Journal of Manufacturing in Industrial Engineering and Technology (MINE-TECH)
Vol.5, No.2, Desember 2026, E-ISSN : 2985-3516
DOI : 10.30651/mine-tech.v5i2.32287

Analisis Dampak Lingkungan Produksi Semen Tipe V dengan *Life Cycle Assessment* dan *Analytical Hierarchy Process*

Angelia Lady Soekarnoizmy[1*], Hastawati Chrisna Suroso[2]
Departemen Teknik Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[1,2]
Departement of Industrial Engineering, Adhi Tama Institute of Technology Surabaya [3]
Angelialady03@gmail.com[1] chrisna.suroso@itats.ac.id[2]

Informasi Artikel

Riwayat Artikel:

Disubmit Juni 11, 2026
Diterima Agustus 23, 2026
Diterbitkan November 24, 2026

Kata Kunci:

Semen Tipe V
Life Cycle Assessment
Analytical Hierarchy Process
Dampak Lingkungan

ABSTRAK

Produksi Semen Tipe V memerlukan proporsi klinker yang lebih tinggi dibandingkan semen PCC sehingga berpotensi menghasilkan dampak lingkungan yang lebih besar. Penelitian ini bertujuan menganalisis besaran dampak lingkungan proses produksi Semen Tipe V menggunakan Life Cycle Assessment (LCA) dengan batasan sistem cradle to gate dan unit fungsi 1 ton Semen Tipe V, serta menentukan prioritas penanganan dampak melalui Analytical Hierarchy Process (AHP). Penilaian dampak dilakukan menggunakan metode CML-IA Baseline, ReCiPe 2016 Midpoint (H), serta Cumulative Energy Demand (CED). Selanjutnya, AHP digunakan untuk menentukan prioritas penanganan dampak berdasarkan hasil normalisasi LCA. Hasil LCA menunjukkan bahwa tahap klinkerisasi merupakan hotspot utama dengan kontribusi terhadap Global Warming Potential sebesar 744,31 kg CO_2-eq/ton semen (83,3%), Abiotic Depletion (Fossil Fuel) sebesar 46.696,21 MJ/ton semen (97%). Hasil normalisasi menunjukkan bahwa Abiotic Depletion (Fossil Fuel) memiliki signifikansi tertinggi pada metode CML-IA, sedangkan Human Carcinogenic Toxicity menjadi kategori dominan pada ReCiPe 2016. Hasil AHP menempatkan Global Warming Potential sebagai prioritas utama (21,98%). Berdasarkan integrasi hasil LCA dan AHP, strategi mitigasi difokuskan pada tahap klinkerisasi sebagai hotspot utama melalui peningkatan Thermal Substitution Rate, perluasan biomonitoring logam berat, serta penetapan target internal emisi NOx dan SO_2 untuk mendukung pengurangan dampak prioritas dan pengambilan keputusan menuju produksi semen yang lebih berkelanjutan

© This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

***Penulis Korespondensi:**

Angelia Lady Soekarnoizmy
Departement of Industrial Engineering
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
Jl. Arief Rachman Hakim No.100, Kecamatan Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur
Email : Angelialady03@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Industri semen merupakan salah satu sektor strategis yang mendukung pembangunan infrastruktur. Sektor manufaktur memberikan kontribusi penting terhadap perekonomian nasional [1] sekaligus menjadi salah satu penyumbang emisi industri yang signifikan [2]. Di antara berbagai

subsektor manufaktur, industri semen termasuk yang memiliki intensitas penggunaan energi dan emisi karbon tertinggi, dengan kontribusi sekitar 7–9% terhadap emisi karbon dioksida (CO_2) antropogenik global dan menempatkannya sebagai penyumbang emisi industri terbesar kedua setelah sektor besi dan baja [3]. Sebagian besar emisi tersebut berasal dari proses produksi clinker, terutama akibat dekarbonasi batu kapur ($CaCO_3$) menjadi kalsium oksida (CaO) serta pembakaran bahan bakar pada kiln bersuhu tinggi. Selain menghasilkan emisi gas rumah kaca, proses produksi semen turut berkontribusi terhadap berbagai dampak lingkungan lain, seperti pengasaman (*acidification*) [4], eutrofikasi (*eutrophication*), toksisitas terhadap manusia, serta konsumsi sumber daya dan energi fosil. Oleh karena itu, evaluasi dampak lingkungan pada subsektor industri semen menjadi semakin penting untuk mendukung upaya dekarbonisasi sektor industri.

Saat ini di Indonesia industri semen sedang menghadapi kondisi kelebihan kapasitas (*oversupply*) yang mendorong perusahaan untuk meningkatkan daya saing melalui diversifikasi produk, salah satunya dengan memproduksi Semen Tipe V untuk memenuhi permintaan pasar ekspor. Semen Tipe V merupakan jenis semen dengan ketahanan sulfat tinggi, biasanya digunakan pada lingkungan agresif seperti kawasan pesisir dan konstruksi kelautan. Karakteristik utama Semen Tipe V adalah proporsi clinker yang lebih tinggi dibandingkan *Portland Composite Cement* (PCC)[5]. Kondisi ini meningkatkan kebutuhan energi dan bahan bakar selama proses produksi sehingga berpotensi menghasilkan dampak lingkungan yang lebih besar.

Life Cycle Assessment (LCA) telah banyak digunakan sebagai metode untuk mengevaluasi dampak lingkungan produk sepanjang daur hidupnya. Penelitian terdahulu, baik pada konteks global maupun nasional, secara konsisten menunjukkan bahwa tahap klinkerisasi merupakan *hotspot* utama dalam produksi semen, dengan kontribusi terhadap kategori dampak seperti *Global Warming Potential*, *Acidification*, dan *Abiotic Depletion* yang berkisar antara 70-90% bergantung pada campuran bahan bakar dan teknologi *kiln* yang digunakan [6], [7]. Penelitian pada industri semen di Indonesia oleh [8] dan [9] menunjukkan kecenderungan yang sama. Namun, kedua penelitian tersebut hanya menggunakan metode CML-IA *Baseline* sehingga evaluasi terbatas pada kategori midpoint tertentu. Sebaliknya studi [10] menunjukkan bahwa metode ReCiPe 2016 mampu menghasilkan prioritas kategori dampak yang berbeda dibanding CML-IA. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan lebih dari satu metode LCIA diperlukan agar evaluasi dampak lingkungan menjadi lebih komprehensif. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada semen Portland konvensional dan umumnya berhenti pada tahap kuantifikasi dampak lingkungan tanpa dilanjutkan ke tahap penentuan prioritas penanganan. Tinjauan bibliometrik turut menunjukkan bahwa penelitian LCA pada industri semen berkembang pesat secara global, tetapi kajian yang secara spesifik mengevaluasi produk semen dengan kandungan klinker tinggi seperti Semen Tipe V, khususnya dalam konteks industri semen di Indonesia, masih sangat terbatas [11],[12]

