

# Analisis Dampak Penggunaan Bahan Bakar Alternatif dengan Metode *Life Cycle Assessment* di Pabrik Semen Tuban

Rafi Yogatama Indriyantono<sup>1</sup>, Yayok Suryo Purnomo<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”  
Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

\*Koresponden email: yayoksp.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 18 April 2024

Disetujui: 22 April 2024

## Abstract

The cement sector has greatly added to the overall emissions discharged into the atmosphere., with coal usage as a fuel source being considered a factor in environmental impacts. Therefore, with the increasing global demand for cement, preventive measures are needed to reduce total air emissions and provide appropriate improvement recommendations. The use of alternative fuels is considered a solution to mitigate these impacts, but it also introduces new challenges, such as determining the extent of emissions contributed to the environment and other resulting impacts from the utilization of alternative energy sources. Life Cycle Assessment (LCA) method is used in this study for identification and analysis of environmental impacts. SimaPro 9.5 software, utilizing the IMPACT 2002+ impact assessment method, is employed for analysis. The LCA impact analysis results indicate that respiratory inorganics, global warming potential, and terrestrial ecotoxicity are the three highest impacts resulting from air emissions, including NO<sub>x</sub>, Particulates, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, Cd, Cu, Hg, and Cr due to the utilization of fuels such as coal, rice husks, industrial diesel oil (IDO), spent earth, cocopeat, and tobacco waste. Recommendations for improvement include increasing the ratio of rice husk usage by 15%-30% as fuel and planting giant miscanthus grass (*miscanthus giganteus*).

**Kata Kunci:** *life cycle assessment, alternative fuel, cement, impact, IMPACT 2002+*

## Abstrak

Industri semen memiliki sumbangsih besar terhadap terlepasnya sejumlah total emisi ke udara, timbulnya emisi ke udara akibat penggunaan batubara sebagai bahan bakar dinilai menjadi faktor munculnya dampak ke lingkungan. Oleh karena itu, dengan meningkatnya permintaan akan semen di dunia maka diperlukan tindakan pencegahan yang ditujukan untuk mengurangi total emisi di udara dan menciptakan rekomendasi perbaikan yang tepat. Penggunaan bahan bakar alternatif dinilai bisa menjadi solusi untuk mengurangi timbulnya dampak, namun dengan digunakannya bahan bakar alternatif maka terdapat kemungkinan timbulnya suatu isu baru, yaitu seberapa besar kontribusi emisi yang terbuang ke lingkungan serta dampak lain yang timbul akibat pemanfaatan alternatif energi tersebut. Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) digunakan dalam penelitian ini dengan tujuan untuk identifikasi dan analisis dampak lingkungan. *Software* SimaPro 9.5 dengan jenis pembacaan hasil dampak *IMPACT 2002+* digunakan sebagai pendekatan analisis. Pada hasil analisis dampak LCA, kategori dampak *respiratory inorganics, global warming potential, dan terrestrial ecotoxicity* merupakan tiga dampak tertinggi yang diakibatkan dari emisi ke udara berupa NO<sub>x</sub>, Partikulat, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, Cd, Cu, Hg dan, Cr akibat penggunaan bahan bakar berupa batubara, sekam padi, IDO, *spent earth, cocopeat*, dan aval tembakau. Rekomendasi perbaikan yang dapat diberikan adalah meningkatkan rasio penggunaan sekam padi sebanyak 15%-30% sebagai bahan bakar dan penanaman alang-alang raksasa (*miscanthus giganteus*).

**Kata Kunci:** *life cycle assessment, bahan bakar alternatif, semen, dampak, IMPACT 2002+*

## 1. Pendahuluan

Pada saat ini, semen menjadi salah satu elemen utama dalam perkembangan infrastruktur. Permintaan akan kebutuhan semen terus meningkat dalam 10 tahun terakhir di Indonesia. Sumbangsih akan produk semen cukup besar, misal untuk produksi semen jenis Portland sebanyak satu ton, maka akan menghasilkan sekitar satu ton gas karbondioksida. Adapun sekitar 1,5 miliar ton diproduksi setiap tahunnya, hal ini sebanding dengan jumlah karbondioksida yang dilepaskan ke alam [1].

