

CALCULATION OF CARBON EMISSIONS AND CAP AND TRADE/TAX SCHEMES AT CO-FIRING COAL POWER PLANTS

(Perhitungan Emisi Karbon Dan Skema Cap And Trade/Tax Pada Pltu Batubara Yang Melakukan Co-Firing)

Agus Noor Sidiq^{1*}, Suwardi²

ABSTRACT

The Implementation of co-firing on coal-fired power plants in Indonesia can reduce Greenhouse Gas (GHG) emissions that affect climate change. This reduction in Greenhouse Gas (GHG) emissions has the potential to avoid the carbon tax imposed on carbon-producing industries that exceed the upper limit of carbon emissions. The difference between the Carbon Emission Factor (FE_{CO_2}) in tons of CO_2 e/MWh against the assigned Carbon Cap means the Carbon Economic Value (CEV) owned. CEV can be positive or negative depending on the difference between the results of the Carbon Cap. The opportunity for CEV to be traded depends on the amount of CEV that can be obtained from the co-firing. From this research, it was found that to get a good CEV, the minimum co-firing percentage is 7%. From the calculation results, the lowest value of FE_{CO_2} (corr) that can be achieved in the calculations in this paper is 0.993 tons/MWh at the co-firing percentage of 7%, while the maximum value of FE_{CO_2} (tot) was 1.079 tons/MWh at 7% co-firing percentage. From this study, it was also found that the greater the percentage of co-firing used, the lower the value of FE_{CO_2} (corr) while the value of FE_{CO_2} (tot) is getting bigger.

Keywords: Biomass, Greenhouse Gas, Co-Firing, Carbon Economic Value

PENDAHULUAN

Presiden Republik Indonesia telah menerbitkan Peraturan Presiden No. 98 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) untuk pencapaian target kontribusi yang ditetapkan secara nasional dan pengendalian emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dalam pembangunan nasional pada tanggal 29 Oktober 2021. Peraturan Presiden No. 98 Tahun 2021 ini merupakan *game changer* bagi sektor kebijakan *climate change* di Indonesia terutama dalam upaya pemerintah untuk mengelola mekanisme perdagangan karbon dan menciptakan *sustainable green economy*. Peraturan Presiden No. 98 Tahun 2021 merupakan

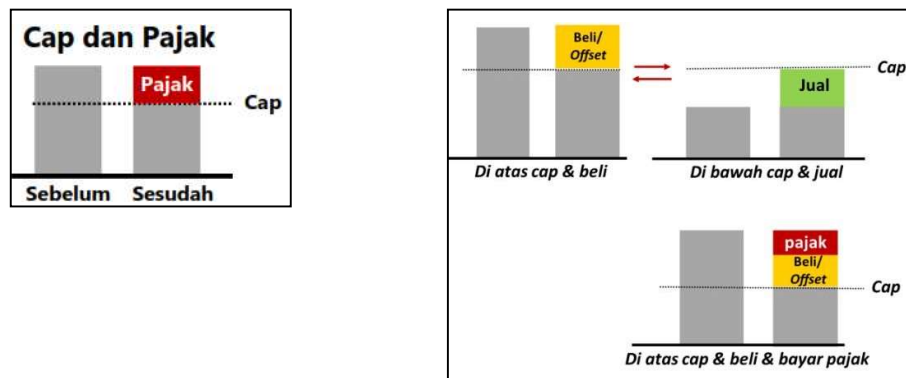
¹ PLN UPDL Suralaya, Cilegon, Indonesia

² PLN IP Suralaya PGU, Cilegon, Indonesia

*Corresponding author:
agus.ns@pln.co.id

salah satu landasan yang sangat penting bagi upaya pemerintah untuk mencapai target *Nationally Determined Contribution* (NDC) Indonesia yaitu sebesar 29% dengan usaha sendiri dan 41% dengan kerja sama internasional pada tahun 2030 (Salsabila, 2021).

Regulasi ini mengatur mengenai penyelenggaraan NEK yang merupakan nilai terhadap setiap unit emisi GRK yang dihasilkan dari kegiatan manusia dan kegiatan ekonomi. Penyelenggaraan NEK untuk memenuhi NDC dilakukan antara lain melalui mekanisme perdagangan karbon, pembayaran berbasis kinerja, pungutan atas emisi karbon, dan/atau mekanisme lain yang ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Batas Atas Emisi GRK merupakan tingkat emisi GRK maksimal dalam suatu periode tertentu yang ditetapkan dengan menyusun dan menetapkan tingkat emisi GRK sub sektor serta usaha dan/atau kegiatan oleh menteri terkait. Batas Atas Emisi GRK disusun berdasarkan beberapa komponen yaitu baseline emisi GRK sektor, target NDC nasional pada sektor, hasil inventarisasi emisi GRK, dan/atau waktu pencapaian target. Batas Atas Emisi GRK digunakan dalam mekanisme perdagangan emisi melalui skema kebijakan perdagangan emisi. Mekanisme ataupun skema kebijakan terkait emisi GRK ini bisa dijelaskan pada gambar di bawah ini.



(a) Skema *Cap And Tax*

(b) Skema *Cap And Trade/Tax*

Gambar 1. Skema kebijakan terkait emisi GRK (Dirjen, 2021)

Salah satu kebijakan berbasis pasar yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah yang disebabkan oleh emisi karbon dari industri adalah kebijakan pajak karbon (Putra, 2021). Merujuk pada *Tax Foundation* (2019), pajak karbon dianggap sebagai *pigouvian tax*. *Pigouvian tax* adalah pajak atas kegiatan ekonomi yang menciptakan eksternalitas negatif.

Pajak karbon ini membuat individu yang membeli barang yang dibuat melalui proses produksi padat karbon menanggung biaya tambahan. Berdasarkan gambar 1(a) di atas maka emitter yang memproduksi emisi melebihi *cap* maka akan dikenakan *tax*, sedangkan gambar 1(b) menjelaskan bahwa emitter yang memproduksi emisi melebihi *cap* dapat memiliki opsi untuk membeli/*trading* dari emitter yang memproduksi emisi di bawah *cap* ataupun jika tidak bisa membeli seluruh kelebihan/*trading* emisi maka sisa kelebihan emisi akan dikenakan *tax*. *Co-Firing* biomassa yang sudah dijalankan di PLTU batubara harus dicermati dengan seksama sehingga dapat menciptakan peluang baru di masa depan. Biomassa adalah bagian dari siklus karbon. CO₂ dihasilkan setelah pembakaran biomassa. Dalam skala waktu tertentu, CO₂ diperbarui dari atmosfer selama generasi berikutnya dari pertumbuhan baru tumbuhan hijau (Sadrul, 2012) .

