

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN INDUSTRI SEMEN DENGAN PENDEKATAN LIFE CYCLE ASSESSMENT PADA RUANG LINGKUP CRADLE TO GATE

ENVIRONMENTAL IMPACT ANALYSIS OF CEMENT INDUSTRY WITH LIFE CYCLE ASSESSMENT APPROACH AT CRADLE TO GATE SCOPE

Muhammad Abrar Firdausy^{1*)}, Muhammad Syufian Syaury¹⁾, Novan D. Natanegara²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat Jl.
A. Yani Km. 36 Banjarbaru Kalimantan Selatan 70714 Indonesia

²⁾PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk. Kabupaten Kotabaru, Kecamatan Kelumpang
Hilir Desa Tarjun, 72161 Indonesia

^{*)}E-mail: abrar.firdausy@ulm.ac.id

Abstrak

Industri semen merupakan yang membutuhkan konsumsi energi yang tinggi dan menghasilkan emisi yang tinggi. Produksi semen menyumbangkan sekitar 4% emisi CO₂ terhadap global. Pemerintah Indonesia berupaya mendorong seluruh pelaku usaha/ industri dalam menurunkan beban dampak lingkungan untuk memenuhi persyaratan PROPER (Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup) yang linier dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis kategori dampak yang dihasilkan pada industri semen dengan pendekatan (*cradle to gate*) dan menganalisis kriteria dari unit proses yang menimbulkan dampak terbesar. Metode yang digunakan adalah penilaian LCA (*Life Cycle Assessment*) dengan menggunakan penilaian kategori dampak CML *Baseline*. Metode penilaian CML *Baseline* merupakan metode penilaian midpoint yang melingkupi sebelas aspek penilaian *Abiotic depletion*, *Abiotic depletion (fossil fuels)*, *Acidification*, *Eutrophication*, *Fresh water aquatic toxicity*, *Global warming Potential* (GWP10), *Human toxicity*, *Marine aquatic ecotoxicity*, *Ozone layer depletion Potential* (ODP), *Photochemical oxidation*, dan *Terrestrial ecotoxicity*. Hasil penelitian didapatkan nilai *Global Warming Potential* (1.75.E+09 kg CO₂ eq.), *Marine aquatic ecotoxicity* (5.97.E+09 kg 1,4-DB eq.), *Human toxicity* (1.26.E+07 kg 1,4-DB eq.), *Photochemical oxidation* (3.66.E+05 kg 1,4-DB eq.), *Acidification Potential* (8.44.E+06 kg SO₂ eq.), *Fresh water aquatic ecotoxicity* (1.31.E+05 kg 1,4-DB eq.), *Abiotic depletion* (6.35.E+00 kg Sb eq.), *Abiotic depletion (fossil fuels)* (4.30.E+08 MJ), *Eutrophication* (4.56.E+05 kg PO₄ eq.), *Ozone layer depletion* (0.00.E+00Kg CFC-11 eq), Analisis berdasarkan unit fungsional total produksi semen selama setahun menimbulkan potensi dampak terbesar (*hotspot*) berada pada unit *kiln & Cooler*.

Kata kunci : Industri Semen, CML baseline, Cradle to gate, Life cycle assessment

Abstract

Cement industry is an that requires high energy consumption and produces high emissions. Cement production contributes about 4% of CO₂ emissions to the global. The Indonesian government seeks to encourage all business industry actors to reduce the burden of environmental impacts to meet the requirements of PROPER (Company Performance Rating Program in Environmental Management) which is linear with the Life. Cycle. Assessment. (LCA). The

purpose of this study is to analyze the category of impacts generated in the cement industry with a cradle to gate approach and analyze the criteria of the process unit that causes the greatest impact. The method used is LCA (Life Cycle Assessment) assessment using CML Baseline impact category assessment. The CML Baseline assessment method is a midpoint assessment method that covers eleven aspects of Abiotic depletion, Abiotic depletion (fossil fuels), Acidification, Eutrophication, Fresh water aquatic toxicity, Global warming Potential (GWP10), Human toxicity, Marine aquatic ecotoxicity, Ozone layer depletion Potential (ODP), Photochemical oxidation, Terrestrial ecotoxicity. The results obtained the value of Global Warming Potential ($1.75.E+09$ kg CO₂ eq.), Marine aquatic ecotoxicity ($5.97.E+09$ kg 1,4-DB eq.), Human toxicity ($1.26.E+07$ kg 1,4-DB equivalent), Photochemical oxidation ($3.66.E+05$ kg 1,4-DB equivalent), Acidification potential ($8.44.E+06$ kg SO₂ equivalent), Freshwater aquatic ecotoxicity ($1.31.E+05$ kg 1,4-DB eq.), Abiotic depletion ($6.35.E+00$ kg Sb eq.), Abiotic depletion (fossil fuel) ($4.30.E+08$ MJ), Eutrophication ($4.56.E+05$ kg PO₄ eq.), Ozone layer depletion ($0.00.E+00$ Kg CFC-11 eq), analysis based on the functional unit of total cement production for a year. The largest potential impact (hotspot) is in the kiln & Cooler unit.