Bahan bakar alternatif merupakan produk berupa hasil limbah cair, padat ataupun sisa-sisa sampah baik B3 maupun Non-B3 yang digunakan sebagai substitusi bahan pada proses produksi di suatu industri. Dengan total penggunaan energi mencapai 30-40% dalam industri semen, menjadikan nilai penggunaan bahan bakar alternatif menjadi lebih ekonomis dibandingkan batubara selaku bahan bakar konvensional [2]. Bahan bakar

alternatif seperti sampah plastik, ban bekas, *refused derived fuels* (RDF), biomassa dan limbah tekstil dapat digunakan untuk menggantikan peranan batubara dalam industri semen [3].

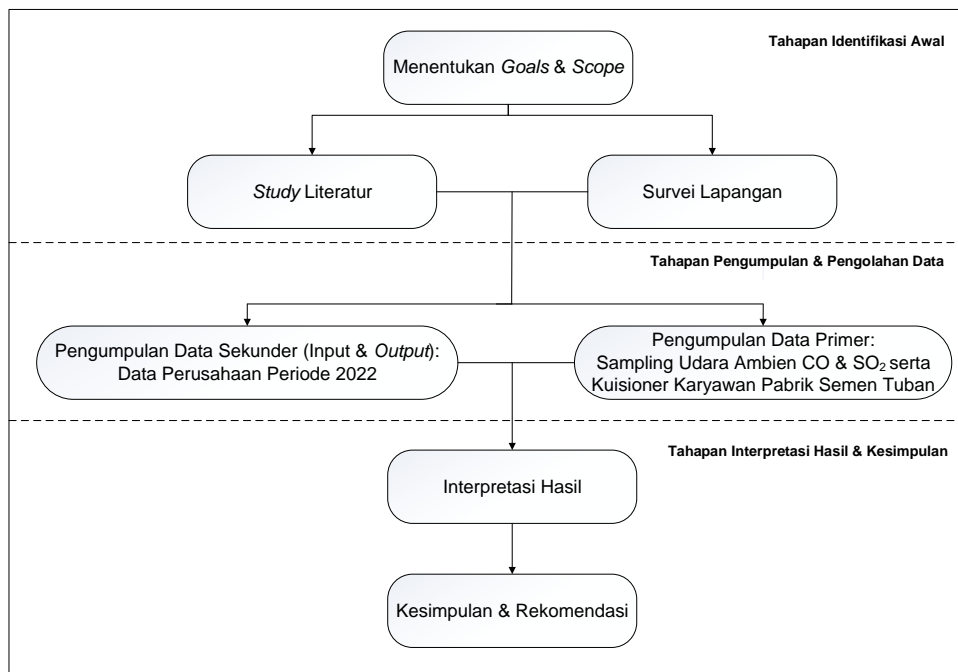
Perubahan komponen bahan bakar dalam industri semen dapat menimbulkan suatu permasalahan baru, seperti seberapa besar kontribusi emisi gas yang terbuang ke lingkungan serta dampak lain yang timbul akibat pemanfaatan energi alternatif tersebut [4]. Untuk mengukur besaran kontribusi tersebut maka metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dapat digunakan sebagai suatu metode pengukuran [5].

Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) semakin sering digunakan dalam beberapa tahun belakangan ini. Dalam operasional sebelumnya, metode ini digunakan untuk menilai dampak lingkungan terkait hasil produk, proses produksi maupun jasa dalam keseluruhan siklus hidupnya [6]. Metode LCA memiliki kelebihan, dikarenakan dapat menganalisis dampak potensial secara komprehensif yang terjadi terhadap lingkungan [7]. Terdapat empat tahapan dalam metode LCA meliputi *goals & scope*, *life cycle inventory* (LCI), *life cycle impact assessment* (LCIA) dan interpretasi siklus hidup [8].

Penelitian ini bersifat *gate to gate* yang meliputi produksi *Raw Mill*, *Kiln*, dan *Finish Mill*. LCA biasanya membutuhkan data yang cukup banyak serta asumsi dan penggunaan *software* khusus yang bisa membantu proses analisa (Pechenart and Roquesalane, 2014). Dalam penelitian ini *software* SimaPro 9.5. dipilih berdasarkan hasil penelitian terdahulu dikarenakan dinilai memiliki kelebihan dari ketersediaan *database*, *datasets*, kualitas data serta *cost-efficiency* [9].

