

## Analisis Co-Firing Kulit Kayu terhadap Emisi dan SFC PLTU Balikpapan

Eri Prabowo<sup>1</sup>, Trassanda Scudetto Widestomo Putra<sup>2</sup>, Wenny Retno Astagina<sup>3</sup>

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Email: eriprabowo@itpln.ac.id, trassanda2410505@ITPLN.AC.ID, wenny2012090@itpln.ac.id

### Abstract

*Co-firing is a practical approach to reduce coal dependency and improve environmental performance in existing coal-fired power plants. This paper evaluates 3% wood bark co-firing at Unit 2 of PLTU Teluk Balikpapan 2 x 110 MW, focusing on emissions, specific fuel consumption (SFC), and key operating parameters. The study compares baseline operation using 100% coal with operation using 97% coal and 3% wood bark. Fuel characteristics, boiler operating data, bottom ash observation, stack visual inspection, SFC calculation, and flue gas emission measurements are evaluated. Wood bark has lower sulfur content than coal, namely 0.13% compared with 0.59%, although its gross calorific value is lower. The co-firing test decreased SO<sub>2</sub> emission from 246.7 mg/Nm<sup>3</sup> to 190 mg/Nm<sup>3</sup>, equivalent to a reduction of 22.98%, while NO<sub>x</sub> increased from 285 mg/Nm<sup>3</sup> to 307 mg/Nm<sup>3</sup> but remained below the 550 mg/Nm<sup>3</sup> emission limit. SFC changed slightly from 0.706 kg/kWh to 0.707 kg/kWh. Bed temperature decreased from 927.16 degC to 924.18 degC and FEGT decreased from 1013.78 degC to 1011.24 degC, indicating stable boiler operation. The test did not show black smoke, carry over, or significant agglomeration tendency. Therefore, 3% wood bark co-firing is technically feasible for emission reduction with limited impact on SFC.*

**Keywords:** co-firing; emission; PLTU; specific fuel consumption; sulfur; wood bark

### Abstrak

Co-firing merupakan pendekatan praktis untuk mengurangi ketergantungan batubara dan memperbaiki kinerja lingkungan pada PLTU eksisting. Artikel ini mengevaluasi co-firing kulit kayu 3% pada Unit 2 PLTU Teluk Balikpapan 2 x 110 MW dengan fokus pada emisi, specific fuel consumption (SFC), dan parameter operasi utama. Penelitian membandingkan operasi baseline menggunakan 100% batubara dengan operasi menggunakan campuran 97% batubara dan 3% kulit kayu. Karakteristik bahan bakar, data operasi boiler, pengamatan bottom ash, inspeksi visual stack, perhitungan SFC, dan pengujian emisi gas buang dianalisis. Kulit kayu memiliki kandungan sulfur lebih rendah dibandingkan batubara, yaitu 0,13% dibanding 0,59%, walaupun nilai kalor kulit kayu lebih rendah. Hasil pengujian menunjukkan emisi SO<sub>2</sub> turun dari 246,7 mg/Nm<sup>3</sup> menjadi 190 mg/Nm<sup>3</sup> atau setara penurunan 22,98%, sedangkan NO<sub>x</sub> meningkat dari 285 mg/Nm<sup>3</sup> menjadi 307 mg/Nm<sup>3</sup> tetapi masih di bawah baku mutu 550 mg/Nm<sup>3</sup>. SFC berubah kecil dari 0,706 kg/kWh menjadi 0,707 kg/kWh. Bed temperature turun dari 927,16 degC menjadi 924,18 degC dan FEGT turun dari 1013,78 degC menjadi 1011,24 degC, sehingga operasi boiler tetap stabil. Pengujian tidak menunjukkan black smoke, carry over, maupun indikasi aglomerasi signifikan. Dengan demikian, co-firing kulit kayu 3% layak secara teknis untuk menurunkan emisi dengan pengaruh terbatas terhadap SFC.

**Kata kunci:** co-firing; emisi; kulit kayu; PLTU; SFC; sulfur

### 1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara masih menjadi salah satu tulang punggung sistem kelistrikan karena mampu menyediakan daya besar dan stabil untuk memenuhi kebutuhan beban dasar [1]. Di sisi lain, penggunaan batubara menimbulkan tantangan lingkungan, terutama emisi sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), partikulat, merkuri, dan karbon yang perlu dikendalikan sesuai baku mutu emisi pembangkit listrik tenaga termal [11,14]. Upaya penurunan emisi pada PLTU eksisting perlu dilakukan tanpa mengubah sistem pembangkitan secara besar sehingga solusi yang praktis, ekonomis, dan kompatibel dengan peralatan yang sudah ada menjadi penting.

Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah co-firing biomassa, yaitu pembakaran bersama batubara dan biomassa pada boiler PLTU. Metode ini relatif menarik karena dapat memanfaatkan fasilitas pembakaran batubara yang sudah tersedia, mengurangi konsumsi batubara, serta menurunkan emisi tertentu bergantung pada karakteristik biomassa dan konfigurasi pembakaran [1-6]. Biomassa umumnya memiliki kandungan sulfur lebih rendah daripada batubara sehingga berpotensi menurunkan pembentukan SO<sub>2</sub> pada gas buang, tetapi perbedaan

nilai kalor, kadar air, kandungan abu, dan karakter mineral tetap perlu dievaluasi karena dapat memengaruhi SFC, pembakaran, aglomerasi, slagging, dan fouling [8-12].

PLTU Teluk Balikpapan merupakan pembangkit 2 x 110 MW yang menggunakan boiler Circulating Fluidized Bed (CFB). Boiler CFB memiliki fleksibilitas bahan bakar dan mampu membakar batubara low rank sehingga cocok untuk pengujian campuran biomassa pada porsi rendah [7,13]. Biomassa yang digunakan dalam penelitian ini adalah kulit kayu dengan porsi 3% dari total fuel flow. Kulit kayu dipilih karena tersedia di sekitar area PLTU Teluk Balikpapan dan memiliki kandungan sulfur yang relatif rendah, namun penerapannya tetap harus dikaji melalui pengamatan karakteristik bahan bakar, kestabilan temperatur bed, kondisi bottom ash, serta perubahan emisi gas buang [8,12,13]. Permasalahan utama penelitian adalah sejauh mana co-firing kulit kayu dapat menurunkan emisi dan bagaimana pengaruhnya terhadap SFC. Pedoman pelaksanaan co-firing menuntut pengujian yang memperhatikan kesiapan pasokan biomassa, metode pencampuran, pengaturan operasi, pemantauan emisi, serta risiko teknis pada sistem bahan bakar dan boiler [15]. Artikel ini menyajikan analisis karakteristik bahan bakar, parameter operasi, kecenderungan aglomerasi, SFC, biaya produksi, serta emisi gas buang pada kondisi 100% batubara dan co-firing 3% kulit kayu. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi kelayakan teknis co-firing kulit kayu 3% sebagai strategi penurunan emisi dengan dampak terbatas terhadap konsumsi bahan bakar spesifik dan kestabilan operasi unit.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Objek dan Skenario Pengujian

Penelitian dilakukan pada PLTU Teluk Balikpapan Unit 2 dengan beban pengujian sekitar 100 MW. Data baseline diambil pada kondisi operasi menggunakan 100% batubara, sedangkan data pembandingan diambil pada kondisi co-firing 3% kulit kayu dan 97% batubara. Pengujian co-firing dilakukan selama 5 jam dengan campuran biomassa kulit kayu yang dimasukkan melalui sistem penanganan bahan bakar. Parameter yang diamati meliputi fuel flow, load, bed temperature, FEGT, main steam pressure, main steam temperature, emisi gas buang, serta total energi listrik yang dihasilkan.

**Tabel 1.** Skenario pengujian co-firing kulit kayu

| Skenario  | Komposisi bahan bakar        | Durasi | Beban uji | Tujuan                                      |
|-----------|------------------------------|--------|-----------|---------------------------------------------|
| Baseline  | 100% batubara                | 5 jam  | ±100 MW   | Data pembandingan operasi normal            |
| Co-firing | 97% batubara + 3% kulit kayu | 5 jam  | ±100 MW   | Evaluasi emisi, SFC, dan kestabilan operasi |

### 2.2. Karakteristik Bahan Bakar

Karakteristik batubara dan kulit kayu dianalisis melalui parameter ultimate dan proximate. Parameter penting untuk evaluasi lingkungan adalah sulfur, sedangkan parameter penting untuk operasi pembakaran adalah moisture, volatile matter, fixed carbon, ash content, dan gross calorific value (GCV). Perbandingan karakteristik kedua bahan bakar ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Perbandingan karakteristik batubara dan kulit kayu

| Parameter             | Satuan  | Batubara | Kulit kayu |
|-----------------------|---------|----------|------------|
| Carbon                | %       | 26,45    | 22,88      |
| Hydrogen              | %       | 3,04     | 2,51       |
| Nitrogen              | %       | 0,64     | 0,24       |
| Sulfur                | %       | 0,59     | 0,13       |
| Oxygen                | %       | 13,48    | 17,74      |
| Total moisture        | %       | 35,59    | 48,15      |
| Ash content           | %       | 5,82     | 8,36       |
| Volatile matter       | %       | 32,14    | 35,79      |
| Fixed carbon          | %       | 26,45    | 7,71       |
| Gross calorific value | kcal/kg | 3966     | 2054       |

Data karakteristik menunjukkan bahwa kulit kayu mempunyai kandungan sulfur lebih rendah daripada batubara. Selisih ini menjadi dasar teknis potensi penurunan SO<sub>2</sub> pada gas buang. Namun kulit kayu juga memiliki moisture lebih tinggi dan GCV lebih rendah, sehingga penambahan biomassa berpotensi mempengaruhi kebutuhan bahan bakar dan kestabilan pembakaran. Oleh karena itu pengujian tidak hanya mengevaluasi emisi, tetapi juga SFC dan parameter operasi boiler.