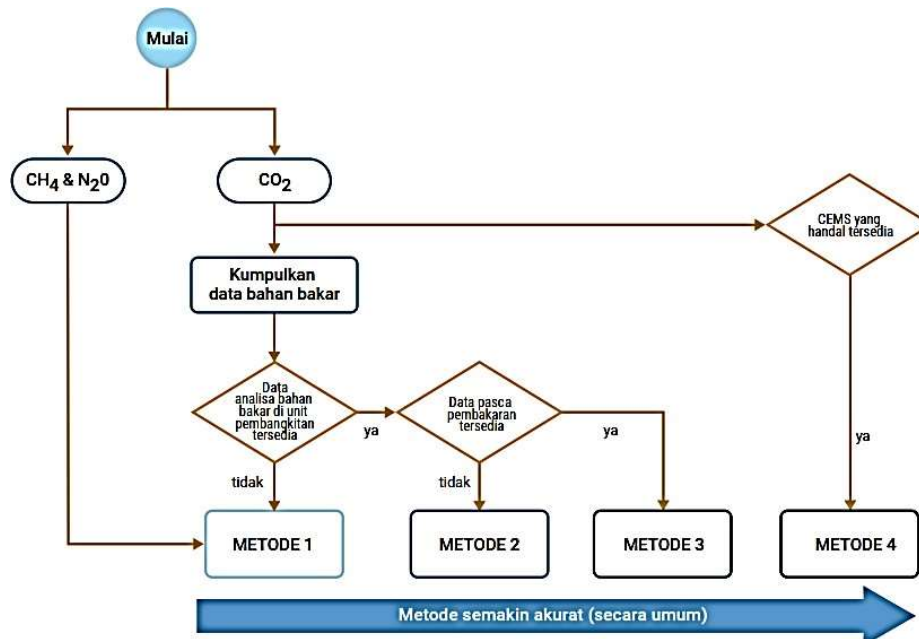
Emisi GRK dari pembakaran *biomass-based fuel* mirip dengan bahan bakar fosil. Meskipun demikian, asal karbon dari dua bahan bakar ini berbeda. Karbon dari *biomass-based fuel* merupakan karbon biogenik yang terkandung dalam suatu jaringan yang hidup dan bernafas (tanaman), sedangkan karbon yang terkandung dalam bahan bakar fosil terperangkap dalam formasi geologis selama jutaan tahun. Dengan demikian, inventarisasi emisi CO₂ dari pembakaran *biomass-based fuel* adalah 0 (nol) karena dianggap diserap kembali oleh tanaman bersangkutan (karbon netral). Namun demikian, emisi CO₂ dari pembakaran *biomass-based fuel* tetap dihitung tetapi tidak dipertimbangkan dalam total emisi CO₂ dan dilaporkan secara terpisah (Jenderal, 2018).

Skema *Cap And Trade/Tax* sebagai salah satu mekanisme yang bisa dilakukan untuk melakukan mitigasi emisi karbon di Indonesia sesuai yang dijelaskan pada gambar 1 (satu). Nilai *carbon cap* seperti pada tabel di bawah ini sesuai dengan pernyataan dari kementerian ESDM dengan kategori nilai *carbon cap* berdasarkan kapasitas PLTU.

Tabel 1. *Carbon Cap* PLTU (Dirjen, 2021)

No	Jenis Pembangkit	Kapasitas Terpasang (MW)	Nilai Cap (ton CO ₂ /MWh)
1	PLTU	$X > 400$	0,918
2	PLTU	$100 \leq X \leq 400$	1,013
3	PLTU Mulut Tambang	$100 \leq X \leq 400$	1,094

Perhitungan emisi GRK yang dihasilkan oleh suatu industri dijelaskan sesuai Pedoman Perhitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca yang dikeluarkan oleh kementerian ESDM seperti dijelaskan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. Metode Perhitungan Emisi GRK (Jenderal, 2018).

Pelaksanaan *co-firing* di PLTU berbahan bakar batubara yang sudah dilakukan oleh PLN sejak tahun 2019 menjadi keuntungan tersendiri yang dapat dijadikan acuan terhadap *carbon cap*. Diharapkan dengan dilakukan *co-firing* pada PLTU batubara dapat menurunkan emisi CO₂ dari penggunaan batubara hingga di bawah *cap* yang telah ditetapkan. Hal ini bisa menghindari pengenaan *carbon tax* dan juga keuntungan lainnya bisa memiliki NEK yang suatu saat bisa diperjualbelikan di pasar karbon. Perhitungan emisi GRK dengan *Tier* tertinggi (*Tier-3*) biasanya dipersyaratkan dalam mekanisme jual beli karbon karena antara penjual dan pembeli memerlukan tingkat ketelitian data emisi GRK yang tinggi seperti ditunjukkan pada matriks tabel 2 (dua) di bawah ini. Namundemikian, unit pembangkitan listrik yang mengetahui kandungan karbon tersisa pada *fly ash* dan *bottom ash* atau yang memiliki *Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS)* yang beroperasi minimal 97,5% selama pembangkit beroperasi dapat menggunakan perhitungan emisi CO₂

dengan *Tier* tertinggi (*Tier-3*) (Jenderal, 2018).

Berikut matriks yang menjelaskan tingkatan *Tier* dan kaitannya dengan jenis metode perhitungan emisi GRK yang dapat digunakan.

Tabel 2. Matriks sistem *Tier* (Jenderal, 2018)

Tier	Data yang diperlukan		Metode
	Aktivitas	Faktor Emisi	
Tier-1	Konsumsi bahan bakar (NCV default IPCC-2006)	Faktor emisi <i>default</i> IPCC-2006	Metode-1
Tier-2	Konsumsi bahan bakar (NCV default nasional atau NCV di unit pembangkit)	Faktor emisi nasional	Metode-1
		Faktor emisi spesifik di unit pembangkit listrik (terdapat data kandungan karbon dan menggunakan faktor oksidasi default)	Metode-2
Tier-3	Konsumsi bahan bakar per teknologi pembakaran (NCV di unit pembangkitan)	Faktor emisi spesifik di unit pembangkit listrik (terdapat data kandungan karbon dan menggunakan faktor oksidasi spesifik di unit pembangkit)	Metode-2
		Faktor emisi spesifik di unit pembangkit listrik (terdapat data kandungan karbon dan data kandungan karbon tidak terbakar (<i>unburned carbon</i>))	Metode-3
		Emisi GRK sesuai CEMS	Metode-4