## 2. Metode Penelitian

Waktu penelitian ini dilakukan selama tiga bulan, yaitu pada bulan November 2023-Januari 2024 dan acuan yang digunakan adalah berdasarkan SNI ISO 14040:2016, yang dibagi menjadi empat tahap yaitu: (1) tahapan identifikasi awal, (2) tahapan pengumpulan data, (3) tahapan pengolahan data, dan (4) tahapan interpretasi hasil analisis serta penentuan kesimpulan. Adapun tahapan-tahapan dalam penelitian ini digambarkan pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Metode Penelitian Pabrik Semen Tuban

## 3. Hasil & Pembahasan

### A. Goals & Scope

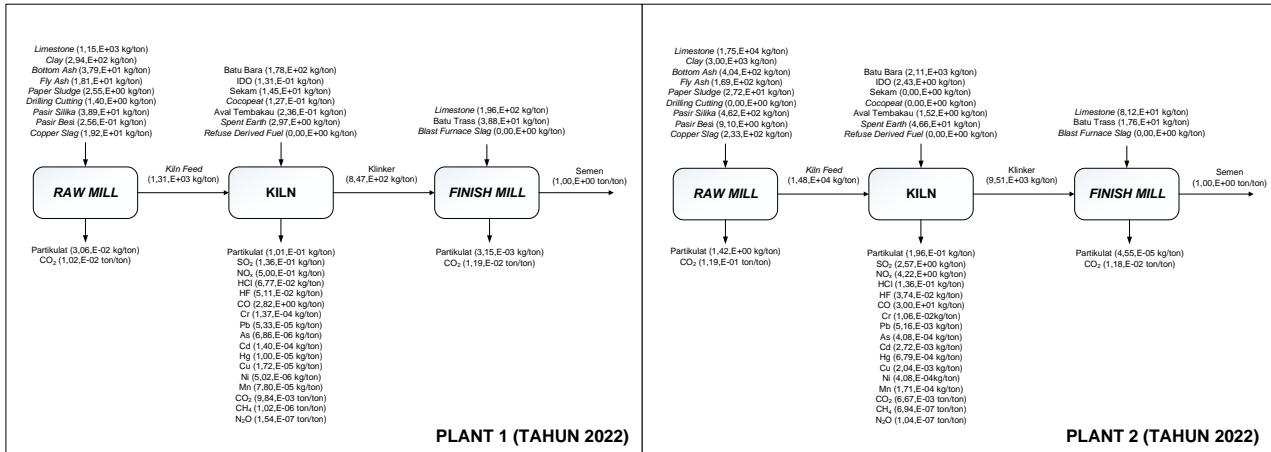
Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis dampak dan penyebab serta menentukan rekomendasi alternatif yang tepat akibat dari pemanfaatan bahan bakar alternatif di Pabrik Semen Tuban sesuai dengan alur proses produksi semen yang ada.

Kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) dalam penelitian ini menggunakan unit fungsional 1 Ton semen, di mana unit fungsional ini dapat berfungsi untuk menunjukkan besaran dampak yang dihasilkan dalam setiap 1 Ton produksi semen. Dalam kajian ini ruang lingkup kajian bersifat *gate to gate* dalam perbandingan kajian komparatif antara *Plant 1* yang menggunakan persentase bahan bakar alternatif paling banyak dan *Plant 2* yang menggunakan persentase bahan bakar alternatif paling sedikit, batasan sistem teknis kajian meliputi

proses produksi yang menghasilkan produk semen serbaguna, yaitu: (1) *Raw Mill*, (2) *Kiln*, dan (3) *Finish Mill*. Pada kajian ini data transportasi dan emisi yang dihasilkan dari penggunaan energi listrik tidak dimasukkan dengan pertimbangan tidak adanya korelasi antara *output* emisi yang dikeluarkan dari penggunaan bahan bakar.

**B. Inventory Analysis**

Analisis inventori dalam kajian ini dijalankan mengacu pada alur input & output komponen/material dalam proses produksinya, yang meliputi kategori input berupa; bahan baku, bahan baku alternatif, bahan bakar, bahan bakar alternatif, bahan tambahan, dan material perantara. Sedangkan untuk *output* dapat dikategorikan berupa; produk, produk intermediate, dan emisi ke udara. Data yang digunakan dalam kajian LCA harus representatif, dinyatakan bahwa data yang digunakan harus memenuhi standar minimal pengumpulan data selama 1 tahun [10]. Dalam kajian LCA ini data yang digunakan adalah berdasarkan inventarisasi perusahaan dalam periode Januari 2022 sampai dengan Desember 2022.

