

PERHITUNGAN EMISI GAS RUMAH KACA DALAM KAWASAN PERTAMBANGAN

Calculation of Greenhouse Gas Emissions in Mining Area

Aulya Putri^{1*}, Suwardi^{1,2}, Hermanu Widjaja^{1,2}, Dyah Tjahyandari Suryaningtyas^{1,2}, Putri Oktariani^{1,2}, Octaviana Randrikasari¹

¹Pusat Studi Reklamasi Tambang, IPB University, Kampus IPB Baranangsiang,
Bogor 16143

²Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, Dramaga,
Bogor 16680

*Korespondensi: aulyaputri@apps.ipb.ac.id

Received 02 Mei 2024, Revised 13 Mei 2024; Accepted 13 Juni 2024

Abstract

Carbon emissions are one of the components of greenhouse gas (GHG) emissions in the form of carbon dioxide (CO₂) which mainly comes from the use of fossil fuels and various human activities. Based on fossil fuel and industrial emissions data, in 2022 Indonesia ranked as the 6th largest carbon emitting country in the world after China, the United States, India, Russia and Japan, with 728.88 million tons of CO₂e total emissions. The Ministry of Industry reported that total GHG emissions from Indonesia's industrial sector reached 238.1 million tons of CO₂e in 2022. In the mining industry, GHG emissions originate from deforestation, energy use, processing, and refining, with non-renewable energy use being the largest emitter. GHG emissions from primary mineral and metal production contribute approximately 10% of global GHG emissions related to energy. Each mining industry may have varying primary sources of GHG emissions depending on the type of mine and the final product. Mining industries, as one of the major emitters, must conduct GHG inventories to understand emission sources and develop effective reduction strategies. GHG inventory activities are conducted based on guidelines provided by the Ministry of Environment and Forestry's National Greenhouse Gas Inventory Management Handbook (2012), Book II Volumes 1-4. Efforts to reduce GHG emissions can be undertaken through planting plants that have high carbon absorption and storage capabilities in mine reclamation activities, as well as using New and Renewable Energy (NRE) as an alternative to replace fossil energy.

Keywords: deforestation, greenhouse gas emission, mining industry, non-renewable energy



PENDAHULUAN

Emisi karbon merupakan salah satu penyusun emisi gas rumah kaca berupa karbon dioksida (CO₂) yang dilepaskan ke atmosfer dan berasal dari penggunaan bahan bakar fosil serta berbagai aktivitas manusia. Berdasarkan data emisi bahan bakar fosil dan industri (tanpa memperhitungkan emisi akibat perubahan penggunaan lahan), pada tahun 2022 Indonesia berada pada peringkat ke-6 negara penghasil karbon terbesar di dunia setelah China, Amerika Serikat, India, Rusia, dan Jepang, dengan total emisi sebesar 728,88 juta ton CO₂e (Ritchie *et al.*, 2020). Isu karbon kini kembali hangat diperbincangkan seiring dengan komitmen Indonesia terhadap tercapainya *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060. Seiring dengan komitmen tersebut Indonesia telah menyerahkan dokumen *Enhanced Nationally Determined Contributions* (NDC) kepada *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) yang berisi target penurunan emisi gas rumah kaca (GRK). *Nationally Determined Contributions* atau NDC merupakan komitmen yang disusun oleh Negara Pihak (yang meratifikasi Persetujuan Paris/*Paris Agreement*), untuk berkontribusi pada penurunan emisi GRK di dalam konteks Persetujuan Paris. Indonesia telah beberapa kali memperbaharui NDC-nya, dengan target penurunan terbaru dalam *Enhanced Nationally Determined Contributions* sebesar 31,89% untuk upaya sendiri (*unconditional*) dan sebesar 43,20% dengan bantuan internasional (*conditional*).

