

Kajian *Life Cycle Assessment* Proses Produksi Dore Bullion Pertambangan Emas di Jawa Barat

Rizal Hardiansyah¹, Adhi Yuniarto^{2*}, Syaiful Habib³, Eva Roslina Sari⁴

^{1,2}Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

^{3,4}HSSE Bureau, PT ANTAM Tbk. UBPE Pongkor, Bogor, Indonesia

*Koresponden email: adhy@its.ac.id

Diterima: 21 Juni 2024

Disetujui: 30 Juni 2024

Abstract

Gold is one of the largest mining products in Indonesia, amounting to 34,39 tons in 2022. In addition, gold is considered to be one of the safest investment instruments currently. The main raw material for gold production is dore bullion, namely metal bars containing gold and silver. Dore bullion production has various impacts on Life Cycle Assessment (LCA) studies. High levels of dore bullion production cause high use of fuel, energy, raw materials, and emissions, so it is necessary to analyze and identify the impact of the precious metal production process using the LCA method. The impacts produced in this research are midpoint and endpoint impacts based on the ReCiPe 2016 (H) method for the cradle-to-gate scope. This LCA study examined 14 midpoint and 3 endpoint impacts. The dominant midpoint impact results are mineral resource scarcity (149,581,850,000 kg Cu eq), water consumption (167.905,36 m³), and global warming (4.514.295,80 kg CO₂ eq), while the endpoint impacts are resources (34.608.348.000 USD2013), human health (4,7626 DALY), and ecosystem quality (0,0150 species.yr). The largest impact contributors were the drilling process unit (mineral resource scarcity), milling process unit (water consumption), and dewatering process unit (global warming).

Keywords: *environmental impact, mining industry, lca, dore bullion, ReCiPe 2016 (H)*

Abstrak

Emas merupakan salah satu hasil tambang terbesar di Indonesia sebesar 34,39 ton pada tahun 2022. Selain itu emas dianggap menjadi salah satu instrument investasi paling aman saat ini. Bahan baku utama pembuatan emas adalah *dore bullion* yaitu batangan logam yang mengandung emas dan perak. Produksi *dore bullion* menghasilkan berbagai dampak pada kajian *Life Cycle Assessment* (LCA). Tingginya tingkat produksi *dore bullion* menyebabkan tingginya penggunaan bahan bakar, energi, bahan baku, dan emisi, sehingga perlu adanya analisa dan identifikasi dampak dari proses produksi *dore bullion* dengan metode LCA. Dampak yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah *midpoint* dan *endpoint* dengan metode ReCiPe 2016 (H) untuk ruang lingkup *cradle to gate*. Studi LCA ini mengkaji 14 dampak *midpoint* dan 3 dampak *endpoint*. Hasil dampak *midpoint* dominan yaitu *mineral resource scarcity* sebesar 149.581.850.000 kg Cu eq, *water consumption* sebesar 167.905,36 m³, dan *global warming* sebesar 4.514.295,80 kg CO₂ eq, sedangkan dampak *endpoint* yaitu *resources* sebesar 34.608.348.000 USD2013, *human health* sebesar 4,7626 DALY, dan *ecosystem quality* sebesar 0,0150 species.yr. Kontributor dampak terbesar yaitu unit proses *drilling* (*mineral resource scarcity*), unit proses *milling* (*water consumption*) dan unit proses *dewatering* (*global warming*).

Kata Kunci: *dampak lingkungan, industri pertambangan, LCA, dore bullion, ReCiPe 2016 (H)*.

1. Pendahuluan

Emas merupakan salah satu hasil tambang terbesar di Indonesia sebesar 34,39 ton pada Tahun 2022 [1], selain itu emas dianggap menjadi salah satu instrument investasi paling aman saat ini. Cadangan emas di Jawa Barat merupakan salah satu penemuan emas terbesar di Indonesia, mengandung 100 ton emas dan 1.000 ton perak. Penemuan tersebut dihasilkan dari proses eksplorasi selama 3 tahun dengan metode teknik geologi, geofisika dan geokimia [3]. Perusahaan emas yang berlokasi di Jawa Barat memiliki kapasitas produksi yang bervariasi, dan perusahaan yang dikaji memiliki kapasitas produksi hingga 400.000 ton *ore* per tahun. Perusahaan ini memproduksi *dore bullion* sebagai produk utamanya, yang merupakan batangan logam campuran dari emas dan perak [2].

Proses produksi *dore bullion* membutuhkan berbagai macam sumber daya serta menghasilkan emisi atau buangan yang berbahaya bagi lingkungan dan manusia. Proses produksi emas menghasilkan berbagai

dampak pada kajian LCA seperti *climate change*, *ozone depletion*, *human toxicity*, *acidification*, *land use*, *ecotoxicity* dan lain-lain [4]. Dampak ini dihasilkan dari proses produksi seperti penambangan (penggunaan mesin produksi dan transportasi bahan baku), proses pengolahan (*grinding and sizing*, penggunaan listrik, dan bahan kimia) dan proses pendukung [5].

