

PENGARUH PENAMBAHAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF PADA PROSES PEMBUATAN SEMEN DI PT SEMEN INDONESIA (PERSERO) TBK

Adinda Sabrina Maharani¹, Luchis Rubianto¹, Jaenuri²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²RKC 1, Jalan Semen Indonesia, Area Ladang, Sumberarum, Kec. Kerek, Kabupaten Tuban, Jawa Timur 62356, Indonesia

adindamaharani435@gmail.com; [luchis.rubianto@polinema.ac.id; jaenuri@sig.id]

ABSTRAK

Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar utama dalam industri semen telah menimbulkan permasalahan lingkungan dan efisiensi energi, terutama karena emisi karbon dioksida (CO₂) yang tinggi. Penelitian ini dilakukan di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk untuk mengkaji pengaruh penambahan bahan bakar alternatif (*alternative fuel/AF*) terhadap konsumsi batu bara dan emisi CO₂ dalam proses produksi semen. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data konsumsi bahan bakar, nilai kalor, dan emisi gas CO₂ sebelum dan sesudah penggunaan AF selama tiga bulan (Agustus–Oktober 2023). Variabel utama dalam penelitian ini adalah volume batu bara dan bahan bakar alternatif, serta besaran emisi CO₂. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar alternatif seperti sekam padi, serbuk kayu, dan limbah tembakau secara signifikan mampu menurunkan konsumsi batu bara hingga 40.605 ton dan mengurangi emisi CO₂ sebesar 97.452 ton. Kesimpulannya, substitusi sebagian batu bara dengan bahan bakar alternatif terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan dampak lingkungan proses produksi semen, serta mendukung transisi industri menuju produksi yang lebih berkelanjutan.

Kata kunci: bahan bakar alternatif, batu bara, emisi CO₂, energi terbarukan, industri semen.

ABSTRACT

The use of coal as the primary fuel in the cement industry has raised concerns regarding environmental impact and energy efficiency, particularly due to high carbon dioxide (CO₂) emissions. This study, conducted at PT Semen Indonesia (Persero) Tbk, aims to analyze the effect of alternative fuel (AF) substitution on coal consumption and CO₂ emissions during cement production. The methodology includes data collection on fuel consumption, calorific values, and CO₂ emissions before and after the application of AF over a three-month period (August–October 2023). The main variables are the volume of coal and alternative fuel used, along with the amount of CO₂ emitted. Results indicate that implementing alternative fuels—such as rice husk, sawdust, and tobacco waste—significantly reduced coal consumption by up to 40,605 tons and lowered CO₂ emissions by 97,452 tons. In conclusion, partial substitution of coal with alternative fuels proved effective in enhancing energy efficiency and reducing the environmental impact of cement manufacturing, supporting the industry's transition toward more sustainable production practices.

Keywords: alternative fuel, coal substitution, CO₂ emissions, renewable energy, cement industry.

1. PENDAHULUAN

Dalam proses pembuatan semen, bahan bakar utama yang digunakan PT Semen Indonesia (Persero) Tbk adalah batu bara. Menurut Kurniawan, dkk. (2020), konsumsi batu

bara di Indonesia meningkat dari 0,9 juta ton setara minyak (MTOE) pada tahun 1985 menjadi 57,16 MTOE pada tahun 2017, dengan sektor industri sebagai salah satu kontributor utama. Peningkatan ini didorong oleh pertumbuhan ekonomi, urbanisasi, dan peningkatan pendapatan per kapita di daerah perkotaan. PT Semen Indonesia (Persero) Tbk merupakan industri semen yang memanfaatkan batu bara sebagai bahan bakar utamanya [1]. Total kapasitas produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk yaitu sekitar 32.000.000 ton/tahun. PT Semen Indonesia (Persero) Tbk menggunakan batu bara sebagai bahan bakar dalam pembakaran *raw mix* yang akan menghasilkan klinker [2]. Proses ini merupakan suatu proses yang penting dalam proses pembuatan semen. Selain kiln sebagai “jantung” yang merupakan tempat untuk pembakaran, terdapat dua peralatan yang digunakan dalam pembuatan semen, yaitu *preheater* dan *grate cooler*. *Preheater* digunakan untuk pemanasan awal dan *grate cooler* yang digunakan untuk pendinginan mendadak klinker. Kinerja ketiga unit tersebut sangat mempengaruhi kualitas klinker yang akan dihasilkan.

