

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Dampak Sampah Terhadap Pemanasan Global dan Masa Layan TPA

Peningkatan populasi penduduk di wilayah perkotaan mengakibatkan volume sampah yang dihasilkan oleh aktifitas manusia juga terus meningkat. Selain itu perubahan pola konsumsi yang mempengaruhi karakteristik sampah dan timbulan sampah (Visvanathan *et al.*, 2005). Akibatnya pengelolaan sampah di sebagian besar kota-kota di negara berkembang pada umumnya dihadapkan pada permasalahan yang sejenis. Permasalahan tersebut menurut Zurbrugg (2003) adalah: 1) terbatasnya wilayah layanan dan peralatan operasional yang tidak efisien, 2) sedikitnya aktifitas daur ulang, 3) keterbatasan tempat pembuangan akhir, dan 4) pemrosesan sampah yang tidak memadai. Terkait dengan permasalahan sampah di negara berkembang Asia, Visvanathan *et al.* (2005) menyebutkan bahwa timbulnya berbagai masalah lingkungan akibat sampah dikarenakan pengelolaan dan pembuangan sampah yang tidak memadai.

Karena volume sampah yang terus meningkat tersebut, pengelolaan sampah di negara berkembang biasanya tidak sesuai dengan aspek pembangunan berkelanjutan khususnya pada aspek lingkungan. Pencemaran akibat sampah terhadap lingkungan akan terus timbul, baik dalam lingkup lokal seperti pencemaran air dan tanah oleh lindi maupun lingkup global berupa emisi gas

rumah kaca (GRK) atau jejak karbon dari timbunan sampah. Gas metana (CH_4) dan gas karbon dioksida (CO_2) merupakan emisi yang dihasilkan timbunan sampah seiring dengan dekomposisi sampah organik pada timbunan sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) pada kondisi anaerob (Themelis *et al*, 2006). Kedua emisi GRK dari timbunan sampah tersebut menyebabkan kenaikan konsentrasi GRK di atmosfer sehingga memicu terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim. Apalagi gas metana mempunyai potensi pemanasan global atau *global warming potential* (GWP) sebesar 20 hingga 30 kali lebih besar daripada gas karbondioksida. Sektor persampahan, berdasarkan data World Resources Institute (Bracmort K *et al*, 2009), memberikan kontribusi sebesar 20,4% atau sebesar 1.307,2 MtCO₂e dari gas metana keseluruhan sebesar 6.407,5 MtCO₂e, ketiga terbesar setelah sektor pertanian (51,4%) dan distribusi bahan bakar fosil (24,2%). Konsentrasi gas metana di atmosfer telah mengalami peningkatan yang signifikan dari 715 ppbv di masa pra industri hingga 1774 ppbv pada tahun 2005 (Boucher, 2009). Kesemua jenis GRK akan menaikkan temperatur sebesar 1,5 °C sampai dengan 4,5 °C dalam kurun waktu 40 tahun (Cunningham, 1997). Sesuai dengan laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), permukaan bumi telah mengalami kenaikan suhu sekitar 0,6°C selama abad ke-20 (IPCC, 2001).

Di Indonesia, pengelolaan sampah di berbagai kota juga menghadapi permasalahan yang bermacam. Permasalahan tersebut misalnya adalah kekurangan biaya operasional pengelolaan dan keterbatasan lahan pembuangan seperti yang terjadi di Bandung (Pirngadi *et.al*, 2012), besarnya volume sampah dan

keterbatasan lahan TPA Bantar Gebang seperti yang terjadi di Jakarta (Aprilia, 2012), dan pencemaran terhadap tanah dan air akibat lindi seperti yang terjadi di TPA Benowo Surabaya (Prayogo, 2008). Kelemahan utama permasalahan pengelolaan sampah adalah pengetahuan pengelolaan sampah yang semestinya tidak diterapkan secara konsisten (Mangkoedihardjo *et al*, 2007). Studi sebelumnya dilakukan oleh Meidiana *et al*. (2010) yang meninjau praktek pengelolaan sampah di Indonesia dan usulan penyelesaian masalahnya. Meidiana *et al*. (2010) menyatakan bahwa walaupun Indonesia sudah memiliki UU. No. 18/2008 tentang Pengelolaan Sampah, namun undang-undang tersebut tidak segera diimplementasikan sehingga praktek pengelolaan sampah di sebagian besar kota-kota di Indonesia masih saja bertumpu pada pembuangan akhir. Akibatnya timbul berbagai masalah akibat pembuangan sampah di TPA seperti terbatasnya usia pakai TPA dan dampak terhadap lingkungan. Pada umumnya sampah ditimbun secara terbuka (*open dumping*), tidak mengikuti kaidah *sanitary landfill* seperti tidak adanya lapisan penutup timbunan sampah, tidak adanya sistem pengumpulan dan pemrosesan gas sehingga mencemari atmosfer, dan tidak adanya sistem pengumpulan dan pemrosesan lindi sehingga mencemari tanah dan air permukaan. Adapun kontribusi gas metana dari sektor persampahan dari 400 TPA di Indonesia adalah 109,96 Gg per tahun atau setara dengan 2,31 MtCO₂e (Purwanta, 2009). Sedangkan kontribusi emisi GRK pengelolaan sampah di Kota Jakarta adalah 0,692 MtCO₂e (Aprilia *et al.*, 2013).

Selain mencemari atmosfer dari emisi GRK, pengelolaan sampah yang bertumpu pada elemen pembuangan akhir atau pengelolaan sampah dengan cara

end-of-pipe, juga menyebabkan terbatasnya usia pakai atau masa layan TPA karena hampir semua sampah terus menerus ditimbun di TPA. Berdasarkan data statistik persampahan (KNLH, 2008), sebanyak 60% TPA di Indonesia hanya memiliki masa layan hingga tahun 2015. Ketika suatu kota akan menentukan lokasi TPA yang baru, permasalahan teknis dan non teknis biasanya selalu muncul. Permasalahan teknis biasanya terkait luas lahan yang harus cukup untuk menampung volume sampah yang terus meningkat hingga periode waktu tertentu. Sedangkan aspek non teknis biasanya terkait dengan penolakan masyarakat karena di wilayahnya tidak menghendaki dibangun TPA. Karena pemrosesan akhir yang tidak baik, masyarakat yang tinggal di sekitar TPA akan terganggu kenyamanan dan kesehatannya sehingga beberapa TPA di Indonesia diprotes keberadaannya oleh warga sekitar dan demikian halnya dengan relokasi TPA ke lokasi yang baru (Hadi, 2004).

B. Pengolahan Sampah Untuk Mengendalikan Pencemaran

Untuk menuju pengelolaan sampah yang berkelanjutan maka perlu dikembangkan sistem pengelolaan sampah yang sesuai pertumbuhan volume sampah yang ditimbulkan, ketersediaan sumberdaya, dan kondisi lingkungan di wilayah sosial tertentu (Hwa, 2007). Idris *et al.* (2004) mengelompokkan permasalahan pengelolaan sampah menjadi tiga kategori. Kategori pertama adalah faktor eksternal seperti pesatnya pertumbuhan populasi dan urbanisasi. Kategori ini adalah diluar kemampuan pengelola sampah untuk memecahkannya. Kategori kedua adalah faktor eksternal dan internal dimana pengelola sampah

harus bekerja sama dengan pihak lain untuk untuk menanganinya. Yang termasuk kategori ini antara lain adalah edukasi, koordinasi, pendanaan, dan evaluasi. Kategori ketiga adalah faktor internal dimana pengelola sampah mempunyai kapasitas untuk menanganinya. Yang termasuk kategori ini antara lain adalah struktur kelembagaan pengelola, perencanaan pengelolaan, pengawasan, pengumpulan, dan pembuangan.

Untuk mengatasi permasalahan sampah di Indonesia, Meidiana *et al.* (2010) mengusulkan perbaikan dengan memperhatikan berbagai potensi pengelolaan sampah di Indonesia. Potensi tersebut adalah bahwa: 1) sesuai UU. No. 18/2008 tentang Pengelolaan Sampah, pemerintah daerah mempunyai peran yang besar dalam pengelolaan sampah; 2) pelibatan masyarakat dalam pengelolaan sampah khususnya dalam praktek pemilahan; 3) skema insentif dan disinsentif untuk mendorong penegakan hukum; 4) perlu kebijakan daur ulang sampah dapat menurunkan volume sampah, meningkatkan pemulihan material, dan meningkatkan pendapatan; 5) sampah dengan kadar organik yang tinggi sangat potensial untuk diproses menjadi kompos; dan 6) komposisi plastik yang tinggi bisa menjadi material daur ulang yang berharga atau bahan bakar insinerator.

Strategi pengelolaan sampah yang diterapkan segaiknya mengacu pada prinsip hirarki pengelolaan sampah yang terbaik (Cheremisinoff, 2003 dan Themelis, 2008) atau pengelolaan sampah terpadu yang diperkenalkan oleh Hickam (1999) dan dikembangkan oleh McDougall *et al.* (2001) dan oleh Tchobanoglous *et al.* (2002). Untuk pengolahan, USEPA (2006) menyediakan

panduan mitigasi jejak karbon dan biaya yang diperlukan terkait dengan beberapa pilihan teknologi pengolahan sampah sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Reduksi emisi tersebut adalah reduksi emisi secara langsung. Secara tidak langsung reduksi emisi juga bisa berasal dari penggunaan material daur ulang yang akan mengurangi eksploitasi bahan mentah atau pemakaian gas metana untuk pembangkit listrik yang akan mengurangi penggunaan sumber energi fosil. Potensi reduksi emisi GRK pada berbagai macam pilihan teknologi pengelolaan sampah bisa dihitung dengan pendekatan penilaian daur hidup sesuai dengan jenis pengolahan sampah yang dipilih (McDougall *et al.*, 2001).

Tabel 2. Beberapa pilihan teknologi reduksi emisi GRK dari timbunan sampah

Teknologi	Biaya (US\$/ton CO₂-eq)	Reduksi Emisi (ton CO₂-eq)
Penangkapan gas metana untuk mesin pemanas	-17	0,36
Penangkapan dan pembakaran gas metana	8	0,39
Penangkapan gas metana untuk pembangkit listrik	73	0,39
Digesi anaerob	36	0,16
Pemilahan dan pengomposan	254	0,51
Perawatan mekanis dan biologis	363	0,16

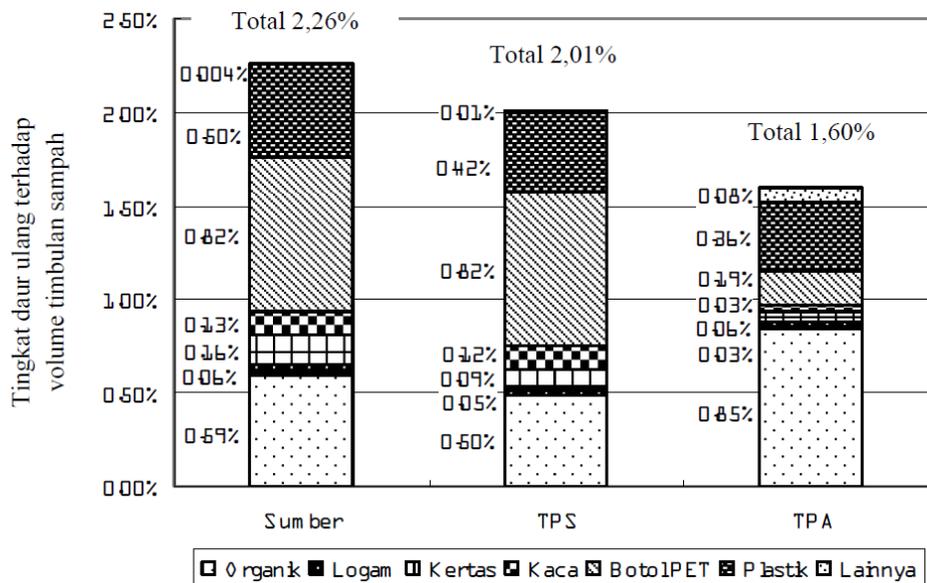
Sumber: USEPA (2006)

Berdasarkan isu-isu pengelolaan sampah di negara berkembang pada umumnya dan di Indonesia pada khususnya tersebut, maka pengelolaan sampah terpadu yang berbasiskan pengolahan sampah dengan cara daur ulang diharapkan bisa memecahkan masalah pengelolaan sampah selama ini sebagaimana direkomendasikan oleh Zurbrugg (2003), Visvanathan *et al.* (2005),

Mangkoedihardjo *et al.* (2007), dan Meidiana *et al.* (2010). Berdasarkan kategori permasalahan sampah menurut Idris (2004), pengolahan sampah termasuk faktor internal dimana pengelola sampah mempunyai kewenangan untuk menanganinya.

Terkait dengan pengolahan sampah, selama ini praktek daur ulang sampah di sebagian besar negara di Asia, khususnya di negara dengan pendapatan rendah dan menengah, umumnya dilakukan oleh sektor informal yang biasanya dilakukan oleh pemulung. Sebagian kecil lainnya dilakukan oleh warga secara individu, oleh petugas pengumpulan sampah sebagai tambahan pendapatan, dan oleh kelompok masyarakat yang sebagian didukung oleh Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) (Visvanathan *et al.*, 2010). Material yang dapat dipergunakan kembali dan didaur ulang tersebut disetorkan oleh sektor informal tersebut kepada pengepul untuk kemudian dijual ke industri. Di sebagian kecil negara Asia, praktek daur ulang juga dilakukan oleh sektor informal seperti di India, Pakistan, dan Sri Lanka. Sektor informal tersebut memungut material yang bisa didaur ulang di tiga tempat, yaitu di sumber, di tempat pengumpulan (TPS), dan di pembuangan (TPA). Praktek daur ulang yang lebih banyak dilakukan oleh sektor informal tersebut menyulitkan untuk mendapatkan data daur ulang sampah di Asia. Visvanathan *et al.* (2007) menyebutkan bahwa sebesar 20% hingga 30% dari volume sampah yang dihasilkan oleh negara di kawasan Asia dan Pasifik didaur ulang oleh sektor informal. Di Bangladesh misalnya, volume sampah yang didaur ulang adalah sebesar 4% - 15% dari volume sampah total.

