© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1473-1483 *ISSN 1829-8907*

Analisis Komparatif Dampak Implementasi Program Pengelolaan Lingkungan pada *Hotspot* Pertambangan Batubara Menggunakan *Life Cycle Assessment*

Muhamad Hari Rahmawan[1], Budi Warsito[2], Fuad Muhammad[1], dan Mislia Shinta[3]

[1]Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia; e-mail: muhamadhrahmawan@gmail.com
[2]Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia
[3]PT Bhumi Rantau Energi, Jakarta, Indonesia

ABSTRAK

Penilaian dampak lingkungan pada pertambangan batubara umumnya berfokus pada kepatuhan baku mutu atau identifikasi profil dampak dan *hotspot*, sehingga pengukuran kuantitatif perubahan dampak setelah program dijalankan masih terbatas. Penelitian ini mengidentifikasi *hotspot* dampak lingkungan produksi batubara PT Bhumi Rantau Energi, serta mengevaluasi perubahan dampak sebelum (2023) dan sesudah (2024) implementasi program. *Life Cycle Assessment* (LCA) *cradle-to-gate* diterapkan dengan unit fungsi 1 ton batubara, metode CML-IA *Baseline*, dan perangkat lunak SimaPro 9.5.0.0 pada kategori *global warming potential* (GWP), *acidification potential* (AP), dan *eutrophication potential* (EP), sedangkan prioritas program lanjutan ditentukan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Data inventori dari dokumen lingkungan perusahaan berkualitas sangat baik berdasarkan penilaian *Data Quality Rating* (DQR). *Hotspot* ketiga kategori terkonsentrasi pada unit *topsoil* dan *overburden removal* serta *coal hauling*, yang didominasi pembakaran bahan bakar, rantai pasok biodiesel (FAME), dan bahan peledak amonium nitrat. Intensitas dampak per ton batubara menurun pada ketiga kategori, dengan GWP turun sekitar 13%. Pada unit proses sasaran, teknologi *air deck* dan substitusi *bucket* CAT980NG berasosiasi dengan penurunan dampak sekitar 4-24%, terutama melalui berkurangnya konsumsi bahan bakar, sementara kontribusi FAME justru meningkat. Karena kondisi operasional 2023 dan 2024 juga berubah, penurunan tersebut dipandang sebagai indikasi efektivitas program, bukan atribusi tunggal. Optimisasi jarak dan rute angkut menjadi prioritas program lanjutan karena menyasar ketiga kategori dampak dengan biaya rendah. Kebaruan penelitian ini terletak pada LCA komparatif sebelum-sesudah pada tingkat unit proses yang ditelusuri hingga aliran inventori dan dipadukan dengan AHP untuk mengevaluasi realisasi program pengelolaan lingkungan, tidak berhenti pada identifikasi *hotspot*.

***Kata kunci*:** life cycle assessment, batubara, global warming potential, acidification potential, eutrophication potential, hotspot, analisis komparatif

ABSTRACT

Environmental assessment in coal mining generally stops at regulatory compliance or at identifying impact profiles and hotspots, so impact changes after programs are rarely quantified. This study identifies environmental hotspots of coal production at PT Bhumi Rantau Energi and evaluates impact changes before (2023) and after (2024) implementation. A cradle-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) used a functional unit of 1 tonne of coal, the CML-IA Baseline method, and SimaPro 9.5.0.0 for global warming potential (GWP), acidification potential (AP), and eutrophication potential (EP); follow-up programs were prioritised using the Analytical Hierarchy Process (AHP). Inventory data from company environmental documents showed very good quality under the Data Quality Rating (DQR). Hotspots in all three categories were concentrated in topsoil and overburden removal and coal hauling, dominated by fuel combustion, the biodiesel (FAME) supply chain, and ammonium nitrate explosives. Impact intensity per tonne of coal decreased in all three categories, with GWP down about 13%. In the targeted unit processes, air deck technology and the CAT980NG bucket substitution were associated with reductions of about 4-24%, mainly through lower fuel use, while the FAME contribution increased. As operating conditions also changed between 2023 and 2024, the reductions suggest program effectiveness, not sole attribution. Optimising hauling distance and routes emerged as the priority follow-up program, targeting all three impact categories at low cost. The novelty lies in unit-process-level before-after comparative LCA, traced to inventory flows and coupled with AHP, to evaluate realised program performance rather than stopping at hotspot identification.

***Keywords*:** life cycle assessment, coal, global warming potential, acidification potential, eutrophication potential, hotspot, comparative analysis

Citation: Rahmawan, M. H., Warsito, B., Muhammad, F., dan Shinta, M. (2026). Analisis Komparatif Dampak Implementasi Program Pengelolaan Lingkungan pada *Hotspot* Pertambangan Batubara Menggunakan *Life Cycle Assessment*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24 (6), 1473-1483, doi:10.14710/jil.24.6.1473-1483

1. LATAR BELAKANG

Batubara masih menjadi salah satu komoditas energi utama dalam struktur pasokan energi global. Penghentian penggunaannya memerlukan peta jalan bertahap yang memperhitungkan transisi yang adil bagi wilayah dan pekerja yang bergantung pada sektor ini (Jakob *et al.*, 2020). Selama masa transisi tersebut, kegiatan pertambangan dituntut menerapkan prinsip pembangunan berkelanjutan di sepanjang daur hidup tambang (Asr *et al.*, 2019; Monteiro *et al.*, 2019).

Meskipun memberikan kontribusi besar terhadap penyediaan energi, kegiatan produksi batubara menimbulkan dampak lingkungan yang serius. Tahapan seperti pembukaan lahan, pengupasan tanah penutup, penggunaan alat berat berbahan bakar diesel, konsumsi listrik fosil, dan pengelolaan limbah operasional dapat memengaruhi perubahan iklim maupun kualitas ekosistem di sekitar tambang (Tughyan, 2020). Penilaian dampak pada sektor ini selama ini sering berfokus pada satu tahap proses, seperti pengukuran kualitas udara atau air untuk kepatuhan baku mutu. Pendekatan tersebut penting untuk pemenuhan regulasi, namun belum menggambarkan dampak kumulatif dan berisiko menyebabkan perpindahan dampak (burden shifting) karena tidak diinterpretasikan secara sistemik (Finnveden *et al.*, 2009).

Pengelolaan lingkungan pada *hotspot* tambang batubara memiliki signifikansi strategis karena beban lingkungan siklus hidup umumnya terkonsentrasi pada sedikit unit proses, terutama pemindahan tanah penutup dan pengangkutan batubara yang bergantung pada bahan bakar diesel (Diharjo & Manik, 2023; Tao *et al.*, 2024). Intervensi yang diarahkan tepat pada *hotspot* berpotensi memberikan penurunan dampak per ton produk yang lebih besar dibandingkan perbaikan yang tersebar merata, sehingga menjadi dasar alokasi sumber daya pengelolaan lingkungan yang efisien. Dari sisi regulasi, kewajiban pengelolaan tersebut berakar pada Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU PPLH) yang mewajibkan setiap penanggung jawab usaha mencegah dan menanggulangi pencemaran serta kerusakan lingkungan hidup (Republik Indonesia, 2009), serta Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020 tentang Perubahan atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara (UU Minerba) yang mewajibkan pemegang izin menerapkan kaidah teknik pertambangan yang baik, termasuk pengelolaan dan pemantauan lingkungan, reklamasi, dan pascatambang (Republik Indonesia, 2020). Selain itu, Peraturan Menteri LH/BPLH No. 7 Tahun 2025 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup menetapkan LCA sebagai salah satu indikator penilaian PROPER (Kementerian LH, 2025). Peran LCA dalam menunjang perolehan peringkat PROPER telah dikaji pada industri mineral (Handayani & Hanaseta, 2022), dan pengaruh program pengungkapan kinerja lingkungan berskala nasional terhadap kinerja perusahaan juga telah diteliti (Ahmad *et al.*, 2019). Dengan demikian, LCA tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis ilmiah, tetapi juga sebagai instrumen pembuktian kinerja lingkungan yang diakui dalam kerangka regulasi nasional.