Kualitas klinker akan sangat berpengaruh terhadap kualitas semen yang dihasilkan. Kualitas batu bara yang ada di Indonesia pada umumnya didominasi oleh batu bara dengan peringkat rendah (*subbituminous*) yaitu sekitar 60-70% dari total cadangan batu bara. Batu bara peringkat rendah mempunyai kandungan air total yang cukup tinggi sehingga nilai kalor menjadi rendah. Dengan ketersediaan batu bara dengan kualitas yang rendah dapat berdampak pada konsumsi batu bara yang semakin tinggi sehingga dapat mengakibatkan nilai produksi menjadi lebih mahal dan kemurnian dari produk semen menjadi berkurang. Maka perlu adanya pengurangan terhadap kadar *moisture content* batu bara untuk meningkatkan nilai kalor dari batu bara serta dapat meningkatkan nilai ekonomis produksi. Penelitian oleh Bizzy, dkk. (2017) menunjukkan bahwa proses pengeringan batu bara peringkat rendah dari Sumatera Selatan dapat mengurangi kadar air dan meningkatkan nilai kalor, sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran dalam industri semen [3].

Penggunaan batu bara secara berlebihan akan mengakibatkan dampak negatif antara lain, tingginya emisi karbon dioksida (CO₂) yang menyebabkan perubahan iklim global, terbatasnya ketersediaan Bahan Bakar Fosil yang dapat meningkatkan kestabilan biaya produksi. Menurut penelitian oleh Shen (2022), pembakaran batu bara menghasilkan emisi CO₂ yang tinggi, yang berdampak pada peningkatan suhu permukaan bumi dan perubahan iklim ekstrem [4]. Selain itu, aktivitas pertambangan batu bara juga menyebabkan degradasi lingkungan lokal, termasuk deforestasi dan pencemaran air [5]. Salah satu upaya dalam mengurangi penggunaan Batu Bara sebagai bahan bakar yaitu dengan menggunakan Bahan bakar alternatif. Bahan bakar alternatif (*alternative fuel*) merujuk pada jenis bahan bakar yang digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil tradisional seperti bensin, diesel, batu bara, atau minyak bumi. Bahan bakar alternatif umumnya dirancang untuk memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah, lebih berkelanjutan, dan lebih ramah terhadap lingkungan dibandingkan bahan bakar konvensional. Penggunaan bahan bakar alternatif dapat membantu mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil yang terbatas dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, seperti emisi gas rumah kaca dan polusi udara [6].

Industri semen merupakan salah satu sektor yang membutuhkan banyak energi untuk proses produksinya, terutama dalam pembakaran bahan baku di kiln (tanur) pada suhu tinggi. Untuk itu, industri semen di Indonesia mulai mencari bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan ekonomis, guna mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (seperti batu bara dan minyak) yang harganya fluktuatif dan berdampak buruk terhadap lingkungan [7]. Bahan bakar alternatif yang

digunakan pada PT Semen Indonesia (Persero) Tbk adalah jenis biomassa seperti sekam padi, serbuk gergaji, serbuk kelapa (*cocopeat*) dan limbah yang dihasilkan dari tembakau. Penggunaan biomassa ini secara bertahap ditingkatkan menjadi 3% dari kebutuhan bahan bakar batu bara sekitar 2.000 ton per hari. Penggunaan biomassa ini dapat mengurangi gas CO₂ sekitar 15.034 ton per tahun [8].