Perbedaan komposisi bahan baku, teknologi proses, jenis bahan bakar, serta karakteristik operasional antar pabrik menyebabkan hasil penelitian dari negara lain tidak dapat langsung digeneralisasi pada kondisi Indonesia. Hal tersebut menjadi dasar penelitian ini, yaitu belum tersedianya kajian LCA yang secara spesifik mengevaluasi produk Semen Tipe V yang memiliki kandungan klinker tinggi di Indonesia dengan batasan sistem *cradle-to-gate* dan kombinasi metode penilaian dampak. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berhenti pada tahap kuantifikasi dampak, penelitian ini melanjutkan hasil LCA ke tahap penentuan prioritas penanganan dampak. Untuk itu diperlukan metode pengambilan keputusan multikriteria yang mampu mengakomodasi penilaian para ahli. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk tujuan tersebut adalah *Analytical Hierarchy Process* (AHP), yaitu metode pengambilan keputusan multikriteria yang menyusun permasalahan ke dalam struktur hierarki dan menentukan tingkat kepentingan setiap kriteria melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*), sehingga menghasilkan urutan prioritas yang logis dan konsisten [13]. AHP banyak digunakan karena mampu membantu pengambilan keputusan pada permasalahan kompleks yang melibatkan berbagai kriteria dan pertimbangan ahli. Penelitian ini mengintegrasikan *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan AHP: LCA digunakan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi dampak lingkungan pada batasan sistem

cradle-to-gate, sedangkan AHP digunakan untuk menentukan prioritas pengelolaan berdasarkan hasil normalisasi LCA melalui penilaian pakar. Pendekatan multi-kriteria semacam ini telah diterapkan pada sektor industri lain, seperti industri tahu [13]. Pada industri semen sendiri, integrasi LCA dengan metode *multicriteria decision-making* lain seperti TOPSIS dan EDAS telah digunakan untuk membandingkan jenis material semen dari sisi dampak lingkungan [14], namun penerapan AHP secara khusus untuk menentukan prioritas penanganan kategori dampak pada satu jenis produk seperti Semen Tipe V belum pernah dilakukan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis dampak lingkungan proses produksi Semen Tipe V menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengidentifikasi hotspot lingkungan, serta menentukan prioritas penanganan dampak menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) sebagai dasar perumusan strategi mitigasi. Bagi pengembangan ilmu pengetahuan, penelitian ini memperluas penerapan integrasi LCA dan AHP pada evaluasi lingkungan industri semen, khususnya untuk produk berkandungan clinker tinggi yang masih terbatas dikaji di Indonesia. Sementara itu, bagi perusahaan, hasil penelitian memberikan dasar untuk menetapkan prioritas pengelolaan lingkungan dan menyusun strategi mitigasi yang lebih terarah berdasarkan tahapan proses dan kategori dampak yang paling signifikan.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menganalisis dampak lingkungan produksi Semen Tipe V. Batasan sistem yang digunakan adalah *cradle-to-gate*. Penilaian dampak dilakukan menggunakan metode CML-IA *Baseline*, ReCiPe 2016 *Midpoint* (H), serta *Cumulative Energy Demand* (CED) menggunakan perangkat lunak SimaPro [15] dengan memperhatikan standar SNI ISO 14040:2016 tentang Prinsip dan Kerangka Kerja Life Cycle Assessment, SNI ISO 14044:2017 tentang Persyaratan dan Pedoman Life Cycle Assessment[16], [17] serta *Product Category Rules* (PCR) [18] untuk produk semen di Indonesia. Selanjutnya, *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan *software Expert Choice* digunakan untuk menentukan prioritas kategori dampak lingkungan.

2.1. Identifikasi Sistem dan Ruang Lingkup

Tahap ini bertujuan untuk menentukan batasan sistem dan ruang lingkup analisis yang akan dilakukan. Sistem yang dikaji mencakup seluruh tahapan produksi Semen Tipe V mulai dari proses ekstraksi bahan baku (*cradle)* sampai dengan produk siap untuk dipasarkan (*gate)* dengan unit fungsi 1 ton semen Tipe V. Data diperoleh dari tiga departemen utama perusahaan, yaitu *Quarry*, Produksi (mencakup *Raw Mill*, *Kiln*, serta *Finish Mill* & *Dispatch*), dan Technical, yang masing-masing berperan dalam penyediaan informasi terkait proses produksi dan aspek lingkungan.

Pendekatan ini digunakan untuk memastikan bahwa seluruh aliran material, energi, dan emisi yang relevan dalam sistem produksi dapat dianalisis secara komprehensif sebagai dasar dalam penyusunan *Life Cycle Inventory* (LCI).

2.2. Pengumpulan Data *(Life Cycle Inventory)*

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan sekunder yang dikumpulkan untuk periode produksi Januari 2024-Desember 2025. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan penelusuran dokumen internal perusahaan, meliputi konsumsi bahan baku, energi, bahan bakar, air, serta data emisi dan limbah pada setiap tahapan proses produksi. Data sekunder diperoleh dari *database* ecoinvent 3 pada perangkat lunak SimaPro yang telah mengintegrasikan berbagai metode *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) termasuk CML-IA dan ReCiPe 2016 secara konsisten dengan versi database yang digunakan[19], dokumen lingkungan (RKL/RPL), standar teknis, serta faktor emisi IPCC/KLHK, yang digunakan untuk melengkapi data proses yang tidak tersedia secara primer, seperti emisi hulu dari penyediaan bahan bakar dan listrik.

Keandalan data inventori diperiksa melalui penyusunan *checklist* ketersediaan data, yang mencakup identifikasi keberadaan data (lengkap, tidak lengkap, atau tidak tersedia) serta penelusuran

sumber data. Dari total 42 jenis data inventori yang digunakan, sebanyak 71,42% (30 jenis) merupakan data primer yang bersumber dari laporan produksi perusahaan periode 2024-2025, sedangkan 28,57% (12 jenis) merupakan data sekunder yang bersumber dari *database* ecoinvent 3.

Kualitas data selanjutnya dievaluasi berdasarkan lima aspek yang mengacu pada *pedigree matrix* dalam *database* ecoinvent dan pedoman ILCD [20], yaitu cakupan teknologi, cakupan geografis, cakupan waktu, kelengkapan, serta presisi dan konsistensi data. Pemeriksaan cakupan waktu menunjukkan bahwa seluruh data pada setiap unit proses (*quarry*, *raw mill*, *coal mill and kiln*, serta *finish mill and dispatch*) berasal dari periode yang sama, yaitu Januari 2024-Desember 2025, dengan umur data satu tahun terhadap tahun kajian (2026), sehingga diperoleh nilai cakupan waktu (TiR) = 1. Pemeriksaan cakupan geografis dan teknologi menunjukkan bahwa seluruh data berasal dari lokasi dan teknologi proses yang sesuai dengan sistem yang dikaji, yaitu Pabrik Tuban, Jawa Timur, sehingga diperoleh nilai cakupan geografis (GR) = 1 dan cakupan teknologi (Ter) = 1. Parameter kelengkapan (C) dan presisi (P) dihitung berdasarkan proporsi serta tingkat verifikasi data primer dan sekunder, dengan hasil masing-masing sebesar 1,57 dan 1,07, sedangkan parameter konsistensi (M) diperoleh nilai 1 karena seluruh data disusun dengan pendekatan metodologis yang seragam pada seluruh aliran material, energi, air, dan emisi. Selanjutnya, kualitas data dikuantifikasi menggunakan *Data Quality Rating* (DQR), yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$DQR = \frac{\text{Ter+GR+TiR+C+P+M+Xw}*4}{\text{i+4}} \quad (1)$$

Dimana Ter merupakan cakupan teknologi, GR menunjukkan cakupan geografis, dan TiR menggambarkan cakupan waktu. Parameter C menyatakan kelengkapan data (*completeness*), P menunjukkan tingkat presisi (*precision*), dan M mencerminkan konsistensi (*consistency*). Selanjutnya, Xw merupakan *weakest quality level*, yaitu nilai tertinggi dari seluruh parameter yang menunjukkan tingkat kualitas terendah dari data yang digunakan. Sementara itu, i adalah jumlah parameter kualitas yang digunakan dalam perhitungan DQR, yang dalam penelitian ini berjumlah enam parameter (Ter, GR, TiR, C, P, M).

Berdasarkan *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) [20], hasil dari perhitungan DQR akan menunjukkan kualitas data sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Indikator Kualitas Data berdasarkan ILCD

DQR	***Data Quality Level***
≤ 1.6	*High Quality*
>1.6 - ≤ 3	*Basic Quality*
≥3	*Data Estimate*

Nilai DQR yang lebih rendah menunjukkan kualitas data yang lebih baik. Berdasarkan nilai parameter yang diperoleh (Ter = GR = TiR = M = 1; C = 1,57; P = 1,07; Xw = 1,57), hasil perhitungan DQR pada penelitian ini adalah 1,292, yang menurut Tabel 1 termasuk kategori *high quality*. Nilai ini menunjukkan bahwa inventori kajian LCA mayoritas menggunakan data primer, sehingga hasil dampak dan kajian LCA dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara akurat dan dapat dilanjutkan ke tahap pengolahan data.