Sebagai bentuk tindak lanjut komitmen Indonesia terhadap penurunan emisi GRK, Indonesia telah meresmikan Bursa Karbon Indonesia (IDXCarbon) pada 26 September 2023. Bursa karbon Indonesia diselenggarakan oleh Bursa Efek Indonesia (BEI) dan diawasi Otoritas Jasa Keuangan (OJK). Kegiatan perdagangan karbon telah diatur dalam Peraturan Otoritas Jasa Keuangan Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2023, tentang perdagangan karbon melalui bursa karbon. Selain perdagangan karbon pemerintah Indonesia juga tengah mempersiapkan kebijakan terkait pajak karbon guna mengoptimalkan pengendalian emisi karbon di Indonesia. Perdagangan karbon yang melibatkan seluruh sektor, termasuk sektor pertambangan baru akan dilakukan oleh pemerintah pada tahun 2025 dengan mempertimbangkan kondisi industri, ekonomi, hingga dampak yang terjadi. Perdagangan karbon pada seluruh sektor kelak akan berjalan seiring dengan rencana mulai berlakunya pajak karbon di tahun 2025.

Seluruh sektor, termasuk sektor pertambangan perlu menyiapkan data dan informasi untuk memperkirakan emisi GRK yang dihasilkan melalui kegiatan inventarisasi GRK. Kegiatan inventarisasi GRK sangat penting untuk memantau perubahan tutupan hutan, penggunaan lahan, serta perubahan stok karbon hutan akibat kegiatan/intervensi yang telah dilakukan. Berdasarkan dokumen Pedoman Inventarisasi GRK *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tahun 2006, inventarisasi GRK dan penurunan emisi di suatu negara harus terukur, dapat dilaporkan, dan dapat diverifikasi. Kegiatan inventarisasi GRK dilakukan berdasarkan buku Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2012).

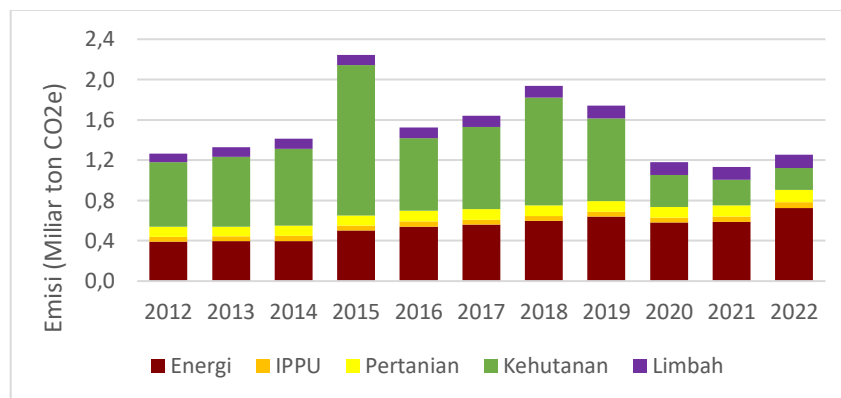
METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat deskriptif analitis, dengan mendeskripsikan dan memberikan gambaran terkait sumber emisi karbon di kawasan pertambangan serta pentingnya melakukan inventarisasi gas rumah kaca (GRK) bagi perusahaan tambang. Metodologi yang digunakan mencakup pengumpulan data sekunder terkait emisi GRK pada kawasan tambang dari berbagai sumber seperti analisis kebijakan, basis data pemerintah, dan publikasi ilmiah terkait.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kementerian Perindustrian (Kemenperin) melaporkan, total emisi GRK dari sektor industri Indonesia mencapai 238,1 juta ton CO₂e pada tahun 2022. Emisi GRK sektor industri terbagi menjadi

tiga komponen yaitu penggunaan energi, limbah industri, dan *industrial process and product use* (IPPU) dengan penggunaan energi industri sebagai penyumbang emisi terbesar, yaitu 152,2 juta ton CO₂e atau 64% dari total emisi GRK industri. Berdasarkan data emisi GRK nasional yang disajikan pada Gambar 1, diketahui bahwa sektor energi dan kehutanan menjadi penyumbang utama emisi GRK dari tahun 2012 hingga 2022. Pada sektor industri pertambangan, emisi GRK berasal dari kegiatan deforestasi, penggunaan energi, pemrosesan dan pemurnian. Umumnya 40%–50% emisi GRK industri pertambangan berasal dari konsumsi bahan bakar solar pada alat berat, lalu 30%–35% lainnya berasal dari pembangkit listrik tak terbarukan milik *smelter* tambang (Bellois, 2022). Emisi GRK dari produksi mineral dan logam primer menyumbang sekitar 10% dari emisi GRK global yang terkait dengan energi (Huo *et al.*, 2023).

