

**LIFE CYCLE ASSESSMENT PILIHAN PENGELOLAAN SAMPAH :
STUDI KASUS WILAYAH KARTAMANTUL PROPINSI D.I. YOGYAKARTA**
*(Life Cycle Assessment of Solid Waste Management Options :
Case Study of the KARTAMANTUL Regions, Province of D.I. Yogyakarta)*

Made Gunamantha*, Chafid Fandeli, Shalihuddin Djalal Tandjung**, Sarto****

Ilmu Lingkungan Sekolah Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada

*Universitas Pendidikan Ganesha Singaraja

**Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

md_gunamantha@yahoo.com

Diterima: 26 Maret 2010

Disetujui: 3 Mei 2010

Abstrak

Berbagai skenario sistem pengelolaan sampah telah dikembangkan dan dibandingkan untuk sampah yang dikelola di wilayah KARTAMANTUL dengan menggunakan metodologi *life cycle assessment* (LCA). Metode pengelolaan sampah yang dipertimbangkan dalam skenario adalah *landfilling* tanpa atau dengan pemungutan energi, insinerasi, gasifikasi, dan *anaerobic digestion*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai indikator dampak dalam menentukan pilihan sistem pengelolaan sampah yang paling sesuai dari aspek lingkungan. Jumlah sampah yang dikelola ditetapkan sebagai unit fungsi dari sistem yang diamati. *Life cycle inventory* (LCI) dilakukan dengan melibatkan asumsi-asumsi pada masing-masing metode pengolahan dalam sistem pengelolaan sampah. Produksi energi dan inventori emisi dihitung dan diklasifikasikan ke dalam kategori dampak pemanasan global, asidifikasi, eutrofikasi, dan pembentukan oksidan fotokimia. Indikator kategori dampak dikuantifikasi dengan faktor ekuivalensi dari emisi yang sesuai untuk mengembangkan kinerja lingkungan dari masing-masing skenario. Pada sebagian besar kategori dampak gasifikasi langsung ditemukan sebagai metode pengelolaan yang paling layak, kecuali untuk kategori asidifikasi. Analisis sensitivitas telah digunakan untuk menguji perubahan hasil dalam berbagai variasi masukan tetapi tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap hasil secara keseluruhan. Oleh karena itu, alternatif terbaik terhadap sistem pengelolaan yang ada saat ini dapat diidentifikasi.

Kata kunci: Sistem pengelolaan sampah, *Life cycle assessment*, *Life cycle inventory*, kategori dampak

Abstract

Various solid waste management (SWM) system scenarios were developed and compared for solid waste managed in KARTAMANTUL region by using life cycle assessment (LCA) methodology. The solid waste management methods considered in the scenarios were *landfilling* without and with energy recovery, *incineration*, *gasification*, and *anaerobic digestion*. The goal of the study was to assess indicators in determining the most suitable environmentally aspect of SWM system options. The functional unit of the study was the amount of solid waste managed. The life cycle inventory analysis carried out by including the assumptions made for each processes in the SWM system. Energy production and inventory emissions were calculated and classified in to impact categories; global warming, acidification, eutrophication, and photochemical oxidant. Impact categories indicator were quantified with equivalence factors of relevant emissions to develop the environmental profiles of each scenario. In most of the categories, direct gasification was found to be the most feasible method, except the acidification. Sensitivity analysis has been used to test some of the assumptions used in the influence of variety

input to the results but none have effect on the overall result. Therefore, the best alternative to the existing SWM can be identified.

Keywords: Solid waste management system, Life cycle assessment, Life cycle inventory, impact categories

PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia telah menetapkan undang-undang tentang Pengelolaan Sampah no. 18 tahun 2008 yang mewajibkan pemerintah daerah harus membuat perencanaan penutupan TPA yang menggunakan sistem *open dumping* atau *uncontrolled landfilling* paling lambat 1 (satu) tahun sejak undang-undang ini diberlakukan (KNLH, 2009). Dalam hal ini pemerintah daerah dihadapkan pada beberapa pilihan pengelolaan sampah. Berbagai pilihan pengelolaan sampah telah tersedia. Walaupun demikian, mengingat kandungan sampah sangat heterogen sehingga memunculkan berbagai persoalan di antaranya : Apakah sampah organik *biowaste* harus ditimbun dalam *landfill* atau diolah dalam *anaerobic digester* atau melalui pengolahan *thermal*? Apakah bahan yang mempunyai nilai kalor tinggi harus diolah secara *thermal* atau ditimbun dalam *landfill*? Apakah sampah campuran harus diolah secara *thermal* atau ditimbun dalam *landfill*? Bagaimanakah manfaat atau beban lingkungan dari pengelolaan sampah untuk energi? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat diperoleh dengan mengembangkan skenario pengelolaan sampah (Thorneloc et al., 2007) dan alat analisis yang diperlukan untuk mengeksplorasi informasi-informasi relevan sehingga dapat diambil keputusan yang lebih baik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model *life cycle inventory* (LCI). *Life cycle inventory* (LCI) sebagai fase kedua dalam *life cycle assessment* (LCA) adalah fase yang paling kompleks dan menghabiskan banyak waktu (USEPA, 2006). LCI bertujuan untuk mengkuantifikasi aliran bahan dan energi serta emisi yang dilepaskan ke lingkungan dari sistem yang diamati (ISO 14041, 1998). Oleh karena itu aspek kunci dalam LCI adalah