Metode Life Cycle Assessment (LCA) sebagaimana distandarkan dalam SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017 dapat menjadi pendekatan yang relevan untuk mengevaluasi dampak lingkungan secara lebih komprehensif. Penerapan LCA di industri pertambangan maupun di Indonesia terus berkembang (Awuah-Offei & Adekpedjou, 2011; Wiloso *et al.*, 2019). LCA memungkinkan penilaian dampak dari seluruh rangkaian proses produksi, dari pembukaan lahan hingga batubara siap dipasarkan (cradle-to-gate), serta mengidentifikasi unit proses yang menjadi hotspot (Badan Standardisasi Nasional, 2016). Batasan cradle-to-gate dinilai lebih sesuai dibandingkan cradle-to-grave karena sejalan dengan batas kendali operasional perusahaan sehingga data lebih mudah ditelusuri dan ketidakpastiannya lebih rendah (Triatmojo *et al.*, 2024).

Kategori dampak yang paling relevan pada sistem produksi batubara meliputi global warming potential (GWP), acidification potential (AP), dan eutrophication potential (EP) (Tao *et al.*, 2024). GWP menggambarkan kontribusi emisi gas rumah kaca, terutama CO_2 dan CH_4, dengan penggunaan diesel pada pemindahan material umumnya menjadi kontributor terbesar (Diharjo & Manik, 2023). AP menunjukkan potensi pembentukan hujan asam akibat emisi SO_2 dan NOx (Huijbregts *et al.*, 2017; Nasihah, 2018), sedangkan EP menggambarkan potensi akumulasi nutrien, terutama nitrogen dan fosfor, pada badan air dan tanah (Tao *et al.*, 2024). Kategori ozone depletion potential (ODP) dikecualikan karena proses utama penambangan terbuka tidak menggunakan maupun menghasilkan bahan perusak ozon, sesuai prinsip cut-off criteria pada SNI ISO 14040:2016 (Badan Standardisasi Nasional, 2016).

Penerapan LCA pada pertambangan batubara di Indonesia terus berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Darpawanto *et al.* (2022) mengkaji dampak lingkungan produksi batubara PT Berau Coal–Site Sambarata dengan kerangka SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017; Firdausy *et al.* (2022) menganalisis produksi batubara di Kalimantan Selatan dengan pendekatan *cradle-to-gate* menggunakan OpenLCA; Diharjo & Manik (2023) mengidentifikasi dampak lingkungan proses penambangan batubara di Kalimantan Timur dalam konteks pemenuhan kriteria PROPER; sedangkan Mahmud *et al.* (2022) menilai emisi GRK dan asidifikasi rantai pasok batubara menuju PLTU serta merumuskan skenario penurunan emisi melalui substitusi biosolar, efisiensi transportasi laut, dan penggantian truk dengan *overland conveyor*. Pada

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

tingkat internasional, Lelek & Kulczycka (2021) menilai dampak siklus hidup tambang lignit terbuka, dan Tao *et al.* (2024) menunjukkan bahwa profil dampak tambang batubara bervariasi menurut skala operasi dan berubah dari waktu ke waktu. Studi lain menilai operasi tambang batubara secara umum (Burchart-Korol *et al.*, 2016), tambang bawah tanah di Tiongkok (Tao *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022), tambang terbuka di Tiongkok (Zhang *et al.*, 2018), dan ekstraksi batubara di Bangladesh (Roy *et al.*, 2023). Di Indonesia, Tampubolon *et al.* (2021) memakai LCA untuk menyusun strategi pemanfaatan energi dan pengelolaan dampak tambang batubara, sedangkan Yuniarto & Amalia (2022) memakainya untuk menentukan program perbaikan lingkungan terhadap emisi penambangan batubara.

Meskipun demikian, studi-studi tersebut umumnya masih berupa profil dampak pada satu periode atau rekomendasi berbasis skenario hipotetis, sehingga belum mengukur realisasi efektivitas program pengelolaan lingkungan yang benar-benar telah diimplementasikan. Studi LCA komparatif sebelum–sesudah implementasi program pada *hotspot* tambang batubara masih sangat langka di Indonesia. Padahal, pendekatan komparatif yang dinormalisasi terhadap unit fungsi diperlukan untuk membuktikan bahwa penurunan dampak bersumber dari intervensi program, bukan dari perubahan volume produksi, sekaligus untuk mendeteksi potensi perpindahan dampak antarkategori maupun antartahap daur hidup.

Untuk mengisi kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dampak lingkungan dan mengidentifikasi hotspot pada proses produksi batubara PT Bhumi Rantau Energi di Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan, serta melakukan analisis komparatif kondisi sebelum dan sesudah implementasi program pengelolaan lingkungan pada kategori GWP, AP, dan EP, sehingga dapat dirumuskan rekomendasi perbaikan berbasis bukti ilmiah.

Kebaruan dan kontribusi ilmiah penelitian ini adalah sebagai berikut. Pertama, LCA digunakan sebagai alat evaluasi kinerja program melalui perbandingan sebelum–sesudah implementasi pada tingkat unit proses *hotspot*, tidak hanya sebagai alat diagnosis profil dampak. Kedua, perubahan dampak ditelusuri hingga aliran inventori penyebabnya, sehingga potensi perpindahan beban (*burden shifting*) ke hulu rantai pasok dapat terdeteksi. Ketiga, hasil LCA dipadukan dengan AHP untuk menentukan prioritas program lanjutan yang mempertimbangkan target penurunan dampak, biaya, dan kemudahan pelaksanaan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan penilaian daur hidup produksi batubara PT Bhumi Rantau Energi yang berlokasi di Bitahan Baru, Kecamatan Lokpaikat, Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan. Batasan sistem yang digunakan adalah cradle-to-gate yang mencakup proses hulu (*land clearing, topsoil* dan *overburden removal*), proses inti (*coal getting, coal hauling, coal crushing, stockpile, dan coal barging*), serta kegiatan utilitas (kantor, *settling pond*, genset, reklamasi, dan *workshop*). Unit fungsi yang digunakan adalah 1 ton batubara. Data yang digunakan diperoleh pada periode Januari 2023-Desember 2024.

Pengolahan data dilakukan menggunakan metode LCA mengacu pada SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017, meliputi penetapan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, penilaian dampak, dan interpretasi hasil. Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak SimaPro versi 9.5.0.0 dan Microsoft Excel 2021. Penilaian dampak menggunakan metode CML-IA *Baseline* yang berfokus pada pendekatan midpoint karena memiliki ketidakpastian lebih rendah dibandingkan pendekatan *endpoint* (Bare *et al.*, 2000).

Kategori dampak ditetapkan pada tahap penentuan tujuan dan ruang lingkup berdasarkan relevansinya terhadap aliran inventori dominan pada tambang batubara terbuka (Tao *et al.*, 2024), yaitu: (1) *global warming potential* (GWP100), yang mengkarakterisasi emisi gas rumah kaca (CO_2, CH_4, dan N_2O) dari pembakaran bahan bakar, peledakan, dan konsumsi listrik ke dalam satuan kg CO_2-eq; (2) *acidification potential* (AP), yang mengkarakterisasi emisi SO_2, NOx, dan NH_3 penyebab pengasaman tanah dan perairan ke dalam satuan kg SO_2-eq; dan (3) *eutrophication potential* (EP), yang mengkarakterisasi emisi senyawa nitrogen dan fosfor ke udara, air, dan tanah ke dalam satuan kg PO_4-eq. Ketiga kategori dihitung menggunakan faktor karakterisasi CML-IA *Baseline* dan dinyatakan per unit fungsi 1 ton batubara (Darpawanto *et al.*, 2022; Firdausy *et al.*, 2022). Kategori *ozone depletion potential* tidak dianalisis karena sistem tidak melibatkan bahan perusak ozon dalam jumlah yang signifikan.

