Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) dalam Upaya Pengurangan Gas Metana Di TPA Rawa Kucing Kota Tangerang Menggunakan Sistem *Flaring* dan *Waste to Energy*

Irena Annafi Annur[1], Awaluddin Nurmiyanto[1*], Hijrah Purnama Putra[1], Ikrom Mustofa[1]

[1] Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana, Fakultas Teknik Sipil dan Perencaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584

*Korespondensi: awaluddin@uii.ac.id

Abstrak. Timbulan sampah Kota Tangerang yang masuk ke dalam Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Rawa Kucing pada tahun 2023 tercatat sebesar 386.535 ton per tahun. TPA Rawa Kucing sendiri hingga saat ini masih menerapkan sistem *controlled landfill* dengan pengelolaan emisi gas metana yang minim. Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk menyediakan evaluasi berbasis sains untuk membandingkan efektivitas skenario yang dimiliki, mendorong pengelolaan sampah berkelanjutan di Kota Tangerang, dan memberikan konstribusi nyata pada target penurunan emisi nasional. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan emisi gas metana yang dihasilkan di TPA serta melakukan analisa daur hidup dari beberapa opsi skenario dengan menggunakan pendekatan *OpenLCA*. Skenario yang digunakan adalah skenario 0 (eksisting, *controlled landfill*), skenario 1 (*gasification*), dan skenario 2 (*flaring*). Penelitian ini menggunakan data sekunder dan pemodelan emisi gas keadaan eksisting dengan perangkat *LandGEM* yang kemudian divalidasi dengan menggunakan metode IPCC. Analisis *life cycle assessment* (LCA) dilakukan dengan menghitung neraca sampah dan dilanjutkan dengan *OpenLCA 2.3.1* dengan basis data *ecoinvent LCIA 2.2* dan metode analisis CML-IA *baseline*. Hasil pemodelan menunjukkan total emisi gas metana tahun 1992-2030 sebesar 506,51 Gg/tahun dengan *LandGEM* dan 552 Gg/tahun dengan IPCC, selisih antara kedua metode adalah sebesar 1,16 Gg/tahun. Analisis LCA menunjukkan bahwa skenario dengan dampak terhadap lingkungan terkecil per 1 ton sampahnya adalah skenario 2 (*flaring*).

Kata Kunci: *controlled landfill*, emisi gas metana, *flaring*, gasifikasi, *life cycle assessment*

1. PENDAHULUAN

Dengan jumlah penduduk Kota Tangerang yang mencapai 1,9 juta jiwa pada 2023, timbulan sampah meningkat hingga lebih dari 1.400 ton per hari. Hal ini memicu permasalahan lingkungan, terutama emisi gas metana dari TPA Rawa Kucing yang masih menggunakan sistem *controlled landfill*. Penguraian sampah secara anaerobik menghasilkan gas metana, yang menurut Nugroho *et al.* (2021), berdampak negatif pada kesehatan jika terpapar terus-menerus. Namun, metana juga berpotensi dimanfaatkan sebagai energi terbarukan karena kandungan hidrokarbonnya yang relatif rendah dan ramah lingkungan. Penelitian ini memodelkan estimasi emisi gas metana menggunakan perangkat lunak LandGEM dan IPCC, serta mengevaluasi dampaknya melalui analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) menggunakan OpenLCA. Tiga skenario diuji: *controlled landfill* (eksisting),

gasifikasi (*waste to energy*), dan *flaring*. *OpenLCA* digunakan untuk mengestimasi dampak lingkungan dari tiap kilogram sampah, dengan mempertimbangkan aktivitas pengelolaan di TPA (Anasstasia & Aziz, 2020). Kota Tangerang dengan kepadatan penduduk tinggi membutuhkan strategi pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan ilmiah dalam merumuskan kebijakan mitigasi emisi gas rumah kaca di TPA Rawa Kucing serta memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif dan ramah lingkungan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Penentuan Lokasi dan Pengumpulan Data

TPA Rawa Kucing terletak di Jalan Iskandar Muda, Kelurahan Kedaung Wetan, Kecamatan Neglasari, Kota Tangerang (6°8'15" LS, 106°37'3" BT). Identifikasi lokasi mencakup data karakteristik TPA seperti luas lahan, tahun operasional, jumlah timbunan sampah, komposisi sampah, serta sarana dan prasarana berdasarkan data dari DLH Kota Tangerang.