Selain data inventori, penelitian ini turut mengumpulkan data penilaian pakar untuk kebutuhan pengolahan AHP melalui penyebaran kuesioner perbandingan berpasangan. Responden dipilih berdasarkan kompetensi, pengalaman, dan keterlibatan langsung terhadap objek penelitian, terdiri atas tujuh orang, yaitu empat responden dari penanggung jawab lingkungan yang memiliki kompetensi dalam pengelolaan lingkungan perusahaan dan pemahaman terhadap regulasi lingkungan yang berlaku, serta tiga responden dari departemen *Process Engineering* (PE) yang memiliki pemahaman mengenai optimasi proses produksi, khususnya tahapan pembentukan *clinker* dan faktor-faktor proses yang memengaruhi terbentuknya dampak lingkungan. Pemilihan responden tersebut diharapkan memberikan penilaian yang komprehensif karena mewakili dua sudut pandang yang saling melengkapi, yaitu aspek operasional proses produksi dan aspek pengelolaan lingkungan perusahaan

2.3. Penilaian Dampak (*Life Cycle Impact Assessment*)

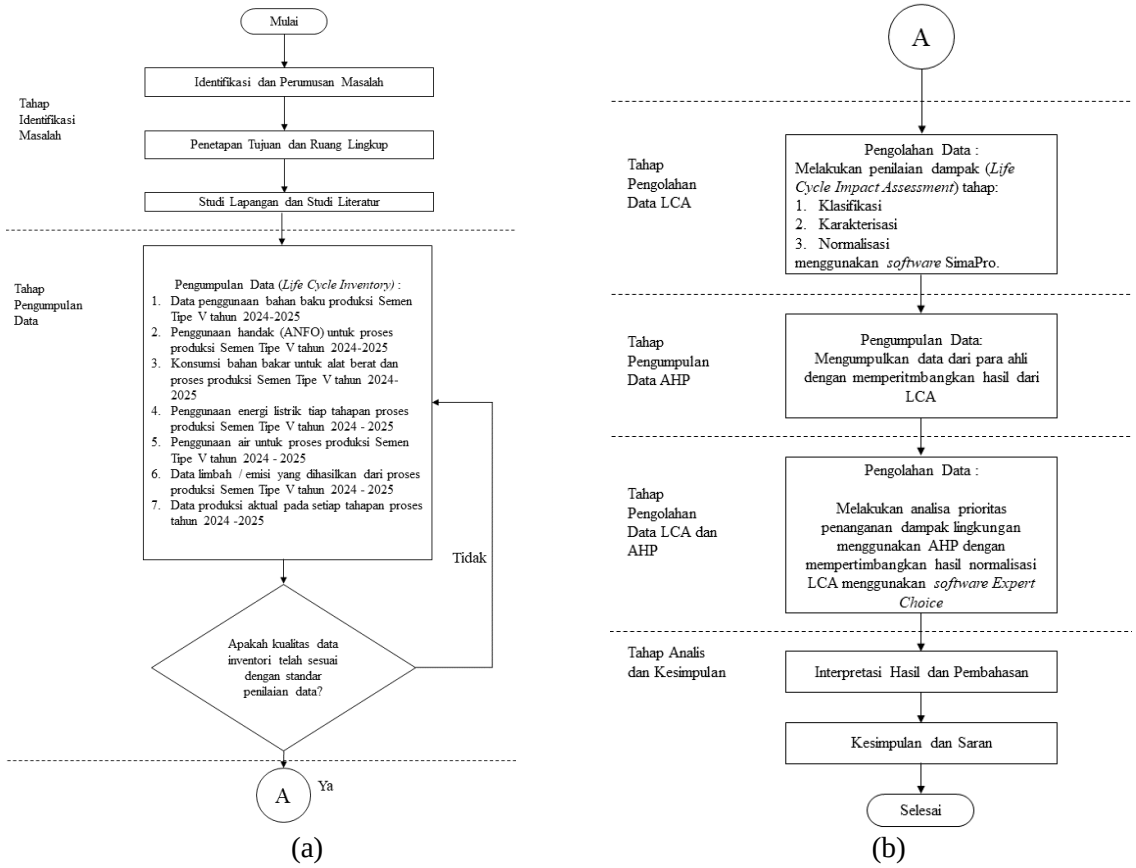
Tahap *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) dilakukan untuk mengubah data inventori siklus hidup (*Life Cycle Inventory/LCI*) menjadi indikator dampak lingkungan guna menilai kontribusi proses produksi semen terhadap berbagai permasalahan lingkungan. LCIA berfungsi untuk mengubah aliran input dan output yang telah diidentifikasi menjadi informasi yang lebih representatif dalam bentuk kategori dampak. Pemilihan kategori dampak dalam penelitian ini mengacu pada Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) yang dikeluarkan oleh KLHK[21]. Dampak yang dianalisa terdiri dari *Global Warming Potential* (GWP), *Ozone Layer Depletion (ODP), Acidification, Eutrophication, Photochemical Oxidation, Abiotic Depletion* (Fossil Dan Non-Fossil), *Ecotoxicity* (*Terrestrial, Freshwater, Marine*), *Human Carcinogenic Toxicity, Human Non-Carcinogenic, Toxicity Water Footprint, Land Use Change serta* dampak penggunaan energi. Penilaian dampak dilakukan menggunakan kombinasi beberapa metode, yaitu CML-IA *Baseline* [22], ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) [23] , dan *Cumulative Energy Demand* (CED).

Tahapan LCIA dalam penelitian ini dilakukan dengan empat langkah yaitu:

1. Klasifikasi yaitu menghubungkan data inventaris ke kategori dampak yang relevan. Data yang sudah di inventaris akan dihubungkan ke setiap aliran kategori dampak yang relevan. Contohnya untuk unit proses ekstraksi material menghasilkan CO_2 akan dihubungkan ke kategori dampak *Global Warming Potential*. Kontributor dampak dibatasi pada substansi yang teridentifikasi dan terkuantifikasi dalam inventori penelitian serta berasal dari proses yang berada dalam batas sistem *cradle-to-gate*
2. Karakterisasi yaitu menghitung besarnya kontribusi setiap aliran terhadap kategori dampak menggunakan faktor karakterisasi. Pada tahap ini seluruh aliran dikonversi ke dalam satuan seragam seperti kg CO_2-eq untuk kategori pemanasan global.
3. Normalisasi yaitu proses membandingkan nilai dampak yang diperoleh dengan angka acuan, seperti data rata-rata global atau regional, sehingga dapat dilihat seberapa besar kontribusi sistem terhadap keseluruhan beban lingkungan.
4. Pembobotan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berdasarkan hasil normalisasi LCIA. Struktur hierarki AHP dalam penelitian ini disusun dalam tiga tingkat, yaitu: tingkat pertama adalah tujuan (*goal*), yakni menentukan prioritas penanganan kategori dampak lingkungan pada proses produksi Semen Tipe V; tingkat kedua adalah kelompok kriteria dampak, yang terdiri atas perubahan iklim dan atmosfer, dampak terhadap lingkungan, toksisitas, serta penggunaan sumber daya dan energi; dan tingkat ketiga adalah subkriteria berupa kategori dampak spesifik hasil normalisasi LCIA pada masing-masing kelompok kriteria. Ketujuh responden ahli melakukan penilaian perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) pada setiap tingkat hierarki menggunakan skala fundamental Saaty (1-9). Hasil penilaian dari seluruh responden diagregasi menggunakan metode *geometric mean* untuk memperoleh matriks perbandingan berpasangan gabungan yang mewakili penilaian kelompok, yang selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak *Expert Choice* 11 untuk memperoleh bobot prioritas [24], [25]. Konsistensi penilaian diuji menggunakan *Consistency Ratio* (CR); penilaian dinyatakan konsisten apabila CR $\leq$ 0,10, sedangkan penilaian dengan CR > 0,10 dikembalikan kepada responden untuk direvisi sebelum digunakan pada tahap sintesis bobot. Hasil pembobotan memungkinkan integrasi berbagai kategori dampak menjadi nilai komposit yang mendukung pengambilan keputusan.

