



Critical Minerals Life Cycle Assessment (LCA): Sustainable Mining Practices

Ulul Azmi^{1*}, Sri Murtiana², Nugroho Adi Sasongko³, Sri Yanto⁴
Program Studi Ketahanan Energi, Universitas Pertahanan Indonesia
Corresponding Author: Ulul Azmi uazmi763@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords: Critical Minerals, Life Cycle Assessment (LCA), Sustainable Mining, Environmental Impact

Received : 25, January
Revised : 27, February
Accepted: 29, March

©2025 Azmi, Murtiana, Sasongko, Yanto: This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



ABSTRACT

This study uses Life Cycle Assessment (LCA) to analyze the environmental impacts of critical minerals from extraction to disposal, aiming to minimize harm and improve social welfare. Guided by ISO 14040, the assessment identifies areas of improvement: cleaner technologies, energy efficiency, waste management, ecosystem conservation, community engagement and supportive policies. Reviewing studies from 2010 to 2024, it emphasizes collaboration between government, industry and communities for sustainable mining that aligns with global sustainability goals. Implementing these findings can drive long-term benefits across the environmental, economic and social dimensions of the mining sector. This comprehensive approach ensures that nickel mining and production activities are managed responsibly, promoting environmental sustainability and efficient resource utilization.

Penilaian Siklus Hidup (LCA) Mineral Kritis : Praktik Pertambangan Berkelanjutan

Ulul Azmi^{1*}, Sri Murtiana², Nugroho Adi Sasongko³, Sri Yanto⁴

Program Studi Ketahanan Energi, Universitas Pertahanan Indonesia

Corresponding Author: Ulul Azmi uazmi763@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords: Mineral kritis, Penilaian Siklus Hidup (LCA), Penambangan berkelanjutan, Dampak lingkungan

Received : 25, Januari

Revised : 27, Februari

Accepted: 29, Maret

©2025 Azmi, Murtiana, Sasongko, Yanto: This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



ABSTRAK

Studi ini menggunakan Life Cycle Assessment (LCA) untuk menganalisis dampak lingkungan dari mineral kritis dari ekstraksi hingga pembuangan, yang bertujuan untuk meminimalkan bahaya dan meningkatkan kesejahteraan sosial. Dipandu oleh ISO 14040, penilaian ini mengidentifikasi area peningkatan: teknologi yang lebih bersih, efisiensi energi, pengelolaan limbah, konservasi ekosistem, keterlibatan masyarakat, dan kebijakan yang mendukung. Meninjau studi dari tahun 2010 hingga 2024, penelitian ini menekankan kolaborasi antara pemerintah, industri, dan masyarakat untuk pertambangan berkelanjutan yang selaras dengan tujuan keberlanjutan global. Menerapkan temuan ini dapat mendorong manfaat jangka panjang di seluruh dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial di sektor pertambangan. Pendekatan komprehensif ini memastikan bahwa kegiatan penambangan dan produksi nikel dikelola secara bertanggung jawab, mempromosikan kelestarian lingkungan dan pemanfaatan sumber daya yang efisien.

PENDAHULUAN

Lapisan tanah mineral Indonesia sangat kaya dan beragam. Menurut Gambar 1, bauksit, mangan, emas, tembaga, timah, kobalt, dan nikel adalah mineral utama yang ditemukan di wilayahnya, dan masing-masing memiliki peran penting dalam pergerakan energi global. Tembaga dan aluminium digunakan dalam sirkuit listrik, dan timah sebagian besar digunakan dalam elektronik. Mangan, kobalt, dan nikel juga penting untuk produksi baterai (Wang et al., 2022).



Gambar 1. Komoditas Utama di Indonesia yang Bergantung pada Konsesi Pertambangan yang Diterbitkan (Thibault MICHEL, 2024)

Indonesia telah diuntungkan dari sumber dayanya, terutama potensi nikelnya. Kepulauan ini menghasilkan 50% nikel dunia dan mengandung 42% cadangan nikel dunia, dengan 1,8 juta ton diproduksi pada tahun 2023. Hanya 130.000 ton nikel yang diekspor dari negara itu pada tahun 2015. Dengan 600.000 ton yang diproduksi di dalam negeri pada tahun 2018, Indonesia menyalip Filipina sebagai produsen nikel terbesar di dunia. Pada tahun 2023, produksi ini akan meningkat tiga kali lipat menjadi 1.800.000 ton (U.S. Geological Survey, 2024) (U.S. Geological Survey, 2024).

Meskipun penambangan nikel sebagian besar terjadi di pulau Sulawesi dan Maluku, perkembangan ini membutuhkan penciptaan wilayah pertambangan yang luas yang tersebar di seluruh negeri (Gambar 2). Kawasan Industri Morowali Indonesia (IMIP) adalah landmark utama di wilayah pertambangan ini (Coman et al., 2013), yang didirikan pada Oktober 2013 di pulau Sulawesi. Dalam sepuluh tahun, kota nelayan Bahodopi telah berkembang menjadi kota lengkap dengan pelabuhan laut dalam dan lapangan terbang, tempat 66.000 orang bekerja (B. Pedroletti, 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, industri pertambangan telah menjadi bagian penting dari perekonomian Indonesia (Jiang et al., 2013). Bahkan, laporan PwC menyebutkan bahwa pangsa industri pertambangan terhadap PDB akan meningkat dari 4,3% pada tahun 2020 menjadi 9,2% pada tahun 2022. Pada saat yang sama, ekspor akan meningkat dari 12% menjadi 22%.

Namun, kegiatan penambangan nikel memiliki dampak lingkungan yang signifikan. Proses ekstraksi dan pengolahan bijih nikel dapat menyebabkan deforestasi, degradasi lahan, pencemaran air, dan emisi gas rumah kaca (Centre For Energy and Mining Law Studies, 2020). Penggunaan energi yang intensif dalam proses pemrosesan juga menambah jejak karbon industri. Limbah tambang (tailing) yang tidak dikelola dengan baik dapat mencemari sumber air lokal dan menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat sekitar. Selain dampak lingkungan (Awuah-Offei & Adekpedjou, 2011), Penambangan nikel juga memiliki implikasi sosial yang kompleks. Praktik pertambangan yang tidak berkelanjutan dapat menyebabkan konflik sosial, penggusuran masyarakat, dan penurunan kualitas hidup masyarakat lokal (Norgate & Haque, 2010). Di sisi lain, industri ini memberikan peluang ekonomi melalui penciptaan lapangan kerja dan kontribusi terhadap pendapatan nasional. Oleh karena itu, penting untuk menyeimbangkan manfaat ekonomi dengan kelestarian lingkungan dan kesejahteraan sosial (Bigum et al., 2012).

Untuk mengatasi tantangan tersebut, penerapan Life Cycle Assessment (LCA) sangat penting. LCA adalah metodologi komprehensif untuk menilai dampak lingkungan dari suatu produk sepanjang siklus hidupnya, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga pembuangan akhir. Melalui LCA, dimungkinkan untuk mengidentifikasi dan mengukur dampak lingkungan dari setiap tahap dalam rantai produksi nikel. Pendekatan ini membantu dalam menemukan titik-titik kritis yang memerlukan intervensi untuk mengurangi dampak negatif. Melalui pemanfaatan nikel dan produknya, konsumsi energi dapat diminimalkan, dan dampak lingkungan berkurang. Berdasarkan sifat fisiko-kimia nikel, produk yang mengandung nikel diketahui memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang umur produk, atau mengurangi frekuensi perawatan yang diperlukan. Studi terbaru tentang biaya siklus hidup dan penilaian siklus hidup di dermaga terpanjang di dunia menunjukkan bahwa elemen-elemen ini dapat secara langsung berkontribusi pada penghematan energi dan sumber daya.