Pembatasan pada tiga kategori tersebut didasarkan pada tiga pertimbangan. Pertama, aliran inventori dominan, yaitu pembakaran biodiesel dan penggunaan amonium nitrat, berkontribusi paling langsung terhadap emisi GRK, SO_2, NOx, dan senyawa nitrogen yang dikarakterisasi oleh GWP, AP, dan EP (Oluwoye *et al.*, 2017; Tao *et al.*, 2024), dan kedua program yang dievaluasi juga menyasar konsumsi bahan bakar. Kedua, aliran penggunaan lahan dan air dalam inventori tidak memiliki faktor karakterisasi pada set kategori CML-IA *Baseline*, sedangkan emisi logam ke air (TSS, Fe, Mn, dan Cd) secara teknis dapat dikarakterisasi melalui kategori toksisitas, tetapi faktor karakterisasi toksisitas memiliki ketidakpastian yang jauh lebih besar dibandingkan kategori *midpoint* lainnya (Rosenbaum *et al.*, 2008). Limbah B3 dan limbah sampah dimodelkan sebagai proses pengolahan limbah sehingga emisinya tetap terhitung dalam ketiga kategori. Ketiga, penggunaan kategori yang sama dengan studi LCA batubara sebelumnya (Darpawanto *et al.*, 2022; Firdausy *et al.*,

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

2022) memungkinkan perbandingan hasil secara kuantitatif. Dengan demikian, dampak penggunaan lahan, air, dan toksisitas belum tercakup dan dinyatakan sebagai keterbatasan penelitian.

Sebelum dilakukan penilaian dampak, data hasil inventarisasi terlebih dahulu dievaluasi kualitasnya menggunakan metode *Data Quality Rating* (DQR) berdasarkan pedoman *Product Environmental Footprint* (PEF) dengan empat indikator, yaitu *technological, geographical, time-related representativeness,* dan *precision* (*European Commission*, 2018). Identifikasi hotspot dilakukan melalui analisis kontribusi, selanjutnya analisis komparatif membandingkan kondisi baseline tahun 2023 dengan improvement scenario tahun 2024. Penentuan rekomendasi program perbaikan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan tiga kriteria, yaitu target penurunan dampak, biaya, dan kemudahan pelaksanaan (Saaty, 2008). Matriks dinyatakan konsisten apabila nilai consistency ratio (CR) < 0,10.

Prosedur AHP disusun dalam tiga tingkat hierarki, yaitu tujuan (menentukan prioritas program perbaikan lingkungan), kriteria (target penurunan dampak, biaya, dan kemudahan pelaksanaan), serta lima alternatif program yang diturunkan dari hasil analisis *hotspot*. Penilaian dilakukan oleh 5 responden yang dipilih secara *purposive*, yaitu pimpinan perusahaan sejumlah 1 responden serta personel Departemen Produksi sejumlah 2 responden dan Departemen SHE sejumlah 2 responden yang terlibat langsung dalam operasi produksi dan pengelolaan lingkungan, melalui wawancara mendalam dan kuesioner. Bobot kriteria diperoleh dari matriks perbandingan berpasangan menggunakan skala Saaty (2008), kemudian dinormalisasi dengan metode rata-rata kolom ternormalisasi. Konsistensi matriks diuji dengan *consistency index*, CI = (λmax − n)/(n − 1), dan *consistency ratio*, CR = CI/RI, dengan RI = 0,58 untuk n = 3; matriks diterima apabila CR < 0,10. Alternatif dinilai dengan metode *rating* (*absolute measurement*), yaitu setiap alternatif diberi skor ordinal pada tiap kriteria (target dampak: 3, 2, atau 1 sesuai jumlah kategori dampak yang disasar; biaya: rendah = 3, sedang = 2, tinggi = 1; pelaksanaan: mudah = 3, sulit = 1) berdasarkan hasil wawancara dan kuesioner, lalu skor dinormalisasi terhadap jumlah skor seluruh alternatif pada kriteria yang sama. Nilai prioritas akhir merupakan jumlah hasil kali bobot kriteria dengan skor ternormalisasi alternatif. Ketahanan peringkat diuji melalui analisis sensitivitas dengan memvariasikan bobot kriteria.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

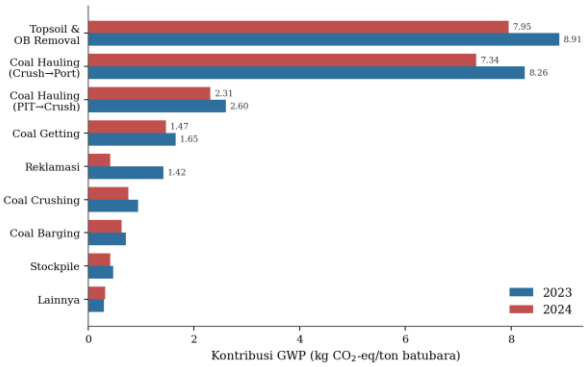
3.1. Analisis Inventori dan Kualitas Data

Inventarisasi masukan dan keluaran yang disajikan pada Tabel 1 dinormalisasi terhadap unit fungsi 1 ton batubara. Produksi batubara tercatat sebesar 9.675.000 ton pada tahun 2023 dan 9.584.477 ton pada tahun 2024. Penggunaan bahan bakar menurun dari 61,82 juta liter biodiesel B30 (2023) menjadi 53,41 juta liter biodiesel B35 (2024), sejalan dengan penurunan luas lahan terbuka dari 53,57 Ha menjadi 18,53 Ha dan emisi CO_2 dari 166.387 ton menjadi 142.468 ton. Hasil penilaian kualitas data memperoleh skor DQR sebesar 1,26 yang lebih kecil dari ambang kategori sangat baik (DQR ≤ 1,5), sehingga data inventori dinyatakan layak untuk klaim publik dan publikasi ilmiah (*European Commission*, 2018).

3.2. Penilaian Dampak dan Identifikasi Hotspot

Penilaian dampak menggunakan metode CML-IA Baseline menghasilkan nilai total GWP sebesar 25,2 kg CO_2-eq/ton (2023) dan 22,0 kg CO_2-eq/ton (2024); AP sebesar 0,159 dan 0,140 kg SO_2-eq/ton; serta EP sebesar 0,0357 dan 0,0333 kg PO_4-eq/ton. Kontribusi setiap unit proses terhadap ketiga kategori dampak disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 menunjukkan bahwa pada tahun 2023, empat unit proses secara kumulatif menyumbang sekitar 80% total dampak. Kontribusi terbesar GWP berasal dari topsoil dan overburden removal (8,91 kg CO_2-eq/ton; 35,28%), diikuti coal hauling (Crush→Port) (8,26; 32,72%), coal hauling (PIT→Crush) (2,60; 10,28%), dan coal getting (1,65; 6,54%). Pola serupa terjadi pada kategori AP dan EP. Profil kontribusi unit proses terhadap GWP tahun 2023 dan 2024 disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kontribusi Unit Proses Terhadap Dampak Global Warming Potential (GWP) Tahun 2023 dan 2024

Penyebab utama dampak pada *topsoil* dan *overburden removal* adalah emisi pembakaran bahan bakar (5,79 kg CO_2-eq/ton pada 2023 dan 5,00 pada 2024), penggunaan biodiesel, serta penggunaan amonium nitrat (0,906 kg CO_2-eq/ton pada 2023). Menurut Tao *et al.* (2024), pembakaran diesel pada operasi pengupasan dan pengangkutan menyumbang lebih dari 60% total emisi GRK siklus hidup batubara. Komponen FAME memberikan kontribusi lebih tinggi dibandingkan diesel karena emisi terkait penggunaan lahan, pemupukan, dan proses transesterifikasi pada produksi biodiesel berbasis minyak nabati (Wernet *et al.*, 2016). Pada kategori AP, emisi SO_2 dan NOx dari pembakaran bahan bakar fosil menjadi penyumbang terbesar (Lelek & Kulczycka, 2021), sedangkan kontribusi amonium nitrat bersumber dari emisi NOx selama peledakan dan proses produksi amonia

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

(Oluwoye *et al.*, 2017). Pada kategori EP, kontribusi FAME hampir sepuluh kali lipat lebih besar dibandingkan diesel akibat limpasan nitrat dan fosfat dari aplikasi pupuk N-P-K pada perkebunan penghasil minyak nabati (Wernet *et al.*, 2016).

