

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara adalah salah satu sumber energi dunia, dimana merupakan komoditas energi yang semakin menarik. Eksplorasi dan eksploitasi batubara terus meningkat dalam pemenuhan kebutuhan energi masyarakat dunia. Batubara merupakan istilah yang luas untuk bahan bersifat karbon secara menyeluruh yang terjadi secara alamiah. Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara menjelaskan definisi batubara adalah endapan senyawa organik karbonan yang terbentuk secara alamiah dari sisa tumbuh-tumbuhan. Batubara merupakan campuran yang sangat kompleks yang tersusun dari zat kimia organik yang mengandung karbon, oksigen dan hidrogen dalam sebuah rantai karbon (Irwandy, 2014). Dalam pengertian lain, batubara merupakan batuan sedimen (padatan) yang dapat terbakar, berasal dari tumbuhan, serta berwarna cokelat sampai hitam, yang sejak pengedapannya terkena proses fisika dan kimia yang menjadikan kaya akan kandungan karbon (Sukandarrumidi, 1995).

Menurut Irwandy (2014), batubara berasal dari tumbuhan yang telah mati dan tertimbun dalam waktu yang sangat lama diperkirakan mencapai jutaan tahun. Dalam proses pembentukan batubara terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi seperti besaran temperatur dan tekanan terhadap tumbuhan mati akan berdampak pada kondisi lapisan batubara yang terbentuk, termasuk pengayaan kandungan karbon di dalam batubara.

Batubara dapat dibakar untuk membangkitkan uap atau dikarbonisasikan untuk membuat bahan bakar cair untuk dihidrogenasikan untuk membuat gas metana. Gas sintesis atau bahan bakar berupa gas dapat diproduksi sebagai produk utama dengan gasifikasi batubara menggunakan oksigen dan uap maupun udara dan uap (Irwandy, 2014).

2.2 Proses Penambangan Batubara

Sistem penambangan yang banyak ditemukan dalam penambangan batubara adalah sistem tambang terbuka. Hal ini dikarenakan sebagian besar cadangan batubara terdapat pada dataran rendah atau pada topografi yang landai dengan kemiringan lapisan batubara yang kecil yaitu $<30^\circ$ (Luthfia, 2020). Sistem tambang terbuka melakukan pembukaan lahan dan penggalian tanah serta batuan penutup. Tanah dan batuan tersebut akan ditimbun terlebih dahulu pada *disposal area* yang nantinya akan ditimbun kembali pada lubang bekas galian sebelumnya (*backfilling*). Mineral-mineral sulfida yang terkandung di batuan penutup dan batubara akan terekspose sehingga terdapat peningkatan kecepatan reaksi antara mineral-mineral tersebut dengan udara dan air.

Menurut Siahaan (2019), terdapat 5 proses produksi penambangan batubara, yaitu meliputi:

1. Pembersihan lahan (*land clearing*) merupakan kegiatan yang dilakukan untuk membersihkan lahan yang akan ditambang mulai dari rerumputan hingga pepohonan baik yang berukuran kecil hingga berukuran besar.
2. Pengupasan Tanah Pucuk (*Top Soil Removal*) yaitu pemindahan tanah yang berfungsi untuk menyelamatkan tanah agar tidak rusak sehingga masih memiliki unsur hara yang kemudian dapat digunakan kembali untuk kegiatan reklamasi. Tanah pucuk yang diambil akan dipindahkan ke *disposal area* sebagai tempat penyimpanan sementara.
3. Pengupasan Tanah Penutup (*Stripping Overburden*). Pada proses ini terdapat dua cara dalam melakukan pengupasan tanah, apabila material tanah penutup merupakan material lunak maka tanah penutup tersebut dapat dilakukan dengan sistem pengeboran (*drilling*). Namun apabila materialnya merupakan material kuat, maka dalam melakukan pengupasan tanah perlu diawali dengan melakukan peledakan (*blasting*) kemudian dilakukan kegiatan penggalian.
4. Penimbunan tanah (*Material Removal*) merupakan kegiatan pemindahan material bongkaran dari kegiatan pengupasan tanah dengan menggunakan alat gali yaitu *excavator* jenis *backhoe* atau *shovel* dari *point loading* menuju *disposal area* yang telah direncanakan dan ditentukan oleh perusahaan

penambangan batubara. Penimbunan tanah penutup dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan *backfilling* dan penimbunan secara langsung. *Backfilling* merupakan metode efektif untuk mengurangi kandungan asam dari kegiatan kegiatan penambangan yang dilakukan maupun lahan tambang yang telah digunakan (Skousen, 2002).

5. Penambangan Batubara (*Coal Getting*). *Coal Getting* merupakan proses pengambilan batubara dari pembersihan, proses pengangkutan *raw coal* menggunakan *dumptruck (Coal Hauling)*, proses pemecahan batubara dari ukuran besar menjadi ukuran kecil (*Coal Crushing*) hingga pengisian batubara ke alat angkut untuk kemudian diangkut menuju tempat penampungan (*stockpile*).