Di Indonesia, pengolahan sampah dengan cara daur ulang juga dilakukan dengan kondisi yang hampir sama dengan cara yang dilakukan oleh semua negara Asia, yaitu dilakukan oleh sektor informal. Dalam jumlah yang kecil, praktek daur ulang dilakukan oleh masyarakat secara individu atau secara berkelompok yang sebagian di antaranya didukung oleh LSM. Contoh praktek daur ulang yang dilakukan oleh kelompok masyarakat adalah daur ulang di Kampung Banjarsari Jakarta Selatan, di Perumahan Tiga Raksa Mustika Tangerang yang didukung LSM BEST, di Perumahan Bukit Kencana Jaya Semarang yang didukung LSM Bintari, di Kampung Rungkut Lor III Surabaya yang didukung Pusdakota Universitas Surabaya, di Kampung Sukunan Sleman Yogyakarta, dan di Perumnas Monang-Maning Tegal Kartha Denpasar Barat. Di Kota Malang, Pemerintah Kota Malang juga telah melakukan inisiasi dengan membentuk Bank Sampah Malang yang perkembangan jumlah nasabahnya terus meningkat dari tahun ke tahun. Praktek daur ulang di berbagai tempat tersebut mampu mengurangi volume sampah di kawasan yang bersangkutan hingga lebih dari 50% (Amrizal, 2010). Walaupun demikian secara keseluruhan persentase sampah yang didaur ulang masih sangat kecil apabila dibandingkan dengan volume sampah total yang dihasilkan. Berdasarkan data Statistik Persampahan Tahun 2008 (KNLH, 2008), persentase sampah yang didaur ulang adalah sebesar 2,26% di sumber asalnya, 2,01% di TPS, dan 1,60% di TPA (Gambar 1).



Gambar 1. Proporsi sampah yang didaur ulang di sumber asalnya, di TPS, dan di TPA (KNLH, 2008)

C. Pengelolaan Sampah Dengan Pendekatan Penilaian Daur Hidup dan Sistem Dinamik

Penelitian tentang pengelolaan sampah yang berkelanjutan dengan pendekatan daur hidup telah dikaji oleh beberapa peneliti terdahulu tetapi dengan lokasi, karakteristik sampah, dan penekanan yang berbeda. Penelitian yang terkini dengan metode penilaian daur hidup atau *life cycle assessment* (LCA) dilakukan oleh Gunamantha (2010) yang membandingkan potensi dampak lingkungan pengelolaan sampah pada saat ini dengan skema alternatif berbasis konversi energi dengan mempertimbangkan aspek lingkungan dan ekonomi di Yogyakarta – Sleman – Bantul (KARTAMANTUL) dan Denpasar – Badung – Gianyar – Tabanan (SARBAGITA). Pendekatan daur hidup juga telah digunakan untuk menghitung biaya pengelolaan sampah (Purwanto, 2009), menghitung

jejak karbon (Dadd, 2007), dan membandingkan dampak lingkungan berbagai skenario pengelolaan sampah oleh beberapa peneliti sebelumnya seperti Beccali (2001), Weitz (2002), dan Kirkeby (2005). Sedangkan sistem dinamik dipergunakan untuk memprediksi emisi GRK (Horng *et al.*, 2004 dan Talyan *et al.*, 2007), merencanakan pengelolaan sampah dari sisi finansial (Kum *et al.*, 2004), memprediksi timbulan sampah dan energi (Sufian dan Bala, 2006), dan menghitung beban penumpukan sampah di TPA (Surjandari *et al.*, 2009). Talyan *et al.* (2007) telah meneliti emisi karbon penimbunan sampah di TPA secara langsung.

Gunamantha (2010), dengan metode LCA, membandingkan potensi dampak lingkungan pengelolaan sampah pada saat ini dengan skema alternatif berbasis konversi energi dengan mempertimbangkan aspek lingkungan dan ekonomi di Yogyakarta – Sleman – Bantul (KARTAMANTUL) dan Denpasar – Badung – Gianyar – Tabanan (SARBAGITA). Skenario-skenario yang diusulkan adalah penimbunan akhir tanpa pemungutan energi (skenario dasar atau skenario_0) sebagai representasi sistem pengelolaan sampah saat ini, penimbunan akhir dengan pemungutan energi (skenario_1), kombinasi antara insinerasi dengan *anaerobic digestion* (skenario_2), kombinasi antara gasifikasi dengan *anaerobic digestion* (skenario_3), insinerasi langsung (skenario_4), dan gasifikasi langsung (skenario_5). Adapun aplikasinya untuk aliran sampah yang dikelola di wilayah SARBAGITA dan KARTAMANTUL menunjukkan bahwa dari sudut pandang indikator kategori dampak lingkungan, skenario 5 menunjukkan pilihan yang terbaik baik untuk aliran sampah SARBAGITA maupun KARTAMANTUL.

Adapun dari sudut pandang ekonomi, pilihan terbaik ditunjukkan oleh skenario 1. Pilihan terbaik dari sudut pandang sosial ekonomi dan lingkungan ditunjukkan oleh skenario 4 untuk aliran sampah SARBAGITA dan skenario 5 untuk aliran sampah KARTAMANTUL.

Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Purwanto (2009) yang mengambil obyek pengelolaan sampah di Kota Bogor. Tujuannya adalah untuk mengetahui model pengelolaan sampah yang memiliki dampak yang lebih kecil kaitannya dengan penggunaan energi yang diperlukan untuk pengelolaan sampah. Dengan metode LCA, Purwanto (2009) membandingkan 4 skenario pengelolaan sampah di Kota Bogor yang merupakan kombinasi dari elemen sampah, yaitu pengumpulan (*collection, C*), pengangkutan (*transport, T*) – pembuangan (*landfilling, L*) dan pengomposan (*compost, C*). Keempat skenario tersebut adalah CTL dan CC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario CC merupakan pilihan yang lebih baik daripada CTL. Skenario CC menghasilkan pemasukkan dari penjualan kompos sebesar Rp. 3.600.000,- dan subsidi sebesar Rp. 3.520.000,-. Sedangkan skenario CTL memerlukan biaya Rp. 8.360.000 s/d Rp. 20.200.000,- tergantung lokasi TPS-nya.

Dadd (2007) juga melakukan penelitian dengan metode LCA untuk menghitung jejak karbon di fasilitas daur ulang material atau *material recycling facility* (MRF) di Kota Costessey, Norwegia. Adanya fasilitas daur ulang tersebut dapat mengurangi emisi CO₂ sebesar 50.365.194 kg sebagai hasil pengurangan emisi hasil daur ulang material sebesar 37.697.359 kg ditambah pengurangan

emisi dari TPA sebesar 12.667.835 kg. Adanya MRF tersebut akan mengurangi sampah yang dibuang ke TPA tersebut sebesar 54.466 ton.

Ketiga peneliti sebelumnya tersebut di atas, masing-masing merekomendasikan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut. Gunamantha (2010) merekomendasikan bahwa metodologi LCA sebaiknya dipergunakan untuk mengkonstruksi seperangkat data lingkungan dan dapat dipadukan dengan penilaian ekonomi untuk menunjang pembuatan keputusan strategi pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Purwanto (2009) merekomendasikan agar pengelolaan sampah dikaitkan dengan aspek lingkungan dan aspek sosial untuk mendapatkan hasil yang lebih mendalam. Dadd (2007) merekomendasikan agar dilakukan pengembangan model LCA yang sederhana yang bisa digunakan secara umum untuk dijadikan alat bantu pengambilan keputusan pada skenario pengelolaan sampah.

Beberapa model LCA untuk pengelolaan sampah juga telah dikembangkan seperti Model IWM (McDougal *et al.*, 2001), LCA-IWM (Boer *et al.*, 2007), ORWARE (Eriksson *et al.*, 2002), EASEWASTE (Kirkeby, 2005), dan SWM-GHG Calculator (Ifeu, 2009). Model-model tersebut umumnya kurang fleksibel karena menggunakan *software* yang khusus dan keterbatasan dalam memodifikasi parameter-parameter model (Gunamantha, 2010). Di samping itu kesemua model tersebut tidak ditujukan untuk memprediksi dampak berbagai pilihan skenario pengelolaan sampah di masa yang akan datang akibat pertumbuhan sampah. Model yang dikembangkan dalam penelitian ini secara konseptual mengacu pada SWM-GHG Calculator dengan mengfokuskan pada

dampak emisi karbon berdasarkan skema pengolahan sampah dengan cara pemungutan material, daur ulang, pengomposan, dan penimbunan di TPA. Pengembangan yang lain adalah terkait dengan prediksi emisi karbon di masa yang akan datang karena pertumbuhan jumlah sampah.

D. Landasan Teori

1. Pengertian Sampah

Tchobanoglous, *et al.* (1993) mendefinisikan sampah sebagai semua jenis limbah berbentuk padat yang berasal dari kegiatan manusia dan hewan, dan dibuang karena tidak bermanfaat atau tidak diinginkan lagi kehadirannya. Sedangkan dalam PP No. 18/1999 *jo* PP No. 85/1999 tentang pengelolaan limbah berbahaya dan beracun, secara umum limbah didefinisikan sebagai bahan sisa pada suatu kegiatan dan/atau proses produksi. Dalam Standar Nasional Indonesia (SNI), sampah didefinisikan sebagai limbah yang bersifat padat terdiri dari bahan organik dan bahan anorganik yang dianggap tidak berguna lagi dan harus dikelola agar tidak membahayakan lingkungan dan melindungi investasi pembangunan (SNI 19-2454-2002). Sedangkan Damanhuri, *et al.* (2010) mendefinisikan sampah sebagai semua buangan yang dihasilkan oleh aktivitas manusia dan hewan yang berbentuk padat, lumpur (*sludge*), cair maupun gas yang dibuang karena tidak dibutuhkan atau tidak diinginkan lagi.

Pada akhirnya definisi sampah mengalami perkembangan karena aspek pembuangan tidak disebutkan secara jelas sehingga seolah-olah semua bahan buangan adalah bahan yang tidak dibutuhkan lagi. Pada masa sekarang ada

kecenderungan untuk tidak membuang sampah begitu saja, melainkan sedapat mungkin melakukan aktifitas pemungutan kembali terhadap sampah yang bisa dimanfaatkan dan/atau aktifitas daur ulang sebagai bahan baku produk material yang baru. Walaupun dianggap sudah tidak berguna dan tidak dikehendaki, namun bahan tersebut kadang-kadang masih dapat dimanfaatkan kembali atau didaur ulang untuk dijadikan bahan baku. Dalam UU No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, sampah didefinisikan secara lebih sederhana sebagai sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat.

2. Sumber, Komposisi, Karakteristik, dan Timbulan Sampah

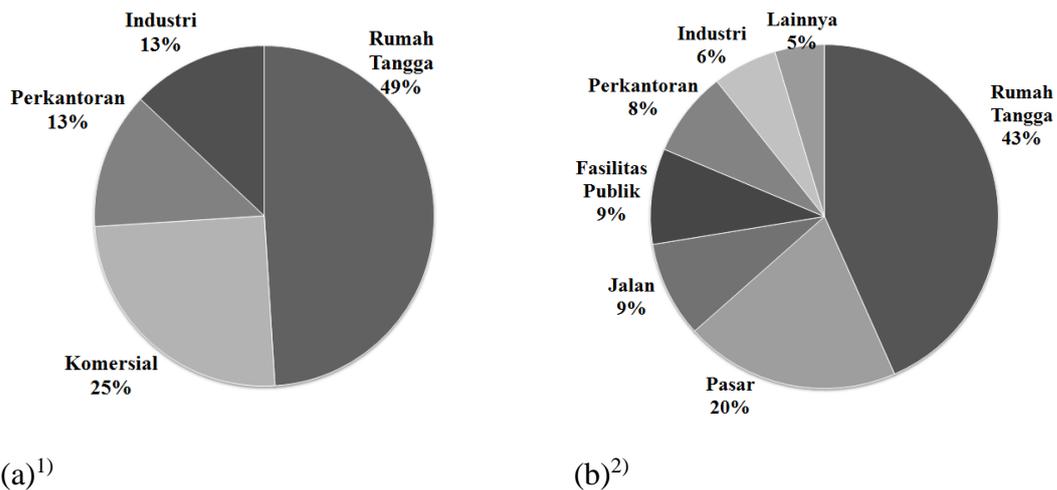
Pembahasan tentang sampah tidak terlepas dari pembahasan tentang sumber, komposisi, dan karakteristik sampah. Perencanaan pengelolaan sampah yang baik perlu memahami komposisi sampah pada saat ini, dan perkembangan karakteristik sampah (Tchobanoglous *et al.*, 2002). Sampah bisa berasal dari berbagai sumber, yaitu: 1) kawasan permukiman (perumahan, rumah susun, apartemen), 2) kawasan komersial (perkantoran, pertokoan, pergudangan, hotel, dan restoran), 3) kawasan perkantoran (sekolah, kantor, rumah sakit, dan penjara), dan 4) kawasan industri (komponen pengepakan, sampah kantor dan gudang, tidak termasuk sampah hasil proses industri) (Tchobanoglous *et al.*, 2002).

Di Indonesia, sumber sampah seperti telah dijelaskan dalam UU No 18 Tahun 2008, dikategorikan sebagai sampah rumah tangga, sampah sejenis rumah tangga, dan sampah spesifik. Sampah rumah tangga bersumber dari aktifitas

rumah/dapur serta aktifitas rumah tangga lainnya. Jenis atau tipe sampah yang dihasilkan terutama berupa sampah basah dan sampah kering dan debu. Sampah sejenis sampah rumah tangga bersumber dari pasar, pertokoan, restoran, perusahaan dan sebagainya. Sebagian besar kategori sampah ini berasal dari pasar dan kebanyakan berupa sampah organik. Kategori sampah spesifik dikelola secara terpisah dengan jenis sampah yang lain karena mempunyai sifat spesifik yang harus ditangani secara khusus. Berdasarkan klasifikasi sumber-sumber sampah tersebut, dapat dikembangkan lagi jenis sumber-sumber sampah yang lainnya sesuai dengan sumber sampah seperti sampah pertanian, kandang hewan/pemotongan hewan, instalasi pengolahan air bersih, instalasi pengolahan air limbah dan lain-lain. Kategori lainnya yang digunakan di Indonesia adalah penggolongan sampah sebagai sampah organik dan sampah anorganik (BSN, 2008). Sampah organik atau sampah basah merupakan sampah yang mudah membusuk terdiri dari bekas makanan, bekas sayuran, kulit buah lunak, daun-daunan dan rumput. Sedangkan sampah anorganik atau sampah kering yang terdiri atas kertas, kardus, kaca/gelas, plastik, besi dan logam lainnya.