METODOLOGI

Tinjauan literatur ini mengkaji Penilaian Siklus Hidup Cradle-to-Grave (LCA), metode mendalam untuk menilai dampak lingkungan dari suatu produk atau layanan dari tahap produksi awal ("buai") hingga akhir siklus hidupnya ("kuburan"). Ini termasuk penggunaan produk, pemrosesan, distribusi, pemanfaatan, dan pembuangan atau daur ulang pada akhirnya, secara khusus berfokus pada Mineral Kritis, terutama Nikel, untuk mempromosikan Praktik Pertambangan Berkelanjutan seperti yang diuraikan dalam analisis berikut. Untuk penelitian ini, kami mengumpulkan publikasi dari tahun 2010 hingga 2024 melalui database elektronik, menggunakan pendekatan kualitatif di samping observasi berbasis perpustakaan. Metode kami mengharuskan abstrak, temuan lengkap, dan komentar setiap artikel dapat diakses di semua database yang dipilih. Pencarian literatur dilakukan di database Scopus, Science Direct, Web of Science, PubMed, Google Scholar, Springer Link, dan ACS menggunakan kata kunci seperti Life Cycle Assessment (LCA), Cradle-to-Grave, Critical Minerals, Mining, dan Environmental Protection. Selain itu, kami menyusun

bibliografi makalah referensi untuk mencakup seluruh literatur. Awalnya, 120 makalah diidentifikasi dan setelah penyaringan ketat untuk memverifikasi kesesuaian dengan kriteria kami, 50 makalah tersisa.

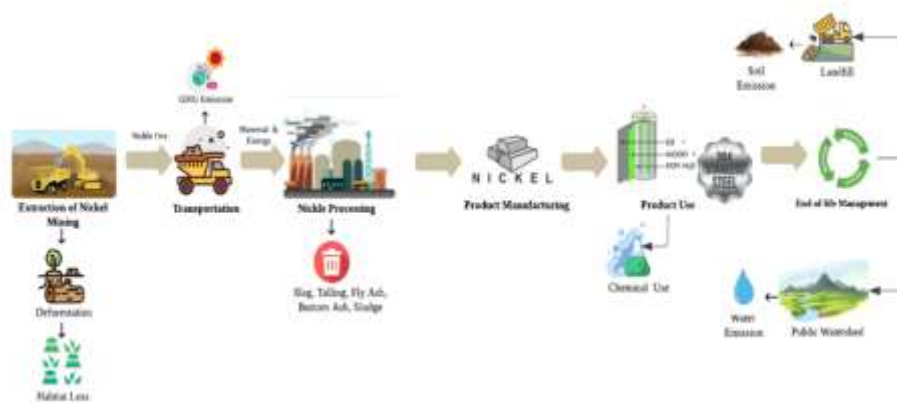


Gambar 2. Metode Penilaian Siklus Hidup (LCA)

HASIL PENELITIAN

Penambangan nikel, seperti industri ekstraktif lainnya, memiliki dampak lingkungan yang cukup besar di seluruh siklus hidup produknya. Dari ekstraksi bijih awal hingga pemrosesan, transportasi, pemurnian, dan pembuangan akhir, setiap fase memiliki efek lingkungan spesifik yang harus dievaluasi dan dikelola dengan cermat untuk mendorong praktik berkelanjutan. Standar ISO 14040 tentang Penilaian, Prinsip, dan Kerangka Kerja Siklus Hidup Manajemen Lingkungan memberikan pedoman yang diterima secara internasional untuk menilai dan memitigasi dampak lingkungan pada setiap tahap siklus hidup produk. Pendekatan komprehensif ini memastikan bahwa kegiatan penambangan dan produksi nikel dikelola secara bertanggung jawab, mempromosikan kelestarian lingkungan dan pemanfaatan sumber daya yang efisien (Burger Mansilha et al., 2019; Meißner, 2021). Ini melibatkan pendekatan cradle-to-grave, yang menyoroti pentingnya menganalisis siklus hidup lengkap suatu produk atau layanan dari tahap awal (cradle, seperti ekstraksi bahan baku) hingga tahap akhir (grave, seperti pembuangan atau daur ulang) (Dubreuil et al., 2010).

Pemeriksaan ekstensif terhadap jumlah produksi logam dari hampir 3.000 proyek pertambangan di seluruh dunia, yang mencakup sembilan bijih logam (bauxit, tembaga, emas, besi, timbal, mangan, nikel, perak, dan seng), dilakukan untuk menilai distribusinya dari tahun 2000 hingga 2019 (Bartzas & Komnitsas, 2015; Valero & Valero, 2013b). Analisis ini berusaha untuk mengevaluasi dampak perluasan aktivitas pertambangan logam pada ekosistem yang rentan di seluruh dunia. Ini secara khusus berfokus pada penentuan lokasi geografis lokasi ekstraksi bahan baku dan memeriksa efek lingkungan yang dihasilkan pada ekosistem yang berdekatan. Studi tersebut mengusulkan bahwa peningkatan aktivitas ekstraksi kemungkinan terkait dengan tekanan ekologis tambahan. Hipotesis ini didasarkan pada keyakinan bahwa volume produksi yang lebih besar secara langsung terkait dengan ekspansi fisik operasi pertambangan (Werner et al., 2020) dan penggunaan alat berat yang semakin intensif (Luckeneder et al., 2021).



Gambar 3. Batas-batas Sistem Nikel

Ekstraksi, pemrosesan mineral kritis, dan pengelolaan pada tahap akhir masa pakainya adalah tiga fase inti dalam produksi mineral kritis. Fasilitas pertambangan dan pengolahan membutuhkan input berupa material dan energi. Fase penambangan menghasilkan bijih nikel, sedangkan unit pemrosesan bergantung pada bahan baku dan sumber energi untuk operasinya. Limbah yang dihasilkan selama kegiatan ini meliputi jenis berbahaya dan tidak berbahaya. Penanganan limbah ini mengikuti semua peraturan terkait, dengan upaya yang difokuskan untuk meminimalkan dampak negatif lingkungan untuk mencegah gangguan pada masyarakat sekitar. Pengelolaan limbah untuk bahan berbahaya dan tidak berbahaya mengikuti pendekatan 4R: Reduce, Reuse, Recover, dan Recycle.

Untuk mengelola tumpahan limbah berbahaya (HTM) secara efektif, penting untuk memiliki sistem pengaduan yang kuat, prosedur yang ditetapkan, dan infrastruktur yang sesuai. Pendekatan ini membantu mengurangi insiden dan mencegah polusi akibat tumpahan yang tidak disengaja, memastikan bahwa konsekuensi berbahaya dapat dihindari. Dalam konteks ini, tidak ada pelanggaran besar di wilayah operasional yang berdampak negatif pada ekosistem atau masyarakat lokal. Untuk limbah yang tidak berbahaya, metode 4R (Reduce, Reuse, Recover, Recycle) diterapkan untuk menangani limbah anorganik yang tidak dapat terurai secara hayati. Sampah organik diproses melalui tahapan dekomposisi, pemisahan, daur ulang, dan penggunaan kembali. Menggunakan kembali limbah HTM meminimalkan dampak lingkungannya melalui teknik inovatif. Jika limbah HTM tidak dapat didaur ulang, limbah tersebut dialihkan ke pihak ketiga yang berwenang untuk penanganan yang tepat. Mitra eksternal yang disetujui ini bertanggung jawab untuk mengelola limbah menggunakan metode yang ramah lingkungan, termasuk pembuangan TPA, substitusi bahan bakar, stabilisasi, dan pemadatan, semuanya sesuai dengan peraturan yang relevan.