Metode LCA dapat digunakan dalam mengevaluasi dan menemukan kemungkinan perbaikan lingkungan akibat adanya dampak kegiatan. Penerapan LCA terdiri dari empat tahapan yaitu *goal and scope definition*, *life cycle inventory* (LCI), *life cycle impact assessment* (LCIA), dan *interpretation* data [6]. Metode penelitian ini menggunakan pendekatan *midpoint* dan *endpoint* dengan metode ReCiPe 2016 (H) dengan ruang lingkup *cradle to gate*. Dampak lingkungan yang timbul dari kajian LCA dilakukan evaluasi, identifikasi, dan analisis guna menentukan dampak apa saja yang muncul pada kajian LCA ini serta unit mana saja yang menjadi kontributor utama di masing-masing kategori dampak.

2. Metode Penelitian

Ruang lingkup yang dilakukan kajian adalah *cradle to gate*. *Cradle to gate* yaitu ruang lingkup analisis daur hidup yang dimulai dari *raw material* sampai ke *gate* sebelum penggunaan produk oleh konsumen [7]. Tahapan LCA yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

Goal and Scope

Definisi goal dari kajian LCA wajib ditetapkan secara jelas mengenai sebuah tujuan penerapan LCA. *System boundaries* berisi rangkaian kriteria untuk menetapkan unit proses yang akan dikaji [8].

Life Cycle Inventory

Tahapan *life cycle inventory* adalah analisis terhadap kumpulan *inventory* data yang bermula dari *input/output* yang berkaitan dengan sistem yang sedang dikaji atau diteliti. Tahapan LCI ini melakukan deskripsi kuantitatif dari *flow material*, energi, dan polutan dalam *system boundaries* [9]. Sumber data yang digunakan dibagi menjadi 4 yaitu elektronik *database*, data literatur, data *unreported*, dan data pengukuran atau perhitungan [10]. Proses validasi dan verifikasi data dilakukan oleh personil yang berpengalaman dengan membandingkan data di catatan/*logbook* dengan kondisi di lapangan [11].

Life Cycle Impact Assessment

Life Cycle Impact Assessment (LCIA) merupakan tahapan yang dilakukan guna memahami dan mengevaluasi besaran dampak lingkungan yang berpotensi dari sistem produksi daur hidup produk [12]. Metode LCIA yang digunakan adalah metode ReCiPe 2016 (H). Metode ReCiPe 2016 tipe *Hierarchist* (H) didasarkan pada kesepakatan ilmiah berdasarkan jangka waktu dan kemungkinan mekanisme dampak, sehingga sangat cocok untuk digunakan dalam kajian ilmiah [NO_PRINTED_FORM] [13]. Tahapan LCIA dibagi menjadi 3 tahap yaitu karakterisasi, normalisasi dan pembobotan.

Faktor karakterisasi yang dapat *digunakan* berdasarkan jalur dampaknya, yaitu pendekatan *midpoint* dan *endpoint*. Pendekatan *midpoint* lebih berfokus pada masalah lingkungan tunggal yang menggambarkan sebab akibat dampak lingkungan muncul berdasarkan hasil LCI. Pendekatan *endpoint* menghasilkan dampak lingkungan dengan tingkat pengkategorian yang lebih tinggi dan besar, seperti *human health*, *ecosystem quality*, dan *natural resources* [14].

Normalisasi adalah menghitung besaran hasil indikator kategori *relative* terhadap informasi acuan [9]. Umumnya metode LCIA sudah menyediakan faktor normalisasi yang dapat dihitung dari skor karakterisasi. [15]. Normalisasi dilakukan untuk mempermudah analisis dalam membandingkan besaran dampak antar kategori dampak [16].

Pembobotan adalah proses mengkonversi hasil indikator dari kategori dampak yang berbeda menggunakan faktor pembobotan [9]. Pembobotan dapat digunakan untuk menentukan dampak mana yang paling penting [16].

Interpretasi

Interpretasi merupakan gabungan dari *goal and scope*, LCI, dan LCIA, yang bertujuan melakukan pengambilan kesimpulan akhir. Tahapan Interpretasi bertujuan mengidentifikasi tahap *life cycle* yang pada kondisi tertentu dapat mengurangi *environmental impact* [17].

