

## Analisis Pengujian *Co-Firing* Biomassa Cangkang Kelapa Sawit Pada PLTU *Circulating Fluidized Bed* (CFB) Sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan

Indra A. Aditya<sup>a,\*</sup>, Fajar N. Haryadi<sup>a</sup>, Indri Haryani<sup>a</sup>

<sup>a</sup>PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan  
Jl. Duren Tiga Raya No.102 Duren Tiga, Jakarta

\*E-mail: indra.aditya@pln.co.id

### Abstract

The *co-firing* characteristics of palm kernel shell biomass are implemented at a *Circulating Fluidized Bed* (CFB) power plant to determine the effect of *co-firing* on the potential for corrosion, slagging, fouling, and specific fuel consumption (SFC). Biomass *co-firing* fuel is mixed in a stockpile with the composition of the *co-firing* scenario, namely 5%, 10%, 15%, and 20% palm shells for the burn test. Data is retrieved after a stabilization period and then automatically recorded by the data acquisition system. The test results show a lower calorific value, higher volatile matter content, and higher ash content than the coal used during the test. The percentage of oil palm shells in *co-firing* increases the SFC at the PLTU up to 3,7%. Lower sulfur and HGI content than coal make it more challenging to work. The ratio of base to acid when *co-firing* 5%, 10%, and 15% palm shells are in the high/weight category. The slagging index when coal burning and *co-combustion* is still at a safe limit. The Fouling Index for coal combustion and *co-firing* of 5%, 15%, and 20% of palm shells is in the high category, while *co-firing* of 10% of palm shells is severe. Based on the sulfur and chlorine data in the fuel, the ratio of 2S/Cl during coal combustion and *co-firing* is feasible >8. The corrosion potential due to the presence of chlorine is Cl-induced active synthesis minor.

**Keywords:** *co-firing*, CFB, biomass, palm kernel shell, SFC

### Abstrak

Pelaksanaan pengujian karakteristik *co-firing* biomassa cangkang kelapa sawit dilakukan pada pembangkit listrik jenis *Circulating Fluidized Bed*(CFB) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh *co-firing* terhadap potensi korosi, *slagging*, *fouling* dan *specific fuel consumption*(SFC). Bahan bakar *co-firing* biomassa dicampurkan pada penampungan batubara sementara dengan komposisi skenario *co-firing* yaitu 5%, 10%, 15%, dan 20% cangkang sawit untuk uji bakar. Data operasi diambil setelah periode stabilisasi (*steady state*) dan kemudian secara otomatis dicatat oleh sistem akuisisi data. Hasil pengujian menunjukkan nilai kalor lebih rendah, kandungan *volatile matter* lebih tinggi, *ash content* lebih tinggi dibandingkan dengan batubara yang digunakan selama pengujian. Peningkatan prosentase cangkang kelapa sawit pada *co-firing* cenderung mengakibatkan kenaikan SFC pada PLTU hingga 3,7%. Kandungan sulfur dan HGI lebih rendah dibandingkan dengan batubara sehingga lebih sulit untuk dihancurkan. *Base to acid ratio* saat *co-firing* 5%, 10%, dan 15% cangkang sawit berada pada kategori *high/severe*. *Slagging Index* saat *coal firing* dan *co-firing* masih berada pada batas aman. *Fouling Index* saat *coal firing* dan *co-firing* 5%, 15%, dan 20% cangkang sawit berada pada kategori *high*, sedangkan *co-firing* 10% cangkang sawit kategori *severe*. Berdasarkan data sulfur dan klorin pada bahan bakar, rasio 2S/Cl saat *coal firing* dan *co-firing* bernilai >8 sehingga potensi korosi akibat adanya klorin adalah *Cl-induced active oxidation* minor.