2.3 Dampak Lingkungan Proses Produksi Batubara

Proses produksi penambangan batubara memiliki potensi dampak terhadap lingkungan. Mekanisasi peralatan dan teknologi pertambangan batubara menyebabkan skala pertambangan semakin besar dan ekstraksi batubara kadar rendahpun menjadi ekonomis sehingga semakin luas dan dalam lapisan bumi harus digali (Fitriyanti, 2016). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sari (2018), dampak lingkungan dapat berupa dampak lingkungan terhadap kualitas udara, kualitas air dan dampak sosial di masyarakat. Menurut Purwanto (2015) menerangkan bahwa kegiatan penambangan batubara dapat menyebabkan dampak terhadap lingkungan seperti sebagai berikut:

1. Perubahan Bentang Alam

Kegiatan pertambangan batubara diawali dengan melakukan pengambilan tanah, pembongkaran batubara serta menutup kembali lapisan tanah yang telah tebruka sehingga berpotensi terjadinya perubahan bentang alam. Akibat adanya kegiatan pengambilan tanah akan menghasilkan lubang-lubang tambang, sehingga perlu dilakukan penutupan melalui kegiatan reklamasi dan revegetasi lahan. Penutupan lubang tambang tentunya cukup sulit dipenuhi mengingat kurangnya tanah penutup akibat deopist batubara yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan dengan tanah penutup yang ada. Dalam

dokumen AMDAL pada umumnya sudah ditekankan agar melakukan penutupan lubang tambang dengan melakukan kegiatan reklamasi dan revegetasi, namun kondisi nyata di lapangan perusahaan batubara sebagian besar meninggalkan lubang-lubang tambang yang besar (Hakim, 2014).

2. Penurunan Tingkat Kesuburan Tanah

Efek penurunan kesuburan tanah dari operasi penambangan batubara terjadi pada operasi pengupasan lapisan tanah atas dan lapisan penutup. Pengangkatan dan penimbunan tanah lapisan atas akan mengubah sifat-sifat tanah terutama sifat fisik tanah karena struktur tanah yang terbentuk secara alami dengan susunan lapisan yang rapi dari atas ke bawah akan terganggu tercampur dan terbuka akibat pengupasan tanah. Tanah yang telah dikupas kemudian dipindahkan ke lokasi yang telah ditentukan dimana tanah lapisan atas dipisahkan dari tanah lapisan atas. Setelah proses pembongkaran tambang batubara tanah lapisan atas dan bagian yang tertimun dikembalikan ke lubang tambang dengan cara penimbunan kembali. Waktu kembali dari tanah ke tambang lebih lama tergantung kecepatan proses penambangan. Tanah lapisan atas dan tanah lapisan atas yang telah disimpan atau dibalik dalam lubang sangat rentan terhadap perubahan kesuburan tanah terutama kesuburan kimia dan biologi akibat kerusakan tanah akibat pembongkaran untuk memanfaatkan tambang batubara di bawahnya. Curah hujan yang tinggi akan sangat berpengaruh terhadap komposisi unsur hara karena akan terjadi pencucian unsur hara sehingga tanah dapat kekurangan unsur hara yang dibutuhkan tanaman selama masa pemulihan.

3. Terjadinya Ancaman Terhadap Keanekaragaman Hayati

Pembersihan lahan mengakibatkan terjadinya degradasi vegetasi akibat pembukaan lahan, tentunya akan menyebabkan terganggunya keanekaragaman hayati di area lahan yang dibersihkan untuk penambangan.

4. Penurunan Kualitas Perairan

Penambangan batubara berkontribusi tinggi dalam menurunkan kualitas air khususnya kualitas air sungai. Kegiatan produksi batubara mampu membawa bahan-bahan pencemar yang masuk ke badan air atau sumber air di sekitar

wilayah pertambangan. Menurut Raden, dkk (2010) menyatakan bahwa lokasi dekat penambangan memiliki kualitas air diatas baku mutu lingkungan seperti parameter pH, kandungan besi, mangan, TSS dan TDS. Tingginya parameter pemantauan diakibatkan oleh aktivitas produksi penambangan batubara, dimana material bahan pencemar terbawa oleh air limpasan yang kemudian masuk ke badan air penerima.

5. Penurunan Kualitas Udara

Penurunan kualitas udara disebabkan oleh aktivitas penambangan batubara, diantaranya yaitu aktivitas pembongkaran batubara dan penggunaan alat berat penunjang penambangan. Menurut Victor (2010), di Afrika Selatan memiliki kualitas udara terburuk didunia, hal ini dikarenakan tingginya aktivitas pertambangan batubara, kebakaran lahan dan penggunaan batubara sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap. Penggunaan batubara sebagai sumber bahan bakar mampu melepaskan senyawa beracun seperti, CO, CO₂, methana, benzene, toluene, xylene, suplhur dan lain sebagainya.