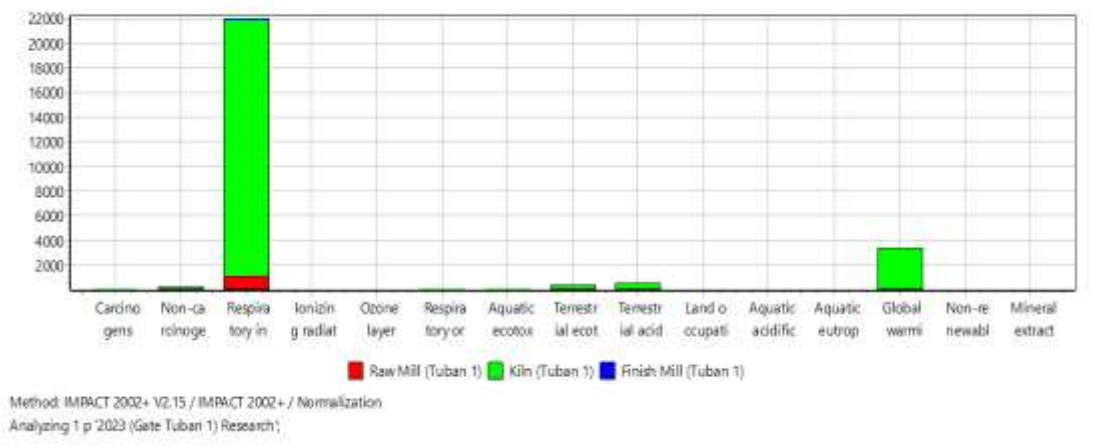


**Gambar 2.** Data Inventori Pabrik Semen Tuban Tahun 2022 pada *Plant 1* & *Plant 2* dalam Unit Fungsi per-Ton

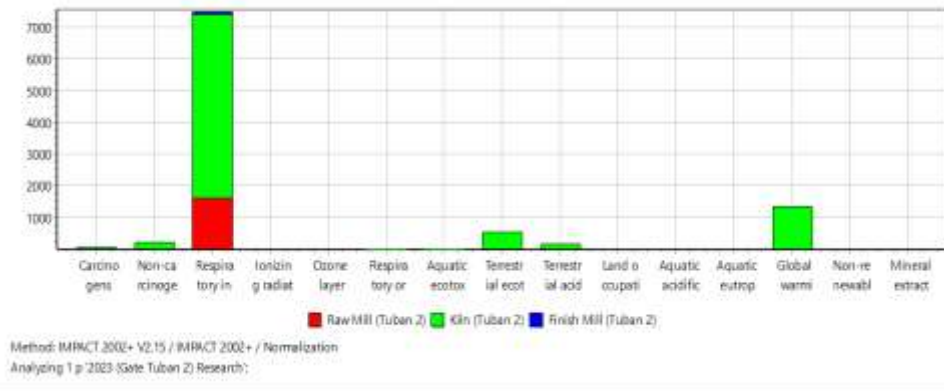
Dalam penelitian ini dilakukan hasil uji udara ambien SO<sub>2</sub> dan CO pada unit/proses *Kiln*, pada hasil uji menunjukkan hasil bahwa konsentrasi SO<sub>2</sub> dan CO berdasarkan PP.RI No.22/2021, Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengolahan LH masih memenuhi standart baku mutu yang ditetapkan.

**C. Impact Assessment**

Jenis metode dampak *IMPACT 2002+* dipilih berdasarkan analisis dampak lingkungan yang dihasilkan dari pemanfaatan bahan bakar alternatif pada *Plant 1* dan *Plant 2*. Adapun hasil dampak dalam *characterization* dapat dilihat pada **Tabel 1**. Pada tahapan *characterization* terjadi penilaian besaran dampak dinilai dari kontribusi suatu substansi dalam tiap karakterisasi dampaknya. Dalam kajian ini, untuk melakukan komparasi dampak antar *Plant 1* dan *Plant 2* yang menggunakan persentase bahan bakar konvensional dan bahan bakar alternatif yang berbeda, maka dalam setiap hasil dampak yang muncul akan dibagi dengan hasil total produksi pada masing-masing *Plant* dengan unit fungsi berupa (ton).