**Kata kunci:** *co-firing*, CFB, biomassa, cangkang kelapa sawit, SFC

### 1. Pendahuluan

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mencatat konsumsi listrik nasional sebesar 242,6 TWh pada tahun 2020, sedangkan kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia mencapai 72.750,72 MW, dibandingkan 69.678,85 MW pada tahun 2019 [1]. Terlihat dari angka-angka tersebut, sebagian besar pembangkit listrik di Indonesia masih didominasi oleh pembangkit listrik berbahan bakar batubara, baik yang menggunakan batubara nilai kalori tinggi maupun batubara nilai kalori rendah (*low rank coal*). Dalam jangka panjang, pasokan batubara akan semakin berkurang, sehingga diperlukan langkah-langkah konkrit untuk mengurangi penggunaan bahan bakar tersebut dan menggantinya dengan bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan.

Pada tahun 2025 bauran energi baru dan terbarukan ditargetkan mencapai 23% terhadap total pemakaian energi primer (Peraturan Presiden RI, 2017). Bersama dengan itu ada target pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) berdasarkan Paris Agreement-2015, dimana Indonesia berkomitmen mengurangi emisi GRK sebanyak 29% (834 jt-tCO<sub>2</sub>) dengan usaha sendiri dan 41% (1.081 jt-tCO<sub>2</sub>) dengan bantuan internasional dari emisi GRK dari BAU

/Business As Usual (2.869 jt t-CO<sub>2</sub>) pada tahun 2030 [2]. Pada beberapa proyek EBT yang digagas dan diusulkan ke PLN, salah satunya programnya adalah aplikasi *co-firing* pada PLTU yang ada [3]. *Co-firing* merupakan salah satu teknik penambahan biomassa sebagai bahan bakar pengganti parsial ke dalam *boiler* PLTU batubara. *Co-firing* sebagai salah satu *green booster* dalam program percepatan peningkatan penggunaan energi terbarukan dengan minimum investasi dikarenakan menggunakan fasilitas yang ada pada PLTU eksisting [4].

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% hingga 5% [3].

Sejauh ini substitusi bahan bakar alternatif dalam sistem *co-firing* sebanyak 3% hingga 10%, semakin tinggi komposisi bahan bakar alternatif berarti semakin rendah gas rumah kaca yang dihasilkan [5]. Biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara. Oleh karena itu, *co-firing* batubara dan biomassa berpotensi menurunkan emisi CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan SO<sub>x</sub> [6].

## 2. Metodologi

Pengujian dilakukan dengan cara eksperimental pada PLTU eksisting jenis *Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler*. Pembakaran dengan *fluidized bed combustion* memiliki kelebihan dibandingkan dengan sistem pembakaran konvensional antara lain fleksibel terhadap bahan bakar, efisiensi pembakaran yang tinggi, pembakaran *fluidized bed* berlangsung pada suhu yang lebih rendah berlangsung pada suhu yang lebih rendah berkisar antara 850°C sehingga menghasilkan kadar NO<sub>x</sub> lebih sedikit dan dapat menghindari masalah pembentukan terak pada beberapa jenis batubara tertentu. Keunggulan utama pembakaran *fluidized bed* adalah pereduksian kadar sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) yang biasanya terbentuk dari pembakaran kandungan belerang didalam batubara (7).

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* (8). Namun, metode yang lebih murah yang digunakan dalam uji *co-firing* adalah *Direct co-firing*. Secara umum, tidak ada biaya investasi untuk peralatan khusus dengan metode ini, tetapi ada 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 (9). Selain itu, perbedaan karakteristik pembakaran batubara dan biomassa dapat mempengaruhi stabilitas dan karakteristik perpindahan panas nyala api.

Bahan bakar Biomassa cangkang sawit dan batubara dicampur ditempat penampungan batubara sementara menggunakan alat berat excavator. Prosentase cangkang sawit (PKS) disesuaikan dengan masing-masing skenario *co-firing* yaitu 5%, 10%, 15%, dan 20% cangkang sawit untuk uji bakar. Setelah mendapatkan campuran bahan bakar yang seragam, maka campuran bahan bakar dimasukkan kedalam *coal bunker* dengan tetap memperhatikan ukuran ( $\pm$  6mm) serta level *bunker* untuk mengestimasi waktu yang dibutuhkan bahan bakar masuk kedalam *boiler*. Secara periodik level *bunker* dimonitor untuk memastikan kondisi campuran bahan bakar aman selama pengujian berlangsung.