2.4 *Life Cycle Assessment (LCA)*

Berdasarkan ISO (2006), *Life Cycle Assessment (LCA)* merupakan suatu kompilasi dan evaluasi aliran material dan energi, serta potensi dampak lingkungan berdasarkan siklus hidup suatu program. LCA atau Penilaian Daur Hidup merupakan salah satu metode yang dapat digunakan dalam mengidentifikasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari sebuah proses produksi sebuah produk (Awuah-Offei and Adekpedjou, 2011). Metode LCA dapat digunakan untuk berbagai produk karena dilakukan analisis secara bertahap dimulai dari analisis proses input hingga output untuk menilai dampak lingkungan yang ada di proses produksi. LCA juga merupakan salah satu metode untuk mengetahui keberlanjutan dari suatu produk (Christie *et al.*, 2011). Metode LCA dapat membantu untuk menentukan potensi dampak yang dapat muncul dari suatu proses serta pertimbangan penggunaan bahan bakar dan bahan baku selama proses produksi. LCA mampu menganalisis potensi pengurangan dampak dengan memberikan

rekomendasi upaya pengelolaan lingkungan yang dapat lingkungan (Purwaningsih, 2016).

LCA berkembang secara pesat setelah digunakan oleh *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) pada awal 1990 (Awuah-Offei and Adekpedjou, 2011). Namun di industri pertambangan, khususnya di Indonesia, penilaian dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA masih jarang dilakukan oleh industri pertambangan maupun pemerintah. Metode penilaian dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA belum menjadi instrumen penting dalam mengidentifikasi potensi dampak lingkungan dan pengambilan keputusan dalam upaya pengelolaan lingkungan berkelanjutan di industri pertambangan di Indonesia.

Menurut Luthfia (2021), penilaian potensi dampak lingkungan dengan menggunakan LCA memiliki banyak manfaat bagi perusahaan maupun pemerintah. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia kemudian melakukan inisiasi dengan memperkenalkan identifikasi potensi dampak lingkungan menggunakan metode LCA dalam aktivitas yang dilakukan oleh perusahaan. Hal ini termuat dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup, dimana dalam peraturan tersebut dijelaskan bahwa identifikasi potensi dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA merupakan salah satu instrumen penting dalam penilaian dokumen PROPER. Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup yang selanjutnya disebut PROPER merupakan evaluasi kinerja perusahaan atau industri di bidang pengelolaan lingkungan hidup dan wajib dilakukan oleh setiap penanggung jawab usaha dan/atau kegiatan.

2.5 Tahapan LCA

Setiap tahapan pelaksanaan LCA tercantum dalam ISO 14040 dan ISO 14044. Langkah ini senantiasa berulang, dimana detail dari kajian akan terdapat dari tujuan penelitian yang dilakukan (*World Business Council for Sustainable Development*,

2002). Langkah-langkah dalam LCA terdiri dari pendefinisian tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, penilaian dampak dan interpretasi (ISO 14040, 2006).

2.5.1 Tujuan dan Ruang Lingkup

Tahapan awal dalam LCA yaitu menentukan tujuan dan ruang lingkup kajian, sistem yang dievaluasi, batasan dan asumsi yang berkaitan dengan dampak sesuai dengan siklus hidup dari suatu proses yang dievaluasi (Marriott, 2007).

2.5.2 Analisis Inventori

Analisis inventori merupakan proses pengumpulan data dan perhitungan baik input maupun output dari suatu proses ke lingkungan. Langkah ini dilakukan untuk menginventarisasi penggunaan energi berupa bahan bakar dan penggunaan sumber daya lainnya, serta menginventarisasi pelepasan energi atau sumber daya ke lingkungan terkait proses yang dievaluasi (Marriott, 2007).

