Journal Purifikasi
DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i1.499

RESEARCH ARTICLE / REVIEW ARTICLE

OPEN ACCESS

Check for updates

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

Article history
Received
26 July 2025
Received in revised form
27 July 2025
Accepted
27July 2025
Published online
29 July 2025

Muhammad Abrar Firdausy[1)], Muhammad Syufian Syauri, Novan D. Natanegara[3)]

[1,2)] Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat Jl. A. Yani Km. 36 Banjarbaru Kalimantan Selatan 70714 Indonesia, [3)] PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk. Kabupaten Kotabaru, Kecamatan Kelumpang Hilir Desa Tarjun, 72161 Indonesia

*Corresponding author
abrar.firdausy@ulm.ac.id

Graphical abstract

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
Mining	*Input*	Jenis	*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
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	13.707.149	Kwh
			Solar transport	1.206,82	Ton
			Gasoline Transport	16,34	Ton
		Bukaan Lahan			
			Limestone	1.320.829,83	m^2
			Clay	102321.86	m^2
			Silica sand	45.883,96	m^2
			Laterite	3.545,31	m^2
	Output	Emisi (Ton)			
		Cerobong	Partikulat	2,779	Ton
		Listrik	CO_2 (*Indirect*)	12.473,50	Ton
			SO_2 (*Indirect*)	53,320	Ton
			NO_x (*Indirect*)	18,641	Ton
		Transportrasi			
		Solar	CO_2	3.845,30	Ton
			CH_4	0,15	Ton
			N_2O	0,03	Ton
		Gasoline	CO_2	50,17	Ton
			CH_4	0,0033	Ton
			N_2O	0,00043	Ton
		Tanah	Partikulat (Ekstraksi)	17,79	Ton
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	*Pulvurized Limestone*	1.948.862,99	Ton
			Pulvurized Clay	260.692,65	Ton
			Pulvurized Silica sand	119.334,11	Ton
			Pulvurized Laterite	13.916,85	Ton

ABSTRACT

Industri semen merupakan salah satu industri dengan konsumsi energi dan emisi CO_2 yang tinggi, sehingga diperlukan upaya pengurangan dampak lingkungan sesuai persyaratan PROPER. Penelitian ini bertujuan menganalisis kategori dampak lingkungan dan mengidentifikasi unit proses yang memberikan kontribusi dampak terbesar pada industri semen menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan pendekatan *cradle to gate* dan metode penilaian CML *Baseline*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensi dampak lingkungan meliputi *Global Warming Potential* sebesar $1{,}75 \times 10^9$ kg CO_2 eq., *Marine Aquatic Ecotoxicity* sebesar $5{,}97 \times 10^9$ kg 1,4-DB eq., *Human Toxicity* sebesar $1{,}26 \times 10^7$ kg 1,4-DB eq., *Acidification Potential* sebesar $8{,}44 \times 10^6$ kg SO_2 eq., serta *Abiotic Depletion (Fossil Fuels)* sebesar $4{,}30 \times 10^8$ MJ. Berdasarkan analisis total produksi semen selama satu tahun, unit *Kiln & Cooler* teridentifikasi sebagai penyumbang dampak lingkungan terbesar (*hotspot*), sehingga menjadi prioritas dalam upaya peningkatan kinerja lingkungan industri semen.

Keywords: Industri Semen, *CML baseline, Cradle to gate, Life cycle assessment*

Copyright ©2026 Institut Teknologi Sepuluh Nopember, All rights reserved

Corresponding Author:
Muhammad Abrar Firdausy

abrar.firdausy@ulm.ac.id

Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Planning and Geo Engineering Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

1. INTRODUCTION

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 pertambahan (Fitriyanti & Fatimura, 2019).

