

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara merupakan batuan sedimen organik yang terbentuk dari akumulasi dan transformasi sisa-sisa tumbuhan yang terlitifikasi, kemudian mengalami proses diagenesis dan pematuration selama waktu geologi. Secara komposisi, batubara tidak hanya tersusun atas bahan organik, tetapi juga mengandung mineral dan unsur anorganik (Dai, 2012). Komposisi penyusun batubara sangat kompleks, senyawa organik berbasis unsur karbon sebagai komponen utama, serta oksigen dan hidrogen yang terikat dalam struktur rantai karbon yang panjang dan beragam (Irwandy, 2014). Komposisi dan karakteristik batubara dipengaruhi oleh sumber serta proses akumulasi bahan organik dan anorganik yang membentuknya, dan intensitas proses diagenesis serta pematuration yang dialami (Thomas, 2013). Batubara dapat mengandung berbagai mineral lempung, karbonat, sulfida, serta unsur tanah jarang, hal ini mencerminkan kondisi lingkungan dan proses geologi dapat memengaruhi (Hou et al., 2022).

Tidak hanya sebagai batuan sedimen kompleks dari sisi mineralogi dan geokimia, batubara juga merupakan sumber energi penting yang dapat digunakan untuk sumber produksi energi listrik dan kebutuhan industri, dengan cadangan yang lebih melimpah dibandingkan beberapa sumber energi fosil lainnya (Tanno & Makino, 2018). Batubara juga dapat berfungsi sebagai sumber unsur kritis bernilai strategis, kandungan unsur tanah jarang pada beberapa lapisan batubara sudah melebihi batas minimum standar kelayakan industri, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk industri energi terbarukan, teknologi informasi, dan sektor strategis lainnya (Hou et al., 2022). Batubara berperingkat rendah berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku energi berbasis bioteknologi melalui proses biokonversi mikroorganisme, di mana makromolekul batubara diuraikan menjadi senyawa antara seperti asam organik dan alkohol yang kemudian dikonversi menjadi metana. Kandungan mineral didalamnya dapat membantu

menjaga kestabilan dan aktivitas mikroorganisme selama proses biogasifikasi berlangsung (Huang et al., 2025).

2.1.1 Proses Produksi Batubara

Metode tambang terbuka (*open-pit/surface mining*) merupakan pendekatan yang umum digunakan pada penambangan batubara, terutama ketika kedalaman relatif dangkal dan memungkinkan untuk dapat memindahkan tanah/batuan penutup (*overburden*) secara ekonomis. Sistem tambang terbuka pada penambangan batubara diawali dengan kegiatan *land clearing*, dilanjutkan dengan pengupasan *topsoil* (tanah pucuk) dan *overburden removal*, *coal getting*, *hauling*, *coal crushing*, *stockpiling* hingga pengiriman melalui *coal barging* (Diharjo & Manik, 2023). Berikut rincian setiap tahapan proses produksi penambangan batubara sistem terbuka:

1. *Land Clearing*

Land clearing merupakan tahapan awal dalam sistem tambang terbuka yang dilakukan sebelum kegiatan produksi dimulai. Menurut Hartman (1987), *land clearing* merupakan aktivitas teknis dalam membersihkan vegetasi dan pembangunan fasilitas seperti *plant*, *crusher*, gudang, dan pengembangan infrastruktur pendukung lainnya.

2. Pengupasan *Topsoil*

Pengupasan *topsoil* (tanah pucuk) dilakukan setelah *land clearing* sebagai bagian dari persiapan pertambangan terbuka. *Topsoil* mengandung unsur hara penting bagi keberhasilan reklamasi, sehingga dipisahkan dan disimpan khusus untuk digunakan kembali dalam kegiatan revegetasi dan rehabilitasi lahan pascatambang (Hartman, 1987). Dengan demikian, *topsoil* tidak dikategorikan sebagai limbah, melainkan sebagai sumber daya reklamasi.

3. *Overburden Removal*

Overburden removal merupakan proses pemindahan tanah dan batuan penutup untuk membuka akses ke lapisan batubara. Dalam sistem tambang terbuka, *overburden* dikupas dan dipindahkan ke *disposal area* agar

batubara dapat terekspos. Sifat fisik material *overburden* menentukan metode pemindahan; material lunak dapat dilakukan penggalian langsung, sedangkan batuan yang keras memerlukan proses *drilling* (pengeboran) dan *blasting* (peledakan) sebelum dipindahkan (Hartman, 1987). Proses *drilling* dilakukan untuk membuat lubang ledak (*blast holes*) dengan diameter dan kedalaman tertentu sesuai desain geometri peledakan, sedangkan *blasting* bertujuan memecah material batuan menjadi fragmen yang lebih kecil agar mudah digali dan diangkut.