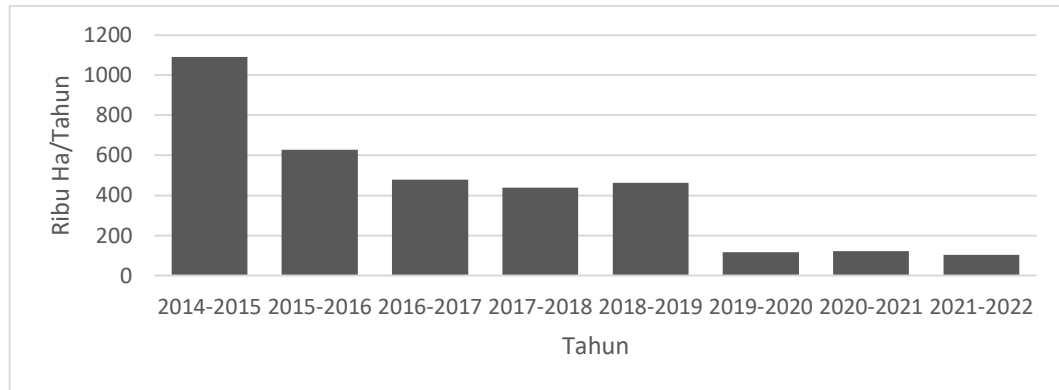


Gambar 1 Grafik emisi GRK nasional tahun 2012-2022 (KLHK, 2024).

Inventarisasi GRK (*GHG accounting*) merupakan kegiatan untuk memperoleh data dan informasi mengenai tingkat, status, dan kecenderungan perubahan emisi GRK secara berkala dari berbagai sumber emisi (*source*) dan penyerapnya (*sink*) termasuk simpanan karbon (*carbon stock*). Inventarisasi GRK diatur dalam Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon untuk Pencapaian Target Kontribusi yang Ditetapkan Secara Nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca dalam Pembangunan Nasional. Inventarisasi gas rumah kaca (GRK) merupakan hal yang penting untuk dilakukan oleh perusahaan tambang guna memahami sumber dan jumlah emisi GRK yang dihasilkan, sehingga perusahaan dapat menyusun strategi untuk mengurangi jumlah emisi agar tidak melebihi batas atas emisi GRK. Setiap perusahaan tambang dapat memiliki sumber utama emisi GRK yang bervariasi tergantung pada jenis tambang dan produk akhir yang dihasilkan. Sebagai contoh, dalam penelitian milik Norgate & Haque (2010) disebutkan bahwa proses pemuatan dan pengangkutan memberikan kontribusi terbesar terhadap total emisi GRK untuk penambangan dan pengolahan bijih besi dan bauksit, sedangkan dalam produksi konsentrat tembaga tahap penghancuran dan penggilingan merupakan proses yang memberikan kontribusi terbesar terhadap total emisi GRK. Kegiatan inventarisasi GRK dilakukan berdasarkan buku Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2012), Buku II Volume 1-4.

Deforestasi

Deforestasi adalah proses perusakan kawasan hutan akibat konversi lahan hutan menjadi penggunaan lain secara permanen. Berdasarkan data BPS (2024), secara keseluruhan deforestasi Indonesia telah mengalami penurunan dari tahun 2014 hingga 2022 (Gambar 2). Indonesia mengalami peningkatan deforestasi dalam periode tahun 1990 dengan luas kawasan hutan sekitar 105 juta hektar hingga tersisa 97 juta hektar pada tahun 2013 (Djaenudin *et al.*, 2018). Berdasarkan hasil pemantauan hutan Indonesia tahun 2022, diketahui luas lahan hutan Indonesia adalah 96 juta ha atau 51,2% dari total luas daratan.



Gambar 2 Grafik deforestasi (netto) Indonesia di dalam dan di luar kawasan hutan tahun 2014-2022 (BPS, 2024).