Kebutuhan Data

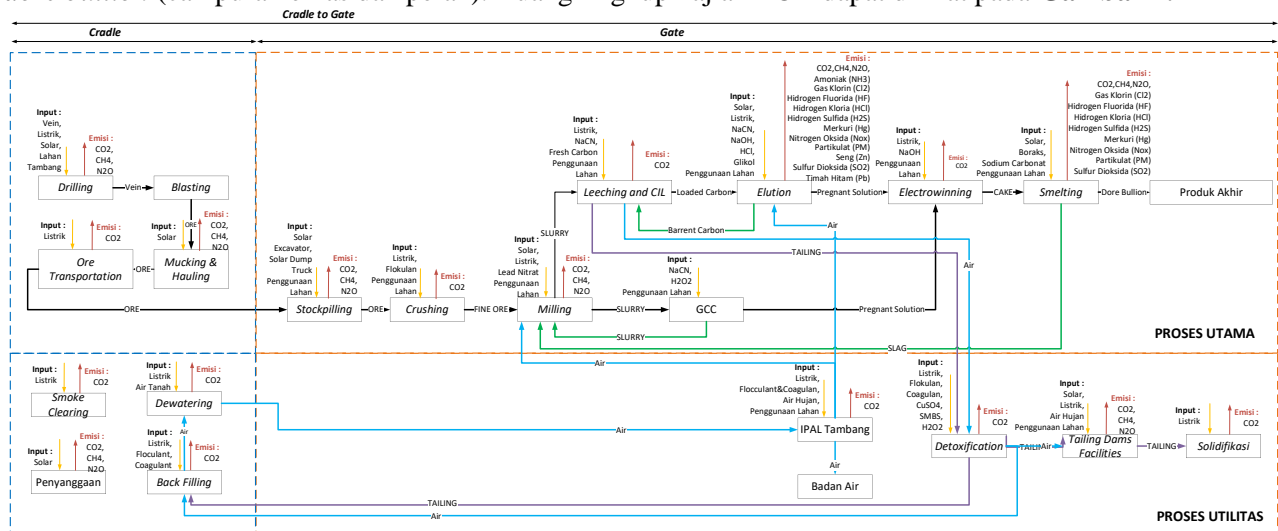
Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari pihak perusahaan. Data yang digunakan dalam rentang waktu pada periode 1 tahun. Data sekunder yang dibutuhkan untuk penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Jenis dan Pengambilan Data

No.	Jenis Data	Metode Pengambilan Data	Durasi Data
1.	Alur proses produksi <i>dore bullion</i>	Data sekunder	-
2.	Detail komponen masing-masing unit proses	Data sekunder	-
3.	Data jumlah bahan baku dan produk dari setiap unit proses	Data sekunder	1 tahun
4.	Data jumlah bahan bakar dan/atau energi listrik yang digunakan dari setiap unit proses	Data sekunder	1 tahun
5.	Data jumlah emisi dan penggunaan air yang dihasilkan disetiap unit proses	Data sekunder	1 tahun
6.	Data dan informasi yang mendukung terhadap penilaian kualitas data	Data sekunder	1 tahun
7.	Data jumlah produk yang dihasilkan	Data sekunder	1 tahun

3. Hasil dan Pembahasan Goal and Scope

Goal and scope dari penelitian ini adalah menganalisis potensi dampak lingkungan proses produksi pertambangan *dore bullion* berdasarkan kajian LCA. Scope lingkup kajian LCA yang dilakukan yaitu *cradle to gate* mulai dari proses penambangan *ore* di dalam tanah sampai pemrosesan bahan setengah jadi *dore bullion* (campuran emas dan perak). Ruang lingkup kajian LCA dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Produksi *Dore Bullion*
Sumber : Hasil penelitian, (2024)

Life Cycle Inventory

Life Cycle Inventory berisi data *input* dan *output* setiap unit proses produksi *dore bullion*. Data yang telah didapat kemudian dilakukan normalisasi dengan produk utama yaitu *dore bullion*. Normalisasi adalah input dan output data pada setiap unit proses dibagi dengan produk akhir *dore bullion*. Berikut merupakan data inventori yang digunakan dalam kajian LCA.

Tabel 2. Data Cradle & Gate *Dore Bullion*

No	Jenis Data	Jumlah	Satuan
1	Ore	40.102,3729	ton/ton
2	Penggunaan lahan	3,3675	ha/ton
3	Listrik	4.880.722,9379	kWh/ton
4	Solar	146.102,3390	liter/ton
5	Air	4.213.229,7353	m ³ /ton
6	CO ₂	5.268,3921	ton/ton
7	CH ₄	0,0136	ton/ton
8	N ₂ O	0,0125	ton/ton
9	NaOH	35,5932	set/ton
10	HCl	18,6575	m ³ /ton