METODE PENELITIAN

Seperti dijelaskan sebelumnya pada tabel di atas bahwa terdapat 4 (empat) metode

cara perhitungan jumlah emisi GRK sesuai dengan Pedoman Perhitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca yang dikeluarkan oleh kementerian ESDM. Dalam hal ini penulis menggunakan metode 2 (dua) untuk proses perhitungan emisi GRK. Metode ini masuk ke dalam tier-3 sehingga hasil proses perhitungannya diharapkan masih cukup akurat. Metode perhitungan yang digunakan adalah metode 2 (dua) seperti ditunjukkan pada perhitungan di bawah ini.

$$E_{CO_2} = F_{BB} \times C_{ar} \times FO \times 44/12 \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

- ECO₂ : Total Emisi CO₂ (ton)
- FBB : Konsumsi bahan bakar (ton)
- Car : Kandungan karbon, *as received, percentage (weighted average)*
- FO : Faktor Oksidasi Spesifik
- 44 : Massa molekul CO₂
- 12 : Massa atom C

Dimana kandungan karbon *as received*, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_{ar} = C_{ad} \times \left[\frac{(100) - TM_{ar}}{(100) - M_{ad}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

- TM_{ar} : *Total Moisture* = kadar air total (*as received*) dalam *weighted average* (%)
- M_{ad} : *Inherent Moisture* = kadar air bawaan (*as dried*) dalam *weighted average* (%)
- C_{ad} : Kandungan karbon (*as dried*) dalam *weighted average* (%)

Berdasarkan tabel 1 (satu) diatas *carbon cap* dinyatakan dalam faktor emisi, yaitu perbandingan jumlah emisi CO₂ dalam ton terhadap produksi energi listrik dalam MWh yang dibangkitkan dalam suatu periode waktu tertentu. Sehingga faktor emisi dapat dinyatakan dalam persamaan di bawah ini.

$$FE_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}}{\text{Produksi MWh}} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

FE_{CO₂} : Faktor Emisi (ton/MWh)

Biomass co-firing adalah teknologi yang menjanjikan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil untuk pembangkit listrik dan karenanya diharapkan dapat mengurangi inventarisasi emisi GRK. Batubara dan *biomass co-firing* menghasilkan keuntungan yang relevan dari kemudahan implementasi yang relatif mudah dengan menghasilkan pengurangan emisi CO₂ dan polutan lainnya (SO_x, NO_x) yang efektif ke atmosfer.

Bahan bakar yang berasal dari *biomass-based fuel* (kayu, cangkang, sisa pertanian, *biogas*, dan lainnya) bisa dijadikan sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil. Emisi GRK dari pembakaran *biomass-based fuel* mirip dengan bahan bakar fosil. Meskipun demikian, asal karbon dari dua bahan bakar ini berbeda. Karbon dari *biomass-based fuel* merupakan karbon biogenik yang terkandung dalam suatu jaringan yang hidup dan bernafas (tanaman), sedangkan karbon yang terkandung dalam bahan bakar fosil terperangkap dalam formasi geologis selama jutaan tahun. Dengan demikian, inventarisasi emisi CO₂ dari pembakaran *biomass-based fuel* adalah 0 (nol) karena dianggap diserap kembali oleh tanaman bersangkutan (karbon netral). Namun demikian, emisi CO₂ dari pembakaran *biomass-based fuel* tetap dihitung tetapi tidak dipertimbangkan dalam total emisi CO₂ dan dilaporkan secara terpisah (Jenderal, 2018). Dalam hal ini persamaan 3 (tiga) di atas dapat dikembangkan lagi menjadi persamaan berikut.

$$FE_{CO_2} (tot) = \frac{E_{CO_2 bb} + E_{CO_2 biomass}}{\text{Produksi MWh}} \dots\dots\dots (4)$$

$$FE_{CO_2} (corr) = \frac{E_{CO_2 bb}}{\text{Produksi MWh}} \dots\dots\dots (5)$$

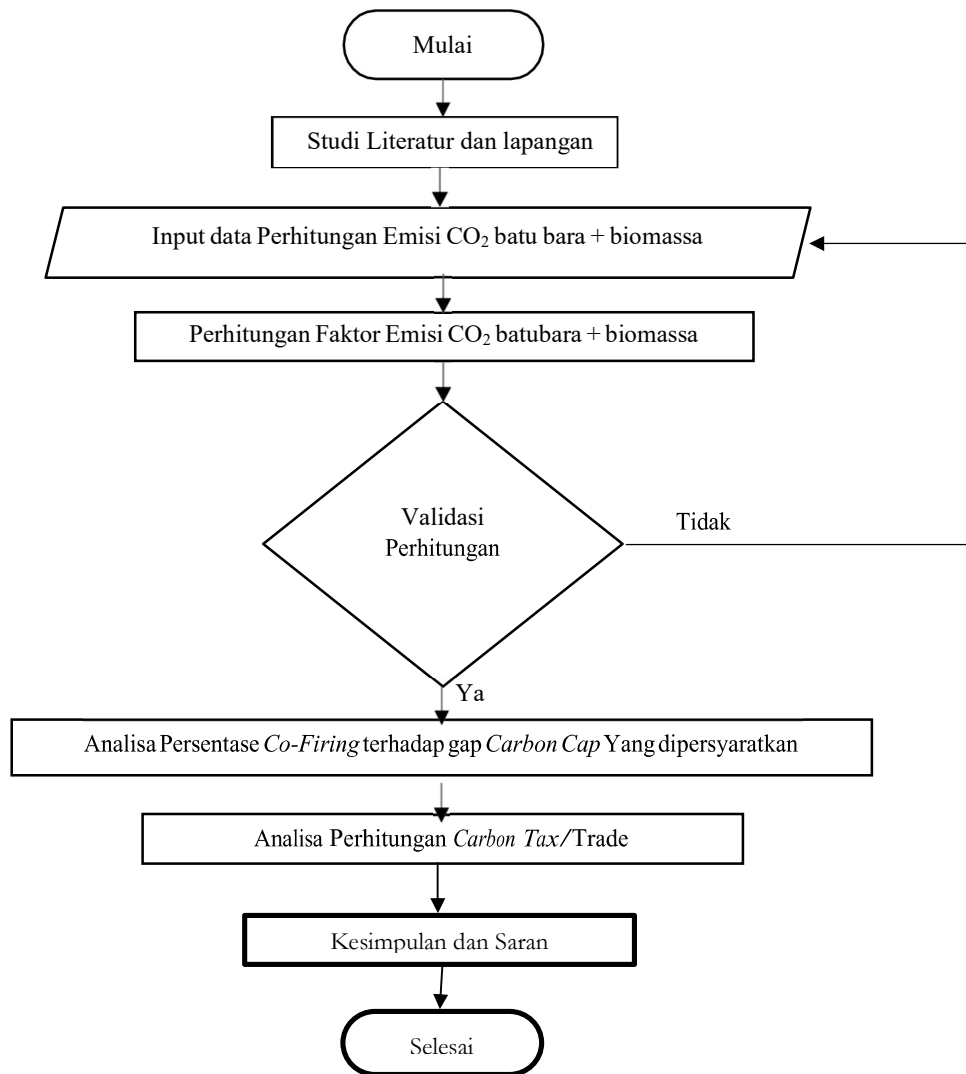
Dimana :