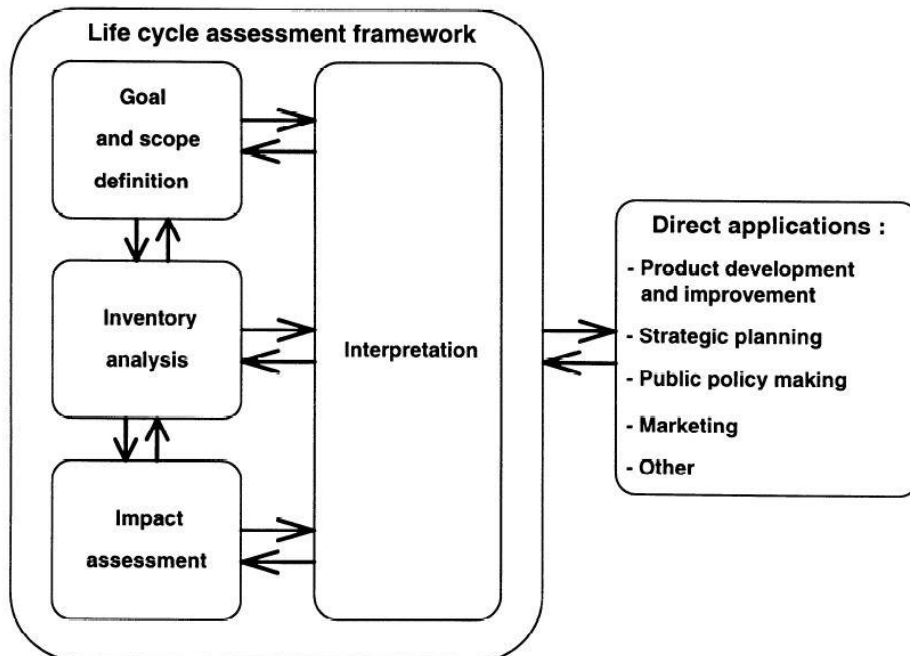
2.5.3 Penilaian Dampak Lingkungan

Penilaian dampak lingkungan dilakukan untuk penanganan dari dampak lingkungan yang dihasilkan, semua dampak penggunaan dari sumber daya yang dihasilkan dikelompokkan dan dikuantifikasikan ke dalam jumlah tertentu sesuai dengan kategori dampak yang telah ditentukan sesuai dengan tingkat kepentingannya (Marriott, 2007). Pada tahap penilaian dampak, akan dilakukan karakterisasi, yaitu masukan dan keluaran akan dilakukan penilaian kontribusinya sesuai dengan kategori dampak yang telah ditentukan sebelumnya (Saputri, 2018). Output dari penilaian dampak lingkungan dapat berupa tabel maupun grafik.

2.5.4 Interpretasi

Intepretasi merupakan integrasi antara hasil dari analisis inventori dan penilaian dampak yang kemudian digunakan untuk menentukan kesimpulan dan

rekomendasi upaya pengelolaan lingkungan yang sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup yang telah diformulasikan (Marriott, 2007).



Gambar 2 Tahapan LCA

Sumber: ISO 14040, 2006

2.6 Batasan Sistem LCA

Berdasarkan ISO 14044 (2006), terdapat empat pilihan utama dalam menentukan batasan-batasan sistem yang digunakan dalam sebuah analisis dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA. Batasan-batasan tersebut terdiri dari *Cradle to Grave*, *Cradle to Gate*, *Gate to Grave* dan *Gate to Gate*. Dalam penentuan batasan sistem Penjelasan terkait dengan batasan-batasan menurut GaBi (2009) yaitu sebagai berikut:

1. *Cradle to Grave*

Batasan ini mencakup bahan dan rantai produksi energi seluruh proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi, transportasi hingga penggunaan akhir produk dalam siklus hidupnya.

2. *Cradle to Gate*

Batasan ini meliputi semua proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi, digunakan dalam mengidentifikasi dampak lingkungan dari suatu proses produksi suatu produk.

3. *Gate to Grave*

Batasan ini meliputi proses dari penggunaan pasca produksi hingga fase akhir kehidupan dari siklus hidupnya dan digunakan untuk menentukan dampak lingkungan dari suatu produk tersebut setelah meninggalkan perusahaan.

4. *Gate to Gate*

Batasan ini hanya meliputi proses produksi dari suatu produk dan menentukan dampak lingkungan dari proses produksi

2.7 Metode Penilaian Dampak pada LCA

Salah satu metode penilaian dampak pada LCA yaitu menggunakan metode CML-IA. Berdasarkan *Handbook for LCA using GaBi Software* (2009), metode CML merupakan metodologi dari *Centre of Environmental Science Leiden University Impact Assessment* (CML) di Universitas Leiden dan berfokus pada serangkaian kategori dampak lingkungan. Metode CML meliputi klasifikasi, karakterisasi, dan normalisasi (opsional). Metode ini dibagi menjadi *baseline* dan *non-baseline*, *baseline* menjadi kategori dampak yang paling umum yang digunakan dalam LCA (Khairona, 2019). Menurut Nurunnisa (2020), metode CML-IA termasuk *midpoint categories* yang merupakan kategori dampak yang timbul terhadap lingkungan secara langsung dengan mengaplikasikan standar ISO 14040. Normalisasi pada faktor analisis tersedia namun tidak ada pembobotan maupun penambahan. Pada panduan CML-IA terdapat daftar kategori penilaian dampak yang dapat dikelompokkan, sebagai berikut (Guinee *et al.*, 2002):

- a. Kategori dampak wajib merupakan kategori indikator yang sebagian besar digunakan dalam analisis LCA.
- b. Kategori dampak tambahan merupakan indikator operasional yang tersedia, namun tidak selalu tercakup dalam analisis LCA.

- c. Kategori dampak lainnya merupakan tidak terdapat indikator operasional sehingga tidak memungkinkan secara kuantitatif dianalisis dalam LCA.

2.8 Kategori Dampak Lingkungan pada LCA

Berdasarkan *Handbook for LCA using GaBi Software* (2009), dalam menggunakan CML-IA Baseline terdapat 11 kategori dampak untuk dilakukan karakterisasi. Kategori dampak tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2 Kategori Dampak dengan Metode CML-IA Baseline

Grup Dampak	Kategori Dampak	Indikator
Hujan Asam	Potensi Hujan Asam	kg SO ₂ ek
Perubahan Iklim	Potensi Pemanasan Global	kg CO ₂ ek
Sumberdaya Abiotik	Penurunan Sumberdaya Abiotik – <i>Non Fossil Fuels</i>	kg Sb ek
	Penurunan Sumberdaya Abiotik – <i>Fossil Fuels</i>	MJ
Ekotoksistas	<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB ek
	<i>Marine Aquatic Exotoxicity</i>	kg 1,4-DB ek
	<i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB ek
Eutrofikasi	Eutrofikasi	kg PO ₄ ek
Toksisitas pada Manusia	Toksisitas pada Manusia	kg 1,4-DB ek
Penipisan Lapisan Ozon	Penipisan Lapisan Ozon	kg CFC-11 ek
Oksidasi Fotokimia	Oksidasi Fotokimia	kg C ₂ H ₄ ek

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup juga menjelaskan bahwa terdapat 11 kategori dampak yang harus dikaji dalam LCA, namun hanya terdapat 4 dampak utama yang wajib dikaji dalam melakukan analisis dampak lingkungan menggunakan metode LCA yaitu potensi pemanasan global, potensi penipisan ozon, potensi hujan dan eutrofikasi.