Tabel 1. Data Inventori Masukan dan Keluaran Produksi Batubara Tahun 2023 dan 2024

Kategori	Inventori	Jumlah		Satuan	Status Data	Sumber
		2023	2024			
			Input			
Bahan Baku	Batubara	9.675.000	9.584.477	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Lahan	Lahan yang digunakan	53,57	18,53	Ha	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Material Lain	*Topsoil* dan *Overburden*	198.185.153	100.298.664	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Energi	Biodiesel B30	61.817.754	-	Liter	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Biodiesel B35	-	53.407.121	Liter	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Listrik	4.370.437	3.118.805	kWh	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Air	Air	4.623	7.023,00	m3	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Bahan Kimia dan Pendukung	Filter	23,34	19,43	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Aki	5,76	9,83	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Oli	475,37	476,04	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Majun	7,25	4,45	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Grease	1,00	0,73	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Hose	16,00	10,63	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Ban	20,49	15,04	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Besi	18,05	14,81	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Kertas	0,90	0,70	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Plastik	6,79	2,39	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Ammonium Nitrat	3.631,85	3.330,40	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Dinamit	37,39	31,62	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Detonator	149,55	127,65	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Kapur	11,35	10,21	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Tawas	31,48	16,80	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Geocure	83,18	74,79	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Jarak Transportasi	Darat Bahan Pendukung	3.267.573	2.954.960	tkm	Perhitungan	Citra Satelit
	Laut Bahan Pendukung	1.916.861	1.734.631	tkm	Perhitungan	Citra Satelit
	Darat Limbah B3	56.540	55.145	tkm	Perhitungan	Citra Satelit
	Laut Limbah B3	255.861	252.072	tkm	Perhitungan	Citra Satelit
	Darat Limbah Sampah	524,54	357,82	tkm	Perhitungan	Citra Satelit
			Output			
Produk	Batubara	9.675.000	9.584.477	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Lahan	Lahan hasil peledakan	53,57	18,53	Ha	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Lahan yang direklamasi	104,00	85,75	Ha	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Material Lain	*Topsoil* dan *Overburden*	95.374.211	90.934.437	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Emisi Udara	CO_2	166.387	142.468	Ton	Perhitungan	IPCC, 2006
	CH_4	15,14	13,51	Ton	Perhitungan	IPCC, 2006
	N_2O	1,41	1,21	Ton	Perhitungan	IPCC, 2006
	SO_2	642,32	557,01	Ton	Perhitungan	Wijono, 2017
	NO_2	655,91	582,11	Ton	Perhitungan	Wijono, 2017
	PM	96,22	83,40	Ton	Perhitungan	Wijono, 2017
	CO	1.723,58	1.487,75	Ton	Perhitungan	Wijono, 2017
Emisi ke Air	Air Limbah Domestik	3.877	3.668	m3	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Air Limbah Hasil Olahan	8.192.084	4.287.099	m3	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	TSS	327,16	375,47	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Fe	5,68	4,98	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Mn	1,96	2,58	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Cd	0,13	0,12	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Limbah B3	Filter	23,34	19,43	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Aki	5,76	9,83	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Oli	475,37	476,04	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Majun	7,25	4,45	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Grease	1,00	0,73	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Limbah Terkontaminasi	16,00	10,63	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Kemasan bekas B3	1,01	0,78	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
Limbah Sampah	Ban	31,52	27,35	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Besi	18,05	14,81	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Kertas	0,90	0,70	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Plastik	5,59	5,74	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Sisa Makanan	5,73	2,69	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Karung pupuk	0,50	0,16	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan
	Polybag	3,50	2,00	Ton	Pengukuran Langsung	Data Perusahaan

Sumber data: Dokumen Lingkungan PT Bhumi Rantau Energi 2023-2024

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 2. Nilai Karakterisasi dan Kontribusi Dampak Per Unit Proses Tahun 2023 dan 2024

Unit Proses	GWP (kg CO_2-eq/ton)		AP (kg SO_2-eq/ton)		EP (kg PO_4-eq/ton)	
	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Land Clearing	0,024	0,021	1,40E-04	1,30E-04	2,90E-05	2,80E-05
Topsoil & OB Removal	8,91	7,95	0,0512	0,0454	0,011	0,0106
Coal Getting	1,65	1,47	0,01	0,0088	0,002	0,002
Coal Hauling (PIT→Crush)	2,6	2,31	0,0157	0,0139	0,0032	0,0031
Coal Crushing	0,946	0,761	0,0049	0,004	0,0034	0,0026
Coal Hauling (Crush→Port)	8,26	7,34	0,0501	0,0442	0,0102	0,0098
Stockpile	0,472	0,419	0,0029	0,0025	0,0006	0,0006
Coal Barging	0,708	0,629	0,0043	0,0038	0,0009	0,0008
Reklamasi	1,42	0,419	0,0086	0,0025	0,0018	0,0006
Workshop	0,175	0,629	0,0001	0,0038	0,0002	0,0008
Settling Pond	0,037	0,027	0,0002	0,0002	0,0001	0
Kantor	0,019	0,016	0,0078	0,0075	0,0021	0,002
Genset	0,033	0,032	0,0033	0,0032	0,0003	0,0003
Total	**25,2**	**22**	**0,159**	**0,14**	**0,0357**	**0,0333**

Sumber data: Hasil perhitungan menggunakan SimaPro 9.5.0.0, metode CML-IA Baseline

Secara kuantitatif, nilai GWP yang diperoleh dalam penelitian ini, yaitu 25,2 kg CO_2-eq/ton pada 2023 dan 22,0 kg CO_2-eq/ton pada 2024, relatif mendekati hasil Firdausy *et al.* (2022) sebesar 24,11 kg CO_2-eq/ton. Sebaliknya, Darpawanto *et al.* (2022) melaporkan nilai yang hampir dua kali lebih tinggi, yaitu 49,9 kg CO_2-eq/ton. Ketiga penelitian tersebut menggunakan metode CML-IA Baseline dengan batas sistem *cradle-to-gate* pada kegiatan pertambangan batubara terbuka. Pada kategori AP, nilai penelitian ini sebesar 0,159 dan 0,140 kg SO_2-eq/ton berada di antara hasil Firdausy *et al.* (2022) sebesar 0,036 kg SO_2-eq/ton dan Darpawanto *et al.* (2022) sebesar 0,259 kg SO_2-eq/ton. Perbedaan yang lebih besar terlihat pada kategori EP, di mana nilai penelitian ini sebesar 0,0357 dan 0,0333 kg PO_4-eq/ton sekitar sepuluh kali lebih rendah dibandingkan Darpawanto *et al.* (2022) yang mencapai 0,377 kg PO_4-eq/ton, sementara Firdausy *et al.* (2022) tidak melaporkan kategori tersebut. Tingginya nilai dampak pada studi Darpawanto *et al.* (2022) sejalan dengan intensitas konsumsi bahan bakarnya yang juga lebih besar, yaitu sekitar 11,0 liter solar per ton batubara untuk kegiatan pengupasan tanah, peledakan, dan pemindahan overburden, dibandingkan sekitar 2,1 liter per ton pada penelitian ini. Meskipun nilai dampak yang dihasilkan berbeda, ketiga studi menunjukkan pola hotspot yang serupa, yaitu pengupasan tanah penutup sebagai sumber dampak utama. Kontribusi proses tersebut terhadap GWP mencapai sekitar 35% pada penelitian ini, 60% pada Darpawanto *et al.* (2022), dan 74% pada Firdausy *et al.* (2022). Perbedaan yang cukup menonjol pada penelitian ini terletak pada proses coal hauling dari crusher menuju pelabuhan, yang menyumbang sekitar 32,7% terhadap total GWP, jauh lebih tinggi dibandingkan kontribusi yang dilaporkan oleh Firdausy *et al.* (2022) sekitar 2,5% terhadap total GWP.

