

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sampah Plastik

Sampah adalah sebagian dari sesuatu yang tidak terpakai, tidak disenangi atau sesuatu yang dibuang, umumnya berasal dari kegiatan manusia dan bersifat padat (Azwar, 1990). Hadiwijoto (1983) mengemukakan bahwa sampah adalah sisa-sisa bahan yang telah mengalami perlakuan baik telah diambil bagian utamanya, telah mengalami pengolahan, dan sudah tidak bermanfaat, dari segi ekonomi sudah tidak ada harganya serta dari segi lingkungan dapat menyebabkan pencemaran atau gangguan kelestarian alam.

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, definisi sampah adalah sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat. Kemudian dalam Peraturan Pemerintah No.81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga dijelaskan lagi tentang definisi sampah rumah tangga adalah sampah yang berasal dari kegiatan sehari-hari dalam rumah tangga yang tidak termasuk tinja dan sampah spesifik. Sampah sejenis sampah rumah tangga adalah sampah rumah tangga yang berasal dari kawasan komersial, kawasan industri, kawasan khusus, fasilitas sosial, fasilitas umum, dan/atau fasilitas lainnya.

Murtadho dan Gumbira (1988) membedakan sampah atas sampah organik dan sampah anorganik. Sampah organik meliputi limbah padat semi basah berupa bahan-bahan organik yang umumnya berasal dari limbah hasil pertanian. Sampah ini memiliki sifat mudah terurai oleh mikroorganisme dan mudah membusuk karena memiliki rantai karbon relatif pendek. Sedangkan sampah anorganik berupa sampah padat yang cukup kering dan sulit terurai oleh mikroorganisme karena memiliki rantai karbon yang panjang dan kompleks seperti kaca, besi, plastik, dan lain-lain.

Menurut Adekunle (2014), mayoritas limbah padat perkotaan terdiri dari zat organik, plastik, kaca, logam, tekstil dan bahan karet tetapi komposisi dan

volume limbah bervariasi dari satu wilayah yang lain dan juga dari satu negara ke Negara lain. Sampah plastik merupakan salah satu sampah anorganik yang diproduksi setiap tahun oleh seluruh dunia. Seperti telah kita ketahui bersama bahwa sampah plastik sangat sulit terurai dalam tanah, membutuhkan waktu bertahun-tahun dan ini akan menimbulkan permasalahan tersendiri dalam penanganannya. Pada umumnya sampah plastik tersebut memiliki komposisi 46 % *polyethylene* (HDPE dan LDPE), 16 % *polypropylen* (PP), 16 % *polystyrene* (PS), 7 % *polyvinyl chloride* (PVC), 5 % *polyethylene terephthalate* (PET), 5 % *acrylonitrile-butadiene-styrene* (ABS), dan 5 % polimer-polimer yang lainnya (Vasile, 2002).

Manajemen pengelolaan sampah plastik mulai dari lingkungan terkecil yaitu rumah tangga hingga skala besar meliputi kawasan kota yang dikelola oleh pemerintah kota atau daerah setempat sangat diperlukan. Untuk memudahkan pengelolaan sampah plastik pada skala rumah tangga, maka perlu adanya pemahaman tentang jenis-jenis plastik, kandungan materialnya, hingga dampaknya terhadap lingkungan sehingga diharapkan terbentuk manajemen pengelolaan yang tepat. Pembuangan di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) bukanlah solusi yang cukup bijak dalam pengelolaan sampah plastik ini. Peranan para pemulung dalam mengurangi timbunan sampah plastik patut di apresiasi meskipun ini tidak bisa menghilangkan seratus persen sampah plastik yang ada.

Plastik merupakan material yang baru secara luas dikembangkan dan digunakan sejak abad ke-20 yang berkembang secara luar biasa penggunaannya dari hanya beberapa ratus ton pada tahun 1930-an, menjadi 150 juta ton/tahun pada tahun 1990-an dan 220 juta ton/tahun pada tahun 2005. Plastik dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu *thermoplastic* dan *termosetting*. *Thermoplastic* adalah bahan plastik jika dipanaskan sampai temperatur tertentu akan mencair dan dapat dibentuk menjadi bentuk yang diinginkan. Sedangkan *thermosetting* adalah jenis plastik yang sudah dipadatkan tidak dapat dicairkan kembali dengan cara dipanaskan (Surono, 2013). Jenis plastik yang termasuk dalam kategori *thermoplastic* bisa dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut :

Tabel 2.1 Jenis Plastik dalam Kategori *Thermoplastic*

Jenis	Kegunaan	Kode	Keterangan
<i>Polyester thermoplastic</i> (PETE)	Botol minuman, botol kecap		Disarankan satu kali pemakaian, tidak boleh untuk menyimpan air panas
<i>High Density Polyethylene</i> (HDPE)	Botol <i>shampoo</i> , bahan mainan, botol obat		Disarankan satu kali pemakaian, jika dipakai berulang bahan penyusun tercampur dalam bahan pangan
<i>Polyvinyl Chloride</i> (PVC)	Botol minyak goreng, selang, lapisan kabel, Pipa		Tidak disarankan untuk wadah makanan
<i>Low Density Polyethylene</i> (LDPE)	Kantong roti, Kantong kresek, jas hujan plastik		Boleh digunakan sekali dan tidak boleh digunakan pada makan yang masih panas
<i>Polypropylene</i> (PP)	Bungkus <i>snack</i> , sedotan, gelas kemasan air minum		Dapat dipakai kembali dan sangat baik untuk menyimpan makanan dan minuman
<i>Polystyrene</i> (PS)	Styrofoam, Cup kopi sekali pakai		Digunakan sekali pakai untuk wadah minuman dan perhatikan lagi dalam penggunaannya
<i>Other</i> , misalnya: polikarbonat	Galon air mineral, botol susu bayi		Dapat digunakan berulang, karena sifat termalnya stabil

Sumber : Kurniawan (2012).

Berdasarkan sifat kedua kelompok plastik tersebut, *thermoplastic* adalah jenis plastik yang memungkinkan untuk di daur ulang yang memiliki sifat-sifat khusus, sebagai berikut :

1. Berat molekul kecil
2. Tidak tahan terhadap panas
3. Jika dipanaskan akan melunak
4. Jika didinginkan akan mengeras
5. Mudah untuk diregangkan
6. Fleksibel
7. Dapat dibentuk ulang (daur ulang)
8. Mudah larut dalam pelarut yang sesuai.

Dari Tabel 2.1 setiap jenis plastik memiliki karakteristik masing-masing. Berikut dijelaskan karakteristiknya, yaitu :

1. *Polyester Thermoplastic (PETE)*



Gambar 2.1 Kemasan Plastik PETE (Generasi3R, 2015)

Jenis plastik PETE biasa ditemukan pada botol air mineral, botol soda, botol minyak sayur, dan tempat plastik lainnya yang memiliki karakter berwarna jernih/transparan/tembus pandang dan direkomendasikan hanya sekali pakai. Jenis plastik pada Gambar 2.1 mempunyai sifat karakteristik sebagai berikut :

- a. Tembus pandang (transparan), bersih dan jernih
- b. Tahan terhadap pelarut organik seperti asam-asam organik dari buah-buahan, sehingga dapat digunakan untuk mengemas minuman sari buah.
- b. Tidak tahan terhadap asam kuat, fenol dan benzil alkohol.
- c. Kuat dan tidak mudah sobek
- d. Tidak mudah dikelim dengan pelarut

2. *High Density Polyethylene (HDPE)*



Gambar 2.2 Kemasan Plastik HDPE (Generasi3R, 2015)

Plastik jenis HDPE banyak digunakan untuk botol detergen, botol pemutih, botol susu yang berkemasan putih pucat, tempat mentega, tempat yoghurt, tempat shampoo, dan tempat sabun. Jenis plastik ini memiliki karakteristik sebagai berikut :

- a. Kuat
- b. Berbahan kaku
- c. Lapisan berminyak
- e. Mudah dicetak

3. *Polyvynil Chloride (PVC)*



Gambar 2.3 Kemasan Plastik PVC (Generasi3R, 2015)

Jenis plastik ini banyak digunakan untuk pipa plastik, lantai, dan outdoor meubel. Sangat tidak dianjurkan untuk menggunakan plastik dengan jenis PVC sebagai wadah makanan. Adapun sifat karakteristik dari plastik jenis PVC adalah :

- a. Kuat
- b. Keras
- c. Bisa jernih
- d. Bentuk dapat diubah dengan pelarut

4. *Low Density Polyethylene (LDPE)*



Gambar 2.4 Kemasan Plastik LDPE (Generasi3R, 2015)

Jenis plastik LDPE mengandung bahan *additive* dengan komposisi BHEB 18%, isonox 129 21%, irganox 1076 18%, dan irganox 1010 12%. Sifat dari plastik ini mempunyai karakteristik sebagai berikut :

- a. Penampakkannya bervariasi dari transparan, berminyak sampai keruh tergantung proses pembuatan dan jenis resin.
- b. Lentur sehingga mudah dibentuk dan mempunyai daya rentang yang tinggi.
- c. Tahan asam, basa, alkohol, deterjen dan bahan kimia.
- d. Kedap terhadap air, uap air dan gas.
- e. Dapat digunakan untuk penyimpanan beku hingga suhu -50°C
- f. Transmisi gas tinggi sehingga tidak cocok untuk pengemasan bahan yang beraroma. Tidak sesuai untuk bahan pangan berlemak
- g. Mudah lengket sehingga sulit dalam proses laminasi, tapi dengan bahan antiblok sifat ini dapat diperbaiki.