### 2.3. Persamaan Perhitungan

SFC digunakan untuk menilai jumlah bahan bakar yang dibutuhkan pembangkit untuk menghasilkan energi listrik. SFC dihitung dari rasio total konsumsi bahan bakar terhadap energi listrik yang dibangkitkan.

$$\text{SFC} = \text{total fuel} / \text{kWh generated} \quad (1)$$

Biaya produksi komponen bahan bakar dihitung dari perkalian harga bahan bakar dan SFC. Pada skenario co-firing, harga bahan bakar campuran dihitung dari proporsi harga kulit kayu dan harga batubara.

$$C = H_{\text{BB}} \times \text{SFC} \quad (2)$$

$$H_{\text{mix}} = (x_{\text{bio}} \times H_{\text{bio}}) + (x_{\text{coal}} \times H_{\text{coal}}) \quad (3)$$

Persentase penurunan emisi SO<sub>2</sub> dihitung dari selisih nilai emisi baseline dan nilai emisi co-firing terhadap nilai baseline. Persamaan ini digunakan untuk melihat efektivitas penambahan kulit kayu terhadap penurunan emisi sulfur.

$$\text{Reduction} = ((E_0 - E_3) / E_0) \times 100\% \quad (4)$$

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Parameter Operasi Boiler

Pengujian dilakukan pada beban yang relatif sama, yaitu sekitar 100 MW. Pada operasi 100% batubara, load rata-rata sebesar 98,81 MW dan total coal flow rata-rata sebesar 70,06 t/h. Pada operasi co-firing 3%, load rata-rata sebesar 98,82 MW dan total fuel flow rata-rata berada pada kisaran 69,65 t/h. Kedua kondisi ini cukup sebanding untuk mengevaluasi perubahan operasi yang disebabkan oleh campuran kulit kayu.

**Tabel 3.** Ringkasan parameter operasi baseline dan co-firing

| Parameter                     | 100% batubara | Co-firing 3% | Perubahan       |
|-------------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Load rata-rata (MW)           | 98,81         | 98,82        | Relatif sama    |
| Total fuel flow (t/h)         | 70,06         | 69,65        | Sedikit turun   |
| FEGT rata-rata (degC)         | 1013,78       | 1011,24      | Turun 2,54 degC |
| Bed temperature (degC)        | 927,16        | 924,18       | Turun 2,98 degC |
| Bed pressure (kPa)            | 6,08          | 6,18         | Relatif stabil  |
| Main steam pressure (MPa)     | 9,00          | 9,29         | Masih normal    |
| Main steam temperature (degC) | 535,13        | 538,12       | Masih normal    |

Penurunan FEGT dan bed temperature pada skenario co-firing masih berada dalam batas operasi normal. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan kulit kayu 3% tidak menyebabkan gangguan signifikan terhadap stabilitas pembakaran CFB. Nilai main steam pressure dan main steam temperature tetap berada dalam rentang operasional sehingga pembangkit mampu mempertahankan produksi pada beban uji.

### 3.2. Evaluasi Aglomerasi, Smoke, dan Carry Over

Boiler CFB memanfaatkan proses fluidisasi pada bed material. Pada pembakaran campuran biomassa, potensi yang perlu diamati adalah aglomerasi akibat penggumpalan partikel abu serta carry over bahan bakar yang belum terbakar sempurna. Selama pengujian, drain bottom ash diamati untuk melihat kemungkinan terbentuknya gumpalan atau bibit aglomerasi.

Hasil pengamatan bottom ash tidak menunjukkan indikasi aglomerasi signifikan. Beberapa butiran putih yang teramati diduga berkaitan dengan pyrite sehingga perlu analisis laboratorium lanjutan bila co-firing dilakukan dalam jangka panjang. Secara visual, gas buang pada stack juga tidak menunjukkan black smoke dan carry over. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa campuran 3% kulit kayu masih dapat terbakar dengan baik pada konfigurasi operasi yang diuji.

### 3.3. Analisis Emisi Gas Buang

Pengujian emisi dilakukan pada area air heater menggunakan flue gas analyzer. Parameter utama yang dievaluasi adalah SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> karena kedua parameter tersebut menjadi indikator penting kinerja lingkungan PLTU. Hasil perbandingan emisi ditampilkan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Perbandingan emisi gas buang

| Parameter       | Satuan             | 100% batubara | Co-firing 3% | Baku mutu |
|-----------------|--------------------|---------------|--------------|-----------|
| SO <sub>2</sub> | mg/Nm <sup>3</sup> | 246,7         | 190          | 550       |
| NO <sub>x</sub> | mg/Nm <sup>3</sup> | 285           | 307          | 550       |

Penambahan kulit kayu 3% menurunkan emisi SO<sub>2</sub> dari 246,7 mg/Nm<sup>3</sup> menjadi 190 mg/Nm<sup>3</sup>. Dengan menggunakan Persamaan (4), penurunan tersebut setara 22,98%. Penurunan SO<sub>2</sub> sejalan dengan data sulfur kulit kayu yang lebih rendah daripada batubara. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan biomassa dengan kadar sulfur rendah dapat menjadi strategi pengurangan emisi sulfur pada PLTU eksisting.