Penelitian oleh Harjanto, dkk. (2012) menunjukkan bahwa penggunaan biomassa sebagai bahan bakar alternatif mampu menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan [9]. Selain itu, penelitian Nugraha, dkk. (2018) menyatakan bahwa penggunaan limbah biomassa dapat meningkatkan efisiensi energi pada proses pembakaran kiln [10]. Namun, penelitian tersebut umumnya masih terbatas pada skala laboratorium atau simulasi, sehingga belum sepenuhnya menggambarkan kondisi operasional di industri. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan bahan bakar alternatif terhadap konsumsi batu bara dan emisi karbon dioksida (CO₂) pada proses produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Pengumpulan data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif yang bersifat empiris untuk mengevaluasi pengaruh penambahan bahan bakar alternatif terhadap konsumsi batu bara dan emisi gas karbon dioksida (CO₂) dalam proses produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk metode pelaksanaan dimulai dengan identifikasi masalah berdasarkan pengamatan langsung di unit kerja *Section of RKC 1 Operation* selama periode magang. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data primer yang mencakup volume penggunaan batu bara dan *alternative fuel* (AF), nilai kalor masing-masing bahan bakar, serta emisi CO₂ sebelum dan sesudah penggunaan AF. Data diperoleh melalui pencatatan harian produksi dan wawancara dengan pihak teknis perusahaan. Data sekunder diperoleh melalui studi pustaka yang relevan mengenai karakteristik bahan bakar fosil dan biomassa, serta standar emisi industri semen.

2.2 Perhitungan penurunan konsumsi batu bara dan penurunan emisi gas CO₂

Pengolahan data dilakukan menggunakan Microsoft Excel 2019 untuk menghitung penurunan konsumsi batu bara dan penurunan emisi gas CO₂ berdasarkan rumus:

$$\text{Emisi CO}_2 = \text{Konsumsi bahan bakar} \times \text{Faktor emisi [7].} \quad (1)$$

Keterangan:

Emisi CO₂ : pelepasan gas karbon dioksida (ton CO₂)
 Konsumsi bahan bakar : penggunaan bahan bakar (ton)
 Faktor emisi : jumlah bahan bakar yang dibakar (ton CO₂ / tonBB)

2.3 Pengolahan hasil perhitungan

Hasil perhitungan dibandingkan antar bulan (Agustus, September, dan Oktober 2023) untuk melihat tren perubahan yang terjadi. Pendekatan ini mendukung validitas analisis dengan menggabungkan data operasional aktual dan kajian ilmiah, sehingga hasilnya dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi peningkatan efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan di sektor industri semen.

Tabel 1. Data Batu Bara dan Emisi Gas CO₂

Keterangan	Nilai	Satuan
Jumlah batu bara yang digunakan dalam sehari (sebelum penambahan bahan bakar alternatif)	135.500	Ton
emisi gas CO ₂ yang dikeluarkan batu bara	2,4	ton CO ₂ /tonBB

Tabel 2. Data Bahan bakar alternatif bulan Agustus 2023

Keterangan	Jumlah (ton)	NHV (kcal/kg)
Sekam Padi	1.741	2.800
Oil AFVAL	-	-
Spent Earth AFR	499	2.195
RDF/Sludge	4	7.341
Bag Cloth	-	-
Gliserin Pitch	78	6.300
Kemasan Bekas	3	6.999
Limbah Sludge Cat	12	1.369
Sepatu Reject	9	5.397

Tabel 3. Data Bahan bakar alternatif bulan September 2023

Keterangan	Jumlah (ton)	NHV (kcal/kg)
Sekam Padi	3.015	2.756
Oil AFVAL	9	11.340
Spent Earth AFR	375	2.371
RDF/Sludge	5	7.341
Bag Cloth	2,54	4.341
Gliserin Pitch	16	6.300
Kemasan Bekas	-	-
Limbah Sludge Cat	29	1.369
Sepatu Reject	23	5.397

Tabel 4. Data Bahan bakar alternatif bulan Oktober 2023

Keterangan	Jumlah (ton)	NHV (kcal/kg)
Sekam Padi	2.845	2.869
Oil AFVAL	-	-
Spent Earth AFR	1.323	2.257
RDF/Sludge	18	7.341
Bag Cloth	-	-
Gliserin Pitch	-	-
Kemasan Bekas	-	-
Limbah Sludge Cat	10	1.306
Sepatu Reject	-	-