Deforestasi merupakan salah satu sumber emisi GRK yang terkait dengan industri pertambangan. Sumberdaya mineral banyak ditemukan di kawasan hutan sebab banyaknya endapan mineral yang terbentuk dalam lingkungan geologi yang berasosiasi dengan kawasan hutan. Selain itu kawasan hutan dapat menyediakan lokasi yang relatif luas dan mudah diakses untuk operasi penambangan mineral, sehingga kegiatan deforestasi tidak dapat dipisahkan dari aktivitas pertambangan. Perluasan kawasan pertambangan menjadi salah satu penyebab utama deforestasi dan peningkatan emisi karbon (Csillik *et al.*, 2019). Aktivitas deforestasi pada kawasan tambang dapat menimbulkan berbagai masalah lingkungan termasuk permasalahan emisi karbon. Menurut penelitian Chaddad *et al.* (2022), deforestasi akibat pertambangan dapat menyebabkan peningkatan suhu permukaan dari 30°C menjadi 39°C di kawasan tambang. Inventarisasi GRK terkait kegiatan deforestasi dapat dilaksanakan melalui pengukuran terestrial dan pengukuran menggunakan data penginderaan jauh sesuai metode Tier 3 berdasarkan buku Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional (2012), Buku II Vol 3 oleh KLHK yang berisi metodologi penghitungan tingkat emisi gas rumah kaca kegiatan pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan lainnya (*Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU*).

Tabel 1 Daftar tanaman dengan daya serap CO₂

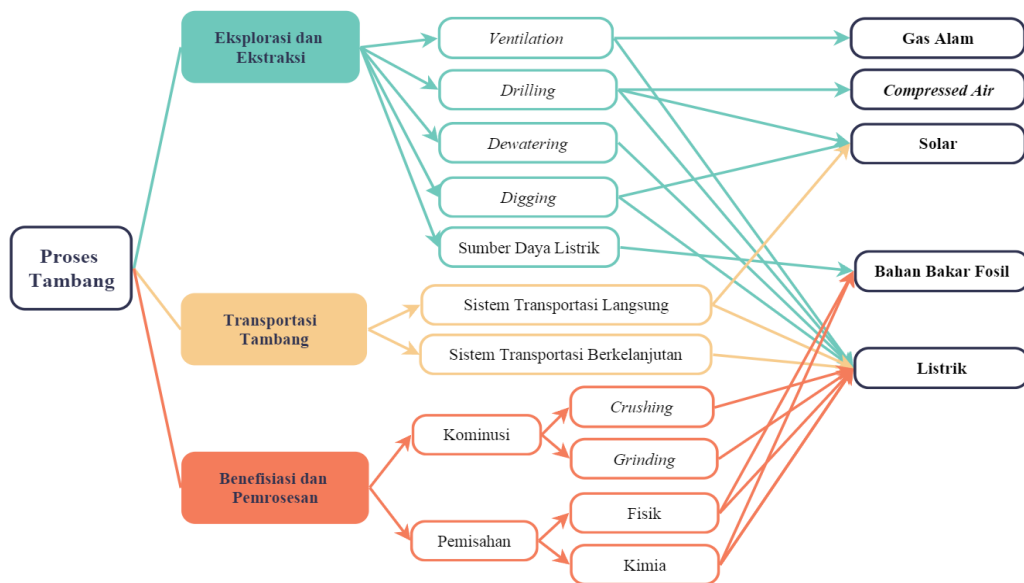
| No | Nama Lokal | Nama Ilmiah | Daya Serap CO ₂ (kg/pohon/tahun) |
|----|-------------|---------------------------------|--|
| 1 | Trambesi | <i>Samanea saman</i> | 28.448,39 |
| 2 | Cassia | <i>Cassia sp</i> | 5.295,47 |
| 3 | Kenanga | <i>Canangium odoratum</i> | 756,59 |
| 4 | Pingku | <i>Dysoxylum excelsum</i> | 720,49 |
| 5 | Beringin | <i>Ficus benjamina</i> | 535,90 |
| 6 | Krey Payung | <i>Felcium decipiens</i> | 404,83 |
| 7 | Matoa | <i>Pornetia pinnata</i> | 329,76 |
| 8 | Mahoni | <i>Swietenia mahagoni</i> | 295,73 |
| 9 | Saga | <i>Adenantha pavoniana</i> | 221,18 |
| 10 | Bungkur | <i>Lagerstroemia speciosa</i> | 160,14 |
| 11 | Jati | <i>Tectona grandis</i> | 135,27 |
| 12 | Nangka | <i>Artocarpus heterophyllus</i> | 126,51 |
| 13 | Johar | <i>Cassia grandis</i> | 116,25 |
| 14 | Sirsak | <i>Annona muricata</i> | 75,19 |
| 15 | Puspa | <i>Schima wallichii</i> | 63,31 |

