

LIFE CYCLE ASSESSMENT PADA SISTEM PENGELOLAAN SAMPAH DI WILAYAH SARBAGITA, BALI

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEM IN SARBAGITA REGION, BALI

Made Gunamantha¹⁾ dan Sarto²⁾

¹⁾Jurusan Analis Kimia Universitas Pendidikan Ganesha Singaraja

²⁾Jurusan Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

¹⁾e-mail: md_gunamantha@yahoo.com

Abstract

The requirement of reliable and scientific based data with more information has induced requirement of decision making tool for solid waste management. This study used life cycle assessment (LCA) methodology as environmental analysis tool for comparing different scenarios for municipal solid waste management. The scenarios which were considered in this study included: landfilling without energy recovery as a representative of existing solid waste management, landfilling with energy recovery, combination of incineration and anaerobic digestion, combination of gasification and anaerobic digestion, direct incineration, and direct gasification. A case study in SARBAGITA region in the Province of Bali is discussed. One tonne of treated solid waste was defined as a functional unit of the systems studied. The Life Cycle Inventory (LCI) analysis was done by including field and laboratory survey to characterize solid waste in area study and using emission factors which were adopted from literature to estimate environmental burdens for each scenario. The inventory results were classified into impact categories, i.e. global warming, acidification, eutrophication, and photochemical oxidant formation. The indicators of categories were quantified by using the equivalence factors of relevant emissions to determine the potential of environmental impact in each scenario. Results of the study showed that in all of the impact categories, the direct gasification scenario had the best environmental profile. A sensitivity analysis was also conducted to examine changes in outcomes of a variety of organic bio-waste inputs, which had no significant effect on the overall results.

Keywords: assessment, impact, inventory, life cycle, management, scenario, solid waste.

1. PENDAHULUAN

Life cycle assessment (LCA) telah diakui sebagai alat analisis untuk mengevaluasi berbagai strategi pengelolaan sampah (Ekvall *et al.*, 2007). Menurut Ekvall *et al.* (2007) LCA sebagai alat analisis yang memungkinkan untuk membandingkan kinerja lingkungan berbagai pilihan pengelolaan sampah, baik untuk aliran produk tertentu maupun sampah campuran.

Penelitian ini bertujuan mengaplikasikan pendekatan metodologi LCA untuk menganalisis potensi dampak lingkungan berbagai skenario pilihan pengelolaan sampah

perkotaan. LCA dalam pengelolaan sampah telah diimplementasikan baik di negara yang sudah berkembang (Thorneloe, Weitz, dan Jambeck, 2007), maupun sedang berkembang (Liamsanguan dan Gheewala, 2008). Walaupun demikian hasil dari penelitian tersebut tidak dapat digeneralisasi karena karakteristik sampah sangat tergantung pada kondisi lokal. Karakteristik sampah menentukan jumlah polutan yang diemisikan (Bjarnadóttir *et al.*, 2002) dan energi yang dapat dihasilkan (Tchobanoglous, Theisen, dan Vigil, 1993).

Dalam penelitian ini karakteristik sampah yang dikelola di wilayah SARBAGITA dipilih

untuk dianalisis sesuai dengan skenario-skenario pengelolaan sampah yang dikembangkan. SARBAGITA adalah akronim dari Kota Denpasar, Kabupaten Badung, Gianyar, dan Tabanan yaitu satu pemerintah kota dan tiga kabupaten yang ada di Propinsi Bali. Pesatnya perkembangan yang terjadi di Kota Denpasar berakibat terbentuknya wilayah terbangun aglomerasi perkotaan dimana berbagai aktivitas antar kota telah saling melampaui lintas batas. Wilayah kota dan kabupaten yang terletak di bagian Bali Selatan tersebut telah dihuni oleh 1,63 juta jiwa penduduk. Laju pertumbuhan ekonomi di wilayah ini selama lima tahun terakhir rata-rata mencapai 4,41% dengan kontribusi konsumsi rumah tangga terhadap Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) 54,17%. Pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi tersebut menyebabkan peningkatan timbulan sampah. Terkait dengan persoalan tersebut, pemerintah Propinsi Bali telah menginisiasi pembentukan Badan Kebersihan Bersama SARBAGITA (BKPS) yang memfokuskan diri pada koordinasi sistem pengelolaan sampah bersama. Bahkan BKPS telah mengupayakan sistem pengelolaan sampah untuk energi dengan memadukan teknologi gasifikasi dan *anaerobic digestion*. Upaya tersebut saat ini masih dalam tahap konstruksi, namun perlu dilakukan pengkajian dari aspek lingkungan dalam perspektif siklus hidup pengelolaan sampah. Hal ini penting karena hingga saat ini wilayah SARBAGITA masih memanfaatkan tiga TPA (TPA Suwung, Temesi, dan Sembung Gede) sebagai fasilitas pengelolaan sampah. Dalam kaitan tersebut, studi ini diharapkan dapat menyediakan informasi dalam perspektif global bagi pembuat keputusan.

2. METODA

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti prosedur LCA. Struktur dari LCA terdiri dari empat fase (ISO 14040, 1997): (1) penentuan tujuan dan ruang lingkup, yaitu menentukan tujuan studi, unit

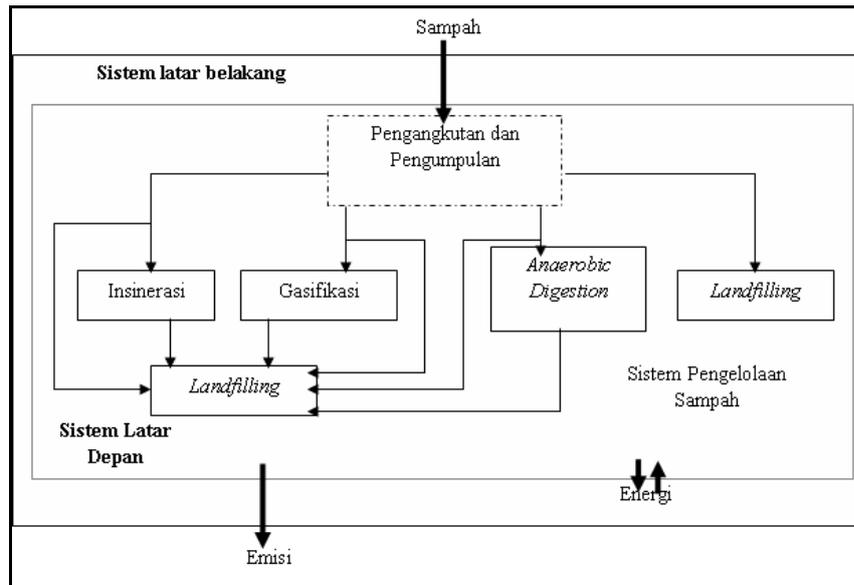
fungsi dan batasan sistem demikian pula pilihan pengolahan yang dibandingkan; (2) *Life cycle inventory* (LCI) bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi aliran bahan, energi, dan emisi yang dilepaskan ke lingkungan. (3) *Life cycle impact assessment* (LCIA), mengklasifikasikan data LCI ke dalam kategori dampak dan digabungkan sehingga diperoleh suatu indikator kategori dampak. Indikator-indikator tersebut merepresentasikan potensi dampak lingkungan dari kategori dampak. (4) *Interpretation*, bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi informasi dari hasil LCI dan LCIA sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup yang telah ditentukan.