No	Jenis Data	Jumlah	Satuan
11	Glikol	0,7373	ton/ton
12	Amoniak (NH ₃)	0,0011	ton/ton
13	Gas klorin (Cl ₂)	0,0316	ton/ton
14	Hidrogen fluorida (HF)	0,0305	ton/ton
15	Hidrogen klorida (HCl)	0,6859	ton/ton
16	Hidrogen sulfida (H ₂ S)	0,0124	ton/ton
17	Merkuri (Hg)	0,0000	ton/ton
18	Nitrogen oksida (NO _x)	1,0768	ton/ton
19	Partikulat (PM)	0,3661	ton/ton
20	Seng (Zn)	0,0023	ton/ton
21	Sulfur dioksida (SO ₂)	0,4746	ton/ton
22	Timah hitam (Pb)	0,0023	ton/ton
23	Cake	1,3405	ton/ton
24	Boraks	0,0873	ton/ton
25	Sodium karbonat	0,0282	ton/ton
26	<i>Dore bullion</i>	1,0000	ton/ton
27	<i>Flocculant</i>	0,3322	ton/ton
28	Koagulan konsentrat	0,8054	ton/ton
29	Koagulan	0,0198	ton/ton
30	CuSO ₄	3,0288	ton/ton
31	SMBS	42,2514	ton/ton
32	Penyanggaan <i>steel support</i>	35,5932	set/ton
33	Penyanggaan <i>shotcrete</i>	522,0339	m ³ /ton

Sumber : Hasil penelitian, (2024)

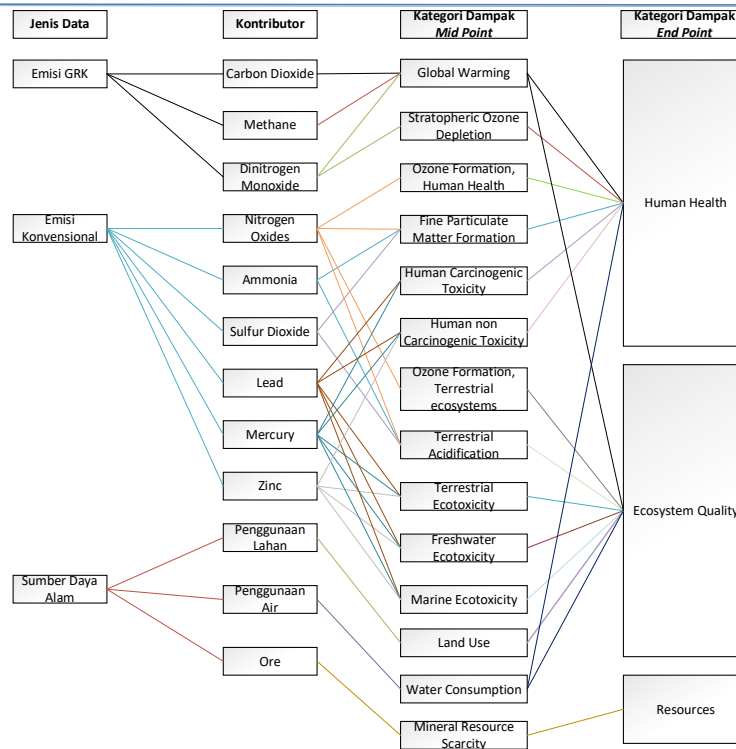
Life Cycle Impact Assessment

a. Klasifikasi

Klasifikasi dampak dilakukan berdasarkan inventarisasi inventori dengan metode ReCiPe 2016 (H). Klasifikasi inventori dapat dilihat pada **Gambar 2**. Data penggunaan bahan bakar solar dan penggunaan listrik menghasilkan emisi gas rumah kaca berupa CO₂, CH₄, dan N₂O yang tergolong dalam kategori dampak *midpoint* yaitu *global warming* dan *stratospheric ozone depletion* dengan dampak *endpoint* yaitu *human health* dan *ecosystem quality*.

Emisi konvensional yang dihasilkan dari proses produksi *dore bullion* yaitu NO_x, NH₃, SO₂, Pb, Hg, dan Zn menyebabkan dampak *midpoint* dan *endpoint*. Emisi ini dihasilkan dari proses produksi *dore bullion* dimana zat tersebut berasal dari penambahan bahan kimia ataupun berasal dari dalam bumi. Dampak *midpoint* yang dihasilkan dari emisi konvensional meliputi *ozone formation human health*, *fine particulate matter formation*, *ozone formation terrestrial ecosystems*, *terrestrial acidification*, *terrestrial ecotoxicity*, *freshwater ecotoxicity*, *marine ecotoxicity*, *human carcinogenic toxicity*, dan *human non-carcinogenic toxicity* dengan dampak *endpoint* yaitu *human health* dan *ecosystem quality*.

Proses sumber daya alam menggunakan data yang berasal dari penggunaan lahan, air tanah dan proses *ore*. Dalam kategori *midpoint* dampak yang dihasilkan adalah *land use*, *water consumption*, dan *mineral resources scarcity*. Dengan kategori *endpoint* yaitu *human health*, *ecosystem quality*, dan *resources*. Kategori dampak *land use* berasal dari penggunaan lahan di masing-masing unit proses, sedangkan kategori dampak *water consumption* didapatkan dari penggunaan air tanah pada proses produksi *dore bullion* terutama pada *drilling*, *milling* dan *elution*, sedangkan kategori dampak *resources* didapatkan dari proses pengerukan *ore* pada proses *drilling* yang bertujuan untuk mendapatkan bahan baku tanah yang akan diproses.