5. *Polypropylene* (PP)



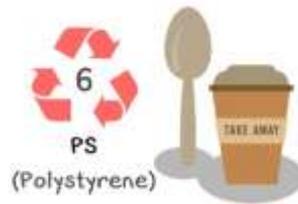
Gambar 2.5 Kemasan Plastik PP (Generasi3R, 2015)

Jenis plastik PP mengandung bahan *additive* dengan komposisi stabilator panas (AE) 4%, stabilator panas (AJ) 4%, pelumas (AH) 5%, *syntetic hydrotalcite* (HD) 3%, *slip agent* (SB) 14%, dan *antiblocking* (SC) 8%.

Sifat dari plastik ini mempunyai karakteristik sebagai berikut :

- a. Keras tapi fleksibel
- b. Ringan
- c. Mudah dibentuk
- d. Kuat
- e. Permukaan berkilin
- f. Tahan terhadap bahan kimia dan minyak

6. *Polystyrene (PS)*



Gambar 2.6 Kemasan Plastik PS (Generasi3R, 2015)

Jenis plastik ini banyak digunakan untuk tempat makan styrofoam, *coffee cup*, dan sendok garpu plastik. Bahan ini berbahaya untuk kesehatan otak, mengganggu hormon estrogen yang berakibat pada masalah reproduksi, gangguan pertumbuhan sistem syaraf, serta bahan ini sulit didaur ulang. Adapun karakteristik dari plastik jenis PS ini adalah :

- a. Ringan
- b. Getas
- c. Kaku
- d. Biasanya berwarna putih
- e. Melunak pada suhu 95°C
- f. Baik untuk kemasan bahan segar
- g. Permukaan licin, jernih dan mengkilap serta mudah dicetak
- h. Bila kontak dengan pelarut akan keruh
- i. Mudah menyerap pемlastis, jika ditempatkan bersama-sama dengan plastik lain menyebabkan penyimpangan warna
- j. Baik untuk bahan dasar laminasi dengan logam (aluminium)

7. *Other*



Gambar 2.7 Kemasan Plastik *Other* (Generasi3R, 2015)

Jenis plastik yang tergolong dalam OTHER adalah SAN (*Styrene acrylonitrile*), ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), PC (*poly carbonate*), dan Nylon. Jenis plastik OTHER banyak ditemui pada CD, alat-alat rumah tangga, dan alat-alat elektronik. Plastik jenis ini memiliki sifat karakteristik sebagai berikut :

- a. Keras
- b. Tahan panas
- c. Tidak mudah pecah

Dalam usaha mengelola limbah atau sampah secara baik, ada beberapa pendekatan teknologi, diantaranya penanganan pendahuluan. Penanganan pendahuluan umumnya dilakukan untuk memperoleh hasil pengolahan atau daur ulang yang lebih baik dan memudahkan penanganan yang akan dilakukan. Penanganan pendahuluan yang umum dilakukan saat ini adalah pengelompokan limbah sesuai jenisnya, pengurangan volume dan pengurangan ukuran. Usaha penanganan pendahuluan ini dilakukan dengan tujuan memudahkan dan mengefektifkan pengolahan sampah selanjutnya, termasuk upaya daur ulang.

2.2 Dampak Lingkungan dari Sampah Plastik

Plastik merupakan salah satu jenis makromolekul yang dibentuk melalui proses polimerisasi. Polimerisasi adalah sebuah proses di mana molekul sederhana seperti monomer bergabung menjadi molekul yang lebih besar melalui proses kimia. Penyusun utama dari polimer plastik adalah hidro karbon. Bahan mentah yang biasa digunakan untuk membuat plastik adalah naptha. Naptha bisa didapat dari penyulingan minyak bumi atau gas alam. Untuk dapat membuat plastik dibutuhkan minyak bumi yang lebih banyak dari pada target yang ingin didapat, sebagai contoh untuk membuat 1 kg plastik memerlukan 1,75 kg minyak bumi. Nilai minyak bumi tersebut sudah termasuk bahan baku dan kebutuhan energi yang diperlukan dalam prosesnya. (Kumar dkk, 2011).

Sampah plastik dalam pengolahannya masih banyak menimbulkan masalah. Plastik yang ditimbun akan membutuhkan waktu yang lama agar plastik dapat terurai oleh tanah secara sempurna dan jika dibakar, sampah plastik akan menghasilkan asap beracun yang berbahaya bagi kesehatan. Untuk mengatasi masalah tersebut, sampah plastik dapat didaur ulang menjadi bentuk lain yang memiliki fungsi berbeda dari fungsi semula.

Rajkumar (2015) mengungkapkan sebagian besar plastik yang kita gunakan menjadi limbah dalam waktu singkat. Persentase yang tinggi dari plastik yang diproduksi berakhir di sungai secara cepat. Sebagian besar plastik yang digunakan di India pada sektor kemasan, bahkan hampir 52 persen dari semua plastik yang digunakan dalam kemasan. Sampah plastik yang dibuang sembarangan juga dapat menyumbat saluran drainase, selokan dan sungai sehingga bisa menyebabkan banjir. Sampah plastik yang dibakar bisa mengeluarkan zat-zat yang berbahaya bagi kesehatan manusia yaitu zat karbon monoksida, dioksin, furan, volatil dan zat-zat berbahaya lainnya.

Penggunaan plastik yang berlebihan mengakibatkan jumlah timbulan sampah plastik yang sangat besar. Dalam kondisi seperti itulah dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Adapun dampak lingkungan yang ditimbulkan banyaknya timbulan sampah plastik adalah sebagai berikut :

1. Tercemarnya tanah, air tanah dan makhluk bawah tanah. Racun-racun dari partikel plastik yang masuk ke dalam tanah akan membunuh hewan-hewan pengurai di dalam tanah seperti cacing. Kantong plastik akan mengganggu jalur air yang meresap ke dalam tanah. Menurunkan kesuburan tanah karena plastik juga menghalangi sirkulasi udara di dalam tanah dan ruang gerak makhluk bawah tanah yang mampu menyuburkan tanah.
2. Pembuangan sampah plastik sembarangan di sungai-sungai akan mengakibatkan pendangkalan dan penyumbatan aliran air sungai.
3. Sampah jenis kantong plastik akan mengganggu jalur air yang meresap ke dalam tanah.
4. Jika dibakar, sampah plastik akan menghasilkan asap beracun yang berbahaya bagi kesehatan yaitu jika proses pembakarannya tidak sempurna,

plastik akan mengurai di udara sebagai dioksin. Senyawa ini sangat berbahaya bila terhirup manusia. Dampaknya antara lain memicu penyakit kanker, hepatitis, pembengkakan hati, gangguan sistem saraf dan memicu depresi.

2.3 Proses Daur Ulang Sampah Plastik

Pemanfaatan limbah plastik merupakan salah satu upaya untuk menekan pembuangan plastik seminimal mungkin. Selain itu, dalam batas tertentu menghemat sumber daya dan mengurangi ketergantungan akan bahan baku impor. Pemanfaatan limbah plastik dapat dilakukan dengan pemakaian kembali (*reuse*) maupun daur ulang (*recycle*) (Anonim, 2009). Daur ulang adalah proses untuk menjadikan suatu bahan bekas menjadi bahan baru dengan tujuan mencegah adanya sampah yang sebenarnya dapat menjadi sesuatu yang berguna, mengurangi bahan baku yang baru, mengurangi penggunaan energi, mengurangi polusi, kerusakan lahan dan emisi gas rumah kaca jika dibandingkan dengan proses pembuatan barang baru.