DISCUSSION

Ekstraksi Pertambangan Nikel

Industri nikel mencakup proses ekstraksi, fasilitas pemurnian, dan sistem pengelolaan limbah, yang secara kolektif melepaskan partikel (PM), nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_x), dan karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer. Selain itu, industri ini memasukkan berbagai kontaminan ke dalam badan air, termasuk tembaga (Cu), kadmium (Cd), seng (Zn), nikel (Ni), timbal (Pb), merkuri (Hg), dan total padatan terlarut (TDS). Emisi industri juga mengakibatkan pengendapan unsur-unsur seperti nikel (Ni) dan kromium (Cr) ke dalam tanah (Marzuki, 2016; Murdifin et al., 2019).

Berkonsentrasi pada kerentanan ekosistem memungkinkan penilaian potensi dampak kegiatan pertambangan terhadap ekosistem. Dalam ilmu keberlanjutan, kerentanan didefinisikan sebagai "sejauh mana sistem, subsistem, atau komponen sistem cenderung menimbulkan bahaya karena paparan bahaya, yang dapat bermanifestasi sebagai gangguan atau stres" (Binnemans et al., 2013; Chordia et al., 2021). Dalam evaluasi menyeluruh mereka, (Weißhuhn et al., 2018) menyarankan istilah "kerentanan ekosistem" lebih baik daripada konsep lain tentang "kerentanan ekologis", "lingkungan", atau "kerentanan lingkungan", dan mengusulkan sistem yang menentukan tingkat kerentanan melalui "paparan", "sensitivitas", dan "kapasitas adaptasi" (Calvo et al., 2016). Perspektif ini menekankan pendekatan biosentris daripada pendekatan antroposentris, memahami sistem lingkungan yang dibentuk oleh faktor pendorong alami dan antropogenik, bukan hanya sebagai sumber bahaya yang mempengaruhi sistem manusia. Penelitian kami menyelidiki apakah pengakuan kerentanan ekosistem berpotensi menghambat aktivitas ekstraksi, terutama dalam konteks operasi penambangan intensif (Danino-Perraud, 2020).

Eksplorasi dan ekstraksi nikel melibatkan berbagai kegiatan yang dapat menyebabkan degradasi lingkungan. Penambangan nikel, terutama di negara-negara dengan cadangan nikel besar seperti Indonesia, memiliki hubungan langsung yang signifikan dengan deforestasi. Pembukaan kawasan hutan untuk kegiatan pertambangan menyebabkan deforestasi dan degradasi lingkungan yang berkelanjutan, yang merusak ekologi hutan. Selain itu, kegiatan penambangan ini juga menyebabkan kerusakan vegetasi dan kondisi hayati seperti PT. Vale Indonesia (PTVI), sebagai salah satu perusahaan pertambangan nikel yang berlokasi di Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan, telah melakukan kegiatan penambangan sejak tahun 1970. Kegiatan pertambangan, yang termasuk dalam pembukaan kawasan hutan, menyebabkan degradasi hutan dan lahan. Oleh karena itu, upaya pemulihan kualitas hutan, seperti revegetasi di bekas kawasan tambang, menjadi agenda penting (Wei et al., 2011) menyatakan bahwa revegetasi merupakan rangkaian komponen terpenting dari kegiatan reklamasi.

The restoration process carried out from the results of forest deforestation is to measure how much biomass content is in the reforestation area (Smith dkk., 2016) (Smith et al., 2016) According to (Witno et al., 2018) . Thus, in planning forest management for revegetation areas, it is essential to investigate and understand the biomass content and the spatial distribution patterns of biomass. The findings of this study were derived using a regression model with rank as an estimator for biomass in the revegetation area of PT Vale Indonesia's former sites. mining. (Prematuri et al., 2020b) , Studi ini juga meneliti efek penambangan nikel terbuka pada kimia tanah dan pertumbuhan dua spesies pohon tropis yang tumbuh cepat, *Falcataria moluccana* dan *Albizia saman*. Sampel tanah dikumpulkan dari daerah yang terkena dampak pertambangan nikel serta dari hutan alam yang berdekatan. Parameter yang diukur meliputi pH tanah, konsentrasi fosfor (P) yang tersedia, karbon total (TC), nitrogen total (TN), rasio C/N, kapasitas pertukaran kation (KTK), dan konsentrasi unsur yang dapat dipertukarkan seperti K, Na, Mg, Ca, Fe, dan Ni. Bibit *F moluccana* dan *A saman* ditanam di tanah yang telah dikumpulkan dan disiapkan selama 15 minggu di rumah kaca. Ketinggian pucuk dan berat kering pucuk dan akar bibit diukur.

Temuan ini mengungkapkan bahwa tanah pasca-tambang nikel menunjukkan penurunan yang nyata dalam ketersediaan unsur hara esensial, dengan konsentrasi nitrogen total (TN), karbon total (TC), fosfor (P), kapasitas pertukaran kation (KTK), dan kalsium yang dapat ditukar (Ca) dan natrium (Na) menunjukkan penurunan masing-masing sebesar 98%, 93%, 11%, 62%, 85%, dan 74%, dibandingkan dengan yang ditemukan di tanah hutan alam. Selain itu, pH tanah pasca tambang lebih tinggi daripada pH tanah hutan yang tidak terganggu. Biomassa kering bibit *Falcataria moluccana* yang ditanam di tanah pasca tambang secara signifikan lebih rendah ($P < 0,05$) dibandingkan di tanah hutan alam, sedangkan tidak ada perbedaan signifikan yang diamati pada berat kering pucuk bibit *Albizia saman* antara kedua jenis tanah, atau berat kering akar untuk kedua spesies. Hasil ini menyoroti bahwa penambangan nikel terbuka secara substansial mengurangi kesuburan tanah, berdampak negatif pada pertumbuhan bibit *F moluccana* dan *A saman*.

Operasi penambangan nikel tambang terbuka memiliki dampak yang nyata pada kesuburan tanah. Pendekatan penambangan ini melibatkan ekstraksi batuan atau mineral dari lubang permukaan, yang mengakibatkan gangguan yang cukup besar pada tanah lapisan atas dan vegetasi, yang akibatnya merusak kesuburan tanah. Tanah ultramafik yang kaya nikel, sering dikenal sebagai tanah serpentine dalam studi botani dan ekologi, menunjukkan karakteristik unik yang terkait dengan degradasi ini. Baik tanah dan batuan serpentin maupun ultramafik ditandai dengan konsentrasi logam berat yang meningkat dan rasio kalsium terhadap magnesium (Ca/Mg) yang sangat miring, menghadirkan tantangan tambahan bagi produktivitas tanah dan adaptasi tanaman (Kumar & Maiti, 2013) dan kandungan nutrisi tanaman yang buruk seperti N, P, dan K. Nitrogen dan fosfor adalah nutrisi penting yang memainkan peran penting dalam meningkatkan produktivitas tanah dan mendukung perkembangan tanaman. Nutrisi ini secara substansial meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman, meningkatkan kandungan klorofil dan karoten, dan meningkatkan

morfologi akar yang lebih baik, yang semuanya penting untuk kesehatan dan produktivitas tanaman yang optimal (García-Palacios et al., 2012). Penelitian sebagian besar menunjukkan bahwa pengayaan nitrogen hanya memiliki efek terbatas pada komunitas tanaman. Karakteristik fisik, kimia, dan biologis tanah yang beragam terkait erat dengan pengayaan nitrogen, yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan mengganggu keseimbangan nutrisi, terutama di area pertambangan. Pengayaan ini dapat memengaruhi kesehatan tanaman dan status nutrisinya secara keseluruhan di ekosistem yang terkena dampak tersebut.