Data operasi diambil setelah periode stabilisasi (*steady state*) dan kemudian secara otomatis dicatat oleh sistem akuisisi data. Karakteristik bahan bakar diuji di laboraorium yang sudah terakreditasi untuk mengetahui potensi *slagging*, *fouling*, dan korosi pada pipa *boiler*.

## 3. Hasil Dan Pembahasan

### 3.1 Karakteristik Biomassa Cangkang Kelapa Sawit

Karakteristik bahan bakar yang digunakan pada *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*, *Hardgrove Grindability Index (HGI)*, 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.

Perbandingan karakteristik antara batubara, cangkang kelapa sawit dan campuran batubara dengan 5%, 10%, 15%, dan 20% cangkang sawit dilakukan dengan membandingkan hasil analisis *ultimate* dan *proximate* bahan bakar yang diperoleh dari hasil uji laboratorium seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

**Tabel 1.** Komparasi Karakteristik Batubara dengan Biomassa Cangkang Kelapa Sawit

Analisis	Basis	Parameter	100% Batubara	5% Biomassa	10% Biomassa	15% Biomassa	20% Biomassa	100% Biomassa
Proximate Analysis (% wt)	ADB	Moisture	21	13,6	19,2	22,8	21	9,7
	ADB	Volatile Matter	38,1	40,7	41,5	39,2	39,3	63,4
	ADB	Fixed Carbon	37,3	40,9	34,6	34,3	35,3	17,3
	ADB	Ash	3,6	4,7	4,8	3,7	4,4	9,6
Ultimate Analysis (% wt)	ADB	Carbon	54,32	58,84	53,66	51,83	52,92	45,03
	ADB	Hydrogen	3,91	4,19	4,11	3,87	3,94	4,8
	ADB	Oxygen	15,62	17,04	16,86	16,43	16,15	30,26
	ADB	Sulfur	25,06	18,88	24,36	26,88	26,04	19,39
	ADB	Nitrogen	1,09	1,05	1,01	0,99	0,95	0,52
Hardgrove Grindability Index			53	50	55	57	51	16
Gross Calorific Value (kCal/kg)	ARB		4073	4043	4103	3973	3831	3491
Relative Density (gram/ml)			1,31	1,41	1,37	1,34	1,4	1,27
Chlorine	ADB		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Sesuai dengan Tabel 1, terdapat beberapa perbedaan karakteristik antara batubara dengan cangkang kelapa sawit antara lain:

- Nilai kalor cangkang kelapa sawit lebih rendah dibandingkan dengan batubara yang digunakan selama pengujian. Peningkatan prosentase campuran cangkang kelapa sawit dengan batubara pada *co-firing* berpengaruh pada penurunan nilai kalor bahan bakar.
- Kandungan *volatile matter* pada cangkang kelapa sawit lebih tinggi dibandingkan dengan batubara, sehingga membuat cangkang kelapa sawit lebih cepat terbakar sehingga membantu mempercepat proses pembakaran di dalam *boiler* secara keseluruhan.
- Cangkang kelapa sawit juga mempunyai kandungan *ash* yang lebih tinggi dibandingkan dengan batubara sehingga dapat menambah jumlah *ash* yang terbentuk/dihasilkan dari proses pembakaran di *boiler* baik pada *fly ash* maupun *bottom ash*.
- Kandungan sulfur cangkang kelapa sawit lebih rendah dibandingkan dari batubara.
- Nilai HGI cangkang kelapa sawit lebih rendah dibandingkan dengan batubara sehingga lebih sulit untuk dihancurkan.