Sumber: Dahlan (2008)

Upaya untuk mengurangi jumlah emisi GRK yang dihasilkan dari kegiatan deforestasi dapat dilakukan melalui reklamasi tambang dengan menanam tanaman yang memiliki kemampuan penyerapan dan penyimpanan karbon tinggi. Menurut Momongan *et al.*, (2017), pohon Trembesi (*Samanea saman*) dan Cassia (*Cassia* sp) merupakan contoh tanaman dengan kemampuan serapan CO₂ yang tinggi. Tanaman mampu mengambil karbon dari atmosfer melalui proses fotosintesis dan selanjutnya disimpan dalam bentuk jaringan-jaringan organ tanaman seperti batang, kulit, dahan, ranting, akar, dan daun. Semakin tua usia tanaman, semakin tinggi biomassa dan kemampuan penyimpanan karbonnya. Sebagaimana disebutkan dalam penelitian Ijazah & Sancayaningsih (2015), tegakan Akasia yang berusia 33 tahun memiliki biomassa dan kemampuan penyimpanan karbon yang lebih tinggi daripada tegakan Pinus yang berusia 30 tahun. Oleh sebab itu keberhasilan reklamasi tambang memiliki dampak yang sangat signifikan terhadap pengurangan jumlah emisi gas rumah kaca dari perusahaan tambang.

Penggunaan energi

Industri pertambangan secara global bertanggung jawab atas konsumsi energi yang signifikan dan merupakan salah satu sumber utama emisi GRK (Aramendia *et al.*, 2023). Menurut Igogo *et al.* (2021), pertambangan merupakan salah satu industri dengan penggunaan energi paling intensif di dunia, dimana kegiatan pertambangan memerlukan energi dalam jumlah besar untuk aktivitas eksplorasi, ekstraksi, benefisiasi, pemrosesan, serta pemurnian mineral dan logam. Sumber energi utama dalam industri pertambangan meliputi bahan bakar fosil seperti batubara, solar, dan gas alam (Gambar 3). Selain itu, pembangkit listrik berbahan bakar fosil masih menjadi pilihan utama bagi banyak *smelter* tambang di Indonesia. Pembangkit listrik berbahan bakar fosil dapat menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah besar ke atmosfer yang kemudian menjadi penyebab utama pemanasan global (Cebrucean *et al.*, 2014). Bahan bakar fosil dipilih sebagai sumber energi utama *smelter* sebab mengandung energi yang efisien untuk digunakan pada tahap pemrosesan dan peleburan, serta memiliki harga yang lebih murah jika dibandingkan dengan sumber energi terbarukan (Pouresmaieli *et al.*, 2023). Menurut Liun & Sunardi (2014), biaya teknologi energi terbarukan jauh melebihi biaya pembangkit listrik berbahan bakar fosil akibat kepadatan energi (*energy density*) yang sangat rendah dibandingkan bahan bakar fosil.



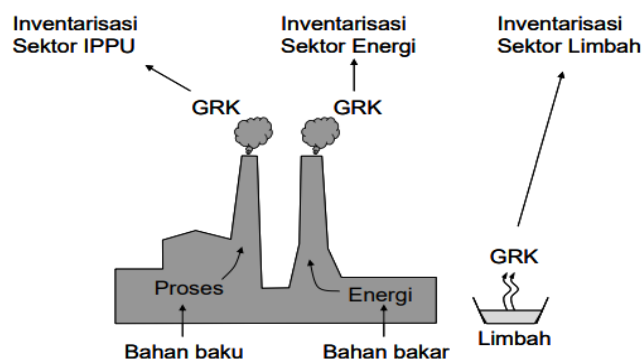
Gambar 3 Proses penambangan dan sumber bahan bakar terkait (Pouresmaieli *et al.*, 2023).

