030. Keputusan Menteri ESDM No 188.K/HK.02/MEM.L/2021. *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030*, 2019–2028.
- Wang, X., Hu, Z., Wang, G., Luo, X., Ruan, R., Jin, Q., & Tan, H. (2019). Influence of coal co-firing on the particulate matter formation during pulverized biomass combustion. *Journal of the Energy Institute*, 92(3), 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.05.003>