2.2 Perhitungan Penduduk

Proyeksi jumlah penduduk diperlukan untuk memperkirakan timbulan sampah di masa depan. Dua metode yang digunakan adalah Aritmatika dan Geometrik, sesuai Buku Referensi Opsi Sistem dan Teknologi Sanitasi. Estimasi terbaik dipilih berdasarkan standar deviasi terkecil untuk mendukung prediksi timbulan sampah di TPA Rawa Kucing.

2.2.1 Metode aritmatik

Pertumbuhan penduduk secara aritmatik adalah pertumbuhan penduduk dengan jumlah sama setiap tahun. Adapun Pn adalah penduduk pada tahun *n*, penduduk pada tahun awal (P_0), jumlah pertambahan penduduk konstan (*c*), angka pertambahan penduduk (*r*), dan periode tahun (*N*).

$$P_n = P_o + c_n \text{ atau } P_n = P_o\,(1+ r_n) \quad (1)$$

$$r = \frac{(\frac{P_n}{P_0}\text{-}1)}{n} \quad (2)$$

2.2.2 Metode geometrik

Pertumbuhan penduduk secara geometrik adalah pertumbuhan penduduk yang menggunakan dasar bunga majemuk. Angka pertumbuhan penduduk dianggap sama untuk setiap tahun. Adapun Pn adalah penduduk pada tahun *n*, penduduk pada tahun awal (P_0), angka pertambahan penduduk (*r*), dan periode tahun (*N*).

$$P_n = P_o\,(1 + r)^n \quad (3)$$

$$r = (\frac{P_n}{P_0})^{1/n} \quad (4)$$

2.3 Analisis Timbulan Sampah

Proyeksi volume dan timbulan sampah dihitung sesuai tahun perencanaan melalui empat langkah: menghitung timbulan sampah rata-rata dari beberapa tahun sebelumnya, menentukan rata-rata nilai tersebut persamaan (5), menggunakan nilai rata-rata untuk menghitung timbulan sampah tahun perencanaan, dan menghitung volume sampah tahun perencanaan berdasarkan nilai rata-rata dengan persamaan (6).

$$T = \frac{M_t}{F_p \times P_T \times 365} \quad (5)$$

$$M_t = F_p \times T \times P_T \times 365 \quad (6)$$

2.4 Pemodelan Emisi Gas Metana

2.4.1 Pemodelan LandGEM

Pemodelan emisi metana di TPA Rawa Kucing menggunakan LandGEM didasarkan pada timbulan sampah tahunan hingga tahun tutup. *Input* mencakup volume sampah, suhu, konstanta K, kapasitas pembentukan metana, dan kandungan CH_4 (EPA, 2016). Hasilnya digunakan untuk analisis skenario LCA.

2.4.2 Pemodelan IPCC

Model IPCC digunakan untuk mengestimasi emisi metana berbasis pendekatan peluruhan orde pertama. Pemodelan ini menggunakan asumsi seperti faktor koreksi CH_4, DOC, tingkat pemulihan metana, faktor oksidasi, dan fraksi metana. Data input meliputi kondisi wilayah, faktor emisi, jenis sampah, metode pengolahan, dan volume metana yang dipulihkan.

2.5 Evaluasi Dampak dalam Beberapa Skenario dengan OpenLCA

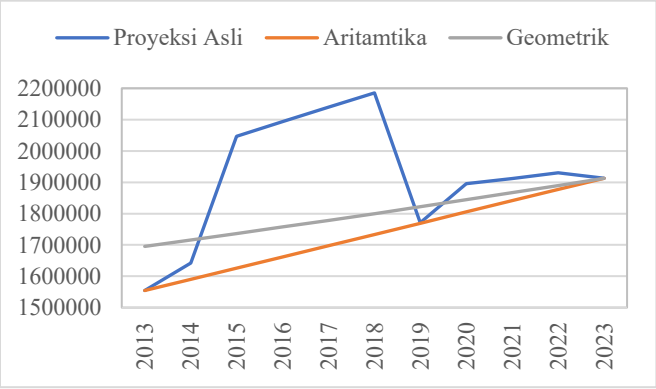
Analisis dampak lingkungan dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) yang dibagi ke dalam beberapa skenario pengelolaan sampah. Tujuan penggunaan skenario tersebut adalah untuk membandingkan dampak lingkungan dari penerapan sistem yang berbeda sebagai dasar evaluasi. Proses LCA dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenLCA 2.3.1 dengan database *ecoinvent 2.2* dan metode LCIA *CML-IA baseline*. Analisis ini mengikuti empat tahapan utama, yaitu penetapan tujuan dan ruang lingkup, inventarisasi daur hidup, penilaian dampak siklus hidup, serta interpretasi hasil (Nurjaya dan Rachmanto, 2023).