Peningkatan permintaan akan bahan tambang di masa mendatang akan menyebabkan peningkatan penggunaan energi serta pengeluaran emisi GRK. Transisi penggunaan energi tak terbarukan ke energi terbarukan dapat membantu perusahaan tambang dalam mengurangi emisi GRK. Inventarisasi GRK terkait penggunaan energi dapat dilaksanakan berdasarkan buku Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional KLHK (2012), Buku II Volume 1, metodologi penghitungan tingkat emisi gas rumah kaca kegiatan pengadaan dan penggunaan energi. Inventarisasi GRK mengenai penggunaan energi telah diatur dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 22 Tahun 2019, tentang Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi dan Mitigasi Gas Rumah Kaca Bidang Energi.

Energi Baru Terbarukan (EBT) seperti energi surya, angin, hidro, dan biomassa merupakan salah satu sumber alternatif penyediaan energi yang dapat digunakan sebagai pengganti energi fosil dalam aktivitas pertambangan. Penggunaan sumber energi yang ramah lingkungan diharapkan mampu mengurangi efek GRK dan dapat mencegah perubahan iklim yang ekstrem (Pramudiyanto & Suedy, 2020). Menurut Setyono *et al.*, (2019), EBT memiliki dampak kerusakan lingkungan yang relatif rendah serta dapat menjamin keberlanjutan energi untuk masa mendatang. Pemanfaatan EBT dalam aktivitas tambang terutama pada tahap pemrosesan dan peleburan masih memerlukan penelitian lebih lanjut guna meningkatkan efisiensi EBT. Selain itu, pembangunan infrastruktur energi terbarukan juga memegang peranan kunci dalam menjadikan harga energi terbarukan lebih ekonomis.

Pemrosesan dan pemurnian

Emisi GRK yang dihasilkan dari kegiatan pemrosesan dan pengolahan dapat sangat bervariasi tergantung pada jenis tambang dan proses spesifik yang terlibat. Tahapan pengolahan hasil tambang meliputi proses penghancuran, penggilingan, dan peleburan/ pemurnian. Berbagai kegiatan pengolahan bahan hasil tambang tersebut dapat menghasilkan emisi GRK. Menurut Cox *et al.* (2022), emisi karbon yang dihasilkan dalam industri pertambangan utamanya berasal dari proses pemurnian dan peleburan. Sebagai contoh, reaksi kimia dalam proses ekstraksi dan pemurnian logam serta pembakaran bahan bakar fosil yang digunakan untuk menghasilkan panas dalam proses peleburan dapat melepaskan emisi GRK. Semakin lama proses pengolahan hasil tambang berlangsung maka semakin besar jumlah energi yang dibutuhkan serta semakin besar pula jumlah emisi GRK yang dihasilkan.



Gambar 4 Pengelompokan inventarisasi GRK dari kegiatan industri (KLHK, 2012).

Baku mutu emisi kegiatan pertambangan telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 4 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pertambangan, serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 11 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Emisi Mesin Dengan Pembakaran Dalam. Inventarisasi GRK terkait proses industri pertambangan dapat dilaksanakan berdasarkan buku Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional KLHK (2012), Buku II Volume 2, metodologi penghitungan tingkat emisi gas

rumah kaca kegiatan proses industri dan penggunaan produk. Ilustrasi pengelompokan inventarisasi GRK dalam kegiatan industri pertambangan disajikan pada Gambar 4.

KESIMPULAN

Industri pertambangan memiliki pengaruh yang besar terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) di Indonesia, terutama melalui deforestasi dan penggunaan energi fosil. Perusahaan pertambangan perlu melakukan inventarisasi GRK guna memahami sumber dan jumlah emisi yang dihasilkan, sehingga perusahaan dapat mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk mengurangi jumlah emisi GRK. Inventarisasi GRK dilakukan berdasarkan pedoman yang telah ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, yaitu buku Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional KLHK (2012), Buku II Volume 1-4. Usaha penurunan GRK dapat dilakukan melalui penanaman tanaman yang memiliki kemampuan penyerapan dan penyimpanan karbon tinggi dalam kegiatan reklamasi tambang, serta penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT) sebagai energi alternatif pengganti energi fosil.