Penelitian dilakukan dengan mengkombinasikan antara studi literatur dengan pengumpulan data primer. Perhitungan-perhitungan untuk melakukan fase LCI dan LCIA dalam LCA menggunakan faktor emisi dan data-data yang relevan dari berbagai metoda pengolahan yang dilibatkan.

Penentuan Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan aplikasi LCA dalam penelitian ini adalah untuk membandingkan berbagai alternatif pengelolaan sampah yang diusulkan untuk sampah yang dikelola di wilayah SARBAGITA terhadap sistem pengelolaan saat ini. Perbandingan tersebut berdasarkan pada indikator kategori dampak yang ditentukan yaitu pemanasan global, asidifikasi, eutrofikasi, dan pembentukan oksidasi fotokimia. Unit fungsi (uf) yang digunakan berdasarkan pada satu ton sampah yang dikelola tahun 2008 sebesar 500 ton/hari.

Ruang lingkup pada studi ini dibatasi oleh sistem latar depan (*foreground system*) dan sistem latar belakang (*background system*). Sistem latar depan hanya dibatasi pada proses pengolahan. Sedangkan sistem latar belakang hanya melibatkan produksi listrik konvensional untuk menunjukkan adanya interaksi dari energi yang dihasilkan (Gambar 1).



Gambar 1. Batasan sistem model (diadopsi dan dimodifikasi dari Diaz dan Warith, 2005)

Tabel 1. Distribusi sampah yang diolah pada masing-masing proses dalam skenario

Sistem Pengelolaan Sampah	Jumlah Sampah yang Diolah (ton/hari)					
	Skenario 0	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
<i>Landfilling</i>	500	-	50	50	-	-
<i>Landfilling</i> dengan pemungutan energi	-	500	-	-	-	-
Insinerasi	-	-	200	-	500	-
Gasifikasi	-	-	-	200	-	500
<i>Anaerobic Digestion</i>	-	-	250	250	-	-

Life Cycle Inventory

Sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 1, skema pengelolaan sampah tidak hanya berfungsi untuk mengolah sampah tetapi juga memproduksi energi listrik. Dalam hal ini, energi listrik yang dihasilkan diasumsikan untuk menggantikan produksi listrik secara konvensional dalam jumlah yang ekuivalen. Oleh karena itu penghindaran emisi dari produk listrik konvensional dilibatkan dengan mengurangi emisi ini dari emisi yang dihasilkan skema. Dalam upaya tersebut, produksi listrik pada jaringan Jawa Madura Bali (JAMALI) diasumsikan digunakan terutama yang diproduksi dengan bahan bakar fosil gas alam 18,74%, batubara 53,57%, dan minyak berat 27,69% (PLN, 2006). Faktor emisi dari campuran bahan bakar tersebut diperoleh dari literatur (Diaz dan Warith, 2005).

Proses-proses yang dilibatkan dalam model ini adalah insinerasi, gasifikasi, dan *anaerobic digester*. Skenario yang dipertimbangkan dan

distribusi sampah yang diolah ditunjukkan dalam Tabel 1. Total sampah yang diolah sesuai dengan catatan yang tersedia di masing-masing lokasi TPA, 500 ton/hari pada tahun 2008.

Tahapan ini melibatkan dua aktivitas utama yaitu pengumpulan data dan perhitungan untuk menentukan beban lingkungan maupun aliran energi dari sistem yang diamati. Pengumpulan data meliputi karakteristik sampah dan data lain yang diperlukan untuk menentukan inventori (beban lingkungan). Data karakteristik yang berkaitan dengan komposisi komponen-komponen sampah dikumpulkan melalui pengamatan langsung di TPA Suwung, Temesi, dan Sembung Gede. Pemeriksaan laboratorium dilakukan untuk menentukan analisis *proximate*, *ultimate*, dan nilai kalor komponen sampah (Tabel 2). Komponen-komponen sampah selain organik/*biowaste* dikelompokkan sebagai bahan yang mudah dibakar.

Tabel 2. Karakteristik aliran sampah yang dikelola di wilayah SARBAGITA

Parameter	Satuan	Jenis Sampah						
		Plastik	Organik/biowaste	Kayu	Kertas	Tekstil	Karet dan Kulit	Pembalut
Komposisi****	% berat	11,95	68,76	1,20	6,09	5,80	0,76	1,79
Analisis proksimat								
Kadar air	% berat	2,76	67,55	25,27	8,59	17,67	1,50	13,39
Total solid (TS)	% berat	97,25	32,46	74,73	91,42	82,33	98,51	86,61
Volatile matter (Vm)	% bk	75,97	49,55	51,05	75,23	75,97	68,28	39,77
Abu	% bk	7,63	12,56	18,78	13,26	4,08	27,77	48,18
Karbon tetap (FC)	% bk	14,43	8,32	11,48	7,84	12,55	2,92	5,72
Analisis ultimat								
C-bio	% bk	0,00	40,42	4,53	32,53**	35,27**	40,80**	10,88***
C-fosil	% bk	61,58*	-	-	0,81**	23,51**	17,79**	19,69***
C	% bk	61,58*	40,42	44,53	33,34*	58,78	58,59*	30,58
H	% bk	7,39*	6,26	5,56	5,31	3,84	7,22*	4,09
N	% bk	0,00	4,77	2,68	1,98	1,84	4,82*	0,07
S	% bk	0,00	0,43	0,12	0,32	0,13	0,16*	0,00
O	% bk	23,40*	35,57	28,33	45,80	31,34	4,65*	0,00
Cl	Gr/kg	1,52	10,27	3,71	0,78	4,53	9,58	3,04
Nilai kalor	GJ/ton	36,38	3,86	10,87	13,51	15,35	19,97	23,67