2.4. Interpretasi Hasil dan Pembahasan

Tahap interpretasi merupakan bagian akhir dari analisis siklus hidup (*Life Cycle Assessment*) yang berfungsi untuk menguraikan hasil dari analisis inventori (LCI) serta penilaian dampak (LCIA). Pada tahap ini, dilakukan pengkajian untuk memastikan bahwa temuan yang diperoleh selaras dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian. Selain itu, interpretasi juga bertujuan untuk merumuskan kesimpulan serta memberikan rekomendasi yang dapat mendukung proses pengambilan keputusan.

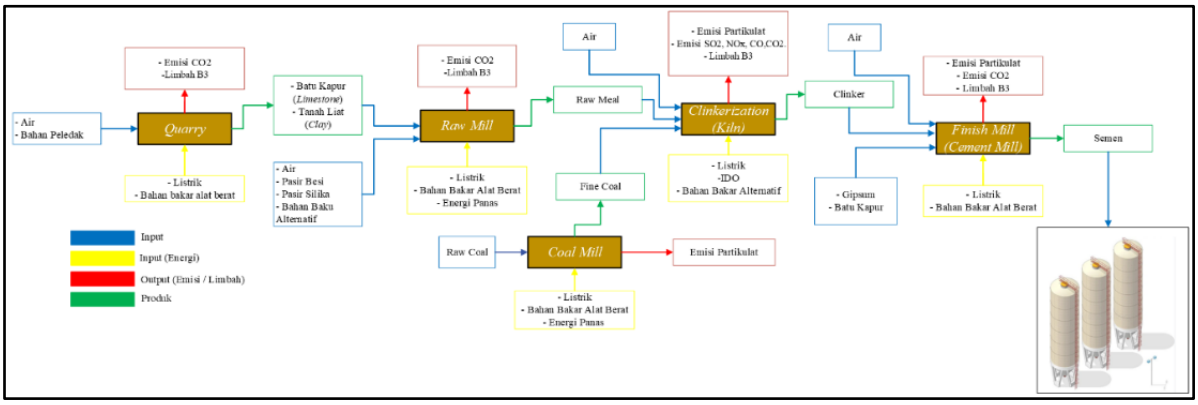


Gambar 1. Alur Penelitan (a) tahap awal (b) lanjutan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2. menunjukkan alur produksi Semen Tipe V dengan pendekatan *cradle-to-gate*, yang digunakan sebagai dasar dalam penentuan batas sistem dan pengumpulan data inventori. Diagram ini menggambarkan alur utama proses produksi, mulai dari penambangan bahan baku (*quarry*), pengolahan bahan baku di *raw mill*, proses pembakaran di *kiln*, tahap penggilingan akhir di *finish mill* untuk menghasilkan produk semen sampai semen siap untuk didistribusikan.

Melalui pemetaan sistem tersebut, seluruh aliran input dan output dapat diidentifikasi secara sistematis, meliputi bahan baku, energi, air, produk antara, produk akhir, serta emisi dan limbah. Penyusunan sistem produk ini menjadi acuan dalam menentukan jenis dan sumber data yang dikumpulkan, serta keterkaitan antar proses, sehingga mendukung pembentukan inventori daur hidup (LCI) yang konsisten dan sesuai dengan batas sistem yang telah ditetapkan.



Gambar 2. Sistem Produk Proses Produksi Semen Tipe V *Cradle to Gate*

Berdasarkan batas sistem yang telah ditetapkan, selanjutnya dilakukan penyusunan data inventori yang mencakup seluruh aliran material, energi, dan emisi pada setiap tahapan proses produksi. Hasil data inventori tersaji pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Inventori Produksi Semen Tipe V

Inventori	Satuan	Jumlah
Bahan Baku		
Batu Kapur (Limestone)	ton	269.283
Tanah Liat (Clay)	ton	63.791
Copper Slag	ton	8.911
Pasir Silika	ton	8.208
Mix Alternative Raw Material	ton	14.450
Clinker	ton	139.914
Gipsum (SO3)	ton	5.220
Material Tambahan		
ANFO	ton	59,24
Bahan Bakar		
Batubara	ton	44.220,68
IDO	liter	99.442
Solar	liter	380.807
SBE	ton	2.011,7
Material Alternatif	ton	1.594,39
Listrik		
Listrik	kWh	19.331.674,49
Air		
Air	m^3	25.025,28
Output Produk		
Semen Tipe V	ton	148.282
Emisi ke Udara		
CO2	ton	92.833,3
SO2	ton	35,21
NOx	ton	277,55
CO	ton	367
Partikulat	ton	57,85
Emisi ke Air		
BOD	ton	0,0021
COD	ton	0,00612579
Minyak dan Lemak	ton	0,00033576
TSS	ton	0,00097664

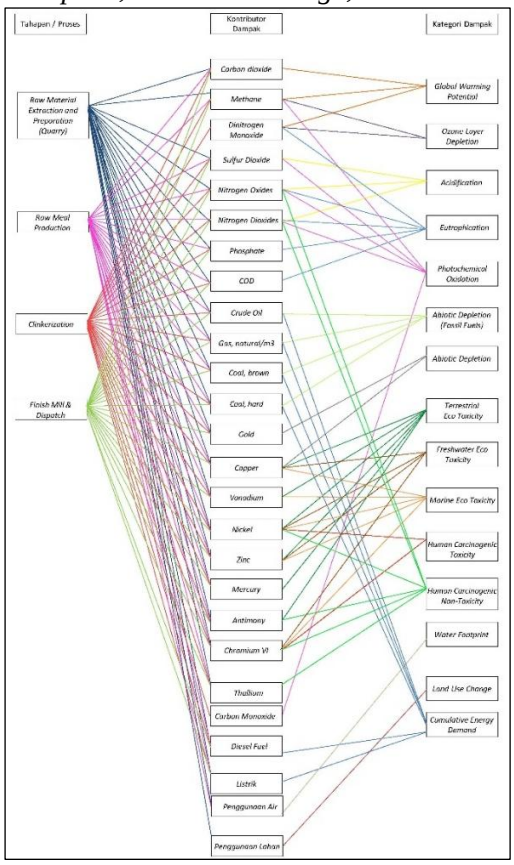
Limbah B3		
Oli bekas	ton	5,48
Majun Bekas	ton	1,81
Filter Oli	ton	0,27
Bag Filter Bekas	ton	0,73
Refraktori Bekas	ton	5,31

Seluruh nilai pada Tabel 2 merupakan data total selama periode inventori Januari 2024 - Desember 2025 yang mencakup seluruh aliran material, energi, emisi, dan limbah pada sistem produksi Semen Tipe V. Hasil perhitungan DQR untuk kualitas data inventori adalah 1,292. Nilai ini menunjukkan bahwa *data quality level* termasuk *high quality*. Hal ini dapat membuat hasil dampak dan hasil kajian LCA lebih akurat dan representatif terhadap kondisi lapangan dan dapat dilanjutkan pengolahan data.

Analisis dilanjutkan ke tahap *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), yang bertujuan untuk mengidentifikasi dan menguji kontribusi setiap aliran inventori terhadap berbagai kategori dampak lingkungan. Tahapan LCIA dalam penelitian ini meliputi proses klasifikasi, karakterisasi, normalisasi menggunakan perangkat lunak SimaPro, dan pembobotan dengan AHP.

Hasil klasifikasi menunjukkan hubungan antara tahapan proses produksi, aliran inventori, dan kategori dampak lingkungan. Batas sistem yang digunakan adalah *cradle-to-gate*, yang mencakup tahapan *raw material extraction and preparation (quarry), raw meal production, clinkerization, serta finish mill and dispatch.* Setiap tahapan proses menghasilkan berbagai aliran inventori, seperti emisi udara, konsumsi energi, penggunaan air, serta pemanfaatan sumber daya alam, yang berperan sebagai kontributor terhadap dampak lingkungan.