Industri semen merupakan industri yang membutuhkan konsumsi energi yang tinggi dan menghasilkan emisi yang tinggi. Produksi semen menyumbangkan sekitar 4% emisi CO_2 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. MATERIALS AND METHODS

Penelitian ini menggunakan analisis berdasarkan *Framework* LCA sesuai pendoman ISO 14040, 2006; Alur analisis pertama menentuan 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. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Tujuan dan Batasan

Ruang lingkup penelitian ini adalah cradle to gate yang diawali dari ektraksi 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 (*Portland Composit Cement*)	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	*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
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	13.707.149	Kwh
			Solar transport	1.206,82	Ton
			Gasoline Transport	16,34	Ton
		Bukaan Lahan			
			Limestone	1.320.829,83	m^2
			Clay	102321.86	m^2
			Silica sand	45.883,96	m^2
			Laterite	3.545,31	m^2
	Output	Emisi (Ton)			
		Cerobong	Partikulat	2,779	Ton
		Listrik	CO_2 (*Indirect*)	12.473,50	Ton
			SO_2 (*Indirect*)	53,320	Ton
			NO_x (*Indirect*)	18,641	Ton
		*Transport*rasi			
		Solar	CO_2	3.845,30	Ton
			CH_4	0,15	Ton
			N_2O	0,03	Ton
		Gasoline	CO_2	50,17	Ton
			CH_4	0,0033	Ton
			N_2O	0,00043	Ton
		Tanah	Partikulat (Ekstraksi)	17,79	Ton
			Produk Yang Dihasilkan		
		Jenis	*Pulvurized Limestone*	1.948.862,99	Ton
			Pulvurized Clay	260.692,65	Ton
			Pulvurized Silica sand	119.334,11	Ton
			Pulvurized Laterite	13.916,85	Ton

Tabel 3. *Inventory* Penggilingan Awal

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
Raw Mill	*Input*	Jenis	*Pulvurized Limestone*	1.948.862,99	Ton
			Pulvurized Clay	260.692,65	Ton
			Pulvurized Silica sand	119.334,11	Ton
			Pulvurized Laterite	13.915,85	Ton
			Alt. Silica Material	12.009,47	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	67.562.546	Kwh
			Solar transport	5,90	Ton
			Gasoline Transport	2,14	Ton
		Pemakaian Air			
			Water Consumption	199.369,5	m^3
	Output	Emisi (Ton)			
		Udara Cerobong	Partikulat	236,99	Ton
		Listrik	CO_2 (Indirect)	61.481,91	Ton
			SO_2 (Indirect)	262,81	Ton
			NOx (Indirect)	91,88	Ton
		Transport			
		Solar	CO_2	18,79	Ton
			CH_4	0,001	Ton
			N_2O	0,0001	Ton
		Gasoline	CO_2	6,57	Ton
			N_2O	0,000057	Ton
			CH_4	0,00028	Ton
		Air	Uap air	199.369,5	m^3
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	*Raw meal*	2.354.815,09	Ton

Tabel 4. *Inventory Coal Mill*

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
Coal Mill	*Input*	Jenis	Batu Bara	278.807	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	15.458.330	Kwh
			Solar *transport*	23,60	Ton
			Gasoline transport	8,56	

This journal is © Marsono, et al. 2026

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
	Output	Emisi (Ton)			
		Cerobong	Partikulat	1.839,25	Ton
		Listrik	CO_2 (Indirect Listrik)	14.067,08	Ton
			SO_2 (Indirect Listrik)	60,13	Ton
			NOx (Indirect Listrik)	21,02	Ton
		Transport			
		Solar	CO_2	27,29	Ton
			CH_4	0,001	Ton
			N_2O	0,000	Ton
		Gasoline	CO_2	72,47	Ton
			CH_4	0,003	Ton
			N_2O	0,001	Ton
		Produk Yang Dihasilkan			
		Jenis	*Pulvurized Coal (Fine Coal)*	278.807,02	Ton

Tabel 5. *Inventory Kiln and Cooler*

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
Kiln & Cooler	*Input*	Jenis	*Raw Meal Consume*	2.354.815,09	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	59.460.467	Kwh
			Coal	278.807,02	Ton
			Convert To Heat	7.304.743.924	MJ
			Disel Fuel	399,72	Ton
			Solar transport	23,60	Ton
			Gasoline Transport	8,56	Ton
		Alternative Fuel			
		Jenis	*Waste oil*	85,57	Ton
			Saw Dust	89,8	Ton
			Palm/coffee	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
			Spent Bleaching Earth	43.484,59	Ton
			Paper Carton	83,54	Ton
			Tire/rubber	476,2	Ton
		Pemakaian Air			
			Water Consumption	66.456,5	m^3