Keywords : Cement Industry, CML baseline, Cradle to gate, Life cycle assessment

1. PENDAHULUAN

Semen merupakan bahan dasar utama pembangunan konstruksi, di Indonesia terdapat tujuh produsen semen yang beroperasi. Pemenuhan kebutuhan pasar yang tinggi ditambah dengan kepekaan konsumen terhadap kualitas dan mutu, sehingga produsen harus tetap konsisten dalam menjaga mutu produk, tantangan yang dihadapkan oleh pelaku industri semen mengurangi konsumsi energi dan tetap menghasilkan produk yang bermutu (Purnawan & Prabowo, 2018). Pembuatan semen berbahan baku utama *Limestone* dan *Clay* dan ada bahan baku yang sifatnya bahan koreksi yakni pasir silika (*Silica sand*) dan pasir besi (*Iron ore*) didapatkan dari proses pertambangan (Fitriyanti & Fatimura, 2019).

Industri semen merupakan industri yang membutuhkan konsumsi energi yang tinggi dan menghasilkan emisi yang tinggi. Produksi semen menyumbangkan sekitar 4% emisi CO₂ terhadap global (Devia et al., 2017). Pembuatan semen terdiri dari beberapa proses antara lain *raw Material* (unit mining), *Unit raw mill*, *Unit Burning*, *Unit coal mill*, *unit finish mill* dan *unit packer*. Industri semen merupakan industri dengan konsumsi energi yang besar, proses produksi dapat dianalisis secara menyeluruh

dengan prinsip produksi bersih agar mendapatkan penggunaan energi yang efisien (Fitriyanti & Fatimura, 2019). *Life Cycle Assessment* (LCA) adalah metode yang diperuntukkan untuk mengukur besaran dampak dari setiap unit proses berupa dampak langsung dan tidak langsung (Lolo et al., 2021).

Life Cycle Assessment (LCA) merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi serta mengestimasi dampak lingkungan secara menyeluruh mengenai suatu produk, proses, dan layanan sepanjang daur hidup tersebut. Penilaian dampak dinilai dari bahan baku, produksi, penggunaan, dan disposal. Metode LCA dibuat oleh standar internasional ISO 14040 dan ISO 14044 yang dapat digunakan untuk membantu identifikasi peluang untuk meningkatkan mutu produk dari aspek lingkungan, ekonomi, dan pandangan masyarakat (Monteiro et al., 2021).

Pemerintah Indonesia berupaya mendorong seluruh pelaku usaha/ industri dalam menurunkan beban dampak lingkungan untuk memenuhi persyaratan PROPER (Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup) yang linier dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Program PROPER diatur pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 1 tahun 2021 Tentang

Program. Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021).

Penilaian produk dan jasa ramah lingkungan dilakukan sebagai komitmen pelaku usaha dengan cara menunjukkan informasi potensi dampak dalam menciptakan produk bersih. Penilaian daur hidup berdasarkan kategori dampak CML Baseline; *Abiotic depletion*, *Abiotic depletion (fossil fuels)*, *Acidification*, *Eutrophication*, *Fresh Water Aquatic Ecotoxicity*, *Global Warming Potential (GWP100)*, *Human Toxicity*, *Marine Aquatic Ecotoxicity*, *Ozone Layer Depletion (ODP)*, *Photochemical Oxidation*, dan *Terrestrial Ecotoxicity*.

Penelitian ini bertujuan menganalisis dan mengidentifikasi kategori dampak yang dihasilkan dengan pendekatan (*Cradle to gate*), menganalisis dan menetapkan lokasi kriteria dari unit proses yang menimbulkan dampak terbesar terhadap lingkungan hidup dari proses produksi semen selama periode penelitian, dan menganalisis rekomendasi dalam memperbaiki proses produksi dan upaya untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan.

2. METODA

Penelitian ini menggunakan analisis berdasarkan *Framework LCA* sesuai pendoman ISO 14040, 2006; Alur analisis pertama menentukan tujuan dan lingkup penelitian, kedua membuat *inventory* daur hidup, selanjutnya melakukan penilaian dampak dan membuat interpretasi data berupa rekomendasi peningkatan kinerja unit proses produksi untuk menurunkan dampak terhadap lingkungan. Analisis Perhitungan dampak dihitung menggunakan *software OpenLCA* dengan metode penilaian dampak CML IA. Pemilihan kategori dampak sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 1 Tahun 2021 berupa penilaian dampak wajib dan tambahan.