Perbandingan sumber dampak dengan dua studi LCA batubara Indonesia lain dirangkum pada Tabel 3. Jika dibandingkan berdasarkan intensitas emisi CO_2 langsung, penelitian ini menghasilkan 17,2 kg CO_2/ton pada 2023 dan 14,9 kg CO_2/ton pada 2024, lebih rendah dibandingkan Firdausy *et al.* (2022) sebesar 24,1 kg CO_2/ton dan Darpawanto *et al.* (2022) sebesar 38,2 kg CO_2/ton. Nilai pembanding tersebut dihitung dari total emisi CO_2 dan produksi batubara yang dilaporkan pada masing-masing penelitian.

Tabel 3. Perbandingan Sumber Dampak dengan Studi LCA Batubara Indonesia Lain

Indikator	Penelitian ini (2023)	Darpawanto dkk. (2022)	Firdausy dkk. (2022)
GWP total (kg CO_2-eq/ton)	25,2	49,9	24,11
CO_2 (kg/ton)	17,2	38,2	24,1
SO_2 (kg/ton)	0,066	0,068	0,031
NOx (kg/ton)	0,068	1,45	–
Kontribusi pengupasan tanah penutup terhadap GWP	35,30%	59,60%	74,20%
Solar untuk pengupasan (L/ton batubara)	2,1	11	–
Amonium nitrat (kg/ton batubara)	0,375	1,08	tidak dimodelkan

– = tidak dilaporkan. Nilai pembanding dihitung dari data dalam artikel masing-masing. Sumber: Hasil olahan, 2026

Konsumsi solar untuk pengupasan tanah, peledakan, dan pemindahan *overburden* pada Darpawanto *et al.* (2022) mencapai 11,0 liter per ton batubara, jauh di atas 2,1 liter per ton pada unit yang sama di penelitian ini. Intensitas SO_2 penelitian ini (0,066 kg/ton) hampir sama dengan Darpawanto *et al.* (2022) (0,068 kg/ton) dan sekitar dua kali Firdausy *et al.* (2022) (0,031 kg/ton). Pada NOx, Darpawanto *et al.* (2022) melaporkan 1,45 kg/ton, sedangkan penelitian ini 0,068 kg NOx/ton. Faktor emisi pembakaran juga dipengaruhi komposisi campuran, karena penambahan biodiesel mengubah karakteristik pembakaran dan emisi mesin diesel (Özener *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2021). Amonium nitrat yang dipakai 0,375 kg per ton batubara pada 2023, sekitar sepertiga dari 1,08 kg per ton batubara pada Darpawanto *et al.* (2022) (3,98 juta kg untuk 3,69 juta ton batubara). Kontribusinya 0,906 kg CO_2-eq/ton, atau 2,4 kg CO_2-eq/kg amonium nitrat. Firdausy *et al.* (2022) tidak memasukkan bahan peledak dalam inventorinya, sehingga komponen ini tidak dapat dibandingkan dengan studi tersebut.

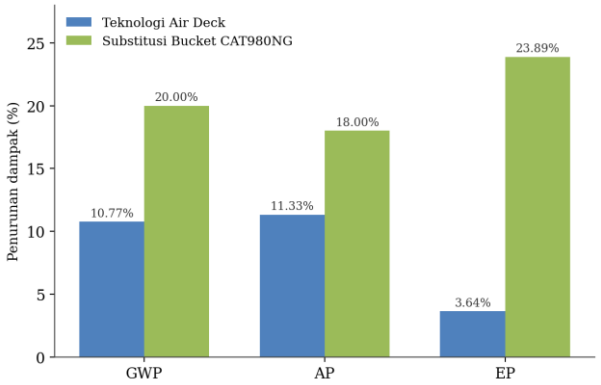
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

3.3. Analisis Komparatif Efektivitas Program

Terdapat dua program yang berjalan mulai tahun 2024 pada lokasi hotspot tahun 2023, yaitu implementasi teknologi air deck dalam proses peledakan pada unit topsoil dan overburden removal, serta optimalisasi produktivitas alat muat melalui substitusi bucket CAT980NG pada unit coal crushing. Kedua program bertujuan menurunkan konsumsi bahan bakar diesel. Hasil analisis komparatif disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 2.

Tabel 4. Penurunan Dampak Lingkungan Sebelum (2023) dan Sesudah (2024) Implementasi Program

Program / Kategori Dampak	2023	2024	Penurunan	%
Teknologi Air Deck (Topsoil & Overburden Removal)				
GWP (kg CO_2-eq/ton)	8,91	7,95	0,96	10,77%
AP (kg SO_2-eq/ton)	0,051	0,045	0,0058	11,33%
EP (kg PO_4-eq/ton)	0,011	0,011	0,0004	3,64%
Substitusi Bucket CAT980NG (Coal Crushing)				
GWP (kg CO_2-eq/ton)	0,946	0,761	0,185	20,00%
AP (kg SO_2-eq/ton)	0,005	0,004	0,0009	18,00%
EP (kg PO_4-eq/ton)	0,003	0,003	0,0008	23,89%



Gambar 2. Persentase Penurunan Dampak GWP, AP, dan EP pada Kedua Program

Implementasi teknologi air deck menurunkan dampak pada seluruh kategori, terutama GWP (10,77%) dan AP (11,33%), yang dipengaruhi oleh berkurangnya emisi pembakaran biodiesel (turun 13,6%) dan kontribusi diesel (turun 19,1%). Substitusi bucket CAT980NG memberikan penurunan lebih besar, yaitu GWP 20%, AP 18%, dan EP 23,89%, karena peningkatan produktivitas alat muat menurunkan intensitas penggunaan bahan bakar per ton batubara, sejalan dengan studi optimalisasi fuel ratio alat gali-muat dan alat angkut di tambang batubara (Himawan *et al.*, 2020; Ramadhani *et al.*, 2022). Pada kedua program, kontribusi FAME justru meningkat (sekitar 1,7-2,1%), menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel tetap memiliki beban lingkungan dari tahap hulu produksi dan distribusi FAME. Temuan ini sejalan dengan prinsip contribution analysis dalam tahap interpretasi LCA (Badan Standardisasi Nasional, 2017), yang menekankan bahwa perubahan dampak harus dapat ditelusuri ke perubahan aliran masukan atau keluaran yang spesifik.

Penggunaan amonium nitrat per ton batubara turun sekitar 7,4% (dari 3,75 × 10^{-4} menjadi 3,47 × 10^{-4} ton/ton), lebih rendah daripada penghematan bahan peledak 12–20% per lubang ledak yang dilaporkan untuk aplikasi *air decking* pada peledakan *overburden* tambang batubara di Kalimantan Selatan (Hasruddin *et al.*, 2022). Selisih ini wajar karena angka penelitian ini merupakan rata-rata tahunan seluruh operasi peledakan. Interpretasi efektivitas program juga perlu dilakukan secara proporsional, sebab kondisi operasional 2023 dan 2024 berubah cukup besar, antara lain luas lahan terbuka turun dari 53,57 Ha menjadi 18,53 Ha, luas reklamasi menurun, dan bahan bakar beralih dari B30 ke B35. Normalisasi per ton batubara dan analisis pada tingkat unit proses mengurangi pengaruh perbedaan volume produksi, tetapi tidak sepenuhnya memisahkan efek program dari perubahan operasional tersebut. Oleh karena itu, penurunan dampak pada unit proses sasaran lebih tepat dipandang sebagai indikasi kontribusi program, bukan atribusi tunggal.