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Perhitungan Proyeksi Penduduk

3.1.1 Perhitungan Proyeksi Mundur

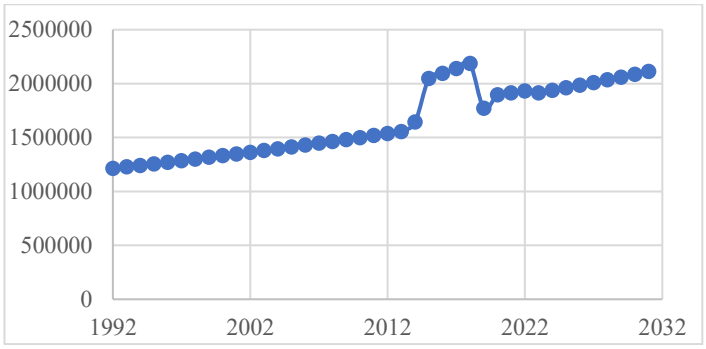
Data demografis Kota Tangerang tahun 2013–2023 digunakan untuk memproyeksikan jumlah penduduk dari 1992 hingga 2031 dengan metode aritmatika dan geometrik. Perbandingan hasil berdasarkan standar deviasi menunjukkan bahwa metode geometrik lebih akurat karena memiliki deviasi terkecil, sehingga digunakan sebagai dasar proyeksi penduduk (Gambar 1).



Gambar 1. Perbandingan perhitungan proyeksi penduduk antara data asli, perhitungan aritmatika, dan perhitungan geometrik

3.1.2 Perhitungan Proyeksi 1992-2031

Pembuatan proyeksi penduduk dari tahun 1992 sampai dengan tahun 2031 didasarkan pada tahun TPA Rawa Kucing beroperasi dan perhitungan tahun tutup TPA sesuai dengan luas lahan yang dimiliki. Berikut merupakan hasil proyeksi penduduk berdasarkan Kecamatan di Kota Tangerang (Gambar 2) Total penduduk dari hasil proyeksi pada tahun tutup TPA (2031) menunjukkan peningkatan peningkatan dibanding dengan tahun-tahun sebelumnya. Jumlah penduduk pada tahun tersebut adalah 2.111.210 jiwa.



Gambar 2. Grafik Proyeksi Penduduk Kota Tangerang Tahun 1992-2031

3.2 Timbulan Sampah

Berdasarkan data timbulan sampah Kota Tangerang oleh Dinas Lingkungan Hidup untuk TPA Rawa Kucing, data yang didapatkan adalah data tonase sampah per bulan pada periode 2020 sampai dengan 2023. Sampah di TPA Rawa Kucing terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, dengan rata-rata 42,67 juta kg/bulan. Tahun 2020–2023, timbulan sampah per jiwa tercatat 0,733 kg/orang/hari.

3.3 Karakteristik Sampah

Sampah yang masuk ke TPA Rawa Kucing didominasi oleh sampah organik, terutama sisa makanan, sedangkan persentase terkecil berasal dari sampah kaca. Komposisi ini memengaruhi karakteristik dan potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan. Kandungan organik yang tinggi berkontribusi pada peningkatan produksi gas, khususnya metana, dibandingkan sampah anorganik.

3.4 Desain Umur TPA

Desain umur TPA digunakan untuk memperkirakan tahun penutupan TPA, dihitung dari luas lahan dibagi jumlah sampah masuk per tahun. Volume efektif TPA ditentukan berdasarkan luas landfill aktual, dengan mempertimbangkan faktor degradasi, densitas, serta tinggi dan kedalaman maksimum landfill. Volume total yang dihasilkan adalah sebesar 12.057.920 m3. Oleh karena itu didapatkan Volume efektif sebesar 16.881.088 m3. Perhitungan umur TPA Rawa Kucing dengan luas landfill 34,45 Ha dengan timbulan pertahunnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Umur TPA} = \frac{\text{Volume efektif}}{\text{Sampah masuk per tahun}} = \frac{16881088}{429079.46} = 40 \text{ tahun}$$

3.5 Perhitungan Emisi Gas Metana

Hasil pemodelan *LandGEM* dan IPCC menunjukkan nilai yang serupa. Namun LandGEM dipilih karena lebih akurat, menggunakan data riil, sesuai dengan tahun tutup TPA (2031), dan menghasilkan data gas yang lebih variatif. Sementara IPCC lebih cocok untuk skala regional/ nasional dan bergantung pada data *default, LandGEM* lebih tepat untuk analisis di tingkat TPA.