### 3.2 Potensi Slagging, Fouling, dan Korosi

*Co-firing* biomasa skala besar menghasilkan slagging yang sangat bergantung pada komposisi abu yang dihasilkan dari pembakaran. Risiko slagging dapat digambarkan oleh karakteristik *ash fusion temperature of sintering, softening, melting and flowing*. Abu di atas *softening temperature* dapat bersifat sangat *adhesive*. Untuk memprediksi dengan tepat *ash fusibility*, dibuat beberapa korelasi antara *fusion temperatures* dan komposisi kimia abu dalam bentuk oksida. Parameter yang sering digunakan untuk menentukan potensi terbentuknya *slagging* seperti berikut :

#### a. Base to acid ratio

Potensi pengendapan abu dapat dievaluasi dengan menggunakan *rasio base to acid (B/A)*. Rasio ini merupakan indikasi *fusion characteristic* dan potensi *slagging* abu dan logam yang mengandung abu yang bergabung di dalam proses pembakaran dan membentuk garam bertitik leleh rendah. Rasio B/A dapat dihitung menggunakan rumus :

$$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

Dimana:

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

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standar B/A *ratio* dapat dikategorikan ke 3 level, yaitu : (1) B/A < 0,4 kategori *low*; (2) B/A < 0,7 kategori *medium*; (3) B/A antara 0,4 ~ 0,7 *high* atau *severe*.

b. *Slagging index* (Rs)

Karakteristik *slagging* ditentukan berdasarkan perhitungan rasio unsur alkali terhadap unsur asam, dengan kadar sulfur menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Rs = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \times S$$

Dimana:

B/A = *Base to acid ratio*  
 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O = Konsentrasi oksida basa  
 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> = Konsentrasi oksida asam  
 S = Total sulfur dalam DB

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standar Rs (*slagging index*) dapat dikategorikan ke 4 level, yaitu: (1) Rs < 0,6 kategori *low*; (2) Rs < 0,6 ~ 2,0 kategori *medium*; (3) Rs < 2,0 ~ 2,6 kategori *high*; (4) Rs > 2,6 kategori *severe*

Selain rumus diatas, Rs dapat juga dihitung dengan melihat suhu lebur abu dari bahan bakar, yang dapat dihitung menggunakan rumus :

$$Rs = \frac{\{HT + (4 \times IDT)\}}{5}$$

Dimana:

HT = *Hemisphere temperature*  
 IDT = *Initial deformation temperature*

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standar Rs (*slagging index*) dapat dikategorikan ke 4 level, yaitu: (1) Rs < 0,6 kategori *low*; (2) Rs < 0,6 ~ 2,0 kategori *medium*; (3) Rs < 2,0 ~ 2,6 kategori *high*; (4) Rs > 2,6 kategori *severe*.

c. *Fouling index* (Rf)

*Fouling index*(Rf) dari bahan bakar padat merupakan alat ukur dari kecenderungan terbentuknya *fouling* yang dapat dihitung menggunakan rumus :

$$Rf = \frac{B}{A} (Na_2O + K_2O)$$

Dimana:

Rf = *Fouling index*  
 B/A = *Base to acid ratio*  
 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O = Konsentrasi oksida basa

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standar Rf *ratio* dapat dikategorikan ke 4 level, yaitu: (1) Rf < 0,2 kategori *low*; (2) Rf < 0,2 ~ 0,5 kategori *medium*; (3) Rf < 0,5 ~ 1,0 kategori *high*; (4) Rf > 1,0 kategori *severe*.

d. *Cl-Induced Active Oxidation*

Bahan bakar dengan konsentrasi biomasa tinggi dapat menyebabkan korosi klorin di *boiler*. Analisis komposisi bahan bakar dapat diperoleh nilai kandungan S dan Cl, kemudian dihitung rasio 2S/Cl dalam basis molar dengan rumus sebagai berikut:

$$Rasio\ 2S/Cl = \frac{2x \left( \frac{\% \text{ Bahan bakar } \times S}{\text{Masa atom Sulfur}} \right)}{\left( \frac{\% \text{ Bahan bakar } \times Cl}{\text{Masa atom Klorin}} \right)}$$