Permadi (2011) berpendapat bahwa daur ulang merupakan salah satu strategi pengelolaan sampah padat yang terdiri atas kegiatan pemisahan, pengumpulan, pemrosesan, pendistribusian, dan pembuatan produk atau material bekas pakai dan komponen utama dalam manajemen sampah modern. Proses daur ulang limbah plastik melibatkan proses pengumpulan, pemisahan dan pemrosesan yang bertujuan untuk mengembalikannya kembali ke masyarakat dalam bentuk produk yang sama ataupun produk yang baru, baik dari jenis atau fungsinya. (Lardinois dan Van de Klundert, 1993).

Tujuan utama dalam proses dasar daur ulang plastik adalah untuk mengolah sampah plastik menjadi pellet atau bijih plastik yang merupakan bahan dasar pembentuk plastik menurut produk yang diinginkan. Dalam proses ini, jenis bahan baku yang digunakan menentukan jenis bijih plastik yang dihasilkan. Bahan baku daur ulang dengan kualitas satu merupakan plastik yang belum pernah didaur ulang sebelumnya atau hanya pernah sekali saja didaur ulang.

Pemanfaatan limbah plastik dengan cara daur ulang umumnya dilakukan oleh industri. Secara umum terdapat empat persyaratan agar suatu limbah plastik dapat diproses oleh suatu industri, antara lain limbah harus dalam bentuk tertentu (biji, pellet, serbuk, pecahan) sesuai kebutuhan, limbah harus homogen, tidak terkontaminasi, serta diupayakan tidak teroksidasi. Untuk mengatasi masalah tersebut, sebelum digunakan limbah plastik diproses melalui beberapa tahapan, yaitu pemisahan, pemotongan, pencucian, dan penghilangan zat-zat seperti besi dan sebagainya (Anonim, 2009).

Pemanfaatan plastik daur ulang dalam pembuatan kembali barang-barang plastik telah berkembang pesat. Hampir seluruh jenis limbah plastik (80%) dapat diproses kembali menjadi berbagai jenis barang walaupun harus dilakukan pencampuran dengan bahan baku baru dan *additive* untuk meningkatkan kualitas. Terdapat empat jenis limbah plastik yang populer dan laku di pasaran yaitu polietilena (PE), high density polyethylene (HDPE), polipropilena (PP) dan asoi (Anonim, 2009).

Daur ulang (*recycle*) sampah plastik dapat dibedakan menjadi empat cara yaitu daur ulang primer, daur ulang sekunder, daur ulang tersier dan daur ulang quarter. Daur ulang primer adalah daur ulang limbah plastik menjadi produk yang memiliki kualitas yang hampir setara dengan produk aslinya. Daur ulang cara ini dapat dilakukan pada sampah plastik yang bersih, tidak terkontaminasi dengan material lain dan terdiri dari satu jenis plastik saja. Daur ulang sekunder adalah daur ulang yang menghasilkan produk yang sejenis dengan produk aslinya tetapi dengan kualitas di bawahnya. Daur ulang tersier adalah daur ulang sampah plastik menjadi bahan kimia atau menjadi bahan bakar. Daur ulang kuartier adalah proses untuk mendapatkan energi yang terkandung di dalam sampah plastik (Kumar dkk., 2011).

Dalam penerapannya, daur ulang sampah memiliki banyak manfaat. Salah satunya, sampah-sampah yang ada di lingkungan dapat diminimalisir. Pendaaur ulangan sampah sudah mempunyai nilai ekonomi yang cukup tinggi di negara-negara maju. Banyak berdiri pabrik-pabrik pendaaur ulangan sampah, mereka menjadikan sampah tersebut sebagai bahan baku atas produk benda-benda

tertentu, hal ini jelas meningkatkan nilai ekonomi dari benda yang bersangkutan. Pengelolaan sampah yang baik memberikan dua manfaat penting yaitu: 1) menjaga kelestarian lingkungan, dan 2) meningkatkan ekonomi (Hadi, 2001).

Sampah didaur-ulang (*recycled*) untuk dijadikan bahan baku industri (*raw material*) dalam proses produksi (*reprocessing* dan *remanufacture*). Dalam proses ini, sampah sudah mengalami perubahan baik bentuk maupun fungsinya. Sebagai contoh sampah plastik, karet, kertas, besi, tembaga, aluminium, dengan melalui proses daur ulang maka mengalami perubahan bentuk dan fungsi menjadi produk akhir yang dapat digunakan kembali.

Dalam pengelolaan sampah, upaya daur ulang akan berhasil baik bila dilakukan pemilahan dan pemisahan komponen sampah mulai dari sumber sampai ke proses akhirnya. Upaya pemilahan sangat dianjurkan dan hendaknya diprioritaskan sehingga termasuk yang paling penting didahulukan. Persoalannya adalah bagaimana meningkatkan keterlibatan masyarakat. Pemilahan yang dianjurkan adalah pola pemilahan yang dilakukan mulai dari level sumber atau sifat awal yaitu belum tercampur atau terkontaminasi dengan sampah lainnya (Damanhuri dan Padmi, 2009).

Menurut Budiyanoro (2010) dalam Surono (2013), dalam proses pembuatan dan daur ulang plastik, pengetahuan sifat berbagai jenis plastik sangat penting. Ada tiga sifat termal yang penting untuk diketahui yakni titik lebur (T_m), temperatur transisi (T_g), dan temperatur dekomposisi. Temperatur transisi adalah kondisi di mana struktur dalam plastik mengalami perenggangan sehingga menjadi lebih fleksibel. Titik lebur plastik adalah sebuah kondisi di mana plastik akan mengalami pembesaran volume dan berubah menjadi lebih lentur. Temperatur lebur adalah temperatur di mana plastik mengalami fase cair. Sementara itu untuk mengalami dekomposisi suhu harus berada di titik lebur sehingga energi termal melampaui energi yang mengikat rantai molekul. Pada umumnya rantai polimer pada plastik akan mengalami dekomposisi ketika suhu termal berada 1,5 kali dari temperatur transisinya. Data sifat termal yang penting pada proses daur ulang plastik dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Data Temperatur Transisi dan Temperatur Lebur Plastik

Jenis Bahan	T_m (°C)	T_g (°C)	Temperatur Kerja Maksimal (°C)
PP	168	5	80
HDPE	134	- 110	82
LDPE	330	- 115	260
PA	260	50	100
PET	250	70	100
ABS	-	110	82
PS	-	90	70
PMMA	-	100	85
PC	-	150	246
PVC	-	90	71

Sumber: Budiyanoro, 2010

Perbandingan energi yang terkandung dalam plastik dengan sumber-sumber energi lainnya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.3 Nilai kalor plastik dan bahan lainnya

Material	Nilai Kalor (MJ/kg)
<i>Polyethylene</i>	46,3
<i>Polypropylene</i>	46,4
<i>Polyvinyl chloride</i>	18,0
<i>Polystrene</i>	41,4
<i>Coal</i>	24,3
<i>Petrol</i>	44,0
<i>Diesel</i>	43,0
<i>Heavy fuel oil</i>	41,1
<i>Liquid fuel oil</i>	41,9
<i>LPG</i>	46,1
<i>Kerosene</i>	43,4

Sumber: Das dan Pande, 2007

Selain nilai kalornya yang tinggi, plastik *polypropilena* (PP) dan *polyethylene therephthalate* (PET/HDPE) merupakan plastik yang sering diaplikasikan. Sifatnya yang tahan panas, keras, dan fleksibel membuat plastik PP sering digunakan untuk membuat kantung plastik, gelas plastik air mineral, pembungkus makanan instan, dan beberapa botol plastik. Sementara plastik PET lebih sering

digunakan untuk botol minuman instan karena sifatnya yang tahan dengan larutan (Nugraha, 2013).

Pemanfaatan plastik daur ulang sebagai bahan konstruksi masih sangat jarang ditemui. Pada tahun 1980 an, di Inggris dan Italia plastik daur ulang telah digunakan untuk membuat tiang telepon sebagai pengganti tiang-tiang kayu atau besi. Di Swedia, plastik daur ulang dimanfaatkan sebagai bata plastik untuk pembuatan bangunan bertingkat, karena ringan serta lebih kuat dibandingkan bata yang umum dipakai (Alfauzi dan Tjahjono, 2014). Semakin berkembangnya teknologi, pengelolaan sampah plastik juga dapat dilakukan melalui proses pirolisis. Pirolisis merupakan teknik daur ulang limbah tersier atau teknik yang mampu mengkonversi limbah plastik menjadi bahan bakar, monomer, atau bahan berharga lainnya melalui proses degradasi termal dan katalitik (J. Scheirs and W. Kaminsky, 2006).