Tabel 5. Data Batu Bara dan Alternatif Fuel

Keterangan	Agustus 2023	September 2023	Oktober 2023
Kalori total AFR (MJ)	27.414.633,92	39.946.011,37	47.250.176,40
Jumlah batu bara yang digunakan	132.436	132.111	94.895
Volume batu bara yang dikalkulasi AF (ton)	1.560,77	2.273,423	2.688,893
Volume AF total yang digunakan (ton)	2.345,347	3.469,3	4.196,334

Tabel 6. Data Emisi Gas Karbon CO₂

Keterangan	Agustus 2023	September 2023	Oktober 2023
Emisi gas karbon CO ₂ (ton CO ₂ /ton)	187,832	191,171	205,297

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil perhitungan

Dari data yang telah didapatkan, diperoleh hasil berupa nilai emisi gas karbon dioksida (CO₂) sebelum dan sesudah penggunaan bahan bakar alternatif dapat dilihat pada Tabel 7 untuk menunjukkan perbandingan serta penurunan emisi pada setiap periode yang dapat dilihat di Tabel 8.

Tabel 7. Hasil emisi Gas Karbon CO₂ (ton CO₂)

Keterangan	Emisi Gas Karbon CO ₂ (ton CO ₂)
Sebelum Penambahan Bahan bakar alternatif	325.200
Agustus	317.846,4
September	317.066,4
Oktober	277.748

Tabel 8. Selisih Penurunan Emisi Gas karbon CO₂ (ton CO₂)

Keterangan	Selisih Penurunan Emisi Gas karbon CO ₂ (ton CO ₂)
Agustus	7353,6
September	8133,6
Oktober	97.452

3.2 Pembahasan

Alternative fuel (Bahan Bakar Alternatif) adalah bahan atau zat yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti bahan bakar konvensional, seperti bahan bakar fosil (batu bara). Bahan bakar alternatif yang pernah digunakan pada PT Semen Indonesia (Persero) Tbk antara lain, SBE (*Solid Biofuel Energy*), BPA (Bahan Peledak Alam), Sekam, Bonggol Jagung, Serbuk Kayu, RDE (*Residual Dewatering Effluent*), dan Tembakau [11]. Bahan bakar alternatif digunakan karena menghasilkan emisi atau gas rumah kaca yang lebih sedikit dibandingkan bahan bakar fosil. Bahan bakar alternatif bersifat dapat diperbarui, sehingga tidak akan habis dalam waktu dekat. Hal tersebut berbeda dengan bahan bakar fosil yang apabila digunakan secara terus-menerus maka akan habis [12].

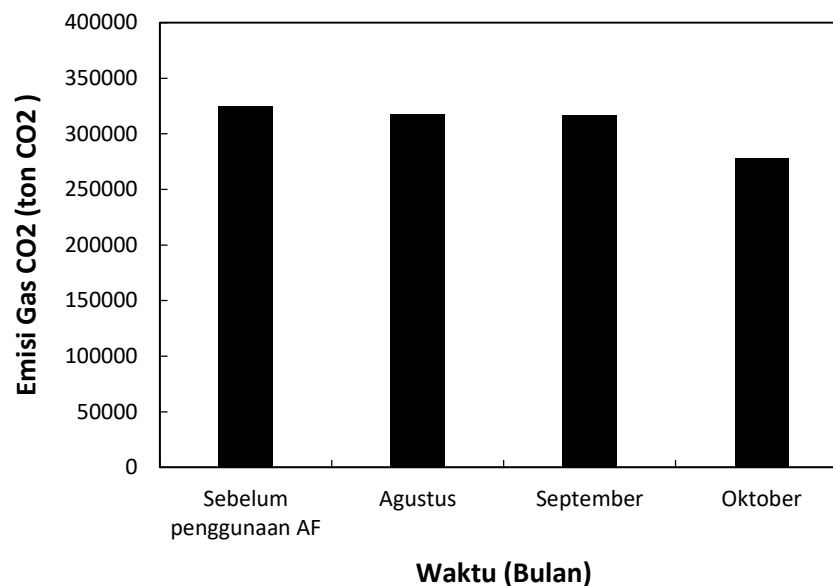
Dalam proses pembuatan semen, bahan bakar alternatif tidak langsung dimasukkan ke dalam kiln melainkan masuk ke dalam preheater (ILC atau *Inline Calciner*) karena membutuhkan persiapan dan pengolahan terlebih dahulu untuk memastikan pembakaran yang efisien, aman, dan ramah lingkungan [7]. Proses pengolahan ini membantu mengatasi perbedaan karakteristik bahan bakar, mempertahankan suhu pembakaran yang stabil, dan mengurangi dampak negatif pada sistem pembakaran dan emisi [13].