3.4. Rekomendasi Program Perbaikan

Matriks perbandingan berpasangan kriteria disajikan pada Tabel 5. Target penurunan dampak dinilai 3 kali lebih penting dibandingkan biaya maupun kemudahan pelaksanaan, sedangkan biaya dan kemudahan pelaksanaan dinilai sama penting, sehingga diperoleh bobot 0,60; 0,20; dan 0,20. Nilai CR sebesar 0,00 bukan hasil pembulatan, melainkan konsekuensi matematis dari matriks yang konsisten sempurna: setiap elemen memenuhi aij = aik × akj (misalnya a12 = a13 × a32 = 3 × 1), sehingga λmax = n = 3 dan CI = 0. Skor dan peringkat kelima alternatif program disajikan pada Tabel 7.

Tabel 5. Matriks Perbandingan Berpasangan Kriteria AHP

Kriteria	Target Dampak	Biaya	Pelaksanaan	Bobot
Target penurunan dampak	1	3	3	**0,6**
Biaya	3-Jan	1	1	**0,2**
Kemudahan pelaksanaan	3-Jan	1	1	**0,2**

Uji konsistensi: λmax = 3,00; CI = 0,00; RI (n = 3) = 0,58; CR = 0,00.
Sumber: Hasil olahan AHP, 2026

Perhitungan nilai CR pada matriks kriteria (Tabel 5) dilakukan dalam enam langkah, dengan rincian numerik pada Tabel 6. Langkah pertama adalah menjumlahkan setiap kolom matriks perbandingan berpasangan, dengan a_{ij} sebagai elemen pada baris ke-*i* dan kolom ke-*j* serta *n* = 3 sebagai ordo matriks:

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} a_{ij} \quad (1)$$

$$S_1 = 1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1{,}667$$

$$S_2 = S_3 = 3 + 1 + 1 = 5$$

Langkah kedua adalah normalisasi, yaitu membagi setiap elemen dengan jumlah kolomnya (Persamaan 2), kemudian merata-ratakan setiap baris matriks

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

ternormalisasi untuk memperoleh vektor bobot (Persamaan 3):

$$\overline{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} \quad (2)$$

$$w_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \overline{a}_{ij} \quad (3)$$

$$\overline{a}_{11} = \frac{1}{1{,}667} = 0{,}600$$

$$\overline{a}_{12} = \frac{3}{5} = 0{,}600$$

$$w = (0{,}600; 0{,}200; 0{,}200)^T$$

Langkah ketiga adalah mengalikan matriks awal dengan vektor bobot (Persamaan 4):

$$(Aw)_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} w_j \quad (4)$$

$$(Aw)_1 = 1(0{,}600) + 3(0{,}200) + 3(0{,}200) = 1{,}800$$

$$(Aw)_2 = \frac{1}{3}(0{,}600) + 1(0{,}200) + 1(0{,}200) = 0{,}600$$

$$(Aw)_3 = (Aw)_2 = 0{,}600$$

Langkah keempat adalah menghitung nilai eigen setiap baris (Persamaan 5) dan nilai eigen maksimum sebagai rata-ratanya (Persamaan 6):

$$\lambda_i = \frac{(Aw)_i}{w_i} \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \frac{1{,}80}{0{,}60} = 3{,}00$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{0{,}60}{0{,}20} = 3{,}00$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{3}(3{,}00 + 3{,}00 + 3{,}00) = 3{,}00$$

Langkah kelima dan keenam adalah menghitung *consistency index* (CI) dan *consistency ratio* (CR) (Persamaan 7 dan 8), dengan RI = 0,58 sebagai *random index* Saaty (2008) untuk matriks berordo 3:

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (7)$$

$$\mathrm{CI} = \frac{3{,}00 - 3}{3 - 1} = 0{,}00$$

$$\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \quad (8)$$

$$\mathrm{CR} = \frac{0{,}00}{0{,}58} = 0{,}00$$

Karena CR < 0,10, matriks dinyatakan konsisten. Uji konsistensi hanya diterapkan pada matriks kriteria, sebab alternatif program dinilai menggunakan metode *rating* sehingga tidak membentuk matriks perbandingan berpasangan.

Program dengan prioritas tertinggi adalah optimisasi jarak dan rute angkut (nilai 0,265) karena menargetkan tiga kategori dampak sekaligus (GWP, AP, EP), berbiaya rendah, dan mudah dilaksanakan. Program ini relevan dengan hasil hotspot karena unit coal hauling memiliki keterkaitan langsung dengan pembakaran bahan bakar biodiesel yang menghasilkan emisi CO_2, SO_2, dan NOx. Perbaikan rute, pengurangan jarak tempuh, pengaturan kemiringan dan kondisi jalan, serta pengurangan waktu antre kendaraan dapat menurunkan konsumsi bahan bakar per ton batubara, sehingga menargetkan sumber inventori utama yang memengaruhi beberapa kategori dampak sekaligus.

Tabel 6. Tahapan Perhitungan Uji Konsistensi Matriks Kriteria AHP

Kriteria	Norm. T	Norm. B	Norm. P	Bobot (w)	A·w	λi = (A·w)/w
Jumlah kolom matriks awal	1,667	5	5	–	–	–
Target penurunan dampak (T)	0,6	0,6	0,6	0,6	1,8	3
Biaya (B)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	3
Kemudahan pelaksanaan (P)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	3
Hasil uji	λmax = 3,00		CI = 0,00	RI = 0,58	CR = 0,00	Konsisten

Norm. = elemen matriks dibagi jumlah kolomnya; w = rata-rata baris matriks ternormalisasi; CI = (λmax − n)/(n − 1); CR = CI/RI. Sumber: Hasil olahan AHP, 2026

Tabel 7. Skor dan Prioritas Alternatif Program Perbaikan Lingkungan

Alternatif program	Target dampak (skor)	Biaya (skor)	Pelaksanaan (skor)	Nilai akhir	Pkt
Optimisasi jarak dan rute angkut	GWP, AP, EP (0,250)	Rendah (0,300)	Mudah (0,273)	**0,27**	1
Optimisasi desain geometri peledakan	GWP, AP, EP (0,250)	Rendah (0,300)	Sulit (0,091)	**0,23**	2
Optimisasi sistem pengangkutan melalui peningkatan kapasitas muatan	GWP, AP, EP (0,250)	Tinggi (0,100)	Mudah (0,273)	**0,23**	3
Peningkatan kesesuaian kapasitas alat gali-muat dengan alat angkut	GWP, AP (0,167)	Sedang (0,200)	Mudah (0,273)	**0,2**	4
Optimisasi desain crusher	EP (0,083)	Tinggi (0,100)	Sulit (0,091)	**0,09**	5
Bobot kriteria	0,6	0,2	0,2		

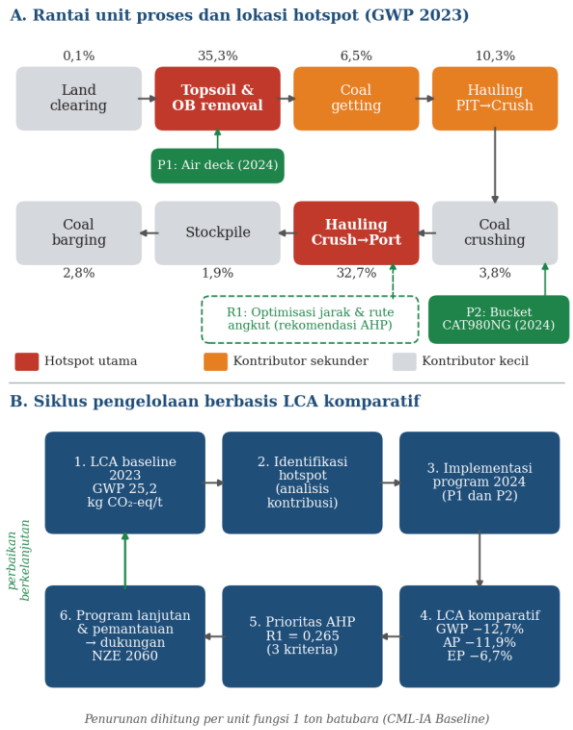
Skor = skor ordinal (3–1) yang dinormalisasi terhadap jumlah skor seluruh alternatif pada kriteria yang sama; Nilai akhir = Σ (bobot kriteria × skor). Sumber: Hasil olahan AHP, 2026