Emisi NO<sub>x</sub> meningkat dari 285 mg/Nm<sup>3</sup> menjadi 307 mg/Nm<sup>3</sup>, namun nilai tersebut masih berada di bawah baku mutu 550 mg/Nm<sup>3</sup>. Kenaikan NO<sub>x</sub> dapat dipengaruhi oleh perubahan pola pembakaran, ketersediaan oksigen, temperatur lokal, serta distribusi bahan bakar pada boiler CFB. Meskipun demikian, dari sisi kepatuhan lingkungan, hasil uji co-firing 3% masih memenuhi batas yang dipersyaratkan.

### 3.4. Analisis SFC dan Biaya Produksi

SFC dihitung berdasarkan total konsumsi bahan bakar dan energi listrik yang dihasilkan. Pada kondisi 100% batubara, SFC sebesar 0,706 kg/kWh. Pada kondisi co-firing 3%, SFC menjadi 0,707 kg/kWh. Perubahan ini sangat kecil sehingga penambahan kulit kayu 3% tidak memberikan dampak signifikan terhadap konsumsi bahan bakar spesifik pada beban uji.

**Tabel 5.** Hasil perhitungan SFC dan biaya produksi

| Parameter                  | Satuan | 100% batubara | Co-firing 3% |
|----------------------------|--------|---------------|--------------|
| Energi listrik gross       | kWh    | 393750        | 393500       |
| Energi listrik netto       | kWh    | 360870        | 360380       |
| Total konsumsi bahan bakar | kg     | 277940        | 278240       |
| SFC                        | kg/kWh | 0,706         | 0,707        |
| Harga batubara             | Rp/kg  | 535,70        | 535,70       |
| Harga kulit kayu           | Rp/kg  | -             | 277,44       |
| Biaya produksi             | Rp/kWh | 378,14        | 373,31       |

Walaupun SFC co-firing sedikit lebih tinggi, biaya produksi bahan bakar menurun karena harga kulit kayu lebih rendah daripada batubara. Biaya produksi turun dari Rp 378,14/kWh menjadi Rp 373,31/kWh, sehingga terdapat penghematan sekitar Rp 4,83/kWh. Dengan asumsi produksi listrik tahunan 1752 GWh, potensi penghematan biaya bahan bakar diperkirakan mencapai Rp 6,77 miliar per tahun.

### 3.5. Pembahasan Teknis

Secara teknis, keberhasilan co-firing dipengaruhi oleh kesesuaian karakter bahan bakar, sistem feeding, proses mixing, ukuran partikel, serta karakter boiler. Kulit kayu memiliki volatile matter lebih tinggi daripada batubara sehingga lebih mudah terbakar. Namun kandungan moisture kulit kayu yang lebih tinggi dan nilai kalor yang lebih rendah perlu diperhatikan karena dapat menurunkan nilai energi campuran bahan bakar jika porsi biomassa dinaikkan terlalu besar.

Pada porsi 3%, perubahan parameter operasi masih kecil. Bed temperature dan FEGT cenderung menurun, tetapi tidak keluar dari rentang operasi normal. Hal ini menunjukkan bahwa boiler CFB PLTU Teluk Balikpapan memiliki toleransi yang cukup baik terhadap campuran kulit kayu pada porsi rendah. Dari sudut pandang lingkungan, penurunan SO<sub>2</sub> menjadi temuan paling penting karena berkaitan langsung dengan kandungan sulfur bahan bakar.

Risiko teknis yang tetap perlu dikendalikan adalah aglomerasi, slagging, fouling, penyumbatan pada sistem coal handling, serta variasi kualitas biomassa. Untuk operasi jangka panjang, kualitas kulit kayu harus distandarkan melalui pengendalian ukuran, kadar air, dan kontaminan. Monitoring bottom ash, fly ash, temperatur bed, serta emisi gas buang perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan co-firing tetap aman dan stabil.

#### 4. Kesimpulan

- 1) Co-firing kulit kayu 3% pada Unit 2 PLTU Teluk Balikpapan layak secara teknis karena parameter operasi utama tetap stabil pada beban sekitar 100 MW.
- 2) Kandungan sulfur kulit kayu sebesar 0,13% lebih rendah daripada batubara sebesar 0,59%, sehingga berkontribusi terhadap penurunan emisi SO<sub>2</sub>.
- 3) Emisi SO<sub>2</sub> turun dari 246,7 mg/Nm<sup>3</sup> menjadi 190 mg/Nm<sup>3</sup> atau turun sekitar 22,98%, sedangkan NO<sub>x</sub> naik dari 285 mg/Nm<sup>3</sup> menjadi 307 mg/Nm<sup>3</sup> tetapi tetap di bawah baku mutu 550 mg/Nm<sup>3</sup>.
- 4) SFC berubah sangat kecil dari 0,706 kg/kWh menjadi 0,707 kg/kWh, sehingga pengaruh co-firing 3% terhadap konsumsi bahan bakar spesifik relatif terbatas.
- 5) Biaya produksi bahan bakar turun dari Rp 378,14/kWh menjadi Rp 373,31/kWh, sehingga potensi penghematan mencapai Rp 4,83/kWh.
- 6) Pengujian visual tidak menunjukkan black smoke, carry over, ataupun indikasi aglomerasi signifikan, tetapi operasi jangka panjang tetap memerlukan monitoring bottom ash dan kualitas biomassa.