4. *Coal Getting*

Coal getting merupakan tahap penggalian batubara setelah lapisan batuan penutup berhasil disingkirkan. Pada lapisan batubara yang bersifat lunak, proses ini dapat dilakukan secara langsung menggunakan *excavator* jenis *backhoe* atau *shovel* tanpa memerlukan peledakan tambahan (Hartman, 1987). Namun, pada kondisi tertentu di mana batubara memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi, dapat dilakukan dengan proses *drilling* (pengeboran) dan *blasting* (peledakan) ringan.

5. *Hauling*

Hauling merupakan kegiatan pengangkutan material *overburden* maupun batubara hasil penggalian, dari lokasi penambangan (*pit*) menuju *disposal area*, *ROM stockpile*, atau fasilitas pengolahan menggunakan truk, *scraper*, *conveyor*, atau kombinasi sistem lainnya tergantung pada desain sistem pertambangan (Hartman, 1987).

6. *Coal Crushing*

Coal crushing merupakan tahapan pengolahan awal yang bertujuan untuk menghasilkan material dengan ukuran partikel yang lebih homogen menggunakan unit *crusher* seperti *jaw crusher*, *roll crusher*, atau *impact crusher* agar sesuai dengan spesifikasi teknis yang dipersyaratkan oleh konsumen atau kebutuhan pengolahan lanjutan (Hustrulid, 2013).

7. *Stockpiling*

Stockpiling merupakan kegiatan penyimpanan sementara batubara hasil penambangan sebelum dilakukan proses lanjutan seperti *crushing* atau

pengiriman ke konsumen. *Stockpile* umumnya dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu ROM (*Run of Mine*) *stockpile* sebagai tempat penyimpanan batubara dari *coal getting* sebelum masuk dalam proses *Coal crushing* dan *product stockpile* sebagai tempat penyimpanan batubara yang telah memenuhi spesifikasi ukuran tertentu (Hartman, 1987). *Stockpile* berfungsi sebagai *buffer* produksi sekaligus sebagai titik pengendalian mutu sebelum material diproses atau dikirim ke konsumen.

2.1.2 Dampak Lingkungan Pertambangan Batubara

Pertambangan batubara merupakan aktivitas ekstraktif yang memberikan kontribusi signifikan terhadap penyediaan energi global, namun pada saat yang sama menimbulkan tekanan lingkungan yang kompleks dan multidimensional. Metode tambang terbuka (*surface coal mining*) yang saat ini mendominasi produksi batubara dunia dikenal memiliki dampak spasial yang luas karena melibatkan pengupasan lapisan tanah penutup (*overburden*), perubahan morfologi bentang alam, serta pembentukan disposal dan void dalam skala besar. Ekspansi tambang terbuka dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan peningkatan signifikan baik dari sisi jumlah maupun luas area operasional, yang secara langsung mengubah tutupan lahan, struktur lanskap, dan fungsi ekologis wilayah terdampak (Ma et al., 2021). Peningkatan skala ini juga memperbesar tekanan terhadap sumber daya air, biodiversitas, serta stabilitas sosial-ekonomi kawasan tambang.

1. Perubahan Bentang Alam dan Fragmentasi Ekosistem

Aktivitas pertambangan batubara terbuka menyebabkan perubahan permanen pada topografi dan struktur lanskap akibat penghilangan vegetasi, pengerukan material penutup, dan pembentukan lubang tambang yang sulit dipulihkan dalam jangka pendek. Dampak ekologisnya tidak hanya terbatas pada area tambang, tetapi meluas akibat fragmentasi habitat dan perubahan konektivitas ekologis (Ma et al., 2024). Kondisi ini menurunkan keanekaragaman hayati, mengganggu habitat spesies, serta mengurangi jasa ekosistem seperti regulasi hidrologi dan penyimpanan karbon. Selain itu,

ekspansi tambang juga memicu konversi lahan skala besar yang memperburuk tekanan terhadap keberlanjutan lingkungan (Ma et al., 2021).

2. Pencemaran Tanah dan Risiko Ekologis Logam Berat

Pertambangan batubara dapat menyebabkan pencemaran tanah akibat akumulasi logam berat dari batuan penutup dan limbah tambang yang mengalami pelapukan dan pelindian jangka panjang. Unsur seperti kadmium (Cd), arsen (As), dan seng (Zn) dapat terakumulasi di sekitar area tambang, dengan Cd memiliki tingkat risiko ekologis tertinggi sehingga menjadi prioritas pengendalian (Zhao et al., 2024). Logam berat yang bersifat persisten berpotensi terakumulasi dalam rantai makanan dan meningkatkan risiko toksisitas bagi organisme tanah. Dampak ini menurunkan kualitas tanah, menghambat pertumbuhan vegetasi, serta mengganggu fungsi ekologis dan keberlanjutan pemanfaatan lahan.