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa peringkat pertama tidak berubah ketika bobot kriteria divariasikan. Pada bobot setara (masing-masing sepertiga), nilai optimisasi jarak dan rute angkut menjadi 0,274, sedangkan pada bobot target dampak yang lebih dominan (0,80; 0,10; 0,10) nilainya 0,257, dan pada kedua kondisi tersebut tetap tertinggi dibandingkan alternatif lain. Prioritas ini sejalan dengan Aytaç & Erkayaoğlu (2025) yang menunjukkan bahwa revisi rencana tambang dan jaringan jalan angkut untuk mengatasi kemacetan truk pada tambang batubara terbuka mampu menurunkan emisi GRK operasi pengangkutan hingga 41,8%. Meskipun demikian, jumlah penilai yang terbatas dan penggunaan skor ordinal membuat hasil AHP ini lebih tepat dibaca sebagai prioritas indikatif bagi perusahaan.

Keseluruhan alur pengelolaan lingkungan yang diterapkan dalam penelitian ini dirangkum pada

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Gambar 3. Panel A memetakan lokasi *hotspot* pada rantai unit proses beserta titik intervensi program tahun 2024 (P1 dan P2) dan rekomendasi prioritas hasil AHP (R1), sedangkan Panel B menggambarkan siklus pengelolaan yang dimulai dari LCA *baseline*, identifikasi *hotspot*, implementasi program, evaluasi melalui LCA komparatif, penentuan prioritas dengan AHP, hingga program lanjutan dan pemantauan. Siklus ini bersifat berulang sehingga hasil evaluasi setiap periode menjadi *baseline* bagi periode berikutnya, sejalan dengan prinsip perbaikan berkelanjutan dan prosedur interpretasi LCA (Badan Standardisasi Nasional, 2017).



Gambar 3. Diagram Alur Pengelolaan Lingkungan pada Hotspot Produksi Batubara Berbasis LCA Komparatif

3.5. Keterkaitan dengan Target Net Zero Emission Nasional

Penurunan intensitas GWP dari 25,2 menjadi 22,0 kg CO_2-eq/ton (12,7%) setara dengan pengurangan sekitar 30,7 ribu ton CO_2-eq pada tingkat produksi tahun 2024 (3,2 kg CO_2-eq/ton × 9.584.477 ton). Nilai ini merupakan estimasi indikatif berbasis siklus hidup *cradle-to-gate*, sehingga tidak dapat langsung disetarakan dengan inventarisasi GRK nasional yang disusun per sektor. Meskipun demikian, arah penurunannya sejalan dengan komitmen penurunan emisi dalam dokumen NDC Indonesia serta visi *net zero emission* (NZE) pada tahun 2060 atau lebih cepat yang ditegaskan kembali dalam *Second* NDC (Republik Indonesia, 2025).

Selama masa transisi energi, ketika batubara masih menjadi bagian dari bauran energi, efisiensi pada sisi hulu menjadi salah satu ruang mitigasi yang dapat segera dilakukan (Laing *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa intervensi operasional pada *hotspot*, seperti teknologi *air deck* dan penyesuaian kapasitas alat muat, mampu menurunkan intensitas emisi per ton batubara tanpa mengurangi volume produksi. Namun, meningkatnya kontribusi FAME pada kedua program menegaskan bahwa pemanfaatan biodiesel (B30–B35) tidak serta-merta netral karbon jika ditinjau dari perspektif siklus hidup, karena beban hulu dari perkebunan dan pengolahan minyak nabati tetap terhitung (Wernet *et al.*, 2016). Oleh karena itu, kontribusi operasi tambang terhadap target NZE memerlukan kombinasi optimisasi jarak dan rute angkut sebagai prioritas hasil AHP, peralihan bertahap segmen pengangkutan ke sistem berbasis listrik seperti *overland conveyor* atau truk listrik (Mahmud *et al.*, 2022; Breuer *et al.*, 2021), serta pemantauan berbasis LCA secara berkala agar setiap klaim penurunan emisi dapat diverifikasi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa beban lingkungan produksi batubara PT Bhumi Rantau Energi pada kategori GWP, AP, dan EP terkonsentrasi pada dua kelompok unit proses, yaitu *topsoil* dan *overburden removal* serta *coal hauling*, dengan sumber utama pembakaran bahan bakar, rantai pasok biodiesel, dan amonium nitrat. Intensitas dampak per ton batubara menurun pada ketiga kategori pada tahun 2024, dan kedua program yang menyasar *hotspot*, yaitu teknologi *air deck* dan substitusi *bucket* CAT980NG, berasosiasi dengan penurunan dampak pada unit proses sasaran melalui berkurangnya konsumsi bahan bakar. Namun, meningkatnya kontribusi FAME menunjukkan adanya perpindahan sebagian beban ke hulu rantai pasok biodiesel, sehingga penurunan konsumsi bahan bakar belum sepenuhnya diterjemahkan menjadi penurunan EP.

Secara praktis, program pengelolaan lingkungan tambang sebaiknya diarahkan pada *hotspot* dan dievaluasi dengan LCA komparatif secara berkala agar penurunan dampak dapat dibuktikan, baik untuk pemenuhan PROPER maupun untuk mendukung target *net zero emission*. Optimisasi jarak dan rute angkut direkomendasikan sebagai prioritas berikutnya, disertai evaluasi pemasok FAME. Penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu perbandingan hanya mencakup dua tahun dengan kondisi operasional yang turut berubah, sebagian proses menggunakan proksi basis data global, cakupan terbatas pada tiga kategori dampak, dan jumlah penilai AHP terbatas; penelitian lanjutan disarankan menggunakan data multi-tahun, basis data lokal, serta kategori toksisitas, lahan, dan air.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, N., Li, H. Z., & Tian, X. L. (2019). Increased firm profitability under a nationwide environmental information disclosure program? Evidence from China. Journal of Cleaner Production, 230, 1176–

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

1187. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.161

Asr, E. T., Kakaie, R., Ataei, M., & Mohammadi, M. R. T. (2019). A review of studies on sustainable development in mining life cycle. Journal of Cleaner Production, 229, 213–231. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.029

Awuah-Offei, K., & Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. The International Journal of Life Cycle Assessment, 16(1), 82–89. https://doi.org/10.1007/s11367-010-0246-6

Aytaç, Ş. M., & Erkayaoğlu, M. (2025). Determination of optimal fleet equipment to mitigate greenhouse gas emissions in an open pit coal mine. Mining, Metallurgy & Exploration. https://doi.org/10.1007/s42461-025-01182-8

Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI ISO 14040:2016 Manajemen lingkungan—Penilaian daur hidup—Prinsip dan kerangka kerja. BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI ISO 14044:2017 Manajemen lingkungan—Penilaian daur hidup—Persyaratan dan pedoman. BSN.

Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D. W., & Udo de Haes, H. A. (2000). Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. The International Journal of Life Cycle Assessment, 5(6), 319–326.