memodelkan aliran masukan dan keluaran dari sistem yang diamati (ISO 14041, 1998). Berbagai model LCI untuk pengelolaan sampah telah dikembangkan untuk memfasilitasi aplikasi LCA. Bahkan model LCI berbasis komputer telah dikembangkan oleh McDougall et al. (2001), Eriksson et al. (2002), dan Kirkeby et al. (2006). Walaupun demikian, model-model tersebut kurang fleksibel terhadap parameter-parameter yang digunakan (Diaz and Warith, 2006). Diaz and Warith (2006) telah mengembangkan model WASTED yang lebih fleksibel tetapi hanya menggunakan faktor emisi yang berbasis massa masukan sampah tanpa memperhatikan karakteristik kimia sampah. Demikian pula, Diaz tidak melibatkan proses *anaerobic digestion*.

Model yang dikembangkan dalam penelitian ini, secara konseptual mengacu pada model WASTED. Walaupun demikian, penyesuaian dilakukan dengan memperhatikan karakteristik kimia sampah dalam penentuan emisi dan melibatkan metode pengolahan *anaerobic digestion*. Model digunakan untuk menilai kinerja lingkungan dari berbagai skenario pengelolaan sampah yang diusulkan terhadap karakteristik sampah yang dikelola di wilayah KARTAMANTUL. KARTAMANTUL (Yogyakarta, Sleman, dan Bantul) adalah wadah dalam bentuk Sekretariat bersama yang salah satu fungsinya melakukan koordinasi pengelolaan sampah bersama di wilayah Aglomerasi Perkotaan Yogyakarta (APY) tersebut. APY saat ini memanfaatkan TPA Piyungan untuk fasilitas pengelolaan sampah.

METODOLOGI

Sesuai dengan tujuan dari penelitian, metodologi yang digunakan 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 terhadap kategori dampak. (4) *Interpretation*, bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi informasi dari hasil LCI dan LCIA sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup yang telah ditentukan.

Penentuan Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan informasi untuk membandingkan berbagai peluang skema sistem pengelolaan sampah untuk sampah yang dikelola di wilayah KARTAMANTUL. Adapun unit fungsi (uf) sebagai ukuran yang dijadikan acuan untuk melakukan perhitungan ditetapkan per satu ton sampah yang dikelola tahun 2008. Sistem hanya dibatasi pada proses pengolahan dan perluasan sistem hanya untuk menunjukkan kompensasi dari energi yang dihasilkan. Batasan sistem ditunjukkan dalam Gambar 1.

Sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 1, skema pengelolaan sampah tidak hanya berfungsi untuk mengolah sampah tetapi juga memproduksi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan diasumsikan untuk menggantikan produksi listrik secara konvensional dalam jumlah yang ekuivalen. Oleh karena itu penghindaran emisi dari produksi listrik konvensional melibatkan dengan mengurangi emisi ini dari emisi yang dihasilkan skema. Dalam hal ini, produksi listrik pada jaringan Jawa Madura Bali (JAMALI) diasumsikan digantikan terutama yang diproduksi dengan bahan bakar fosil: gas alam 18,74%, batubara 53,57%, dan minyak