**Gambar 3.** Output Normalization LCA Pabrik Semen Tuban *Plant 1* menggunakan metode *IMPACT 2002+* + Persentase Penggunaan Bahan Bakar (*Plant 1*)



Gambar 4. Output Normalization LCA Pabrik Semen Tuban Plant 1 menggunakan metode IMPACT 2002+Persentase Penggunaan Bahan Bakar (Plant 2)

Dalam tahapan *normalization* digunakan satuan hasil dampak yang seragam, dan dari hasil analisa diketahui tiga dampak terbesar yang dihasilkan secara berturut-turut pada *Plant 1* dan *Plant 2* dengan cakupan unit/proses *Raw Mill*, *Kiln*, dan *Finish Mill* yakni *respiratory inorganics*, *global warming potential*, dan *terrestrial ecotoxicity*. Dampak dari *respiratory inorganics* berasal dari unit/proses *Kiln*, *Raw Mill*, dan *Finish Mill*. Adapun dampak *global warming potential* dan *terrestrial ecotoxicity* timbul akibat unit/proses *Kiln* saja.

Tabel 1. Komparasi Hasil Nilai *Characterization* Pada Tiap Unit/Proses *Plant 1* & *Plant 2* untuk 1 Ton Produksi Semen

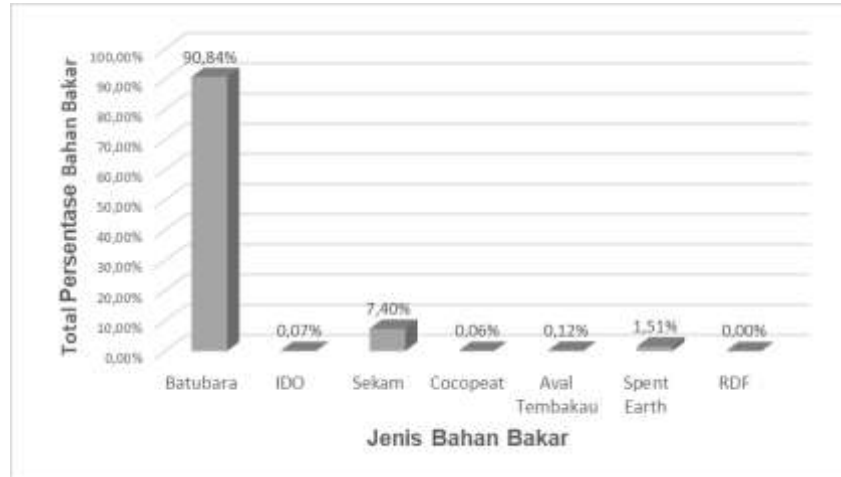
Kategori Dampak	Satuan	Raw Mill (Plant 1)	Kiln (Plant 1)	Finish Mill (Plant 1)	Raw Mill (Plant 2)	Kiln (Plant 2)	Finish Mill (Plant 2)
<i>Carcinogens</i>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq/ton	-	3,02,E-02	-	-	1,89,E+00	-
<i>Non-carcinogens</i>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq/ton	-	1,69,E-01	-	-	7,05,E+00	-
<i>Respiratory inorganics</i>	kg PM <sub>2.5</sub> eq/ton	4,81,E-03	9,29,E-02	4,95,E-04	2,23,E-01	7,99,E-01	7,15,E-03
<i>Ionizing radiation</i>	Bq C-14 eq/ton	-	-	-	-	-	-
<i>Ozone layer depletion</i>	kg CFC-11 eq/ton	-	-	-	-	-	-
<i>Respiratory organics</i>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/ton	-	2,17,E-04	-	-	9,44,E-03	-
<i>Aquatic ecotoxicity</i>	kg TEG water/ton	-	1,33,E+02	-	-	8,78,E+03	-
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg TEG soil/ton	-	2,53,E+02	-	-	1,27,E+04	-
<i>Terrestrial acid/nutri</i>	kg SO <sub>2</sub> eq/ton	-	2,88,E+00	-	-	2,57,E+01	-
<i>Land occupation</i>	m <sub>2</sub> org.arable/ton	-	-	-	-	-	-
<i>Aquatic acidification</i>	kg SO <sub>2</sub> eq/ton	-	6,27,E-01	-	-	5,70,E+00	-
<i>Aquatic eutrophication</i>	kg PO <sub>4</sub> P-lim/ton	-	-	-	-	-	-
<i>Global warming</i>	kg CO <sub>2</sub> eq/ton	-	1,45,E+01	-	-	1,79,E+02	-
<i>Non-renewable energy</i>	MJ primary/ton	-	-	-	-	-	-
<i>Mineral extraction</i>	MJ surplus/ton	-	-	-	-	-	-