Komposisi sampah berdasarkan sumbernya di negara maju dan di Indonesia disajikan pada Gambar 2. Baik di negara maju maupun di Indonesia, sebagian besar sampah berasal dari rumah tangga dan kawasan komersial. Jika komposisi sampah ditinjau berdasarkan jenisnya, karakteristik sampah di negara maju dan di negara berkembang termasuk Indonesia menunjukkan perbedaan (Gambar 3). Kandungan organik sampah di negara berkembang adalah sebesar 52,7%, lebih besar daripada kandungan organik sampah di negara maju sebesar

23%. Persentase organik sampah di Indonesia sedikit lebih besar dari kandungan organik rata-rata di negara berkembang yaitu sebesar 58%. Kondisi sebaliknya terjadi pada kandungan kertas, gelas, dan logam dimana ketiga material tersebut memiliki kandungan jauh lebih besar daripada kandungan material di negara berkembang termasuk di Indonesia.

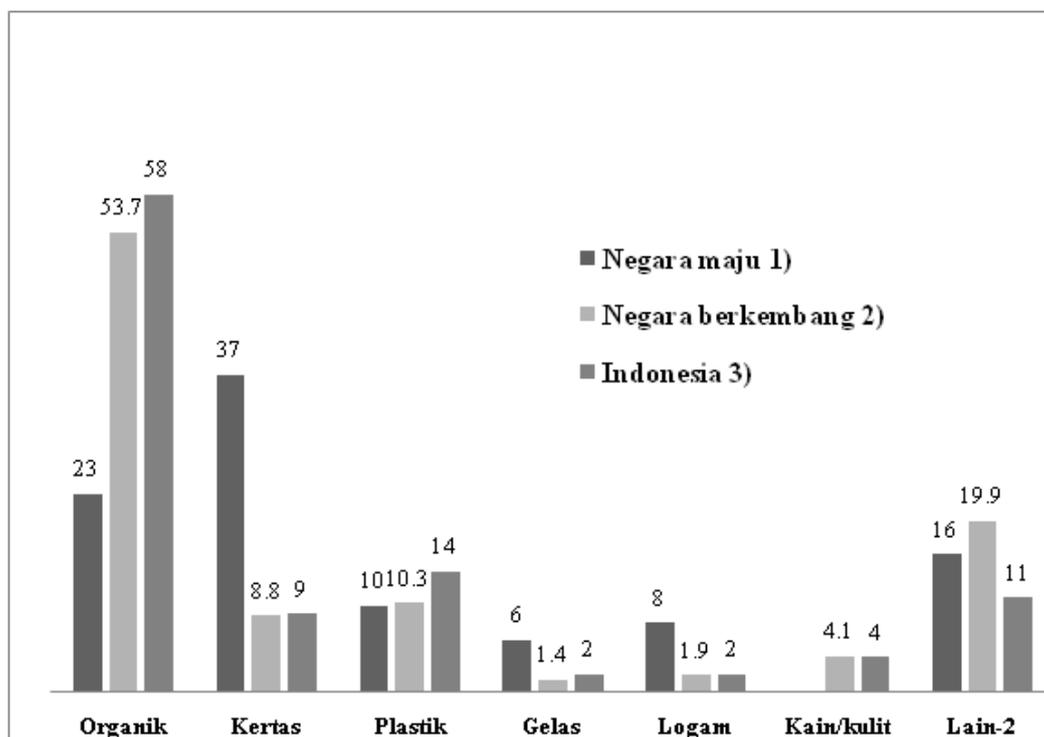


1) Hickman (1999) dalam Penjor (2007); Meidiana & Thomas (2010)

Gambar 2. Komposisi sampah berdasarkan sumbernya di negara maju (a) dan di Indonesia (b)

Selain karakteristik sampah, perencanaan sistem pengelolaan sampah perlu mempertimbangkan pertumbuhan volume sampah. Volume sampah terus mengalami peningkatan di berbagai negara, baik di negara maju maupun di negara berkembang. Pertumbuhan volume sampah ini terutama dikarenakan oleh faktor demografi yang terdiri atas perubahan populasi dan perubahan laju timbulan sampah per kapita (Cheremisinoff, 2003). Pertumbuhan populasi yang dipengaruhi oleh tingkat kelahiran, tingkat kematian, atau migrasi penduduk, mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap volume sampah. Di negara Asia,

volume sampah pada tahun 2000 mencapai lebih dari 3 bilion ton dan diperkirakan akan meningkat hingga tiga kali lipat pada tahun 2050. UNEP (2005) juga menghitung bahwa sampah di kawasan Asia Tenggara mengalami peningkatan sebesar 3% hingga 7% setiap tahunnya (Ray, 2008). Secara keseluruhan, prediksi volume sampah di dunia disajikan pada Gambar 3 (Visvanathan *et al*, 2007).

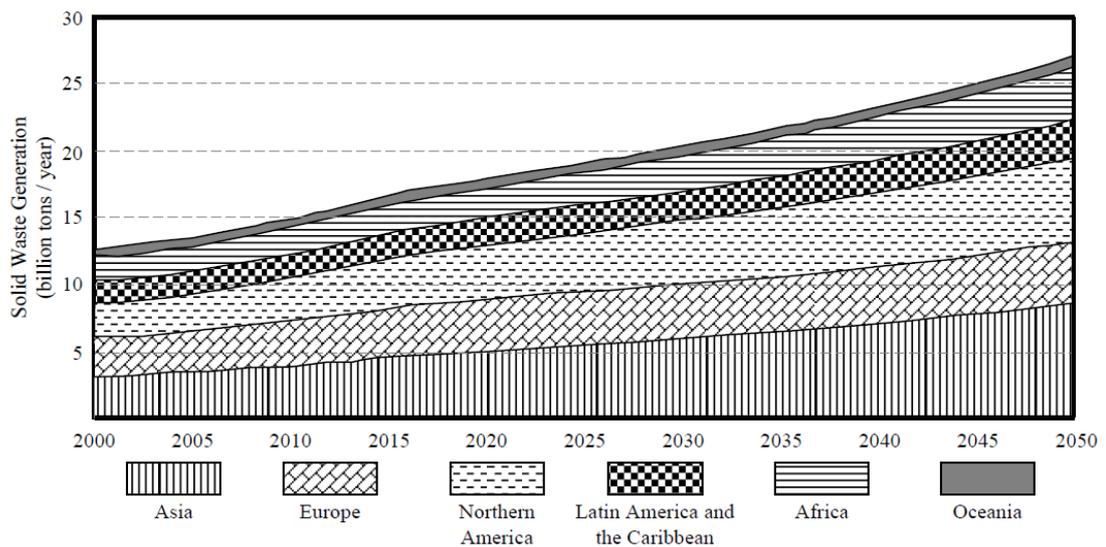


1) Negara maju Amerika Serikat (Tcobanoglous *et al.*, 2002); 2) Rata-rata di 8 kota asia: Dhaka, Khatmandu, Bangkok, Hanoi, Manila, India, Karachi, dan Jakarta (Zurbrugg, 2002 dan KNLH, 2008); 3) KNLH (2008)

Gambar 3. Komposisi sampah berdasarkan jenisnya di negara maju, di negara berkembang Asia, dan di Indonesia

Laju timbulan sampah per kapita dipengaruhi oleh setidaknya tiga faktor, yaitu status sosial ekonomi, tingkat urbanisasi, dan ukuran rumah tangga.

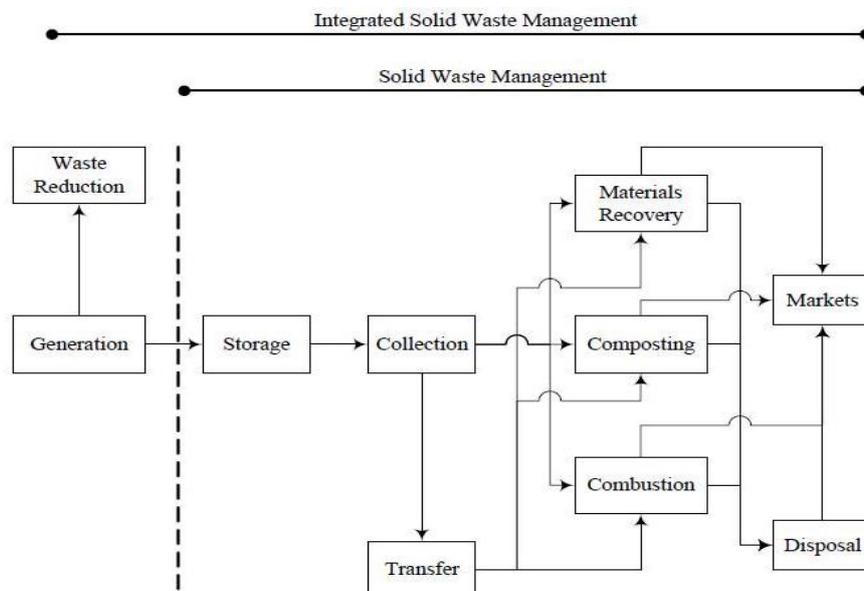
Umumnya, negara maju dengan pendapatan yang tinggi menghasilkan sampah per kapita yang lebih besar daripada negara berkembang dengan pendapatan yang lebih kecil. Di Jepang, sejak tahun 1980-an, laju timbulan sampah mendekati 1,4 kg/orang/hari. Sedangkan di negara berkembang, laju timbulan sampah berkisar 0,5 hingga 1,0 kg/orang/hari (Terazono *et al.*, 2005). Laju timbulan sampah akan meningkat setiap tahunnya karena peningkatan pola konsumsi. Di negara Asia, laju timbulan sampah meningkat 3 – 7% setiap tahunnya (Visvanathan, 2006). Sedangkan di Indonesia, laju laju timbulan sampah meningkat 2 – 4% setiap tahunnya (Aprilia, 2012). Ray (2008) memprediksi timbulan sampah di Asia, di luar Hongkong, akan meningkat hingga 0,96 kg/orang/hari pada tahun 2025.



Gambar 4. Prediksi volume sampah di dunia (Visvanathan *et al.*, 2007)

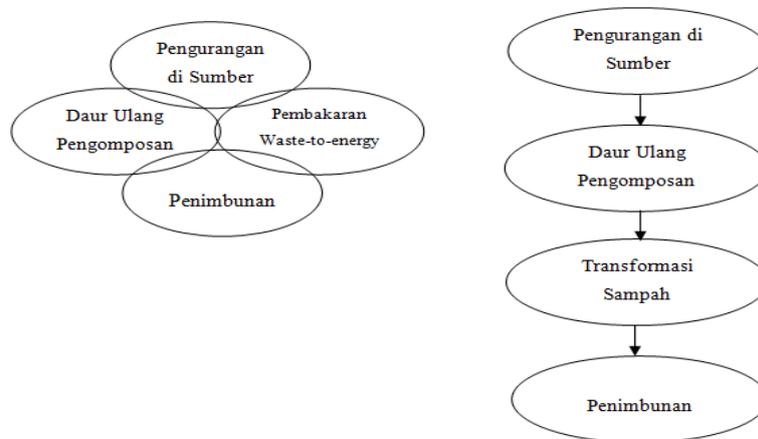
3. Pengelolaan Sampah Terpadu

Pengelolaan sampah terpadu (*integrated solid waste management, ISWM*) merupakan suatu sistem yang mengintegrasikan beberapa teknik penanganan sampah sehingga tercipta pengelolaan sampah yang aman dan terjamin keberlanjutannya. Pengelolaan sampah menurut Tchobanoglous (2002) adalah proses yang kompleks karena melibatkan berbagai macam teknologi dan disiplin ilmu. Teknologi yang terkait dengan pengelolaan sampah adalah pengendalian timbulan, penanganan, pewadahan, pengumpulan, pemindahan, pengangkutan, proses, dan pembuangan sampah. Pengelolaan sampah kota secara terpadu yang dikembangkan oleh Hickman (1999) merupakan sistem pengelolaan secara menyeluruh mulai dari timbulan, pengumpulan, pemilahan dan daur ulang, transformasi, dan pembuangan sampah (Gambar 5).



Gambar 5. Pengelolaan sampah kota terpadu (Hickman, 1999 dalam UNEP, 2005)

Tchobanoglous *et al.* (2002) mendefenisikan pengelolaan sampah terpadu sebagai pilihan dan aplikasi teknik, teknologi, dan program manajemen yang sesuai untuk mencapai tujuan dan target pengelolaan sampah yang tertentu. Pengelolaan sampah terpadu tersebut terdiri atas empat dasar strategi pengelolaan, yaitu: 1) pengurangan sampah di sumbernya, 2) daur ulang dan pengomposan, 3) pembakaran sebagai sumber energi, dan 4) pembuangan. Tchobanoglous *et al.* (2002) mengusulkan agar keempat strategi tersebut dilaksanakan lebih secara interaktif (Gambar 6.a) daripada secara hirarkis (Gambar 6.b). Untuk negara berkembang di Asia, Zurbrugg (2002) menguraikan elemen-elemen sistem pengelolaan sampah terpadu, yaitu: 1) timbulan dan pewadahan sampah di rumah tangga, 2) penggunaan kembali dan daur ulang sampah di rumah tangga, 3) pengumpulan dan pengangkutan sampah ke TPS, 4) pengelolaan sampah di TPS, 5) pengangkutan sampah dari TPS ke TPA, dan 6) pembuangan sampah di TPA.