Dimana:

S = Kandungan sulfur bahan bakar  
 Cl = Kandungan klorin bahan bakar  
 Massa atom sulfur = 32,065 u  
 Masa atom klorin = 35,453 u

Dari perhitungan rumus tersebut, terdapat nilai standar index 2S/Cl seperti berikut: (1) Nilai rasio 2S/ Cl > 8 akan memiliki risiko *Cl-induced active oxidation* minor karena lapisan sulfat pelindung terbentuk pada permukaan pipa; (2) Nilai rasio 2S/Cl < 4 akan memiliki risiko *Cl-induced active oxidation* major karena klorida cenderung diendapkan pada pipa superheater.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan-persamaan diatas maka diperoleh nilai untuk masing-masing parameter *Slagging*, *Fouling*, dan *2S/Cl Index* yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

**Tabel 2.** Potensi Korosi, *Slagging*, dan *Fouling*

Parameter	100% Batubara	5% Biomassa	10% Biomassa	15% Biomassa	20% Biomassa
<i>Base to acid ratio</i>	0,34	0,44	0,53	0,52	0,33
<i>Slagging index</i>	0,15	0,26	0,19	0,2	0,21
<i>Fouling index</i>	0,62	0,96	1,1	0,79	0,72
<i>Rasio 2S/Cl</i>	101,72	128,26	79,61	84,03	70,76

Dari data pada Tabel 2. Dapat diperoleh bahwa *base to acid ratio* saat *co-firing* 5%,10%, dan 15% cangkang sawit berada pada kategori *high/severe*, *slagging index* saat *coal firing* dan *co-firing* masih berada pada batas aman, *ouling index* saat *coal firing* dan *co-firing* 5%,15%, dan 20% cangkang sawit berada pada kategori *high*, sedangkan *co-firing* 10% cangkang sawit kategori *severe*. Berdasarkan data sulfur dan klorin pada bahan bakar, rasio *2S/Cl* saat *coal firing* dan *co-firing* bernilai >8 sehingga berpotensi korosi akibat adanya klorin adalah *Cl-Induced active oxidation* minor. Sedangkan potensi *fouling* dapat ditekan dengan memaksimalkan pembakaran mencakup pencampuran bahan bakar, kadar oksigen serta pengapian yang pas untuk meminimalisir terbentuknya akumulasi padatan/endapan abu batubara pada pipa *boiler*.

**3.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)**

Untuk mengetahui pengaruh *co-firing* biomassa cangkang kelapa sawit pada biaya produksi bahan bakar dilakukan perbandingan *Specific Fuel Consumption* (SFC) pada saat menggunakan batubara dan saat uji *co-firing*. *Specific Fuel Consumption* (SFC) didapat dengan rumus:

$$SFC = \frac{\text{total fuel}}{\text{kWh terbangkit}}$$

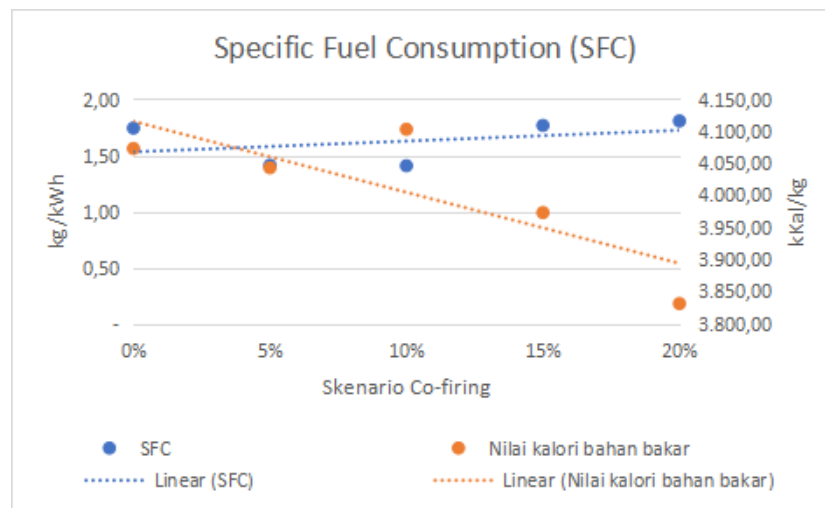
Dimana :