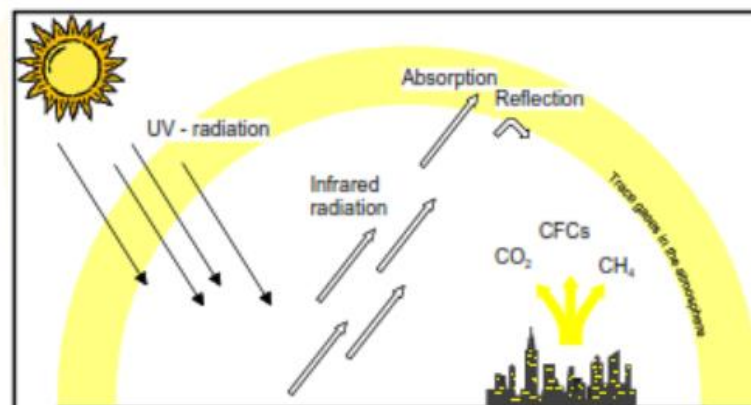
2.8.1 Potensi Pemanasan Global

Berdasarkan *Handbook for LCA using GaBi Software* (2009), Mekanisme efek rumah kaca dapat diamati dalam skala kecil sesuai dengan namanya di dalam rumah kaca. Efek ini juga terjadi secara global. Radiasi gelombang pendek dihasilkan oleh matahari ketika bersentuhan dengan permukaan bumi dan

sebagian diserap (dipanaskan secara langsung) dan sebagian dipantulkan sebagai radiasi inframerah. Bagian yang dipantulkan diserap oleh apa yang disebut gas rumah kaca di troposfer dan dipancarkan kembali ke segala arah termasuk ke arah bumi. Hal ini menyebabkan efek pemanasan di permukaan bumi.

Selain mekanisme alami, efek rumah kaca diperkuat oleh aktivitas manusia. Gas rumah kaca yang dianggap antropogenik atau meningkat misalnya karbon dioksida, metana dan CFC. Analisis efek rumah kaca harus memperhitungkan kemungkinan efek jangka panjang secara keseluruhan.

Potensi pemanasan global diukur dalam ekuivalen karbon dioksida (CO_2eq). Ini berarti bahwa potensi emisi GRK dihitung dalam entuk CO_2 . Karena masa pakai gas di atmosfer diperhitungkan waktu evaluasi juga harus ditentukan. Periode 100 tahun adalah hal biasa.



Gambar 3 Efek Pemamasam Global

Sumber: *GaBi*, 2009

2.8.2 Potensi Penipisan Ozon

Berdasarkan *Handbook for LCA using GaBi Software* (2009), ozon dibuat di stratosfer oleh disosiasi atom oksigen yang terpapar sinar ultraviolet gelombang pendek. Ini mengarah pada pembentukan lapisan ozon stratosfer (tinggi 15 hingga 50 km). Sekitar 10 dari ozon ini mencapai troposfer melalui proses pencampuran. Meskipun konsentrasinya minimal, lapisan ozon sangat penting bagi kehidupan di bumi. Ozon menyerap radiasi UV gelombang pendek

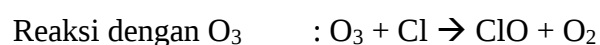
dan melepaskannya pada panjang gelombang yang lebih panjang. Akibatnya, hanya sebagian kecil sinar UV yang mencapai bumi.

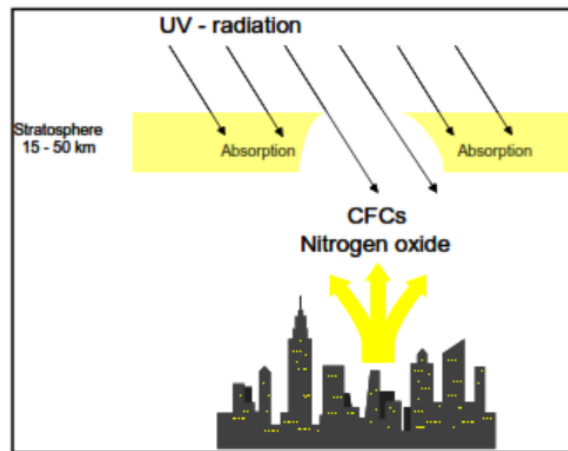
Emisi antropogenik menguras ozon. Hal ini diketahui dari laporan adanya lubang di lapisan ozon. Lubang-lubang tersebut saat ini terbatas pada area di atas Antartika, tetapi penipisan ozon lainnya dapat dilihat di atas garis lintang tengah (seperti Eropa), pada tingkat yang lebih rendah. Zat yang memiliki efek penipisan ozon pada dasarnya dibagi menjadi dua kelompok. Hidrokarbon fluoroklorin (CFC) dan nitrogen oksida (NOX).