3. Perubahan Hidrologi dan Degradasi Kualitas Air

Kegiatan pertambangan batubara dapat mengubah sistem hidrologi melalui penggalian, *dewatering*, dan pembentukan retakan batuan yang memengaruhi aliran serta muka air tanah. Secara kimiawi, oksidasi mineral sulfida seperti pirit dapat membentuk *acid mine drainage* (AMD), meningkatkan konsentrasi sulfat, dan menggeser karakter hidrogeokimia air dari dominasi bikarbonat menjadi sulfat sebagai indikasi penurunan kualitas air (Zhang et al., 2024). Selain itu, tingginya kandungan nutrisi, ion garam, produk samping tambang, dan logam berat berpotensi menurunkan keanekaragaman biota serta mengganggu ekosistem akuatik (Narangarvu et al., 2024).

4. Emisi Debu dan Dampak Kesehatan Masyarakat

Aktivitas pengeboran, peledakan, pemuatan, dan pengangkutan batubara menghasilkan debu respirabel dalam jumlah signifikan yang berisiko menyebabkan penyakit pernapasan kronis seperti pneumokoniosis dan silikosis, baik pada pekerja maupun masyarakat sekitar (Aboelezz et al., 2024). Paparan ini dapat meningkatkan jumlah kasus gangguan kesehatan manusia seperti penyakit ginjal, tiroid, dan kanker pada wilayah yang dekat

dengan aktivitas tambang (Hendryx, 2015). Karakteristik debu batubara yang mudah tersebar oleh angin menyebabkan pencemaran udara dapat menjangkau area yang lebih luas dari lokasi tambang, sehingga meningkatkan risiko paparan bagi masyarakat sekitar (Ghose & Majee, 2007).

2.2 *Life Cycle Assessment (LCA)*

Berdasarkan SNI ISO 14040:2016, *life cycle assessment (LCA)* merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi aliran material, energi, serta potensi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup suatu produk. LCA didefinisikan sebagai kompilasi dan evaluasi input, output, serta potensi dampak lingkungan dari suatu sistem produk mulai dari tahap ekstraksi bahan baku hingga tahap akhir (*end-of-life*) (SNI ISO 14044, 2017). Pendekatan LCA memungkinkan analisis menyeluruh terhadap seluruh tahapan siklus hidup sehingga dapat memberikan gambaran komprehensif terhadap kontribusi setiap proses terhadap dampak lingkungan (Guinée et al., 2022). LCA juga dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan lingkungan melalui evaluasi efisiensi penggunaan sumber daya dan potensi pengurangan dampak lingkungan (Hauschild et al., 2018).

Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, telah mulai mengintegrasikan pendekatan LCA dalam kebijakan pengelolaan lingkungan industri. Hal ini tercermin dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 7 Tahun 2025 yang menyatakan bahwa identifikasi potensi dampak lingkungan menggunakan pendekatan LCA menjadi salah satu aspek dalam penilaian PROPER. Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER) merupakan instrumen evaluasi kinerja perusahaan yang bertujuan untuk mendorong peningkatan kinerja lingkungan secara berkelanjutan. Metode ini dilakukan secara sistematis melalui empat tahapan utama yaitu penentuan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, penilaian dampak, serta interpretasi hasil (SNI ISO 14040, 2016).

2.2.1 Tujuan dan Ruang Lingkup

Tahap penentuan tujuan dan ruang lingkup merupakan langkah awal dalam pelaksanaan *life cycle assessment* (LCA) yang menentukan arah, batasan, serta kedalaman analisis yang dilakukan dalam suatu studi. Berdasarkan International Organization for Standardization melalui ISO 14040, tahap ini bertujuan untuk menetapkan secara jelas tujuan studi, alasan dilakukannya analisis, serta bagaimana hasil LCA akan digunakan dalam pengambilan keputusan (SNI ISO 14040, 2016). Tahap ini menjadi krusial karena akan mempengaruhi kualitas hasil analisis serta interpretasi yang dihasilkan dalam studi LCA (Hauschild et al., 2018).

Penentuan tujuan dalam LCA mencakup identifikasi konteks studi, target pengguna hasil analisis, serta tujuan penggunaan hasil dalam mendukung pengambilan keputusan lingkungan (Guinée, 2002). Tujuan tersebut dapat berupa evaluasi kinerja lingkungan, perbandingan alternatif teknologi, maupun analisis efektivitas program pengelolaan lingkungan (European Commission, 2018). Dengan demikian, penetapan tujuan yang jelas akan menentukan tingkat detail serta pendekatan metodologis yang digunakan dalam studi LCA (Hauschild et al., 2018).