Gambar 2. Klasifikasi Dampak Proses Produksi Dari Inventori
Sumber : Hasil penelitian, (2024)

b. Karakterisasi

Metode karakterisasi dampak menggunakan ReCiPe 2016 (H). Metode ReCiPe 2016 membagi indikator menjadi dua tingkatan yaitu 18 indikator *midpoint* dan 3 indikator *endpoint*. Karakterisasi proses produksi *dore bullion* dapat dilihat pada Tabel 3.

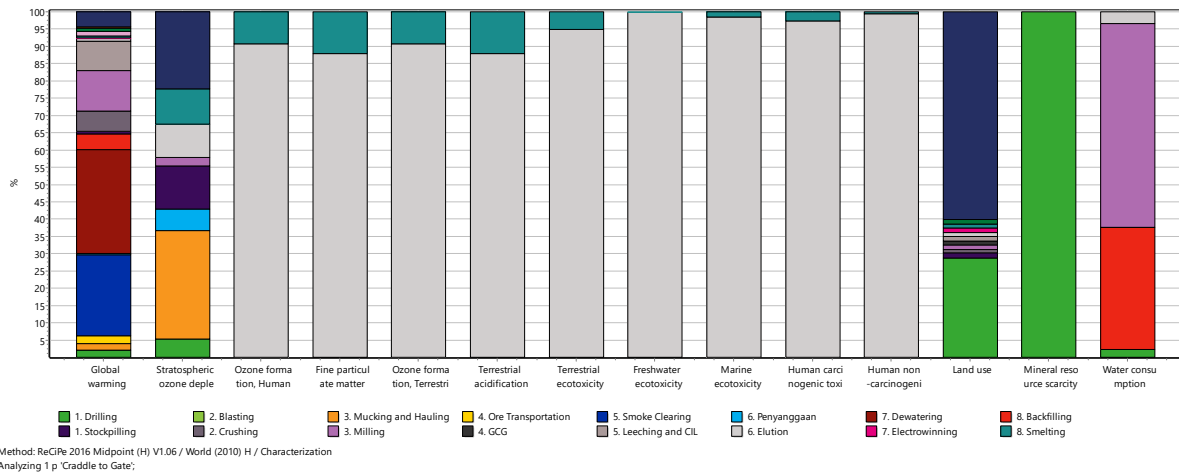
Tabel 3. Karakterisasi Dampak *Dore Bullion*

Kategori Dampak	Karakterisasi	Satuan
<i>Midpoint</i>		
Global warming	4.514.295,80	kg CO ₂ eq
Stratospheric ozone depletion	0,15	kg CFC11 eq
Ozone formation, human health	1.186,44	kg NO _x eq
Fine particulate matter formation	291,6723	kg PM _{2.5} eq
Ozone formation, terrestrial ecosystems	1.186,44	kg NO _x eq
Terrestrial acidification	984,1356	kg SO ₂ eq
Terrestrial ecotoxicity	482.937,85	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	13,4894	kg 1,4-DCB
Marine ecotoxicity	282,6215	kg 1,4-DCB
Human carcinogenic toxicity	45,9661	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	70.440,68	kg 1,4-DCB
Land use	24.582,44	m ² a crop eq
Mineral resource scarcity	149.581.850.000	kg Cu eq
Water consumption	167.905,36	m ³
<i>Endpoint</i>		
Human health	4,7626	DALY
Ecosystems	0,015	species.yr
Resources	34.608.348.000	USD2013

Sumber : Hasil penelitian, (2024)

Berdasarkan Tabel 3, hasil karakterisasi 1 ton produksi *dore bullion* menghasilkan 14 dampak *midpoint* dan 3 dampak *endpoint*. Dampak *midpoint* yang muncul yaitu *global warming* sebesar

4.514.295,80 kg CO₂ eq/ton *dore bullion*, dampak *stratospheric ozone depletion* sebesar (0,15 kg CFC11 eq), dampak *ozone formation – human health* sebesar (1.186,4407 kg NO_x eq), dampak *Fine particulate matter formation* sebesar (291,6723 kg PM_{2.5} eq), dampak *ozone formation - terrestrial ecosystems* sebesar (1.186,4407 kg NO_x eq), dampak *terrestrial acidification* sebesar (984,1356 kg SO₂ eq), dampak *terrestrial ecotoxicity* sebesar (482.937,85 kg 1,4-DCB), dampak *freshwater ecotoxicity* sebesar (13,4894 kg 1,4-DCB), dampak *marine ecotoxicity* sebesar (282,6215 kg 1,4-DCB), dampak *human carcinogenic toxicity* sebesar (45,9661 kg 1,4-DCB), dampak *human non-carcinogenic toxicity* sebesar (70.440,6780 kg 1,4-DCB), dampak *land use* sebesar (24.582,4410 m²a crop eq), dampak *mineral resource scarcity* (149.581.850.000 kg Cu eq), dampak *water consumption* (167.905,3600 m³), untuk *endpoint* yaitu dampak *human health* (4,7626 DALY), dampak *ecosystem quality* (0,0150 species.yr), dan dampak *resources* (34.608.348.000 USD2013). Persentase karakterisasi *midpoint* dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Karakterisasi Midpoint Produksi *Dore Bullion*