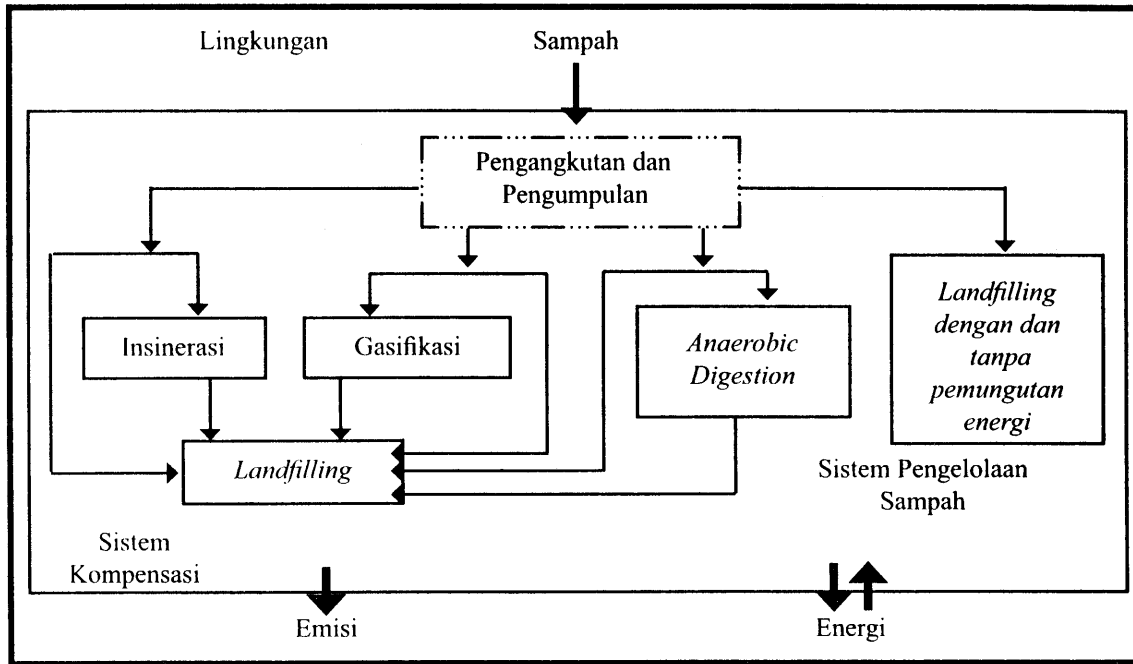
berat 27,69% (diolah dari data statistik PLN 2006) (PLN, 2008). Faktor emisi dari campuran bahan bakar tersebut diperoleh dari literatur (Diaz and Warith, 2006).

Proses-proses yang dilibatkan dalam model ini adalah insinerasi, gasifikasi, dan *anaerobic digestion*. Adapun skenario-skenario yang dipertimbangkan meliputi : *landfilling* sebagai skenario dasar (skenario 0) yang merepresentasikan pengelolaan saat ini dan lima skenario alternatif yang diusulkan : *landfilling* dengan pemungutan energi sebagai skenario 1, kombinasi antara *anaerobic digestion* dengan insinerasi sebagai skenario 2, kombinasi antara *anaerobic digestion* dengan gasifikasi sebagai skenario 3, insinerasi langsung dari aliran sampah sebagai skenario 4, dan gasifikasi langsung sebagai skenario 5. Tabel 1 menunjukkan distribusi sampah yang diolah pada masing-masing skenario.

Life Cycle Inventory

Tahapan ini melibatkan dua aktivitas utama; pengumpulan data dan perhitungan melalui pengembangan model. Pengumpulan data meliputi pengumpulan data karakteristik sampah dan data yang diperlukan sebagai parameter-parameter model. Data karakteristik yang berkaitan dengan komposisi komponen-komponen sampah dikumpulkan melalui pengamatan langsung di TPA Piyungan. Adapun pemeriksaan laboratorium dilakukan untuk menentukan analisis proksimat, ultimat, dan nilai kalor komponen sampah (Tabel 2).

Model LCI untuk melakukan perhitungan dikembangkan dengan menggunakan suatu vektor yang mengandung semua informasi tentang emisi ataupun produk yang mungkin. Setiap metode pengolahan mempunyai suatu vektor sebagai parameter model yang terkait dengan emisi ataupun produk. Vektor ini adalah multi dimensi di mana masing-masing dimensi berkaitan dengan emisi atau produk tertentu. Setiap aliran massa (kg) dalam proses harus dikaitkan dengan vektor, v , yang dinyatakan dalam massa (kg emisi/kg masukan) atau satuan lainnya (mis : $m^3 CH_4/kg VS$, kg polutan/kWh).



Gambar 1. Batasan sistem model (diadopsi dan dimodifikasi dari Diaz and Warith, 2006)

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

Sistem Pengelolaan Sampah	Jumlah sampah yang diolah (ton/tahun)					
	Skenario 0	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
Landfilling	146000	-	18250	18250	18250	18250
Landfilling dengan pemungutan energi	-	146000	-	-	-	-
Insinerasi	-	-	54750	-	127750	-
Gasifikasi	-	-	-	54750	-	127750
Anaerobic Digestion	-	-	73000	73000	-	-

Pernyataan berikut menunjukkan suatu vektor, v , di mana beban lingkungan dan produk digabungkan bersama:

$$v = \begin{pmatrix} kg / kg \\ m^3 / kg \\ kg / kWh \\ dll \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

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

terkait menghasilkan jumlah emisi atau produk P dari proses terkait.