Ruang lingkup dalam LCA meliputi penentuan sistem produk, batas sistem, unit fungsional, serta asumsi dan keterbatasan yang digunakan dalam analisis (SNI ISO 14044, 2017). Penentuan batas sistem sangat penting untuk memastikan bahwa seluruh proses yang relevan telah tercakup sehingga hasil analisis bersifat representatif (Hauschild et al., 2018). Menurut Guinée (2002), batas sistem dalam LCA dibagi menjadi 4 (empat) bagian, yaitu sebagai berikut:

1. *Cradle to Grave*

Batasan ini mencakup seluruh rangkaian proses dalam siklus hidup produk, mulai dari ekstraksi bahan baku, proses produksi, distribusi, hingga tahap penggunaan akhir dan pembuangan produk.

2. *Cradle to Gate*

Batasan ini meliputi seluruh proses dari ekstraksi bahan baku hingga tahap produksi sebelum produk keluar dari sistem produksi, sehingga digunakan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan pada fase produksi suatu produk.

3. *Gate to Grave*

Batasan ini mencakup tahapan setelah produk selesai diproduksi, yaitu mulai dari distribusi, penggunaan, hingga tahap akhir siklus hidup produk, dan digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan setelah produk meninggalkan perusahaan.

4. *Gate to Gate*

Batasan ini hanya mencakup sebagian proses dalam sistem produksi, yaitu pada satu atau beberapa unit proses tertentu, sehingga digunakan untuk menilai dampak lingkungan dari proses produksi secara spesifik.

Unit fungsional merupakan parameter kuantitatif yang digunakan sebagai dasar perbandingan dalam studi LCA untuk memastikan konsistensi hasil analisis (SNI ISO 14040, 2016). Selain itu, tahap ini juga mencakup penetapan asumsi dan batasan yang digunakan untuk mengatasi keterbatasan data serta kompleksitas sistem yang dianalisis (Hauschild et al., 2018). Transparansi dalam penetapan asumsi dan batasan menjadi penting untuk meningkatkan kredibilitas serta reproduktibilitas hasil studi LCA (Guinée et al., 2022).

Tahap penentuan tujuan dan ruang lingkup juga mencakup pemilihan metode penilaian dampak (LCIA method) serta kategori dampak lingkungan yang akan dianalisis (European Commission, 2018). Pemilihan metode ini harus disesuaikan dengan tujuan penelitian serta ketersediaan data agar hasil analisis dapat merepresentasikan kondisi lingkungan secara akurat (Hauschild et al., 2018). Dengan demikian, tahap goal and scope definition menjadi fondasi utama dalam pelaksanaan LCA karena menentukan struktur analisis, kebutuhan data, serta validitas hasil yang dihasilkan dalam suatu studi (SNI ISO 14044, 2017).

2.2.2 Analisis Inventori

Analisis inventori daur hidup atau *Life Cycle Inventory* (LCI) merupakan tahap dalam *Life Cycle Assessment* (LCA) yang bertujuan untuk mengumpulkan dan mengkuantifikasi seluruh aliran input dan output yang terkait dengan sistem produk yang dikaji. Berdasarkan SNI ISO 14040:2016, tahap ini mencakup

identifikasi penggunaan sumber daya seperti bahan baku dan energi serta keluaran berupa emisi ke lingkungan seperti udara, air, dan tanah. LCI menjadi dasar utama dalam analisis LCA karena kualitas dan kelengkapan data inventori sangat menentukan akurasi hasil penilaian dampak lingkungan (Hauschild et al., 2018).

Proses penyusunan LCI dilakukan secara sistematis melalui pengumpulan data, validasi, serta pengolahan data untuk menghasilkan neraca massa dan energi dari sistem yang dianalisis (Guinée, 2002). Data inventori dapat berasal dari data primer maupun data sekunder seperti basis data *life cycle inventory* yang telah tersedia secara luas (European Commission, 2018). Selain itu, database seperti Ecoinvent banyak digunakan dalam studi LCA untuk menyediakan data sekunder yang representatif dan terverifikasi (Wernet et al., 2016). Pemilihan sumber data yang tepat sangat penting untuk memastikan konsistensi dan keandalan hasil analisis (Hauschild et al., 2018).

Dalam tahap LCI juga dilakukan pemodelan sistem untuk menggambarkan hubungan antar proses dalam siklus hidup produk melalui identifikasi unit proses (unit process) dan aliran referensi (reference flow) (Guinée, 2002). Pemodelan ini memungkinkan analisis kontribusi masing-masing proses terhadap penggunaan sumber daya dan emisi secara lebih rinci (Hauschild et al., 2018). Pendekatan ini juga mendukung identifikasi *hotspot* yang menjadi sumber utama dampak lingkungan dalam suatu sistem produksi (European Commission, 2018).