FE_{CO₂}(tot) : Faktor Emisi total gabungan batubara dan biomassa (ton/MWh)

FE_{CO₂}(corr) : Faktor Emisi koreksi (komponen batubara saja) (ton/MWh)

E_{CO₂bb} : Jumlah Emisi CO₂ dari komponen batubara (ton)

Pada PLTU yang melakukan *co-firing* tentunya ada dua jenis bahan bakar yang terlibat yaitu batu bara dan biomassa yang masing-masing memiliki nilai persentase karbon yang berbeda. Dalam hal ini nanti bisa dihitung secara parsial untuk emisi CO₂ yang dihasilkan. Yang pertama yaitu emisi CO₂ dari komponen batu bara dan kedua emisi CO₂ dari komponen biomassa. Jumlah kedua perhitungan tersebut akan bisa dihitung untuk faktor emisi CO₂ gabungan batubara dan biomassa. Metode Penelitian yang digunakan seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 3. Flowchart Metode Penelitian

Penurunan emisi CO₂ dari pelaksanaan *co-firing* tergantung pada banyak faktor, misalnya : tipologi biomassa yang tersedia dan karakteristik batubara, teknologi dan konfigurasi boiler utilitas batubara, serta alternatif *co-firing* yang dipilih untuk diimplementasikan. Penilaian terhadap penurunan emisi GRK yang dicapai cukup memadai dan penting, karena akan mempengaruhi profitabilitas pemanfaatan biomassa, karena hubungannya dengan perdagangan emisi karbon serta terkait langsung dengan tambahan pendapatan yang akhirnya diperoleh (Sebastián, 2011).

Penelitian masa depan tentang karakteristik termal, kimia, mekanik biomassa, masalah teknis dalam pembakaran biomassa dan kondisi *co-firing* yang optimal harus ditangani. Akhirnya, insentif, kebijakan peraturan dan lingkungan yang menguntungkan akan menjadi faktor utama yang mendorong pengembangan teknologi *co-firing*. *Co-firing* biomassa menghasilkan keuntungan yang cukup baik dari segi kemudahan implementasi yang relatif terhadap pengurangan emisi CO₂ serta polutan lainnya seperti (SO_x, NO_x) yang efektif ke atmosfer (Gil, 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan emisi CO₂ dari pelaksanaan *co-firing* ini memerlukan suatu data lapangan yang diambil dari suatu data operasional PLTU batubara yang sudah melakukan *co-firing* biomassa. Data operasi pada sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan kapasitas 4 x 400 MW pada tahun 2022 ditunjukkan pada tabel berikut yang menunjukkan hubungan antara jumlah pemakaian batubara, biomassa, nilai kalori serta produksi bruto yang dihasilkan.

Data pada tabel 3 (tiga) di atas menunjukkan data operasi bulanan PLTU dengan kapasitas total 4 x 400 MW yang sudah melakukan *co-firing* dengan batubara yang digunakan adalah batubara jenis *sub-bituminous* dan biomassa yang digunakan untuk *co-firing* adalah jenis *sawdust* dengan karakteristik yang ditunjukkan dalam bentuk *proximate* dan *ultimate analysis* pada tabel 4.

Proximate analysis dilakukan untuk mengetahui bahan volatil, abu, karbon tetap dan kadar air sampel *sawdust* sesuai metode standard sedangkan tujuan dari *ultimate analysis* adalah untuk menentukan komposisi unsur seperti karbon, hidrogen, nitrogen, belerang dan kandungan oksigen pada *sawdust* (Varma, 2016). Dari data pada tabel 3 (tiga) dan 4

(empat) serta perhitungan faktor oksidasi spesifik merujuk pada persamaan 1 (satu) di atas maka jumlah emisi CO₂ pada saat proses *co-firing* yang dihasilkan dapat dihitung.

Tabel 3. Data Operasi PLTU 4 x 400 MW

Bulan	Energi Primer	Produksi Bruto (MWh)	Energi Primer		Persentase <i>Co-Firing</i>
			Volume	Nilai Kalori	
			ton	kCal/kg	
Jan	Batubara	1.065.922,36	602.156,59	4.504,91	1,02%
	Biomassa	7.475,43	6.203,56	3.067,12	
Feb	Batubara	993.732,85	558.409,48	4.519,39	0,62%
	Biomassa	4.269,55	3.495	3.103,19	
Mar	Batubara	1.061.593,56	599.000,21	4.806,80	1,24%
	Biomassa	8.650,17	7.547,61	3.108,53	
Apr	Batubara	1.014.188,62	577.220,43	4.758,87	0,55%
	Biomassa	3.543,48	3.195,95	3.003,09	
Mei	Batubara	776.516,91	434.523,42	4.805,34	0,42%
	Biomassa	2.014,33	1.814,93	2.985,05	
Jun	Batubara	1.025.706,34	576.696,20	4.815,49	0,52%
	Biomassa	3.313,16	3.005,68	2.984,26	
Jul	Batubara	1.012.906,26	571.686,88	4.856,91	0,49%
	Biomassa	3.055,27	2.802,38	2.986,56	
Aug	Batubara	982.705,59	549.966,30	4.868,53	0,84%
	Biomassa	5.129,71	4.642,59	3.010,17	

Tabel 4. Data *Proximate And Ultimate Analysis* Batubara dan *Sawdust*

<i>Proximate Analysis (Mass Percent %) as received</i>		
Parameter	Batubara	<i>Sawdust</i>
<i>Total Moisture</i>	28,32	3,07
<i>Ash</i>	2,73	3,38
<i>Volatiles</i>	34,83	80,87
<i>Fixed Carbon</i>	34,12	12,68

<i>Ultimate Analysis (Mass Percent %) as received</i>		
Parameter	Batubara	Sawdust
<i>Total Moisture</i>	28,32	-
<i>Ash</i>	2,73	-
<i>Sulfur</i>	0,14	-
<i>Hydrogen</i>	3,6	6,62
<i>Carbon</i>	50,67	46,09
<i>Nitrogen</i>	0,89	0,1
<i>Oxygen</i>	13,65	47,19
<i>H/C molar ratio</i>	-	1,72
<i>O/C molar ratio</i>	-	0,76
<i>C/N molar ratio</i>	-	537
<i>Empirical Formula</i>	-	$CH_{1.72}O_{0.76}N_{0.002}$