Ketersediaan nitrogen di tanah sangat memengaruhi proses ekologis pada berbagai skala, mulai dari efek fisiologis dan tingkat komunitas hingga dampak layanan lingkungan dan ekosistem yang lebih luas. Pada tanah yang terkena dampak kegiatan pasca penambangan nikel, kadar nitrogen total (TN) terpantau 98% lebih rendah daripada yang ada di tanah hutan alam yang berdekatan, penurunan yang bahkan lebih nyata daripada penurunan 91,3% yang ditemukan pada tailing tambang emas Indonesia (Prematuri et al., 2020a). Operasi penambangan terbuka, seperti yang dilakukan di Pulau Bintan untuk bauksit, juga telah menunjukkan penurunan substansial dalam nitrogen total (TN), dengan penurunan mencapai 75% (Singh et al., 2012). Tren serupa diamati di tambang batubara terbuka di India, dengan pengurangan TN sebesar 53%, dan di Amerika Serikat, di mana pengurangan berkisar antara 53% hingga 80% (Shrestha & Lal, 2011). Fosfor (P) berfungsi sebagai makronutrien penting lainnya untuk tanaman. Dalam penelitian ini, fosfor yang tersedia di tanah pasca-pertambangan nikel diukur pada $11,00 \pm 0,02$ mg $P_2 O_5$ /kg, sedikit di bawah $12,30 \pm 0,02$ mg $P_2 O_5$ /kg yang ditemukan di tanah hutan alam. Fosfor memainkan peran kunci dalam membentuk keanekaragaman hayati dan biomassa ekosistem alami (Cramer, 2010). Di banyak ekosistem subtropis dan tropis, fosfor sering dianggap sebagai faktor pembatas utama untuk produksi daripada nitrogen (Vitousek et al., 2010). Studi terbaru di hutan tropis menunjukkan bahwa sebagian besar fosfor (P) hadir dalam bentuk organik yang terkait erat dengan mikroba tanah. Menanggapi terbatasnya ketersediaan P di dalam tanah, tanaman telah mengembangkan berbagai strategi untuk meningkatkan kemampuannya menyerap fosfor organik. Salah satu strategi tersebut melibatkan peningkatan aktivitas enzim fosfatase. Untuk meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor, tanaman juga memperpanjang waktu retensi fosfor dalam biomassa mereka sekaligus mengurangi konsentrasi fosfor dalam jaringan mereka (Dalling et al., 2016).

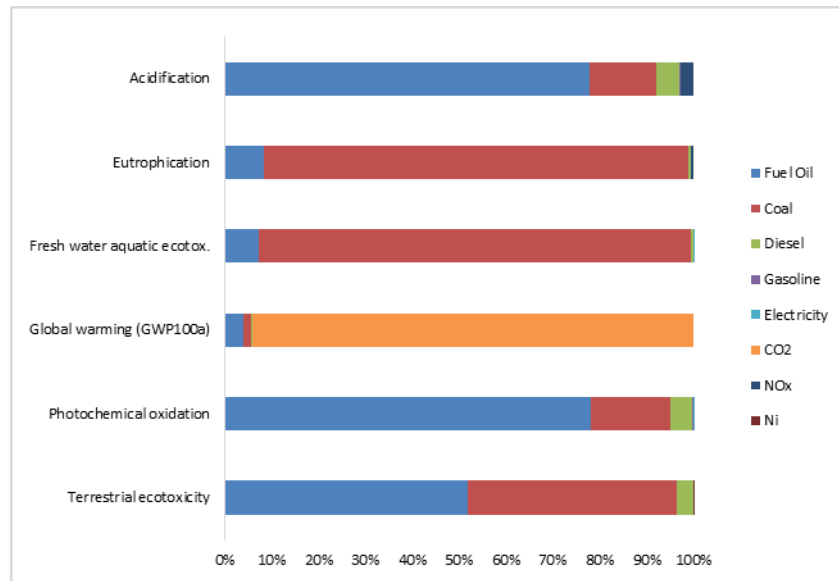
Dampak aktivitas penambangan permukaan menyebabkan gangguan ekosistem dan sifat tanah yang signifikan, termasuk pengurangan bahan organik tanah (SOM) dan kandungan karbon organik (X. Liu et al., 2017). Hilangnya bahan organik tanah terjadi pada awalnya karena pengupasan tanah dari lokasi pertambangan. Kerugian tambahan terjadi ketika tanah disimpan di tempat pembuangan sampah selama proses penggantian di lokasi reklamasi. Kehilangan ini signifikan karena bahan organik tanah sangat penting untuk kesuburan tanah dan kemampuannya menahan air. Selain itu, tanah berfungsi sebagai reservoir utama karbon terestrial. Pengelolaan lapisan atas tanah yang efektif sangat penting untuk merehabilitasi lahan pasca tambang untuk

mencegah hilangnya karbon. Misalnya, upaya reklamasi di tambang pasca-batu bara di Wyoming menunjukkan tingkat penyerapan karbon yang tinggi. Secara khusus, kandungan karbon organik di lokasi reklamasi dekat Hanna, Wyoming, meningkat dari 10,9 g C kg⁻¹ pada tahun 1983 menjadi 20,5 g C kg⁻¹ pada tahun 2002. Karbon adalah parameter penting dalam tanah, meningkatkan sifat fisik dan kimianya serta kualitasnya secara keseluruhan. Karbon tanah ada dalam berbagai bentuk, masing-masing dengan fungsi dan waktu tinggal yang berbeda. Proses pengupasan tanah lapisan atas dan mencampurnya dengan tanah di bawahnya secara signifikan mengurangi konsentrasi karbon organik. Studi terbaru menunjukkan bahwa kadar karbon total (TC) di tanah pasca-pertambangan nikel adalah 93% lebih rendah daripada yang ditemukan di tanah hutan alam.

Transportasi Bijih Nikel

Analisis terperinci tentang emisi gas buang dan partikel yang dihasilkan oleh kendaraan transportasi, seperti truk dan alat berat yang beroperasi di jalan raya dan rute transportasi yang ditentukan, diperlukan untuk penilaian dampak lingkungan yang berkaitan dengan pengangkutan bijih nikel, konsentrat, atau produk nikel olahan ke fasilitas pemrosesan, pelabuhan untuk ekspor, atau pengguna akhir. Pengaruh terhadap kualitas udara di sepanjang koridor transportasi juga dievaluasi dalam penilaian ini, dengan perhatian khusus diberikan pada implikasi terhadap polusi udara lokal, termasuk pembuangan partikel dan gas berbahaya dari kendaraan ini.