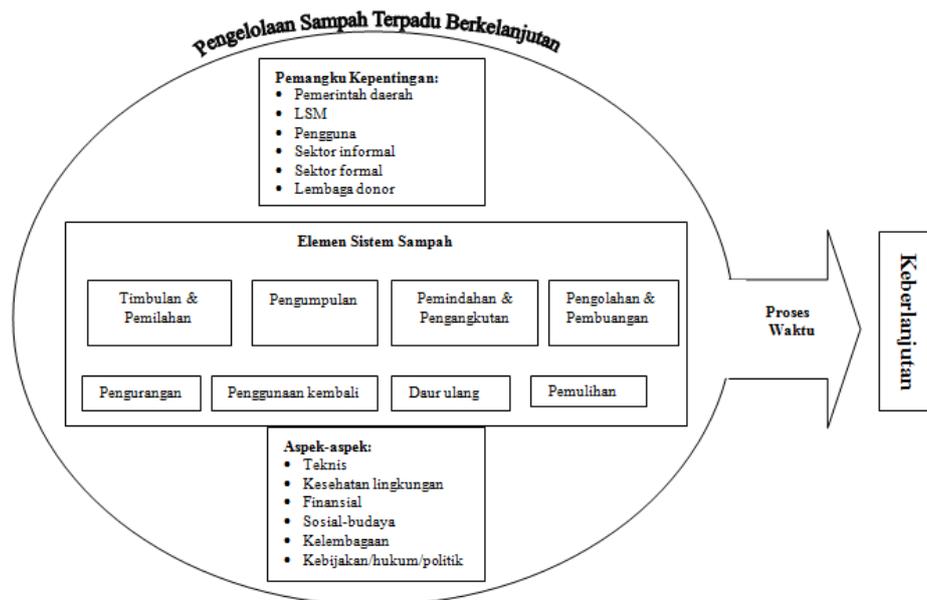


Gambar 6. Pendekatan pengelolaan sampah kota terpadu (Tchobanoglous *et al.*, 2002)

Anschutz *et al.* (2004) mengaitkan pengelolaan sampah terpadu dengan tiga dimensi untuk mencapai keberlanjutan pengelolaan sampah. Sebagaimana terlihat pada Gambar 7, ketiga dimensi tersebut adalah sebagai berikut.

1) Pihak-pihak berkepentingan (*stakeholders*)

Pihak berkepentingan terkait yang terlibat dan mempengaruhi pengelolaan sampah bisa perorangan atau organisasi, institusi pemerintah atau swasta, dan lembaga donor. Pihak utama yang berkepentingan dalam pengelolaan sampah adalah dinas kebersihan yang bertanggungjawab pada kebersihan kota dan rumah tangga yang dilayani oleh sistem pengelolaan sampah. Walaupun pihak yang berkepentingan mempunyai peran dan kepentingan yang berbeda-beda, sistem pengelolaan sampah terpadu harus mampu mengajak mereka untuk bekerja sama sehingga tujuan pengelolaan sampah dapat tercapai.



Gambar 7. Dimensi pengelolaan sampah terpadu
(Anschutz *et al.* , 2004)

2) Elemen sistem sampah

Elemen sistem sampah merupakan cara penanganan sampah yang dimulai dari timbulan sampah di sumber asalnya hingga tahap akhir pembuangannya. Cara penanganan yang dipilih akan berpengaruh terhadap lingkungan, karena itu pengelola sampah kota biasanya menerapkan ide hirarki pengelolaan sampah sebagai panduan operasional. Hirarki yang merupakan dasar pengelolaan sampah terpadu tersebut memberikan prioritas pada pencegahan, pengurangan, daur ulang sampah, dan pemulihan material.

3) Aspek

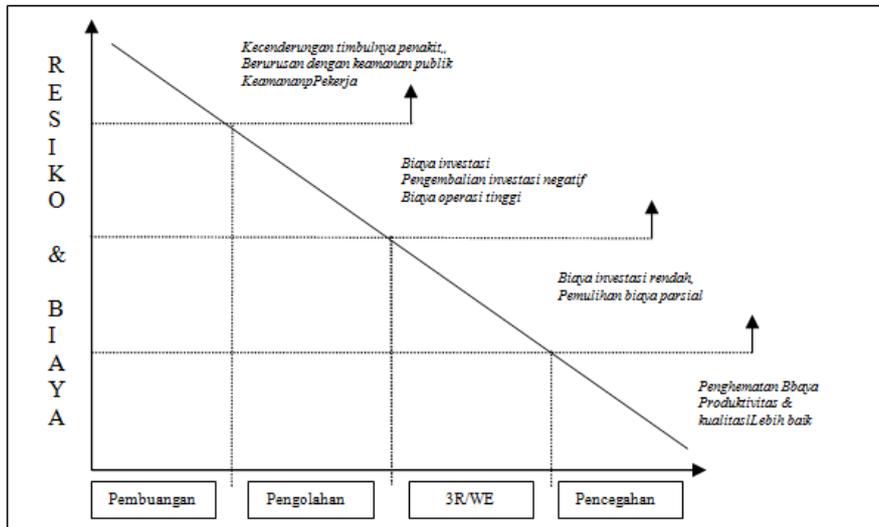
Perencanaan sistem pengelolaan sampah perlu mempertimbangkan aspek keberlanjutan dalam konteks. Aspek keberlanjutan terdiri atas aspek teknis, lingkungan/kesehatan, finansial, sosial-budaya, kelembagaan, dan kebijakan/hukum.

Dalam konteks pengelolaan sampah di negara berkembang di Asia, Zurbrugg (2002) mengelompokkan sistem pengelolaan sampah terpadu menjadi enam elemen, yaitu: 1) timbulan dan pewadahan sampah di rumah tangga, 2) penggunaan kembali dan daur ulang sampah di rumah tangga, 3) pengumpulan dan pengangkutan sampah ke TPS, 4) pengelolaan sampah di TPS, 5) pengangkutan sampah dari TPS ke TPA, dan 6) pembuangan sampah di TPA.

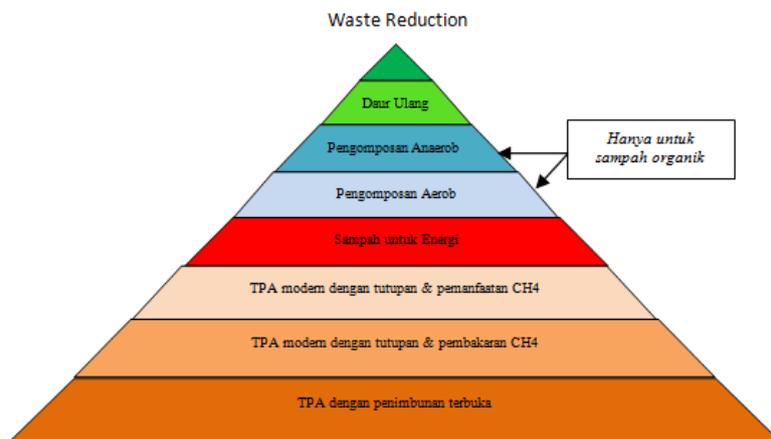
Berbagai permasalahan sampah memunculkan pemikiran untuk mengembangkan pemikiran baru untuk merubah pandangan dari pembuangan sampah menjadi pengelolaan material seperti yang sudah dilakukan di Amerika Serikat (Thorneloe, 2005) dan di beberapa negara maju yang lain seperti di

Jepang, Swiss, Jerman, Perancis, Denmark, Swedia, dan China (Hogland dan Marcia, 2005). Melalui pemikiran baru ini, sampah yang selama ini lebih banyak dibuang ke TPA, diubah menjadi material yang berharga untuk bahan daur ulang, kompos, atau sumber energi untuk pembangkit listrik baik secara langsung melalui insinerator maupun secara tidak langsung melalui penangkapan gas metana di TPA. Di Denmark misalnya, sampah yang dibuang ke TPA hanya sebesar 18%. Sisanya, sebesar 70% dipakai sebagai bahan bakar pembangkit listrik melalui insinerator dan sebesar 12% dijadikan kompos (Hogland dan Marcia, 2005).

Secara mendasar, Cheremisinoff (2003) menganjurkan untuk menerapkan tahapan hierarki pengelolaan sampah yang lebih awal karena menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan yang lebih kecil dan memerlukan biaya pengelolaan yang juga lebih kecil (Gambar 2.8). Hirarki yang dikembangkan oleh Cheremisinoff (2003) tersebut juga telah mengadopsi pemikiran sampah sebagai material yang berharga bukan saja melalui praktek *reduce* dan *resource recovery* (R^3) tetapi juga pengolahan sampah menjadi sumber energi (*waste to energy*, WE). Pengembangan hirarki pengelolaan sampah yang lain dilakukan oleh Themelis (2008) dan McDougall *et al.* (2001). Seperti tersaji pada Gambar 8, hirarki pengelolaan sampah di tingkat pembuangan dikembangkan oleh Themelis (2008) menjadi beberapa tingkatan, yaitu: TPA yang dilengkapi lapisan penutup dan instalasi penangkapan gas metana, TPA yang dilengkapi lapisan penutup dan pembakaran gas metana, dan TPA dengan sistem pembuangan terbuka.



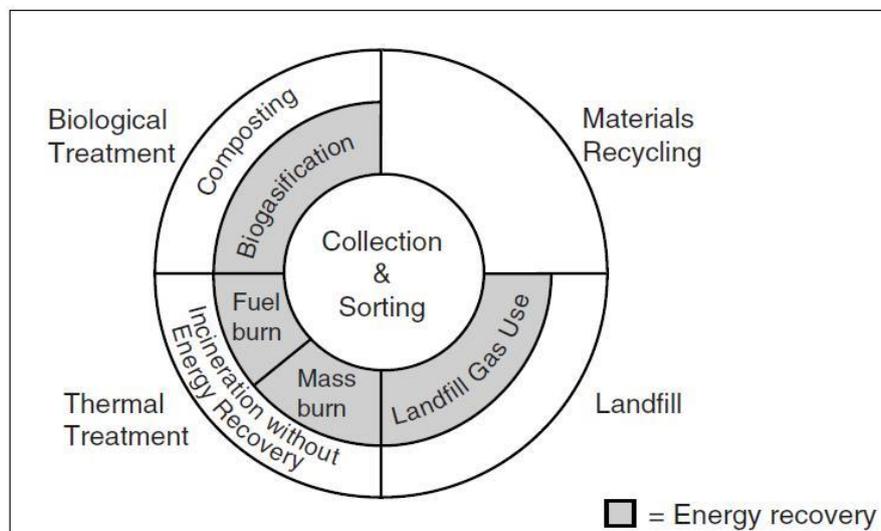
Gambar 8. Hirarki pengelolaan sampah dan dampaknya terhadap lingkungan dan biaya (Cheremisinoff, 2003)



Gambar 9. Pengembangan hirarki pengelolaan sampah (Themelis, 2008)

Sebelumnya McDougall *et al.* (2001) mengusulkan pengelolaan sampah terpadu dengan pendekatan yang menyeluruh dimana semua pilihan pengelolaan sampah memiliki peran yang penting (Gambar 10). Tidak seperti pendekatan hirarki, pendekatan menyeluruh ini tidak memprediksi jenis pengelolaan yang

terbaik karena pengelolaan sampah di suatu kota tergantung kondisi setempat, termasuk kondisi geografis yang mempengaruhi komposisi dan jumlah sampah, ketersediaan pilihan pengelolaan sampah, dan ketersediaan pasar material daur ulang. Peran masing-masing pilihan pengelolaan tersebut tidak harus sama persisnya (masing-masing sebesar 25%), tetapi tergantung kondisi lokal. Setiap pilihan pengelolaan sampah didasarkan pada data pengelolaan sampah yang terkini. Pilihan pengelolaan sampah didasarkan juga pada pertimbangan ekonomi, seperti ketersediaan prasarana pengelolaan sampah yang sudah ada sebelumnya.



Gambar 10. Elemen pengelolaan sampah terpadu (McDougall *et al.*, 2001)

Pengelolaan sampah terpadu yang merekomendasikan elemen pengurangan di sumber sebagai bagian dari sistem pengelolaan sampah (Hickman, 1999, McDougall *et al.*, 2001, Tchobanoglous *et al.*, 2002, dan Anschutz *et al.*, 2004) sejalan dengan pendekatan eko-sentris dalam manajemen lingkungan. Sedangkan pengelolaan sampah terpadu yang bertumpu pada

pembuangan akhir sejalan dengan manajemen tradisional. Perbedaan kedua pendekatan teori manajemen lingkungan tersebut, sebagaimana disajikan dalam Tabel 3, bisa ditinjau dari tujuan, nilai, produk, sistem produksi, organisasi, lingkungan, dan fungsi bisnis (Hadi, 2014).