Penggunaan bahan bakar alternatif tentunya memiliki karakteristik pembakaran yang berbeda dibandingkan batu bara hal ini dapat memengaruhi suhu dan kestabilan proses pembakaran. Beberapa bahan bakar alternatif membakar pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar konvensional [14]. Jika tidak dikelola dengan baik, ini bisa menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna, meningkatkan emisi atau mengurangi efisiensi. Selain mempengaruhi suhu dan kestabilan proses pembakaran, bahan bakar alternatif juga dapat menyebabkan fluktuasi suhu dalam kiln, terutama jika

bahan bakar tersebut tidak homogen atau tidak stabil. Ini bisa mempengaruhi proses *sintering* (pembentukan klinker) dan kualitas semen yang dihasilkan [10].

Tak hanya pengaruh dalam operasi, bahan bakar alternatif juga dapat mempengaruhi kualitas pada semen. Yang mana pembakaran bahan bakar alternatif yang tidak stabil atau tidak efisien dapat mempengaruhi proses pembuatan klinker di kiln, yang pada gilirannya bisa mempengaruhi kualitas semen. Beberapa bahan bakar alternatif dapat mempengaruhi komposisi kimia klinker atau semen. Bahan bakar alternatif yang mengandung elemen tertentu, seperti belerang atau logam berat, dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia semen, sehingga memerlukan pengawasan ketat terhadap komposisi bahan bakar dan dampaknya terhadap produk akhir [15].

Batu bara adalah sumber energi fosil yang tidak terbarukan dan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan ketika ditambang dan dibakar. Dengan menggantikan sebagian batu bara dengan bahan bakar alternatif, industri mengurangi ketergantungannya pada energi fosil yang terbatas. Ini mendukung upaya untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan membantu transisi ke ekonomi yang lebih berkelanjutan [16]. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 1.