Penelitian dilakukan di Industri semen PT. XYZ berlokasi di Kabupaten Kotabaru, Kalimantan Selatan, Ruang lingkup penelitian menggunakan pendekatan *cradle to gate* dengan mengidentifikasi seluruh unit produksi industri semen dari tahap ekstraksi bahan baku hingga tahap pengepakan.

Perhitungan yang digunakan dalam penelitian berbasis data inventarisasi emisi pada periode satu tahun. Penelitian ini menggunakan data sekunder perusahaan dan data hasil perhitungan, data sekunder antara lain data data konsumsi *Material*, data konsumsi energi, data Emisi proses dan data kebutuhan solar dalam proses *handling alternative Material & fuel* menggunakan data OE (*own estimation*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Tujuan dan Batasan

Ruang lingkup penelitian ini adalah *cradle to gate* yang diawali dari ekstraksi bahan baku hingga proses pengepakan. Penelitian menggunakan metode CML IA, metode dipilih karena menggunakan pendekatan *midpoint* yang berorientasi pada masalah dan sesuai dengan tujuan penelitian menganalisis kategori dampak terhadap lingkungan. Penilaian dampak pada penelitian ini sesuai dengan penilaian CML *Baseline* menggunakan bantuan *software OpenLCA*. Batasan (*Scope*) penelitian proses ekstraksi bahan baku hingga pengemasan (*packer*). Ruang lingkup *cradle to gate* sudah mengimplementasikan kategori dampak produksi terhadap lingkungan. penelitian menggunakan kriteria *cut off* berupa *transportasi* dari pihak luar di abaikan. Unit fungsional pada penelitian tercantum pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Unit Fungsional dalam Kajian LCA

Item	Unit Fungsional
Semen PCC (<i>Portland Composit Cement</i>)	Produksi tahun 2022

3.2. Penetapan *Inventory* Daur Hidup

Inventory data pada analisis LCA berupa data *input*, *output*, dan beban emisi yang dihasilkan pada setiap proses. Data *input* berupa bahan dan energi yang digunakan pada unit produksi untuk menghasilkan *output* berupa produk. Data *output* adalah data jumlah produk yang dihasilkan dari suatu unit, data beban emisi yang dihasilkan

termasuk ke dalam data *output* dalam analisis *inventory*. Data *inventory* pada penelitian ini adalah *inventory* pertambangan, penggilingan awal, *coal mill*, *kiln* dan *cooler*, *finish mill* dan *finish packer* yang dapat dilihat pada **Tabel 2**, **Tabel 3**, **Tabel 4**, **Tabel 5**, **Tabel 6** dan **Tabel 7**.

Tabel 2. *Inventory* Pertambangan

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
Mining	Input	Jenis	<i>Ammonium Nitrate</i>	699.750	Ton
			<i>Limestone</i>	1.948.862,99	Ton
			<i>Clay</i>	260.692,65	Ton
			<i>Silica sand</i>	119.334,11	Ton
			<i>Laterite</i>	13.916,85	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	13.707.149	Kwh
			<i>Solar transport</i>	1.206,82	Ton
			<i>Gasoline Transport</i>	16,34	Ton
		Bukaan Lahan			
			<i>Limestone</i>	1.320.829,83	m ²
			<i>Clay</i>	102321.86	m ²
			<i>Silica sand</i>	45.883,96	m ²
			<i>Laterite</i>	3.545,31	m ²
	Output	Emisi (Ton)			
		Cerobong	Partikulat	2,779	Ton
			CO ₂ (<i>Indirect</i>)	12.473,50	Ton
		Listrik	SO ₂ (<i>Indirect</i>)	53,320	Ton
			NO _x (<i>Indirect</i>)	18,641	Ton
		Transportasi			
		Solar	CO ₂	3.845,30	Ton
			CH ₄	0,15	Ton
			N ₂ O	0,03	Ton
		Gasoline	CO ₂	50,17	Ton
			CH ₄	0,0033	Ton
			N ₂ O	0,00043	Ton
		Tanah	Partikulat (Ekstraksi)	17,79	Ton
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	<i>Pulvurized Limestone</i>	1.948.862,99	Ton
			<i>Pulvurized Clay</i>	260.692,65	Ton

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
			<i>Pulvurized Silica sand</i>	119.334,11	Ton
			<i>Pulvurized Laterite</i>	13.916,85	Ton