3.5.1 Eksisting

Pemodelan eksisting tahun 2024 dilakukan untuk memperkirakan gas metana sejak TPA mulai beroperasi hingga saat ini. Hasil dari *LandGEM* (Tabel 1) dan validasi IPCC (Tabel 2) menunjukkan selisih kecil, yaitu 62,7 Gg atau 1,96 Gg/tahun.

Tabel 1. Emisi LFG dan Metana Eksisting *LandGEM*

Tahun	**Parameter (Gg/year)**	
	Total Landfill Gas	Methane
1992-2024	1375.99	367.53

Tabel 2. Emisi Gas Metana Eksisting IPCC

Tahun	**Parameter (Gg/year)**
	Methane
1992-2024	430

3.5.2 Proyeksi

Melanjutkan pemodelan eksisting, pemodelan proyeksi dilakukan untuk menghitung timbulan gas metana hingga perkiraan tahun tutup TPA. Hasil LandGEM (Tabel 3) dan validasi IPCC (Tabel 4) menunjukkan selisih kecil, yaitu 45,1 Gg atau 1,16 Gg/tahun.

Tabel 3. Emisi LFG dan Metana Proyeksi LandGEM

Tahun	**Parameter (Gg/year)**	
	Total Landfill Gas	Methane
1992-2030	1896.27	506.51

Tabel 4. Emisi Gas Metana Eksisting IPCC

Tahun	**Parameter (Gg/year)**
	Methane
1992-2030	552

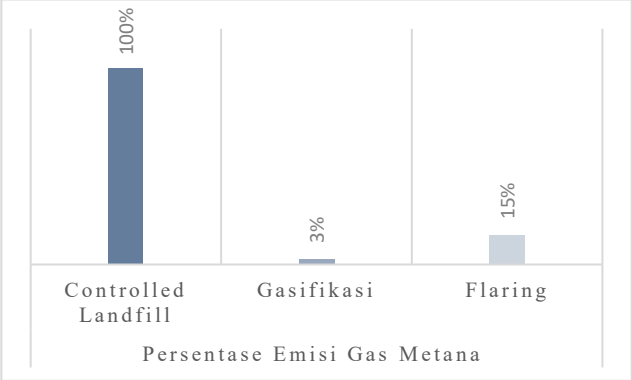
Hasil pemodelan yang dilakukan ditambahkan validasi timbulan gas metana dengan TPA lainnya dengan tujuan untuk membuktikan hasil yang didapat sudah valid seperti yang terpaparkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Emisi Gas Metana di beberapa TPA

Lokasi	Periode	Volume Sampah masuk TPA		Timbulan Methane	Timbulan Methane	Sampah Organik	Referensi
		m^3/tahun	m^3/hari	Gg/tahun	/m^3 sampah	%	
TPA Rawa Kucing	32	429079,5	1175,6	11,80	0,00003	58%	Penelitian
TPA Bengkala	6	224995	616,4	3,8	0,00002	65%	Nurjaya *et al.* (2023)
TPA Koya Koso	13	170751	467,8	9,41	0,00006	67%	Royend *et al.* (2023)

3.5.1 Perhitungan Emisi Per Skenario

Emisi metana dari pemodelan LandGEM digunakan sebagai acuan skenario eksisting (*controlled landfill*) dengan nilai dasar sebesar 29,6 kg per ton sampah (100%). Berdasarkan referensi US EPA 2020, skenario 1 (*waste to energy/gasifikasi)* menghasilkan emisi sekitar 3% dari skenario eksisting, yaitu 0,89 kg per ton. Sementara itu, skenario 2 (*flaring*) menghasilkan emisi sebesar 15% atau setara 4,2 kg per ton sampah.