Emisi gas CO_2 , CO , CH_4 , N_2O , NO_2 , NH_3 , SO_2 , H_2S , HF , HCl , dan $NM VOC$ telah dipilih sebagai beban lingkungan. Data parameter-parameter yang diperlukan dalam model diadopsi dan dikembangkan dari berbagai literatur. Pada bagian berikut diuraikan analisis secara teknis dari proses berkaitan dengan parameter-parameter yang telah ditetapkan dengan mengacu pada masing-masing skenario yang diusulkan.

Tabel 2. Karakteristik aliran sampah yang dikelola di wilayah KARTAMANTUL

Parameter	Satuan	Plastik	Organik/ Biowaste	Kayu	Kertas	Tekstil	Karet dan Kulit	Pem- balut
Komposisi****	% berat	14,69	60,99	2,18	6,46	5,32	2,12	2,74
Analisis Proksimat								
Kadar air	% berat	17,89	84,83	40,15	38,93	41,72	8,43	25,77
Total solid (TS)	% berat	82,11	15,17	59,85	61,07	58,28	91,57	74,23
Volatile matter (Vm)	% bk	88,09	64,64	67,74	44,94	82,84	55,88	85,11
Abu	% bk	7,84	28,49	8,12	35,80	4,83	42,90	9,23
Karbon tetap (FC)	% bk	4,07	6,89	24,15	19,26	12,34	1,23	5,66
Analisis Ultimat								
C-bio	% bk	0,00	40,415	44,530	32,53**	35,27**	32,26**	19,06***
C_fosil	% bk	61,44*			0,81**	23,51**	2,29**	34,49***
C	% bk	61,44*	40,415	44,530	33,340*	58,780	46,32*	53,56
H	% bk	7,37*	6,260	5,560	5,310	3,840	5,71*	7,17
N	% bk	0,00	4,765	2,680	1,980	1,840	3,81*	0,12
S	% bk	0,00	0,430	0,120	0,320	0,130	0,13*	0,00
O	% bk	23,35*	19,65	39,00	23,25	30,59	3,68*	29,96
Cl	gr/kg	1,59	10,27	3,705	0,78	4,53	9,58	3,04
Nilai Kalor	GJ/ton	30,70	2,26	2,42	12,4	130,34	25,45	13,99

Sumber : penelitian ini

* Tchobanoglous et al. (1993) dengan penyesuaian terhadap kadar abu hasil pengamatan; ** IPCC (2006); *** Bjamadottir et al. (2002); **** Sisanya adalah logam, gelas, bahan berbahaya dan *inert*.

Skenario 0. Produksi gas *landfill* diestimasi dengan menggunakan model LandGEM yang menyediakan alat estimasi untuk mengkuantifikasi produksi gas *landfill* dari *landfill*. Model LandGEM adalah model dekomposisi orde satu yang mengestimasi laju gas *landfill* berdasarkan potensi kapasitas metan (Lo m^3 CH_4 /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 metan (k), potensi kapasitas menghasilkan metan (Lo). Dalam penelitian ini k (thn^{-1}) ditentukan mengacu pada nilai yang ditetapkan IPCC sedangkan Lo ditentukan sebagai fungsi dari kandungan DOC (*Degradable organic carbon*). DOC ditentukan berdasarkan kandungan C-bio dari komponen-komponen sampah. Estimasi Lo dilakukan dengan menggunakan model IPCC (IPCC, 2006).

Model 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 metan yang diemisikan dihitung berdasarkan pada estimasi produksi metan dengan mempertimbangkan jumlah metan yang teroksidasi. Artinya, emisi ditentukan berdasarkan hasil dari perhitungan model LandGEM selanjutnya dikurangkan dengan jumlah metan yang mengalami oksidasi. Dalam skenario ini 10% dari metan diasumsikan mengalami oksidasi pada penutup permukaan *landfill* (IPCC, 2006).

Kandungan gas metan dalam gas *landfill* diasumsikan 50% sedangkan konsentrasi gas-gas lainnya seperti CO , H_2S , 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. Emisi-emisi tersebut ditentukan dengan

menggunakan faktor emisi berturut-turut 6 dan 2 mg/(m³gas *landfill*) yang diperoleh dari Manfredi *and* Christensen (2008). Emisi dari peralatan berbahan bakar diesel yang digunakan dalam operasional *landfill* untuk penyebaran dan pemadatan sampah dihitung dengan menggunakan faktor emisi dari Diaz *and* Warith (2006).