Evaluasi kualitas data inventori menjadi bagian penting dalam tahap LCI yang mencakup aspek kelengkapan, konsistensi, representativitas, serta ketidakpastian data (SNI ISO 14044:2017). Evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan dapat merepresentasikan kondisi sistem secara akurat. Transparansi dalam pengolahan dan pelaporan data inventori menjadi aspek penting untuk meningkatkan kredibilitas serta reproduktibilitas hasil studi LCA (Guinée et al., 2022). Dengan demikian, tahap LCI merupakan fondasi utama dalam pelaksanaan LCA karena menyediakan basis data kuantitatif yang digunakan dalam tahap penilaian dampak (LCIA) serta menentukan keandalan hasil analisis secara keseluruhan (Hauschild et al., 2018).

2.2.3 Penilaian Dampak

Penilaian dampak daur hidup atau *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) merupakan tahap dalam *Life Cycle Assessment* (LCA) yang bertujuan mengevaluasi besaran dan potensi dampak lingkungan berdasarkan data inventori. LCIA berfungsi untuk menghubungkan hasil *Life Cycle Inventory* (LCI), berupa aliran input dan output seperti emisi, limbah, dan penggunaan sumber daya, dengan kategori dampak lingkungan melalui pendekatan ilmiah berbasis hubungan sebab-akibat (SNI ISO 14040, 2016). Tahap ini juga mengonversikan data inventori menjadi indikator dampak lingkungan yang bermakna sehingga dapat digunakan dalam interpretasi hasil LCA secara kuantitatif (Huijbregts et al., 2017).

Secara umum, LCIA dilakukan dengan menggunakan faktor karakterisasi yang mengonversikan setiap aliran emisi atau penggunaan sumber daya menjadi nilai kontribusi terhadap kategori dampak tertentu (Firdausy et al., 2022). Pendekatan ini memungkinkan penyederhanaan kompleksitas data lingkungan menjadi indikator yang dapat dibandingkan antar sistem atau skenario (Guinée et al., 2022). Dalam praktiknya, LCIA terdiri atas beberapa langkah utama yaitu klasifikasi (*classification*), karakterisasi (*characterization*), normalisasi (*normalization*), dan pembobotan (*weighting*), dimana klasifikasi dan karakterisasi merupakan tahapan wajib, sedangkan normalisasi dan pembobotan bersifat opsional tergantung tujuan studi (SNI ISO 14044, 2017). Tahap klasifikasi bertujuan untuk mengelompokkan aliran inventori ke dalam kategori dampak yang relevan, sedangkan tahap karakterisasi digunakan untuk menghitung kontribusi masing-masing zat terhadap dampak lingkungan (Hauschild et al., 2018).

Pendekatan dalam LCIA dapat dibedakan menjadi midpoint dan endpoint, dimana pendekatan midpoint menggambarkan dampak pada tingkat proses lingkungan seperti perubahan iklim dan pengasaman, sedangkan endpoint merepresentasikan dampak akhir terhadap area perlindungan seperti kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan ketersediaan sumber daya (Huijbregts et al., 2017). Pendekatan midpoint umumnya lebih banyak digunakan karena memiliki tingkat ketidakpastian yang lebih rendah dibandingkan pendekatan endpoint (Hauschild et al., 2018).

2.2.4 Interpretasi

Tahap interpretasi dalam standar SNI ISO 14040:2016 didefinisikan sebagai proses sistematis untuk mengevaluasi hasil studi LCA agar dapat mendukung pengambilan keputusan yang tepat. Tahap ini merupakan fase akhir yang bertujuan untuk merangkum dan membahas hasil analisis inventori dan penilaian dampak sebagai dasar dalam penyusunan kesimpulan dan rekomendasi sesuai dengan tujuan serta ruang lingkup studi (Guinée, 2002). Interpretasi berperan penting dalam memastikan bahwa hasil analisis tidak hanya bersifat kuantitatif, tetapi juga relevan, dapat dipahami, dan dapat digunakan dalam evaluasi kinerja lingkungan suatu sistem produk. Dengan melakukan evaluasi terhadap seluruh hasil dari tahapan sebelumnya dengan mempertimbangkan ketidakpastian data, asumsi yang digunakan, kesesuaian unit fungsional, serta batas sistem yang telah ditetapkan (Hauschild et al., 2018)

Berdasarkan SNI ISO 14044:2017 dijelaskan bahwa interpretasi harus dilakukan secara iteratif dengan mempertimbangkan keterkaitan antar tahap LCA untuk menjamin konsistensi hasil. Dalam pedoman operasional LCA, tahap interpretasi mencakup beberapa langkah seperti *consistency check*, *completeness check*, *contribution analysis*, *sensitivity analysis*, dan *uncertainty analysis* untuk mendukung validitas hasil studi (Guinée, 2002). Sehingga hasil interpretasi dapat digunakan untuk menentukan prioritas perbaikan serta merumuskan strategi pengelolaan lingkungan yang lebih efektif dan efisien.