* Tchobanoglous, Theisen, dan Vigil. (1993) dengan penyesuaian terhadap kadar abu hasil pengamatan

** IPCC (2006)

*** Bjarnadóttir *et al.* (2002)

**** Sisanya adalah logam, gelas, bahan berbahaya, dan inert

Perhitungan dalam LCI dilakukan dengan menghubungkan semua beban lingkungan maupun produk terhadap masukan. Hal ini dilakukan dengan menggunakan suatu vektor yang mengandung informasi tentang emisi ataupun produk yang mungkin. Setiap metoda pengolahan mempunyai suatu vektor yang terkait dengan emisi ataupun produk. Vektor ini adalah multi dimensi dimana masing-masing dimensi berkaitan dengan emisi atau produk tertentu. Vektor-vektor tersebut dapat berupa faktor emisi ataupun faktor efisiensi untuk emisi atau produk atau keluaran tertentu. Setiap aliran massa (kg) dalam proses harus dikaitkan dengan vektor (v) dimana elemen-elemen dinyatakan dalam massa (kg polutan/kg masukan) atau satuan lainnya (misal: m³ CH₄/kg VS).

Pernyataan berikut menunjukkan suatu vektor (v) dimana beban lingkungan dan produk digabungkan bersama.

$$v = \begin{pmatrix} kg / kg \\ m^3 / kg \\ Limbah\ padat \\ dll \end{pmatrix}$$

Aliran massa M (kg) atau energi E (kw) dari suatu proses dikalikan dengan vektor terkait

menghasilkan jumlah emisi atau produk P dari setiap proses.

Emisi yang diestimasi pada penelitian ini dibatasi pada gas CO₂, CO, CH₄, N₂O, NO₂, NH₃, SO₂, H₂S, HF, HCl, dan NMVOC. Data parameter-parameter yang diperlukan dalam model diadopsi dan dikembangkan dari berbagai literatur. Pada bagian berikut diuraikan faktor-faktor emisi yang diadopsi langsung dan yang ditentukan dari elemen indikator. Diuraikan pula cara melakukan estimasi emisi serta acuan yang digunakan pada masing-masing skenario yang diusulkan.

Skenario 0. Produksi gas *landfill* diestimasi dengan menggunakan *Landfill Gas Emissions Model* (LandGEM) yang menyediakan alat estimasi untuk mengkuantifikasi produksi gas *landfill* dari *landfill*. LandGEM adalah model dekomposisi orde satu yang mengestimasi laju gas *landfill* berdasarkan potensi kapasitas metana (Lo m³ CH₄/ton) yang dihasilkan dari sampah dan laju pembusukan k (thn⁻¹). Masukan yang diperlukan dalam model ini adalah tahun *landfill* dibuka dan ditutup, jumlah sampah yang ditimbun per tahun, nilai lokal konstanta laju timbulan metana (k), potensi kapasitas menghasilkan metana (Lo). Dalam penelitian ini k (thn⁻¹) ditentukan mengacu pada nilai yang ditetapkan

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). L_0 ditentukan sebagai fungsi dari kandungan DOC (*Degradable Organic Carbon*). DOC ditentukan berdasarkan kandungan C-bio dari komponen-komponen sampah. Estimasi L_0 dilakukan dengan menggunakan model IPCC (IPCC, 2006).

LandGEM hanya mengestimasi produksi gas-gas yang terkandung dalam gas *landfill*, tidak mengestimasi emisi dari gas-gas tersebut ke atmosfer (USEPA, 2005). Oleh karena itu metana yang diemisikan dihitung berdasarkan pada estimasi produksi metana dengan mempertimbangkan jumlah metana yang dipungut dan teroksidasi. Artinya, emisi ditentukan berdasarkan hasil dari perhitungan model LandGEM dengan mengurangi metana yang dipungut pada sistem pemungutan dan faktor oksidasi yang digunakan. Dalam skenario ini 10% dari metana diasumsikan mengalami oksidasi pada penutup permukaan *landfill* (IPCC, 2006).

Kandungan gas metana dalam gas *landfill* diasumsikan 50%. Sedangkan konsentrasi gas-gas lain seperti CO, H₂S, NMVOC ditentukan berdasarkan konsentrasinya dalam gas *landfill* sesuai dengan yang ditetapkan dalam model LandGEM. Emisi gas lainnya (HCl dan HF) yang tidak diestimasi dalam model LandGEM ditentukan dengan menggunakan faktor emisi yang diadopsi dari Manfredi dan Christensen (2008) berturut-turut 6 dan 2 mg/(m³ gas *landfill*) untuk HCl dan HF. Emisi dari peralatan berbahan bakar diesel yang digunakan dalam operasional *landfill* untuk penyebaran dan pemadatan dihitung dengan menggunakan faktor emisi dari Diaz dan Warith (2005).

Mengingat emisi dari gas *landfill* terjadi dalam rentang waktu yang lama maka analisis dilakukan hingga periode 100 tahun (termasuk 30 tahun masa operasional *landfill*). Emisi dihitung dengan mengintegrasikan potensi emisi selama 100 tahun. Hal ini konsisten dengan Diaz dan

Warith (2005) dan Manfredi dan Christensen (2008). Cara penentuan ini juga dilakukan pada skenario-skenario lainnya baik dengan tujuan penggunaan metoda *landfill* sebagai proses utama maupun untuk pengelolaan sampah sisa dan/atau limbah padat dari sisa pengolahan utama.

Skenario 1. Dalam skenario ini, 50% dari gas *landfill* diasumsikan dikumpulkan dan diolah untuk menghilangkan H₂S sehingga diperoleh gas *landfill* yang kaya CH₄ ± 97%. Pengumpulan dilakukan pada tahun ke-11 hingga tahun ke-40 (termasuk 10 tahun pasca operasional *landfill*). Pertimbangan ini didasarkan pada hasil estimasi jumlah produksi gas *landfill* dengan menggunakan LandGEM. Gas *landfill* (biogas) selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin gas dalam upaya menghasilkan listrik dengan kapasitas yang ditentukan. Kandungan energi dalam biogas dengan CH₄ 97% ini ditetapkan sebesar 36,60 MJ/m³ (Murphy dan Power, 2007). Efisiensi konversi menjadi energi listrik ditetapkan 30% mengacu pada asumsi yang digunakan oleh Liamsangan dan Gheewala (2008) 35% dan Cherrubini, Bargigli, dan Ulgiati (2008) 28%. Kelebihan biogas dibakar dan dilepaskan langsung ke atmosfer. Demikian pula sisa dari biogas yang tidak dikumpulkan, 10% diantaranya teroksidasi dan sisanya dilepaskan langsung ke atmosfer.