Salah satu dampak penipisan lapisan ozon adalah pemanasan permukaan bumi. Kepekaan manusia, hewan, dan tumbuhan terhadap radiasi UVB dan UVA sangat penting. Efek yang mungkin terjadi adalah perubahan pertumbuhan atau penurunan hasil tanaman (gangguan fotosintesis), penanda tumor (kanker kulit dan penyakit mata) dan pengurangan plankton laut, yang akan sangat mempengaruhi rantai makanan. Saat menghitung potensi penipisan ozon, hidrokarbon terhalogenasi antropogenik, yang dapat menghancurkan banyak molekul ozon, diperhitungkan terlebih dahulu. Ozone Depletion Potential (ODP) dihasilkan dari perhitungan potensi berbagai zat yang berkaitan dengan lapisan ozon.

Hal yang dilakukan terlebih dahulu yaitu dengan menghitung skenario untuk referensi CFC tetap (CFC 11). Ini mengarah pada keseimbangan penipisan ozon total. Skenario yang sama dipertimbangkan untuk setiap zat yang dipelajari di mana CFC 11 diganti untuk kuantitas. Hal ini menyebabkan potensi penipisan ozon untuk setiap zat, dinyatakan sebagai nilai ekuivalen CFC 11. Penilaian potensi penipisan ozon perlu mempertimbangkan efek global, jangka panjang, dan satu-satu. Berikut merupakan reaksi kimia dari penipisan ozon menurut Sari (2017).

- Reaksi penipisan ozon karena CFC





Gambar 4 Potensi Penipisan Ozon

Sumber: *GaBi*, 2009

2.8.3 Potensi Hujan Asam

Menurut Nasihah (2018), hujan asam diartikan sebagai berbagai macam hujan dengan pH dibawah 5,6. Hujan secara alami bersifat asam dikarenakan karbondioksida di udara larut bersamaan dengan air hujan memiliki bentuk sebagai asam lemah. Jenis asam dalam hujan ini bermanfaat karena mampu melarutkan mineral dalam tanah yang dibutuhkan oleh tumbuhan maupun hewan. Potensi hujan asam disebabkan oleh belerang (sulfur), yaitu sebagai pengotor dalam bahan bakar fosil serta nitrogen di udara yang kemudian bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida dan nitrogen oksida. Zat-zat tersebut berdifusi ke dalam atmosfer dan bereaksi dengan air membentuk asam sulfat dan asam nitrat yang jatuh bersama air hujan. Hujan asam dapat meningkatkan kadar keasaman pada tanah dan air permukaan, hal ini terbukti berbahaya bagi kehidupan tumbuhan dan hewan.

Sumber hujan asam secara alami dapat terjadi akibat aktivitas gunung berapi dan berasal dari proses biologi di tanah, rawa dan laut. Namun, kondisi saat ini hujan asam mayoritas disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti aktivitas penambangan batubara, pembangkit tenaga listrik serta aktivitas kendaraan bermotor maupun alat berat dari aktivitas industri/perusahaan. Gas yang dihasilkan oleh kegiatan-kegiatan tersebut dapat terbawa angin hingga

radius ratusan kilometer di atmosfer sebelum berubah menjadi asam dan ikut terbawa turun oleh air hujan.

Menurut Yatim (2007), hujan asam dapat berdampak pada kesehatan, hutan, pertanian, ekosistem akuatik dan material. Penjelasan mengenai dampak hujan asam yaitu sebagai berikut.

a. Kesehatan

Hujan asam dapat mempengaruhi kesehatan dengan tiga cara, yaitu melalui efek jangka pendek karena menghiru udara yang tercemar berat, efek jangka panjang karena menghirup udara yang tercemar sedang atau ringan serta efek tidak langsung karena terkontaminasi pada logam berat seperti aluminium dan logam berat lainnya yang terbebaskan dari tanah pada pH rendah, akumulasi logam berat melalui rantai makanan serta terlarutnya logam berat dari pipa yang terbuat dari tembaga atau timbal.

b. Hutan

Dampak hujan asam terhadap hutan sebagian diakibatkan oleh pH tanah yang turun. Penurunan pH tanah dipengaruhi oleh kemampuan tanah untuk menetralkan asam tersebut. Kerusakan hutan oleh hujan asam memiliki gejala yang berbeda dengan gejala akibat kekeringan maupun serangan hama. Kerusakan dan kematian hutan disebut *Forest Dieback* atau *Waldserben*. Kematian hutan dapat meningkatkan resiko terjadi tanah longsor yang sangat berbahaya bagi masyarakat yang tinggal di daerah yang berdekatan dengan hutan.

c. Pertanian

Dampak hujan asam terhadap pertanian mampu menurunkan hasil padi mencapai 30%. Hal ini dikarenakan besarnya laju pertumbuhan industri dan transportasi, dimana terdapat kemungkinan akan terjadi peningkatan kadar SO_2 sampai pada kadar yang dapat menyebabkan keracunan kronik dan penurunan hasil pertanian tanpa adanya gejala morfologik. Menurut Nasihah (2018), dengan adanya aktivitas yang bisa menyebabkan terjadinya hujan asam tersebut mampu mempengaruhi tingkat pertumbuhan yang tidak bisa optimal.

d. Ekosistem Akuatik

Hujan asam dengan jangka yang panjang akan mempengaruhi pH air ekosistem akuatik (Kupchella, 1993). Karena kehidupan organisme akuatik sangat dipengaruhi oleh pH air di lokasi hidupnya, hujan asam memiliki pengaruh yang signifikan terhadap biologi ekosistem akuatik.