Sumber : Hasil penelitian, (2024)

c. Normalisasi

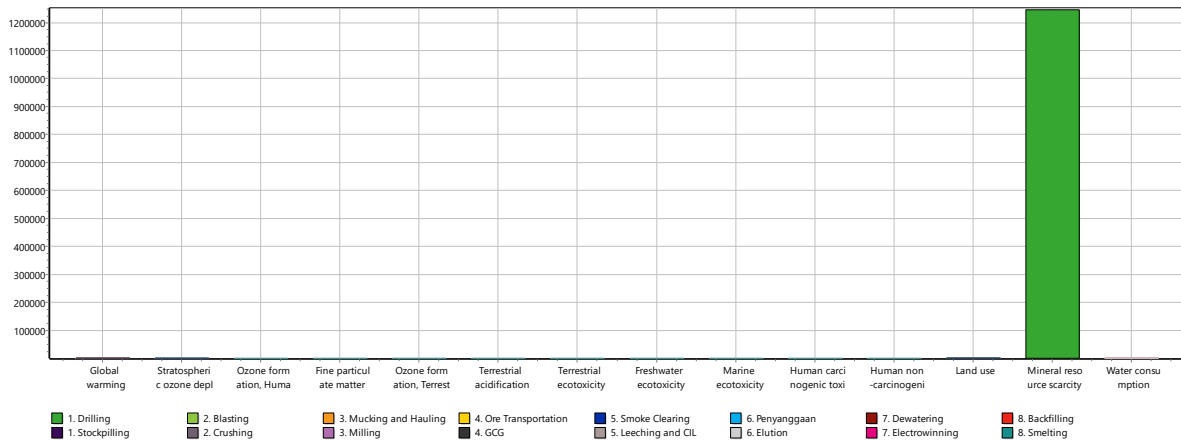
Skor *normalisasi* merupakan hasil pembagian dampak karakterisasi dengan faktor normalisasi (tanpa satuan). Faktor normalisasi yang digunakan bersumber dari metode ReCiPe 2016 (H). Normalisasi proses produksi *dore bullion* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Normalisasi Dampak *Dore Bullion*

Kategori Dampak	Normalisasi
<i>Midpoint</i>	
<i>Global warming</i>	564,2870
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	2,5035
<i>Ozone formation, Human health</i>	57,6610
<i>Fine particulate matter formation</i>	11,4044
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	66,7966
<i>Terrestrial acidification</i>	24,0129
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	31,7773
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	0,5355
<i>Marine ecotoxicity</i>	6,5003
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	4,4633
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	2,2541
<i>Land use</i>	3,9824
<i>Mineral resource scarcity</i>	1.246.016,80
<i>Water consumption</i>	629,6451
<i>Endpoint</i>	
<i>Human health</i>	198,6017
<i>Ecosystems</i>	10,4730
<i>Resources</i>	1.235.518,00

Sumber : Hasil penelitian, (2024)

Berdasarkan pada **Tabel 4** kategori dampak *midpoint* dengan skor normalisasi terbesar adalah *mineral resources scarcity* (1.246.016,80), urutan dampak *midpoint* dari yang terbesar adalah *mineral resources scarcity* (1.246.016,80), *water consumption* (629,6451), *global warming* (564,2870), *ozone formation*, *terrestrial ecosystems* (66,7966), *ozone formation*, *human health* (57,6610), *terrestrial ecotoxicity* (31,7773), *terrestrial acidification* (24,0129), *fine particulate matter formation* (11,4044), *marine ecotoxicity* (6,5003), *human carcinogenic toxicity* (4,4633), *land use* (3,9824), *stratospheric ozone depletion* (2,5035), *human non-carcinogenic toxicity* (2,2541), *freshwater ecotoxicity* (0,5355), sedangkan kategori dampak *endpoint* dengan skor normalisasi terbesar adalah *resources* (1.235.518). Urutan kategori dampak *endpoint* dari yang terbesar adalah *resources* (1.235.518), *human health* (198,6017) dan *Ecosystem quality* (10,4730). Normalisasi dampak per unit proses dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Normalisasi Dampak Proses Produksi *Dore Bullion*