Tabel 3. Pendekatan manajemen tradisional dan ekosentris

Aspek	Manajemen Tradisional	Manajemen Ekosentris
Tujuan	<ul style="list-style-type: none"> • Pertumbuhan ekonomi & profit • Memperkaya <i>shareholder</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Keberlanjutan & kualitas kehidupan • Kesejahteraan <i>stakeholder</i>
Nilai	<ul style="list-style-type: none"> • Antroposentris • Rasional & pengetahuan terpaket • Patriarkal 	<ul style="list-style-type: none"> • Biosentris atau ekosentris • Intuisi dan pemahaman • Pasca patriarkal
Produk	<ul style="list-style-type: none"> • Desain untuk fungsi, gaya, & harga • Menghasilkan sampah 	<ul style="list-style-type: none"> • Desain untuk lingkungan • Ramah lingkungan
Sistem Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Intensif menggunakan sumber daya & energi • Efisiensi teknis 	<ul style="list-style-type: none"> • Hemat energi dan sumber daya • Efisiensi lingkungan
Organisasi	<ul style="list-style-type: none"> • Struktur yang hirarkis • Pengambilan keputusan bersifat <i>top-down</i> • Kekuasaan terpusat 	<ul style="list-style-type: none"> • Struktur yang non hirarkis • Pengambilan keputusan bersifat partisipatif • Desentralisasi
Lingkungan	<ul style="list-style-type: none"> • Dominasi atas alam • Lingkungan dikelola sebagai sumber daya alam • Menghasilkan polusi & sampah 	<ul style="list-style-type: none"> • Harmoni dengan alam • Menghemat sumber daya alam yang terbatas • Eliminasi polusi & sampah
Fungsi Bisnis	<ul style="list-style-type: none"> • Pemasaran bertujuan untuk meningkatkan konsumsi • Tujuan finansial jangka pendek untuk memaksimalkan profit • Akuntansi difokuskan kerugian konvensional 	<ul style="list-style-type: none"> • Pemasaran bertujuan untuk edukasi konsumen • Tujuan finansial jangka panjang untuk pertumbuhan berkelanjutan • Akuntansi difokuskan pada kerugian lingkungan

Sumber: Hadi (2014)

4. Pengolahan Sampah

Pada sub bab sebelumnya telah dibahas bahwa konsep pengelolaan sampah terpadu terus mengalami pengembangan. Pada awalnya, pengelolaan sampah terpadu dikembangkan untuk meningkatkan rantai pengelolaan sampah

yang efisien, yang meliputi pemilahan sampah di sumber asalnya, pengumpulan dan pengangkutan sampah, tempat penampungan sementara, perawatan, dan pembuangan (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Akhir-akhir ini, pengelolaan sampah terpadu menjadi suatu proses untuk mencapai pengelolaan sampah yang berkelanjutan dengan cara mengurangi volume sampah yang dibuang ke TPA, memaksimalkan pemulihan sampah untuk bahan daur ulang dan energi, dan meminimalkan pencemaran terhadap lingkungan (Tchobanoglous *et al.*, 2002, McDougall *et al.*, 2001, dan Anschutz *et al.*, 2004). Untuk menuju pengelolaan sampah yang berkelanjutan, pengolahan sampah sesungguhnya merupakan bagian penting dari elemen sistem pengelolaan terpadu.

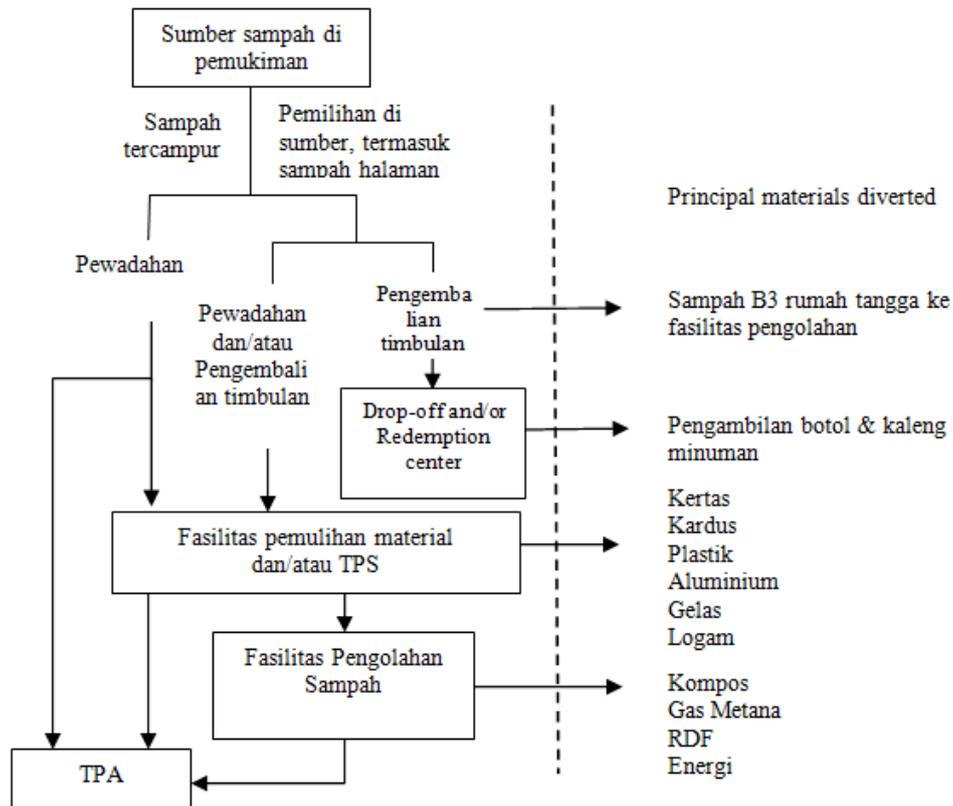
Pengolahan sampah menurut UU No 18 Tahun 2008 didefinisikan sebagai proses perubahan bentuk sampah dengan mengubah karakteristik, komposisi, dan jumlah sampah. Pengolahan sampah merupakan kegiatan yang dimaksudkan untuk mengurangi jumlah sampah, di samping memanfaatkan nilai yang masih terkandung dalam sampah itu sendiri (bahan daur ulang, produk lain, dan energi). Pengolahan sampah tersebut dapat dilakukan dengan cara pengomposan, daur ulang, pembakaran (insinerasi), dan lain-lain. Tujuannya adalah agar sampah dapat diproses lebih lanjut, dimanfaatkan, atau dikembalikan ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan. Pengolahan sampah tersebut dapat dilakukan di sumber asal sampah, di TPS, atau di TPA (Anschutz *et al.*, 2004 dan Damanhuri *et al.*, 2010). Hasil pengolahan sampah, misalnya berupa kompos, pupuk, biogas, potensi energi, dan hasil daur ulang lainnya (Pasal 22 UU No. 18/2008).

Secara teoritis praktek daur ulang sampah bisa mengurangi volume sampah secara signifikan hingga 90% (Tchobanoglous *et al.*, 2002) apabila praktek daur ulang tersebut dilakukan secara formal dan sistematis oleh pengelola di berbagai elemen sistem sampah kota seperti di TPS dan di TPA. Gambar 11 adalah gambar tipikal aliran sampah permukiman pada sistem pengelolaan sampah secara terpadu (Tchobanoglous *et al.*, 2002). Diagram tersebut menunjukkan bahwa *transfer station* atau TPS merupakan bagian integral dari sistem pengelolaan sampah secara terpadu dan bagian dari daur hidup sampah. Karena itu TPS seharusnya ditingkatkan perannya dari tempat penampungan sementara menjadi tempat pengolahan atau pemrosesan sampah untuk memungut material sampah yang bisa didaur ulang. Karena TPS merupakan bagian dari daur hidup pengelolaan sampah, maka praktek daur ulang sampah di TPS tersebut bukan saja bisa mengurangi volume sampah yang dibuang ke TPA secara signifikan, tetapi juga akan mengurangi jejak karbon pada sistem pengelolaan sampah (McDougall *et al.*, 2001). Lokasi TPS juga mempengaruhi besarnya energi yang diperlukan untuk transportasi sampah. Selain itu pengolahan sampah di TPS juga memerlukan energi dilakukan secara mekanis.

Peningkatan peran TPS menjadi tempat pengolahan sampah memerlukan syarat-syarat tertentu. Jika TPS yang ada tidak memenuhi syarat maka perlu dibuat TPS skala kawasan dengan luas lahan yang cukup dan ditempatkan pada lokasi yang khusus, tidak di bahu atau median jalan seperti yang selama ini banyak terjadi. Adapun kriteria TPS skala kawasan menurut Buku Pedoman Implementasi 3R Skala Kota (KNLH, 2010) adalah sebagai berikut.

1. Sedekat mungkin dengan sumber timbulan sampah.
2. Diusahakan ditempatkan di TPS/transfer depo atau di kawasan yang menghasilkan sampah yang cukup banyak seperti pasar tradisional dan kawasan perdagangan.
3. Lokasi yang dipilih diusahakan menyebar secara merata di seluruh wilayah kota.
4. Terdapat lahan siap bangun seluas minimal 250 m² untuk kapasitas 36 m³/hari atau 750 m² untuk kapasitas 60 m³/hari.
5. Status lahan yang dipergunakan diusahakan milik pemerintah kota setempat.
6. Lahan TPA sebagai pilihan terakhir.

Adapun pengolahan sampah untuk merubah karakteristik, komposisi, dan jumlah sampah dapat dilakukan dalam bentuk daur ulang sampah anorganik menjadi bahan baku, daur ulang sampah organik menjadi kompos, dan daur ulang sampah menjadi sumber energi.



Gambar 11. Diagram alir pengelolaan sampah permukiman secara terpadu
(Tchobanoglous *et al.*, 2002)

1) Daur ulang sampah anorganik menjadi bahan baku

Sesuai dengan UU No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, daur ulang masuk elemen pengurangan dan penanganan khususnya elemen pengolahan dari pengelolaan sampah karena daur ulang sampah akan merubah komposisi dan volume sampah. Damanhuri *et al.* (2010) menguraikan bahwa sampah anorganik yang biasanya merupakan bahan pengemas produk seperti kertas, logam, plastik, adalah bahan yang dapat didaur-pakai secara langsung atau tidak langsung dengan melalui proses terlebih dahulu untuk menjadi bahan baku

baru. Sampah anorganik inilah yang menimbulkan permasalahan dalam pengelolaan sampah kota karena memerlukan waktu penguraian yang lebih lama daripada sampah organik dan secara bersamaan menimbulkan pencemaran terhadap tanah dan air. Di negara industri, aplikasi pengemas yang mudah didaur ulang akan menjadi salah satu faktor dalam meningkatkan nilai saing produk tersebut di pasar. Damanhuri *et al.* (2010) proses daur ulang harus memperhatikan komposisi dan karakteristik limbah yang dominan, terutama bila daur ulang dilakukan di tempat pembuangan akhir. Hal lain yang mempengaruhi adalah ketersediaan tenaga operasional agar proses berkelanjutan. Proses daur ulang juga dilakukan bisa di sumber timbulan dan tempat penampungan sementara, atau pada skala kawasan. Daur ulang yang dilakukan di sumber maupun penampungan sementara atau di suatu kawasan, dapat meminimalkan biaya pengangkutan ke pembuangan akhir.

Adapun Damanhuri *et al.* (2010) menyebutkan bahwa proses daur-ulang pada umumnya membutuhkan rekayasa dalam bentuk: a) pemisahan dan pengelompokan, yaitu untuk mendapatkan limbah yang sejenis yang bisa dilaksanakan secara manual (dilakukan dengan tangan manusia secara langsung) atau secara mekanis (dilakukan oleh mesin); b) pemurnian, yaitu untuk mendapatkan bahan/elemen semurni mungkin, baik melalui proses fisik, kimia, biologi, atau termal; c) pencampuran, yaitu untuk mendapatkan bahan yang lebih bermanfaat, misalnya sejenis limbah dicampur dengan limbah lain atau dengan bahan lain; dan d) pengolahan atau perlakuan, yaitu untuk mengolah buangan menjadi bahan yang siap pakai. Untuk lingkungan kecil, tidak ada proses lebih

lanjut kecuali proses yang sederhana seperti perataan, pemecahan atau pencacahan botol, penggulungan kertas untuk kemudian dikirim ke pabrik.

2) Daur ulang sampah organik menjadi kompos

Pengomposan merupakan salah satu elemen dari strategi pengelolaan sampah terpadu yang bisa diterapkan pada sampah yang masih bercampur atau yang pada sampah organik yang telah dipisah (Tchobanoglous, 2002). Pada pengomposan, bahan organik akan diuraikan oleh mikroorganisme sehingga berubah bentuk menjadi kompos yang bisa berfungsi untuk memperbaiki struktur tanah dan memperbesar kemampuan tanah untuk menyerap dan menahan air dan zat hara yang lain (Damanhuri *et al.*, 2010). Dilihat dari komposisi, Damanhuri *et al.* (2010) menjelaskan lebih lanjut bahwa sebagian sampah kota di Indonesia adalah tergolong sampah organik atau sampah basah karena sebagian besar komposisinya adalah sisa-sisa makanan, khususnya sampah dapur. Jenis sampah seperti ini akan cepat membusuk, atau terdegradasi oleh mikroorganisme yang berlimpah di alam ini. Bila ini terjadi, massanya akan berkurang dengan besar. Cara inilah yang sebetulnya dikembangkan oleh manusia dalam bentuk pengomposan dan biogasifikasi. Namun bila mekanisme ini berlangsung secara alamiah, khususnya di lingkungan yang sudah jenuh daya dukungnya, maka akan timbul masalah estetika serta gangguan lainnya terutama karena adanya bau, seperti terjadi di timbunan sampah yang tidak terurus dengan baik. Dengan kondisi kelembaban yang tinggi, serta temperatur yang relatif tinggi seperti di

Indonesia ini, maka kecepatan mikroorganisme dalam menguraikan materi-materi sampah organik akan lebih baik pula.

Menurut Surawiria (2002) banyak faktor yang mempengaruhi proses pembuatan kompos, baik biotik maupun abiotik. Faktor-faktor tersebut adalah pemisahan bahan, bentuk bahan, nutrient, dan kadar air.

a. Pemisahan bahan.

Bahan-bahan yang sekiranya lambat atau sukar untuk didegradasi/diurai, harus dipisahkan/diduakan, baik yang berbentuk logam, batu, maupun plastik. Bahkan, bahan-bahan tertentu yang bersifat toksik serta dapat menghambat pertumbuhan mikroba, harus benar-benar dibebaskan dari dalam timbunan bahan, misalnya residu pestisida.

b. Bentuk bahan

Semakin kecil dan homogen bentuk bahan, semakin cepat dan baik pula proses pengomposan. Karena dengan bentuk bahan yang lebih kecil dan homogen, lebih luas permukaan bahan yang dapat dijadikan substrat bagi aktivitas mikroba. Selain itu, bentuk bahan berpengaruh pula terhadap kelancaran difusi oksigen yang diperlukan serta pengeluaran CO₂ yang dihasilkan.

c. Nutrien

Untuk aktivitas mikroba di dalam tumpukan sampah memerlukan sumber nutrien Karbohidrat, misalnya antara 20% - 40% yang digunakan akan diasimilasikan menjadi komponen sel dan CO₂, kalau bandingan sumber nitrogen dan sumber Karbohidrat yang terdapat di dalamnya (C/N-rasio) = 10

: 1. Untuk proses pengomposan nilai optimum adalah 25 : 1, sedangkan maksimum 10 : 1.

d. Kadar air

Kadar air bahan tergantung kepada bentuk dan jenis bahan, misalnya, kadar air optimum di dalam pengomposan bernilai antara 50 – 70, terutama selama proses fasa pertama. Kadang-kadang dalam keadaan tertentu, kadar air bahan bisa bernilai sampai 85%, misalnya pada jerami.