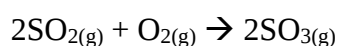
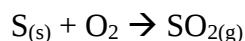
Menurut Odum (1996), hujan asam dapat menurunkan populasi ikan, tumbuhan akuatik serta jasad renik. Di samping pengaruhnya terhadap pH, hujan asam mampu memperkaya danau dengan unsur hara, khususnya nitrogen, sehingga dapat mengakibatkan terjadinya eutrofikasi atau bisa disebut dengan penyuburan perairan. Eutrofikasi menimbulkan kesulitan karena terjadinya pertumbuhan plankton secara berlebih sehingga menghalangi sinar matahari dan mengakibatkan terjadinya kematian massal plankton.

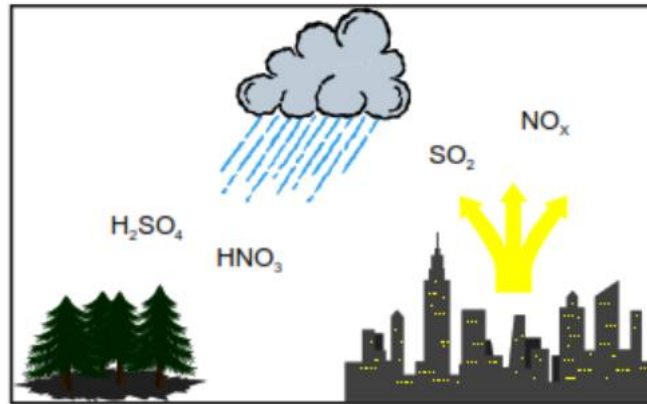
e. Material

Hujan asam sangat berdampak pada berbagai jenis material seperti logam, bangunan baru, keramik dan gelas, kertas, bahan fotografi, cat, kulit, tekstil dan karet. Hal ini diakibatkan terpengaruhnya jenis material tersebut oleh oksida belerang, oksida nitrogen serta zat pencemar udara lainnya. Kerusakan material-material ini disebabkan oleh deposisi kering asam sulfat yang berasal dari transportasi perkotaan serta aktivitas industri.

Berdasarkan *Handbook for LCA using GaBi Software* (2009), potensi hujan asam diberikan dalam ekuivalen sulfur dioksida (SO₂eq). Potensi hujan asam digambarkan sebagai kemampuan zat tertentu untuk membangun dan melepaskan ion H⁺ -. Emisi tertentu juga dapat dianggap memiliki potensi pengasaman, jika atom S-, N- dan halogen yang diberikan diatur secara proporsional dengan massa molekul emisi. Substansi referensi adalah sulfur dioksida. Menurut Matahelumual (2016), berikut merupakan reaksi pembentukan hujan asam:

- Reaksi pembentukan hujan asam





Gambar 5 Potensi Hujan Asam

Sumber: GaBi, 2009

2.9 Software Microsoft Excel

Microsoft Excel merupakan aplikasi *spreadsheet* yang termasuk dalam bagian Microsoft Office berfungsi untuk melakukan operasi perhitungan dan dapat mempresentasikan data secara otomatis seperti perhitungan, rumus, fungsi, tabel, grafik dan manajemen data (Abdullah, dkk., 2019). Adapun beberapa contoh aplikatif dari penggunaan Microsoft Excel dalam kehidupan sehari-hari yaitu seperti keperluan sebagai berikut:

1. Membuat sebuah grafik yang memperlihatkan presentasi suatu penjualan dalam range tertentu.
2. Menghitung rata-rata atau nilai maksimum suatu data.
3. Memperlihatkan jumlah total suatu variabel
4. Manajemen database.

Dalam melaksanakan perhitungan dampak dengan menggunakan metode LCA dapat menggunakan beberapa *software*, yaitu SimaPro namun masih diperlukan validasi perhitungan manual menggunakan Microsoft Excel. Adapun *software* OpenLCA yang bersifat *open source* namun hanya berfungsi sebagai kalkulasi saja, pengguna harus mencari dan memberi *database* secara mandiri. Salah satu *software* alternatif yang dapat digunakan adalah Microsoft Excel,

dikarenakan mudah digunakan dan masih memungkinkan jika menggunakan kalkulasi manual.

2.10 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Menurut Latif, dkk (2018), *Analytical Hierarchy Process (AHP)* merupakan metode yang dapat mendukung keputusan yang memiliki sifat unik dibandingkan dengan yang lainnya. *Analytical Hierarchy Process (AHP)* merupakan suatu teori umum untuk pengukuran skala yang dapat digunakan dalam menemukan skala rasio, baik perbandingan berpasangan yang diskrit maupun kontinyu. AHP digunakan dalam penyelesaian masalah yang kompleks dengan menggunakan kriteria yang relatif banyak. Kompleksitas tersebut disebabkan oleh struktur permasalahan yang masih belum tertata dan minimnya data informasi statistik berdasarkan masalah yang dihadapi (Darmanto *et al.*, 2014).