Aliran inventori tersebut kemudian diklasifikasikan ke dalam kategori dampak lingkungan yang relevan, meliputi *Global Warming Potential, Acidification, Eutrophication, Abiotic Depletion, Ecotoxicity, Toxicity, Water Footprint, Land Use Change, dan Cumulative Energy Demand*.



Gambar 3. Hasil Klasifikasi data inventori terhadap kategori dampak

Tahap karakterisasi merupakan lanjutan dari klasifikasi dalam LCA, yang bertujuan untuk mengkuantifikasi data inventori menjadi nilai dampak lingkungan terukur. Pada tahap ini, setiap aliran inventori dikonversi ke dalam indikator dampak menggunakan faktor karakterisasi sesuai metode yang digunakan.

Tabel 3. Hasil Karakterisasi

No	Kategori Dampak	Satuan	Metode	*Quarry*	Raw Meal Production	Clinkerization	Finish Mill & Dispatch	Total
Dampak Primer								
1	*Global Warming Potential*	kg CO_2 eq/ton semen	ReCiPe 2016 *Midpoint (H)* V1.04	9,83	70,53	620,21	43,75	744,31
2	*Ozone Layer Depletion (ODP)*	kg CFC_{11} eq/ton semen	CML-IA *Baseline* V3.06	1,020E-06	4,038E-06	4,913E-06	1,453E-06	1,142E-05
3	*Acidification*	kg SO_2 eq/ton semen	CML-IA *Baseline* V3.06	0,0270	0,2908	1,6138	0,1849	2,12
4	*Eutrophication*	kg PO_4 eq/ton semen	CML-IA *Baseline* V3.06	0,0062	0,0541	1,1593	0,0366	1,26
Dampak Sekunder								
5	*Photo Chemical Oxidation*	kg C_2H_4 eq/ton semen	CML-IA *Baseline* V3.06	0,000777	0,0131	0,1457	0,006023	0,167
6	**Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil), terdiri dari:**							
	a. Abiotic depletion (fossil fuel)	MJ/ton semen	CML-IA *Baseline* V3.06	100,61	737,70	45402,41	455,49	46696,21
	b. Abiotic depletion	kg Sb eq/ton semen	CML-IA *Baseline* V3.06	5,82601E-06	0,0168	0,0007	0,0000	0,0176
7	**Potensi penurunan biotik, terdiri dari:**							
	a. Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB/ton semen	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04	7,86	195,73	151,55	25,50	380,64
	b. Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB/ton semen	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04	0,0029	0,0749	0,2692	0,0190	0,3661
	c. Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB/t	ReCiPe 2016	0,01	0,21	0,43	0,04	0,69

		on semen	Midpoint (H) V1.04					
8	*Human carcinogenic toxicity*	kg 1,4-DCB/ton semen	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04	0,01	0,75	1,10	0,23	2,10
9	*Human non-carcinogenic toxicity*	kg 1,4-DB eq/ton semen	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04	0,43	13,27	24,74	5,69	44,14
10	*Water Consumption*	m^3/ton semen	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04	0,04	0,43	1,79	0,27	2,53
11	*Land Use*	m^2a crop eq/ton semen	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04	0,01	2,75	365,97	0,04	368,77
Dampak Pemakaian Energi								
12	***Cumulative Energy Demand* terdiri dari :**							
	a. Non-renewable	MJ/ton semen	*Cumulative Energy Demand*	108,440	810,359	47.857,811	507,811	49.284,42
	b. Renewable	MJ/ton semen	*Cumulative Energy Demand*	1,140	37,78	567,75	20,19	626,86

Nilai pada tabel karakterisasi sudah dinormalisasi per unit fungsi. Normalisasi ke satuan per ton semen dilakukan pada tahap ini dengan mengacu pada total produk Semen Tipe V sebesar 148.282 ton sebagai *reference flow*. Hasil karakterisasi dampak lingkungan produksi semen tipe V menunjukkan bahwa sebagian besar kategori dampak didominasi oleh tahap klinkerisasi, sebagaimana dihitung menggunakan metode ReCiPe 2016 *Midpoint* (H), CML-IA *Baseline* V3.06, dan *Cumulative Energy Demand* (CED). Pada kategori *Global Warming Potential*, total dampak mencapai 744,31 kg CO_2-eq/ton semen dengan kontribusi terbesar berasal dari klinkerisasi sebesar 83,3%, sebagai pembanding, studi di Afrika Selatan melaporkan 993 kg CO2-eq/ton dengan kontribusi klinker 78,3% [7], studi di Myanmar juga melaporkan >80% dampak perubahan iklim dan pengasaman berasal dari klinkerisasi [26]. Dengan demikian, meskipun kandungan klinker Semen Tipe V tinggi (>90%), nilai GWP penelitian ini berada pada kisaran bawah dibanding studi pembanding, mengindikasikan efektivitas efisiensi energi dan substitusi bahan bakar alternatif yang telah diterapkan. Pola serupa juga terlihat pada kategori *Acidification*, *Eutrophication*, *Photochemical Oxidation*, serta berbagai kategori toksisitas dan ekotoksisitas. Selain itu, kebutuhan energi didominasi oleh energi non-terbarukan sebesar 49.284,42 MJ/ton semen, dengan lebih dari 95% berasal dari tahap klinkerisasi. Kategori *Water Consumption* dan *Land Use* juga menunjukkan kontribusi dominan dari tahap ini. Proses klinkerisasi merupakan tahapan yang paling intensif dalam keseluruhan proses produksi semen, karena melibatkan pembakaran pada temperatur tinggi, yakni sekitar 1450°C. Kondisi ini menyebabkan kebutuhan energi termal menjadi sangat besar, yang sebagian besar masih dipenuhi oleh penggunaan bahan bakar fosil seperti batubara.

Selain tingginya kebutuhan energi, pada tahap klinkerisasi juga berlangsung proses kalsinasi batu kapur ($CaCO_3$) menjadi kalsium oksida (CaO) dan karbon dioksida (CO_2). Dalam proses tersebut, CaO yang dihasilkan berperan sebagai komponen utama dalam pembentukan mineral klinker, seperti alit (C_3S) dan belit (C_2S), sehingga terintegrasi secara langsung ke dalam produk akhir semen dan tidak dikategorikan sebagai emisi. Sebaliknya, CO_2 yang terbentuk dari reaksi dekomposisi tidak terikat kembali dalam material padat, melainkan bergabung dengan aliran gas buang proses. Gas ini kemudian terbawa bersama gas hasil pembakaran dan akhirnya dilepaskan ke atmosfer melalui cerobong (*stack*).

Pembakaran pada suhu tinggi dalam kiln juga memicu terbentuknya berbagai jenis emisi lain, seperti nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), dan partikulat. Keberadaan emisi-emisi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan nilai dampak lingkungan pada kategori *Acidification di* mana SO_2 dan NO_x di atmosfer dapat bereaksi membentuk senyawa asam yang kemudian turun sebagai deposisi asam[27], kemudian dampak *Eutrophication*, serta *Human Toxicity* maupun *Ecotoxicity*. Dengan demikian, tingginya beban lingkungan pada tahap klinkerisasi merupakan hasil kombinasi antara konsumsi energi termal yang besar dan berlangsungnya reaksi kimia yang secara langsung menghasilkan emisi.

Jika dibandingkan dengan tahapan proses lainnya, seperti proses penambangan, produksi *raw meal*, maupun *finish mill and dispatch*, kontribusi dampak yang dihasilkan relatif lebih kecil. Hal ini disebabkan karena tahapan-tahapan tersebut umumnya hanya melibatkan proses mekanis, seperti ekstraksi material dan penggilingan, tanpa disertai reaksi kimia intensif maupun kebutuhan energi termal yang tinggi. Dengan demikian, klinkerisasi menjadi tahap kunci yang paling berpengaruh terhadap beban lingkungan dalam sistem produksi Semen Tipe V.