Di samping persyaratan di atas, masih diperlukan pula persyaratan lain yang pada pokoknya bertujuan untuk mempercepat proses serta menghasilkan kompos dengan nilai yang baik, antara lain, homogenitas (pengerjaan yang dilakukan agar bahan yang dikomposkan selalu dalam keadaan homogen), aerasi (suplai oksigen yang baik agar proses dekomposisi untuk bahan-bahan yang memerlukan), dan penambahan starter (preparat mikroba) kompos dapat pula dilakukan, misalnya untuk jerami. Agar proses pengomposan bisa berjalan secara optimum, maka kondisi saat proses harus diperhatikan..

Tempat pengomposan tergantung kondisi serta luas lahan (pekarangan rumah) yang dapat disiapkan untuk pembuatan kompos. Dengan demikian, bentuk tempat pengomposan dapat bermacam-macam, yaitu berbentuk lubang, berbentuk bak, dan di atas permukaan tanah.

a) Bentuk lubang

Tempat pengomposan berbentuk lubang memiliki ukuran 100 x 75 x 50 cm atau 2,5 x 1 x 1 m (panjang, lebar, dan tinggi) atau disesuaikan dengan lahan yang dapat digunakan sebagai tempat pembuatan kompos dan bahan baku

yang akan dibuat atau diproses. Bahan baku yang akan dibuat kompos diisikan ke dalam lubang. Namun, kekurangan dari tempat pengomposan berbentuk lubang ini adalah bahwa lubang pengomposan akan tergenang air pada saat musim hujan sehingga mempengaruhi proses pengomposan.

b) Berbentuk bak

Tempat pengomposan berbentuk bak terbuat dari dinding dari batu bata (tembok), dari bambu, dari kayu ataupun dari bahan-bahan lainnya. Keuntungan pengomposan berbentuk bak adalah kemudahan untuk mencampurkan bahan dan tidak tergenang air di musim hujan. Adapun kelemahannya adalah pada biaya pembuatan dinding bak yang cukup mahal.

c) Pada permukaan tanah

Timbunan bahan baku langsung ditempatkan pada permukaan tanah tanpa lubang atau dinding. Pencampuran bahan baku dapat dilakukan dengan mudah. Selain itu, genangan air juga bisa dicegah sehingga tidak mengganggu proses pengomposan. Akan tetapi, pengomposan yang terbuka ini sangat mudah diganggu oleh binatang seperti ayam dan tikus yang senang berdiam pada timbunan sampah.

3) Pembakaran biogas sampah (*flaring*)

Pada proses dekomposisi sampah, mikroorganisme akan menguraikan sampah khususnya sampah organik dalam kondisi anaerobik dan mengakibatkan timbulnya biogas (Damanhuri *et al.*, 2010). Gas-gas yang dihasilkan dari proses

penguraian antara lain gas metan (CH_4), karbondioksida (CO_2), uap air (H_2O), gas nitrogen (N_2), dan lain-lain. Komposisi biogas rata-rata yang terbesar adalah gas metan sebesar 50% dan gas karbondioksida sebesar 45% (Cheremisnoff, 2003). Dalam perencanaan suatu TPA, pembentukan gas perlu diperhatikan karena metan merupakan gas yang eksplosif, dapat meledak jika terkonsentrasi hingga 5 sampai 15% di udara. Gas metan juga memiliki potensi gas rumah kaca 21 kali lebih besar daripada dibandingkan karbondioksida. Sedangkan gas karbondioksida dapat menjadi penyebab peningkatan mineral pada air tanah serta membentuk asam karbonik.

Untuk menghilangkan pengaruh negatif yang ditimbulkan maka perlu pengelolaan biogas yang dihasilkan oleh TPA. Untuk mengurangi bahaya ledakan biogas sampah di TPA dan mengurangi emisi gas rumah kaca dari gas metan sampah dan mengurangi bahaya ledakan TPA, maka perlu sistem instalasi penangkapan gas metan baik secara pasif maupun aktif untuk kemudian disalurkan melalui instalasi pemipaan dan dibakar untuk mengendalikan biogas sampah (Cheremisnoff, 2003). Pembakaran biogas bisa dilakukan melalui tungku pembakar gas metan atau *flaring*, insinerator sampah, dan ketel penggerak turbin listrik. Setelah dibakar, gas metan akan berubah menjadi gas CO_2 yang potensi gas rumah kacanya hanya 1. Pembakaran biogas adalah efisien diterapkan apabila kandungan gas metan dalam biogas mencapai lebih dari 20% karena dengan kadar sebesar itu, gas metan akan terbakar dengan sendirinya ketika dipantik dengan sumber api dan tidak memerlukan bahan bakar untuk pengoperasian (Cheremisnoff, 2003).

4) Daur ulang sampah menjadi energi

Kandungan gas metan dalam biogas sampah yang mencapai rata-rata 50% merupakan bahan bakar potensial yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi. Daur ulang sampah menjadi energi atau sering disebut *waste-to-energy*, bisa dilakukan dengan memanfaatkan biogas tersebut untuk membakar sampah dalam tungku pembakaran (insinerator) (Damanhuri *et al.*, 2010). Insinerasi merupakan proses pengolahan buangan dengan cara pembakaran pada temperatur yang sangat tinggi ($> 800^{\circ}\text{C}$) untuk mereduksi sampah yang tergolong mudah terbakar (*combustible*), yang sudah tidak dapat didaurulang lagi. Pada insinerator, sampah sebagai material padat dikonversi menjadi materi gas (gas buang), serta materi padatan yang sulit terbakar, yaitu abu (*bottom ash*) dan debu (*fly ash*). Panas yang dihasilkan dari proses insinerasi juga dapat dimanfaatkan untuk mengkonversi suatu materi menjadi materi lain dan energi, misalnya untuk pembangkitan listrik dan air panas.

Meskipun teknologi insinerator ini mampu melakukan reduksi volume sampah hingga 70%, namun teknologi ini membutuhkan biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan yang cukup tinggi. Khusus untuk sampah kota, sebuah insinerator akan dianggap layak bila selama pembakarannya tidak dibutuhkan subsidi enersi dari luar. Jadi sampah tersebut harus terbakar dengan sendirinya. Sejenis sampah akan disebut layak untuk insinerator, bila mempunyai nilai kalor sebesar paling tidak 1200 kcal/kg-kering. Untuk sampah kota di Indonesia, angka ini umumnya merupakan ambang tertinggi. Di samping itu, sampah kota di

Indonesia umumnya memiliki kandungan organik tinggi (> 60 %) dan kadar air yang tinggi (sekitar 60 %) sehingga akan mempersulit untuk terbakar sendiri tanpa bahan bakar tambahan. Permasalahan lain yang muncul adalah bagaimana mencari lokasi yang cocok dan bagaimana mengurangi dampak negatif dari pencemaran udara dan bau pembakaran.

Selain untuk membakar sampah melalui insinerator, biogas sampah yang mempunyai kandungan gas metan lebih dari 50% tersebut juga merupakan bahan potensial untuk pembangkit listrik. Teknologi yang digunakan untuk memanfaatkan biogas sampah sebagai pembangkit listrik tersebut antara lain adalah mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) dan turbin gas (Cheremisnoff, 2003). Jika suplai biogas cukup untuk menghasilkan listrik sebesar 1 s/d 3 MWh, maka akan lebih ekonomis jika digunakan teknologi mesin pembakaran dalam. Keuntungan teknologi ini adalah biaya produksi listriknya yang rendah, yaitu antara \$950 s/d \$1250 per KW lebih rendah daripada turbin gas sebesar \$100 s/d \$1500 per KW. Kelebihan lain dari mesin pembakaran dalam adalah efisiensinya yang lebih baik. Kehilangan energi pada turbin gas bisa mencapai 17% sedangkan pada mesin pembakaran dalam hanya mencapai 7%.

5. Jejak Karbon

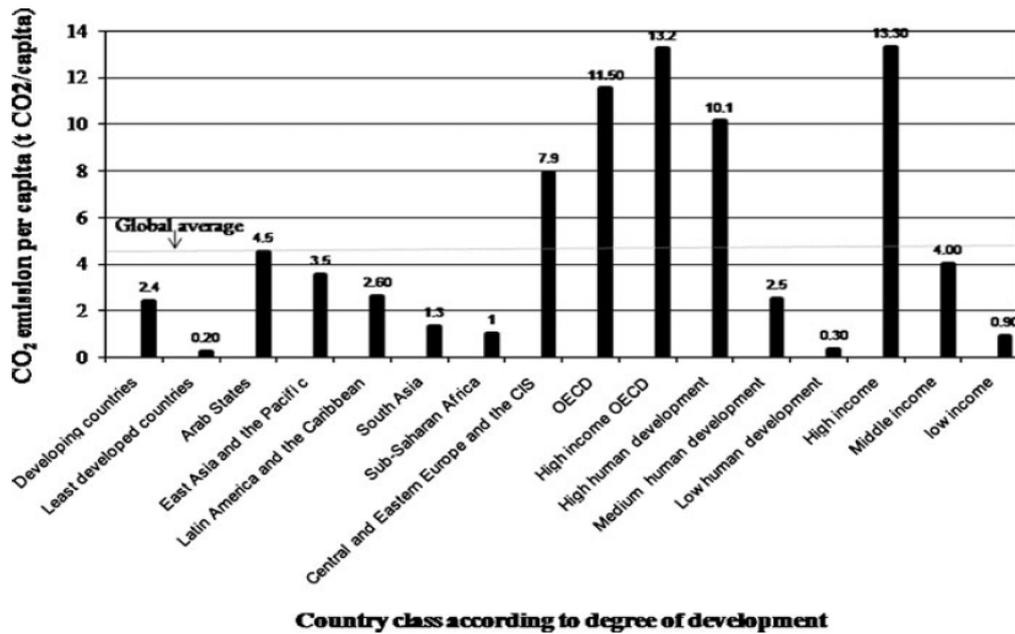
Pemakaian jejak karbon sebagai indikator dan ukuran penggunaan energi pada awalnya digagas oleh Wackernagel and Rees (1996) melalui publikasinya yang berjudul *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*

(Wikipedia, 2010 dan Pandey, 2010). Jejak ekologi (*ecological footprint*) merupakan perangkat yang ditujukan untuk menghitung lahan produktif yang diperlukan untuk kebutuhan hidup manusia. Pengukuran jejak ekologi dari aktifitas manusia penting dilakukan untuk keberlanjutan hidup manusia karena jejak ekologi ini akan membandingkan dan memberikan informasi bagaimana pengaruh berbagai aktifitas terhadap ekologi. Hal ini sesuai dengan teori pembangunan berkelanjutan sebagaimana konsep World Commission on Environment and Development (WCED) bahwa penggunaan sumberdaya alam pada saat ini tidak boleh mengabaikan kebutuhan sumberdaya untuk generasi yang akan datang (Hadi, 2001). Informasi jejak ekologi tersebut bisa dipergunakan untuk merancang target reduksi konsumsi sumber daya sehingga tercapai lingkungan yang berkelanjutan.

Istilah jejak karbon adalah hampir sama dengan jejak ekologi yang menunjukkan jumlah emisi GRK dalam satuan ton karbon dioksida (Petkova, 2010). Secara umum jejak karbon didefinisikan sebagai kadar emisi GRK yang dihasilkan oleh suatu aktifitas baik secara langsung maupun tidak langsung atau terakumulasi selama usia produk atau layanan, yang dinyatakan dalam ton karbon dioksida ekuivalen (Wiedmann dan Minx, 2007). Sedangkan Pandey (2010) mendefinisikan jejak karbon sebagai penjumlahan dan pengurangan emisi GRK pada daur hidup (*life cycle*) suatu produk atau aktifitas. Jejak karbon tersebut merupakan salah satu emisi yang dihasilkan selama daur hidup suatu produk. Agar bisa diterima secara luas, pengertian aktifitas ini oleh Pandey (2010) diperjelas sebagai individu, organisasi, proses, produk, atau kegiatan tertentu.

Sumber emisi GRK pada suatu perusahaan, organisasi, atau aktifitas tertentu tersebut dapat dibagi dalam tiga kategori, yaitu: emisi langsung, emisi tidak langsung, dan emisi lainnya (WRI, 2004).

Emisi GRK berdampak negatif terhadap lingkungan karena menimbulkan efek GRK. Karena itu masyarakat perlu memperhatikan jumlah emisi karbon yang dilepas ke atmosfer oleh aktifitasnya. Berdasarkan Global Footprint Network, jejak karbon merupakan bagian terbesar dari jejak ekologi yang paling pesat perkembangannya. Pada saat ini jejak karbon adalah dua kali lebih besar dari pada jejak karbon patahun 1970 dan tumbuh tiga kali lebih cepat daripada jenis jejak ekologi yang lain yaitu lahan terbangun. Secara keseluruhan, emisi karbon dioksida pada saat ini telah melebihi kemampuan alami ekosistem planet untuk menyerapnya sehingga konsentrasi GRK di atmosfer meningkat dan menyebabkan perubahan iklim (WWF, 2010). Untuk kepentingan bisnis, jejak karbon telah dipergunakan sebagai indikator untuk mengukur dampak gaya hidup masyarakat di suatu negara terhadap emisi karbon. UNDP (2007) menerbitkan jejak karbon per kapita yang membandingkan kontribusi tiap negara terhadap jejak karbon. Sebagaimana terlihat pada Gambar 12, negara maju menghasilkan jejak karbon per kapita yang jauh lebih besar (13,2 ton karbon/kapita) daripada negara berkembang (2,4 ton karbon/kapita) (Pandey, 2010).