Sumber : Hasil penelitian, (2024)

d. Pembobotan

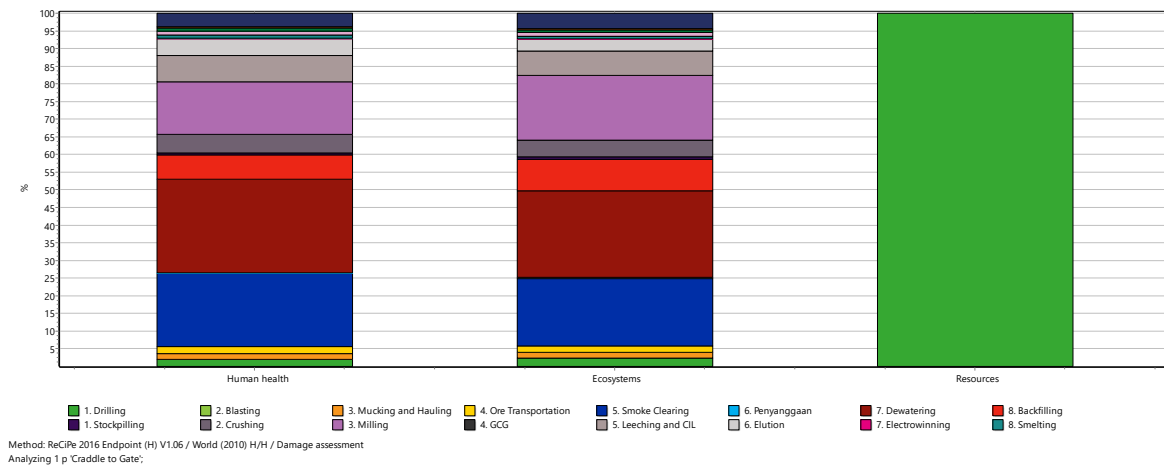
Faktor pembobotan yang digunakan bersumber dari metode ReCiPe 2016 (H) / World (2010) H/H. Kategori dampak *endpoint* setelah dilakukan pembobotan akan menghasilkan skor tunggal dengan satuan *point* (Pt).

Tabel 5. Pembobotan Dampak Proses Produksi *Dore Bullion*

Kategori Dampak	Pembobotan	Satuan
<i>Human health</i>	59.580,4950	Pt
<i>Ecosystems</i>	4.189,2012	Pt
<i>Resources</i>	370.655.400,0000	Pt

Sumber : Hasil penelitian, (2024)

Berdasarkan **Tabel 5**, pembobotan dampak *endpoint* paling besar adalah dampak *resources* (370.655.400 Pt). Urutan dampak *endpoint* berdasarkan pembobotan adalah *resources* (370.655.400 Pt), *human health* (59.580,4950 Pt), dan *ecosystem quality* (4.189,2012 Pt), dengan nilai total dampak yang dihasilkan (370.719.169,6962 Pt). Persentase pembobotan proses produksi *dore bullion* dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Pembobotan Endpoint Per Unit Proses
Sumber : Hasil penelitian, (2024)

Interpretasi

Berdasarkan Tabel 3, hasil karakterisasi 1 ton produksi *dore bullion* menghasilkan 14 kategori dampak *midpoint* dan 3 kategori dampak *endpoint*. Berdasarkan Gambar 3, kontributor utama kategori dampak *global warming* dan *stratospheric ozone depletion* adalah unit proses *dewatering* dan *mucking and hauling*. Kontributor dampak *global warming* terbesar adalah *dewatering* dengan persentase karakterisasi sebesar 30,1%. Hal ini dikarenakan unit *dewatering* menggunakan energi listrik yang besar untuk melakukan pemompaan air tanah yang muncul saat proses penambangan. Dampak *stratospheric ozone depletion* terbesar berada pada unit *mucking and hauling* sebesar 31,4% penyebab tingginya dampak ini dikarenakan *substance N₂O* yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar kendaraan untuk transportasi *ore*.

Kategori dampak yang diakibatkan emisi konvensional mayoritas berada pada unit proses *elution*. Dampak yang dihasilkan dari unit proses *elution* yaitu *ozone formation -human health* sebesar (90,8%), *fine particulate matter formation* sebesar (87,9%), *ozone formation - terrestrial ecosystems* sebesar (90,8%), *terrestrial acidification* sebesar (87,8%), *terrestrial ecotoxicity* sebesar (94,8%), *freshwater ecotoxicity* sebesar (99,9%), *marine ecotoxicity* sebesar (98,5%), *human carcinogenic toxicity* sebesar (97,3%), dan *human non-carcinogenic toxicity* sebesar (99,4%). Hal ini diakibatkan karena unit *elution*, menggunakan *fuel gas* yang besar serta emisi lain yang dihasilkan dari penguapan bahan kimia dan logam berat selama operasional proses produksi.