Tabel 3. *Inventory* Penggilingan Awal

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
<i>Raw Mill</i>	<i>Input</i>	Jenis	<i>Pulvurized Limestone</i>	1.948.862,99	Ton
			<i>Pulvurized Clay</i>	260.692,65	Ton
			<i>Pulvurized Silica sand</i>	119.334,11	Ton
			<i>Pulvurized Laterite</i>	13.915,85	Ton
			<i>Alt. Silica Material</i>	12.009,47	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	67.562.546	Kwh
			<i>Solar transport</i>	5,90	Ton
			<i>Gasoline Transport</i>	2,14	Ton
		Pemakaian Air			
			<i>Water Consumption</i>	199.369,5	m ³
	<i>Output</i>	Emisi (Ton)			
		Udara Cerobong	Partikulat	236,99	Ton
			CO ₂ (Indirect)	61.481,91	Ton
		Listrik	SO ₂ (Indirect)	262,81	Ton
			NO _x (Indirect)	91,88	Ton
		<i>Transport</i>			
			CO ₂	18,79	Ton
		Solar	CH ₄	0,001	Ton
			N ₂ O	0,0001	Ton
		<i>Gasoline</i>	CO ₂	6,57	Ton
			N ₂ O	0,000057	Ton
			CH ₄	0,00028	Ton
		Air	Uap air	199.369,5	m ³
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	<i>Raw meal</i>	2.354.815,09	Ton

Tabel 4. *Inventory Coal Mill*

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
<i>Coal Mill</i>	<i>Input</i>	Jenis	Batu Bara	278.807	Ton

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	15.458,330	Kwh
			Solar <i>transport</i>	23,60	Ton
			<i>Gasoline transport</i>	8,56	
		<i>Output</i>			
		Emisi (Ton)			
		Cerobong	Partikulat	1.839,25	Ton
		Listrik	CO ₂ (Indirect Listrik)	14.067,08	Ton
			SO ₂ (Indirect Listrik)	60,13	Ton
			NO _x (Indirect Listrik)	21,02	Ton
		<i>Transport</i>			
		Solar	CO ₂	27,29	Ton
			CH ₄	0,001	Ton
			N ₂ O	0,000	Ton
		<i>Gasoline</i>	CO ₂	72,47	Ton
			CH ₄	0,003	Ton
			N ₂ O	0,001	Ton
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	<i>Pulvurized Coal (Fine Coal)</i>	278.807,02	Ton

Tabel 5. Inventory Kiln and Cooler

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
Kiln & Cooler	<i>Input</i>	Jenis	<i>Raw Meal Consume</i>	2.354.815,09	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	59.460.467	Kwh
			<i>Coal</i>	278.807,02	Ton
			<i>Convert To Heat</i>	7.304.743.924	MJ
			<i>Disel Fuel</i>	399,72	Ton
			<i>Solar transport</i>	23,60	Ton
			<i>Gasoline Transport</i>	8,56	Ton
		<i>Alternative Fuel</i>			
		Jenis	<i>Waste oil</i>	85,57	Ton
			<i>Saw Dust</i>	89,8	Ton
			<i>Palm/coffee</i>	4.196,84	Ton
			<i>High Carbon</i>	722,48	Ton
			<i>Other Biomass AF</i>	47,22	Ton
			<i>Other Biomass Non AF</i>	19,55	Ton
			<i>Infectius Waste</i>	7,84	Ton

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
			<i>Spent Bleaching Earth</i>	43.484,59	Ton
			<i>Paper Carton</i>	83,54	Ton
			<i>Tire/rubber</i>	476,2	Ton
		Pemakaian Air			
			<i>Water Consumption</i>	66.456,5	m ³
Output		Emisi (Ton)			
		Udara Cerobong	Partikulat	31,84	Ton
			Sulfur Dioksida (SO ₂)	1.021,03	Ton
			Nitrogen Oksida (NO ₂)	1.474,38	Ton
			Hidrogen Fluorida (HF)	0,12	Ton
			Hidrogen Klorida (HCL)	44,05	Ton
			Carbon Monoksida (CO)	8.049,24	Ton
			(TOC), sebagai CH ₄	59,04	Ton
			Khromium (Cr)	0,0077	Ton
			Timbal (Pb)	0,022	Ton
			Arsen (As)	0,0027	Ton
			Kadmium (Cd)	0,0032	Ton
			Raksa (Hg)	0,060	Ton
			Thallium (TI)	0,0018	Ton
			Antimony (Sb)	0,0013	Ton
			Cobalt (Co)	0,0018	Ton
			Tembaga (Cu)	0,047	Ton
			Nikel (Ni)	0,15	Ton
			Vanadium (V)	0,0018	Ton
		Udara	CO ₂ (Kalsinasi)	797.512,70	Ton
		Bahan Bakar Fosil Batubara	CO ₂	701.985,89	Ton
			CH ₄	73,04	Ton
			N ₂ O	10,95	Ton
			SO ₂	3.596,61	Ton
			NO _x	1.672,84	Ton
		Bahan Bakar Biomassa	CO ₂	5.416,27	Ton
			CH ₄	0,48	Ton
			N ₂ O	0,064	Ton
		Bahan Bakar Non Biomassa	CO ₂	336,70	Ton
			CH ₄	0,048	Ton
			N ₂ O	0,007	Ton
		Bahan Bakar Foss	CO ₂	4.967,68	Ton