2.4 Gas Rumah Kaca

Gas Rumah Kaca (GRK) menurut EPA (2017) adalah gas-gas yang terperangkap panas di atmosfer dan dapat menyebabkan kenaikan suhu rata-rata bumi yang sering disebut pemanasan global. Pemanasan global ini menjadi masalah yang penting dan kritis yang sedang dihadapi oleh dunia saat ini (Freije, 2017). Dalam Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011 Gas Rumah Kaca didefinisikan sebagai gas yang terkandung dalam atmosfer baik alami maupun antropogenik yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah.

Terdapat 6 senyawa GRK yang disepakati dalam Protokol Kyoto, yaitu karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogenoksida (N_2O), chlorofluoro-carbon (CFC), hidro-fluoro-carbon (HFCs), dan sulfur heksafluorida (SF_6). Hal tersebut juga tercantum dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 71 Tahun 2011 Tentang Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional. Gas-gas tersebut dianggap memiliki potensi pemanasan global yang diperhitungkan dalam potensi CO_2 atau dikenal sebagai *Global Warming Potential* (GWP). GWP merupakan besaran efek radioaktif GRK apabila dibandingkan dengan CO_2 (Purwanta, 2009). GWP menunjukkan sekian ton CO_2

setara dengan satu ton GRK lainnya. Metana (CH₄) memiliki GWP 21 kali CO₂, sedangkan nilai GWP untuk N₂O, HFC, PFC dan SF₆ berturut-turut adalah sebesar 310, 140-11.700, 6500-9.200, dan 23.900 kali CO₂ seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Jenis Gas Rumah Kaca Berdasarkan Protokol Kyoto

No	Gas Rumah Kaca (GRK)	Potensi Pemanasan Global (GWP)
1	Karbondioksida (CO ₂)	1
2	Metana (CH ₄)	21
3	Nitrogenoksida (N ₂ O)	310
4	Hidroflorokarbon (HFC)	140 – 11.700
5	Perflorokarbon (PFC)	6500 – 9200
6	Sulfurheksaklorida (SF ₆)	23.900

Sumber: Handayani, 2008

Dua sumber utama dari terbentuknya GRK yaitu GRK yang terbentuk secara alami tanpa campur tangan manusia dan GRK yang terbentuk karena kegiatan manusia (anthropogenik). Sumber GRK anthropogenik dipercaya sebagai penyebab utama dari terjadinya pemanasan global dimana kegiatan manusia yang menimbulkan emisi GRK menurut laporan IPCC (*IPCC Tehnical Paper 1, 1996*) berasal dari 7 sektor, yakni dari sektor perumahan dan bangunan, transportasi, industri, energi, pertanian, kehutanan dan limbah. Sektor pertanian memberikan emisi $\leq 1/5$ dari total emisi global, dengan besar sumbangan emisi CH₄ dan N₂O sekitar 18 %. Sedangkan sisanya, sektor energi, transportasi dll adalah sebesar 68%.

Setiap jenis gas rumah kaca memiliki waktu tinggal yang berbeda-beda. Semakin lama waktu tinggal gas rumah kaca di atmosfer, semakin efektif pengaruhnya terhadap peningkatan suhu rata-rata bumi (Latuconsina, 2010). Tabel 2.5 menunjukkan lama waktu tinggal dari masing-masing gas rumah kaca (IPCC, 2007). Karbon Dioksida (CO₂), Metana (CH₄), dan Dinitrogen Oksida (N₂O) merupakan gas yang termasuk dalam golongan gas rumah kaca berumur panjang (*long-lived greenhouse gases* atau LLGHGs). Gas yang termasuk ke

dalam LLGHGs adalah gas yang menjadi kontributor utama perubahan iklim (WMO, 2014).

Tabel 2.5 Lama Waktu Tinggal Gas Rumah Kaca

Gas Rumah Kaca (GRK)	Waktu Tinggal di Atmosfer (Tahun)
Karbondioksida (CO₂)	5 - 2000
Metana (CH₄)	12
Dinitrogen Oksida (N₂O)	144

Sumber: IPCC, 2007

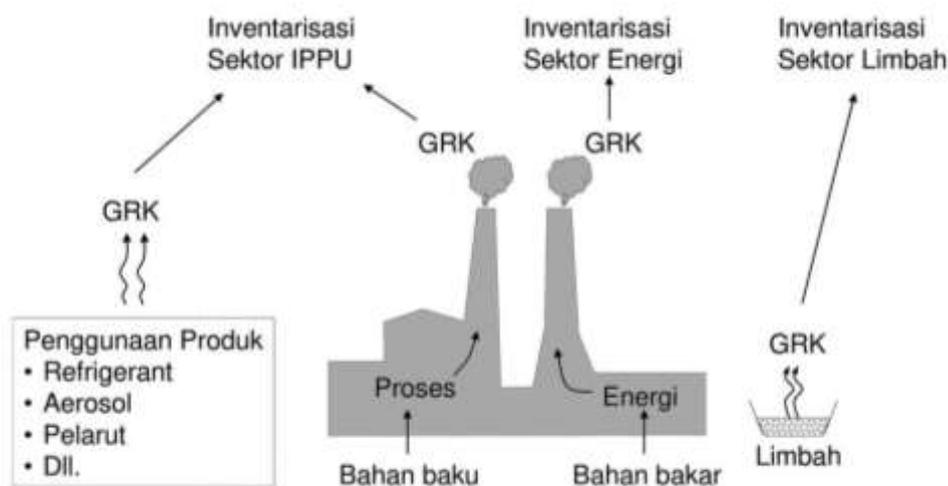
2.5 Emisi Gas CO₂ dari Sektor Industri

Karbon dioksida (CO₂) adalah suatu gas penting dan dalam kadar yang normal sangat bermanfaat dalam melindungi kehidupan manusia di bumi. Komposisi ideal dari CO₂ dalam udara bersih seharusnya adalah 314 ppm sehingga jumlah yang berlebihan di atmosfer bumi akan mencemari udara serta menimbulkan efek gas rumah kaca – GRK (Kirby, 2008). Dalam kaitannya dengan GRK, gas karbondioksida (CO₂) merupakan salah satu gas antropogenik rumah kaca yang menjadi penyebab utama terjadinya perubahan iklim bumi (Yazdi, *et.al.*, 2010). Emisi CO₂ berasal dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan penyebab terbesar sekitar 50% dari efek GRK (Puslitbangkim, 2005).

Emisi CO₂ yang dihasilkan dari kegiatan manusia (antropogenik) konsentrasinya relatif lebih tinggi sehingga mengganggu sistem kesetimbangan di udara dan pada akhirnya merusak lingkungan dan kesejahteraan manusia (Yoshinori, *et al.*, 2009). Salah satu contoh sumber emisi antropogenik adalah diakibatkan dari sektor industri. Sektor industri memiliki pengaruh besar sebagai penyumbang emisi gas rumah kaca. Emisi CO₂ yang dihasilkan dari sektor industri cukup tinggi yang terjadi pada proses produksi karena penggunaan energi yang cukup banyak dan umumnya masih memakai bahan bakar fosil. Proses industri menghasilkan emisi karbon yang cukup besar dari proses awal pengambilan bahan baku, proses pengolahan atau produksi sampai proses

distribusi. Semua sektor industri memberikan kontribusi GRK tetapi kontributor terbesar adalah pada industri semen, industri baja, industri pulp dan kertas, industri petrokimia, industri keramik, industri pupuk, industri makanan dan minuman (Badan Pengkajian Kebijakan Iklim dan Mutu Industri, 2012).

Setiap produk yang dihasilkan dari sektor industri memiliki banyak kelebihan dari kekuatan, fleksibel, hingga ketersediaan di pasaran sehingga menjadi pilihan yang tepat namun hal ini juga berbanding terbalik berbanding lurus dengan emisi yang dihasilkannya. Selain emisi yang dihasilkan dari proses pengolahan atau produksi, emisi yang besar juga dihasilkan dari proses eksploitasi bahan baku, pengangkutan dari lokasi pengambilan ke tempat pengolahan serta proses distribusi dari tempat pengolahan hingga lokasi pembangunan. Sektor industri juga mencatat bahwa penggunaan energi juga terdapat pada proses pengolahan limbah namun inventarisasi emisinya biasanya dilakukan terpisah.