Selanjutnya, hasil karakterisasi dianalisis melalui tahap normalisasi untuk menyajikan nilai dampak dalam bentuk relatif sehingga memungkinkan perbandingan antar kategori yang sebelumnya memiliki satuan berbeda. Proses ini dilakukan menggunakan fitur *normalisation* pada SimaPro berdasarkan nilai referensi metode yang digunakan, sehingga hasil dinyatakan tanpa satuan (*dimensionless*) dan dapat dibandingkan terhadap beban lingkungan acuan. Hasil normalisasi kemudian menjadi dasar dalam tahap pembobotan. Namun untuk kategori *Cumulative Energy Demand* (CED) tidak dinormalisasi karena merepresentasikan total akumulasi energi, bukan kategori dampak lingkungan yang dibandinkan terhadap beban referensi.

Normalisasi CML-IA Baseline V3.06 mengacu pada referensi World, 1995 (rata-rata beban lingkungan tahunan satu penduduk dunia pada 1995) [22], sedangkan ReCiPe 2016 Midpoint (H) mengacu pada World (2010), per capita [23]

Tabel 4. Hasil Normalisasi Dengan Metode CML-IA *Baseline*

No	Kategori Dampak	*Quarry*	Raw Meal Production	Clinkerization	Finish Mill & Dispatch	Total
1	*Ozone Layer Depletion (ODP)*	1,69E-09	6,71E-09	8,16E-09	2,41E-09	1,9E-08
2	*Acidification*	1,42E-07	1,53E-06	8,49E-06	9,73E-07	1,11E-05
3	*Eutrophication*	6,94E-08	6,09E-07	1,3E-05	4,11E-07	1,41E-05
4	*Photo Chemical Oxidation*	1,36E-08	2,29E-07	2,55E-06	1,05E-07	2,9E-06
5	*Abiotic depletion (fossil fuel)*	4,74E-07	3,48E-06	0,000214	2,15E-06	0,00022

6	*Abiotic depletion*	1,02E-08	2,95E-05	1,19E-06	7,31E-08	3,07E-05

Tabel 5. Hasil Normalisasi Metode ReCiPe 2016 *Midpoint* (H)

No	Kategori Dampak	*Quarry*	Raw Meal Production	Clinkerization	Finish Mill & Dispatch	Total
1	*Human carcinogenic toxicity*	785,47	40.282,17	59.081,08	12.176,33	112.325,06
2	*Marine ecotoxicity*	1.301,01	30.249,74	61.891,24	5.749,03	99.191,02
3	*Terrestrial ecotoxicity*	1.124,63	28.007,44	21.685,40	3.649,50	54.466,97
4	*Freshwater ecotoxicity*	351,11	9.051,93	32.535,91	2.299,36	44.238,31
5	*Human non-carcinogenic toxicity*	431,50	13.206,92	24.619,73	5.656,97	43.915,11
6	*Global warming*	182,46	1.309,38	11.514,05	812,24	13.818,14
7	*Land use*	0,13	66,10	8.791,32	0,95	8.858,50
8	*Water consumption*	22,32	237,37	994,47	152,25	1.406,42

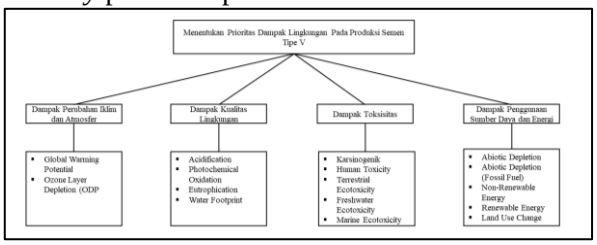
Normalisasi menggunakan metode CML-IA *Baseline* menunjukkan bahwa kategori *Abiotic Depletion* (*fossil fuels*) memiliki nilai normalisasi tertinggi, yang menunjukkan kontribusi relatif terbesar terhadap beban referensi. Kontribusi terbesar berasal dari tahap klinkerisasi, yang menyumbang sekitar 97,3% dari total dampak kategori tersebut. Dominasi klinkerisasi juga terlihat pada kategori *Eutrophication, Acidification*, dan *Photochemical Oxidation*, sedangkan kategori *Ozone Layer Depletion* menunjukkan nilai normalisasi yang relatif rendah.

Hasil normalisasi menggunakan metode ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) menunjukkan bahwa kategori *Human Carcinogenic Toxicity* memiliki nilai normalisasi tertinggi, diikuti oleh *Marine Ecotoxicity, Terrestrial Ecotoxicity, Freshwater Ecotoxicity, Human Non-Carcinogenic Toxicity, Global Warming Potential, Land Use dan Water Consumption*. Pada seluruh kategori tersebut, tahap klinkerisasi menjadi kontributor dominan. Tingginya dampak pada kategori *Human Carcinogenic Toxicity* dan berbagai kategori ekotoksisitas diduga berkaitan dengan keberadaan unsur jejak logam pada bahan baku semen yang dapat mengalami transformasi selama proses pembakaran suhu tinggi. Kromium (Cr) secara alami terkandung dalam batu kapur dan tanah liat yang digunakan sebagai bahan baku semen. Pada kondisi *kiln* yang bersifat oksidatif dan bersuhu tinggi, sebagian kromium trivalen (Cr(III)) dapat teroksidasi menjadi kromium heksavalen (Cr(VI)) yang memiliki toksisitas, mobilitas, dan potensi karsinogenik yang lebih tinggi, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan dampak pada kategori kesehatan manusia dan ekotoksisitas[28]. Sementara itu, tingginya nilai *Global Warming Potential* terutama disebabkan oleh konsumsi bahan bakar fosil dan emisi CO_2 dari proses kalsinasi batu kapur. Dominasi klinkerisasi pada kategori *Water Consumption* dan *Land Use* menunjukkan bahwa dampak lingkungan tidak hanya berasal dari proses produksi di dalam pabrik, tetapi juga dari aktivitas hulu yang terkait dengan penyediaan energi dan bahan bakar.

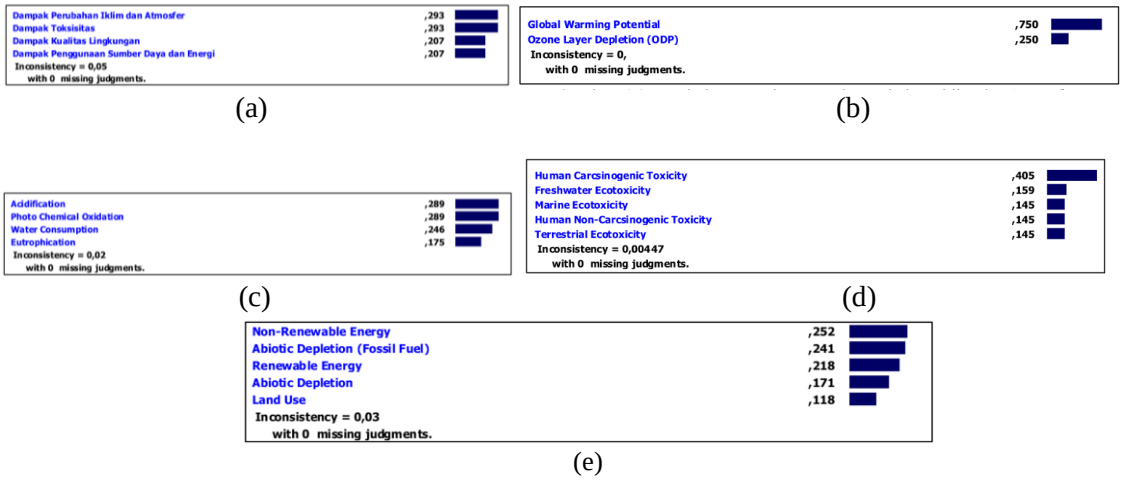
Secara keseluruhan, hasil normalisasi dari kedua metode menunjukkan bahwa klinkerisasi merupakan *hotspot* lingkungan utama dalam produksi Semen Tipe V. Tingginya kontribusi tahap ini

dipengaruhi oleh kebutuhan energi yang besar, penggunaan bahan bakar fosil, serta emisi yang dihasilkan selama proses pembakaran dan pembentukan klinker.