#### D. Interpretation

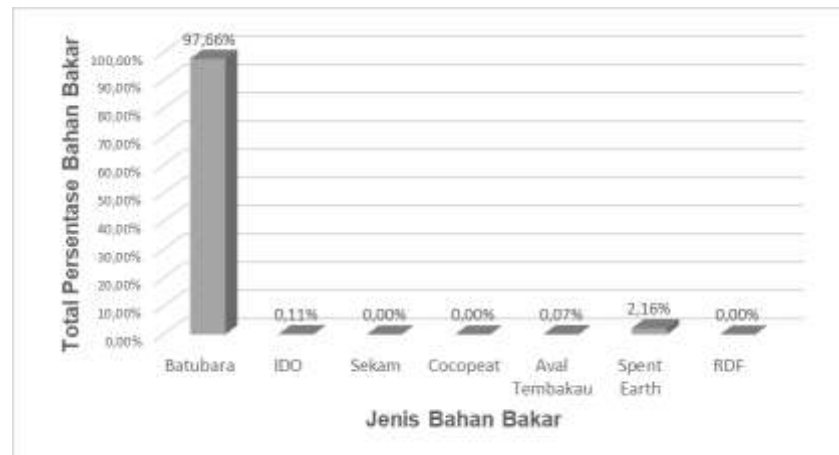
Interpretasi adalah tahapan yang digunakan untuk membandingkan dua material berdasarkan hasil inventori dan analisis dampak yang diperoleh dari tahapan *impact assessment* [8]. Interpretasi dilakukan untuk mengetahui *hotspot* dari unit/proses dengan dampak yang paling besar. *Hotspot* merupakan tahap siklus hidup, proses atau aliran dasar yang menyumbang proporsi signifikan dari dampak unit fungsional [10]. Pada kajian ini Dampak lingkungan yang muncul akan langsung difokuskan dan disajikan pada tiga dampak lingkungan terbesar berdasarkan fase normalisasi yaitu *respiratory inorganics*, *global warming potential*, dan *terrestrial ecotoxicity*. Alasan pemfokusan tiga dampak tertinggi ini supaya alternatif rekomendasi pengelolaan dampak lingkungan yang diberikan dapat lebih terpusat dan detail [11].

Secara umum, *hotspot* pada kajian ini terletak pada unit/proses *Kiln*. Namun, dikarenakan penelitian ini bersifat kajian komparatif maka dapat diketahui berdasarkan hasil perbandingan dampak bahwa *Kiln (Plant 2)* yang menggunakan bahan bakar alternatif paling sedikit menyumbang dampak tertinggi dengan jenis kategori dampak yang muncul; (1) *respiratory inorganics* akibat emisi ke udara berupa NO<sub>x</sub>, Partikulat, dan SO<sub>2</sub>, (2)

*global warming potential* akibat emisi ke udara berupa CO<sub>2</sub> dan CO, (3) *terrestrial ecotoxicity* akibat emisi ke udara berupa Cd, Cu, Hg, dan Cr, seluruh emisi tersebut dihasilkan dari pembakaran batubara, sekam padi, IDO, *spent earth*, *cocopeat* serta aval tembakau, di mana jika dikorelasikan dengan persentase penggunaan bahan bakar alternatif pada unit/proses *Kiln (Plant 1)* yang menggunakan bahan bakar alternatif paling banyak, nilai dampak tersebut akan bernilai lebih besar yang menunjukkan bahwa semakin besar bahan bakar alternatif yang digunakan dalam proses produksi, maka semakin sedikit juga besaran dampak yang dihasilkan. Persentase penggunaan bahan bakar dapat dilihat pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