Faktor emisi dari pembakaran biogas dalam turbin gas meliputi CH₄ (430 mg/MJ), NO_x (100 mg/MJ), NMVOC (4 mg/MJ), CO (250 mg/MJ) diadopsi dari Baky dan Erisson (2003). Sedangkan HCl (38 mg/Nm³), SO₂ (6 mg/Nm³) diadopsi dari McDougall *et al.* (2001). Faktor emisi pembakaran gas *landfill* dalam nyala api terbuka meliputi CO (39,70 g/kg), NO_x (162 mg/kg), dan SO₂ (931 mg/kg) diadopsi dari Bjarnadotir *et al.* (2002). Emisi CO₂ baik yang dihasilkan dari pembakaran biogas dalam turbin gas maupun dalam nyala api terbuka tidak dipertimbangkan berkontribusi terhadap efek gas rumah kaca (Cherubini, Bargigli, dan Ulgiati, 2008).

Emisi dari operasional *landfill* ditentukan dengan cara yang sama dengan skenario 0. Kebutuhan energi internal mengacu pada Boer, Boer, dan Jager (2005).

Skenario 2. Skenario ini merupakan kombinasi antara pengolahan secara anaerobik dengan insinerasi. Skenario ini menyandarkan pada fasilitas pemilahan untuk memisahkan fraksi organik/*biowaste* sampah dengan fraksi lainnya yang dalam penelitian ini disebut fraksi anorganik. Demikian pula terhadap logam, gelas, bahan berbahaya, dan inert. Fraksi organik/*biowaste* terutama terdiri dari sisa makanan, daun, dan rumput. Adapun plastik, kertas, kayu, tekstil, karet dan kulit, serta *diapers* dan pembalut dikategorikan sebagai bahan yang mudah dibakar karena mempunyai nilai kalor yang tinggi.

Fraksi bahan organik yang telah dihancurkan diolah ke fasilitas pengolahan *anaerobic digestion* untuk menghasilkan biogas. Produksi biogas dikaitkan dengan efisiensi konversi biodegradabilitas dari *volatile solid (biodegradability volatile solid destroyed)* (Tchobanoglous, Theisen, dan Vigil, 1993 dan Murphy dan McKeogh, 2004). Komposisi CH₄ dalam biogas diasumsikan 60%. Sebagaimana dalam skenario 1, CH₄ dalam biogas ditingkatkan konsentrasinya dengan menyingkirkan gas-gas impuritis sebelum digunakan untuk menggerakkan turbin gas hingga konsentrasi CH₄ 97%. Efisiensi konversi energi ditetapkan 40% terhadap kandungan energi dalam gas dan kebutuhan energi internal 37% dari energi listrik yang dihasilkan (Borjesson dan Borglund, 2006). Faktor emisi dari operasional sistem *anaerobic digestion* dialokasikan berdasarkan kandungan *total solid*. Faktor-faktor emisi tersebut meliputi CO₂ (15 kg/ton TS), CH₄ (4 kg/ton TS), NO_x (46 kg/ton TS), CO (11 kg/ton TS), NMVOC (3 kg/ton TS) (Borjesson dan Borglund, 2006).

Fraksi bahan mudah dibakar dari sampah diteruskan ke fasilitas sistem insinerasi

dengan pemungutan energi listrik. Energi listrik yang dapat dipungut dari insinerasi dihitung berdasarkan kandungan *lower heating value* (LHV) dalam sampah sesuai dengan efisiensi pemungutan energi yang telah ditetapkan dan dikurangkan dengan kebutuhan internal (Ribber, Bhandar, dan Christensen, 2008). Efisiensi insinerasi diasumsikan 18% dan kebutuhan energi internal 15% dari energi listrik yang dihasilkan (Murphy dan McKeogh, 2004). Estimasi jumlah *ash* yang dihasilkan baik *bottom ash* maupun *ash* dari pengolahan *flue gas* mengacu pada Sundqvist (1999). Faktor emisi CO₂, SO₂, NO_x, N₂O, NH₃, dan HCl dari insinerasi ditentukan dengan pendekatan *product-related* sedangkan CO dan NMVOC ditentukan dengan pendekatan *process-related* (Sundqvist, 1999). Data koefisien transfer untuk C, N, Cl, dan S yang diperlukan mengacu pada teknologi *grate* dengan sistem pemurnian gas yang diperoleh dari Hellweg, Hofsteter, dan Hungerbuhler (2001).

Skenario 3. Dalam skenario ini proses insinerasi dalam skenario 2 digantikan dengan gasifikasi. Efisiensi gasifikasi diasumsikan 34% dan kebutuhan energi internal 20% dari energi listrik yang dihasilkan (Murphy dan McKeogh, 2004). Estimasi jumlah *char* yang dihasilkan ditentukan berdasarkan karbon tetap, abu, dan karbon dalam *volatile matter* yang tidak terkonversi (Jung dan Fontana, 2007). Teknologi gasifikasi adalah teknologi yang belum banyak diaplikasikan dalam pengelolaan sampah (Belgiorno *et al.*, 2003) sehingga ketersediaan data terutama yang berkaitan dengan estimasi emisi dari teknologi ini juga masih terbatas. Oleh karena itu hanya emisi CO, CO₂, SO₂, H₂S, NO_x yang ditentukan dari proses ini. Dalam hal ini faktor emisi CO₂, SO₂, H₂S, NO_x dari gasifikasi ditentukan dengan pendekatan *product-related* yaitu menggunakan koefisien transfer C, S, dan N pada teknologi *Thermoselcet* yang diperoleh dari Hellweg, Hofsteter, dan Hungerbuhler (2001). Adapun CO ditentukan analog dengan insinerasi.

Skenario 4. Dalam skenario ini sampah diarahkan langsung ke fasilitas insinerasi tanpa melalui pemilahan. Efisiensi konversi dan faktor konversi ditentukan dengan cara yang sama seperti insinerasi pada skenario 2.

Skenario 5. Dalam skenario ini sampah diarahkan langsung ke fasilitas gasifikasi tanpa melalui pemilahan. Efisiensi konversi dan faktor konversi ditentukan dengan cara yang sama seperti gasifikasi pada skenario 4.

Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Data beban lingkungan (emisi) yang dihasilkan dari tahap LCI diklasifikasi ke dalam kategori dampak pemanasan global, asidifikasi, eutrofikasi, dan pembentukan oksidan fotokimia. Emisi gas CO₂, CH₄, CO, NO_x dikelompokkan ke dalam emisi-emisi yang berkontribusi terhadap kategori dampak pemanasan global. H₂S, HCl, HF, SO_x, NO_x dikelompokkan ke dalam kategori dampak asidifikasi. NO_x dan NH₃ dikelompokkan ke dalam kategori dampak eutrofikasi. CO, NO_x, dan NMVOC dikelompokkan ke dalam kategori dampak pembentukan oksidan fotokimia. Selanjutnya indikator kategori dampak dihitung sesuai dengan faktor ekuivalensinya yang dinyatakan dalam massa emisi gas acuan per unit fungsi (uf). Indikator kategori dampak pemanasan global dinyatakan dalam CO₂-ekuivalen, asidifikasi dalam SO₄-ekuivalen, eutrofikasi dalam PO₄-ekuivalen, dan pembentukan oksidan fotokimia dalam ethena-ekuivalen (Guinée *et al.*, 2001).

3. HASIL ANALISIS

Beban Lingkungan dari Masing-masing Skenario

Data inventori emisi atau beban lingkungan dari masing-masing skenario ditunjukkan dalam Gambar 2a-2f. Nilai dalam kurung pada sumbu X menunjukkan faktor pengali untuk nilai pada sumbu Y. Kecuali dalam Gambar 2a, semua diagram menunjukkan adanya penghindaran beban. Hal ini karena

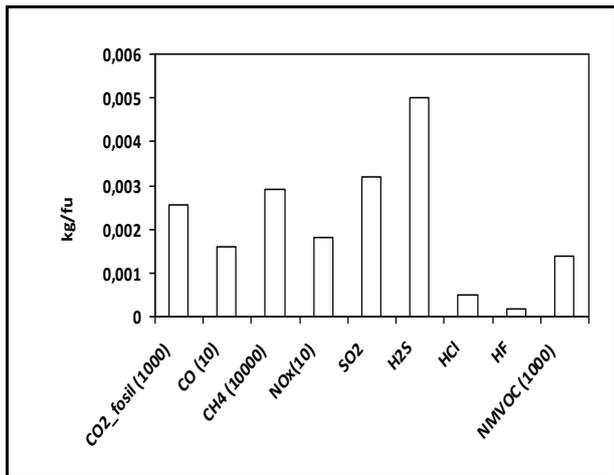
pada skenario 0 tidak dilakukan pemungutan energi sehingga kompensasi emisi dari skenario ini tidak diperoleh. Emisi gas CO₂ merupakan yang paling dominan dikontribusikan dari masing-masing skenario kecuali pada skenario 0 dan 1. Hal ini karena CO₂ yang dilepaskan dari proses *biogenik* maupun dari pembakaran metana yang dihasilkan pada skenario 0 dan 1 dipertimbangkan sebagai karbon netral. Skenario 2 dan 3 menghasilkan emisi CO₂ (463 kg/uf) yang lebih tinggi dibandingkan dengan skenario 4 dan 5 (332 kg/uf) sebagai akibat dari kandungan karbon fosil dalam komponen sampah yang mudah dibakar lebih besar dibandingkan dengan fraksi organik/*biowaste*. Walaupun demikian, skenario 3 dan 5 memiliki penghindaran terhadap emisi CO₂ lebih tinggi (728 dan 730 kg/uf) daripada yang diemisikan langsung. Nilai ini diperoleh dari kompensasi sesuai dengan jumlah energi yang dapat diperoleh. Keterangan untuk emisi lainnya analog dengan emisi CO₂ tetapi tidak ditunjukkan dalam artikel ini.

Indikator Kategori Dampak

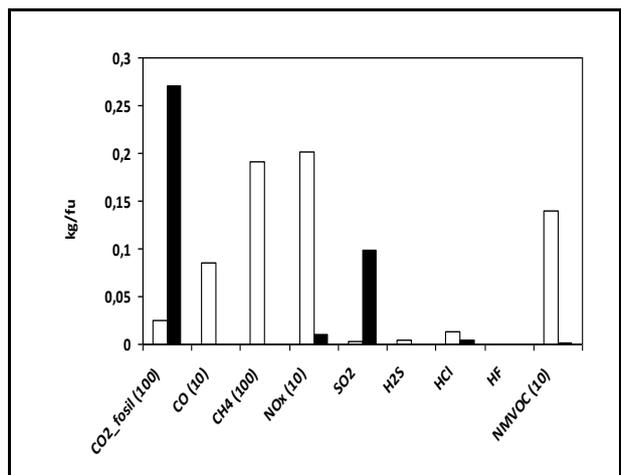
Indikator untuk masing-masing kategori dampak mengindikasikan potensi dampak dari setiap kategori dampak tersebut. Masing-masing potensi dampak (pemanasan global, asidifikasi, eutrofikasi, dan pembentukan oksidan fotokimia) yang ditunjukkan oleh masing-masing skenario diuraikan pada Gambar 3.

Potensi Pemanasan Global (*Global Warming Potential, GWP*)

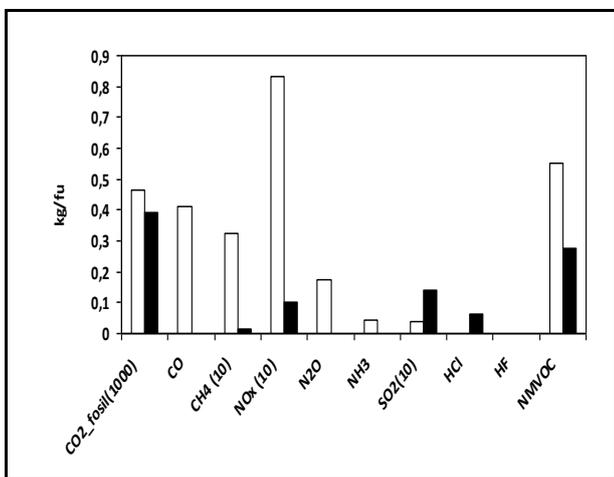
Gambar 3a menunjukkan GWP (dalam kg CO₂-ek/uf) dari masing-masing skenario. Kontribusi positif ditunjukkan oleh skenario 2 (192,70 kg CO₂-ek/uf) dan skenario 1 (378,69 kg CO₂-ek/uf). Walaupun demikian kedua skenario tersebut menunjukkan mitigasi GWP dibandingkan dengan pengelolaan yang ada saat ini (skenario 0) berturut-turut 68,55% dan 38,20%. Adapun kontribusi negatif