Gambar 3. Perbandingan Persentase Emisi Gas Metana Tiga Skenario

3.6 *Life Cycle Assessment*

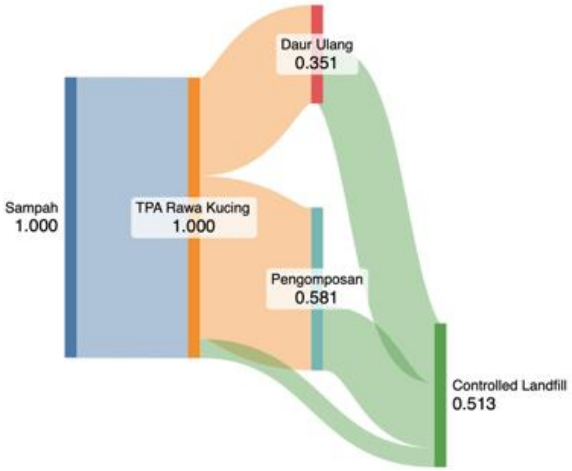
3.6.1 Analisis Inventaris Siklus Hidup

Analisis inventarisasi siklus hidup merupakan tahap yang bertujuan untuk memperhitungkan dan menentukan data-data kebutuhan *input* dan *output* pada setiap skenario. Data yang dimasukkan berasal dari data sekunder yang telah didapatkan dari penelitian dan studi literatur. Pembuatan data *input* dan *output* dihitung untuk satuan 1 ton sampah masuk TPA.

Skenario 0: Controlled Landfill

Inventarisasi skenario *controlled landfill* menunjukkan bahwa dari 1 ton sampah, 0,351 ton didaur ulang, 0,581 ton dikomposkan, dan sisanya 0,068 ton langsung ke *landfill.* Residu dari daur ulang

dan kompos, masing-masing 0,213 ton dan 0,232 ton, juga masuk ke *landfill*.Adapun rincian kuantitas sampah tiap pengolahanya seperti yang tercantum dalam Gambar 4.

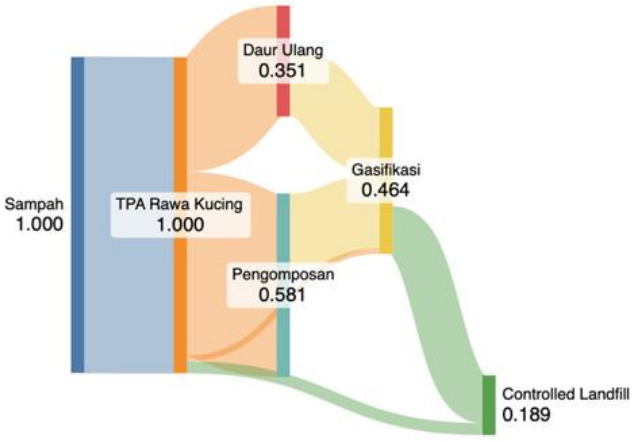


Gambar 4. Neraca Massa Skenario 0

Data input untuk skenario mencakup hasil perhitungan sampah setelah pemilahan dan pengomposan, serta konsumsi bahan bakar alat di TPA, yaitu total 7,5 liter per ton sampah (alat pemadat 1,7 L, *excavator* 2 L, alat pencacah 0,8 L, dan truk pemindahan 3 L per ton). Data output diperoleh dari pemodelan *LandGEM*, yang mencakup estimasi emisi berupa gas dan air lindi dari proses pengangkutan hingga *landfilling*.

Skenario 1: Gasifikasi

Inventarisasi skenario gasifikasi menunjukkan bahwa dari 1 ton sampah, 0,351 ton didaur ulang dan 0,581 ton dikomposkan. Residu dari keduanya (0,181 ton dan 0,197 ton) serta 0,019 ton sampah langsung dialirkan ke gasifikasi. Proses ini menghasilkan 0,378 ton residu yang dibuang ke *landfill*. Analisis terbatas hingga tahap gasifikasi. Adapun rincian kuantitas sampah tiap pengolahanya seperti yang tercantum dalam Gambar 5.