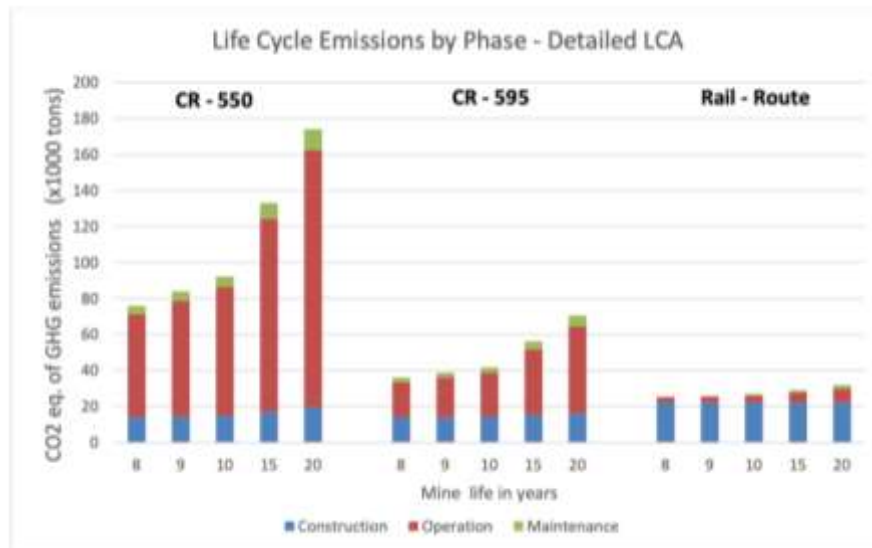
Untuk mengevaluasi dampak emisi gas rumah kaca, potensi pemanasan global (GWP) karbon dioksida dihitung selama satu abad dan direpresentasikan dalam hal setara karbon dioksida. Efek potensial dari produksi satu ton nikel, emas, tembaga, timah, dan bauksit di Indonesia tercantum dalam Tabel 3. 4.61.E+04, 7.34.E+07, 8.01.E+03, 1.02.E+04, dan 3.10.E+04 kg CO₂ eq/t adalah nilai yang sebanding. Penyebab utama efek pemanasan global pada industri yang menghasilkan tembaga, nikel, timah, dan bauksit adalah karbon dioksida (CO₂), yang masing-masing menyumbang 99,99%, 93,97%, 76,22%, dan 66,63% dari total emisi untuk setiap logam (Paraschiv & Paraschiv, 2020). Penggunaan listrik merupakan kontributor utama efek pemanasan global yang terkait dengan sektor emas, terhitung 91,41% dari total emisi (Gambar 6). Penggunaan kendaraan pertambangan bertenaga diesel dan pembakaran batu bara di pembangkit uap adalah dua sumber utama emisi karbon dioksida (Suherman & Saleh, 2018). Akumulasi karbon dioksida dan gas rumah kaca lainnya di atmosfer bumi menyebabkan pantulan energi inframerah dari matahari kembali ke permukaan planet, sehingga memperburuk pemanasan global (Letcher, 2020). Selain itu, konsekuensinya mencakup pencairan lapisan es kutub yang progresif, yang mengakibatkan kenaikan permukaan laut, bersama dengan perubahan pola iklim global (Hauschild et al., 2018; Khosravi et al., 2022; Bordbar, 2023).



Gambar 4. Dampak Lingkungan Kontributor Produksi Nikel

Berdasarkan (Oduru, 2017), Hasil dari dua evaluasi penilaian siklus hidup (LCA) menunjukkan potensi pemanasan global yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca (GRK) selama satu abad, dinyatakan dalam ton setara CO₂. Gambar 4, yang menyoroti umur tambang 8, 9, 10, 15, dan 20 tahun dan mencakup data emisi dari fase bangunan, operasi, dan pemeliharaan, menampilkan hasil kumulatif dari penilaian siklus hidup komprehensif (LCA) untuk CR-550, CR-595, dan jalur kereta api konseptual. Hasilnya menunjukkan bahwa emisi keseluruhan untuk keputusan jalan raya selama fase operasi lebih dari jumlah emisi dari fase bangunan dan pemeliharaan. Sebaliknya, sebagian besar emisi dari pilihan kereta api selama masa pakai tambang datang selama tahap konstruksi.

Sementara emisi yang terkait dengan infrastruktur relatif stabil karena sebagian besar aktivitas bangunan terjadi pada fase pertama, emisi operasional menunjukkan peningkatan linier seiring dengan usia tambang. Volume transportasi bijih tahunan yang konsisten, di mana setiap beban ekstra secara bertahap menambah total emisi, bertanggung jawab atas peningkatan linier dalam emisi operasi ini. Meskipun mereka meningkat lebih bertahap dan memiliki emisi operasi yang lebih rendah, alternatif kereta api menunjukkan pola yang sama. Dibandingkan dengan dua kategori lainnya, emisi pemeliharaan merupakan persentase kecil dan secara bertahap meningkat seiring dengan kematangan peralatan.



Gambar 5. Estimasi Emisi Siklus Hidup Berbasis Fase Menggunakan LCA Terperinci

Temuan menunjukkan bahwa CR-595 adalah alternatif yang unggul dalam hal emisi jika dibandingkan dengan dua opsi jalan, sedangkan opsi rel adalah pilihan terbaik secara keseluruhan, terutama untuk umur tambang yang lebih lama. Emisi dari fase operasi jalan alternatif meningkat secara linier dengan usia tambang dan secara substansial lebih tinggi daripada emisi dari fase pembangunan dan pemeliharaan. Sebaliknya, jalur kereta api alternatif memiliki emisi dari fase operasi yang jauh lebih rendah daripada emisi dari fase konstruksi, dengan hanya sedikit peningkatan selama masa pakai tambang. Emisi pemeliharaan lebih rendah daripada kategori lain dan agak meningkat di semua pilihan.

Namun, untuk opsi kereta api, emisi pemeliharaan menjadi hampir setara dengan emisi operasional untuk umur tambang terpanjang (S. K. Oduru & Lautala, 2017). Penelitian lain yang mengembangkan proses LCA (Kalluri et al., 2016) dan menerapkannya pada studi kasus tambang Eagle. Namun, studi ini juga menyelidiki manfaat dari proses "LCA operasional" yang hanya mencakup emisi dari fase operasi dan apakah pendekatan tersebut dapat digunakan sebagai opsi yang kurang intensif untuk melakukan analisis.

Pengolahan Pertambangan Nikel

Terak adalah produk sampingan dari ekstraksi logam suhu tinggi fasilitas pengolahan mineral dari bijih. Terak yang dipulihkan ini digunakan untuk memproduksi beton. Secara internal, beberapa perusahaan menggunakan terak untuk komponen bangunan beton, dasar jalan, dan konstruksi pondasi halaman. Setelah diklasifikasikan ulang dari limbah berbahaya menjadi tidak berbahaya, terak sekarang dapat digunakan dalam konstruksi komersial. Tailing adalah produk sampingan dari proses hidrometalurgi yang memurnikan bijih emas. Bahan bangunan berkelanjutan yang disebut Green Fine Aggregate (GFA) terbuat dari tailing daur ulang ini. Selain itu, fly ash dan bottom ash yang secara kolektif dikenal sebagai FABA diproduksi dengan membakar batubara di pembangkit listrik tenaga uap dan presipitor elektrostatik. FABA digunakan

sebagai bahan konstruksi di dalamnya. Meskipun FABA sebelumnya tidak diakui sebagai limbah berbahaya, namun FABA memiliki banyak potensi untuk diubah menjadi produk dengan nilai eksternal yang tinggi.

Beberapa prosedur kimia diperlukan untuk memisahkan nikel dari mineral lain dan meningkatkan kemurnian produk akhir selama konversi bijih nikel menjadi konsentrat nikel atau barang olahan. Biasanya, metode flotasi digunakan dalam pemisahan ini bersama dengan berbagai bahan kimia, termasuk agen flotasi dan reagen lainnya. Setelah pemisahan, nikel dimurnikan menggunakan proses seperti pemisahan hidrometalurgi atau elektrolitik. Misalnya, nikel dilarutkan dan dipisahkan dari kontaminan menggunakan asam sulfat. Berbagai bahan kimia, termasuk sebagai reagen flotasi dan pelarut, digunakan dalam pemrosesan bijih nikel untuk secara efisien memisahkan mineral berharga dari gangue atau unsur limbah. Namun, jika bahan kimia ini tidak dikelola dengan baik, tanah dan air dapat terkontaminasi.