#### Rekomendasi

Pengujian co-firing pada porsi lebih tinggi perlu dilakukan secara bertahap dengan tetap memperhatikan batas temperatur bed, FEGT, emisi, SFC, dan kondisi bottom ash. Kenaikan porsi biomassa tidak boleh hanya mempertimbangkan penurunan emisi, tetapi juga harus mempertimbangkan kestabilan pembakaran, moisture bahan bakar, dan risiko gangguan coal handling. Pengendalian kualitas kulit kayu perlu dibuat sebagai standar operasi. Parameter yang perlu dikontrol meliputi ukuran partikel, kadar air, kandungan sulfur, nilai kalor, kandungan abu, dan kebersihan dari material asing. Penyimpanan biomassa di coal yard juga perlu memperhatikan potensi penurunan kualitas akibat hujan, pembusukan, dan pencampuran yang tidak merata.

Pengujian emisi lanjutan sebaiknya dilakukan menggunakan laboratorium terakreditasi agar hasilnya dapat digunakan untuk evaluasi lingkungan formal. Selain SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>, parameter partikulat, CO, Hg, dan CO<sub>2</sub> juga perlu dimonitor agar profil emisi co-firing dapat dipahami secara menyeluruh. Untuk penerapan jangka panjang, PLTU perlu menyusun prosedur co-firing yang mencakup persiapan biomassa, metode mixing, pengaturan fuel flow, inspeksi bottom ash, jadwal sampling, serta batas penghentian pengujian apabila muncul indikasi abnormal seperti kenaikan tekanan bed, penurunan efisiensi, black smoke, atau kenaikan emisi melebihi batas.

#### Diskusi Operasional Co-Firing

Hasil pengujian menunjukkan bahwa co-firing 3% kulit kayu tidak mengganggu kestabilan boiler CFB. Indikator ini terlihat dari load yang relatif sama antara baseline dan co-firing, penurunan FEGT yang kecil, serta bed temperature yang tetap berada di bawah batas operasi. Stabilitas ini penting karena boiler CFB mengandalkan fluidisasi partikel; gangguan pada distribusi partikel dapat menyebabkan perubahan tekanan bed dan pembakaran tidak merata. Kulit kayu memiliki volatile matter lebih tinggi sehingga proses devolatilisasi terjadi lebih cepat dibandingkan batubara. Kondisi ini dapat membantu penyalaan awal partikel biomassa, tetapi juga perlu dikendalikan agar pembakaran tidak terlalu terpusat pada zona tertentu. Pada porsi 3%, karakter ini belum menimbulkan perubahan temperatur ekstrem, sehingga campuran masih dapat diterima oleh sistem pembakaran.

Kadar moisture kulit kayu yang lebih tinggi berpotensi menyerap sebagian panas pembakaran untuk proses penguapan air. Pada porsi rendah, dampak ini terlihat dari penurunan FEGT dan bed temperature yang kecil. Apabila porsi co-firing dinaikkan, moisture menjadi parameter kritis karena dapat mempengaruhi heat balance boiler, konsumsi bahan bakar, dan respons beban. Pengamatan visual stack yang tidak menunjukkan black smoke menjadi indikasi bahwa pembakaran campuran masih cukup baik. Namun, pengamatan visual tidak dapat menggantikan pengujian emisi kuantitatif. Oleh sebab itu, co-firing jangka panjang perlu dilengkapi monitoring emisi kontinu atau pengujian periodik agar perubahan kualitas biomassa dapat segera terdeteksi.

**Tabel 6.** Evaluasi parameter kritis co-firing 3% kulit kayu

| Aspek           | Temuan pengujian                                | Implikasi operasi                        |
|-----------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SO <sub>2</sub> | Turun dari 246,7 menjadi 190 mg/Nm <sup>3</sup> | Kinerja lingkungan membaik               |
| NO <sub>x</sub> | Naik dari 285 menjadi 307 mg/Nm <sup>3</sup>    | Masih aman terhadap baku mutu            |
| SFC             | 0,706 menjadi 0,707 kg/kWh                      | Dampak konsumsi bahan bakar sangat kecil |
| Bed temperature | Turun 2,98 degC                                 | Fluidisasi masih stabil                  |
| FEGT            | Turun 2,54 degC                                 | Tidak mengganggu pembakaran              |
| Bottom ash      | Tidak tampak aglomerasi signifikan              | Perlu monitoring jangka panjang          |