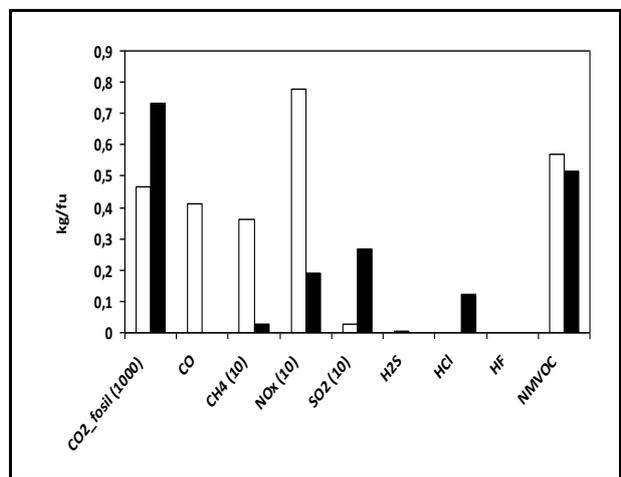
(a) Skenario 0



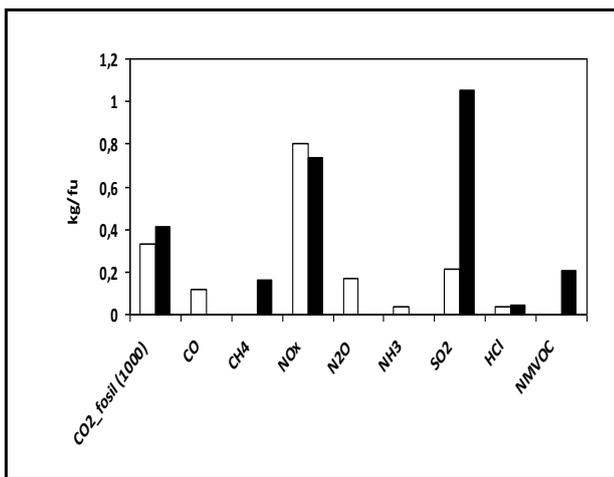
(b) Skenario 1



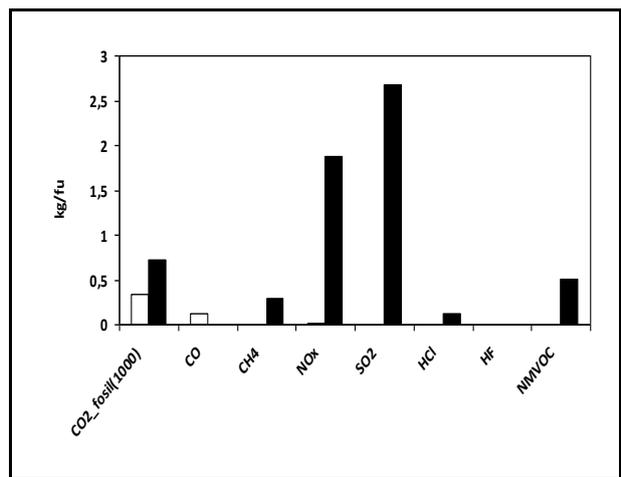
(c) Skenario 2



(d) Skenario 3



(e) Skenario 4

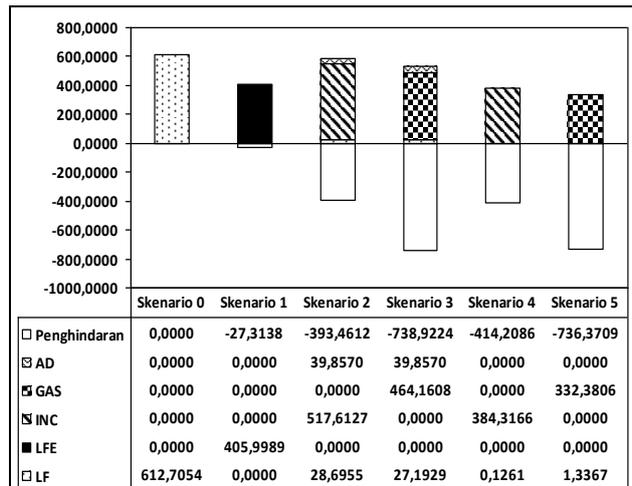


(f) Skenario 5

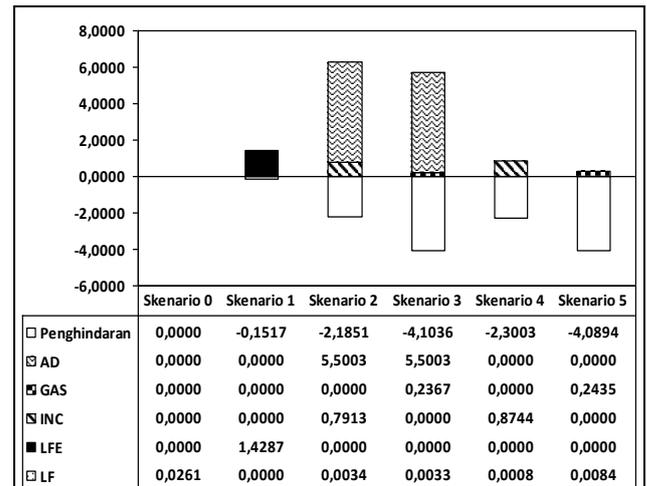
□ Emisi

■ Penghindaran emisi

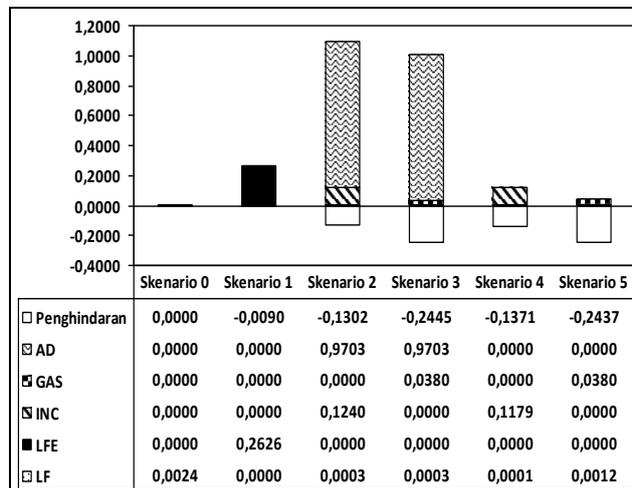
Gambar 2. Potensi dan penghindaran emisi dari masing-masing skenario