Sekolah Pascasarjana

2.3 Kategori Dampak Lingkungan dalam LCA

Kategori dampak utama dalam Life Cycle Assessment (LCA) merupakan indikator lingkungan yang dipilih untuk merepresentasikan potensi dampak paling signifikan dari suatu sistem produk berdasarkan tujuan dan ruang lingkup penelitian (SNI ISO 14040, 2016). Pemilihan kategori dampak ini sangat penting karena akan menentukan fokus analisis dalam tahap Life Cycle Impact Assessment (LCIA) serta mempengaruhi interpretasi hasil secara keseluruhan (Guinée, 2002).

Dalam praktik LCA, kategori dampak utama umumnya dipilih berdasarkan relevansi terhadap sistem yang dikaji, ketersediaan data inventori, serta kontribusinya terhadap isu lingkungan global maupun lokal (European Commission, 2018). Pendekatan ini bertujuan untuk menyederhanakan kompleksitas dampak lingkungan menjadi beberapa indikator kunci yang dapat dianalisis secara mendalam dan komparatif (Hauschild et al., 2018).

Berdasarkan *Handbook for Life Cycle Assessment Using GaBi Software* (2009), metode CML-IA Baseline memiliki sejumlah kategori dampak yang digunakan dalam tahap karakterisasi untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan secara sistematis. Secara umum, metode ini mencakup 11 kategori dampak utama yang digunakan untuk mengonversikan aliran inventori menjadi indikator dampak lingkungan. Kategori-kategori dampak tersebut disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Kategori Dampak dengan Metode CML-IA Baseline

Grup Dampak	Kategori Dampak	Indikator
<i>Acidification</i>	<i>Acidification Potential</i>	kg SO ₂ ek
<i>Climate Change</i>	<i>Global Warming Potential</i>	kg CO ₂ ek
<i>Abiotic Resources</i>	<i>Depletion of Abiotic Resources- Elemental Reserves</i>	kg Sb ek
	<i>Depletion of Abiotic Resources- Fossil Fuels</i>	MJ
<i>Ecotoxicity</i>	<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB ek
	<i>Marine Aquatic Ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB ek
	<i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB ek
<i>Eutrophication</i>	<i>Eutrophication</i>	kg PO ₄ ek
<i>Human Toxicity</i>	<i>Human Toxicity</i>	kg 1,4-DB ek
<i>Ozone Layer Depletion</i>	<i>Ozone Layer Depletion</i>	kg CFC-11 ek
<i>Photochemical Oxidation</i>	<i>Photochemical Oxidation</i>	kg C ₂ H ₄ ek

Sumber : GaBi Education, (2009)

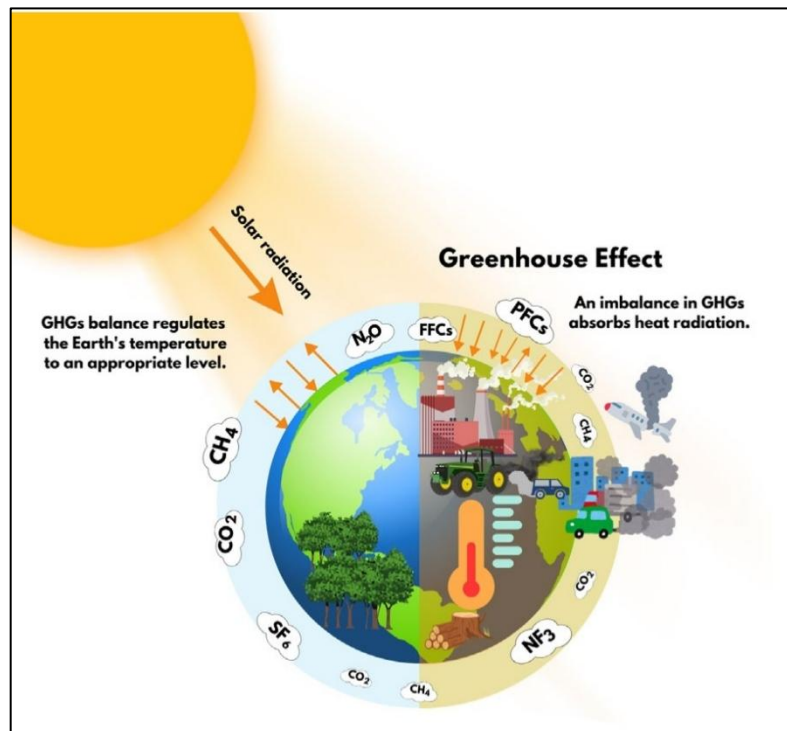
2.3.1 *Global Warming Potential (GWP)*

Global warming potential (GWP) merupakan salah satu kategori dampak utama dalam *Life Cycle Assessment (LCA)* yang digunakan untuk menilai kontribusi emisi gas rumah kaca terhadap perubahan iklim dalam satuan karbon