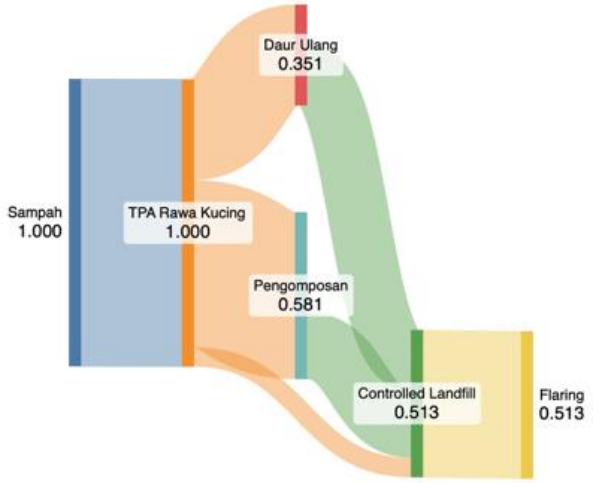


Gambar 5. Neraca Massa Skenario 1

Hasil perhitungan neraca sampah pada tiap tahap pengolahan digunakan sebagai data input untuk skenario gasifikasi. Selain itu, proses gasifikasi memerlukan beberapa bahan tambahan dalam jumlah kecil per ton sampah, yaitu aseton 2,52 kg, propana 0,0287 kg, arang kayu 1,36 kg, dan air 12,91 kg (Ouedraogo *et al.,* 2021). Data output berupa emisi gas diperoleh dari referensi *Enviros Consulting Ltd et al.* (2004), yang memuat data emisi dari berbagai metode pengolahan termal sampah.

Skenario 2: Flaring

Pada skenario *flaring*, dari 1 ton sampah yang masuk, 0,351 ton didaur ulang dan 0,581 ton dikomposkan. Residu dari kedua proses (0,213 dan 0,232 ton) serta 0,068 ton sampah tak terolah masuk ke *landfill,* total 0,514 ton. Sampah di *landfill* kemudian ditangani dengan sistem *flaring* untuk menekan emisi gas. Adapun rincian kuantitas sampah tiap pengolahanya seperti yang tercantum dalam Gambar 6.



Gambar 6. Neraca Massa Skenario 2

3.6.2 Pengkajian Dapak Siklus Hidup

Pengkajian dampak dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *software OpenLCA* 2.3.1 dengan metode analisis CML-IA *baseline*, yang dipilih karena sesuai dengan kebutuhan studi. Tujuan pengkajian ini adalah membandingkan dampak lingkungan dari tiga skenario pengelolaan sampah di TPA Rawa Kucing, yaitu *controlled landfill*, gasifikasi, dan *flaring,* untuk menentukan skenario dengan dampak paling rendah. Proses pengkajian meliputi tahap *running flow* dan *process*, yang kemudian dilanjutkan dengan kalkulasi dampak siklus hidup.

3.6.3 Interpretasi Siklus Hidup

Interpretasi LCA menunjukkan bahwa skenario gasifikasi memiliki dampak pemanasan global terendah, namun skenario *flaring* adalah yang paling ramah lingkungan secara keseluruhan, karena proses pembakarannya sederhana dan minim emisi residu. Sebaliknya, skenario *controlled landfill* memiliki dampak terbesar akibat pelepasan metana dan air lindi tanpa pengelolaan. Menurut Statista (2023), Indonesia menyumbang 4% emisi metana global, dengan total 430 juta ton pada 2022. TPA Rawa Kucing berkontribusi 13,5 Gg (0,004%) per tahun. Melalui skenario *flaring* yang mampu menurunkan emisi 15%, emisi turun menjadi 2,03 Gg (0,0006% dari total nasional), mendukung target NDC pengurangan emisi 30% pada 2030. Persentase pengurangan tertera pada Tabel 6.

Tabel 6. Persentase kontribusi pengurangan emisi gas Metana TPA Rawa Kucing ke emisi nasional dan emisi Global dengan skenario terpilih

	Emisi Global	Emisi Nasional		Emisi TPA Rawa Kucing	
	Ton Emisi	Ton Emisi	%	Ton Emisi	%
Eksisting	8750 juta	350 juta	4%	13500	0,004%
Skenario	8749,9 juta	349,9 juta	4%	2030	0,0006%

3.6.4 Perbandingan Dampak 3 Skenario

Analisis dampak menggunakan metode ecoinvent LCIA CML-IA *Baseline* meliputi kategori asidifikasi, eutrofikasi, ekotoksisitas air tawar, pemanasan global, toksisitas manusia, ekotoksisitas air laut, oksidasi fotokimia, ekotoksisitas darat, dan penipisan ozon. Dari ketiga skenario yang dianalisis, skenario eksisting (*controlled landfill*) menunjukkan dampak terbesar, khususnya pada pemanasan global dengan emisi sebesar 923,82 kg CO_2 eq per ton sampah. Skenario ini juga memiliki profil dampak yang paling kompleks dibandingkan dengan skenario lainnya. Perbandingan dampak secara rinci dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Besaran Dampak per Skenario