Pada suhu antara 1100 dan 1200 °C, proses pirometalurgi digunakan untuk secara selektif mengurangi bijih nikel laterit, mengubah senyawa besi dan nikel oksida menjadi logam feronikel. Untuk memetalisasi besi, sejumlah kecil reduktan dan aditif diperkenalkan selama proses reduksi ini. Konsentrasi nikel dan ketersediaan dalam konsentrat dapat ditingkatkan dengan menambahkan lebih banyak aditif, tetapi menggunakan terlalu banyak bahan kimia dapat meningkatkan biaya produksi proses reduksi selektif. Reduktan yang terbuat dari batubara sulfur tinggi menghadirkan pengganti aditif tradisional yang berpotensi hemat biaya. Dengan menetapkan keadaan ideal yang mengurangi titik leleh fase logam dan non-logam, proses reduksi selektif, yang menggabungkan proses solid-state dan liquid-state, membuatnya lebih mudah untuk mengoptimalkan biaya produksi. Dengan menurunkan persyaratan suhu dan konsumsi energi, pendekatan ini memposisikan teknologi reduksi selektif untuk bijih nikel laterit sebagai pengganti kompetitif untuk teknik pirometalurgi konvensional termasuk tanur sembur dan tungku listrik rotary kiln.

Pemrosesan bijih nikel laterit bermutu rendah (memiliki kurang dari 1,7% Ni), yang berlimpah di seluruh dunia tetapi memiliki nilai ekonomi yang kecil jika diperlakukan secara konvensional, adalah masalah lain yang ingin dipecahkan oleh teknik ini. Selain itu, tanah, udara, dan air semuanya terkena dampak buruk oleh polusi industri yang disebabkan oleh penumpukan limbah metalurgi.

Penelitian terkait penambahan reduktan batubara pada proses reduksi bijih nikel laterit tipe limonit telah dilakukan (Elliott et al., 2017). (Elliott et al., 2015, 2017; Jiang et al., 2013; Li et al., 2015), menurut penelitian yang dilakukan oleh Sri Harjanto (2015), Penggunaan batubara lignit sebagai reduktan, yang dikategorikan sebagai batubara bermutu rendah, tidak berdampak signifikan terhadap kandungan atau hasil nikel. Namun demikian, pemulihan logam selama proses reduksi dengan batubara lignit jauh lebih rendah daripada yang diperoleh dengan batubara bitumen. Variasi ini dapat ditelusuri kembali ke kandungan karbon yang lebih rendah yang ditemukan dalam batubara lignit dibandingkan dengan batubara bitumennya.

Oleh karena itu, menerapkan strategi pengelolaan limbah yang efektif sangat penting untuk meningkatkan keberlanjutan industri baja, melestarikan sumber daya alam, dan mempromosikan perlindungan lingkungan.

Manufaktur Produk Pertambangan Nikel

Ketika bijih nikel dilebur atau direduksi dengan batu bara atau kokas ditambahkan, feronikel adalah apa yang diciptakan. Rasio nikel dan besi yang tepat yang dibuat selama proses peleburan membuat feronikel menjadi bagian penting dari industri baja dan industri. Saat mengevaluasi dampak feronikel, perhitungan awal memperhitungkan kontribusi komponen besi. Ferronickel diperlukan untuk produksi paduan yang digunakan dalam produksi stainless steel. Sebuah studi Penilaian Siklus Hidup (LCA) baru-baru ini tidak menemukan dampak besi tua, yang sering digunakan dalam tungku busur listrik untuk memproduksi baja tahan karat.

Menurut penelitian, feronikel memiliki persentase nikel rata-rata 29%, yang berarti bahwa besi membentuk sekitar 71% dari jumlah produk. Ferronikel seringkali hanya mengandung sejumlah kecil unsur lain yang sangat penting. Menurut studi baru-baru ini, potensi pemanasan global (GWP) dapat diturunkan sebesar 12,6% dengan memperhitungkan kredit lingkungan yang terkait dengan besi dalam feronikel. Ini berarti bahwa untuk setiap kilogram nikel yang ada dalam feronikel, emisi dapat turun dari 29 kg CO₂ menjadi 26 kg CO₂ (Mistry et al., 2016).

Pembuatan feronikel melibatkan sejumlah polutan udara dari operasi peleburan dan pemurnian yang menimbulkan kekhawatiran bagi lingkungan. Partikulat, sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), dan berbagai gas lainnya biasanya termasuk dalam emisi ini. Penduduk di daerah sekitar pabrik peleburan mungkin memiliki gangguan pernapasan dan masalah kesehatan lainnya sebagai akibat dari efek negatif polutan ini terhadap kualitas udara. Selain itu, smelter feronikel menghasilkan limbah cair yang mencakup senyawa kimia berbahaya dan logam berat termasuk nikel, besi, dan kromium. Pengelolaan air limbah yang tidak tepat ini dapat mencemari sumber air terdekat, merusak ekosistem perairan dan menimbulkan risiko kesehatan yang serius bagi manusia. Praktik pengelolaan limbah yang efektif sangat penting untuk mengurangi dampak lingkungan ini dan melindungi masyarakat dan ekosistem sekitarnya dari konsekuensi berbahaya dari produksi feronikel (Ma et al., 2019). Oleh karena itu, penting untuk menerapkan teknologi pengelolaan limbah dan mitigasi emisi yang tepat untuk meminimalkan dampak lingkungan dan kesehatan dari produksi feronikel (Li et al., 2015).

Pengelolaan Akhir Masa Pakai Tambang Nikel

Manajemen akhir masa pakai dalam pertambangan nikel mencakup berbagai strategi dan praktik yang bertujuan untuk secara efektif menangani limbah dan sisa-sisa yang dihasilkan dari operasi penambangan setelah dihentikan. Kegiatan pertambangan diketahui menyebabkan kerusakan lingkungan yang signifikan, terutama melalui pelepasan bahan kimia yang dapat memperburuk kualitas air. Misalnya, limbah tambang dapat mengubah air jernih menjadi coklat keruh, menghalangi sinar matahari dan menghambat keanekaragaman hayati laut, termasuk terumbu karang yang merupakan komponen penting dari ekosistem laut Indonesia yang kaya. Terlepas dari masalah lingkungan ini, sektor pertambangan telah meningkatkan kualitas hidup penduduk setempat dengan memasok air bersih, listrik, dan kemungkinan pendidikan. Saluran komersial baru telah meningkatkan kesehatan masyarakat secara keseluruhan dengan menurunkan tingkat kematian bayi dan memperluas akses ke makanan dan vitamin yang sehat.

Sangat penting untuk menangani sampah yang dihasilkan selama operasi penambangan secara efektif. Untuk mengurangi bahaya kontaminasi, hal ini melibatkan penanganan limbah batuan, limbah kimia, dan jenis sampah lainnya, yang semuanya perlu dikelola sesuai dengan undang-undang lingkungan yang berlaku. Selain itu, penting untuk mengembalikan lokasi penambangan ke keadaan semula atau hampir alami. Untuk mengurangi kerusakan ekologis dan mendorong pemulihan lingkungan di tempat-tempat yang terkena dampak aktivitas pertambangan, ini memerlukan penutupan tambang, restorasi topografi, dan regenerasi vegetasi. Pelestarian ekosistem khas Indonesia dan keuntungan finansial dari pertambangan dapat hidup berdampingan secara damai berkat inisiatif ini.