**Gambar 5.** Persentase Penggunaan Bahan Bakar (*Plant 1*)



**Gambar 6.** Persentase Penggunaan Bahan Bakar (*Plant 2*)

Berdasarkan hasil analisis LCA pada penggunaan bahan bakar alternatif dalam proses produksi semen di Pabrik Semen Tuban dengan menggunakan metode *IMPACT 2002+*, menyatakan bahwa dampak yang berkontribusi besar yang muncul dalam kajian ini adalah *respiratory inorganics*, di mana dampak ini termasuk ke dalam jenis kategori *human health* dengan satuan DALY. Berdasarkan hasil interpretasi, dampak ini muncul akibat proses pembakaran batu bara yang menimbulkan emisi berupa NO<sub>x</sub>, Partikulat, dan SO<sub>2</sub>. Namun, berdasarkan kuisioner yang diberikan oleh peneliti kepada karyawan Pabrik Semen Tuban menyatakan bahwa tidak ada karyawan yang mengalami masalah penyakit yang berhubungan dengan pernapasan, seperti batuk berkepanjangan, sesak napas ataupun bronkitis. Sehingga berdasarkan hal tersebut, hasil yang muncul pada *software* SimaPro menunjukkan hasil yang berbeda dengan kondisi yang dialami oleh karyawan di Pabrik Semen Tuban. Dalam hal ini, munculnya kategori dampak tertinggi yaitu *respiratory inorganics* pada *software* SimaPro hanya menunjukkan bahwa masalah penyakit pernapasan kemungkinan akan muncul suatu saat (*potential*) kepada para karyawan di Pabrik Semen Tuban, tentunya hal ini didukung dengan hasil sampling udara ambien berupa SO<sub>2</sub> yang merupakan salah satu substansi tertinggi penyebab dampak *respiratory inorganics* pada unit/proses *Kiln* yang masih memenuhi standar baku mutu.

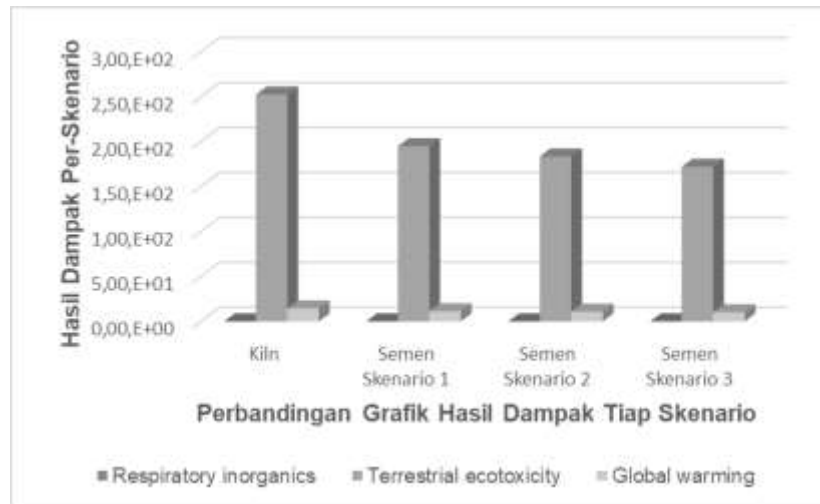
#### E. Rekomendasi Perbaikan

Dalam setiap tahunnya dampak lingkungan pada proses produksi semen akibat penggunaan batubara akan terus berlangsung jika tidak dilakukan upaya perbaikan. Maka dari itu, pada penelitian ini dirumuskan rekomendasi perbaikan yang bertujuan untuk mengurangi timbulan dampak yang terjadi akibat penggunaan



bahan bakar konvensional di Pabrik Semen Tuban. Usulan yang diberikan dilakukan berdasarkan berdasarkan jurnal-jurnal pendukung dan wawancara langsung dengan pihak terkait.

Adapun usulan yang diberikan adalah melakukan skenario komposisi penggunaan bahan bakar konvensional berupa batu bara serta bahan bakar alternatif berupa sekam padi dengan rancangan skenario sebagai berikut: (1) Jenis bahan bakar yang dipakai sama seperti yang digunakan di Kiln Pabrik Semen Tuban. (2) Komposisi bahan bakar terdiri dari 85% batubara dan 15% sekam padi sebagai sumber energi. (3) Energi yang digunakan terdiri dari 80% batubara dan 20% sekam padi dalam campuran bahan bakar. (4) Campuran bahan bakar melibatkan penggunaan 70% energi dari batubara dan 30% dari sekam padi., kemudian berdasarkan skenario tersebut akan dihitung penurunan nilai dampaknya dari hasil *running software* SimaPro 9.5 dan akan dibandingkan dengan kondisi eksisting dari unit/proses yang menjadi *hotspot*. Untuk memberikan gambaran terkait hasil komparasi dampak antara kondisi eksisting pada unit/proses *Kiln* dan skenario dapat dilihat pada **Gambar 7** berikut.