Dampak	*Controlled Landfill*	Gasifikasi	*Flaring*	Satuan
Asidifikasi	0	0,2058	0,12	kg SO_2 eq
Eutrofikasi	0	0,0507	0	kg PO_4-- eq
Ekotoksistas Akuatik Air Tawar	0,00016	0,01897	0	kg 1,4-DB eq
Pemanasan global	923,81642	25,62	279,912	kg CO_2 eq
Toksisitas manusia	2,46309	1,83903	0,0096	kg 1,4-DB eq
Ekotoksisitas air laut	0,02452	4574,487	0	kg 1,4-DB eq
Oksidasi fotokimia	0,19255	0,24866	0,03	kg C_2H_4 eq
Ekotoksisitas darat	0,00057	0,48356	0	kg 1,4-DB eq
Penipisan Lapisan Ozon	0,00094	0	0	kg CFC-11 eq

4. KESIMPULAN

Pemodelan emisi gas metana di TPA Rawa Kucing menggunakan *LandGEM* (506,51 Gg/tahun) dan divalidasi dengan IPCC (552 Gg/tahun), menunjukkan selisih 1,16 Gg/tahun. Estimasi emisi per m^3 sampah adalah 0,00003 Gg, dipengaruhi oleh kandungan organik 58%. Analisis OpenLCA 2.3.1 membandingkan tiga skenario: skenario 0 (*controlled landfill)* menghasilkan emisi tertinggi (923,82 kg CO_2 eq/ton), skenario 1 (gasifikasi) lebih rendah (25,62 kg CO_2 eq/ton), dan skenario 2 (*flaring*) paling rendah (279,91 kg CO_2 eq/ton). Skenario *flaring* dipilih sebagai opsi dengan dampak lingkungan paling kecil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengungucapkan Syukur kepada Allah SWT atas Rahmat dan hidayah-Nya sehingga penelitian dapat terlaksana dan terselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis haturkan kepada kedua orang tua dan keluarga yang tanpa henti memberikan

dorongan, motivasi, serta doanya. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Dr. Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S. T., M. Eng., Dr. Ir. Hijrah Purnama Putra, S. T., M. Eng., I.P.P, dan Ikrom Mustofa, S.Si., M.Sc. selaku pembimbing dan penguji penulis dalam proses penyusunan yang memberikan arahan dan masukan. Penulis juga berterima kasih kepada seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia atas ilmu yang telah diberikan. Serta penulis berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan baik secara langsung, maupun tidak langsung. Semoga semua pihak terkait diberikan balasan yang setimpal dari Alllah SWT.

REFERENSI

Anasstasia, T. T., Lestianingrum, E., Cahyono, R. B., & Aziz, M. M. (2020). Life cycle assessment of refuse derived fuel (RDF) for municipal solid waste (MSW) management: Case study area around cement industry, Cirebon, Indonesia. *Material Sains dan Teknik*, 778(1).

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 5. Waste*. Diakses pada 20 November 2024, dari https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html

Nugroho, L., Saptono, R., & Hariyadi, A. (2021). Sistem monitoring kadar gas metana (CH_4), gas amonia (NH_3) dan gas karbon dioksida (CO_2) pada tempat pembuangan sampah untuk pencegahan penyakit ISPA berbasis wireless sensor network. *Journal of Telecommunication Network (Jurnal Jaringan Telekomunikasi)*, 11(4), 220–227.

Nurjaya, L. A. N. W., & Rachmanto, T. A. (2023). Potensi produksi gas metana (CH_4) dari kegiatan landfilling di TPA Bengkulu Buleleng dengan kombinasi pemodelan LandGEM, IPCC, dan LCA. *Emvirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(2), 114–123.

Oudraogo, A. S., Frazier, R. S., & Kumar, A. (2021). Comparative life cycle assessment of gasification and landfilling for disposal of municipal solid wastes. *Energies*, 14, 7032. https://doi.org/10.3390/en14157032

Statista. (2023). Waste-related methane emissions from Indonesia from 2010 to 2030. Diakses pada 17 April 2025, dari https://www.statista.com/statistics/1418115/waste-related-methane-emissions-from-indonesia/

US EPA. (2020). *Landfill gas energy project development handbook.*