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
	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_2O	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_2O	0,064	Ton
		Bahan Bakar Non Biomassa	CO_2	336,70	Ton
			CH_4	0,048	Ton
			N_2O	0,007	Ton
		Bahan Bakar *Foss Mix*	CO_2	4.967,68	Ton
			CH_4	0,18	Ton
			N_2O	0,03	Ton
		Disel Regular Oil	CO_2	1.273,63	Ton
			CH_4	0,052	Ton
			N_2O	0,010	Ton
			SO_2	0,19	Ton
			NO_x	0,30	Ton

This journal is © Marsono, et al. 2026

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
		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_2O	0,001	Ton
		Gasoline	CO_2	26,59	Ton
			CH_4	0,0011	Ton
			N_2O	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
Finish Mill	*Input*	Jenis	*Clinker -O.P.C*	1.519.071,81	Ton
			Limestone	461.825	Ton
			Gypsum Natural	62.896	Ton
			Waste Gypsum	3.387	Ton
			Fly Ash	33.063	Ton
			Material Trass	232.462	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	86.986.260	Kwh
			Solar *transport*	64,91	Ton
			Gasoline transport	23,55	Ton
		Pemakaian Air			
			Water Consumption	26,82	m^3
	Output	Emisi (Ton)			
		Udara	Partikulat	74,27	Ton
		Listrik	CO_2 (*Indirect*)	79.157,49	Ton
			SO_2 (*Indirect*)	338,37	Ton
			NO_x (*Indirect*)	118,30	Ton
		Transport			
		Solar	CO_2	206,84	Ton
			CH_4	0,0083	Ton
			N_2O	0,0016	Ton
		Gasoline	CO_2	73,13	Ton