Gambar 2.8 Pengelompokan Inventarisasi Emisi GRK dari Kegiatan Industri

2.6 Jejak Karbon

Jejak karbon (*carbon footprint*) adalah suatu ukuran jumlah total emisi karbon dioksida baik secara langsung maupun tidak langsung yang berasal dari aktivitas atau akumulasi dari kegiatan sehari-hari (Wardhani, 2017). Aktivitas

manusia dalam menghasilkan emisi CO₂ dapat dihitung dengan melihat penggunaan bahan bakar fosil dalam keseharian manusia berupa minyak bumi ataupun gas alam secara langsung dapat menghasilkan CO₂ serta melihat penggunaan listrik untuk keperluan sehari-hari. Emisi CO₂ dari aktivitas penggunaan listrik berasal dari pembangkit listrik sebagai pemasok energi listrik yang digunakan dan nilai CO₂ yang dihasilkan dihitung dari besar daya penggunaan listrik sehari-hari. Jejak karbon yang juga dikenal dengan *Carbon Footprint* (CFP) dinyatakan dalam satuan ton setara CO₂ (tCO₂e) atau kg-setara-CO₂ (kgCO₂e).

Jejak karbon terbagi menjadi 2 (dua) macam, yaitu jejak karbon primer dan jejak karbon sekunder.

- 1) Jejak karbon primer, merupakan jejak karbon yang didapat dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, sebagai contohnya penggunaan bahan bakar untuk kegiatan industri dan transportasi (Wulandari, 2013).

Jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari kegiatan transportasi ditentukan oleh jenis bahan bakar dan jumlah yang digunakan. Kendaraan bermotor menggunakan bahan bakar fosil agar dapat bergerak. Hasil dari pembakaran bahan bakar fosil yang digunakan menghasilkan emisi gas rumah kaca. Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi biasanya terdata dalam satuan liter, selanjutnya direpresentasikan sebagai data aktivitas (DA). Lalu jenis bahan bakar direpresentasikan sebagai faktor emisi (FE). Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi terlebih dahulu dikonversi ke dalam satuan energi mega joule (MJ). Untuk mengubah ke satuan terra joule (TJ), maka dikalikan dengan konversi energi atau nilai kalor (KLH, 2012). Adapun persamaan umum yang digunakan untuk menghitung emisi GRK dari pembakaran bahan bakar adalah:

$$\text{Emisi GRK (kg/tahun)} = \text{DA (Tj/tahun)} \times \text{FE (kg/Tj)}$$

Tabel 2.6 Nilai Kalor Bahan Bakar Indonesia

Bahan Bakar	Nilai Kalor	Penggunaan
Premium	33×10^{-6} J/liter	Kendaraan bermotor
Solar	36×10^{-6} J/liter	Kendaraan bermotor, Pembangkit listrik
Minyak Diesel	38×10^{-6} J/liter	Boiler industri, Pembangkit listrik
MFO (Marine Fuel Oil)	40×10^{-6} J/liter	Pembangkit listrik
Gas Bumi	$1,055 \times 10^{-6}$ J/SCF	Industri, rumah tangga, dll
LPG (Liquid Petroleum Gas)	$47,3 \times 10^{-6}$ J/kg	Rumah tangga, restoran, dll
Batu bara	$18,9 \times 10^{-6}$ J/ton	Pembangkit listrik, industri

Sumber: IPCC, 2007

- 2) Jejak karbon sekunder, yaitu jumlah emisi karbon dioksida yang diemisikan secara tidak langsung, dihasilkan dari peralatan-peralatan elektronik yang menggunakan daya listrik, misalnya penggunaan produk-produk hasil pabrikasi maupun penggunaan lampu, AC (*Air Conditioning*) dan berbagai peralatan elektronik lainnya (Wulandari, 2013).

Menurut Sutjahjo (2007), emisi gas rumah kaca dari pemakaian listrik dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar batu bara atau panas bumi (bahan bakar fosil) di pembangkit listrik. Polutan yang dihasilkan antara lain gas karbondioksida, SO₂, serta NO_x yang dapat menyebabkan hujan asam. Konsumsi energi listrik tidak secara langsung berkontribusi terhadap emisi CO₂, akan tetapi berperan dalam menghasilkan CO₂ di pusat pembangkit listrik yang berbahan bakar fosil.

Rumus perhitungannya :

$$EF = SFC \times NCV \times CEF \times Oxid \times 44/12$$

Keterangan :

EF = *Emission factor*

SFC = *Specific Fuel Consumption* (kiloton fuel/Megawatthour
(kt fuel/MWh))

NCV = *Net Calorific Value* (tera joule/kiloton fuel (TJ/kt fuel))

CEF = *Carbon Emission Factor* (TC/TJ)

Oxid = *Oxidation factor*

Setelah faktor emisi dihitung lalu:

$$\text{Emisi CO}_2 = \text{EF} \times \text{pemakaian listrik (kilowatt(kW))}$$

Keterangan :

EF = Faktor emisi CO₂ konsumsi listrik (satuan massa/MWh)

2.7 *Life Cycle Assesment* (Kajian Daur Hidup)

Life Cycle Assessment (LCA) atau kajian daur hidup ini didasarkan pada pemikiran bahwa suatu sistem industri tidak lepas kaitannya dengan lingkungan tempat industri itu berada. Dalam suatu sistem industri terdapat *input* dan *output*. *Input* dalam suatu sistem adalah material-material yang diambil dari lingkungan sedangkan *output* adalah keluaran yang akan dibuang kembali ke lingkungan. Besaran *input* dan *output* dari suatu sistem industri ini memberi dampak terhadap lingkungan, dimana pengambilan material (*input*) yang berlebihan akan menyebabkan semakin berkurangnya sumber daya, sedangkan hasil *output* dari sebuah industri yang berupa limbah (padat, cair, udara) dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu *Life Cycle Assessment* (LCA) berusaha melakukan evaluasi untuk meminimumkan baik pengambilan material maupun meminimumkan limbah industri yang akan dibuang ke lingkungan. Berdasarkan SETAC (*Society for Environmental Toxicologi and Chemistry*) *Life Cycle Assessment* (LCA) atau Kajian Daur Hidup didefinisikan sebagai :

”Suatu proses dengan tujuan mengevaluasi beban lingkungan terkait dengan suatu sistem produk, proses ataupun aktivitas dengan mengidentifikasi energi dan material yang digunakan serta limbah dan emisi yang dihasilkan atau dilepaskan ke lingkungan, dan mengkaji dampak dari penggunaan energi dan material tersebut terhadap lingkungan. Kajiannya meliputi seluruh daur hidup produk atau aktivitas yang mencakup ekstraksi dan proses bahan baku;

manufaktur ; distribusi; penggunaan; penggunaan kembali ; perawatan ;daur ulang dan pembuangan akhir ; dan termasuk seluruh kegiatan transportasi.

Life cycle Assessment (LCA) berdasarkan ISO 14040:1997 merupakan sebuah mekanisme untuk menganalisa dan memperhitungkan dampak lingkungan total dari suatu produk dalam setiap tahapan daur hidupnya yang dimulai dari persiapan bahan baku, proses produksi, penjualan dan transportasi serta pembuangan limbah yang disebut juga konsep “*cradle to grave*”. Dalam proses LCA dilakukan suatu prosedur objektif dalam mengevaluasi dampak lingkungan dengan melakukan determinasi kuantitatif dari semua aliran masuk/keluar (*exchange flow*) dari sistem terhadap lingkungan dalam tiap tahap kehidupan sistem (Honsono, 2012). Elemen utama dari *Life cycle Assessment* (LCA) antara lain :

- 1) Mengidentifikasi dan mengkuantifikasikan semua bahan yang terlibat, misalnya energi dan bahan baku yang dikonsumsi, emisi dan limbah yang dihasilkan.
- 2) Mengevaluasi dampak yang potensial dari bahan-bahan tersebut terhadap lingkungan.
- 3) Mengkaji beberapa pilihan yang ada untuk menurunkan dampak tersebut.

Dalam pembangunan berkelanjutan dibutuhkan suatu metode untuk mengukur dan membandingkan dampak-dampak lingkungan yang disebabkan oleh kegiatan manusia dalam bentuk produk yang berupa barang maupun jasa. Dampak lingkungan tersebut dapat berasal dari konsumsi sumber daya, emisi yang dilepaskan ke lingkungan, maupun intervensi lainnya seperti contoh gangguan terhadap tata guna lahan terkait proses produksi yang terjadi ketika ekstraksi sumber bahan baku, proses manufaktur produk, penggunaan produk dan akhir masa penggunaan produk (*reduce, reuse, recycle*). Emisi yang dilepaskan ke lingkungan akan berkontribusi terhadap dampak secara luas, seperti perubahan iklim, penipisan lapisan ozon, asidifikasi, eutrofikasi, beban toksikologis pada aspek kesehatan manusia maupun ekosistem, berkurangnya sumber daya alam, perubahan tata guna lahan, kebisingan dan sebagainya (Rebitzer *et al.*, 2004).