Faktor oksidasi spesifik pada pembakaran sumber tidak bergerak (*stationary combustion*) sesuai panduan pada IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol 2. Chapter 2 Stationary Combustion* IPCC tahun 2006 seperti dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 5. Faktor Oksidasi Spesifik *Stationary Combustion* (Chernova, 1996)

Bahan Bakar	Faktor Oksidasi
Batubara	100 %
Bahan Bakar Minyak	100 %
Bahan Bakar Gas	100

a. Perhitungan Faktor Emisi (FE CO₂) PLTU *Co-Firing*

Perhitungan emisi CO₂ pada PLTU yang melakukan *co-firing* maka dihitung E_{CO_2} untuk masing-masing bahan bakar yaitu batubara dan biomassa. Untuk perhitungan emisi CO₂ dari sumbangsih pembakaran biomassa diasumsikan menggunakan faktor oksidasi sama seperti pembakaran batubara yaitu 100%. Dalam perhitungan ini nanti nilai emisi yang dihasilkan dari pembakaran biomassa akan menjadi pengurang total emisi karena emisi dari pembakaran biomassa dianggap sebagai karbon netral sehingga yang digunakan untuk

nilai faktor emisi yang akan dibandingkan dengan nilai *carbon cap* sesuai tabel 1 (satu) hanya faktor emisi dari pembakaran batubara saja.

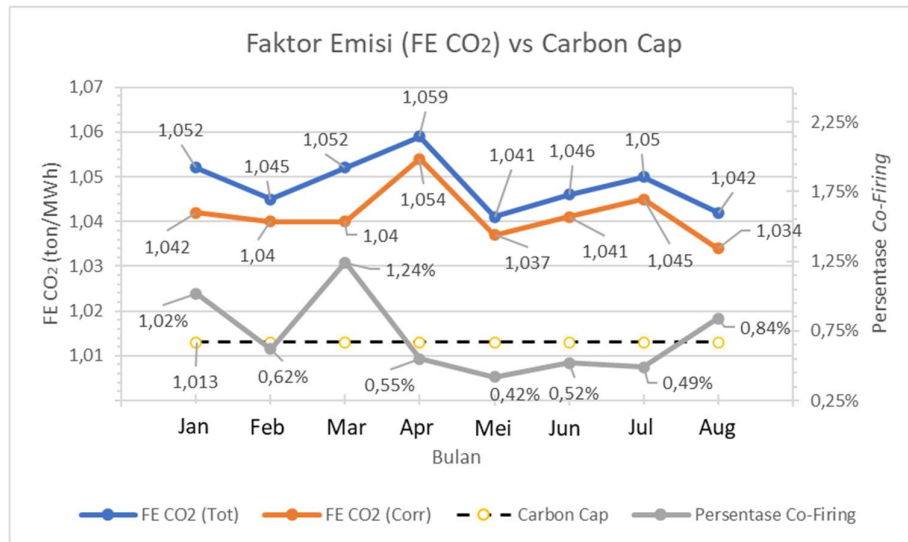
Biomassa memegang peran yang cukup penting dalam skenario sistem energi masa depan sebagai sistem karbon netral. Biomassa juga dapat berfungsi sebagai pelengkap strategis untuk variabel energi terbarukan dengan memasok listrik selama berjam-jam pada kondisi *base load* (Johansson, 2018).

Berikut disampaikan hasil perhitungan jumlah emisi karbon ECO_2 (ton) dan faktor emisi $FECO_2$ (ton/MWh) dari pembakaran batubara dan juga biomassa.

Tabel 6. Hasil Perhitungan ECO_2 dan $FECO_2$

Bulan	Energi Primer	ECO_2 (ton)	$FECO_2$		Persentase <i>Co-Firing</i>
			$FECO_2$ (tot) (ton/MWh)	$FECO_2$ (corr) (ton/MWh)	
Jan	Batubara	1.118.746,73	1,052	1,042	1,02%
	Biomassa	10.483,82			
Feb	Batubara	1.037.468,97	1,045	1,040	0,62%
	Biomassa	5.906,43			
Mar	Batubara	1.112.882,51	1,052	1,040	1,24%
	Biomassa	12.755,21			
Apr	Batubara	1.072.417,84	1,059	1,054	0,55%
	Biomassa	5.401,06			
Mei	Batubara	807.301,06	1,041	1,037	0,42%
	Biomassa	3.067,17			
Jun	Batubara	1.071.443,87	1,046	1,041	0,52%
	Biomassa	5.079,51			
Jul	Batubara	1.062.137,05	1,050	1,045	0,49%
	Biomassa	4.735,94			
Aug	Batubara	1.021.782,40	1,042	1,034	0,84%
	Biomassa	7.845,82			

Dari hasil perhitungan pada tabel 6 (enam) di atas maka bisa disajikan dalam bentuk grafik pada gambar di bawah ini, hasil perhitungan FE_{CO_2} tersebut kita bandingkan terhadap *carbon cap* sesuai pada tabel 1 (satu).



Gambar 4. Grafik FE CO₂ vs Carbon Cap

Dari grafik di atas dapat dijelaskan bahwa pelaksanaan *co-firing* biomassa dapat menurunkan FE_{CO_2} dalam bentuk $FE_{CO_2} (corr)$ karena nilai emisi CO₂ yaitu $E_{CO_2} biomassa$ dianggap karbon netral. Sehingga dalam skema *Carbon Cap And Tax/Trade* yang menjadi perhitungan adalah nilai $FE_{CO_2} (corr)$. Namun demikian jika kita lihat nilai $FE_{CO_2} (corr)$ masih di atas nilai *carbon cap* yang dipersyaratkan, sehingga selisih antara $FE_{CO_2} (corr)$ terhadap *carbon cap* tersebut menciptakan suatu nilai yang disebut dengan Nilai Ekonomis Karbon (NEK) dan dalam hal ini karena selisihnya berupa selisih + (plus) terhadap *carbon cap* maka harus dibayarkan dalam bentuk *tax* ataupun membeli nilai NEK sejumlah tertentu dari tempat lain untuk menutup selisih terhadap *carbon cap* tersebut.

b. Analisa Persentase Co-Firing Terhadap Carbon Cap Yang Diperkirakan

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya yang dijelaskan pada grafik gambar 4 (empat) di atas, maka disimpulkan bahwa pelaksanaan *co-firing* aktual yang sudah dilakukan tersebut belum mampu menurunkan $FE_{CO_2} (corr)$ di bawah *carbon cap* yang dipersyaratkan.