**Gambar 7.** Grafik Hasil Komparasi Dampak Skenario 1, 2, dan 3

Adapun dalam skenario pada penelitian lain menyatakan bahwa komparasi antara penggunaan sekam padi dengan alang-alang raksasa (*miscantus giganteus*), menghasilkan kesimpulan bahwa alang-alang raksasa (*miscantus giganteus*) lebih ramah lingkungan jika digunakan sebagai bahan bakar alternatif dilihat dari nilai dampaknya. Tanaman alang-alang raksasa (*miscantus giganteus*) mampu menghasilkan biomassa sebesar 20 ton, kuat akan perubahan cuaca dan juga tanaman ini memiliki kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub> sebesar 569/ton/tahun [12]. Dalam hal ini tanaman alang-alang raksasa (*miscantus giganteus*) bisa menjadi pertimbangan perusahaan Pabrik Semen Tuban sebagai sumber bahan bakar alternatif lainnya, di samping peningkatan persentase pemanfaatan sekam padi sebagai bahan bakar alternatif.

#### 4. Kesimpulan

Potensi dampak lingkungan tertinggi yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar alternatif adalah *respiratory inorganics*, *global warming potential*, dan *terrestrial ecotoxicity*. Penyebab munculnya potensi dampak tersebut diakibatkan dari emisi berupa NO<sub>x</sub>, Partikulat, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, Cd, Cu, Hg dan, Cr akibat penggunaan bahan bakar berupa batubara, sekam padi, IDO, *spent earth*, *cocopeat*, dan aval tembakau.

Usulan perbaikan yang dilakukan adalah dengan meningkatkan rasio penggunaan bahan bakar alternatif berupa sekam padi sebanyak 15%-30% yang berdasarkan hasil *running software* SimaPro 9.5 dapat menurunkan secara berturut-turut dampak *respiratory inorganics*, *global warming*, dan *terrestrial ecotoxicity*. Selain itu upaya lain yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan penanaman alang-alang raksasa (*miscantus giganteus*) yang dapat menyerap CO<sub>2</sub> dalam tiap hektar sebanyak 569/ton/tahun. Selain itu *miscantus giganteus* juga memiliki manfaat lain sebagai pilihan bahan bakar alternatif yang memiliki nilai dampak lebih sedikit dibanding sekam padi.

#### 5. Referensi

- [1] Zacoeb, A., Dewi, S. M., & Jamaran, I. (2013). Pemanfaatan limbah bottom ash sebagai pengganti semen pada genteng beton ditinjau dari segi kuat lentur dan perembesan air. *Rekayasa Sipil*, 7(1), 81-87.
- [2] Mokrzycki, E., & Uliasz-Bocheńczyk, A. (2003). Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy*, 95-100.

- [3] Hossain, M. U. (2017). Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study. *Resource Conservation Recycle*, 199-208.
- [4] Cahyono, T. D., Coto, Z., & Febriyanto, F. (2008). Aspek Thermofisis Pemanfaatan Kayu Sebagai Bahan Bakar Substitusi di Pabrik Semen. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan, Institut Pertanian Bogor*.
- [5] Harjanto, T. R., Fahrurrozi, M., & Bendiyasa, I. M. (2014). Life Cycle Assessment Pabrik Semen PT Holcim Indonesia Tbk. Pabrik Cilacap: Komparasi antara Bahan Bakar Batubara dengan Biomassa. *Jurnal Rekayasa Proses*, 51–58.
- [6] SETAC. (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"*. Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry.
- [7] Wahyudi, J. (2017). Penerapan Life Cycle Assessment untuk Menakar Emisi Gas Rumah Kaca yang Dihasilkan dari Aktivitas Produksi Tahu. *Urecol*, 475–480.
- [8] Organization, I. S. (2016). *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework ISO 14040*. ISO Press.
- [9] Silva, D., Nunes, A. O., da Silva Moris, A., Moro, C., & Piekarski, T. O. (2017). How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. *Proceedings of the VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica*, (pp. 10-15). Medellin.
- [10] Devi, S. A., & Mirwan, M. (2023). Analisis Life Cycle Assessment (LCA) pada Proses Produksi Pupuk ZA II Menggunakan Metode Recipe 2016. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 620-632.
- [11] Nurbaiti, G. A. (2022). *Life Cycle Assessment (LCA) Sebagai Metode Kajian Dampak Lingkungan Proses Pengolahan Air Bersih di Instalasi Pengolahan Air (IPA) Siwalapanji*. Surabaya: Fakultas Teknik. Departemen Teknik Lingkungan.
- [12] Dahlan, E. N. (1992). *Hutan Kota Untuk Peningkatan Kualitas Lingkungan Hidup*. Jakarta: APHI.