### Risiko Teknis dan Mitigasi

Penerapan co-firing biomassa tidak hanya ditentukan oleh keberhasilan uji singkat, tetapi juga oleh kemampuan menjaga kualitas bahan bakar dalam operasi berulang. Risiko utama berasal dari variasi kadar air, ukuran partikel, kontaminan, serta kestabilan pasokan biomassa. Perubahan karakteristik tersebut dapat mengubah pola pembakaran dan berdampak pada emisi, SFC, maupun kondisi abu. Risiko aglomerasi pada boiler CFB perlu mendapat perhatian khusus. Aglomerasi dapat mengganggu fluidisasi, menaikkan tekanan bed, menurunkan efisiensi perpindahan panas, dan pada kondisi berat dapat memaksa unit untuk shutdown. Pada pengujian 3% belum ditemukan aglomerasi signifikan, tetapi indikasi butiran putih pada bottom ash perlu dianalisis lebih lanjut untuk memastikan komposisi kimia dan potensi pembentukan deposit.

Risiko pada sistem bahan bakar muncul karena biomassa kulit kayu memiliki bentuk dan kerapatan berbeda dari batubara. Apabila ukuran terlalu besar atau kadar air terlalu tinggi, kulit kayu dapat menyebabkan bridging, plugging, atau feeding tidak merata pada coal handling. Oleh karena itu, prosedur mixing harus memastikan campuran homogen sebelum masuk ke coal bunker. Mitigasi teknis dapat dilakukan dengan membatasi porsi co-firing awal pada 3%, melakukan sampling bahan bakar secara rutin, mengontrol ukuran partikel, menjaga area penyimpanan dari hujan, dan melakukan inspeksi bottom ash setelah pengujian. Pengujian lanjutan dengan porsi lebih tinggi harus dilakukan bertahap dan dihentikan apabila muncul indikator abnormal.

**Tabel 7.** Risiko dan mitigasi pengoperasian co-firing

| Risiko                     | Penyebab potensial                                 | Mitigasi                                        |
|----------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Aglomerasi bed             | Abu biomassa dan mineral membentuk gumpalan        | Monitoring bottom ash dan analisis laboratorium |
| Plugging handling          | Ukuran kulit kayu tidak seragam atau terlalu basah | Screening, mixing merata, dan kontrol moisture  |
| SFC meningkat              | Nilai kalor biomassa lebih rendah                  | Batasi porsi campuran dan evaluasi heat rate    |
| Emisi NO <sub>x</sub> naik | Perubahan temperatur lokal dan excess air          | Optimasi udara pembakaran dan distribusi fuel   |
| Kualitas pasokan berubah   | Supplier dan kondisi penyimpanan tidak stabil      | Spesifikasi kontrak dan inspeksi penerimaan     |

### Implikasi Ekonomi dan Lingkungan

Dari sisi ekonomi, hasil co-firing 3% menunjukkan penurunan biaya produksi bahan bakar meskipun SFC sedikit meningkat. Penurunan biaya terutama disebabkan oleh harga kulit kayu yang lebih rendah daripada batubara. Dengan asumsi operasi tahunan tertentu, penghematan kecil per kWh dapat berubah menjadi nilai rupiah yang signifikan karena volume produksi listrik PLTU sangat besar. Dari sisi lingkungan, penurunan SO<sub>2</sub> merupakan manfaat utama. Penurunan ini mendukung kepatuhan terhadap baku mutu emisi dan dapat membantu peningkatan kinerja lingkungan pembangkit. Akan tetapi, kenaikan NO<sub>x</sub> tetap perlu dipantau karena perubahan komposisi bahan bakar dapat mempengaruhi formasi thermal NO<sub>x</sub> dan fuel NO<sub>x</sub>.

Co-firing biomassa juga mendukung pemanfaatan limbah organik lokal. Apabila rantai pasok dikelola dengan baik, kulit kayu dapat menjadi sumber energi tambahan sekaligus mengurangi limbah industri kayu. Namun, manfaat keberlanjutan tersebut bergantung pada kontinuitas pasokan, jarak transportasi, dan standar kualitas biomassa yang masuk ke pembangkit. Implementasi co-firing jangka panjang sebaiknya diikuti evaluasi neraca energi dan neraca emisi yang lebih lengkap. Evaluasi tersebut mencakup dampak terhadap heat rate, auxiliary power, konsumsi limestone pada boiler CFB, kualitas abu, biaya penanganan biomassa, dan dampak emisi total sepanjang rantai pasok.

**Tabel 8.** Ringkasan dampak co-firing 3% kulit kayu

| Dimensi    | Dampak utama                         | Catatan                                  |
|------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| Operasi    | Parameter boiler tetap stabil        | Beban uji sekitar 100 MW                 |
| Lingkungan | SO <sub>2</sub> turun 22,98%         | NO <sub>x</sub> tetap di bawah baku mutu |
| Ekonomi    | Biaya produksi turun Rp 4,83/kWh     | Bergantung harga biomassa dan batubara   |
| Keandalan  | Tidak tampak black smoke/carry over  | Perlu validasi jangka panjang            |
| Pasokan    | Memanfaatkan limbah kulit kayu lokal | Butuh kontrol mutu dan kontinuitas       |

### Keterbatasan Kajian

Kajian ini menggunakan data pengujian co-firing 3% dengan durasi terbatas sehingga hasilnya merepresentasikan kondisi uji, bukan seluruh variasi operasi tahunan. Perubahan beban, musim hujan, perubahan kualitas batubara, dan variasi pasokan kulit kayu dapat memberikan hasil yang berbeda. Karena itu, hasil ini paling tepat digunakan sebagai dasar awal untuk pengujian lanjutan.