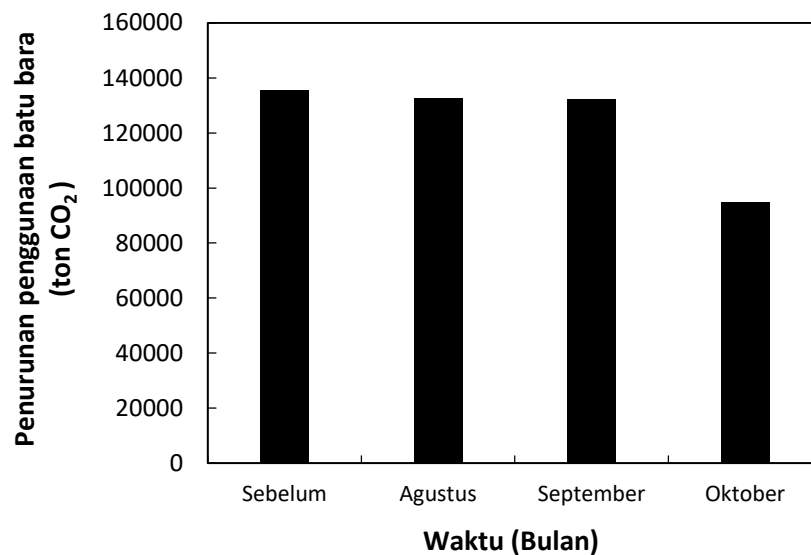


Gambar 1. Emisi Gas CO₂

Berdasarkan Gambar 1, grafik penggunaan batu bara dapat terlihat bahwa terjadi penurunan penggunaan batu bara, sebelum penambahan bahan bakar alternatif batu bara yang digunakan sebanyak 135.500 ton dalam sekali proses produksi sedangkan saat setelah penambahan bahan bakar alternatif penggunaan batu bara menurun. Pada bulan Agustus dibutuhkan batu bara sebanyak 132.436 ton di mana pada bulan tersebut menggunakan sebanyak 2.345,347 ton bahan bakar alternatif dengan nilai kalor 27.414.633,92 MJ, sebanyak 2.345,347 ton bahan bakar alternatif dapat menggantikan penggunaan batu bara sebanyak 1.560,775 ton. Pada bulan September dibutuhkan batu bara sebanyak 132.111 ton di mana pada bulan tersebut menggunakan sebanyak 3.469,3 ton bahan bakar alternatif dengan nilai kalor 39.946.011,37 MJ, sebanyak 3.469,3 ton bahan bakar alternatif dapat menggantikan penggunaan batu bara sebanyak 2.273,423 ton. Sedangkan pada bulan Oktober dibutuhkan batu bara sebanyak 94.895 ton di mana pada bulan tersebut menggunakan sebanyak 4.196,334 ton bahan bakar alternatif dengan

nilai kalor 47.250.176,40 MJ, sebanyak 4.196,334 ton bahan bakar alternatif dapat menggantikan penggunaan batu bara sebanyak 2.688,893 ton. Dari perhitungan tersebut terbukti bahwa penambahan bahan bakar alternatif dapat mengurangi penggunaan batu bara sebagai bahan bakar.

Penurunan konsumsi batu bara di sektor industri memiliki dampak positif baik dari segi lingkungan maupun ekonomi [17]. Dari segi Emisi CO₂, Penggunaan *alternative fuels* dan teknologi efisiensi energi dapat mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. Penurunan konsumsi batu bara ini berpotensi untuk memenuhi target pengurangan emisi gas rumah kaca yang ditetapkan. Bahan bakar alternatif, terutama yang berbasis biomassa atau limbah, sering kali dianggap karbon netral. Ini berarti bahwa karbon yang dilepaskan saat pembakaran bahan bakar ini sebanding dengan karbon yang diserap oleh tanaman selama masa pertumbuhannya, sehingga tidak menambah konsentrasi CO₂ di atmosfer. Penggunaan bahan bakar alternatif dapat mengurangi jejak karbon industri, yang penting untuk mengatasi perubahan iklim [18]. Bahan bakar alternatif dalam upaya mengurangi emisi gas karbon (CO₂) dapat dibuktikan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Penurunan Penggunaan Batu Bara

Berdasarkan Gambar 2, grafik emisi gas karbon (CO₂) di atas dapat terlihat perubahan emisi yang dikeluarkan sebelum dan sesudah penambahan bahan bakar alternatif pada bulan Agustus, September dan Oktober 2023. Emisi gas karbon pada saat sebelum adanya penambahan AF mengeluarkan sebanyak 325.200 ton CO₂. Pada bulan Agustus 2023 sesudah penambahan AF mengeluarkan emisi gas karbon (CO₂) sebanyak 317.846,4 ton CO₂, Sehingga terdapat penurunan emisi gas karbon CO₂ sebesar 7353,6 ton CO₂. Pada bulan September 2023 sesudah penambahan AF mengeluarkan emisi gas karbon (CO₂) sebanyak 317.066,4 ton CO₂, Sehingga terdapat penurunan emisi gas karbon CO₂ sebesar 8133,6 ton CO₂. Pada bulan Oktober 2023 sesudah penambahan AF mengeluarkan emisi gas karbon (CO₂) sebanyak 227.748 ton CO₂, Sehingga terdapat penurunan emisi gas karbon CO₂ sebesar 97.452 ton CO₂.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa emisi gas karbon CO₂ oleh bahan bakar alternatif dianggap karbon netral. Ini berarti bahwa karbon yang dilepaskan saat pembakaran bahan bakar ini sebanding dengan karbon yang diserap oleh tanaman selama masa pertumbuhannya, sehingga tidak menambah konsentrasi CO₂ di atmosfer.