Mengingat emisias 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 *and* Warith (2006) dan Manfredi *and* Christensen (2008). Cara penentuan ini juga dilakukan pada skenario-skenario lainnya baik dengan tujuan penggunaan metode *landfill* sebagai proses utama maupun untuk pengelolaan sampah sisa dan limbah padat dari sisa pengolahan utama.

Skenario 1. Dalam skenario ini, 50% dari gas *landfill* diasumsikan dikumpulkan dan diolah untuk menyingkirkan 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 model 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 36,6 MJ/m³ (Murphy *and* Power, 2007) dan efisiensi konversi menjadi energi listrik ditetapkan 30% mengacu pada asumsi yang digunakan oleh Liamsangan *and* Gheewala (2008) 35% dan Cherrubini et al. (2008) 28%. Kelebihan biogas dibakar dan dilepaskan langsung ke atmosfer. Demikian pula sisa dari biogas yang tidak dikumpulkan 10% di antaranya 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 *and* Eriksson (2003) sedangkan HCl (38 mg/Nm³), SO₂ (6 mg/Nm³) diadopsi dari McDougall et al., (2001). Adapun faktor emisi pembakaran gas *landfill* dalam nyala api terbuka meliputi CO (39,7 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 dalam efek gas rumah kaca (Cherubinni et al., 2008). Emisi dari operasional *landfill* ditentukan dengan cara yang sama dengan skenario 0. Kebutuhan energi internal mengacu pada Boer et al. (2005).

Skenario 2. 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 bahan mudah dibakar 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 pempes dan pembalut dikategorikan sebagai bahan yang mudah dibakar karena mempunyai nilai kalor yang tinggi.

Fraksi organik *biowaste* yang telah dihancurkan diteruskan ke fasilitas pengolahan *anaerobic digestion* untuk menghasilkan biogas dalam proses yang terkendali. Produksi biogas dikaitkan dengan efisiensi konversi biodegradabilitas *volatile solid (biodegradability volatile solid destroyed)* (Tchobanoglous et al., 1993) dan Murphy *and* 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 (Borjensson *and* Borglund, 2006). Adapun kehilangan biogas karena kebocoran diasumsikan 10% (Baky *and*

Eriksson, 2003). Faktor emisi dari operasional sistem *anaerobic digestion* dialokasikan berdasarkan kandungan total solid. Faktor-faktor emisinya meliputi CO₂ (15), CH₄ (4 kg/ton TS), NO_x (46 kg/ton TS), CO (11 kg/ton TS), NMVOC (3 kg/ton TS) (Borjesson and 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 et al., 2008). Efisiensi insinerasi diasumsikan 18% dan kebutuhan energi internal 15% dari energi listrik yang dihasilkan (Murphy and 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 et al., (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 and McKeogh, 2004). Estimasi jumlah *char* yang dihasilkan ditentukan berdasarkan karbon tetap, abu, dan karbon dalam *volatile matter* yang tidak terkonversi (Jung and Fontana, 2007). Teknologi gasifikasi adalah teknologi yang belum banyak diaplikasikan dalam pengelolaan sampah (Balgioro 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 CO, 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 et al. (2001). Adapun CO ditentukan dengan cara yang sama seperti halnya pada 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 inventori yang dihasilkan dari model 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, SO₂, NO_x dikelompokkan ke dalam kategori dampak asidifikasi; NO_x, NH₃ dikelompokkan ke dalam kategori dampak eutrofikasi; dan CO, NO_x, dan NMVOC dikelompokkan ke dalam kategori dampak pembentukan oksidan fotokimia. Selanjutnya indikator kategori dampak dihitung sesuai dengan faktor ekuivalensinya. Indikator kategori dampak pemanasan global dinyatakan dalam CO₂_{ekuivalen}, asidifikasi dalam SO₂₄_{ekuivalen}, eutrofikasi dalam PO₄₄_{ekuivalen}, dan pembentukan oksidan fotokimia dalam etilena_{ekuivalen} (Guine et al., 2001).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data inventori emisi tidak ditunjukkan dalam manuskrip ini mengingat keterbatasan ruang. Potensi dampak dari masing-masing skenario ditunjukkan dalam Gambar 2. Kontribusi bersih diperoleh dengan menjumlahkan kontribusi dari masing-masing aktivitas yang terlibat dalam skenario dan penghindaran karena pemungutan energi.