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
		Mix	CH ₄	0,18	Ton
			N ₂ O	0,03	Ton
	Disel Regular Oil	CO ₂	1.273,63	Ton	
		CH ₄	0,052	Ton	
		N ₂ O	0,010	Ton	
		SO ₂	0,19	Ton	
		NO _x	0,30	Ton	
		Listrik	CO ₂ (Indirect)	54.109,02	Ton
			SO ₂ (Indirect)	231,30	Ton
	NO _x (Indirect)		80,86	Ton	
	Transport				
	Solar	CO ₂	75,21	Ton	
		CH ₄	0,003	Ton	
		N ₂ O	0,001	Ton	
	Gasoline	CO ₂	26,59	Ton	
		CH ₄	0,0011	Ton	
		N ₂ O	0,00023	Ton	
	Air	Uap air	66.456,5	m ³	
	Tanah		-		
Produk Yang Dihasilkan					
Jenis		Clinker	1.519.071,81	Ton	

Tabel 6. Finish Mill

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
<i>Finish Mill</i>	<i>Input</i>	Jenis	<i>Clinker -O.P.C</i>	1.519.071,81	Ton
			<i>Limestone</i>	461.825	Ton
			<i>Gypsum Natural</i>	62.896	Ton
			<i>Waste Gypsum</i>	3.387	Ton
			<i>Fly Ash</i>	33.063	Ton
			<i>Material Trass</i>	232.462	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	86.986.260	Kwh
			<i>Solar transport</i>	64,91	Ton
			<i>Gasoline transport</i>	23,55	Ton
		Pemakaian Air			
			<i>Water Consumption</i>	26,82	m ³
	<i>Output</i>	Emisi (Ton)			
		Udara	Partikulat	74,27	Ton
		Listrik	CO ₂ (Indirect)	79.157,49	Ton

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
			SO ₂ (<i>Indirect</i>)	338,37	Ton
			NO _x (<i>Indirect</i>)	118,30	Ton
		<i>Transport</i>			
			CO ₂	206,84	Ton
		Solar	CH ₄	0,0083	Ton
			N ₂ O	0,0016	Ton
		<i>Gasoline</i>			
			CO ₂	73,13	Ton
			CH ₄	0,0032	Ton
			N ₂ O	0,00063	Ton
		Air	Uap air	268.235	m ³
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	Semen PCC	2.312.688	Ton

Tabel 7. *Finish Packer*

Unit Kegiatan	Keterangan	Material	(Bahan Baku)	Total	Satuan
<i>Packer</i>	<i>Input</i>	Jenis	Semen	2.312.688	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	5.405.546	Kwh
	<i>Output</i>	Emisi (Ton)			
			Partikulat Cerobong	6,28	Ton
		Listrik	CO ₂ (<i>Indirect</i>)	4.919.047	Ton
			SO ₂ (<i>Indirect</i>)	21,02	Ton
			NO _x (<i>Indirect</i>)	7,35	Ton
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	Semen PCC	2.312.688	Ton

3.2.1. Analisis *Inventory* Pertambangan

Penambangan dilakukan sebagai langkah awal dalam proses kajian. Pada tahap ini terdapat aktivitas untuk memperoleh bahan baku utama berupa Tambang batu kapur (*Limestone*), Tambang Tanah Liat (*Clay*), Tambang *Laterite*, dan Tambang *Silica*. Analisis *inventory* pertambangan pada PT. XYZ menggunakan *input*/ bahan baku *Ammonium Nitrate* (699.750 Ton), *Limestone* (1.948.862,99 Ton), *Clay* (260.692,65 Ton), *Silica Sand* (119.334,11 Ton), *Laterite* (13.916,85 Ton), *input* penggunaan bahan bakar dan listrik dengan *input* listrik (13.707.149 Kwh), *Solar transport* (1.206,82 Ton), dan *Gasoline transport* 16,34 Ton, *inventory* pertambangan juga menghitung luas bukaan lahan, bukaan *Limestone* (1.320.829 m²), bukaan *Clay* (102.321,86 m²), bukaan *Silica Sand* (45.883,96 m²) dan bukaan *Laterite* (3.545,31 m²).