Sektor pertambangan merupakan kontributor utama polusi dan kerusakan lingkungan, terutama karena ketergantungannya pada operasi intensif energi. Kekayaan cadangan batubara di Indonesia sangat penting untuk menjaga jaringan listrik dan meningkatkan perekonomian negara. Namun, ada konsekuensi iklim serius yang terkait dengan meluasnya penggunaan batu bara, yang menjadi lebih terlihat di Indonesia dan di seluruh dunia. Sebagai salah satu dari tiga negara yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim, Indonesia sangat rentan, menurut laporan Bank Dunia dan Bank Pembangunan Asia. Mengingat Indonesia memiliki populasi tertinggi kelima di dunia untuk jumlah penduduk yang tinggal di daerah pesisir dataran rendah, kerentanan ini sangat mengkhawatirkan. Naiknya permukaan laut, banjir yang lebih sering, dan peristiwa terkait iklim lainnya lebih mungkin terjadi di daerah tertentu, membahayakan infrastruktur, keanekaragaman hayati, dan mata pencaharian.

Indonesia harus mencapai keseimbangan antara ketahanan iklim dan pertumbuhan ekonomi saat menegosiasikan seluk-beluk kelestarian lingkungan dan produksi energi. Mengurangi konsekuensi negatif dari ketergantungan batu bara dan memperkuat kemampuan negara untuk beradaptasi dengan perubahan iklim akan membutuhkan peralihan ke sumber energi yang lebih bersih, penerapan kebijakan lingkungan yang kuat, dan investasi dalam teknologi energi terbarukan (Bronkhorst & Bhandari, 2021). Ibu kota negara, Jakarta, secara bertahap tenggelam di bawah permukaan laut, dengan sering terjadi banjir. Banjir ini akan menjadi lebih sering jika terus terjadi. Selain itu, Jakarta sering banjir dengan air asin daripada air tawar karena naiknya permukaan laut. Ini adalah hasil dari kota metropolitan yang disusupi oleh air laut. Pada tahun 2007, 76 orang tewas ketika 1,5 meter air asin membanjiri rumah-rumah di wilayah utara Jakarta (Sevin, 2021).

Wilayah utara Jakarta, meskipun dibangun tanggul pesisir pada tahun 2002, menghadapi tantangan yang signifikan dalam mengelola banjir, terutama dari laut. Infrastruktur ini, yang dimaksudkan untuk melindungi dari kenaikan permukaan air, terbukti tidak memadai selama peristiwa banjir parah pada tahun 2007, menyoroti kerentanan daerah perkotaan pesisir terhadap dampak perubahan iklim. Dalam beberapa tahun terakhir, peristiwa cuaca ekstrem menjadi semakin sering, termasuk banjir, angin topan, badai laut, dan gelombang panas. Fenomena ini diperburuk oleh perubahan pola curah hujan, dengan musim hujan yang lebih pendek menjadi lebih umum di bagian barat Indonesia. Pergeseran ini tidak hanya mempengaruhi produktivitas pertanian tetapi juga berkontribusi pada peningkatan risiko tanah longsor, terutama di daerah pegunungan dan perbukitan curam seperti Sulawesi dan Maluku. Curah hujan lebat selama periode hujan yang padat ini dapat menjenuhkan tanah, menyebabkan ketidakstabilan dan mengakibatkan tanah longsor yang mengancam masyarakat dan infrastruktur.

Interaksi kenaikan permukaan laut, cuaca ekstrem, dan perubahan kondisi iklim memerlukan tindakan mendesak dalam hal perencanaan kota, pengurangan risiko bencana, dan strategi adaptasi iklim. Meningkatkan ketahanan daerah perkotaan dan pedesaan di Indonesia akan membutuhkan langkah-langkah komprehensif, termasuk perbaikan sistem drainase, upaya reboisasi, dan keterlibatan masyarakat dalam inisiatif kesiapsiagaan bencana. Mengatasi tantangan ini sangat penting untuk menjaga mata pencaharian dan memastikan keberlanjutan lingkungan Indonesia dalam menghadapi perubahan iklim dalam menghadapi perubahan iklim (IEA (2022)). Padahal, udara di Jakarta penuh dengan polutan. Produksi salah satu PLTU batu bara harus dikurangi pada September 2023 karena tingginya emisi CO₂ dan polusi di ibu kota. Pada tahun 2021, sekitar 150.000 orang di Indonesia meninggal sebelum waktunya karena terpapar polusi udara sekitar dan 100.000 lainnya karena menghirup udara dalam ruangan yang tercemar (IEA, 2022). Meskipun Indonesia memiliki PDB per kapita tertinggi kelima di ASEAN pada tahun 2022, Indonesia hanya menempati peringkat ke-8 (dari 10), di bawah Laos dan Myanmar. Untuk itu, perlu didorong konservasi energi dalam proses penambangan dan pengolahan untuk mengurangi jejak karbon dan konsumsi energi secara keseluruhan.

Selain itu, penting untuk mengatasi masalah tata kelola dan sosial yang terkait dengan kegiatan pertambangan. Indonesia harus meningkatkan kinerja lingkungan dan kerangka tata kelola untuk memantapkan dirinya sebagai pemasok yang andal, terutama karena permintaan akan sumber daya mineral yang bersumber secara berkelanjutan dan bertanggung jawab terus meningkat di kalangan konsumen dan investor. Untuk mengurangi dampak lingkungan dan sosial dari pertambangan, upaya kolaboratif antara badan pemerintah dan sektor swasta sangat penting, memerlukan tindakan dan strategi yang komprehensif. Selain itu, untuk mengurangi intensitas emisi gas rumah kaca dari produksi dan pemrosesan mineral, sangat penting untuk menerapkan kebijakan yang memfasilitasi transisi dari ketergantungan pada tenaga batu bara ke sumber energi rendah karbon. Selain itu, adopsi daur ulang dan praktik ekonomi sirkular lainnya dapat mengurangi permintaan sumber daya primer dan mengurangi konsekuensi lingkungan dan sosial yang merugikan yang terkait dengan ekstraksi dan pemrosesan mineral. Untuk mempromosikan produksi berkelanjutan dan tata kelola yang efektif dalam operasi pertambangan, ada kebutuhan mendesak untuk meningkatkan inisiatif pengembangan kapasitas. Inisiatif semacam itu harus fokus pada peningkatan keterampilan teknis di berbagai bidang seperti survei geologi, estimasi cadangan, praktik pertambangan berkelanjutan, dan memperkuat kemampuan kelembagaan untuk mendukung tata kelola yang baik dan kerangka peraturan yang transparan.

Dengan menggunakan strategi ini, diharapkan pengelolaan kegiatan ekstraksi mineral kritis, terutama yang terkait dengan nikel, dapat dilakukan dengan cara yang lebih berkelanjutan, sehingga meminimalkan dampak buruknya terhadap lingkungan dan masyarakat setempat.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian tentang penilaian siklus hidup (LCA) mineral kritis menggarisbawahi perlunya mengadopsi praktik pertambangan berkelanjutan untuk mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan kesejahteraan sosial. Menggunakan teknologi yang lebih bersih dan lebih efisien selama ekstraksi dan pemurnian mineral kritis dapat menyebabkan pengurangan emisi gas rumah kaca, polusi air dan tanah, dan degradasi habitat. Teknologi canggih, seperti peralatan pertambangan hemat energi, proses pengolahan yang dioptimalkan, dan sistem pengelolaan limbah yang ditingkatkan, dapat secara signifikan mengurangi konsekuensi lingkungan yang negatif.

Selain itu, praktik rehabilitasi tambang setelah selesainya operasi sangat penting untuk memulihkan ekosistem lokal. Ini termasuk inisiatif seperti menanam kembali vegetasi asli, memulihkan habitat satwa liar, dan mengelola tanah yang terdegradasi. Efisiensi energi dalam operasi pertambangan dapat lebih ditingkatkan dengan memanfaatkan peralatan hemat energi, mengoptimalkan proses, dan menerapkan praktik manajemen energi yang ketat. Langkah-langkah ini tidak hanya menurunkan jejak karbon tetapi juga mengurangi biaya operasional. Integrasi sumber energi terbarukan – seperti matahari, angin, dan biomassa – dapat mengurangi ketergantungan pada bahan

bakar fosil dan mengurangi emisi karbon. Akibatnya, pengelolaan limbah yang efektif menjadi penting untuk meminimalkan dampak lingkungan yang merugikan.