Pengujian emisi dilakukan pada titik ukur tertentu dan perlu dikonfirmasi kembali melalui metode pengujian yang mengikuti standar lingkungan terbaru. Untuk kepentingan pelaporan formal, pengujian oleh laboratorium terakreditasi tetap diperlukan agar data emisi dapat diterima sebagai bukti kepatuhan lingkungan. Perhitungan biaya produksi menggunakan harga bahan bakar yang tersedia pada saat kajian. Perubahan harga batubara, harga biomassa, biaya transportasi, dan biaya penanganan biomassa dapat mengubah besaran penghematan. Oleh sebab itu, analisis ekonomi perlu diperbarui apabila co-firing akan diterapkan sebagai program operasi permanen.

### Strategi Implementasi di Unit Pembangkit

Agar penerapan co-firing berjalan konsisten, unit pembangkit perlu menyusun strategi implementasi yang dimulai dari ketersediaan biomassa. Kulit kayu harus dipastikan memiliki pemasok yang stabil, jarak angkut yang ekonomis, serta kualitas yang tidak berubah ekstrem antar pengiriman. Ketidakstabilan pasokan dapat menyebabkan variasi campuran yang pada akhirnya mempengaruhi operasi boiler. Tahap penerimaan bahan bakar perlu dilengkapi inspeksi visual dan sampling sederhana. Pemeriksaan awal dapat mencakup ukuran potongan kulit kayu, kadar air indikatif, kontaminan batu atau logam, dan kondisi pembusukan. Biomassa yang terlalu basah sebaiknya tidak langsung digunakan karena dapat menaikkan moisture campuran dan menurunkan nilai kalor efektif. Pada area coal yard, proses mixing harus dirancang agar komposisi 3% dapat tercapai secara merata. Campuran yang tidak homogen dapat menyebabkan sebagian coal feeder menerima porsi biomassa lebih tinggi daripada yang direncanakan. Kondisi tersebut dapat memicu variasi temperatur lokal dan perubahan respons pembakaran pada furnace.

Operator perlu memiliki lembar monitoring khusus selama co-firing. Parameter yang dicatat tidak hanya load dan fuel flow, tetapi juga perbedaan temperatur bed antar titik, perubahan air chamber pressure, kondisi sealpot, emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>, serta temuan visual pada stack. Format monitoring yang konsisten akan memudahkan evaluasi tren dari satu pengujian ke pengujian berikutnya. Program co-firing juga membutuhkan koordinasi antara bagian operasi, pemeliharaan, lingkungan, energi primer, dan keuangan. Bagian operasi menjaga kestabilan unit, bagian pemeliharaan memantau dampak pada peralatan, bagian lingkungan mengevaluasi emisi, bagian energi primer menjaga kualitas dan pasokan biomassa, sedangkan bagian keuangan menilai dampak biaya produksi. Berdasarkan hasil uji 3%, penerapan jangka panjang dapat dimulai pada porsi rendah dengan periode evaluasi tertentu. Apabila hasilnya stabil, porsi biomassa dapat dinaikkan secara bertahap. Setiap kenaikan porsi

perlu disertai evaluasi ulang terhadap SFC, emisi, bottom ash, dan potensi gangguan handling agar manfaat lingkungan tidak menimbulkan risiko operasi baru.

| <b>Tabel 9.</b> Tahapan implementasi co-firing kulit kayu<br><b>Tahap</b> | <b>Kegiatan utama</b>                                   | <b>Output yang diharapkan</b>           |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Persiapan pasokan                                                         | Verifikasi pemasok, harga, dan kontinuitas kulit kayu   | Pasokan biomassa stabil                 |
| Penerimaan bahan bakar                                                    | Sampling ukuran, moisture, dan kontaminan               | Biomassa layak dicampur                 |
| Mixing di coal yard                                                       | Pencampuran kulit kayu dan batubara sesuai porsi        | Komposisi bahan bakar homogen           |
| Operasi uji                                                               | Monitoring load, temperatur, tekanan, SFC, dan emisi    | Data operasi terukur                    |
| Evaluasi teknis                                                           | Analisis bottom ash, black smoke, carry over, dan emisi | Keputusan kelayakan lanjutan            |
| Implementasi rutin                                                        | Penyusunan SOP dan jadwal sampling berkala              | Co-firing terkendali dan terdokumentasi |

### Validasi Data dan Kesiapan Replikasi

Hasil pengujian perlu dipandang sebagai baseline awal untuk replikasi co-firing pada periode berikutnya. Agar data dapat dibandingkan secara adil, kondisi operasi saat pengujian ulang sebaiknya dibuat mendekati pengujian awal, terutama beban unit, jenis batubara, durasi pengambilan data, dan interval pencatatan parameter. Validasi data SFC perlu memperhatikan kesesuaian pembacaan totalizer coal feeder dan kWh meter. Perbedaan kecil pada total konsumsi bahan bakar dapat mempengaruhi nilai SFC karena selisih antara skenario baseline dan co-firing sangat kecil. Oleh karena itu, kalibrasi instrumen dan konsistensi waktu pencatatan harus dijaga.