Hasil normalisasi LCA diposisikan sebagai informasi pendukung yang diberikan kepada tujuh responden ahli (empat dari departemen penanggung jawab lingkungan dan tiga dari *Process Engineer*) sebelum penilaian *pairwise comparison* menggunakan skala Saaty (1-9). Hasil penilaian digabung dengan *geometric mean* dan diolah dengan *Expert Choice* untuk memperoleh bobot prioritas serta nilai *Inconsistency* pada setiap level hierarki.



Gambar 4. Hierarki Prioritas Dampak Lingkungan Produksi Semen Tipe V



Gambar 5. Pembobotan AHP (a) Perbandingan Kriteria Utama (b) Pembobotan Pada Dampak Perubahan Iklim dan Atmosfer (c) Pembobotan Pada Dampak terhadap Lingkungan (d) Pembobotan Dampak Toksisitas (e) Pembobotan Dampak Penggunaan Sumber Daya dan Energi

Hasil pembobotan level 1 (Gambar 5a) menunjukkan kriteria perubahan iklim dan atmosfer serta kriteria toksisitas memperoleh bobot tertinggi yang identik (masing-masing 0,293), diikuti kualitas lingkungan dan penggunaan sumber daya-energi (masing-masing 0,207), dengan *Inconsistency* 0,05. Penempatan kriteria iklim sejalan dengan hasil normalisasi CML-IA, di mana *Abiotic Depletion (Fossil Fuel)* mencatat nilai tertinggi ($2{,}20\times10^{-4}$), hal ini diperkuat tekanan regulasi dekarbonisasi dan target penurunan emisi CO_2 29% pada 2030 milik perusahaan[29]. Bobot toksisitas yang setara selaras dengan hasil normalisasi ReCiPe 2016, di mana lima kategori toksisitas/ekotoksisitas menempati lima peringkat teratas dari delapan kategori yang dianalisis.

Pada kelompok perubahan iklim (Gambar 5b), *Global Warming Potential* mendominasi (0,750) dibanding *Ozone Layer Depletion* (0,250), selaras dengan posisi ODP sebagai nilai normalisasi CML-IA terendah. Pada kelompok kualitas lingkungan (Gambar 5c), *Acidification* dan *Photochemical Oxidation* memperoleh bobot tertinggi yang identik (0,289), meski normalisasi CML-IA menunjukkan *Eutrophication* sedikit lebih tinggi, perbedaan ini mengindikasikan bahwa penilaian ahli turut dipengaruhi ketatnya pengawasan regulasi emisi SO_2 dan NOx (Permen LHK No. P.19/2017), bukan semata besaran kuantitatif. Pada kelompok toksisitas (Gambar 5d), *Human Carcinogenic Toxicity* mendominasi (0,405) dibanding empat kategori ekotoksisitas lain (0,145-0,159), selaras dengan posisinya sebagai kategori ReCiPe paling signifikan (112.325,06), terkait risiko pajanan kromium heksavalen (Cr(VI)) pada suhu pembakaran tinggi [28].

Pada kelompok penggunaan sumber daya dan energi (Gambar 5e), *Non-Renewable Energy* memperoleh bobot tertinggi (0,252), diikuti *Abiotic Depletion (Fossil Fuel)* (0,241) dan *Renewable Energy* (0,218), sedangkan *Abiotic Depletion* non-fosil (0,171) dan *Land Use* (0,118) memperoleh bobot terendah, dengan *Inconsistency* 0,03. Pola ini menunjukkan preferensi ahli terhadap dampak yang terukur langsung dan dapat dikendalikan melalui efisiensi operasional, dibanding dampak rantai pasok tidak langsung seperti jejak logam berat dari penggunaan *copper slag* pada *raw meal* [30].

Secara keseluruhan, integrasi normalisasi LCA dan pembobotan AHP menunjukkan bahwa prioritas para ahli tidak selalu sejalan dengan besarnya dampak yang dihasilkan melalui analisis kuantitatif. Pada kelompok sumber daya dan energi, para ahli lebih memprioritaskan efisiensi energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dibandingkan aspek ketersediaan sumber daya yang tercermin dalam nilai normalisasi LCA. Kesesuaian antara kedua metode terlihat pada kategori *Human Carcinogenic Toxicity, Acidification,* dan *Photochemical Oxidation*, sedangkan perbedaan muncul pada *Global Warming Potential, Abiotic Depletion Fossil Fuel, Eutrophication*, dan kategori ekotoksisitas. Temuan ini menunjukkan bahwa penilaian para ahli tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya dampak lingkungan, tetapi juga oleh pertimbangan praktis seperti tekanan regulasi, kemudahan pengelolaan, dan relevansi operasional. Dengan demikian, integrasi LCA dan AHP mampu mengidentifikasi kategori dampak yang signifikan secara kuantitatif sekaligus mengungkap prioritas penanganan berdasarkan perspektif para ahli.

IV. KESIMPULAN

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa produksi 1 ton Semen Tipe V menghasilkan dampak lingkungan pada berbagai kategori, dengan nilai utama sebesar 744,31 kg CO_2-eq untuk *Global Warming Potential* (GWP), 2,12 kg SO_2-eq untuk *Acidification*, 1,26 kg PO_4-eq untuk Eutrophication, dan 46.696,21 MJ untuk *Abiotic Depletion (Fossil Fuel)*. Tahap klinkerisasi teridentifikasi sebagai *hotspot* lingkungan yang mendominasi hampir seluruh kategori dampak, dengan kontribusi mencapai 97% pada *Abiotic Depletion (Fossil Fuel)*, 92,2% pada *Eutrophication*, 83,3% pada GWP, dan 76,2% pada *Acidification*, terutama akibat tingginya kebutuhan energi kiln dan emisi CO_2 dari proses kalsinasi.

Hasil pembobotan AHP menunjukkan bahwa kelompok Dampak Perubahan Iklim dan Atmosfer serta Dampak Toksisitas merupakan prioritas utama (masing-masing berbobot 0,293). Global Warming Potential menjadi subkriteria dengan bobot global tertinggi (21,98%), diikuti *Human Carcinogenic Toxicity* (11,87%). Namun, perbandingan dengan hasil normalisasi LCA menunjukkan adanya perbedaan prioritas pada beberapa kategori, seperti GWP dan *Abiotic Depletion (Fossil Fuel),* yang mengindikasikan bahwa penilaian para ahli dipengaruhi tidak hanya oleh besarnya dampak kuantitatif, tetapi juga oleh pertimbangan regulasi dan operasional. Dengan demikian, integrasi LCA dan AHP memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dalam penentuan prioritas perbaikan lingkungan.

Berdasarkan integrasi LCA dan AHP, penelitian ini merekomendasikan tiga strategi mitigasi, yaitu penguatan implementasi *Thermal Substitution Rate* (TSR) berbasis indikator LCA (*Abiotic Depletion Fossil Fuel dan Global Warming Potential*), peningkatan pemantauan risiko toksikologis pada tahap klinkerisasi melalui biomonitoring kromium, serta penetapan target internal pengendalian emisi NO_x dan SO_2 yang lebih ketat sebagai *early warning system* berbasis CEMS. penerapan TSR 25% pada tahun 2030 secara indikatif dapat menurunkan nilai *Abiotic Depletion Fossil Fuel* sekitar 17% dari baseline penelitian ini, namun estimasi ini memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui pemodelan skenario LCIA yang spesifik.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, yaitu ruang lingkup LCA yang terbatas pada pendekatan *cradle-to-gate*, jumlah responden AHP yang hanya melibatkan tujuh ahli internal perusahaan, serta penggunaan data inventori dari satu periode operasional dan satu unit pabrik. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan memperluas cakupan LCA hingga *cradle-to-grave,* melibatkan pemangku kepentingan yang lebih beragam dalam pembobotan AHP, serta melakukan analisis sensitivitas terhadap variasi bahan bakar alternatif dan metode penilaian dampak.