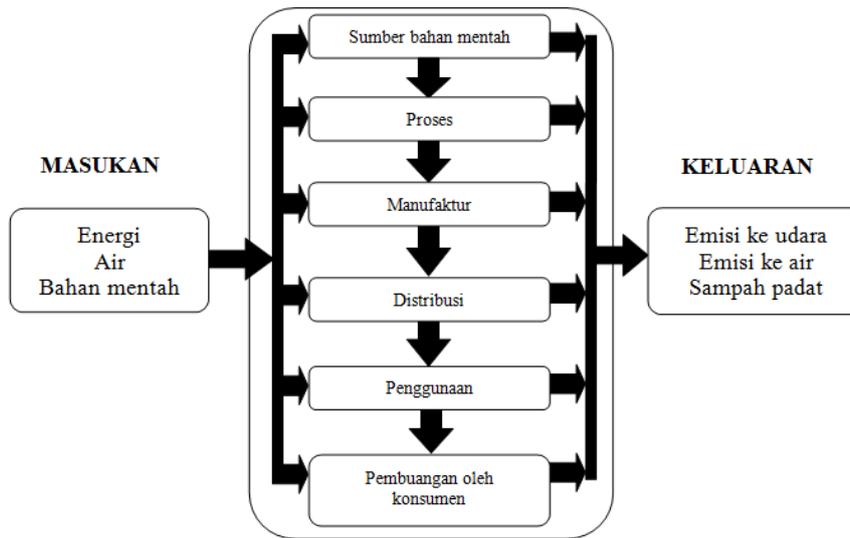
Gambar 12. Jejak karbon per kapita di berbagai kelompok negara
(Pandey, 2010)

6. Pendekatan Penilaian Daur Hidup

Perkembangan ekonomi yang mengabaikan dampak terhadap lingkungan mengakibatkan hal-hal yang tidak dikehendaki seperti perubahan iklim, kelangkaan sumber air bersih, dan punahnya keanekaragaman hayati dan prinsip pembangunan berkelanjutan yang muncul pada sekitar tahun 1980, pada saat ini telah berkembang ke agenda bagaimana cara mengukurnya (Azapagic, 2004). Sebagai salah satu komponen pembangunan berkelanjutan, lingkungan mulai mendapatkan perhatian khusus sejalan dengan tumbuhnya kesadaran dari masyarakat luas seiring dengan tekanan akibat pertumbuhan ekonomi. Hal ini telah mendorong masyarakat luas untuk melakukan berbagai upaya untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan.

Pencapaian lingkungan berkelanjutan memerlukan metode dan alat untuk membantu mengkuantifikasi dan membandingkan dampak lingkungan dalam penyediaan produk bagi masyarakat. Penilaian daur hidup adalah suatu teknik untuk mengukur dampak suatu produk tertentu terhadap lingkungan yang dilakukan dengan melakukan identifikasikan bahan baku dan konsumsi energi, evaluasi potensi dampak dan emisi, interpretasi hasil untuk pengambilan keputusan (Curran 2006). Pendekatan LCA dipergunakan untuk untuk memperkirakan dan menilai dampak lingkungan yang dikaitkan dengan daur hidup suatu produk, seperti perubahan iklim, penipisan lapisan ozon, eutrofikasi, asidifikasi, keracunan pada manusia dan ekosistem, penipisan sumber daya, penggunaan air, penggunaan lahan, kebisingan, dan lainnya (Rebitzer *et al.* 2004).

Setiap produk mempunyai siklus hidup yang dimulai dari pengambilan bahan baku dari alam, fabrikasi, distribusi, pemakaian, kemungkinan penggunaan kembali/daur ulang, dan pembuangan kembali ke alam sebagaimana terlihat pada Gambar 13 (McDougall *et al.*, 2001 dan Guinee, 2004). Semua aktivitas atau proses dalam tiap tahapan siklus hidup memerlukan bahan baku dan energi sebagai masukan (*input*) dan produk menimbulkan dampak lingkungan karena emisi zat ke lingkungan alam sebagai hasil (*output*) (McDougall *et al.*, 2001 dan Curran, 2006).



Gambar 13. Tahapan daur hidup suatu produk (McDougall *et al.*, 2001)

Penilaian daur hidup dengan demikian merupakan perangkat pengelolaan lingkungan yang dipergunakan untuk memahami dan membandingkan bagaimana suatu produk atau layanan 'mulai dari lahirnya hingga penguburannya' (*'from the cradle to the grave'*) (McDougall *et al.*, 2001). Caranya adalah dengan melakukan pengujian terhadap tiap tahap daur hidup, dari perolehan bahan baku, manufaktur, distribusi, penggunaan, kemungkinan penggunaan kembali atau daur ulang, hingga pembuangan. Untuk tiap tahapan operasi di antara tiap tahapan, akan dihitung masukan atau *input* (bahan mentah, sumber daya, dan energi) dan keluaran atau *output* (emisi ke udara, air, dan limbah padat). Hasil LCA akan dipergunakan sebagai evaluasi suatu produk atau layanan dalam keseluruhan daur hidupnya.

LCA dapat digunakan untuk menangani dampak lingkungan dari produk, proses atau aktifitas dalam seluruh siklus hidup mulai dari ekstraksi material

mentah, proses produksi, transportasi, penggunaan, dan pembuangan akhir. Manfaat penerapan konsep LCA adalah untuk perbaikan produk, perbaikan proses, dan perencanaan strategis (Megasari *et al.* 2008). Dalam perbaikan produk, LCA dapat mengidentifikasi pilihan biaya paling efisien dan efektif bagi pengurangan dampak lingkungan dari produk atau jasa. Perbaikan ini dapat membuat produk lebih diinginkan oleh konsumen. Dalam perbaikan proses, LCA dapat diterapkan untuk mengevaluasi operasi atau proses produksi perusahaan. Hal ini merupakan metode yang berguna untuk menghitung sumber daya dan penggunaan energi. Manfaat LCA dapat menawarkan pilihan bagi perbaikan efisiensi seperti meminimalkan limbah, penggunaan sumber daya lebih sedikit, dan memperbaiki kualitas proses. Sedangkan dalam perencanaan strategis, LCA dapat digunakan sebagai perencanaan strategis. Jika peraturan lingkungan dan harapan lingkungan meningkat, akan mengakibatkan peningkatan tekanan terhadap perusahaan untuk memperbaiki kinerja operasinya.

Dengan kualitas lingkungan yang semakin buruk, sektor industri dan kegiatan lainnya dituntut untuk lebih serius dalam memperhatikan dampak lingkungan akibat aktivitasnya. LCA merupakan suatu pendekatan yang tepat untuk mengetahui seberapa besar dampak lingkungan oleh industri atau aktivitas pada tiap tahapan daur hidup mulai dari pengambilan material sampai dengan produk itu selesai digunakan oleh konsumen. Upaya untuk mencegah dan mengurangi timbulnya limbah, bisa dimulai sejak pemilihan bahan, teknologi proses, penggunaan material dan energi, hingga pemanfaatan produk samping pada suatu sistem produksi. Minimalisasi limbah dapat dilakukan dengan cara

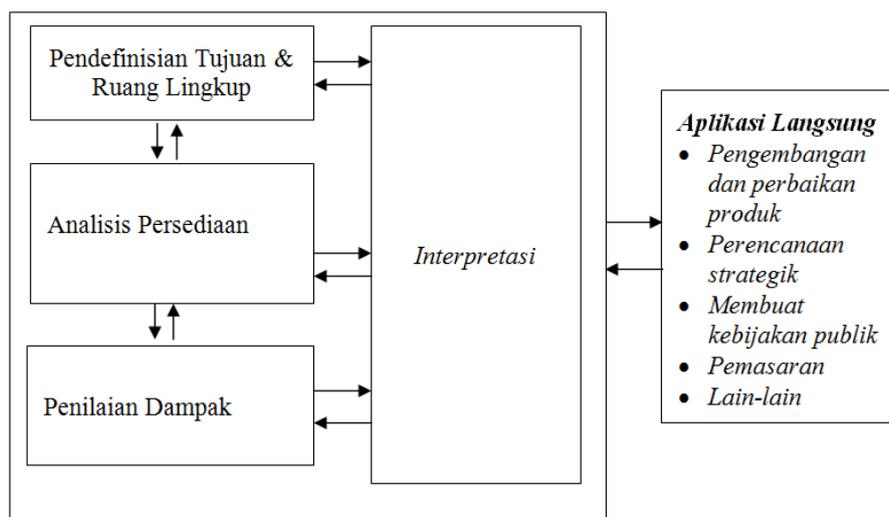
reduce, reuse, recycle, dan recovery. *Reduce* merupakan upaya untuk mengurangi pemakaian atau penggunaan bahan baku seefisien mungkin di dalam suatu proses produksi dan mengurangi limbah yang dibuang. *Reuse* merupakan upaya penggunaan limbah untuk digunakan kembali tanpa mengalami proses pengolahan atau perubahan bentuk. *Reuse* dapat dilakukan di dalam atau di luar daerah proses produksi yang bersangkutan. *Recycle* merupakan upaya pemanfaatan limbah dengan cara proses daur ulang melalui pengolahan fisik atau kimia, baik untuk menghasilkan produk yang sama maupun produk yang berlainan. Daur ulang dapat dilakukan di dalam atau di luar daerah proses produksi yang bersangkutan. *Recovery* adalah upaya pemanfaatan limbah dengan jalan memproses untuk memperoleh kembali materi atau energi yang terkandung di dalamnya.

Secara sistematis, sebagaimana yang diilustrasikan dalam Gambar 14, proses LCA terdiri atas fase yaitu terdiri dari empat fase utama: penentuan tujuan dan ruang lingkup, analisis persediaan, penilaian dampak, dan interpretasi (ISO 14040, 1997). Sesuai dengan ISO 14040 (1997), Yokoyama (2008) menguraikan keempat fase tersebut adalah sebagai berikut.

1. Pendefinisian tujuan dan ruang lingkup (*goal and scoping*)

Tujuan dan ruang lingkup perlu dilakukan untuk inventarisasi kegiatan yang diperkirakan dapat menimbulkan dampak penting yang ditimbulkan oleh proses atau produk tertentu terhadap lingkungan. Fase pertama ini telah terdiri dari isu-isu pokok: tujuan, ruang lingkup, unit fungsi, batasan sistem, dan mutu data (ISO 14041, 1998). Sesuai dengan tujuannya, emisi yang akan diukur dan

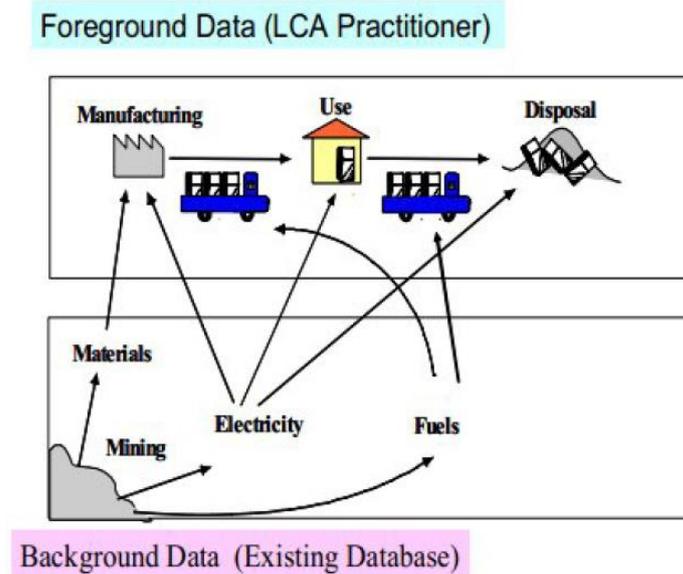
batasan yang dievaluasi bisa diputuskan. Selain itu, ketika melakukan LCA, sulit untuk mencakup semuanya dalam proses yang terkait dengan produk target atau jasa. proses, yang kontribusinya rendah bila dibandingkan dengan tujuan LCA, dihilangkan dari penelitian (*cut-off*). Kriteria *cut-off* digunakan untuk memutuskan pengecualian proses tersebut sesuai tujuannya dan yang terpenting adalah bahwa ruang lingkup harus konsisten dengan tujuan LCA.



Gambar 14. Fase dan Aplikasi LCA (ISO 14040, 1997)

2. Analisis inventarisasi (*Inventory Analysis*)

Analisis inventarisasi merupakan bagian LCA yang berisi inventarisasi masukan berupa energi dan bahan baku dan inventori keluaran berupa emisi dan limbah. Analisis persediaan adalah fase penilaian siklus hidup yang melibatkan kompilasi dan kuantifikasi input dan output untuk produk sepanjang siklus hidupnya didalam batasan yang ditentukan dari tujuan penelitian. Data yang terkait yang dikumpulkan terkait dengan data *foreground* dan data *background*. Hubungan data *foreground* dan data *background* diilustrasikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Hubungan data *foreground* dan data *background* (Yokoyama, 2008)

Data *foreground* terkait dengan manufaktur, penggunaan, dan pembuangan akhir dari produk yang ditargetkan. Data berikutnya yang harus dikumpulkan adalah data *background* berupa data masukan-keluaran untuk produksi bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan produk. Data ini umumnya sulit dikumpulkan sehingga data ini biasanya diambil dari penelitian terdahulu dan studi kasus LCA di masa lalu.