Tujuan utama dari *Life Cycle Assessment* adalah untuk meminimalkan besarnya polusi serta melestarikan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui seperti energi fosil; melestarikan sistem ekologi di area yang terganggu keseimbangannya; mengembangkan cara-cara alternatif untuk memaksimalkan daur ulang bahan dan limbah; serta mengaplikasikan teknik paling tepat untuk pencegahan atau pengurangan polusi. *Life-cycle studies* sudah diterapkan dengan banyak cara di sektor-sektor pemerintah atau swasta untuk beberapa manfaat seperti pengembangan, peningkatan, dan perbandingan produk. Beberapa manfaat atau nilai penting dari *Life Cycle Assessment* (LCA) antara lain :

- 1) Pengambilan keputusan yang lebih baik tentang pemilihan produk dan sistem produksi.
- 2) Untuk mengidentifikasi dampak utama terhadap lingkungan dan tahap-tahap daur hidup produk.
- 3) Menyediakan langkah-langkah perbaikan yang berbasis lingkungan.

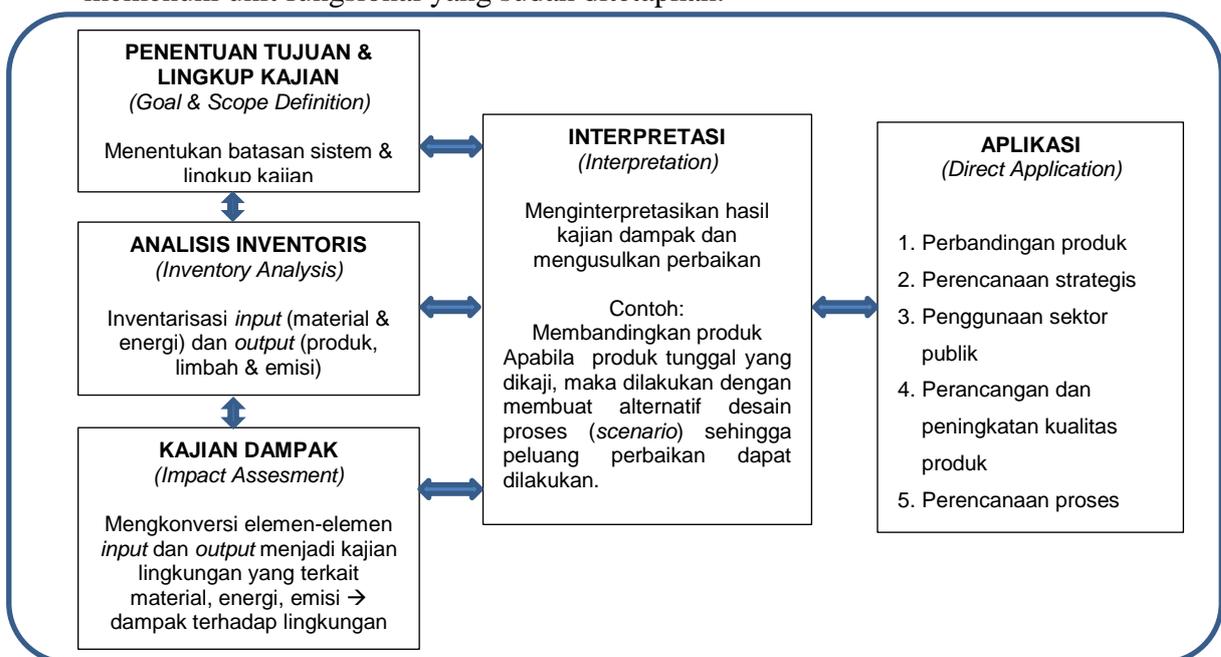
2.6.1 Tahapan *Life Cycle Assesment*

Berdasarkan seri Standar Internasional 14000 dijelaskan mengenai prinsip dan kerangka kerja dari kajian daur hidup atau LCA yaitu ISO 14040 (1997) dimana disebutkan bahwa LCA merupakan salah satu teknik yang dikembangkan untuk lebih memahami dan menangani dampak dari produk, baik saat diproduksi maupun dikonsumsi, termasuk dampak yang mungkin terkait dengannya. ISO 14041 (1998) berisi penjelasan mengenai penentuan tujuan dan batas kajian serta analisis inventaris (*goal and scope definition and inventory analysis*), ISO 14042 (2000) menjelaskan mengenai kajian dampak daur hidup (*life cycle impact assessment*) dan ISO 14043 (2000) menjelaskan mengenai interpretasi daur hidup (*life cycle interpretation*). Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2.8.

2.6.1.1. Penentuan Tujuan dan Lingkup Kajian (*Goal and Scope Definition*)

Pada tahap ini dilakukan penentuan tujuan dan batasan yang akan dilakukan pada penelitian LCA. Tujuan dan batasan yang dilakukan dalam penelitian harus dilakukan dengan jelas. Batasan pada penelitian LCA tidak harus dilakukan dari *cradle to grave* namun dapat dilakukan dari *cradle to gate*, *gate to gate* dan *gate to grave*. Menurut Curran (1996) dalam Honsono (2012), tujuan dari analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) antara lain, adalah membandingkan suatu produk atau proses baru dengan kompetitifnya, memilih alternatif produk atau proses yang lebih ramah lingkungan, dan menganalisis dampak lingkungan dan ekonomi dari suatu proses kerja.

Unit fungsional mendeskripsikan fungsi utama dari sebuah sistem produk. Dari unit fungsional ini dapat disusun beberapa alternatif dari sistem produk yang ekuivalen. Alternatif tersebut dapat berupa cara atau proses, maupun bahan yang digunakan untuk dapat memenuhi fungsi dan unit fungsional yang telah ditetapkan. Sedangkan aliran referensi merupakan sebuah ukuran dari *output* yang dihasilkan oleh proses dalam setiap alternatif sistem produk yang ditujukan untuk memenuhi unit fungsional yang sudah ditetapkan.



Gambar 2.9 Tahapan Utama dalam *Life Cycle Assesment* (Sumber: ISO 14040:2006)

2.6.1.2. Analisis Inventoris (*Inventory Analysis*)

Analisis Inventoris merupakan fase penilaian siklus hidup yang melibatkan kompilasi dan kuantifikasi *input* dan *output* untuk produk sepanjang siklus hidupnya didalam batasan (sistem produk) yang ditentukan dari tujuan penelitian. Analisis ini dilakukan dari input hingga output dari setiap tahapan proses mulai dari pengumpulan data (*data collection*), memperbaiki batasan sistem, perhitungan, validasi data dan keterkaitan data terhadap sistem (EEA, 1997).

1. Mengumpulkan data

Data yang dikumpulkan dapat diperoleh baik dari pengukuran, penghitungan atau perkiraan yang digunakan untuk menghitung input dan output sebuah proses unit. Data diklasifikasikan menjadi:

- a) Input energi, input material mentah, input pendukung dan input faktor fisik lainnya
- b) Produk, co-produk dan limbah
- c) Pelepasan ke udara, air dan tanah
- d) Aspek lingkungan lainnya

2. Memperbaiki batasan sistem

Batasan sistem didefinisikan sebagai bagian dari prosedur penetapan lingkup kajian. Setelah pengumpulan data awal dilakukan, perbaikan dalam batasan sistem dapat terjadi sebagai hasil dari penapisan tahapan daur hidup atau subsistem, penafpisan aliran material atau pemasukan unit proses yang baru berdasarkan analisis sensitivitas. Analisis sensitivitas dapat ini dapat menghasilkan :

- a) Penapisan tahapan daur hidup atau subsistem ketika signifikansinya kurang yang ditunjukkan oleh analisis sensitivitas.
- b) Penapisan aliran material dimana kurang signifikan pada hasil keluaran studi LCA.
- c) Pemasukan unit proses baru yang ditunjukkan signifikan dalam analisis sensitivitas.

3. Menghitung data

Beberapa langkah operasi diperlukan untuk menghitung data, yaitu:

- a) Validasi data; validasi data dapat melibatkan pembangunan neraca massa, neraca energi dan/atau analisis komparatif faktor-faktor lepas.
- b) Menghubungkan data ke proses unit dan unit fungsional; sebuah aliran yang sesuai ditentukan untuk masing-masing proses. Data input dan output kuantitatif proses unit dihitung menurut aliran ini.
- c) Menyaring batasan sistem; merefleksikan sifat berulang LCA, keputusan yang berkaitan dengan data yang akan digunakan didasarkan pada analisis sensitifitas untuk menentukan signifikansinya. Hasil dari proses penyaringan dan analisis sensitifitas ini didokumentasikan.