Sehingga pada perhitungan penambahan bahan bakar alternatif dianggap emisi yang dikeluarkan adalah 0 atau tidak dihitung.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan, Penambahan bahan bakar alternatif dapat mengurangi konsumsi bahan bakar fosil (Batu Bara) dalam proses produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk hal tersebut dapat ditunjukkan pada hasil perhitungan didapatkan bahwa pada bulan Agustus terdapat pengurangan penggunaan batu bara sebanyak 3.064 ton, pada bulan September 2023 terdapat pengurangan batu bara sebanyak 3.389 ton, dan pada bulan Oktober 2023 terdapat penurunan sebanyak 40.605 ton. Pengaruh dari pergantian sebagian bahan bakar fosil dengan bahan bakar alternatif terhadap emisi gas rumah kaca (seperti CO₂) dan polutan lainnya sangat signifikan di mana gas CO₂ sebelum menggunakan bahan bakar alternatif sebesar 106,32 ton CO₂, pada bulan Agustus gas CO₂ setelah menggunakan bahan bakar alternatif adalah sebesar 317.846,4 ton CO₂ hal tersebut terdapat penurunan sebesar 7353,6 ton CO₂. Pada bulan September gas CO₂ setelah menggunakan bahan bakar alternatif adalah sebesar 317.066,4 ton CO₂ terdapat penurunan sebesar 8133,6 ton CO₂. Sedangkan pada bulan Oktober gas CO₂ setelah menggunakan bahan bakar alternatif adalah sebesar 227.748 ton CO₂ terdapat penurunan sebesar 97.452 ton CO₂. serta dampak lingkungan yang ditimbulkan pada proses produksi adalah kurangnya polusi udara yang dikeluarkan, penggunaan limbah plastik dan sampah rumah tangga sebagai bahan bakar dapat membantu mengurangi jumlah sampah yang dibuang ke tempat pembuangan akhir.

Saran untuk penelitian berikutnya berdasarkan hasil perhitungan tersebut adalah melakukan pemantauan emisi secara terus-menerus selama proses produksi guna memastikan bahwa emisi tetap berada dalam batas yang dapat diterima. Selain itu, penambahan bahan bakar alternatif perlu dipastikan tidak mempengaruhi kualitas akhir semen, sehingga diperlukan uji kualitas yang lebih ketat agar produk tetap memenuhi standar yang ditetapkan. Proses produksi yang melibatkan bahan bakar alternatif juga perlu dievaluasi secara berkala untuk memastikan bahwa proses tersebut tetap efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dalam jangka panjang. Penambahan bahan bakar alternatif harus dipastikan tidak mempengaruhi kualitas akhir semen. Uji kualitas yang lebih ketat perlu dilakukan untuk memastikan bahwa produk tetap memenuhi standar yang ditetapkan. Proses produksi yang melibatkan bahan bakar alternatif perlu dievaluasi secara berkala untuk memastikan bahwa proses tersebut tetap efisien, ramah lingkungan, dan dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

REFERENSI

- [1] R. Kurniawan, G. P. Trencher, A. S. Edianto, I. E. Setiawan, dan K. Matsubae, "Understanding the multi-faceted drivers of increasing coal consumption in Indonesia," *Energies*, vol. 13, no. 14, hal. 1–22, 2020.
- [2] A. N. Khalizah, M. Apriani, dan A. E. Afiuddin, "Life Cycle Assessment Emisi ke Udara pada Proses Pembakaran di Kiln PT . Semen Indonesia (Persero) Tbk . Pabrik Tuban," *National Conference Proceeding on Waste Treatment Technology Program*, no. 2623, hal. 137–142, 2015.
- [3] I. Bizzy, R. Sipahutar, E. Ibrahim, dan M. Faizal, "Determining of drying characteristics for South Sumatera low-rank coal using solar and laboratory scaled oven," *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, vol. 7, no. 6, hal. 1998–2003, 2017.
- [4] M. Shen, "Perubahan Iklim: Tinjauan Holistik Sektor Batubara," *Parahyangan Economic*