Output dari analisis pertambangan dibagi menjadi beberapa sumber, sumber cerobong menghasilkan emisi partikulat (2,77 Ton), sumber listrik dihitung sebagai penyumbang emisi secara tidak langsung menghasilkan CO₂ *Indirect* (12.473,50 Ton), SO₂ *Indirect* (53,32 Ton), NO_x *Indirect* (18,64 Ton). Sumber transportasi menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO₂ (3.845,30 Ton), CH₄ (0,15 Ton), N₂O (0,0031 Ton). menggunakan bahan bakar *Gasoline* menghasilkan sumber emisi CO₂ (50,17Ton), CH₄ (0,0033), N₂O (0,000434 Ton). Dan *output* emisi bersumber dari ekstraksi *Material* (17,79 Ton). Produk yang dihasilkan berupa *Pulvurized Limestone* (1.948.862,99 Ton) , *Pulvurized Clay* (260.692,65 Ton), *Pulvurized Silica Sand* (119.334,11 Ton), *Pulvurized Laterite* (13.916,85Ton).

Analisis *Inventory* Penggilingan Awal

Raw Mill merupakan tahapan setelah ekstraksi *Material* dimana pada proses ini terjadi proses dosing antara bahan baku utama dan bahan baku tambahan. Berdasarkan **Tabel 3**. Analisis *inventory* penggilingan awal pada PT. XYZ menggunakan *input*/ bahan baku *Pulvurized Limestone* (1.948.862,99 Ton), *Pulvurized Clay*

(260.692,65 Ton), *Pulvurized Silica Sand* (260.692,65 Ton), *Pulvurized Laterite* (13.915,85 Ton), *Alt. Silica Material* (12.009,47 Ton), *input* penggunaan bahan bakar dan listrik dengan *input* listrik (67.562.546 Kwh), *Solar transport* (5,90 Ton), dan *Gasoline Transport* (2,14 Ton), pada tahap penggilingan awal menggunakan air (199.369,5 m³)

Output dari analisis penggilingan awal dibagi menjadi beberapa sumber, sumber cerobong menghasilkan emisi partikulat (236,99 Ton), sumber listrik dihitung sebagai penyumbang emisi secara tidak langsung menghasilkan CO₂ *Indirect* (61.481,91 Ton), SO₂ *Indirect* (262,81 Ton), NO_x *Indirect* (91,88 Ton). Sumber transportasi menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO₂ (18,79Ton), CH₄ (0,001Ton), N₂O (0,000 Ton). menggunakan bahan bakar *gasoline* menghasilkan sumber emisi CO₂ (6,57 Ton), CH₄ (0,00028 Ton), N₂O (0,000057 Ton), dan *output* penggunaan air berupa uap air (199.369,5 m³). Produk yang dihasilkan berupa *Pulvurized Raw meal* (2.354.815,09 Ton).

3.2.2. Analisis *Inventory* Coal Mill

Coal mill merupakan fasilitas penunjang produksi yang berkaitan dengan pemasok sumber energi ke proses pembakaran kiln secara langsung, Berdasarkan **Tabel 4**. Analisis *inventory coal mill* awal pada PT. XYZ menggunakan *input*/ bahan baku batu bara (278.807 Ton), *input* penggunaan bahan bakar dan listrik dengan *input* listrik (15.458.330 Kwh), *Solar transport* (23,60 Ton), dan *Gasoline Transport* (8,56Ton). *Output* dari analisis *coal mill* dibagi menjadi beberapa sumber, sumber cerobong menghasilkan emisi partikulat (1.839,25 Ton), sumber listrik dihitung sebagai penyumbang emisi secara tidak langsung menghasilkan CO₂ *Indirect* (14.067,08Ton), SO₂ *Indirect* (60,13 Ton), NO_x *Indirect* (21,02 Ton). Sumber transportasi menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO₂ (27,29 Ton), CH₄ (0,0011Ton), N₂O (0,0001 Ton). menggunakan bahan bakar *Gasoline* menghasilkan sumber emisi CO₂ (72,47 Ton), CH₄ (0,003Ton), N₂O (0,001 Ton). Produk yang dihasilkan berupa *Pulvurized Pulvurized Coal*

(278.807,02Ton).