4. Alokasi

Langkah-langkah alokasi:

- a. Langkah 1: jika mungkin, alokasi harus dihindari dengan:
 - i. Membagi proses unit untuk dialokasikan menjadi dua atau lebih sub-proses, atau
 - ii. Mengembangkan sistem produk agar meliputi fungsi-fungsi tambahan yang berhubungan dengan co-produk.
- b. Langkah 2: jika alokasi tidak dapat dihindari, input dan output sistem harus dipisah antara produk-produk atau fungsi-fungsinya yang berbeda dalam cara yang merefleksikan hubungan fisik dasar antar produk atau fungsi tersebut; dengan kata lain alokasi tersebut harus merefleksikan cara input dan output berubah oleh perubahan kuantitatif dalam produk atau fungsi pada sistem.
- c. Langkah 3: dimana hubungan fisik saja tidak dapat dibentuk atau digunakan sebagai dasar alokasi, input harus dialokasikan diantara produk dan fungsi dalam cara yang merefleksikan hubungan lain. Sebagai contoh, data input dan output dapat dialokasikan di antara co-produk dalam proporsi nilai ekonomi produk. Beberapa output dapat berupa sebagian co-produk dan sebagian limbah. Dalam kasus ini,

adalah penting untuk mengidentifikasi rasio antara co-produk dan limbah karena input dan output akan dialokasikan hanya sebagai co-produk.

Bagaimanapun, dalam situasi ini elaborasi tambahan diperlukan untuk alasan-alasan berikut:

- a. *Reuse and recycling* (seperti pengkomposan, pembaruan energi dan proses lain yang dapat diasimilasikan sebagai *reuse/recycling*) dapat mengimplikasikan bahwa input dan output berhubungan dengan proses-proses unit, untuk mengekstrak dan mengolah bahan mentah dan pembuangan akhir produk, memungkinkan dibagi menjadi lebih dari satu sistem produk.
- b. *Reuse* dan *recycling* dapat mengubah sifat-sifat melekat suatu material dalam penggunaan selanjutnya.
- c. Perlakuan khusus harus dilakukan ketika mendefinisikan batasan sistem sehubungan dengan proses *recovery*.

2.6.1.3. Life Cycle Impact Assessment

Pada tahapan ini akan dilakukan pengelompokkan dan penilaian mengenai efek yang ditimbulkan terhadap lingkungan berdasarkan data-data yang diperoleh pada tahapan *life cycle inventory* (LCI). ISO mengembangkan standar untuk melakukan penilaian dampak berjudul ISO 14042, *Life Cycle Assessment* (LCA) ISO 1998, yang menyatakan bahwa ada tiga langkah dalam mengkategorikan dampak yaitu klasifikasi, karakterisasi, dan perhitungan. Akan tetapi untuk kesempurnaan evaluasi data, terdapat langkah-langkah opsional tergantung pada tujuan dan ruang lingkup penelitian.

1. Memilih Kategori Dampak

Langkah pertama dalam *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) adalah memilih kategori dampak yang akan dianggap sebagai bagian dari keseluruhan *Life Cycle Assessment* (LCA). Langkah ini harus diselesaikan

sebagai bagian dari tujuan awal dan fase definisi lingkup untuk memandu proses pengumpulan data *Life Cycle Inventory* (LCI) dan membutuhkan peninjauan kembali mengikuti tahap pengumpulan data. Item yang diidentifikasi dalam *Life Cycle Inventory* (LCI) memiliki kesehatan manusia yang potensial dan dampak lingkungan. Sebagai contoh, sebuah rilis lingkungan diidentifikasi dalam *Life Cycle Inventory* (LCI) dapat membahayakan kesehatan manusia dengan menyebabkan kanker atau kemandulan, atau mempengaruhi keselamatan kerja. Demikian juga, sebuah rilis yang diidentifikasi dalam *Life Cycle Inventory* (LCI) juga bisa mempengaruhi lingkungan dengan menyebabkan hujan asam, pemanasan global, atau spesies yang membahayakan hewan. Untuk *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) , dampak didefinisikan sebagai konsekuensi yang dapat disebabkan oleh input dan output aliran sistem pada kesehatan manusia, tanaman, dan hewan, atau masa depan ketersediaan sumber daya alam.

2. Klasifikasi

Tahap ini bertujuan untuk mengklasifikasikan *input* dan *output* yang telah didapatkan dari analisis inventori menjadi beberapa kategori dampak lingkungan. Untuk *Life Cycle Inventory* (LCI) item yang berkontribusi terhadap hanya satu kategori dampak, prosedur ini merupakan tugas yang sederhana. Sebagai contoh, emisi karbon dioksida dapat diklasifikasikan ke dalam kategori pemanasan global. Untuk *Life Cycle Inventory* (LCI) produk yang berkontribusi terhadap dua atau lebih kategori dampak yang berbeda, aturan harus ditetapkan untuk klasifikasi. Ada dua cara untuk menetapkan *Life Cycle Inventory* (LCI) hasil ke beberapa kategori dampak (ISO 1998):

- a) Partisi sebagian wakil dari hasil *Life Cycle Inventory* (LCI) ke kategori dampak dimana mereka berkontribusi. Hal ini biasanya diperbolehkan dalam kasus-kasus ketika efek tergantung pada satu sama lain.

- b) Tugaskan semua hasil *Life Cycle Inventory* (LCI) semua kategori dampak yang mereka berkontribusi. Hal ini biasanya diperbolehkan ketika efek yang terpisah satu sama lain.

3. Karakterisasi

Pada langkah analisis dampak ini, ditentukan potensi efek dari *input* dan *output* terhadap kategori dampak lingkungan. Setiap jumlah bahan dikonversi menjadi suatu angka yang menunjukkan seberapa besar potensinya untuk menyebabkan dampak tersebut. Karakterisasi menyediakan cara untuk langsung membandingkan hasil *Life Cycle Inventory* (LCI) dalam setiap kategori dampak. Dengan kata lain, faktor-faktor karakterisasi menerjemahkan input persediaan yang berbeda ke dalam indikator dampak langsung dibandingkan. Misalnya, karakterisasi akan memberikan perkiraan toksisitas terestrial relatif antara timbal, kromium, dan seng.

4. Normalisasi

Normalisasi adalah alat *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) yang digunakan untuk menyatakan data indikator dampak dengan cara yang dapat dibandingkan antara kategori dampak. Prosedur ini menormalkan hasil indikator dengan membagi dengan nilai referensi yang dipilih. Tujuan dan lingkup *Life Cycle Assessment* (LCA) dapat mempengaruhi pilihan dari nilai referensi yang sesuai. Perhatikan bahwa data dinormalisasi hanya dapat dibandingkan dalam kategori dampak. Misalnya, efek dari pengasaman tidak bisa langsung dibandingkan dengan toksisitas air karena faktor karakterisasi dihitung dengan menggunakan metode ilmiah yang berbeda.

5. Pengelompokan

Pengelompokan memberikan kategori dampak ke dalam satu atau lebih set untuk lebih memudahkan interpretasi hasil ke wilayah tertentu yang menjadi perhatian. Biasanya, pengelompokan melibatkan menyortir atau peringkat di indikator. Berikut adalah dua cara yang mungkin untuk kelompok *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) data (ISO, 1998):

- a) Urutkan berdasarkan indikator karakteristik seperti emisi (emisi misalnya, udara dan air) atau lokasi (misalnya, lokal, regional, atau global).
- b) Urutkan indikator berdasarkan sistem peringkat, seperti prioritas tinggi, rendah, atau menengah. Peringkat didasarkan pada pilihan nilai.

6. Pembobotan

Bobot langkah (juga disebut sebagai penilaian) dari *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) memberikan bobot atau nilai relatif terhadap kategori dampak yang berbeda berdasarkan kepentingan yang mereka pahami atau relevansi. Pembobotan ini penting karena kategori dampak juga harus mencerminkan tujuan belajar dan nilai-nilai *stakeholder*. Sebelumnya, emisi udara berbahaya seperti yang dinyatakan bisa menjadi perhatian relatif lebih tinggi di zona non-pencapaian udara dari tingkat emisi yang sama di daerah dengan kualitas udara yang lebih baik. Karena bobot bukanlah proses ilmiah, sangat penting bahwa metodologi pembobotan jelas. Meskipun pembobotan secara luas digunakan dalam *Life Cycle Assessment* (LCA), tahap pembobotan sedikit berkembang dari langkah-langkah penilaian dampak dan juga yang paling mungkin untuk ditantang dalam hal integritas. Selain itu, pertimbangan nilai dapat berubah dengan lokasi atau waktu dalam tahun. Isu kedua berasal dari yang pertama: bagaimana seharusnya pengguna adil dan konsisten membuat keputusan berdasarkan preferability lingkungan, mengingat sifat subjektif dari pembobotan benar-benar obyektif ditetapkan bobot atau metode pembobotan layak.