Validasi emisi harus dilakukan pada titik sampling yang sama dan dengan metode yang sama. Perbedaan titik sampling, kondisi excess air, dan durasi stabilisasi pembakaran dapat menyebabkan variasi hasil SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>. Pengujian berulang akan memberikan keyakinan lebih baik terhadap efektivitas kulit kayu dalam menurunkan emisi sulfur. Replikasi pengujian juga perlu menyertakan dokumentasi visual dan foto kondisi bahan bakar, proses mixing, bottom ash, serta stack. Dokumentasi ini membantu reviewer dan operator memahami bahwa perubahan angka operasi didukung oleh kondisi lapangan yang teramati, bukan hanya hasil perhitungan.

**Tabel 10.** Tahapan implementasi co-firing kulit kayu

| <b>Simbol/Istilah</b> | <b>Keterangan</b>            | <b>Satuan</b>      |
|-----------------------|------------------------------|--------------------|
| SFC                   | Specific Fuel Consumption    | kg/kWh             |
| SO <sub>2</sub>       | Sulfur dioksida              | mg/Nm <sup>3</sup> |
| NO <sub>x</sub>       | Nitrogen oksida              | mg/Nm <sup>3</sup> |
| GCV                   | Gross Calorific Value        | kcal/kg            |
| FEGT                  | Furnace Exit Gas Temperature | degC               |
| CFB                   | Circulating Fluidized Bed    | -                  |
| H <sub>mix</sub>      | Harga bahan bakar campuran   | Rp/kg              |
| C                     | Biaya produksi bahan bakar   | Rp/kWh             |

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi PLN, pembimbing, serta pihak PLTU Teluk Balikpapan yang telah mendukung penyediaan data dan pelaksanaan evaluasi co-firing kulit kayu.

## Daftar Rujukan

- 1) Tillman DA. Final Report: EPRI-USDOE Cooperative Agreement Co-firing Biomass with Coal. Clinton, New Jersey; 2001.
- 2) Burdett N. The Development of the 500 MW Co-firing Facility at Drax Power Station. North Yorkshire; 2010.
- 3) Aziz M, Budianto D, Oda T. Computational fluid dynamic analysis of co-firing of biomass and coal. Energies. 2016. Truong AH. Feasibility and Sustainability of Co-firing Biomass in Coal Power Plants in Vietnam. Vietnam; 2015.
- 4) Prabowo G. Laporan Kajian Co-firing Bahan Bakar Batubara dengan Biomassa pada PLTU Paiton 1-2. Surabaya: ITS Tekno Sains; 2019.
- 5) Sugiyanto, Abdillah M, Nugroho A. Pengujian dan Simulasi Co-firing Bahan Bakar Batubara dengan Biomassa pada PLTU Paiton 2x400 MW. Jurnal EBTKE ESDM; 2019.
- 6) Operation Manual of Steam Turbine 2x110 MW Coal-Fired Power Plant in Balikpapan of Indonesia.
- 7) Sadjak M, Kmiec M, Micek B, Hrabak J. Determination of the optimal ratio of coal to biomass in the co-firing process. International Journal of Environmental Science and Technology. 2019;16:2989-3000.
- 8) Retschitzegger S. High Temperature Corrosion in Biomass-Fired Fixed Bed Boilers. Graz University of Technology; 2017.
- 9) Pother-Simon J. High Temperature Corrosion of Superheaters in Biomass and Waste Fired Boilers. Chalmers University of Technology; 2019.
- 10) Basel Convention Regional Centre for South East Asia. Final Report Mercury Emissions From Coal Fired Power Plants in Indonesia. Jakarta; 2017.
- 11) Pintana P, Tippayawong N. Predicting ash deposit tendency in thermal utilization of biomass. Engineering Journal. 2016;20(5).
- 12) Operation Manual of Coal Handling Facility 2x110 MW Coal-Fired Power Plant in Balikpapan of Indonesia.
- 13) Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.
- 14) Peraturan Direksi PT PLN (Persero) No. 0004.P/DIR/2022 tentang Pedoman Pelaksanaan Co-firing.
- 15) Putra TS, Prabowo E, Ramadani F. Pengaruh Overhaul Terhadap Kinerja High Pressure Heater Unit 3 PLTU Banten Lontar. JTM: JURNAL TEKNIK MESIN. 2026 Feb 1;2(1):10-5.