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

Gambar 2a menunjukkan perbandingan dari skenario-skenario dan kontribusi setiap proses dalam setiap skenario terhadap potensi pemanasan global. Kontribusi terendah ditunjukkan oleh skenario 4 (61,3772 kg CO_{2-ek}/uf) diikuti oleh skenario 2 (154,6398 kg CO_{2-ek}/uf), dan 1 (214,2085 kg CO_{2-ek}/uf). Walaupun demikian ketiga skenario tersebut menunjukkan mitigasi GWP dibandingkan dengan pengelolaan yang ada saat ini (skenario dasar) berturut-turut 83,60%, 58,68%, dan 42,76%. Nilai negatif yang ditunjukkan pada skenario 5 (-167,9816 kg CO_{2-ek}/uf) dan 3 (-49,3280 kg CO_{2-ek}/uf) menunjukkan adanya penghindaran terhadap GWP. Penghindaran terhadap GWP dari skenario-skenario tersebut terutama diktribusi kredit GWP sebagai kompensasi dari dihasilkannya energi listrik (Gambar 2a). Bila perhatian hanya difokuskan pada indikator GWP skenario 5 merupakan pilihan terbaik.

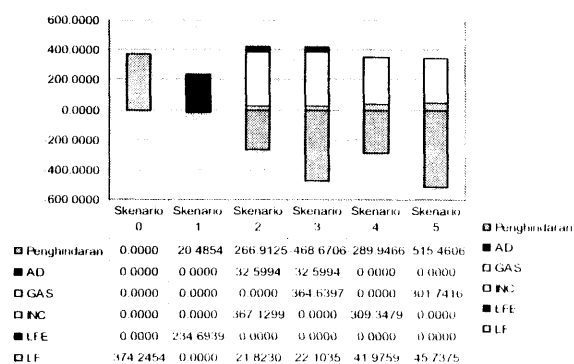
Potensi Asidifikasi (*Asidification Potential, AP*)

Semua skenario alternatif menunjukkan penghindaran terhadap potensi asidifikasi (AP) (Gambar 2b). Penghindaran tertinggi terhadap potensi asidifikasi ditunjukkan oleh skenario 3 (-2,8135 kg SO_{2-ek}/uf), diikuti oleh

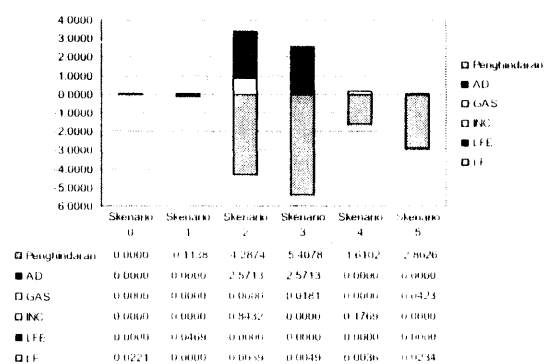
skenario, 5 (-2,7968 kg SO_{2-ek}/uf), 4 (-1,4297 kg SO_{2-ek}/uf), 2 (-0,8690 kg SO_{2-ek}/uf), dan 1 (-0,0669 kg SO_{2-ek}/uf). Pada skenario 2 dan 3 proses *anaerobic digestion* (AD) merupakan kontributor utama terhadap AP. Walaupun demikian, penghindaran terhadap AP yang diperoleh sebagai kompensasi dari produksi energi melampaui yang dikontribusikan skema ini sehingga kedua skenario tersebut memberikan penghindaran terhadap AP. Demikian pula halnya dengan skenario 4 dan 5 penghindaran terutama diktribusi oleh kredit AP sebagai kompensasi dihasilkannya energi listrik. Dalam aspek indikator potensi asidifikasi, skenario 5 menunjukkan kinerja terbaik.

Potensi Eutrofikasi (*Eutrophication Potential, EP*)

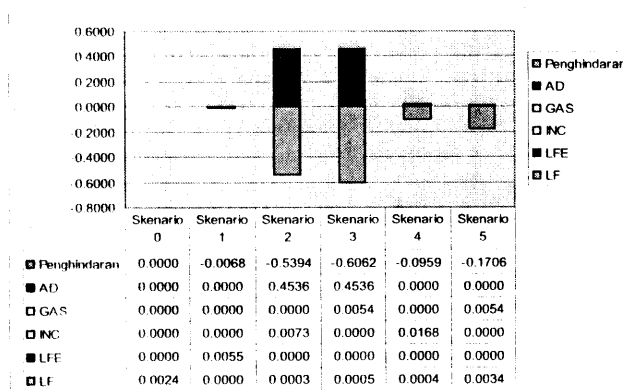
Seperti halnya pada potensi asidifikasi, semua skenario alternatif menunjukkan penghindaran terhadap potensi eutrofikasi (EP) (Gambar 2c). Penghindaran tertinggi ditunjukkan oleh skenario 5 (-0,1618 kg PO_{4-ek}/uf) diikuti oleh skenario 3 (-0,1467 kg PO_{4-ek}/uf), 4 (-0,0787 kg PO_{4-ek}/uf), 2 (-0,0782 kg PO_{4-ek}/uf), dan 1 (-0,0012 kg PO_{4-ek}/uf). Proses AD memberikan kontribusi terbesar pada skenario 2 (0,4536 kg PO_{4-ek}/uf) dan 3 (0,4536 kg PO_{4-ek}/uf), walaupun demikian kredit EP yang diperoleh dari produksi listrik melampaui