Secara khusus, teknik daur ulang dan pemulihan logam dari limbah elektronik dan residu industri memfasilitasi penggunaan kembali nikel dan logam berharga lainnya. Proses pirometalurgi dan hidrometalurgi berperan penting dalam hal ini. Pengelolaan limbah yang tepat, yang mencakup stabilisasi dan pembuangan limbah beracun yang aman, membantu mengurangi risiko pencemaran lingkungan. Limbah padat dapat diubah menjadi bahan konstruksi atau digunakan kembali dalam aplikasi industri lainnya. Selain itu, berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi ramah lingkungan baru, bersama dengan penerapan kebijakan dan peraturan yang mendukung, sangat penting untuk mencapai tujuan keberlanjutan.

Melalui adopsi teknologi yang lebih bersih, langkah-langkah efisiensi energi, pengelolaan limbah yang bijaksana, pelestarian ekosistem, dan keterlibatan masyarakat, didukung oleh kebijakan yang kondusif, industri pertambangan dapat memberikan kontribusi besar bagi keberlanjutan global. Integrasi temuan dari penelitian ini ke dalam praktik operasional sehari-hari akan menghasilkan manfaat jangka panjang bagi lingkungan, ekonomi, dan masyarakat.

PENELITIAN LANJUTAN

Penelitian ini memiliki keterbatasan tertentu yang harus ditangani dalam penelitian selanjutnya. Pertama, ruang lingkup Penilaian Siklus Hidup (LCA) dibatasi pada mineral kritis tertentu dan wilayah tertentu, yang mungkin tidak sepenuhnya mewakili praktik pertambangan global. Memperluas penilaian untuk mencakup berbagai mineral yang lebih luas dan lokasi geografis yang beragam dapat memberikan wawasan yang lebih komprehensif. Selain itu, menggabungkan data lapangan real-time dan menangani dimensi sosial-ekonomi akan meningkatkan pemahaman holistik tentang praktik pertambangan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada kolega dan para ahli atas umpan balik dan dukungan mereka yang berharga selama penelitian ini. Terima kasih khusus kepada [masukkan lembaga atau lembaga pendanaan] atas bantuan keuangan dan kepada semua yang berkontribusi dalam pengumpulan dan analisis data. Dukungan Anda sangat berharga.

DAFTAR PUSTAKA

- Auwah-Offei, K., & Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(1). <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0246-6>.
- Bartzas, G., & Komnitsas, K. (2015). Life cycle assessment of ferronickel production in Greece. *Resources, Conservation and Recycling*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.016>.
- Bigum, M., Brogaard, L., & Christensen, T. H. (2012). Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 207-208. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.001>.
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 51). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
- Bronkhorst, B. Van, & Bhandari, P. (2021). *Climate Risk Profile: Indonesia (2021)*. World Bank.
- Burger Mansilha, M., Brondani, M., Farret, F. A., Cantorski Da Rosa, L., & Hoffmann, R. (2019). Life cycle assessment of electrical distribution transformers: Comparative study between aluminum and copper coils. *Environmental Engineering Science*, 36(1). <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0256>.
- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A., & Valero, A. (2016). Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? *Resources*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/resources5040036>.
- Centre For Energy and Mining Law Studies. (2020). *Students Must Take Role in Energy and Mining Activities*. <https://pushep.or.id/Mahasiswa-Harus-Ambil-Peran-Dalam-Kegiatan-Energi-Dan-Pertambangan>.
- Chordia, M., Nordelöf, A., & Ellingsen, L. A. W. (2021). Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(10). <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01976-0>.
- Coman, V., Robotin, B., & Ilea, P. (2013). *Resources, Conservation and Recycling Nickel recovery / removal from industrial wastes: A review*. "Resources, Conservation & Recycling," 73.
- Cramer, M. D. (2010). Phosphate as a limiting resource: Introduction. In *Plant and Soil* (Vol. 334, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0497-9>.
- Dalling, J. W., Heineman, K., Lopez, O. R., Wright, S. J., & Turner, B. L. (2016). Nutrient Availability in Tropical Rain Forests: The Paradigm of Phosphorus Limitation. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_12.
- Danino-Perraud, R. (2020). The Recycling of Lithium-Ion Batteries: A Strategic Pillar for the European Battery Alliance. In *Études de l'Ifri* (Issue March).
- Dubreuil, A., Young, S. B., Atherton, J., & Gloria, T. P. (2010). Metals recycling maps and allocation procedures in life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6). <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0174-5>.
- Elliott, R., Pickles, C. A., & Peacey, J. (2017). Ferronickel particle formation during the carbothermic reduction of a limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.020>.
- García-Palacios, P., Maestre, F. T., Bardgett, R. D., & de Kroon, H. (2012). Plant responses to soil heterogeneity and global environmental change. *Journal of Ecology*, 100(6). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.02014>.
- IEA. (2022, September). *An Energy Sector Roadmap to Net Zero Emissions in Indonesia*. <https://www.iea.org/Reports/an-Energy-Sector-Roadmap-to-Net-Zero-Emissions-in-Indonesia>.

- Jiang, M., Sun, T., Liu, Z., Kou, J., Liu, N., & Zhang, S. (2013). Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process. *International Journal of Mineral Processing*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.04.005>
- Kalluri, S., Lautala, P., & Handler, R. (2016). Toward integrated life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for road and multimodal transportation alternatives - A case study of the highland copper project. 2016 Joint Rail Conference, JRC 2016. <https://doi.org/10.1115/JRC2016-5841>
- Kumar, A., & Maiti, S. K. (2013). Availability of chromium, nickel and other associated heavy metals of ultramafic and serpentine soil/rock and in plants. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2).
- Letcher, T. M. (2020). Introduction with a focus on atmospheric carbon dioxide and climate change. In *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00001-3>.
- Li, G., Luo, J., Peng, Z., Zhang, Y., Rao, M., & Jiang, T. (2015). Effect of quaternary basicity on melting behavior and ferronickel particles growth of saprolitic laterite ores in Krupp-Renn process. *ISIJ International*, 55(9). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-058>.
- Liu, X., Bai, Z., Zhou, W., Cao, Y., & Zhang, G. (2017). Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.078>.
- Luckeneder, S., Giljum, S., Schaffartzik, A., Maus, V., & Tost, M. (2021). Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems. *Global Environmental Change*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303>.
- Ma, X., Yang, D., Zhai, Y., Shen, X., Zhang, R., & Hong, J. (2019). Cost-combined life cycle assessment of ferronickel production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(10). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01600-2>.
- Marzuki, I. (2016). Analisis Chromium Hexavalent dan Nikel Terlarut dalam Limbah Cair Area Pertambangan PT VALE Tbk . Soroako-Indonesia. *Jurnal Chemica*, 17(2). <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/YF9QJ>.
- Meißner, S. (2021). The impact of metal mining on global water stress and regional carrying capacities—a gis-based water impact assessment. *Resources*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/resources10120120>.
- Mistry, M., Gediga, J., & Boonzaier, S. (2016). Life cycle assessment of nickel products. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1085-x>.
- Murdifin, I., Pelu, M. F. A., Putra, A. H. P. K., Arumbarkah, A. M., Muslim, & Rahmah, A. (2019). Environmental disclosure as corporate social responsibility: Evidence from the biggest nickel mining in Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(1). <https://doi.org/10.32479/ijeep.7048>.