Unit Kegiatan	Keterangan	*Material*	(Bahan Baku)	Total	Satuan
			CH_4	0,0032	Ton
			N_2O	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
Packer	*Input*	Jenis	Semen	2.312.688	Ton
		Pemakaian Bahan Bakar/ Listrik			
		Jenis	Listrik	5.405.546	Kwh
	Output	Emisi (Ton)			
		Listrik	Partikulat Cerobong	6,28	Ton
			CO_2 (*Indirect*)	4.919.047	Ton
			SO_2 (*Indirect*)	21,02	Ton
			NO_x (*Indirect*)	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 mengunakan *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* pengguanaan 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 m^2), bukaan *Clay* (102.321,86 m^2), bukaan *Silica Sand* (45.883,96 m^2) dan bukaan *Laterite* (3.545,31 m^2). *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 CO_2 *Indirect* (12.473,50 Ton), SO_2 *Indirect* (53,32 Ton), NO_x *Indirect* (18,64 Ton). Sumber *transport*asi menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO_2 (3.845,30 Ton), CH_4 (0,15 Ton), N_2O (0,0031 Ton). menggunakan bahan bakar *Gasoline* menghasilkan sumber emisi CO_2 (50,17Ton), CH_4 (0,0033), N_2O (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 ekstrasi *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 mengunakan *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* pengguanaan 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 m^3). *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 CO_2 *Indirect* (61.481,91 Ton), SO_2 *Indirect* (262,81 Ton), NO_x *Indirect* (91,88 Ton). Sumber *transport*asi menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO_2 (18,79Ton), CH_4 (0,001Ton), N_2O (0,000 Ton). menggunakan bahan bakar *gasoline* menghasilkan sumber emisi CO_2 (6,57 Ton), CH_4 (0,00028 Ton), N_2O (0,000057 Ton), dan *output* penggunaan air berupa uap air (199.369,5 m^3). 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 mengunakan *input*/ bahan baku batu bara (278.807 Ton), *input* pengguanaan 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 CO_2 *Indirect* (14.067,08Ton), SO_2 *Indirect* (60,13 Ton), NO_x *Indirect* (21,02 Ton). Sumber *transport*asi menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO_2 (27,29 Ton), CH_4 (0,0011Ton), N_2O (0,0001 Ton). menggunakan bahan bakar *Gasoline* menghasilkan sumber emisi CO_2 (72,47 Ton), CH_4 (0,003Ton), N_2O (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 mengunakan *input*/ bahan baku *Raw Meal* (2.354.815,09 Ton), *input* pengguanaan 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 m^3). *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 Bleacing Earth*) (43.484,59 Ton), *Paper Carton* (83, 54 Ton), *Tire/rubber* (476,2 Ton) dengan penggunaan air (66.456,5 m^3). *Output* dari analisis *Kiln & cooler* dibagi menjadi beberapa sumber, sumber cerobong menghasilkan emisi partikulat (31,84 Ton), Sulfur Dioksida (SO_2) (1.021,03 Ton), Nitrogen Oksida (NO_2) (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 CO_2 kalsinasi (797.512,70 Ton) sumber listrik dihitung sebagai penyumbang emisi secara tidak langsung menghasilkan CO_2 *Indirect* (61.481,91 Ton), SO_2 *Indirect* (262,81 Ton), NO_x *Indirect* (91,88 Ton). Sumber *transport*asi 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 CO_2, CH_4, CO_2 ,N_2O dan beberapa seperti bahan bakar fosil dan batu bara menghasilkan SO_2 dan NO_x, *output* penggunaan air berupa uap air (66456.5 m^3). 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 mengunakan *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* pengguanaan 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 m^3). *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 CO_2 *Indirect* (79.157,49Ton), SO_2 *Indirect* (338,37 Ton), NO_x *Indirect* (118,30 Ton). Sumber *transport*asi menggunakan bahan bakar solar menghasilkan sumber emisi CO_2 (206,84Ton), CH_4 (0,0083 Ton), N_2O (0,00167 Ton). menggunakan bahan bakar *Gasoline* menghasilkan sumber emisi CO_2 (73,13Ton), CH_4 (0,0032), N_2O (0,00063Ton), penggunaan air berupa uap air (268.235 m^3) Produk yang dihasilkan berupa Semen PCC (2.312.688 Ton).

3.2.5 Analisis Packer

Berdasarkan **Tabel 7.** Analisis *Packer* pada PT.XYZ mengunakan *input*/ bahan baku Semen (2.312.688 Ton), *input* pengguanaan 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 CO_2 *Indirect* (4.919,04 Ton), SO_2 *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
Abiotic depletion	Kg Sb eq	6.355.E+00
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	4.300.E+08
Acidification	Kg SO_2 eq	8.445.E+06
Eutrophication	Kg PO_4 eq	4.561.E+05
Fresh water aquatic ecotoxicity	Kg 1,4-DB eq	1.310.E+05
Global warming potential (GWP100)	Kg CO_2 eq	1.749.E+09

.

Impact Category	Reference unit	Characterization
Human toxicity	Kg 1,4-DB eq	1.260.E+07
Marine aquatic ecotoxicity	Kg 1,4-DB eq	5.971.E+09
Ozon layer depletion (ODP)	Kg CFC-11 eq	0.00.E+00
Photochemical oxidation	Kg C_2H_4 eq	3.665.E+05
Terrestrial ecotoxicity	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. Berdasalkan hasil penelitian didapatkan bahwa dampak terbesar yang dihasilkan oleh industri semen berupa *Global Warming Potential* (GWP).

4. CONCLUSION

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 CO_2 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 SO_2 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.*

REFERENCES

Devia, D., Lestari, P., & Sembiring, E. (2017). Life Cycle Assessment (Lca) Produk Semen Portland Komposit (Studi Kasus: Pt X). *Jurnal Tehnik 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 Perusahaann Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER).*Skripsi.*Universitas Brawijaya. Malang.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Peraturan Mentri 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

.