Sehingga dalam hal ini perlu dilakukan analisa perhitungan nilai persentase *co-firing* yang bisa menurunkan nilai $FE_{CO_2} (corr)$ hingga di bawah *carbon cap*. Untuk melakukan analisa perhitungan ini perlu dilakukan beberapa asumsi yang dapat mempermudah perhitungan. Dalam hal ini bisa diambil asumsi bahwa nilai kalori total dari batubara dan biomassa serta GPHR (Gross Plant Heat Rate) pada periode bulanan tertentu adalah konstan sehingga dalam hal ini penulis bisa membuat perbandingan beberapa persentase *co-firing* tanpa mengubah nilai kalori total dan GPHR sehingga pada hal ini diasumsikan juga MWh produksi bruto tetap konstan. Nilai MWh bruto total, kalori total serta GPHR bulanan seperti terlihat pada tabel berikut.

Tabel 7. Nilai Kondisi Aktual *Co-Firing*

Bulan	Energi Primer	Jumlah Total Produksi Bruto (MWh)	Energi Primer		Total Kalori kCal x10 ⁶	GPHR kCal/kWh
			Volume Aktual	Nilai Kalori		
			ton	kCal/kg		
Jan	Batubara	1.073.397,79	602.156,59	4.504,91	2.731.685,31	2544,90
	Biomassa		6.203,56	3.067,12		
Feb	Batubara	998.002,41	558.409,48	4.519,39	2.534.514,74	2539,59
	Biomassa		3.495	3.103,19		
Mar	Batubara	1.070.243,74	599.000,21	4.806,80	2.902.736,18	2712,22
	Biomassa		7.547,61	3.108,53		
Apr	Batubara	1.017.732,10	577.220,43	4.758,87	2.756.515,31	2708,49
	Biomassa		3.195,95	3.003,09		
Mei	Batubara	778.531,23	434.523,42	4.805,34	2.093.450,86	2688,97
	Biomassa		1.814,93	2.985,05		
Jun	Batubara	1.029.019,50	576.696,20	4.815,49	2.786.046,25	2707,48
	Biomassa		3.005,68	2.984,26		
Jul	Batubara	1.015.961,53	571.686,88	4.856,91	2.785.001,77	2741,25
	Biomassa		2.802,38	2.986,56		
Aug	Batubara	987.835,31	549.966,30	4.868,53	2.691.504,08	2724,65
	Biomassa		4.642,59	3.010,17		

Pada tabel 7 (tujuh) di atas adalah nilai kondisi aktual pelaksanaan *co-firing* dengan nilai persentase berbeda-beda yang bisa dilihat pada tabel 3 (tiga). Untuk melakukan

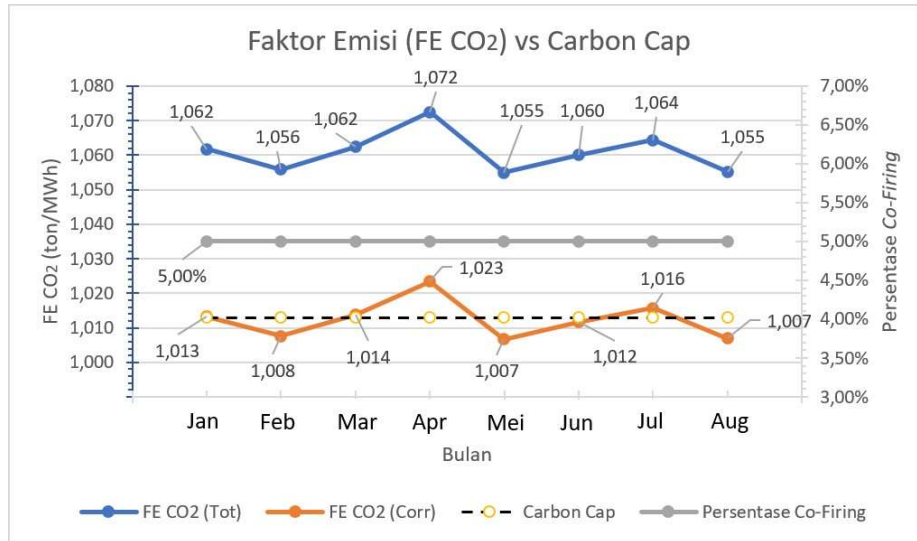
percobaan perbandingan nilai persentase *co-firing* maka penulis menitikberatkan pada total kalori yang dijaga tetap konstan. Dengan asumsi GPHR pada bulan tersebut adalah konstan maka jumlah total produksi bruto juga akan konstan. Dalam hal ini penulis membuat perbandingan persentase *co-firing* mulai dari 5%, 6%, dan 7%. Hasil perbandingan variasi persentase *co-firing* tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 8. Volume Bahan Bakar Variasi *Co-Firing*

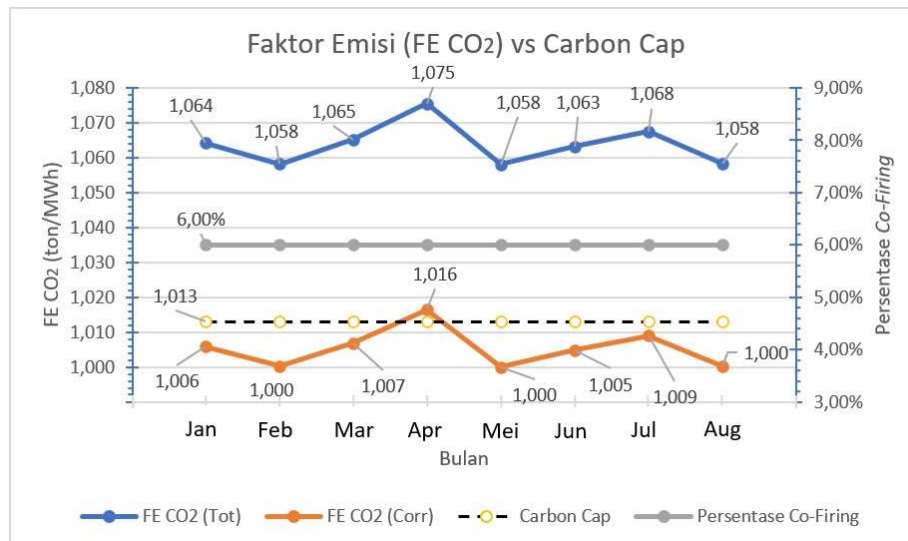
Bulan	Energi Primer	Energi Primer				
		Volume (5%)	Volume (6%)	Volume (7%)	Nilai Kalor	Total Kalori
		ton	ton	ton	kCal/kg	kCalx10 ⁶
Jan	Batubara	585.403,09	581.125,75	576.820,49	4.504,91	2.731.685,31
	Biomassa	30.810,69	37.093,13	43.416,59	3.067,12	
Feb	Batubara	541.249,15	537.262,17	533.249,63	4.519,39	2.534.514,74
	Biomassa	28.486,79	34.293,33	40.137,07	3.103,19	
Mar	Batubara	584.003,76	579.942,18	575.851,16	4.806,80	2.902.736,18
	Biomassa	30.737,04	37.017,58	43.343,64	3.108,53	
Apr	Batubara	560.617,34	556.809,05	552.971,92	4.758,87	2.756.515,31
	Biomassa	29.506,17	35.541,00	41.621,54	3.003,09	
Mei	Batubara	421.858,43	419.035,80	416.191,19	4.805,34	2.093.450,86
	Biomassa	22.203,07	26.746,97	31.326,22	2.985,05	
Jun	Batubara	560.284,19	556.543,91	552.774,40	4.815,49	2.786.046,25
	Biomassa	29.488,64	35.524,08	41.606,67	2.984,26	
Jul	Batubara	555.434,22	551.754,01	548.044,67	4.856,91	2.785.001,77
	Biomassa	29.233,38	35.218,34	41.250,67	2.986,56	
Aug	Batubara	535.413,57	531.847,25	528.252,95	4.868,53	2.691.504,08
	Biomassa	28.179,66	33.947,70	39.760,97	3.010,17	