3.2.3. Analisis Inventory Kiln & Cooler

Pada proses *kiln* dan *cooler* terjadi pembentukan klinker dari proses pemanasan dan pendinginan raw meal secara mendadak. Berdasarkan **Tabel 5**. Analisis *Inventory Kiln & Cooler* awal pada PT. XYZ menggunakan *input/* bahan baku *Raw Meal* (2.354.815,09 Ton), *input* penggunaan bahan bakar dan listrik dengan *input* listrik (59.460.467 Kwh), Batu bara (278.807,02 Ton), *Disel fuel* (399,72 Ton) *Solar transport* (23,60 Ton), dan *Gasoline transport* (8,56 Ton), pada tahap *kiln & cooler* menggunakan air (199.369,5 m³). *Input* bahan bakar alternatif *Waste oil* (85,57 Ton), *Saw dust* (89,8 Ton), *Palm* (4.196,84 Ton), *High Carbon* 722,48 Ton), *Other Biomass AF* 47,22 Ton), *Other Biomass Non AF* (19,55 Ton), *infectius Waste* (7,84 Ton), *SBE (Spent Bleaching Earth)* (43.484,59 Ton), *Paper Carton* (83, 54 Ton), *Tire/rubber* (476,2 Ton) dengan penggunaan air (66.456,5 m³).

Output dari analisis *Kiln & cooler* dibagi menjadi beberapa sumber, sumber cerobong menghasilkan emisi partikulat (31,84 Ton), Sulfur Dioksida (SO₂) (1.021,03 Ton), Nitrogen Oksida (NO₂) (1.474,38 Ton) Hidrogen Fluorida (0,12 Ton), Hidrogen Klorida (44,05 Ton), Karbon monoksida (CO) (8.049,24 Ton), karena menggunakan bahan bakar alternatif dan menggunakan pemanasan suhu tinggi pada proses *Kiln & cooler* menghasilkan emisi berupa logam berat berupa Kromium (Cr), Timbal (Pb), Arsen (As), Kadmium (Cd), Raksa (Hg), Talium (TI), Antimon (Sb), Cobalt (Co), Tembaga (Cu), Nikel (Ni), Vanadium (V), Sumber emisi lainnya berupa CO₂ kalsinasi (797.512,70 Ton) sumber listrik dihitung sebagai penyumbang emisi secara tidak langsung menghasilkan CO₂ *Indirect* (61.481,91 Ton), SO₂ *Indirect* (262,81 Ton), NO_x *Indirect* (91,88 Ton). Sumber *transportasi* menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi, sumber lain berupa pembakaran batubara, bahan bakar biomassa, bahan bakar non biomassa, bahan bakar campuran fosil, *diesel regular oil*, listrik, dan *transport* yang menghasilkan emisi CO₂, CH₄, CO₂, N₂O dan beberapa seperti bahan bakar fosil dan batu bara menghasilkan SO₂ dan NO_x, *output* penggunaan

air berupa uap air (66456.5 m³). Produk yang dihasilkan berupa *Klinker* (1.519.071,81Ton).

3.2.4. Analisis Finish Mill

Berdasarkan **Tabel 6**. Analisis *inventory Finish mill* pada PT. XYZ menggunakan *input/* bahan baku klinker -O.P.C (1.519.071,81 Ton), *Limestone* (461.825 Ton), *Gypsum Natural* (62.896,5 Ton), *Waste Gypsum* (3.387 Ton), *Fly Ash* (33.063 Ton), *Material Trass* (232.462 Ton) *input* penggunaan bahan bakar dan listrik dengan *input* listrik (86.986.260 Kwh), *Solar transport* (64,916 Ton), dan *Gasoline Transport* (23,55) Ton, dan penggunaan air (268.235 m³).

Output dari analisis *Finish mill* dibagi menjadi beberapa sumber, sumber cerobong menghasilkan emisi partikulat (74,27 Ton), sumber listrik dihitung sebagai penyumbang emisi secara tidak langsung menghasilkan CO₂ *Indirect* (79.157,49Ton), SO₂ *Indirect* (338,37 Ton), NO_x *Indirect* (118,30 Ton). Sumber *transportasi* menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO₂ (206,84Ton), CH₄ (0,0083 Ton), N₂O (0,00167 Ton). menggunakan bahan bakar *Gasoline* menghasilkan sumber emisi CO₂ (73,13Ton), CH₄ (0,0032), N₂O (0,00063Ton), penggunaan air berupa uap air (268.235 m³) Produk yang dihasilkan berupa Semen PCC (2.312.688 Ton).

3.2.5. Analisis Packer

Berdasarkan **Tabel 7**. Analisis *Packer* pada PT.XYZ menggunakan *input/* bahan baku Semen (2.312.688 Ton), *input* penggunaan bahan bakar dan listrik dengan *input* listrik (5.405.546 Kwh),

Output dari analisis *Packer* dibagi menjadi beberapa sumber, sumber cerobong menghasilkan emisi partikulat (6,28 Ton), sumber listrik dihitung sebagai penyumbang emisi secara tidak langsung menghasilkan CO₂ *Indirect* (4.919,04 Ton), SO₂ *Indirect* (21,02Ton), NO_x *Indirect* (7,35Ton) Produk yang dihasilkan berupa Semen PCC (2.312.688 Ton).