7. Evaluasi Hasil

Potensi dampak untuk setiap kategori dipilih telah dihitung, keakuratan hasilnya harus diverifikasi. Akurasi harus cukup untuk mendukung tujuan untuk melakukan *Life Cycle Assessment* (LCA) sebagaimana didefinisikan dalam tujuan dan ruang lingkup. Seperti semua alat penilaian lainnya, *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) memiliki keterbatasan. Meskipun proses *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) mengikuti prosedur yang

sistematis, ada banyak asumsi dan penyederhanaan, serta pilihan nilai subyektif tergantung pada metodologi *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) dipilih (SETAC, 2001).

Heijungs & Hofstetter (1996) mengungkapkan bahwa kajian dampak lingkungan merupakan proses kuantitatif dan/atau kualitatif dalam mengenali dan mengkaji dampak dari intervensi lingkungan yang dapat diidentifikasi dalam tabel inventarisasi. Sedangkan dalam ISO (1997), kerangka kerja kajian dampak daur hidup adalah sebagai berikut :

“Kerangka kerja kajian dampak daur hidup dan prosedurnya harus transparan, fleksibel dan praktis untuk jangkauan penerapannya. Cakupan yang berbeda dan intensitas dari analisis dimungkinkan untuk kajian daur hidup dengan aplikasi yang berbeda. Kajian dampak haruslah efektif baik secara biaya dan sumber daya

2.6.1.4. Interpretation

Dalam *Life Cycle Assessment*, praktisi dapat mencapai hasil yang berbeda tergantung pada ruang lingkup studi, batasan sistem dan prosedur alokasi yang diambil dalam *Life Cycle Inventory* (LCI) serta pilihan faktor-faktor karakterisasi di *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) yang kemudian pengaruh dari semua prosedur sebelumnya harus diinterpretasi. Pada tahap LCI hasil dari emisi dan konsumsi sumber daya biasanya dinyatakan dalam nilai numerik tunggal.

Tujuan dari interpretasi adalah untuk mereduksi jumlah data yang dikualifikasi atau pernyataan dalam hasil kunci analisis inventarisasi dan kajian dampak guna memfasilitasi proses pembuatan keputusan berdasarkan atas semua input dalam kajian LCA. Interpretasi daur hidup memiliki interaksi dengan tiga tahapan fase dalam kajian daur hidup. Jika hasil analisis inventarisasi atau kajian dampak ditemukan tidak memenuhi tujuan dan lingkup kajian, maka analisis inventarisasinya harus diperbaiki sebagai contoh merevisi batasan sistem, pengumpulan data lanjutan dan lain sebagainya yang diikuti dengan perbaikan kajian dampak.

Menurut Septia (2012), pada tahap interpretasi yang menjadi elemen utama adalah mengevaluasi hasil dan formulasi dari kesimpulan serta rekomendasi dari keseluruhan studi. Untuk melakukan tahapan interpretasi perlu melalui beberapa langkah, yaitu :

- a. Memastikan apakah asumsi, metode, model dan data telah sesuai dengan tujuan dan lingkup studi mengenai siklus hidup produk dan opsi lainnya.
- b. Memastikan semua informasi telah relevan dan data yang dibutuhkan untuk tahapan interpretasi sudah tersedia lengkap.
- c. Analisis kontribusi dimana terjadi perhitungan kontribusi keseluruhan pada hasil dari berbagai faktor. Analisis ini menjawab pertanyaan tentang kontribusi dari aliran lingkungan, proses, dan dampak yang spesifik terhadap nilai akhir.
- d. Analisis gangguan yang mempelajari efek dari perubahan kecil di dalam sistem dari hasil *Life Cycle Assessment* (LCA).
- e. Analisis sensitivitas dan ketidakpastian

2.6.2 Aplikasi Penggunaan *Life Cycle Assesment*

Penelitian ini menggunakan Software SimaPro 8.4.0.0 *Faculty Version* yang dikembangkan oleh *PRe Consultant*, yang menawarkan konsultasi global dan membantu dalam menilai, memperbaiki dan mengelola lingkungan kinerja produk dan jasa. Perangkat lunak memungkinkan pengguna untuk memodelkan dan menganalisa siklus kehidupan yang kompleks secara sistematis dan transparan. Adapun metode yang digunakan dalam penilaian dampak yang terdapat pada *software* SimaPro seperti ReCiPe, Eco-indicator 99, USEtox, IPCC 2007, EPD, Impact 2002+, CML-IA, Traci 2, BEES, Ecological Footprint EDIP 2003, Ecological scarcity 2006, EPS 2000, Greenhouse Gas Protocol dan lainnya (Broca, 2008). SimaPro menggunakan berbagai metode evaluasi yang akan mengklasifikasikan zat menurut efeknya terhadap dampak lingkungan seperti hujan asam dan ozon deplesi. Pada Tabel 2.7 ditunjukkan siklus dampak kategori penilaian kehidupan dan unsur terkait Sima Pro.

Tabel 2.7. Life Cycle Impact Assessment Categories dalam SimaPro

Impact Category	Indicator	Description	Unit	Reference
Energi Use	Primary Energy Demand (PED)	Sebuah ukuran dari total jumlah energi primer diekstrak dari bumi, termasuk minyak bumi, tenaga air dan sumber lainnya, dengan memperhitungkan efisiensi listrik dan proses pemanasan	MJ	<i>An operational guide to the ISO-standards</i> (Guinée et al.) Centre of Environmental Science Leiden : Leiden University, 2001
Climate Change	Global Warming Potential (GWP)	Sebuah ukuran dari emisi gas rumah kaca, seperti CO ₂ dan metana. Emisi ini menyebabkan peningkatan penyerapan radiasi yang dipancarkan oleh bumi, pembesar efek rumah kaca alami	Kg CO2 equivalent	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2001: The Scientific Basis.</i> Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
Abiotic Depletion	Abiotic Depletion Potential (ADP)	Sebuah ukuran penipisan sumber daya abiotik direferensikan antimony	kg antimony equivalent	<i>An operational guide to the ISO-standards</i> (Guinée et al.) Centre of Environmental Science Leiden : Leiden University, 2001
Smog	Photo chemical Oxidant Potential	Sebuah ukuran emisi prekursor yang berkontribusi untuk rendahnya tingkat asap dihasilkan oleh reaksi nitrogen oksida dan VOC di bawah pengaruh sinar UV.	Ethylene equivalent	<i>An operational guide to the ISO-standards</i> (Guinée et al.) Centre of Environmental Science Leiden : Leiden University, 2001
Acidification	Acidification Potential	Sebuah ukuran emisi yang menyebabkan pengasaman efek ke lingkungan. Itu potensi pengasaman diberikan dengan mengaitkan ada S-, N-, dan atom halogen dengan berat molekul.	g SO2 equivalent	<i>An operational guide to the ISO-standards</i> (Guinée et al.) Centre of Environmental Science Leiden : Leiden University, 2001

Eutrophication	Eutrophication Potential	Sebuah ukuran emisi yang menyebabkan efek eutrofikasi ke lingkungan. Eutrophication ini mengidentifikasi potensi persamaan derajatnya antara N dan P untuk air darat dan air sistem	Kg PO equivalent	<i>An operational guide to the ISO-standards (Guinée et al.) Centre of Environmental Science Leiden : Leiden University, 2001</i>
Toxicity	Human Toxicity Potential (HTP) Eco-toxicity Potential (ETP)	Sebuah ukuran potensi racun bahan yang didasarkan pada kondisi kimia, kondisi emisi sebenarnya. Ambang toksikologi nilai-nilai yang digunakan, yaitu berdasarkan paparan yang berkesinambungan. Toksisitas dibagi menjadi beberapa jenis: toksisitas kanker, non toksisitas kanker, kesehatan manusia dari kriteria polusi, dan ekotoksisitas	kg1,4 DCB equivalent	<i>An operational guide to the ISO-standards (Guinée et al.) Centre of Environmental Science Leiden : Leiden University, 2001</i>
Solid Waste	Waste	Sebuah ukuran sampah diproduksi sebagai hasil dari manufaktur dan penggunaan. Sumber termasuk sumber daya limbah ekstraksi limbah produksi dan akhir penggunaan limbah bukan dibakar	kg waste	

Sumber : Pujadi (2013)