Setelah didapatkan nilai volume bahan bakar batubara dan biomassa sesuai dengan variasi persentase *co-firing* yang diinginkan dengan tetap mempertahankan jumlah kalori total pada bulan tertentu seperti yang terlihat pada tabel 8 (delapan) di atas maka selanjutnya adalah menghitung nilai E_{co2} dan FE_{co2} dalam bentuk $FE_{co2} (tot)$ maupun $FE_{co2} (corr)$ dengan menggunakan persamaan yang sudah dijelaskan sebelumnya. Berikut ini

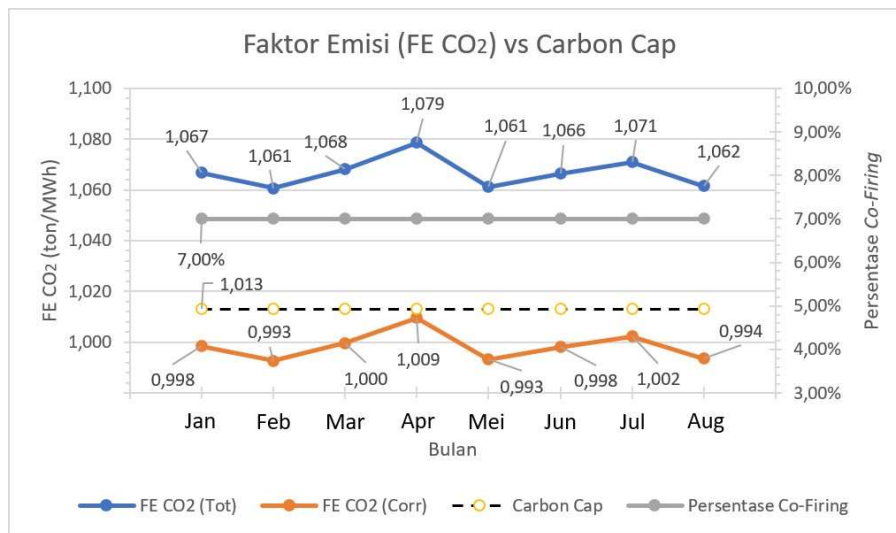
disampaikan dalam bentuk grafik perbandingan FE_{CO_2} dari nilai persentase *co-firing* 5%, 6% dan 7%.



Gambar 5. Grafik FE CO₂ vs Carbon Cap dengan Persentase Co-Firing 5%



Gambar 6. Grafik FE CO₂ vs Carbon Cap dengan Persentase Co-Firing 6%



Gambar 7. Grafik FE CO₂ vs Carbon Cap dengan Persentase Co-Firing 7%

Dari hasil perhitungan yang terlihat pada grafik di atas maka bisa dilihat bahwa semakin tinggi nilai persentase *co-firing* maka nilai $FE_{CO_2}(tot)$ semakin besar sedangkan nilai $FE_{CO_2}(corr)$ semakin kecil. Untuk perhitungan dalam *carbon tax/trade* digunakan nilai $FE_{CO_2}(corr)$, sehingga berdasarkan hasil perhitungan di atas maka jika menginginkan nilai $FE_{CO_2}(corr)$ yang selalu di bawah *carbon cap* maka secara operasional pelaksanaan *co-firing* harus minimal persentasenya adalah 7%.

c. Analisa Perhitungan Carbon Tax/Trade

Nilai Ekonomi Karbon (NEK) dapat dihitung berdasarkan selisih faktor emisi terhadap *cap* yang dipersyaratkan dan jumlah produksi energi MWh yang dibangkitkan. Sesuai dengan gambar 1 (satu) di atas maka kebijakan terkait emisi GRK bisa berupa *cap and tax* ataupun *cap and trade/tax*.

Sesuai dengan data dari Kementerian Keuangan Republik Indonesia terkait nilai *carbon tax* yang merupakan salah satu instrument NEK yaitu senilai Rp. 30.000,-/ton CO₂e (Fiskal, 2021). Untuk nilai *carbon trade* dalam hal ini diasumsikan adalah sama seperti *carbon tax* walaupun untuk skema *carbon trading* nilainya bisa berbeda-beda di beberapa negara tergantung dari mekanisme pasar *carbon trading* itu sendiri. Perhitungan NEK dengan *carbon*

cap senilai 1,013 ton/MWh baik itu dalam bentuk *carbon tax* ataupun *carbon credit* yang bisa diperjualbelikan di pasar karbon dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$NEK = (FE_{CO_2} (corr) - 1,013) \times \text{Produksi } MWh \times Rp\ 30.000, - \tag{6}$$

Dimana :

NEK : Nilai Ekonomi Karbon (Rp)

Hasil perhitungan NEK untuk kondisi aktual, kondisi persentase *co-firing* 5%, 6%, dan 7% sesuai persamaan 6 (enam) di atas dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 9. Nilai Ekonomi Karbon (NEK)