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

Total fuel = Total Konsumsi Bahan Bakar [kg]

kWh terbangkit = Total energi listrik yang dihasilkan [kWh]

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan SFC diatas maka diperoleh nilai untuk masing-masing skenario *co-firing* yang ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Grafik perbandingan SFC dengan skenario *Co-firing*.

Pada Gambar 1 menunjukkan peningkatan prosentase cangkang kelapa sawit pada *co-firing* cenderung mengakibatkan kenaikan SFC pada PLTU. Hal ini disebabkan PLTU membutuhkan bahan bakar yang lebih banyak saat beroperasi menggunakan bahan bakar campuran untuk menghasilkan energi yang sama saat *coal firing*.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil uji sampel campuran batubara dan cangkang sawit dengan prosentase 5%, 10%, 15%, dan 20% memiliki nilai kalor lebih rendah, kandungan *volatile matter* lebih tinggi, *ash content* lebih tinggi dibandingkan dengan batubara yang digunakan selama pengujian. Peningkatan prosentase cangkang kelapa sawit pada *co-firing* cenderung mengakibatkan kenaikan SFC pada PLTU hingga 3,7%. Kandungan sulfur dan HGI lebih rendah dibandingkan dengan batubara sehingga lebih sulit untuk dihancurkan. *Base to acid ratio* saat *co-firing* 5%, 10%, dan 15% cangkang sawit berada pada kategori *high/severe*. *Slagging Index* saat *coal firing* dan *co-firing* masih berada pada batas aman. *Fouling Index* saat *coal firing* dan *co-firing* 5%, 15%, dan 20% cangkang sawit berada pada kategori *high*, sedangkan *co-firing* 10% cangkang sawit kategori *severe*. Berdasarkan data sulfur dan klorin pada bahan bakar, rasio S/Cl saat *coal firing* dan *co-firing* bernilai >8 sehingga potensi korosi akibat adanya klorin adalah *Cl-induced active oxidation* minor. Hasil penelitian ini hanya menunjukkan dampak jangka pendek dari *co-firing*, sehingga perlu dilakukan penelitian lain terkait dampak terhadap daya tahan pembangkit beroperasi dengan skenario *co-firing* untuk waktu yang lebih lama.

#### Ucapan Terima Kasih

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.

#### Daftar Pustaka

- [1] Kementerian ESDM RI, 2021, "*Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2020*."
- [2] Kementerian ESDM, 2016, "*Data Inventory Emisi Grk Sektor Energi*," Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- [3] Pribadi. A., 2020, "*Terapkan Metode Co-Firing Di PLTU, Ini Potensi Biomassa Untuk Substitusi Batubara*," <https://Ebtke.Esdm.Go.Id/>.
- [4] PT PLN (Persero), 2021, "*Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (Ruptl) 2021-2030*," [https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download\\_index/files/38622-ruptl-pln-2021-2030.pdf](https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/38622-ruptl-pln-2021-2030.pdf)
- [5] Cahyo, N., Alif H.H., Aditya, I.A., Saksono, H.D., 2021, "*Co-Firing Characteristics Of Wood Pellets On Pulverized Coal Power Plant*," IOP Conf Ser: Mater Sci Eng., 1098(6): 062088.
- [6] Cahyo, N., 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*," 2020 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP).
- [7] Basu, P., 2015, "*Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation And Maintenance. 1st Ed.*," Springer International Publishing.
- [8] Brem, G., Koppejan, J., 2005, "*Biomass Co-Firing In Coal Fired Power Plants*," VDI Berichte, 2005: 183–95.
- [9] 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): 282–8.