- Development Review (PEDR)*, vol. 1, no. 2, hal. 116–130, 2023.
- [5] R. Pahlevi, S. Thamrin, I. Ahmad, dan F. B. Nugroho, “Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia,” *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 2, hal. 50–60, 2024.
- [6] A. Waste, P. As, dan A. Fuels, “Pengolahan Limbah Pertanian Sebagai Bahan Bakar Alternatif,” vol. 13, no. September, hal. 63–68, 2016.
- [7] E. Faculty dan E. Faculty, “Analisa pengaruh bahan bakar alternatif terhadap performa kiln semen,” vol. 2, no. 2, hal. 129–139, 2024.
- [8] T. R. Harjanto, M. Fahrurrozi, dan I. Made Bendiyasa, “Life Cycle Assessment Pabrik Semen PT Holcim Indonesia Tbk. Pabrik Cilacap: Komparasi antara Bahan Bakar Batubara dengan Biomassa,” *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 6, no. 2, hal. 51, 2012.
- [9] T. R. Harjanto, M. Fahrurrozi, dan I. M. Bendiyasa, “Life Cycle Assessment Pabrik Semen PT Holcim Indonesia Tbk . Pabrik Cilacap : Komparasi antara Bahan Bakar Batubara dengan Biomassa,” hal. 51–58, 2012.
- [10] A. Z. Nugraha, E. I. Wiloso, dan M. Yani, “Pemanfaatan Serbuk Gergaji Sebagai Substitusi Bahan Bakar Pada Proses Pembakaran - Kiln Di Pabrik Semen Dengan Pendekatan Life Cycle Assesment (Lca),” *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources Environmental Management)*, vol. 8, no. 2, hal. 188–198, 2018.
- [11] R. Rifdah, N. Herawati, dan F. Dubron, “Pembuatan Biobriket Dari Limbah Tongkol Jagung Pedagang Jagung Rebus Dan Rumah Tangga Sebagai Bahan Bakar Energi Terbarukan Dengan Proses Karbonisasi,” *Jurnal Distilasi*, vol. 2, no. 2, hal. 39, 2018.
- [12] R. Yogatama Indriyantono dan Y. Suryo Purnomo, “Analisis Dampak Penggunaan Bahan Bakar Alternatif dengan Metode Life Cycle Assessment di Pabrik Semen Tuban,” vol. IX, no. 2, hal. 8934–8940, 2024.
- [13] A. D. Nurdiana, “Manajemen Risiko Dan Analisis Safety System Pada Ilc Slc Pt . Semen Indonesia (Persero), Tbk . Pabrik Tuban Jawa Timur Risk Management and Safety System Analysis of Ilc Slc in Pt . Semen Indonesia (Persero), Tbk . Tuban Factory East Java,” 2016.
- [14] N. Dahliar, S. Widodo, dan A. Tonggiroh, “Pengaruh Komposisi Ash Batubara terhadap Kualitas Klinker Portland Cement pada PT . Semen Tonasa Unit III,” *Geosains*, vol. 10, no. 02, hal. 58–67, 2014.
- [15] F. D. Pramesthi, “Penggunaan Bahan Bakar Alternatif di Industri Semen,” vol. XXV, no. 1, hal. 1–16, 2009.
- [16] L. J. R. Nunes, M. Casau, J. C. O. Matias, dan M. F. Dias, “Coal to Biomass Transition as the Path to Sustainable Energy Production: A Hypothetical Case Scenario with the Conversion of Pego Power Plant (Portugal),” *Applied Science*, vol. 13, no. 7, 2023.
- [17] M. S. Shaari, N. E. Hussain, R. A. Rahim, A. R. Ridzuan, dan F. Masnan, “Coal consumption as a moderator in the link between industrial output and life expectancy in ASEAN nations,” *Carbon Research*, vol. 4, no. 1, 2025.
- [18] P. Chowdhury, N. A. Mahi, R. Yeassin, N. U. R. Chowdhury, dan O. Farrok, “Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 25, no. November 2024, hal. 100889, 2025.