Bulan	NEK (Aktual)	NEK (5%)	NEK (6%)	NEK (7%)
Jan	Rp941.842.941,30	Rp0,00	-Rp230.353.157,06	-Rp470.315.669,30
Feb	Rp794.776.105,86	-Rp161.688.985,98	-Rp383.911.710,49	-Rp607.558.391,65
Mar	Rp861.767.988,73	Rp25.910.727,64	-Rp200.469.978,01	-Rp428.490.884,00
Apr	Rp1.243.656.503,46	Rp318.249.805,12	Rp105.987.428,13	-Rp107.882.751,87
Mei	Rp559.467.744,53	-Rp146.440.536,90	-Rp303.765.775,49	-Rp462.315.396,55
Jun	Rp871.413.386,06	-Rp43.342.846,67	-Rp251.814.824,55	-Rp461.915.719,20
Jul	Rp989.040.575,22	Rp83.166.036,47	-Rp121.957.682,70	-Rp328.704.993,35
Aug	Rp633.157.023,35	-Rp177.969.013,23	-Rp376.744.955,95	-Rp577.080.053,51
Total	Rp6.895.122.268,52	-Rp102.114.813,56	-Rp1.763.030.656,14	-p3.444.263.859,44

Hasil perhitungan NEK seperti pada tabel di atas ada yang bernilai + (plus) ataupun – (minus) hal ini artinya jika bernilai + (plus) maka perusahaan harus mengeluarkan biaya sejumlah nilai tersebut baik untuk membayar *carbon tax* ataupun untuk membeli *carbon credit* di pasar karbon, sedangkan jika bernilai – (minus) maka perusahaan memiliki *carbon credit* yang menguntungkan dan suatu saat bisa dijual ke pasar karbon sesuai nilai NEK tersebut.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Dari hasil perhitungan yang dilakukan di dalam tulisan ini maka didapatkan kesimpulan bahwa semakin besar persentase *co-firing* yang dilakukan maka dapat menurunkan nilai $FE_{CO_2} (corr)$ yang digunakan sebagai acuan untuk perhitungan NEK sehingga perusahaan bisa mendapatkan keuntungan dari NEK tersebut, tetapi di sisi lain terlihat bahwa $FE_{CO_2} (tot)$ semakin besar yang mengindikasikan bahwa sebenarnya nilai emisi CO₂ total yang merupakan gabungan emisi CO₂ dari batubara dan biomassa meningkat, hal ini bisa kita lihat juga jumlah total bahan bakar campuran batubara dan biomassa juga meningkat karena untuk menghasilkan energi sejumlah MWh yang sama dengan nilai kalori biomassa yang jauh lebih kecil daripada batubara maka pengurangan jumlah batubara tidak terlalu signifikan sehingga total bahan bakar campuran (batubara + biomassa) menjadi lebih besar.
2. Nilai persentase *co-firing* minimal yang dapat dilakukan agar bisa memiliki NEK yang menguntungkan berdasarkan hasil perhitungan dalam tulisan ini adalah 7%. Nilai $FE_{CO_2} (corr)$ terendah yang bisa dicapai pada perhitungan dalam tulisan ini adalah 0,993 ton/MWh pada persentase *co-firing* 7% di bulan Mei, sedangkan nilai $FE_{CO_2} (tot)$ tertinggi adalah 1,079 ton/MWh pada persentase *co-firing* 7% di bulan April.
3. Saran yang bisa diberikan adalah untuk mengetahui hasil keakuratan perhitungan terutama berdasarkan data aktual lapangan yang sudah diambil maka nilai $FE_{CO_2} (tot)$ pada kondisi aktual tersebut bisa dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan data CEMS menggunakan perhitungan metode 4.
4. Untuk mengetahui kondisi yang sebenarnya maka pelaksanaan *co-firing* di lapangan juga harus ditambah persentasenya hingga 7% untuk mengetahui apakah benar bahwa $FE_{CO_2} (corr)$ bisa turun di bawah *carbon cap* sehingga hal ini bisa mendapatkan NEK yang menguntungkan perusahaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih dan apresiasi sebesar-besarnya kepada rekan-rekan dari PT. PLN Indonesia Power Suralaya PGU Unit 1-4 yang telah memberi dukungan berupa data- data parameter pengoperasian yang membantu pelaksanaan penelitian ini dan

juga kepada para pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah mendukung hingga tahap akhir penulisan artikel ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- A. K. M. Sadrul Islam and M. Ahiduzzaman, "Biomass energy: Sustainable solution for greenhouse gas emission," in *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1440, doi: 10.1063/1.4704200.
- A. K. Varma and P. Mondal, "Physicochemical characterization and pyrolysis kinetics of wood sawdust," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 38, no. 17, pp. 2536–2544, 2016, doi: 10.1080/15567036.2015.1072604.
- B. K. Fiskal, "Pajak Karbon Di Indonesia," *PAJAK KARBON DI Indones. Upaya Mitigasi Perubahan Iklim dan Pertumbuhan Ekon. Berkelanjutan*, pp. 1–17, 2021.
- D. Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian ESDM and B. Energi -Sub Bidang Ketenagalistrikan, "Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca," p. 15, 2018.
- E. A. Chernova, "Stationary combustion," *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, vol. 7, no. 6, pp. 69–70, 1966, doi: 10.1007/BF00914340.
- F. Sebastián, J. Royo, and M. Gómez, "Cofiring versus biomass-fired power plants: GHG (Greenhouse Gases) emissions savings comparison by means of LCA (Life Cycle Assessment) methodology," *Energy*, vol. 36, no. 4, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.06.003.
- J. J. H. Putra, N. Nabilla, and F. Y. Jabanto, "COMPARING 'CARBON TAX' AND 'CAP AND TRADE' AS MECHANISM TO REDUCE EMISSION IN INDONESIA," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 11, no. 5, 2021, doi: 10.32479/ijeep.11375.
- M. V. Gil and F. Rubiera, "Coal and biomass cofiring: fundamentals and future trends," in *New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking*, 2018.
- R. B. Salsabila Hana Safira, "Peraturan Terkait Emisi Karbon dan Perdagangan Karbon di Indonesia," *Arma Law*, 2021.
- R. I. Dirjen Gatrik, "Uji Coba Perdagangan Karbon Pada PLTU Batubara," *Webinar Penyelenggaraan Nilai Ekon. Karbon di Subsektor Ketenagalistrikan*, pp. 1–10, 2021, [Online]. Available:

https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/b334f-bahan-ditjen-ketenagalistrikan.pdf.

- V. Johansson, M. Lehtveer, and L. Göransson, “Biomass in the electricity system: A complement to variable renewables or a source of negative emissions?,” *Energy*, vol. 168, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.11.112.