dioksida ekuivalen (CO_2 eq) (Huijbregts et al., 2017). Kategori ini termasuk indikator midpoint yang banyak digunakan karena memiliki hubungan langsung dengan aliran inventori serta memudahkan perbandingan antarproses dan antarskenario dalam suatu sistem produk (Hauschild et al., 2018). Proses terjadinya GWP diawali dengan pelepasan gas rumah kaca ke atmosfer dari berbagai sektor, terutama pembakaran bahan bakar fosil, proses industri, transportasi, dan perubahan penggunaan lahan. Gas rumah kaca utama yang berperan dalam proses ini meliputi karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O), yang masing-masing memiliki karakteristik fisik dan kimia berbeda dalam menyerap radiasi panas (IPCC, 2021).

Emisi karbon dioksida (CO_2) sebagian besar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti diesel, batubara, dan gas alam yang digunakan sebagai sumber energi utama (Norgate & Haque, 2010). Selain itu, emisi metana (CH_4) berasal dari proses dekomposisi bahan organik, aktivitas pertanian, serta pelepasan gas dari lapisan geologi seperti pada kegiatan pertambangan batubara (*fugitive emissions*) (Luthfia et al., 2020). Emisi dinitrogen oksida (N_2O) umumnya dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar serta penggunaan bahan peledak berbasis nitrogen dalam kegiatan industri dan pertambangan (Awuah-Offei & Adekpedjou, 2011). Akumulasi gas-gas tersebut menyebabkan ketidakseimbangan energi antara radiasi masuk dan keluar dari sistem bumi, yang dikenal sebagai efek rumah kaca (*greenhouse effect*) (Hauschild et al., 2018).

Dalam kerangka *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), proses ini direpresentasikan melalui faktor karakterisasi yang mengonversikan berbagai gas rumah kaca menjadi satuan CO_2 ekuivalen berdasarkan horizon waktu tertentu, biasanya 100 tahun (GWP100) (European Commission – Joint Research Centre, 2010). Pendekatan ini memungkinkan seluruh emisi gas rumah kaca dihitung secara agregat sehingga memudahkan analisis kontribusi masing-masing proses dalam sistem yang dikaji (Guinée, 2002). Proses terjadinya *global warming* dapat dilihat dalam Gambar 2.1 berikut:



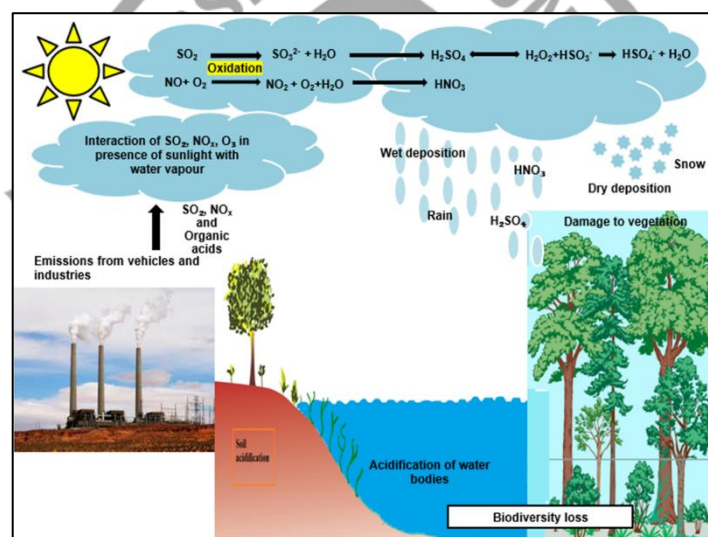
Gambar 2. 1 Proses *Global Warming*

Sumber : Saramath (2025)

2.3.2 *Acidification Potential (AP)*

Acidification potential (AP) merupakan salah satu kategori dampak utama dalam *Life Cycle Assessment (LCA)* yang digunakan untuk menilai potensi pembentukan kondisi asam di lingkungan akibat pelepasan senyawa pengasam ke atmosfer, tanah, dan perairan (Guinée, 2002). *Acidification potential (AP)* termasuk kategori dampak midpoint yang umum digunakan dalam *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)* karena memiliki keterkaitan langsung dengan aliran inventori, khususnya emisi gas-gas pengasam dari suatu sistem produk. Penyebab *acidification potential (AP)* karena terjadinya pelepasan senyawa pengasam ke atmosfer, terutama sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan amonia (NH_3) yang berasal dari aktivitas antropogenik seperti pembakaran bahan bakar fosil dan kegiatan industri. Senyawa-senyawa tersebut kemudian mengalami transformasi kimia di atmosfer dan membentuk asam kuat seperti asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3) yang selanjutnya dapat terdeposisi ke permukaan bumi dalam bentuk hujan asam atau deposisi kering (Hauschild et al., 2018).