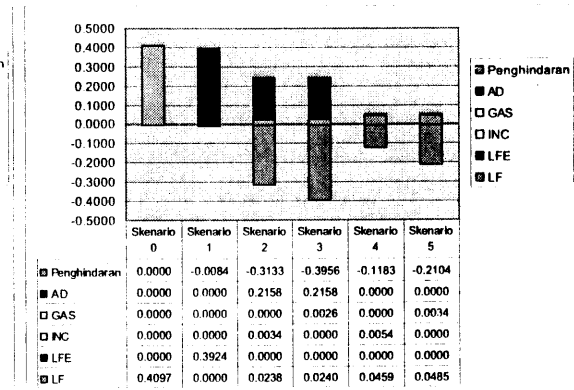
Gambar 2a. Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi pemanasan global (GWP)



Gambar 2b. Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi asidifikasi (AP)



Gambar 2c. Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi eutrofikasi (EP)



Gambar 2d. Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi pembentukan oksidan fotokimia (POP)

LF = *landfilling* tanpa pemungutan energi, LFE = *landfilling* dengan pemungutan energi, INC= insinerasi, GAS = gasifikasi, AD = *anaerobic digestion*.

Gambar 2. Kontribusi proses pada masing-masing skenario terhadap potensi dampak

kontribusi tersebut sehingga kedua skenario tersebut menunjukkan penghindaran terhadap EP. Demikian pula halnya dengan skenario 4 dan 5, pada kedua skenario ini kredit terhadap potensi eutrofikasi yang diperoleh dari produksi listrik lebih besar dari yang dikontribusikan baik oleh proses pengolahan insinerasi (0,0168 kg PO₄ ek/uf) maupun gasifikasi (0,0054 kg PO₄ ek/uf). Bila indikator potensi eutrofikasi menjadi pertimbangan utama maka skenario terbaik ditunjukkan oleh skenario 5.

Potensi Pembentukan Oksidan Fotokimia (*Photochemical oxidant potential, POP*)

Skenario 1 menunjukkan kontribusi positif (0,3840 kg etilena_{ek}/uf) terhadap potensi oksidan fotokimia (POP) di mana terutama dikontribusikan oleh aktivitas *landfilling*. Adapun skenario 2, 3, 4, dan 5 menunjukkan penghindaran terhadap POP. Skenario 5 (-0.1585 kg etilena_{ek}/uf) menunjukkan penghindaran tertinggi diikuti oleh skenario 3 (-0.1532 kg etilena_{ek}/uf), skenario 2 (-0.0702 kg etilena_{ek}/uf), dan skenario 4 (-0.0671 kg etilena_{ek}/uf). Proses pengolahan

anaerobic digestion (AD) menjadi kontributor utama pada skenario 2 dan 3 (Gambar 2d). Walaupun demikian, kredit EP yang diperoleh melampaui kontribusi dari aktivitas lainnya sehingga kedua skenario ini memberikan penghindaran terhadap EP. Demikian pula halnya dengan skenario 4 dan 5 kredit potensi pembentukan oksidan fotokimia lebih besar dibandingkan dengan yang dikontribusikan baik oleh proses pengolahan insinerasi maupun gasifikasi langsung termasuk *landfilling* (Gambar 2d). Bila potensi pembentukan oksidan fotokimia menjadi perhatian utama maka, kinerja terbaik ditunjukkan oleh skenario 5.

Analisis Sensitivitas

Analisis variasi komposisi bahan organik pada aliran sampah KARTAMANTUL dilakukan dengan mengikuti pola variasi 50%, 55%, 60,99%, 65%, dan 70%. Adapun fraksi lainnya mengikuti secara proporsional dari kondisi awal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi fraksi organik sampah tidak mempengaruhi urutan terhadap kinerja lingkungan (GWP).