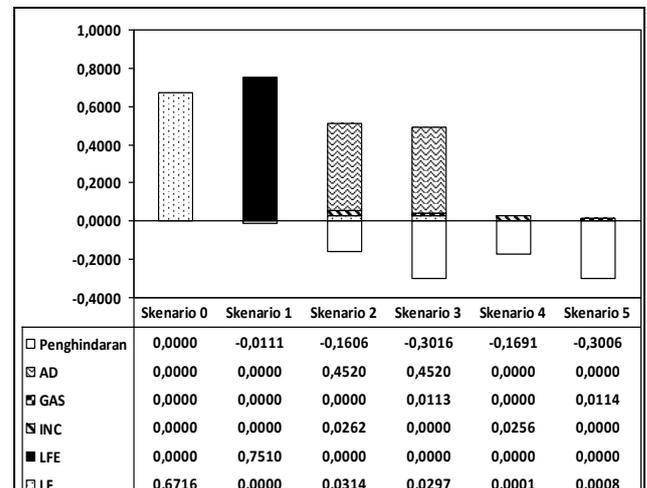
(a) Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi pemanasan global (GWP)



(b) Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi asidifikasi (AP)



(c) Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi eutrofikasi (EP)



(d) Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi pembentukan oksidan fotokimia (POP)

Keterangan: LF = *Landfilling* tanpa pemungutan energi
 LFE = *Landfilling* dengan pemungutan energi
 INC = *Insinerasi*
 GAS = *Gasifikasi*
 AD = *Anaerobic digestion*

Gambar 3. Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi dampak

ditunjukkan oleh skenario 5 (-402,65 kg CO₂-ek/uf), skenario 3 (-207,71 kg CO₂-ek/uf), dan skenario 4 (-29,77 kg CO₂-ek/uf). Kontribusi negatif menunjukkan bahwa terdapat penghindaran terhadap GWP dari skenario-skenario tersebut. Bila dibandingkan dengan

skenario dasar, skenario 3, 4, dan 5 menunjukkan penghindaran GWP masing-masing sebesar 133,90%, 104,86%, 165,72%. Bila perhatian hanya difokuskan pada indikator GWP, skenario 5 merupakan pilihan terbaik

Potensi Asidifikasi (*Acidification Potential, AP*)

Potensi asidifikasi (AP) dari skenario 2 ditemukan paling besar 4,88 (SO₂-ek/uf), diikuti oleh skenario 3 (1,64 SO₂-ek/uf), dan skenario 1 (1,28 SO₂-ek/uf) (Gambar 3b). Pada skenario 2 dan 3, proses *anaerobic digestion* (AD) merupakan kontributor utama terhadap AP. Adapun skenario 4 dan 5 menunjukkan penghindaran terhadap potensi asidifikasi masing-masing berturut-turut -1,42 dan -3,84 (SO₂-ek/uf). Penghindaran ini terutama disebabkan oleh kredit emisi sebagai kompensasi dihasilkannya energi listrik untuk menggantikan produksi listrik secara konvensional. Apabila kinerja lingkungan difokuskan pada indikator potensi asidifikasi, skenario 5 menunjukkan kinerja terbaik.

Potensi Eutrofikasi (*Eutrophication Potential, EP*)

Indikator dampak tertinggi dengan memperhatikan kategori dampak eutrofikasi (EP) ditunjukkan oleh skenario 2 (0,96 PO₄-ek/uf) selanjutnya diikuti oleh skenario 3 (0,76 PO₄-ek/uf), skenario 1 (0,25 PO₄-ek/uf), dan skenario 0 (0,0024 PO₄-ek/uf) (Gambar 3c). Penghindaran tertinggi terhadap potensi eutrofikasi ditunjukkan oleh skenario 5 (-0,20 PO₄-ek/uf) diikuti oleh skenario 4 (-0,02 PO₄-ek/uf). Kredit EP sebagai kompensasi energi listrik yang dihasilkan terhadap produksi listrik konvensional memberikan kontribusi terhadap penghindaran potensi eutrofikasi pada skenario 2 (-0,13 PO₄-ek/uf), skenario 3 (-0,24 PO₄-ek/uf), skenario 4 (-0,14 PO₄-ek/uf), dan skenario 5 (-0,24 PO₄-ek/uf). Walaupun demikian proses AD pada skenario 2 (0,97 PO₄-ek/uf) dan skenario 3 (0,97 PO₄-ek/uf) memberikan kontribusi yang lebih besar dibandingkan dengan kredit yang diperoleh dari produksi listrik. Bila perhatian hanya difokuskan pada indikator EP skenario 5 merupakan pilihan terbaik.

Potensi Pembentukan Oksidan Fotokimia (*Photochemical Oxidant Potential, POP*)

Kontribusi terhadap potensi oksidan fotokimia ditunjukkan dari yang tertinggi

berturut-turut oleh skenario 1 (0,74 kg ethena-ek/uf), skenario 0 (0,67 kg ethena-ek/uf), skenario 2 (0,35 kg ethena-ek/uf), dan skenario 3 (0,19 kg ethena-ek/uf) (Gambar 3d). Proses pengolahan *anaerobic digestion* (AD) menjadi kontributor utama pada skenario 2 dan 3. Skenario 4 dan 5 menunjukkan penghindaran terhadap oksidan fotokimia (POP) masing-masing -0,14 dan -0,29 (kg ethena-ek/uf). Sebagaimana dalam kategori-kategori dampak yang lain, hal ini terutama disebabkan oleh kredit emisi yang diperoleh karena dihasilkannya energi listrik. Apabila kinerja lingkungan difokuskan pada indikator POP, skenario 5 menunjukkan kinerja terbaik.

Berdasarkan hasil indikator kategori dampak menunjukkan bahwa hasil karakterisasi menjadi sulit untuk diinterpretasikan. Misalnya, indikator pemanasan global lebih tinggi pada suatu pilihan tetapi pada sisi lain indikator asidifikasinya lebih rendah dibandingkan dengan pilihan lainnya. Dalam penelitian ini pembobotan terhadap kategori dampak dilakukan untuk memperoleh nilai tunggal. Bobot untuk pemanasan global ditetapkan 4, asidifikasi 3, eutrofikasi 2, dan pembentukan oksidan fotokimia 1. Pemberian bobot tersebut didasarkan atas pertimbangan skala dampak yang ditimbulkan. Kategori dampak pemanasan global termasuk dalam skala dampak global sedangkan asidifikasi termasuk dalam skala dampak regional. Adapun eutrofikasi dan pembentukan oksidan fotokimia termasuk dalam skala dampak lokal. Walaupun demikian pemberian bobot untuk pembentukan oksidan fotokimia lebih rendah dibandingkan dengan eutrofikasi. Hal ini karena dampak pembentukan oksidan fotokimia dipertimbangkan kurang signifikan untuk Indonesia. Berdasarkan bobot nilai dari masing-masing kategori dampak tersebut maka total skor atau indeks lingkungan dari masing-masing skenario adalah 2.452, 1.520, 708, -824, -124, -1.623 berturut-turut untuk skenario 0, 1, 2, 3, 4, dan 5. Nilai positif menunjukkan adanya kontribusi dampak lingkungan dan nilai negatif menunjukkan

perolehan mitigasi dampak dari skenario terkait.