3.3. Penilaian Dampak Daur Hidup

Faktor karakterisasi menunjukkan besarnya dampak lingkungan per unit proses yang berasal

dari besarnya sumber daya yang digunakan atau emisi yang dihasilkan (Khalizah et al., 2019). Karakterisasi merupakan penilaian besarnya substansi yang dapat berkontribusi pada kategori dampak, di dalam produksi berdasarkan faktor karakterisasinya (Handayani,2022).

Tabel 8. Hasil Karakterisasi

Impact Category	Reference unit	Characterization
<i>Abiotic depletion</i>	Kg Sb eq	6.355.E+00
<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	MJ	4.300.E+08
<i>Acidification</i>	Kg SO ₂ eq	8.445.E+06
<i>Eutrophication</i>	Kg PO ₄ eq	4.561.E+05
<i>Fresh water aquatic ecotoxicity</i>	Kg 1,4-DB eq	1.310.E+05
<i>Global warming potential (GWP100)</i>	Kg CO ₂ eq	1.749.E+09
<i>Human toxicity</i>	Kg 1,4-DB eq	1.260.E+07
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	Kg 1,4-DB eq	5.971.E+09
<i>Ozon layer depletion (ODP)</i>	Kg CFC-11 eq	0.00.E+00
<i>Photochemical oxidation</i>	Kg C ₂ H ₄ eq	3.665.E+05
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	Kg 1,4-DB eq	1.745.E+06

Faktor karakterisasi menunjukkan besarnya dampak lingkungan per unit proses yang berasal dari besarnya sumber daya yang digunakan atau emisi yang dihasilkan. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan bahwa dampak terbesar yang dihasilkan oleh industri semen berupa *Global Warming Potential* (GWP).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil penelitian yang dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa kategori dampak yang ditimbulkan di PT. XYZ beserta besaran nilai kategori dampak adalah *Global Warming Potential* (1.75 E+09 kg CO₂ eq.), *Marine aquatic ecotoxicity* (5.97 E+09 kg 1,4-DB eq.), *Ozon layer depletion* (0.00.E+00 Kg CFC-11 eq), *Human toxicity* (1.26 E+07 kg 1,4-DB eq.), *Photochemical oxidation* (3.66 E+05 kg 1,4-DB eq), *Acidification Potential* (8.44 E+06

kg SO₂ eq), *Fresh water aquatic ecotoxicity* (1.31 E+05 kg 1,4-DB eq.), *Abiotic depletion* (6.35 E+00 kg Sb eq), *Abiotic depletion (fossil fuels)* (4.30 E+08 MJ). Dampak terbesar (*hotspot*) dari analisis dampak produksi semen berdasarkan hasil karakterisasi adalah *Global Warming Potential* (GWP100) dan Unit proses sebagai tempat (*hotspot*) berlokasi di unit *Kiln & cooler*.

DAFTAR PUSTAKA

- Devia, D., Lestari, P., & Sembiring, E. (2017). Life Cycle Assessment (Lca) Produk Semen Portland Komposit (Studi Kasus: Pt X). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 23(2), 1–10. <https://doi.org/10.5614/j.tl.2017.23.2.1>
- Fitriyanti, R., & Fatimura, M. (2019). *Aplikasi Produksi Bersih Pada Industri Logam-Kuningan.pdf*. 3, 10–15.
- Handayani,Citra. (2022). Kajian Dampak Lingkungan Industri Semen Menggunakan *Life Cycle Assessment* Sesuai Kriteria Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER).*Skripsi*.Universitas Brawijaya. Malang.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 1 tahun 2021. *Kementrian LHK RI*, 312.
- Khalizah, A. N., Apriani, M., & Afiuddin, A. E. (2019). 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*, 2623, 137–142.
- Lolo, E. U., Gunawan, R. I., Krismani, A. Y., & Pambudi, Y. S. (2021). Penilaian Dampak Lingkungan Industri Tahu Menggunakan Life Cycle Assessment (Studi Kasus: Pabrik Tahu Sari Murni Kampung Krajan, Surakarta). *Jurnal Serambi Engineering*, 6(4), 2337–2347. <https://doi.org/10.32672/jse.v6i4.3480>
- Monteiro, N. B. R., Moita Neto, J. M., & da Silva,

E. A. (2021). Environmental assessment in concrete industries. *Journal of Cleaner Production*, 327(July).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129516>

Purnawan, I., & Prabowo, A. (2018). Pengaruh Penambahan Limestone terhadap Kuat Tekan Semen Portland Komposit. *Jurnal Rekayasa Proses*, 11(2), 86.
<https://doi.org/10.22146/jrekpros.31136>