DAFTAR PUSTAKA

- Aramendia, E., Brockway, P. E., Taylor, P. G., & Norman, J. (2023). Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. *Global Environmental Change*, 83, 102745. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745>.
- Bellois, G. (2022). *The Impacts of Climate Change on the Mining Sector*. International Institute for Sustainable Development. <https://www.iisd.org/publications/brief/impacts-climate-change-mining-sector>.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Indonesia. (2024). *Angka Deforestasi (Netto) Indonesia di Dalam dan di Luar Kawasan Hutan Tahun 2013-2022 (Ha/Th)—Tabel Statistik*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MjA4MSMx/angka-deforestasi--netto--indonesia-di-dalam-dan-di-luar-kawasan-hutan-tahun-2013-2022--ha-th.html>.
- Ceburcean, D., Ceburcean, V., & Ionel, I. (2014). CO₂ Capture and Storage from Fossil Fuel Power Plants. *Energy Procedia*, 63, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.003>.
- Chaddad, F., Mello, F. A. O., Tayebi, M., Safanelli, J. L., Campos, L. R., Amorim, M. T. A., Barbosa de Sousa, G. P., Ferreira, T. O., Ruiz, F., Perlatti, F., Greschuk, L. T., Rosin, N. A., Fim Rosas, J. T., & Demattê, J. A. M. (2022). Impact of mining-induced deforestation on soil surface temperature and carbon stocks: A case study using remote sensing in the Amazon rainforest. *Journal of South American Earth Sciences*, 119, 103983. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103983>.
- Cox, B., Innis, S., Kunz, N. C., & Steen, J. (2022). The mining industry as a net beneficiary of a global tax on carbon emissions. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00346-4>.
- Csillik, O., Kumar, P., Mascaro, J., O'Shea, T., & Asner, G. P. (2019). Monitoring tropical forest carbon stocks and emissions using Planet satellite data. *Scientific Reports*, 9(1), 17831. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54386-6>.
- Dahlan, E. N. (2008). Jumlah emisi gas CO₂ dan pemilihan jenis tanaman berdaya rosot sangat tinggi: Studi kasus di Kota Bogor. *Media Konservasi*, 13(2), 231466. <https://doi.org/10.29243/medkon.13.2.%p>.
- Djaenudin, D., Oktaviani, R., Hartoyo, S., & Dwiprabowo, H. (2018). Analisis peluang keberhasilan penurunan laju deforestasi pendekatan teori transisi hutan. *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan*, 15(1), 15–29. <https://doi.org/10.20886/jpsek.2018.15.1.15-29>.

- Huo, D., Sari, Y. A., Kealey, R., & Zhang, Q. (2023). Reinforcement learning-based fleet dispatching for greenhouse gas emission reduction in open-pit mining operations. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106664. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106664>.
- Igogo, T., Awuah-Offei, K., Newman, A., Lowder, T., & Engel-Cox, J. (2021). Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. *Applied Energy*, 300, 117375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>.
- Ijazah, M., & Sancayaningsih, R. P. (2015). *Penyimpanan Karbon pada Tegakan Pinus merkusii dan Acacia auriculiformis di Hutan Lindung Mangunan, Dlingo, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta* [Seminar Nasional XII Pendidikan Biologi FKIP UNS 2015]. Universitas Sebelas Maret.
- KLHK. (2012). *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan* (Vols. 1–4). Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- KLHK. (2024). *Sistem Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup. <https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/>.
- Liun, E., & Sunardi, S. (2014). Perbandingan harga energi dari sumber energi baru terbarukan dan fosil. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.17146/jpen.2014.16.2.2521>.
- Momongan, J. F., Gosal, P. H., & Kumurur, V. (2017). Efektivitas jalur hijau dalam menyerap emisi gas rumah kaca di Kota Manado. *SPASIAL*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.35793/sp.v4i1.14869>.
- Norgate, T., & Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>.
- Pouresmaeli, M., Ataei, M., Nouri Qarahasanlou, A., & Barabadi, A. (2023). Integration of renewable energy and sustainable development with strategic planning in the mining industry. *Results in Engineering*, 20, 101412. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101412>.
- Pramudiyanto, A. S., & Suedy, S. W. A. (2020). Energi Bersih dan ramah lingkungan dari biomassa untuk mengurangi efek gas rumah kaca dan perubahan iklim yang ekstrim. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(3), 86–99. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9990>.
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020, May 11). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2/country/indonesia>.
- Setyono, J. S., Mardiansjah, F. H., & Astuti, M. F. K. (2019). Potensi pengembangan energi baru dan energi terbarukan di Kota Semarang. *Jurnal Riptek*, 13(2), 177–186.