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas difokuskan pada variasi komposisi bahan organik dengan mengikuti pola variasi 60%; 65%; 68,76% (komposisi sampah saat ini sebagai acuan); 75%; dan 80%. Adapun fraksi lainnya mengikuti secara proporsional dari kondisi awal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi fraksi organik sampah tidak mempengaruhi urutan terhadap kinerja lingkungan (GWP). Skenario 5 tetap menunjukkan kinerja lingkungan terbaik baik dari sudut pandang GWP, AP, EP, dan POP.

4. KESIMPULAN

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa skenario 5 (Gasifikasi dan *Landfilling*) menunjukkan indikator dampak lingkungan terbaik pada semua kategori dampak yang ditentukan (pemanasan global, asidifikasi, eutrofikasi, dan pembentukan oksidan fotokimia). Data-data obyektif berkaitan dengan indikator lingkungan dari berbagai skenario alternatif pengelolaan sampah telah diperoleh dengan mengaplikasikan LCA. Oleh karena itu, sejalan dengan literatur hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa LCA dapat diterapkan sebagai alat penunjang keputusan dalam sistem pengelolaan sampah.

Dalam upaya untuk membangun informasi yang lebih lengkap dari sistem pengelolaan sampah diperlukan penelitian lebih lanjut dengan melibatkan kategori yang lebih banyak terutama yang berkaitan dengan toksisitas. Demikian pula aspek biaya termasuk ekonomi lingkungan harus dilibatkan dalam aplikasi LCA.

DAFTAR PUSTAKA

Baky, A. dan Erisson, O. (2003). System Analysis of Organic Waste Management in Denmark. Environmental Project No.

822. Danish Environmental Protection Agency.

Belgiorno, V., De Feo, G., Rocca, C.D., dan Napoli, R.M.A. (2003). Energy from Gasification of Solid Waste. *Waste Management*. 23. 1-15.

Bjarnadóttir, H.J., Guðmundur, B., Friðriksson, G.B., Johnsen, T., dan Sletsen, H. (2002). Guidelines for The Use of LCA in The Waste Management Sector. Nordtest Report TR 517.

Boer, D.E., Boer, D.J., dan Jager, J. (2005). Waste Management Planning and Optimization, Handbook for Municipal Waste Prognosis and Sustainability Assessment of Waste Management Systems. Ibidem Verlag, Stuttgart, Germany.

Borjesson, P. dan Borglund, M. (2006). Environmental Systems Analysis of Biogas Systems, Part I: Fuel-cycle Emissions. *Biomass and Bioenergy*. 30. 469-485.

Cherubini, F., Bargigli, S., dan Ulgiati S. (2008). Life Cycle Assessment of Urban Waste Management: Energy Performances and Environmental Impacts, The Case of Rome, Italy. *Waste Management*. 28. 2552-2564.

Diaz, R. dan Warith, M. (2005). Life-cycle Assessment of Municipal Solid Waste. Development of The WASTED Model. *Waste Management*. 26. 886-901.

Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., dan Finnveden, G. (2007). What Life Cycle Assessment Does and Does Not Do in Assessment of Waste Management. *Waste Management*. 27. 989-996.

Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Van Oers, L.,

- Sleeswijk, A.W., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., Van Duin, R., dan Huijbregts, M.A.J. (2001). *Life Cycle Assessment: an Operational Guide to The ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Hardbound, ISBN 1-4020-0228-9; Paperback, ISBN 1-4020-0557-1).
- Hellweg, S., Hofsteter, B.T., dan Hungerbuhler, K. (2001). Modeling Waste Incineration for Life Cycle Inventory Analysis in Switzerland. *Environmental Modeling and Assessment*. 6. 219-235.
- IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES Japan.
- ISO 14040 (1997). *Environmental Management, Life Cycle Assessment, Principles and Framework*. International Standards Organization. Geneva, Switzerland.
- Jung, C.G. dan Fontana, A. (2007). Show Pyrolysis vs Gasification: Mass and Energy Balances Using a Predictive Model. CEB Working Paper No. 07/026 2007. Université Libre de Bruxelles, Solvay Business School, Centre Emile Bernheim ULB CP 145/01 50, Avenue F.D. Roosevelt 1050 Brussels, Belgium.
- Liamsanguan, C. dan Gheewala, S.H. (2008). The Holistic Impact of Integrated Solid Waste Management on Greenhouse Gas Emissions in Phuket. *Journal of Cleaner Production*. 16. 1865-1871.
- Manfredi, S. dan Christensen, T.H. (2008). Environmental Assessment of Solid Waste Landfilling Technologies by Means of LCA Modeling. *Waste Management*. 29. 32-43.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., dan Hindle, P. (2001). *Integrated Solid Waste Management a Life Cycle Inventory*. Blackwell Science Ltd., United Kingdom.
- Murphy, J.D. dan Power, N. (2007). A Technical, Economic, and Environmental Analysis of Energy Production from Newspaper in Ireland. *Waste Management*. 27. 177-192.
- Murphy, J.D. dan McKeogh, E. (2004). Technical, Economic, and Environmental Analysis of Energy Production from Municipal Solid Waste. *Renewable Energy*. 29. 1043-1057.
- PLN (2006). Statistik PLN. Perusahaan Listrik Negara. <http://www.pln.go.id>.
- Ribber, C., Bhandar, G.S., dan Christensen, T.H. (2008). Environmental Assessment of Waste Incineration in a Life Cycle Perspective (EASEWASTE). *Waste Management and Research*. 26. 96-103.
- Sundqvist, J.O. (1999). *Life Cycle Assessment and Solid Waste Guidelines for Solid Waste Treatment and Disposal in LCA*. IVL, Swedish Environmental Research Institute Stockholm, Sweden.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., dan Vigil, S.A. (1993). *Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill International Editions, New York.
- Thorneloe, S.A., Weitz, K., dan Jambeck, J. (2007). Application of The US Decision Support Tool for Materials and Waste Management. *Waste Management*. 27. 1006-1020.
- USEPA (2005). *Landfill Gas Emission Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington D.C., 2046.