3. Penilaian dampak (*Impact Assessment*)

Penilaian dampak digunakan untuk menganalisis dampak suatu proses terhadap lingkungan dan kesehatan manusia yang telah didata secara kuantitatif pada analisis inventori. Penilaian dampak pada LCA terdiri dari tiga bagian: klasifikasi, karakterisasi dan evaluasi total. Pada tahap klasifikasi, konsumsi sumber daya atau emisi diklasifikasikan ke kategori dampak berdasarkan dampak

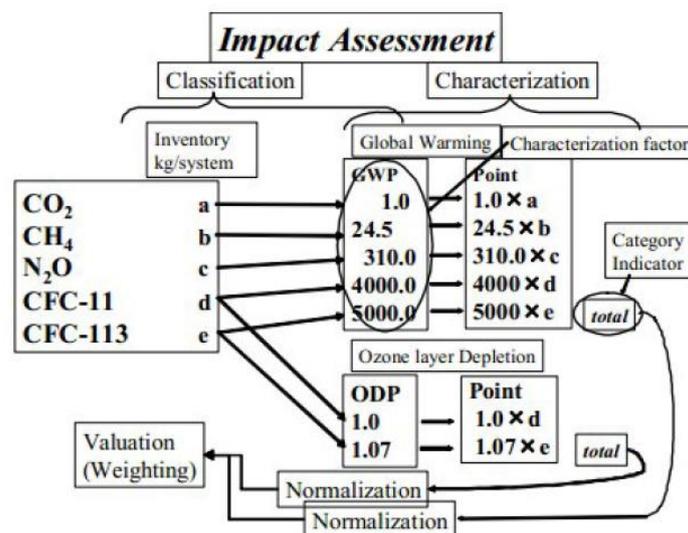
lingkungan yang potensial. Gambar 16 menunjukkan prosedur umum dari penilaian dampak dengan mengambil pemanasan global dan penipisan lapisan ozon sebagai contoh. Nilai numerik yang mengungkapkan dampak lingkungan yang potensial dari emisi, seperti potensi pemanasan global atau *global warming potential* (GWP), sering digunakan untuk faktor karakterisasi.

4. Interpretasi atau analisis perbaikan (*Improvement Analysis*)

Pada tahapan ini dilakukan interpretasi hasil, evaluasi, dan analisis terhadap usaha-usaha yang dapat dilakukan untuk perbaikan. Di dalam LCA, hasil yang dicapai bisa berbeda tergantung pada ruang lingkup studi, batasan sistem, dan analisis inventori, dan pilihan faktor-faktor karakterisasi pada analisis inventori. Dalam analisis inventori, hasil emisi dan konsumsi sumber daya dinyatakan oleh nilai numerik tunggal. Namun, setiap data yang proses mengalami kesalahan pengukuran dan kesalahan estimasi. Dalam standar ISO, perlu untuk mengevaluasi kualitas data menggunakan teknik untuk menentukan efek dari kesalahan data seperti pemeriksaan sensitivitas dan analisis ketidakpastian.

Pendekatan LCA juga dapat dipergunakan untuk menilai kinerja sistem pengelolaan sampah (Clearly, 2009). Setiap produk mempunyai daur hidup, mulai dengan ekstraksi sumber daya, proses produksi, konsumsi, dan aktivitas akhir (pengumpulan, penyortiran, pemanfaatan kembali, daur ulang, dan pembuangan limbah). Semua aktivitas ini akan menghasilkan dampak lingkungan karena pengaruh konsumsi sumber daya, emisi dari bahan-bahan yang digunakan

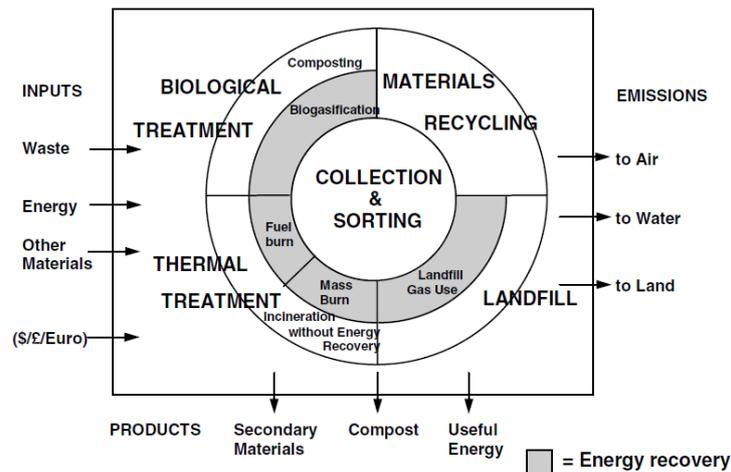
ke lingkungan alam, dan perubahan lingkungan lainnya. Dengan LCA, sistem pengelolaan sampah dapat dihitung pemakaian sumber dayanya dan emisi yang dilepaskannya ke lingkungan (ke udara, air, dan tanah) baik melalui sistem utama pengelolaan sampah maupun sistem lain yang terkait dengan pengelolaan sampah seperti daur ulang dan konversi sampah menjadi energi (Kirkeby *et al*, 2006 dan Velumani *et al.*, 2007).



Gambar 16. Prosedur penilaian dampak pemanasan global (Yokoyama, 2008)

Secara skematis, batasan sistem untuk pengelolaan sampah terpadu diilustrasikan pada Gambar 17. Pada pengelolaan sampah, LCA dimulai pada saat sampah dibuang di wadah atau tong sampah dan berakhir apabila sampah dikirim ke TPA atau dibakar (Velumani *et al.*, 2007, McDougall *et al.*, 2001, dan Konstadinos, 2011). Selain sampah itu sendiri, masukan yang lain pada sistem adalah energi dan material lain (bensin, solar, dll). Keluaran dari sistem adalah produk material yang berguna termasuk kompos, emisi (ke udara dan air), dan

material lain yang tidak dapat diproses (*inert*). Energi juga bisa dihasilkan dari sistem bila sampah diubah menjadi energi. Hasil LCA akan digunakan untuk mengevaluasi perencanaan sistem pengelolaan sampah kota sesuai target yang telah ditentukan.



Gambar 17. Batasan sistem untuk LCA pengelolaan sampah (McDougall *et al.*, 2001)

7. Sistem Dinamik

Jejak karbon pengelolaan sampah dimodelkan dengan sistem dinamik. Sistem pengelolaan sampah merupakan sistem yang dalam keadaan dinamik. Menurut Purwanto (2005), keadaan dinamik merupakan suatu keadaan sistem yang selalu berubah terhadap waktu. Sistem dinamik yang pada awalnya dikembangkan oleh Jay Forrester tahun 1963 di Massachusetts Institute of Technology (MIT), adalah istilah yang diberikan untuk mempelajari perilaku dinamis dari berbagai sistem yang kompleks untuk memecahkan masalah dinamika industri (Muhammadi *et al.*, 2001). Pada akhirnya sistem dinamik diakui sebagai alat yang baik untuk memecahkan masalah-masalah lain dalam lingkup bidang yang lain termasuk sosial, ekonomi, manajemen, dan lingkungan

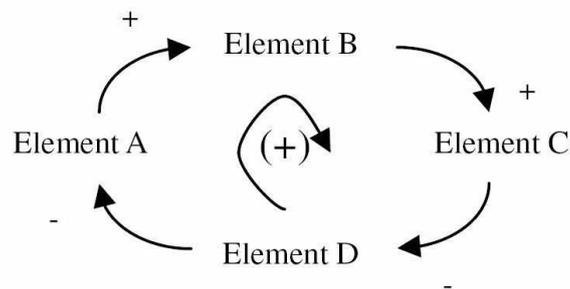
hidup. Beberapa penelitian di bidang pengelolaan sampah yang menggunakan pendekatan sistem dinamik antara lain adalah Sufian & Bala (2006), Talyan *et al.* (2007) dan Surjandari *et al.* (2009). Dengan sistem dinamik, pendekatan kesisteman yang menyeluruh dan terpadu mampu menyederhanakan masalah yang rumit tanpa kehilangan esensi atau unsur utama dari obyek yang menjadi perhatian.

Sasongko (2005) menjelaskan bahwa dengan sistem dinamik dapat diketahui perubahan-perubahan yang terjadi selama kurun waktu tertentu, bukan hanya pada suatu saat dan siklus saja. Perubahan yang terjadi selama kurun waktu dapat terjadi dengan tenggang waktu. Umpan balik adalah salah satu ciri dalam model dinamik dimana umpan balik ini merupakan penerusan pengembalian informasi yang dicirikan oleh beberapa gelung (*loop*) yang saling berkaitan dan merupakan hubungan sebab-akibat. Sekuen yang tertutup dari sebab-akibat merupakan jalur tertutup dari tindakan dan informasi. Himpunan dari gelung-gelung umpan balik ini merupakan suatu sistem umpan balik.

Struktur sistem dinamik, seperti diuraikan oleh Chaerul *et al.* (2008), diwakili oleh diagram lingkaran kausal atau *causal loop diagrams* (CLD) atau kadang-kadang disebut diagram pengaruh. Diagram *causal loop* memainkan dua peran penting dalam dinamika sistem, yaitu: (1) berfungsi sebagai sketsa awal dari hipotesis kausal selama pengembangan model, dan (2) menyederhanakan representasi model. Diagram ini adalah alat untuk mengidentifikasi, menganalisis dan mengkomunikasikan struktur lingkaran umpan balik (*feedback*) secara sistematis. Diagram ini mencakup elemen-elemen dan panah (yang disebut

hubungan sebab akibat) yang menghubungkan elemen-elemen ini bersama-sama dengan tanda polaritas (+ atau -) pada setiap hubungan (Gambar 18). Tanda-tanda ini memiliki arti sebagai berikut.

1. Hubungan sebab akibat dari satu elemen A ke elemen yang lain B adalah positif (yaitu, +) jika (a) A menambah B, atau (b) perubahan A menghasilkan perubahan B dalam arah yang sama.
2. Hubungan sebab akibat dari satu elemen A ke elemen yang lain B adalah negatif (yaitu, -) jika (a) mengurangi dari B, atau (b) perubahan A menghasilkan perubahan B dalam arah yang berlawanan.



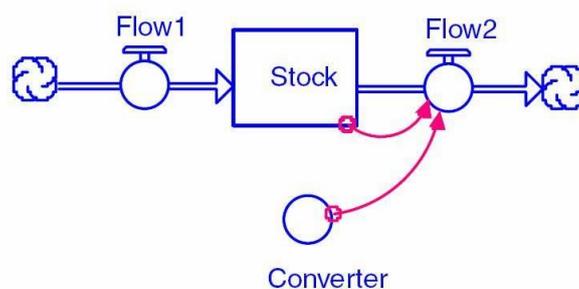
Gambar 18. Notasi *causal loop diagram* (Chaerul *et al.*, 2008)

Selain itu pada *causal loop* yang lengkap juga diberikan tanda-tanda di setiap hubungan (*link*). Tanda tersebut adalah sebagai berikut.

1. Sebuah umpan balik disebut positif (menguatkan) umpan balik, ditandai dengan tanda positif (+), jika berupa bilangan genap atau hubungan kausal positif. Dalam umpan balik positif sebuah gangguan awal mengarah ke perubahan lebih lanjut, menunjukkan adanya keseimbangan stabil.

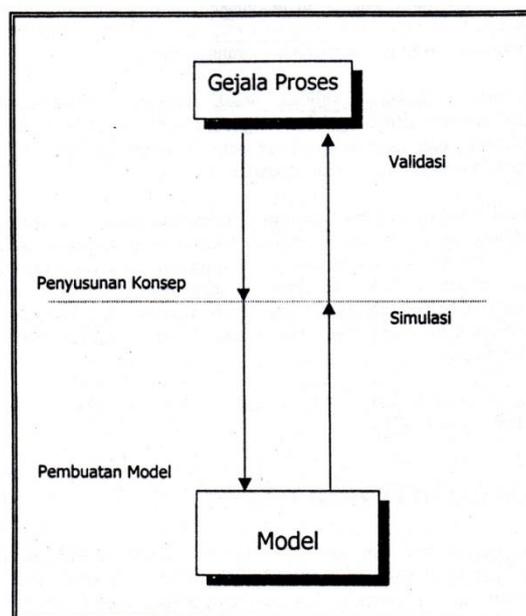
2. Sebuah umpan balik disebut negatif (*balancing*) umpan balik, ditandai dengan tanda negatif (-), jika berupa bilangan ganjil atau kausal negatif. Sebuah umpan balik negatif menunjukkan perilaku pencarian tujuan. Setelah gangguan, sistem berusaha untuk kembali ke situasi keseimbangan.

Chaerul *et al.* (2008) menguraikan lebih lanjut bahwa suatu model sistem dinamik dibangun oleh blok bangunan (variabel) yang dikategorikan sebagai *stock*, arus, konektor, dan konverter (Gambar 19). Variabel *stock* (disimbolkan dengan persegi panjang) adalah variabel tertentu yang mewakili akumulasi utama dalam sistem. Variabel aliran (disimbolkan dengan katup) adalah tingkat perubahan variabel *stock* dan mewakili kegiatan yang mengisi atau menguras *stock*. *Converter* (diwakili oleh lingkaran) adalah variabel antara yang digunakan untuk perhitungan lain-lain. Sedangkan konektor (diwakili oleh panah sederhana) adalah *link* informasi yang merupakan penyebab dan efek dalam struktur model. Pada pengelolaan sampah, blok bangunan pada Gambar 19 adalah sebagai berikut. Dari volume sampah yang dihasilkan (Flow1), volume sampah yang didaur ulang (Flow2) tergantung pada tingkat daur ulang (*Converter*) dan akumulasi volume total sampah (*Stock*).



Gambar 19. Elemen dasar sistem dinamik (Chaerul *et al.*, 2008)

Untuk memudahkan perumusan interaksi dalam sistem dinamis sehingga model yang dirancang bisa disimulasikan, maka diperlukan perangkat lunak (*software*) yang secara cepat dapat melihat perilaku dari model yang telah dibuat tersebut (Muhammadi *et al.*, 2001). Ada berbagai macam perangkat lunak yang dapat dipergunakan untuk keperluan ini seperti I-Think, Vensim, Powersim, dan Stella (Chaerul *et al.*, 2008). Dalam penelitian ini perangkat lunak yang dipergunakan adalah Stella Versi 9.1.3. Muhammadi *et al.* (2001) menguraikan lebih lanjut perilaku dinamis dikenali dari hasil simulasi model dengan bantuan perangkat lunak tersebut. Simulasi model bertujuan untuk memahami gejala atau proses, membuat analisis, dan meramalkan perilaku gejala atau proses tersebut di masa depan. Adapun simulasi model dilakukan melalui tahap-tahap sebagaimana disajikan dalam Gambar 20, yaitu: 1) penyusunan konsep, 2) pembuatan model, 3) simulasi, dan 4) validasi hasil simulasi.



Gambar 20. Tahapan simulasi mode dinamik (Muhammadi *et al.*, 2001)