KESIMPULAN

LCA telah digunakan sebagai alat untuk menilai dan membandingkan berbagai skema pilihan sistem pengelolaan sampah yang dikelola di wilayah KARTAMANTUL, Propinsi D.I. YOGYAKARTA. LCA diaplikasikan melalui pengembangan model LCI sebagai tahapan kedua dalam LCA. Hasil dari studi menunjukkan bahwa :

Dalam kaitannya dengan potensi pemanasan global, eutrofikasi, dan pembentukan oksidan fotokimia skenario 5 (Gasifikasi + *Landfilling*) ditemukan menunjukkan penghindaran tertinggi berturut-turut -167,9816 CO₂_ek/uf, -0,1618 PO₄_ek/uf, -0,1618 etilene_ek/uf diikuti oleh skenario 3 (Gasifikasi + *Anaerobic digestion* + *Landfilling*).

Dalam hubungannya dengan potensi asidifikasi skenario 3 (-2,8135 SO₂_ek/uf) ditemukan menunjukkan penghindaran tertinggi diikuti oleh skenario 5 (-2,7968 SO₂_ek/uf).

Data-data obyektif berkaitan dengan potensi dampak dari berbagai skenario alternatif pengelolaan sampah untuk energi telah diperoleh dengan mengaplikasikan LCA. Oleh karena itu, sejalan dengan literatur hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa LCA dapat diterapkan pada sistem pengelolaan sampah sebagai alat penunjang keputusan.

DAFTAR PUSTAKA

- Baky., and Eriksson, 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., and Napoli, R.M.A. 2003. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*. 23 1–15
- Bjarnadóttir HJ., Guðmundur B., Friðriksson., Johnsen T., and Sletsen., H. 2002. *Guidelines for the use of LCA in the waste management sector*. Nordtest Report TR 517. Finland.
- Boer, D.E., Boer, D.J., and Jager, J. 2005. *Waste Management Planning and Optimisation – Handbook for Municipal Waste Prognosis and Sustainability Assessment of Waste Management Systems*. Ibidem Verlag, Stuttgart, Germany.
- Borjesson, P., and Borglund, M. 2006. Environmental systems analysis of biogas systems—Part I: Fuel-cycle emissions. *Biomass and Bioenergy*. 30. 469–485
- Cherubini, F., Bargigli, S., and Ulgiati, S. 2008. Life Cycle Assessment of Urban Waste Management : Energy Performances and Environmental Impacts. The Case of Rome, Italy. *Waste Management*. xxx. xxx-xxx. ELSEVIER
- Diaz, R., and Warith, M. 2006. Life assessment of municipal solid wastes: Development of the WASTED model. *Waste Management*. 26. 886–901
- Eriksson, O., Frostell, B., Bjorklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J. O., Granath, J., Carlsson, M., Baky, A., and Thyselius, L. 2002. ORWARE—a simulation tool for waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*. 36. 287–307
- Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., van Duin, R., and 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. Leiden, Netherlands.
- Hellweg, S., Hofsteter, B.T., and Hungerbuhler, K. 2001. Modeling waste incineration for life-cycle inventory analysis in Switzerland. *Environmental Modeling and Assessment* 6. 219–235, 2001.
- 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 Organisation, Geneva, Switzerland.
- ISO 14041. 1998. *Environmental management—life cycle assessment—life cycle impact assessment*. International Standards Organisation, Geneva, Switzerland
- Jung, C.G., and Fontana, A. 2007. *Slow 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
- Kirkeby, J.T., Birgisdottir, H., Hansen, T.L., Christensen, T.H., Bhandar, G.S., and Hauschild, M. 2006. Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. *Waste Management & Research*. 24: 3–15
- KNLH, 2009. Undang-Undang Republik Indonesia No. 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah. Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia 2009. Jakarta.
- Liamsanguan, C., and 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., and Christensen, T.H. 2008. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste Management*. xxx. . xxx–xxx
- McDougall, F., White, P., Franke, M., and Hindle, P. 2001. *Integrated Solid Waste Management A Life Cycle Inventory*. Blackwell Science Ltd. United Kingdom.
- Murphy, J.D., and Power, N. 2007. A technical, economic, and environmental analysis of energy production from newspaper in Ireland. *Waste Management*. 27. 177–192
- Murphy, J.D., and McKeogh, E. 2004. Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renewable Energy*. 29. 1043–1057
- PLN. 2008. Statistik PLN. Perusahaan Listrik Negara 2006. <http://www.pln.go.id>. Diakses tanggal 12 April 2008
- Ribber, C., Bhandar, G.S., and Christensen, T.H. 2008. Environmental assessment of waste incineration in a life-cycle-perspective (EASEWASTE). *Waste Management & 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., and Vigil, S. 1993, *Solid wastes Engineering Principles and management issues*. McGraw-Hill. Singapore.
- Thorneloe, S,A; Weitz, K., and 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, DC 20460.
- USEPA. 2006. *Life Cycle Assessment Principles and Practice*. U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268.