Kategori dampak yang dihasilkan dari penggunaan sumber daya alam (mineral, air, dan tanah) yaitu *mineral resource scarcity*, *water consumption*, dan *land use*. Kontributor dampak *mineral resource scarcity* terbesar adalah unit proses *drilling* dengan persentase karakterisasi sebesar 100%. Dampak ini disebabkan adanya proses pengambilan *ore* dari dalam tanah. Dampak *land use* terbesar berada pada unit proses *tailing dams facilities* sebesar 60,2%. Dampak ini disebabkan unit proses *tailing dams facilities* menggunakan banyak lahan yang berfungsi untuk menampung limbah *tailing* sisa proses produksi. Kontributor dampak *water consumption* terbesar adalah unit proses *milling* dengan persentase karakterisasi sebesar 58,9%. Dampak *water consumption* yang besar disebabkan pada tahap ini unit proses *milling* menggunakan air untuk proses penghancuran partikel dari *fine ore* menjadi *slurry*.

Kontributor utama dampak *endpoint human health* dan *ecosystem* adalah unit proses *dewatering* sebesar 26,4% dan 24,5%, Sementara untuk dampak *resources* adalah unit proses *drilling* sebesar 100%.

4. Kesimpulan

Potensi dampak yang timbul dari kajian LCA proses produksi *dore bullion* menggunakan metode ReCiPe 2016 (H) adalah 14 dampak *midpoint* dan 3 dampak *endpoint*. Dampak *midpoint* yang paling dominan adalah *mineral resource scarcity* sebesar 149.581.850.000 kg Cu eq, *water consumption* sebesar 167.905,36 m³, dan *global warming* sebesar 4.514.295,80 kg CO² eq. Urutan kategori dampak *endpoint* adalah *resources* sebesar 34.608.348.000 USD2013, *human health* sebesar 4,7626 DALY, dan *ecosystem quality* sebesar 0,0150 species.yr. Kontributor dampak terbesar yaitu unit proses *drilling* (*mineral resource scarcity*), unit proses *milling* (*water consumption*) dan unit proses *dewatering* (*global warming*).

5. Referensi

- [1] Litbang Kompas, “Realisasi Produksi Emas Indonesia 2017-2022,” www.data.kompas.id. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://data.kompas.id/data-detail/kompas_statistic/6408b9ed10bac3390da6bad4
- [2] M. B. Mooiman and L. Simpson, “Refining of Gold- and Silver-Bearing Doré,” *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*, pp. 595–615, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00034-7.
- [3] A. Basuki, D. Aditya Sumanagara, and D. Sinambela, “The Gunung Pongkor gold-silver deposit, West Java, Indonesia,” *J Geochem Explor*, vol. 50, no. 1–3, pp. 371–391, Mar. 1994, doi: 10.1016/0375-6742(94)90032-9.
- [4] W. Chen *et al.*, “Life cycle assessment of gold production in China,” *J Clean Prod*, vol. 179, pp. 143–150, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.114.
- [5] H. Ferreira and M. G. P. Leite, “A Life Cycle Assessment study of iron ore mining,” *J Clean Prod*, vol. 108, pp. 1081–1091, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.140.
- [6] O. Jolliet, M. Saade-Sbeih, S. Shaked, A. Jolliet, and P. Crettaz, *Environmental Life Cycle Assessment*. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [7] Hermawan, P. F. Marzuki, M. Abduh, and R. Driejana, “Peran Life Cycle Analysis (LCA) Pada Material Konstruksi Dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Karbon Dioksida Pada Efek Gas Rumah Kaca,” in *Konfrensi Nasional Teknik Sipil 7*, Y. Arfiadi and S. As’ad, Eds., Surakarta: Universitas Sebelas Maret (UNS), Oct. 2013, pp. 47–52.
- [8] Bayer Charlene, Gamble Michael, Gentry Russell, and Joshi Surabhi, *AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice Authorship and Acknowledgements A Guide to Life Cycle Assessment of Buildings 2*. New York: The American Institute of Architects, 2010.
- [9] SNI ISO 14044, *Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup – Persyaratan dan Panduan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2017.
- [10] Sonnemann Guido, Tsang Michael, and Schuhmacher Marta, *Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes and Products Second Edition*. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [11] EPA QA/G-8, “Guidance on Environmental Data Verification and Data Validation EPA QA/G-8,” Washington, DC, 2002. [Online]. Available: www.epa.gov/quality
- [12] SNI ISO 14040, *Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup – Prinsip dan Kerangka Kerja*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2016.
- [13] M. A. J. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [14] K. A. I. Menoufi, *Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: a state of the art*. Maig: Universitat de Lleida, 2011. Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10459.1/45831>
- [15] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, and S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- [16] M. Esa, A. Bagaswara, and Y. Hadi, “Analisis dan Rekayasa Proses Produksi untuk Mengendalikan Environmental Impact Menggunakan Metode LCA,” 2017. [Online]. Available: <http://ojs.atmajaya.ac.id/index.php/metrisTelp>.
- [17] T. R. Harjanto and S. Bahri, “Life Cycle Assessment Pilihan Penggunaan Alat Transportasi Bagi Siswa SMA di Cilacap Dalam Kerangka Penerapan Mekanisme Pembangunan Bersih,” in *Jurnal Rekayasa Teknologi Industri Hijau RATIH VOL.2 Edisi 1*, 2018, pp. 1–13.