AHP dapat menguraikan permasalahan yang kompleks menjadi suatu hirarki. Hirarki didefinisikan sebagai suatu representasi dari suatu permasalahan kompleks yang dijabarkan ke dalam struktur multi level dimana level pertama merupakan tujuan, diikuti dengan level faktor, kriteria, sub kriteria hingga alternatif. Dengan hirarki tersebut, suatu permasalahan kompleks dapat diuraikan menjadi kelompok yang kemudian diatur agar terstruktur dan sistematis. Bagian terpenting dari AHP adalah tahap penilaian perbandingan berpasangan dengan melakukan penilaian antara faktor pada suatu tingkat hirarki. Perbandingan yang dilakukan untuk menentukan tingkat kepentingan kriteria maupun alternatif terbaik (Putri, 2017).

2.10.1 Tahapan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)

Menurut Suryadi dan Ramadhani dalam Supriadi, dkk (2018), terdapat tahapan metode AHP yang dapat dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Mendefinisikan masalah dan menentukan solusi yang ingin dicapai.
2. Membuat struktur hirarki yang diawali dengan tujuan, pemilihan kriteria dan pilihan alternatif.

3. Menentukan matriks perbandingan berpasangan yang menggambarkan kontribusi relatif ataupun pengaruh setiap elemen terhadap tujuan maupun kriteria yang lebih tinggi tingkatannya.
4. Mendefinisikan perbandingan pasangan sehingga dapat diperoleh jumlah penilaian seluruhnya sebanyak $n \times [(n-1)/2]$ buah dengan n merupakan jumlah elemen yang dibandingkan
5. Menghitung nilai vektor dan menguji konsistensinya, jika terjadi inkonsistensi maka perlu pengulangan pengambilan data.
6. Memeriksa konsistensi hirarki

2.10.2 Perhitungan Bobot Elemen

Penilaian pada beberapa alternatif yang ditentukan, bertujuan untuk membandingkan nilai atau karakter pilihan berdasarkan tiap kriteria yang ada. Hasil dari penilaian tersebut merupakan nilai karakter dari masing-masing alternatif. Penilaian yang dilakukan pada masing-masing kriteria guna mencapai tujuan yang telah ditentukan di awal. Prosedur perbandingan berpasangan AHP, mengacu pada skor penilaian yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty (2008). Skala penilaian perbandingan berpasangan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3 Skala Penilaian Perbandingan Berpasangan

Tingkat Kepentingan	Definisi	Keterangan
1	Kedua elemen sama penting	Elemen A1 dan A2 sama sama penting
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting	Elemen A1 cukup penting dibandingkan A2
5	Elemen yang satu lebih penting	Elemen A1 lebih penting dibandingkan A2
7	Satu elemen sangat lebih penting	Elemen A1 sangat penting dibandingkan dengan A2
9	Satu elemen mutlak lebih penting	Elemen A1 mutlak lebih penting dibandingkan A2

Tingkat Kepentingan	Definisi	Keterangan
2,4,6,8	Nilai tengah diantara dua penilaian yang berdampingan	Nilai ini diberikan jika diperlukan kompromi memilih skala

Sumber: Saaty, 2008

Di dalam AHP nantinya akan didapatkan 2 elemen yakni A1 dan A2 dimana elemen ini akan dikalikan. Tingkat kepentingan hasil perkalian ditentukan berdasarkan tabel di atas. Pengambilan data dapat menggunakan kuisioner maupun prosedur perbandingan berganda.

2.11 Software *Expert Choice*

Expert Choice merupakan sebuah perangkat lunak yang mendukung *collaborative decision* dan sistem perangkat keras yang memfasilitasi grup pembuatan keputusan yang lebih efisien, analitis dan yang dapat dibenarkan. Cara penggunaannya dengan memasukkan tujuan, kriteria dan alternatif. Selanjutnya melakukan perhitungan dengan membandingkan satu kriteria terhadap kriteria lainnya, lalu dengan *expert choice* dapat menentukan keputusan atau alternatif terbaik yang dapat dipilih (Basorudin dan Hendri, 2009).

Menurut Ruskan (2009), terdapat cara menggunakan *expert choice* yaitu sebagai berikut:

1. Memasukkan tujuan, kriteria dan alternatif
2. Pembobotan dan Skala prioritas
3. Menghasilkan jawaban atau keputusan yang dianjurkan

Untuk menentukan kriteria pada setiap pengambilan keputusan diperlukan untuk memperhatikan kriteria-kriteria sebagai berikut:

1. Lengkap, mencakup aspek penting dan digunakan dalam mengambil keputusan
2. Operasional, setiap kriteria mempunyai arti bagi pengambil keputusan
3. Tidak berlebihan, menghindari adanya kriteria yang mengandung pengertian yang sama
4. Minimum, diusahakan agar jumlah kriteria minimum untuk mempermudah pemahaman