KONTRIBUSI PENULIS

Kontribusi masing-masing penulis dalam penelitian ini dijelaskan berdasarkan peran dan tanggung jawabnya. **Hastawati Chrisna Suroso:** Supervisi (supervision), interpretasi dan analisis hasil penelitian (formal analysis), serta peninjauan substansi ilmiah naskah (writing – review & editing). **Angela Lady:** Pengumpulan dan pengolahan data (investigation and data curation), penggunaan perangkat lunak (software), serta penyusunan draf awal naskah (writing – original draft).
Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak menerima pendanaan atau hibah khusus dari lembaga pemerintah, institusi komersial, maupun organisasi nirlaba. Penelitian dilaksanakan tanpa dukungan pendanaan hibah eksternal.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan finansial, profesional, maupun pribadi yang dapat memengaruhi pelaksanaan penelitian, interpretasi hasil, atau penyusunan naskah ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat ucapan terima kasih khusus yang perlu disampaikan dalam penelitian ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Para penulis menyatakan bahwa teknologi kecerdasan buatan (AI) digunakan secara terbatas untuk membantu penyusunan dan penyempurnaan bahasa naskah ilmiah. Pengolahan dan analisis data penelitian dilakukan menggunakan perangkat lunak Expert Choice dan SimaPro, sedangkan perhitungan dilakukan secara manual dengan bantuan Microsoft Excel.
Penggunaan AI tidak dimaksudkan untuk menghasilkan, merekayasa, atau mengubah data penelitian maupun menggantikan interpretasi ilmiah penulis. Seluruh hasil analisis, interpretasi, dan kesimpulan penelitian telah diperiksa serta menjadi tanggung jawab penuh para penulis.

PERNYATAAN KETERSEDIAAN DATA

Data yang mendukung temuan penelitian ini tersedia dan dapat diperoleh dari penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar. Data tersebut mencakup hasil pengumpulan data, pengolahan menggunakan Expert Choice dan SimaPro, serta perhitungan pendukung menggunakan Microsoft Excel, sepanjang tidak terdapat pembatasan akses atau kerahasiaan yang berlaku.

PERNYATAAN ETIK

Penelitian ini tidak memerlukan persetujuan etik karena tidak melibatkan intervensi terhadap manusia atau hewan maupun prosedur penelitian yang mensyaratkan persetujuan dari komite etik.

REFERENSI

[1] Badan Pusat Statistik Indonesia, “Produk Domestik Bruto Indonesia Triwulanan 2020-2024,” vol. 7, 2024.
[2] Kementerian Perindustrian, “Sosialisasi SE Menperin No 2 Tahun 2025 Tentang Penyampaian Data Emisi Industri,” 2025.
[3] Z. Sherif, S. Sarfraz, M. Jolly, and K. Salonitis, “A Critical Review of the Decarbonisation Potential in the U.K. Cement Industry,” Jan. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ma18020292.
[4] M. Ri. Pahlevi, QotrunadaSyadzadhiya, S. Q. Z. Nisa’, and K. Kunci, “Analisis Dampak Asidifikasi Industri Semen PT X Metode Life Cycle Assessment (LCA) : Gate to Gate,” 2023.
[5] Badan Standarisasi Nasional, “SNI 15-2049-2020 Semen Portland - Bagian 1_Spesifikasi,” 2021.
[6] O. E. Ige, O. A. Olanrewaju, K. J. Duffy, and C. Obiora, “A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 324, p. 129213, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129213.

[7] B. D. Akintayo, O. A. Olanrewaju, and O. I. Olanrewaju, "Life Cycle Assessment of Ordinary Portland Cement Production in South Africa: Mid-Point and End-Point Approaches," *Sustainability (Switzerland)* , vol. 16, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/su16073001.
[8] M. A. Firdausy, M. S. Syauri, and N. D. Natanegara, "Analisis Dampak Lingkungan Industri Semen Dengan Pendekatan Life Cycle Assessment Pada Ruang Lingkup Cradle To Gate," 2025.
[9] A. Ulya, L. Mutaali, and Sudarmadji, "Evaluasi Dampak Proses Produksi Semen Terhadap Lingkungan Dengan Metode Life Cycle Assessment (Studi Kasus: PT Semen Gresik Pabrik Rembang)," 2022.
[10] M. Rybaczewska-Błażejowska and D. Jezierski, "Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 29, no. 10, pp. 1799–1817, Oct. 2024, doi: 10.1007/s11367-024-02326-6.
[11] B. Moutik, J. Summerscales, J. Graham-Jones, and R. Pemberton, "Life Cycle Assessment Research Trends and Implications: A Bibliometric Analysis," Sep. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su151813408.
[12] A. Bărbulescu and K. Hosen, "Cement Industry Pollution and Its Impact on the Environment and Population Health: A Review," Jul. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/toxics13070587.
[13] M. E. Nugroho, P. Setyono, and S. Rachmawati, "Analisis Emisi Gas Rumah Kaca dengan Life Cycle Assessment (LCA) dan Analytical Hierarchy Process (AHP) Industri Tahu," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 22, no. 6, pp. 1504–1512, Nov. 2024, doi: 10.14710/jil.22.6.1504-1512.
[14] B. D. Akintayo, O. M. Babatunde, and O. A. Olanrewaju, "Comparative Analysis of Cement Production Methods Using a Life Cycle Assessment and a Multicriteria Decision-Making Approach," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16020484.
[15] SimaPro, "SimaPro Database Manual Methods Library Title: SimaPro Database Manual Methods Library," 2020.
[16] Badan Standarisasi Nasional, "SNI ISO 14040-2016," 2016.
[17] Badan Standarisasi Nasional, "Manajemen lingkungan - Penilaian daur hidup - Persyaratan dan panduan," 2017. [Online]. Available: www.bsn.go.id
[18] Asosiasi Semen Indonesia, "Product Category Rules (PCR) Produk Semen," 2021.
[19] T. Sonderegger and N. Stoikou, "Implementation of life cycle impact assessment methods in the ecoinvent database v3.9," 2022.
[20] J. R. C. European Commission, *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : general guide for life cycle assessment : detailed guidance*. Publications Office, 2010.
[21] Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "PEDOMAN PENYUSUNAN LAPORAN PENILAIAN DAUR HIDUP (LCA)," 2021.
[22] C. – D. of I. E. Leiden University, "CML-IA characterisation factors," 2016. Accessed: Jun. 27, 2026. [Online]. Available: Leiden University, CML – Department of Industrial Ecology
[23] M. A. J. Huijbregts, Z. J. N. Steinmann, P. M. F. Elshout, and G. Stam, "ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization," 2016.
[24] S. A. Afifah and A. S. Cahyana, "Implementasi Metode AHP dalam Menentukan Penyelesaian Penumpukan Stok Gudang Logistik Menggunakan Aplikasi Expert Choice," 2024.
[25] R. V. Françozo *et al.*, "A web-based software for group decision with analytic hierarchy process," *MethodsX*, vol. 11, p. 102277, 2023, doi: 10.1504/IJSSci.2008.01759.
[26] E. Thwe, D. Khatiwada, and A. Gasparatos, "Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar," *Cleaner Environmental Systems*, vol. 2, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cesys.2020.100007.
[27] M. C. Y. A. P. Putri, Sudarti, and Yushardi, "Mekanisme Hujan Asam Dan Dampak Pada Kehidupan," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, vol. 11, no. A, pp. 149–156, 2025.
[28] A. Estokova, L. Palascakova, and M. Kanuchova, "Study on Cr(VI) Leaching from Cement and Cement Composites," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/ijerph15040824.
[29] Solusi Bangun Indonesia, "Laporan Tahunan 2025," 2025. Accessed: Jul. 16, 2026. [Online]. Available: https://solusibangunindonesia.com/laporan-tahunan/
[30] R. He, S. Zhang, X. Zhang, Z. Zhang, Y. Zhao, and H. Ding, "Copper slag: The leaching behavior of heavy metals and its applicability as a supplementary cementitious material," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 2, p. 105132, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105132.