Dalam kerangka *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), *acidification potential* (AP) dihitung melalui proses karakterisasi yang mengonversikan berbagai emisi pengasam menjadi satuan ekuivalen sulfur dioksida (kg SO₂ eq) sehingga kontribusi masing-masing zat dapat dibandingkan dalam satu indikator agregat (Guinée, 2002). Pendekatan ini memungkinkan berbagai jenis emisi, seperti SO₂, NO_x, dan NH₃, dinilai berdasarkan potensi relatifnya dalam menyebabkan pengasaman lingkungan (Hauschild et al., 2018). Proses terjadinya *acidification* dapat dilihat dalam Gambar 2.2 berikut:



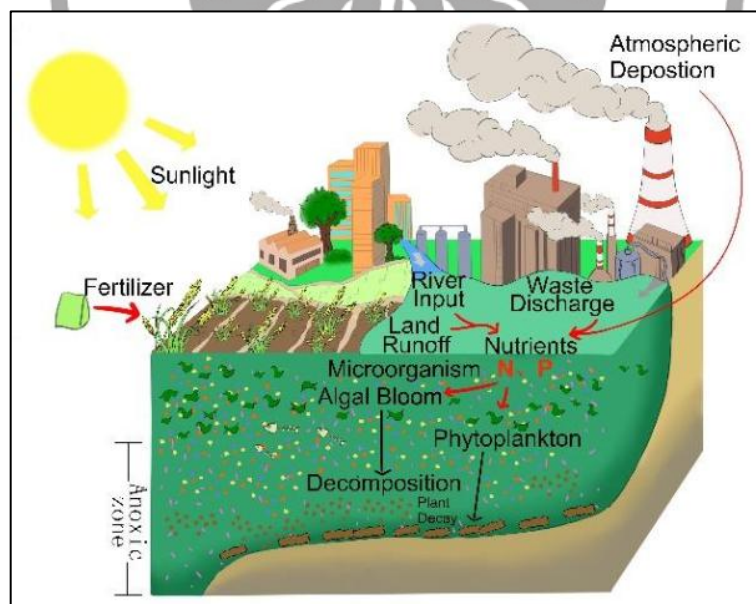
Gambar 2. 2 Proses Acidification
 Sumber : Prakash (2023)

2.3.3 *Eutrophication Potential* (EP)

Eutrophication potential (EP) merupakan salah satu kategori dampak utama dalam Life Cycle Assessment (LCA) yang digunakan untuk menilai potensi pengayaan unsur hara di lingkungan akibat pelepasan senyawa nitrogen dan fosfor dari suatu sistem produk. Proses terjadinya *eutrophication potential* (EP) diawali dari pelepasan senyawa nutrisi reaktif, meliputi nitrat (NO₃⁻), amonium (NH₄⁺), amonia (NH₃), serta fosfat (PO₄³⁻) yang memiliki mobilitas tinggi di lingkungan perairan (Guinée, 2002). Selain proses di perairan, *eutrophication* juga dapat terjadi melalui jalur atmosferik dimana emisi nitrogen reaktif seperti amonia (NH₃) dan

nitrogen oksida (NO_x) mengalami deposisi ke tanah dan badan air. Setelah terdeposisi, senyawa tersebut dapat mengalami transformasi biogeokimia seperti nitrifikasi dan denitrifikasi yang meningkatkan ketersediaan nitrogen dalam ekosistem. Proses biogeokimia tersebut menyebabkan perubahan komposisi spesies dalam ekosistem, dimana spesies yang toleran terhadap kondisi kaya nutrisi akan mendominasi dan menggantikan spesies asli yang lebih sensitif (Hauschild et al., 2018).

Dalam kerangka *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), EP termasuk kategori dampak midpoint yang menggambarkan tekanan lingkungan sebelum terjadinya kerusakan akhir pada ekosistem perairan maupun daratan (Hauschild et al., 2018). *Eutrophication potential* (EP) direpresentasikan melalui faktor karakterisasi yang mengonversikan emisi nutrisi menjadi satuan ekuivalen fosfat (kg PO₄³⁻ eq) untuk menilai besarnya potensi dampak eutrofikasi (Guinée, 2002). Proses terjadinya *eutrophication* dapat dilihat dalam Gambar 2.3 berikut:



Gambar 2. 3 Proses Eutrophication

Sumber : Zhang (2021)