Breuer, J. L., Samsun, R. C., Stolten, D., & Peters, R. (2021). How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. Environment International, 152, 106474. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106474

Burchart-Korol, D., Fugiel, A., Czaplicka-Kolarz, K., & Turek, M. (2016). Model of environmental life cycle assessment for coal mining operations. Science of the Total Environment, 562, 61–72. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.202

Darpawanto, N. J., Budihardjo, M. A., Muhammad, F., & Amalia, D. (2022). Kajian Dampak Lingkungan Produksi Batubara PT Berau Coal – Site Sambarata dengan Metode Life Cycle Assessment. Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(4), 704–716. https://doi.org/10.14710/jil.20.4.704-716

Diharjo, D. F. M. W., & Manik, Y. B. S. (2023). Life cycle assessment of coal mining in East Kalimantan. Jurnal Sains dan Teknologi, 12(3), 613–621. https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v12i3.68103

European Commission. (2018). Product environmental footprint (PEF) guide. European Commission.

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. Journal of Environmental Management, 91(1), 1–21. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018

Firdausy, M. A., Urrahman, M. A., & Firmansyah, M. (2022). Life cycle assessment (LCA) produksi batu bara di PT. XYZ di Kalimantan Selatan dengan pendekatan cradle-to-gate menggunakan software OpenLCA. Jukung Jurnal Teknik Lingkungan, 8(2), 50–59. http://dx.doi.org/10.20527/jukung.v8i2.14910

Handayani, L., & Hanaseta, E. (2022). Peranan penilaian daur hidup (life cycle assessment) dalam menunjang perolehan program penilaian peringkat kinerja perusahaan (PROPER) pada industri mineral timah. Media Ilmiah Teknik Lingkungan, 7(1), 24–31. https://doi.org/10.33084/mitl.v7i1.3257

Hasruddin, M., Yuliadi, Y., & Ashari, Y. (2022). Aplikasi air decking menggunakan balldeck guna mengefisiensi bahan peledak pada kegiatan peledakan overburden di PT Hanwha Mining Services. Kurvatek, 7(1), 79–88. https://doi.org/10.33579/krvtk.v7i1.3150

Himawan, M. A. R., Nurhakim, N., & Annisa, A. (2020). Analisis optimalisasi fuel ratio peralatan mekanis dalam aktifitas penggalian dan pengangkutan overburden PT Madhani Talatah Nusantara. Jurnal Himasapta, 4(3), 77–80. https://doi.org/10.20527/jhs.v4i3.1361

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22(2), 138–147. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y

IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 2: Energy. Institute for Global Environmental Strategies.

Jakob, M., Steckel, J. C., Jotzo, F., Sovacool, B. K., Cornelsen, L., Chandra, R., Edenhofer, O., Holden, C., Löschel, A., Nace, T., Robins, N., Suedekum, J., & Urpelainen, J. (2020). The future of coal in a carbon-constrained climate. Nature Climate Change, 10(8), 704–707. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0866-1

Kementerian LH. (2025). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/BPLH Nomor 7 Tahun 2025 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup. Kementerian Lingkungan Hidup.

Laing, T., Upadhyay, A., Mohan, S., & Subramanian, N. (2019). Environmental improvement initiatives in the coal mining industry: Maximisation of the triple bottom line. Production Planning & Control, 30(5–6), 426–436. https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1501813

Lelek, L., & Kulczycka, J. (2021). Life cycle assessment of opencast lignite mining. International Journal of Coal Science & Technology, 8(6), 1272–1287. https://doi.org/10.1007/s40789-021-00467-9

Mahmud, M. F., Ismayana, A., & Yani, M. (2022). Life cycle assessment proses pengadaan bahan baku batubara pembangkit listrik tenaga uap Tidore. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 18(1), 49–58. https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No1.2022.1243

Monteiro, N. B. R., da Silva, E. A., & Neto, J. M. M. (2019). Sustainable development goals in mining. Journal of Cleaner Production, 228, 509–520. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.332

Nasihah, M. (2018). Efek hujan asam terhadap pertumbuhan tanaman. Jurnal EnviScience (Environment Science), 1(1). https://doi.org/10.30736/1ijev.v1iss1.53

Oluwoye, I., Dlugogorski, B. Z., Gore, J., Oskierski, H. C., & Altarawneh, M. (2017). Atmospheric emission of NOx from mining explosives: A critical review. Atmospheric Environment, 167, 81–96. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.006

Özener, O., Yüksek, L., Ergenç, A. T., & Özkan, M. (2014). Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. Fuel, 115, 875–883. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.081

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Ramadhani, A. D., Mustofa, A., & Melati, S. (2022). Optimalisasi fuel ratio alat gali muat dan alat angkut PT Borneo Alam Semesta. Jurnal Himasapta, 7(3), 157–160. https://doi.org/10.20527/jhs.v7i3.7504

Republik Indonesia. (2009). Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Republik Indonesia. (2020). Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020 tentang Perubahan atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara.

Republik Indonesia. (2025). Second nationally determined contribution Republic of Indonesia. United Nations Framework Convention on Climate Change.

Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A. J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H. F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T. E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., & Hauschild, M. Z. (2008). USEtox—The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 13(7), 532–546. https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4

Roy, P., Hossain, M. N., Uddin, S. M., & Hossain, M. M. (2023). Unraveling the sustainability aspects of coal extraction and use in Bangladesh using material flow analysis and life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 387, 135895. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135895

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1(1), 83–98.

Tampubolon, F. R. S., Yuwono, A. S., Tambunan, A. H., & Achsani, N. A. (2021). Coal mining energy utilization and environmental impact management strategy using the LCA method. Nature Environment and Pollution Technology, 20(5), 2007–2015.

Tao, M., Cheng, W., Nie, K., Zhang, X., & Cao, W. (2022). Life cycle assessment of underground coal mining in China. Science of the Total Environment, 805, 150231. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150231

Tao, M., Lu, D., Shi, Y., Liu, K., Yan, D., & Memon, M. B. (2024). Life cycle assessment of coal mines of diverse scales over time in China. Science of the Total Environment, 912, 169236. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169236

Triatmojo, P., Hadinata, F., & Sari, T. I. (2024). Determining the environmental impact of cradle to gate in coal-fired power generation. Advances in Science and Technology Research Journal, 18(5), 195–205. https://doi.org/10.12913/22998624/190677

Tughyan, M. (2020). Impact of coal mining on environment and natural resources: Causes and potential effects. International Journal of Mining Science, 6(1), 32–36. https://doi.org/10.20431/2454-9460.0601003

Wang, B., Cui, C. Q., Zhao, Y. X., Chen, M., & Yuan, X. C. (2019). Climate change mitigation in the coal mining industry: Low-carbon pathways and mine safety indicators. Natural Hazards, 95, 25–38. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3438-1

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9), 1218–1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

Wijono, A. (2017). Dampak pengurangan emisi kendaraan pada pemakaian campuran biodiesel 20%. Dalam Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2017 (hlm. TK-021). Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta.

Wiloso, E. I., Nazir, N., Hanafi, J., Siregar, K., Harsono, S. S., Setiawan, A. A. R., & Fang, K. (2019). Life cycle assessment research and application in Indonesia. The International Journal of Life Cycle Assessment, 24, 386–396. https://doi.org/10.1007/s11367-018-1459-3

Wu, H., Yin, Z., Zhang, Y., Qi, C., Liu, X., & Wang, J. (2022). Comparison of underground coal mining methods based on life cycle assessment. Frontiers in Earth Science, 10, 879082. https://doi.org/10.3389/feart.2022.879082

Yuniarto, A., & Amalia, D. (2022). Penentuan program perbaikan lingkungan terhadap dampak emisi proses penambangan batubara dengan metode life cycle assessment (LCA). Jurnal Darma Agung, 30(1), 426–438. https://doi.org/10.46930/ojsuda.v30i1.1732

Zhang, L., Wang, J., & Feng, Y. (2018). Life cycle assessment of opencast coal mine production: A case study in Yimin mining area in China. Environmental Science and Pollution Research, 25, 8475–8486. https://doi.org/10.1007/s11356-017-1169-6

Zhang, Y., Zhong, Y., Wang, J., Tan, D., Zhang, Z., & Yang, D. (2021). Effects of different biodiesel-diesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine. Processes, 9(11), 1984. https://doi.org/10.3390/pr9111984

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP