

Analisis Potensi Dampak Lingkungan Dari Pembentukan Gas Metana Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Jabon Kabupaten Sidoarjo

Putrie Radhika Shafadala Susanto, Firra Rosariawari*, Purnomo

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: firra.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 22 Juni 2026

Disetujui: 26 Juni 2026

Abstract

This study projects methane (CH₄) emissions, compares calculation methods, and evaluates environmental impacts at the Griyo Mulyo Jabon Landfill, Sidoarjo. Simulations using LandGEM v3.1 indicate that (CH₄) emissions will peak in 2027 at 8,690 Mg/year. For the 2025 evaluation year, LandGEM estimates emissions at 7,717 Mg/year, whereas the IPCC Tier 1 method yields a higher estimate of 11,055.7 Mg/year. These 2025 emissions convert to greenhouse gas loads of 213,360 Mg CO₂-eq/year (LandGEM) and 309,559.6 Mg CO₂-eq/year (IPCC). Furthermore, Life Cycle Assessment (LCA) using the CML-IA Baseline method on openLCA for the 2027 peak year quantifies a Global Warming Potential (GWP) of 2.43×10^8 kg CO₂-eq and a Photochemical Oxidation Potential (POCP) of 5.21×10^4 kg C₂H₄-eq. These findings underscore the urgency of strategic intervention. Landfill operators are highly recommended to implement active gas recovery, controlled flaring, and optimized compost-based biocovers to effectively mitigate climate impacts and local photochemical smog risks.

Keywords: *ch₄ emission, landgem v3.01, ipcc tier 1, life cycle assessment, gwp, tpa griyo mulyo jabon sidoarjo*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan memproyeksikan emisi metana (CH₄), membandingkan metode perhitungan, serta mengevaluasi dampak lingkungan di TPA Griyo Mulyo Jabon, Sidoarjo. Hasil simulasi LandGEM v3.1 menunjukkan emisi CH₄ diproyeksikan mencapai puncak pada tahun 2027 sebesar 8.690 Mg/tahun. Pada tahun evaluasi 2025, estimasi emisi LandGEM sebesar 7.717 Mg/tahun, sedangkan metode IPCC Tier 1 menghasilkan angka lebih tinggi yaitu 11.055,7 Mg/tahun. Emisi tahun 2025 tersebut setara dengan beban emisi gas rumah kaca sebesar 213.360 Mg CO₂-eq/tahun (LandGEM) dan 309.559,6 Mg CO₂-eq/tahun (IPCC). Lebih lanjut, analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan metode CML-IA Baseline pada *software* openLCA untuk tahun puncak 2027 menghasilkan nilai *Global Warming Potential* (GWP) sebesar $2,43 \times 10^8$ kg CO₂-eq dan *Photochemical Oxidation Potential* (POCP) sebesar $5,21 \times 10^4$ kg C₂H₄-eq. Temuan ini menegaskan pentingnya langkah mitigasi taktis. Pengelola TPA direkomendasikan menerapkan sistem penangkapan gas aktif, pembakaran terkendali (*flaring*), serta optimalisasi lapisan penutup tanah organik (*biocover*) untuk menekan laju emisi dan risiko kabut asap fotokimia lokal.

Kata Kunci: *emisi metana, landgem v3.01, ipcc tier 1, life cycle assessment, gwp, tpa griyo mulyo jabon sidoarjo*

1. Pendahuluan

Tingkat pertumbuhan penduduk berpengaruh pada volume sampah yang berasal dari hasil konsumsi penduduk. Semakin meningkatnya pertumbuhan jumlah penduduk, pembangunan dan kegiatan industri, maka sampah yang dihasilkan juga akan semakin meningkat. [1]. Peningkatan volume limbah secara linier berpotensi menurunkan kualitas ambien lingkungan jika tidak diimbangi dengan sistem manajemen terpadu pada Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sebagai fasilitas penampungan tahap akhir. Kementerian Lingkungan Hidup (2012) menyatakan bahwa masyarakat Indonesia menghasilkan sekitar 28.4 ribu ton sampah plastik/hari. Sedangkan *Indonesia Solid Waste Association* (InsWA) menyatakan bahwa jumlah sampah plastik di Indonesia telah mencapai angka 5.4 juta ton/tahun atau setara dengan 14% dari keseluruhan produksi sampah di Indonesia [2]. UPTD TPA Griyo Mulyo Jabon merupakan salah satu infrastruktur pengelolaan sampah utama di Provinsi Jawa Timur yang melayani wilayah domestik Kabupaten Sidoarjo. Fasilitas ini menerima pasokan harian sebesar 100–300 ton/hari yang didominasi oleh fraksi organik basah mencapai 64,32% [3].

Meskipun UPTD TPA Griyo Mulyo Jabon telah menerapkan sistem *sanitary landfill*, dekomposisi biologis bahan organik secara anaerobik di dalam sel timbunan secara alamiah tetap melepaskan emisi *landfill gas* (LFG). Komponen utama LFG terdiri atas gas metana (CH_4) sebesar 45–60% dan karbon dioksida (CO_2) sebesar 40–60% [4]. Akumulasi emisi metana yang tidak dikelola dengan baik memicu risiko kedaruratan fisik lokal berupa bahaya ledakan dan kebakaran internal apabila konsentrasinya di udara melebihi ambang batas aman 1% volume berdasarkan Peraturan Menteri LHK No. 22/2021 [5]. Selain itu, emisi gas minor seperti hidrogen sulfida (H_2S) dan amonia (NH_3) turut memperburuk polusi bau serta memicu toksisitas pernapasan bagi komunitas pekerja maupun masyarakat sekitar [6].

Dalam skala makro global, emisi metana bertindak sebagai gas rumah kaca (GRK) agresif yang berkontribusi signifikan terhadap pemanasan global. Senyawa ini memiliki nilai *Global Warming Potential* (GWP) 25 kali lebih kuat dibandingkan CO_2 dalam jangka waktu GWP 100 tahun [7]. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan matematis yang akurat untuk mengestimasi timbulan emisi di masa depan. Beberapa instrumen aplikatif yang diakui secara internasional adalah model kinetika orde pertama melalui *software* LandGEM v3.1 buatan US EPA serta metode *macro mass balance* berbasis IPCC Tier 1 [8]. Kedua metode ini memiliki sensitivitas parameter input yang berbeda, sehingga studi komparasi di tingkat tapak (*site-specific*) sangat krusial untuk meminimalkan ketidakpastian (*uncertainty*) data proyeksi emisi [9]. Pendekatan pemodelan ini juga telah banyak diterapkan untuk memetakan fluks gas metana secara akurat pada wilayah urban dengan karakteristik timbulan sampah yang fluktuatif [10].

Guna menyajikan analisis yang komprehensif, kuantifikasi volume emisi gas metana dari hasil proyeksi perlu diintegrasikan dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) berdasarkan standar ISO 14040/14044. Melalui pendekatan metode penilaian dampak CML-IA Baseline pada *software* openLCA, inventori emisi mentah dapat diterjemahkan secara sistemik menjadi indikator potensi dampak lingkungan yang terukur, khususnya GWP dan *Photochemical Oxidation Potential* (POCP) [11, 12]. Integrasi LCA dengan baseline CML-IA terbukti andal dalam mengonversi beban emisi gas organik hasil dekomposisi menjadi parameter kerusakan lingkungan global [13]. Meskipun studi emisi TPA banyak dilakukan, integrasi antara pemodelan kinetika LandGEM v3.1, validasi IPCC Tier 1, dan analisis LCA berbasis CML-IA secara spesifik pada karakteristik sampah organik tinggi di wilayah urban Jawa Timur masih sangat terbatas.

Penelitian ini bertujuan memproyeksikan laju generasi emisi CH_4 di UPTD TPA Griyo Mulyo Jabon menggunakan LandGEM v3.1 dan IPCC Tier 1. Selanjutnya, analisis komparatif dilakukan untuk menguji akurasi antar-metode pada tahun evaluasi, diikuti kuantifikasi potensi dampak lingkungan regionalnya menggunakan openLCA. Hasil kajian ini diharapkan mampu memberikan justifikasi ilmiah yang valid serta rekomendasi mitigasi teknis yang aplikatif bagi otoritas pengelola TPA di wilayah urban.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di UPTD Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Griyo Mulyo Jabon yang berlokasi di Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur. Batasan sistem dalam penelitian ini dikategorikan sebagai *gate-to-gate*, yang berfokus pada analisis emisi fase gas di dalam sel penimbunan TPA sejak awal operasional tahun 2006 hingga tahun proyeksi 2026. Potensi pembentukan emisi gas metana diestimasi menggunakan model LandGEM, yang kemudian divalidasi dengan standar IPCC Tier 1. Selanjutnya, potensi dampak lingkungan dari emisi tersebut dievaluasi secara komprehensif menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan pendekatan CML-IA *baseline*.



Gambar 1. TPA Jabon, Sidoarjo
Sumber : Google Earth, 2026

Data yang digunakan berupa tonase laju penerimaan sampah tahunan periode 2006–2025 diperoleh dari laporan resmi Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Sidoarjo (DLH Sidoarjo), sedangkan data fraksi

karakteristik sampah organik mengacu pada Rencana Induk Persampahan Kabupaten Sidoarjo Tahun 2024–2044 [DLH Sidoarjo, 2023].

Tahap pertama pengolahan data dilakukan melalui simulasi pemodelan kinetika dekomposisi orde pertama menggunakan *software* Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) v3.1 buatan US EPA. Parameter input karakteristik yang digunakan adalah indeks laju generasi metana (k) sebesar $0,098 \text{ tahun}^{-1}$ dan potensi generasi metana (L_0) sebesar $0,17 \text{ m}^3/\text{Mg}$, yang disesuaikan dengan nilai inventori kondisi iklim wilayah Indonesia. Konsentrasi *Non-Methane Organic Compounds* (NMOC) ditetapkan sebesar 550 ppmv sebagai heksana dengan fraksi volume metana murni sebesar 50%. Penentuan tahun penutupan TPA pada model LandGEM v3.1 ditetapkan berdasarkan skenario proyeksi hingga tahun 2026. Asumsi ini dipilih untuk merepresentasikan batas akhir periode operasional aktif sel penimbunan eksisting, sekaligus sebagai batas lini masa operasional penimbunan sampah campuran (*bulk waste*) sebelum dilakukan analisis potensi dampak lingkungan jangka panjang.

Sebagai langkah komparasi akurasi, nilai numerik antar-metode dievaluasi secara spesifik pada tahun evaluasi 2025. Hasil simulasi kurva emisi dari LandGEM v3.1 dikomparasikan secara matematis dengan perhitungan manual menggunakan lembar lajur persamaan standar IPCC Tier 1. Seluruh hasil output massa mentah gas metana (CH_4) kemudian dikonversikan ke satuan massa karbon dioksida ekuivalen ($\text{CO}_2\text{-eq}$) menggunakan faktor pengali *Global Warming Potential* (GWP) sebesar 25 berdasarkan metrik *IPCC Fourth Assessment Report* (AR4).

Tahap kedua penelitian mengaplikasikan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) terstandarisasi ISO 14040/14044 menggunakan perangkat lunak openLCA v2.6.2. Inventori siklus hidup (*Life Cycle Inventory* - LCI) disusun dengan memasukkan total massa emisi metana hasil proyeksi tahun puncak 2027 ke dalam menu *Process* sebagai aliran dasar keluaran ke udara bebas (*elementary flow to air/high population density*) sebesar $8,690 \times 10^6 \text{ kg CH}_4$ (8.690.000 kg CH_4). Selanjutnya, tahapan penilaian dampak siklus hidup (*Life Cycle Impact Assessment* - LCIA) dijalankan menggunakan metode evaluasi ilmiah CML-IA Baseline (versi 3.05) besutan Leiden University. Berdasarkan karakteristik input data inventori emisi yang dibatasi pada fase udara, kuantifikasi potensi dampak difokuskan pada dua kategori indikator lingkungan utama, yaitu *Global Warming Potential* (GWP) dengan satuan kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ dan *Photochemical Oxidation Potential* (POCP) dengan satuan kg $\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$. Hasil akhir visualisasi grafik dan interpretasi ilmiah dari kedua dampak tersebut digunakan untuk menyusun hierarki rekomendasi mitigasi taktis di area UPTD TPA Griyo Mulyo Jabon.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Proyeksi Penduduk Metode Geometri

Proyeksi jumlah penduduk untuk mengestimasi timbunan sampah dari tahun 2006 hingga 2021 dihitung menggunakan tiga pendekatan matematika, yaitu metode aritmatika, geometri, dan *least square*. Berdasarkan hasil analisis uji kesesuaian (*chi-square* / koefisien korelasi (R^2)), metode geometri dipilih karena menghasilkan nilai koefisien yang paling mendekati 1 dibandingkan metode lainnya.

Tabel 1. Perhitungan Koefisien Korelasi (r) dengan metode Geometri

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	X	Y	X ²	Y ²	XY
2006	1.812.800	1	14,410	1	207,659	14,410
2007	1.850.580	2	14,431	4	208,254	28,862
2008	1.884.200	3	14,449	9	208,774	43,347
2009	1.917.320	4	14,466	16	209,278	57,866
2010	1.945.252	5	14,481	25	209,697	72,405
2011	1.982.510	6	14,500	36	210,246	86,999
2012	2.015.996	7	14,517	49	210,732	101,616
2013	2.049.274	8	14,533	64	211,208	116,264
2014	2.084.109	9	14,550	81	211,698	130,949
2015	2.117.279	10	14,566	100	212,158	145,656
2016	2.150.500	11	14,581	121	212,612	160,393
2017	2.183.682	12	14,597	144	213,058	175,158

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	X	Y	X ²	Y ²	XY
2018	2.216.800	13	14,612	169	213,498	189,950
2019	2.249.500	14	14,626	196	213,926	204,767
2020	2.082.801	15	14,549	225	211,680	218,238
2021	1.955.002	16	14,486	256	209,841	231,774
Jumlah	32.497.605	136	232,353	1496	3374,320	1978,656
R						0,782

Sumber: Hasil Analisis, 2026

Berdasarkan hasil perhitungan nilai koefisien korelasi (r) ketiga metode yang mendekati angka 1 adalah metode Geometrik dengan nilai $r = 0,782$. Oleh karena itu, metode Geometrik dapat dianggap lebih dapat dipercaya dalam melakukan proyeksi penduduk dibandingkan dengan metode Aritmatika dan Least Square yang memiliki nilai koefisien korelasi yang lebih rendah. Persentase pertumbuhan Penduduk Kabupaten Sidoarjo. Sebelum menghitung proyeksi jumlah Penduduk Kabupaten, maka diperlukan nilai persentase pertumbuhan Penduduk Kabupaten Sidoarjo terlebih dahulu.

Tabel 2. Persentase penduduk (r)

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	Penambahan Penduduk	Persentase Penduduk (r) (%)
2006	1.812.800	0	0
2007	1.850.580	37.780	2,06
2008	1.884.200	33.620	1,80
2009	1.917.320	33.120	1,74
2010	1.945.252	27.932	1,45
2011	1.982.510	37.258	1,90
2012	2.015.996	33.486	1,67
2013	2.049.274	33.278	1,64
2014	2.084.109	34.835	1,69
2015	2.117.279	33.170	1,58
2016	2.150.500	33.221	1,56
2017	2.183.682	33.182	1,53
2018	2.216.800	33.118	1,51
2019	2.249.500	32.700	1,46
2020	2.082.801	-166.699	-7,70
2021	1.955.002	-127.799	-6,33
Rata-rata			0,50

Sumber: Hasil Analisis, 2026

Dari hasil perhitungan maka dapat dilakukan perhitungan proyeksi pertumbuhan jumlah Penduduk Kabupaten Sidoarjo yang dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Perhitungan proyeksi penduduk dengan metode Geometrik

Tahun	Po	t	r	$P_n = P_o(1+r)^t$
2006	1.812.800	1	0,0050	1.821.864
2007	1.812.800	2	0,0050	1.830.973
2008	1.812.800	3	0,0050	1.840.128
2009	1.812.800	4	0,0050	1.849.329

Tahun	Po	t	r	$P_n = P_o(1+r)^t$
2010	1.812.800	5	0,0050	1.858.575
2011	1.812.800	6	0,0050	1.867.868
2012	1.812.800	7	0,0050	1.877.208
2013	1.812.800	8	0,0050	1.886.594
2014	1.812.800	9	0,0050	1.896.027
2015	1.812.800	10	0,0050	1.905.507
2016	1.812.800	11	0,0050	1.915.034
2017	1.812.800	12	0,0050	1.924.610
2018	1.812.800	13	0,0050	1.934.233
2019	1.812.800	14	0,0050	1.943.904
2020	1.812.800	15	0,0050	1.953.623
2021	1.812.800	16	0,0050	1.963.391

Sumber: Hasil Analisis, 2026

3.2 Timbulan Sampah

Data Timbulan Sampah TPA Jabon, didapatkan melalui Unit Pelaksana Teknis Daerah (UPTD) Tempat Pemrosesan Akhir Griyo Mulyo Jabon untuk tahun 2022-2025, dan Januari-April 2026.

Tabel 4. Data sampah yang masuk TPA 2022-2026

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	Sampah yang masuk TPA (Ton/tahun)	Sampah yang masuk TPA (kg/tahun)	Jumlah sampah masuk TPA (Ton/hari)	Jumlah sampah masuk TPA (kg/hari)
2022	1.996.142	201.975	201975000	553,36	553356,16
2023	2.012.316	189.339	189339000	518,74	518736,99
2024	2.027.874	184.270	184270000	504,85	504849,32
2025	2.041.260	195.590	195590000	535,86	535863,01
2026	2.054.430	202339	202339270,8	554,35	554354,17

Sumber: Hasil Analisis, 2026

Pada **Tabel 4** di atas, data timbulan sampah untuk tahun 2026 disajikan berdasarkan hasil akumulasi data riil jembatan timbang UPTD TPA Griyo Mulyo Jabon periode bulan Januari hingga April 2026. Data riil selama 4 bulan tersebut (total 66.523 Ton dalam 120 hari) diakumulasi untuk memperoleh angka rata-rata timbulan harian sebesar 554,35 Ton/Hari. Selanjutnya, nilai harian ini dikonversikan ke dalam jumlah hari setahun penuh (365 hari) guna memperoleh estimasi total timbulan sampah tahunan (Ton/Tahun) yang representatif untuk pemodelan pada software LandGEM.

Tabel 5. Data sampah yang masuk TPA Jabon tahun 2006-2026

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	Laju Sampah per kapita (kg/orang/hari)	Total Timbulan Sampah (Ton/Tahun)
2006	1.812.800	0,69	153.402
2007	1.850.580	0,70	158.165
2008	1.884.200	0,70	162.649
2009	1.917.320	0,71	167.163
2010	1.945.252	0,72	171.294
2011	1.982.510	0,73	176.321
2012	2.015.996	0,73	181.092
2013	2.049.274	0,74	185.922

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	Laju Sampah per kapita (kg/orang/hari)	Total Timbulan Sampah (Ton/Tahun)
2014	2.084.109	0,75	190.973
2015	2.117.279	0,75	195.953
2016	2.150.500	0,76	201.018
2017	2.183.682	0,77	206.161
2018	2.216.800	0,78	211.380
2019	2.249.500	0,79	216.643
2020	2.082.801	0,79	202.595
2021	1.955.002	0,80	192.065
2022	1.996.142	0,81	201.975
2023	2.012.316	0,82	189.339
2024	2.027.874	0,83	184.270
2025	2.041.260	0,83	195.590
2026	2.054.430	0,84	202.339

Sumber : Hasil Analisis, 2026

3.3 Potensi Produksi Gas Metana dengan Model LandGEM

Data timbulan sampah tahunan Kabupaten Sidoarjo yang masuk ke UPTD TPA Griyo Mulyo Jabon merupakan parameter input utama (*waste acceptance rate*) yang dibutuhkan dalam simulasi model LandGEM. Data historis penimbunan sampah ini disusun berdasarkan kombinasi perhitungan matematis proyeksi penduduk, tingkat pelayanan aktual daerah, serta rekaman riil jembatan timbang TPA.

Tabel 6. Input Data Historis Timbulan Sampah

Year	Input Units	Calculated Units
	US tons/year	(Mg/yr)
2006	153.402	139.165
2007	158.165	143.486
2008	162.649	147.554
2009	167.163	151.649
2010	171.294	155.397
2011	176.321	159.957
2012	181.092	164.286
2013	185.922	168.667
2014	190.973	173.250
2015	195.953	177.767
2016	201.018	182.362
2017	206.161	187.028
2018	211.380	191.763
2019	216.643	196.537
2020	202.595	183.793
2021	192.065	174.240
2022	201.975	183.231
2023	189.339	171.767
2024	184.270	167.169

Year	Input Units	Calculated Units
	US tons/year	(Mg/yr)
2025	195.590	177.438
2026	202.339	183.561

Sumber: Hasil Analisis, 2026 (LandGEM v3.1)

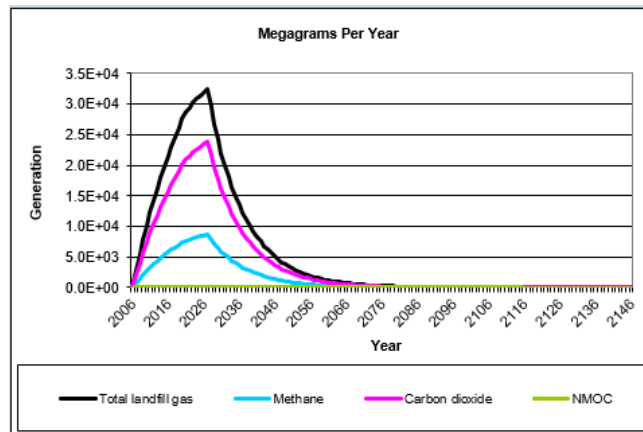
Berdasarkan data pada **Tabel 6**, terlihat fluktuasi volume sampah masuk secara retrospektif. Pada periode awal operasional (2006), kuantitas sampah masuk berada pada angka 139.165 Mg/tahun dan terus mengalami eskalasi linier akibat pertumbuhan penduduk hingga mencapai 187.028 Mg/tahun di tahun 2017. Penurunan timbunan sampah mulai terjadi secara bertahap pasca-2020 akibat adanya dinamika kebijakan pembatasan sosial dan optimalisasi pemilahan sampah di hulu tingkat kecamatan, sebelum akhirnya mencapai akumulasi tahun penutupan (2026) sebesar 183.561 Mg/tahun. Total akumulasi penimbunan sampah historis ini berada di bawah batas kapasitas desain maksimum TPA Jabon Sidoarjo sebesar 1.600.000 Mg. Kumpulan data runtun waktu (*time-series*) kuantitatif inilah yang ditranslasikan oleh spreadsheet LandGEM v3.1 menjadi fluks emisi gas metana tahunan.

Tabel 7. Hasil Proyeksi Laju Emisi Gas Metana (CH₄) TPA Jabon Tahun 2006-2030

Year	Methane			Input openLCA (kg/tahun)
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	
2006	0	0	0	0
2007	736	1.103.000	74,12	736.000
2008	1.430	2.137.000	143,60	1.430.000
2009	2.070	3.109.000	208,90	2.070.000
2010	2.680	4.020.000	270,10	2.680.000
2011	3.250	4.877.000	327,70	3.250.000
2012	3.800	5.690.000	382,30	3.800.000
2013	4.310	6.462.000	434,20	4.310.000
2014	4.800	7.196.000	483,50	4.800.000
2015	5.270	7.898.000	530,70	5.270.000
2016	5.720	8.571.000	575,90	5.720.000
2017	6.150	9.217.000	619,30	6.150.000
2018	6.560	9.839.000	661,10	6.560.000
2019	6.970	10.440.000	701,60	6.970.000
2020	7.360	11.020.000	740,70	7.360.000
2021	7.640	11.450.000	769,50	7.640.000
2022	7.850	11.760.000	790,50	7.850.000
2023	8.090	12.120.000	814,40	8.090.000
2024	8.240	12.350.000	829,90	8.240.000
2025	8.360	12.520.000	841,40	8.360.000
2026	8.510	12.760.000	857,40	8.510.000
2027	8.690	13.030.000	875,20	8.690.000
2028	7.880	11.810.000	793,40	7.880.000
2029	7.140	10.710.000	719,40	7.140.000
2030	6.480	9.707.000	652,20	6.480.000

Sumber: Hasil Analisis, 2026 (LandGEM v3.1)

Simulasi menggunakan model *First-Order Decay* pada LandGEM v3.1 menunjukkan emisi gas metana (CH_4) di TPA Griyo Mulyo Jabon meningkat konsisten sepanjang periode aktif (2006–2026), dari 0 Mg/tahun pada 2006 hingga mencapai 8.510 Mg/tahun pada akhir operasional (2026). Akumulasi emisi tertinggi (*maximum methane generation*) diproyeksikan terjadi pada tahun 2027 (satu tahun pasca-penutupan) sebesar 8.690 Mg/tahun (setara 13.030.000 m^3 /tahun). Jeda waktu dekomposisi ini divalidasi oleh karakteristik fraksi sampah organik basah Kabupaten Sidoarjo yang memerlukan waktu stabilisasi kondisi anaerobik aktif selama kurang lebih 12 bulan di bawah tanah penutup. Setelah tahun 2027, laju emisi menurun secara eksponensial akibat penyusutan kandungan karbon organik terdegradasi (*Degradable Organic Carbon*), hingga mencapai 6.480 Mg/tahun pada tahun 2030. Runtun waktu emisi ini selanjutnya diintegrasikan ke dalam *openLCA* sebagai data *Life Cycle Inventory* (LCI) untuk mengukur dampak lingkungan global.



Gambar 2. Proyeksi Laju Emisi Gas TPA Jabon Sidoarjo dalam Satuan Massa (*Megagrams Per Year*)
Sumber: Hasil Analisis, 2026

3.4 Perbandingan Estimasi Emisi Metode LandGEM dan IPCC Tier 1

1) Perhitungan Emisi CH_4 (Metode IPCC Tier 1)

Tabel 8. Perhitungan Estimasi Emisi Gas Metana (CH_4) Berdasarkan Metode IPCC Tier 1

No	Tahun	Sampah Diterima	Fraksi ke TPA (MSWf)	MCF (standar IPCC)	DOC	DOCf	F	Konversi karbon ke metana	Hasil Emisi
1	2006	139.165	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	7.866
2	2007	143.486	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	8.111
3	2008	147.554	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	8.340
4	2009	151.649	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	8.572
5	2010	155.397	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	8.784
6	2011	159.957	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	9.042
7	2012	164.286	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	9.286
8	2013	168.667	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	9.534
9	2014	173.25	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	9.793
10	2015	177.767	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.048
11	2016	182.362	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.308
12	2017	187.028	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.572
13	2018	191.763	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.839
14	2019	196.537	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	11.109
15	2020	183.793	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.389
16	2021	174.24	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	9.849

No	Tahun	Sampah Diterima	Fraksi ke TPA (MSWf)	MCF (standar IPCC)	DOC	DOCf	F	Konversi karbon ke metana	Hasil Emisi
17	2022	183.231	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.357
18	2023	171.767	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	9.709
19	2024	167.169	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	9.449
20	2025	177.438	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.030
21	2026	183.561	1.0	1.0	0.17	0.5	0.5	1.33	10.376

Sumber: Hasil Analisis, 2026

2) Analisis Deviasi Kesesuaian (Validasi Silang)

Kuantifikasi emisi metana pada tahun 2025 berdasarkan output spreadsheet simulasi *software* LandGEM v3.1 menunjukkan nilai sebesar 8.360 Mg/tahun (**Tabel 7**). Analisis tingkat deviasi (*error margin*) di antara kedua metode dihitung menggunakan persamaan selisih relatif sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Selisih (\%)} &= \frac{[Q_{\text{LandGEM}} - Q_{\text{IPCC}}]}{Q_{\text{IPCC}}} \times 100\% \\
 \text{Selisih (\%)} &= \frac{[8.360 - 10.030]}{10.030} \times 100\% \\
 \text{Selisih (\%)} &= \frac{1.670}{10.030} \times 100\% = 16,65\%
 \end{aligned}$$

Hasil analisis menunjukkan persentase deviasi relatif antara model LandGEM v3.1 dan IPCC Tier 1 sebesar 16,65%. Berdasarkan kriteria Amini et al. (2023), nilai selisih dalam rentang 10–20% mengindikasikan tingkat akurasi pemodelan yang tinggi dan valid sesuai standar internasional [IPCC, 2006]. Nilai estimasi IPCC Tier 1 yang cenderung lebih tinggi (*overestimate*) dinilai wajar karena metode ini menerapkan asumsi pelepasan instan (*instantaneous release*) pada tahun yang sama. Sebaliknya, LandGEM v3.1 bekerja lebih sensitif menggunakan pendekatan kinetika orde pertama dengan konstanta laju peluruhan $k = 0,098 \text{ tahun}^{-1}$ secara bertahap. Kesesuaian kedua metode ini membuktikan keandalan data inventori sebelum dilakukan simulasi dampak lingkungan menggunakan openLCA (Siregar et al., 2024).

3.5 Analisis Potensi Dampak Lingkungan dengan Metode CML-IA Baseline

Tahap akhir penelitian ini adalah mengukur kontribusi emisi metana (CH_4) terhadap beban lingkungan menggunakan openLCA v2.6.2 dengan metode *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) CML-IA Baseline V3.05 [Guinée et al., 2002]. Data fluks emisi tahunan (kg/tahun) hasil pemodelan LandGEM v3.1 diintegrasikan sebagai *Life Cycle Inventory* (LCI) pada aliran emisi ke udara (*emission to air*) di dalam sistem openLCA. Melalui algoritma faktor karakterisasi *midpoint*, akumulasi beban emisi tersebut secara otomatis ditranslasikan ke dalam lima kategori dampak lingkungan utama.

1. Konversi Emisi Gas Metana ke CO_2 -Ekuivalen ($\text{CO}_2\text{-eq}$)

Sebelum simulasi dampak lingkungan pada openLCA v2.6.2, dilakukan verifikasi konversi kuantitas emisi metana (CH_4) menjadi metrik karbon dioksida ekuivalen ($\text{CO}_2\text{-eq}$) [Guinée et al., 2002]. Prosedur ini menerapkan faktor karakterisasi *Global Warming Potential* (GWP) dengan horizon waktu 100 tahun. Untuk menjaga konsistensi dengan metode CML-IA Baseline V3.05 pada openLCA, nilai konstanta pengali GWP gas metana ditetapkan sebesar 25 berdasarkan laporan *IPCC Fourth Assessment Report* (AR4).

Tabel 9. Rekapitulasi Output Simulasi LandGEM v3.01 dan Konversi Emisi Gas Metana (CH_3) ke Karbon Dioksida Ekuivalen ($\text{CO}_2\text{-eq}$)

No	Tahun	Sampah Diterima	Emisi Gas Metana (output LandGEM) Mg/tahun	Emisi $\text{CO}_2\text{-eq}$ (kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ /tahun)
1	2006	153,402	0	0
2	2007	158,165	736000	18400000
3	2008	162,649	1430000	35750000
4	2009	167,163	2070000	51750000
5	2010	171,294	2680000	67000000

No	Tahun	Sampah Diterima	Emisi Gas Metana (output LandGEM) Mg/tahun	Emisi CO ₂ -eq (kg CO ₂ -eq/tahun)
6	2011	176,321	3250000	81250000
7	2012	181,092	3800000	95000000
8	2013	185,922	4310000	107750000
9	2014	190,973	4800000	120000000
10	2015	195,953	5270000	131750000
11	2016	201,018	5720000	143000000
12	2017	206,161	6150000	153750000
13	2018	211,380	6560000	164000000
14	2019	216,643	6970000	174250000
15	2020	202,595	7360000	184000000
16	2021	192,065	7640000	191000000
17	2022	201,975	7850000	196250000
18	2023	189,339	8090000	202250000
19	2024	184,270	8240000	206000000
20	2025	195,590	8360000	209000000
21	2026	202,339	8510000	212750000

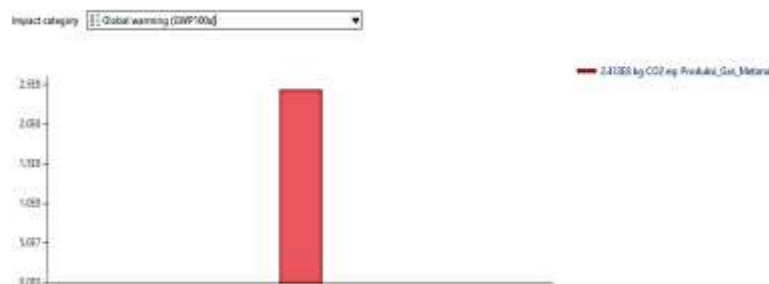
Sumber: Hasil Analisis, 2026

2. Analisis Potensi Dampak Lingkungan Akibat Emisi Gas TPA

Hasil proyeksi emisi dari LandGEM v3.1 dan IPCC Tier 1 yang telah dikonversi ke nilai (CO₂-eq) selanjutnya dievaluasi menggunakan metode CML-IA Baseline. Karena senyawa dominan yang dikaji berupa gas metana (CH₄), analisis dampak difokuskan pada dua kategori utama yang paling relevan, yaitu *Global Warming Potential* (GWP) dan *Photochemical Oxidation Potential* (POCP). Evaluasi kedua dampak tersebut dijabarkan sebagai berikut:

a) Potensi pemanasan global (*Global Warming Potential*)

Simulasi openLCA menggunakan metode CML-IA Baseline difokuskan pada tahun puncak emisi metana di tahun 2027. Hasil kalkulasi menunjukkan total dampak *Global Warming Potential* (GWP) pada tahun puncak tersebut mencapai $2,43 \times 10^8$ kg CO₂-eq

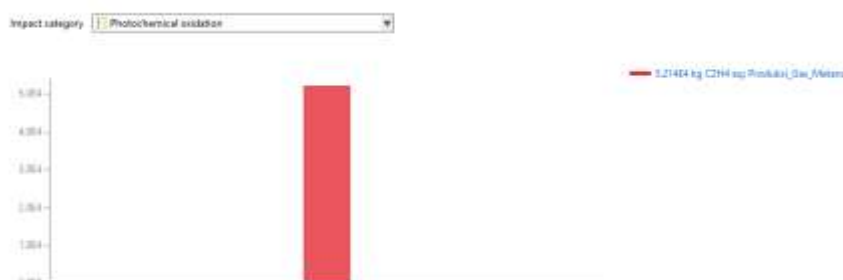


Gambar 3. Grafik Hasil Analisis Dampak *Global Warming Potential* (GWP 100a) pada Tahun Puncak 2027
Sumber: Hasil Analisis, 2026; CML IA Baseline V3.05)

Besarnya dampak GWP pada tahun 2027 dipicu oleh faktor karakterisasi gas metana (CH₄) dalam CML-IA Baseline sebesar 24,83 kg (CO₂-eq CH₄). Hasil simulasi *openLCA* ini selaras dengan estimasi manual dan menegaskan tahun 2027 sebagai periode beban emisi tertinggi bagi lingkungan TPA Griyo Mulyo Jabon. Tanpa adanya sistem penangkapan gas (*gas recovery*) atau pembakaran terkendali (*flaring*) pada tahun puncak tersebut, pelepasan (CH₄) secara bebas akan berkontribusi signifikan terhadap efek rumah kaca di atmosfer.

b) Oksidasi Fotokimia (*Photochemical Oxidation*)

Photochemical Oxidation Potential (POCP) mengukur pembentukan ozon troposfer akibat reaksi emisi gas dengan cahaya matahari dan nitrogen oksida (NO_x). Berdasarkan simulasi *openLCA* dengan metode CML-IA Baseline, nilai dampak POCP pada tahun puncak 2027 mencapai $5,21 \times 10^4$ kg (C_2H_4 -eq).



Gambar 4. Grafik Hasil Analisis Dampak *Photochemical Oxidation* pada Tahun Puncak 2027

Sumber: Hasil Analisis, 2026; CML IA Baseline V3.05)

Nilai dampak tersebut dipicu oleh faktor karakterisasi metana (CH_4) dalam kategori POCP sebesar 0,0005214 kg (C_2H_4 -eq/kg CH_4). Meskipun nilai pengalinya relatif kecil dibandingkan GWP, akumulasi emisi (CH_4) yang masif pada tahun puncak menyebabkan potensi pembentukan oksidator fotokimia tetap signifikan. Tingginya nilai POCP ini mengindikasikan risiko terbentuknya kabut asap fotokimia (*photochemical smog*) di sekitar TPA Griyo Mulyo Jabon saat kondisi cuaca terik. Ozon troposfer yang terbentuk dari reaksi ini bersifat toksik dan berisiko memicu gangguan pernapasan pada manusia serta stres oksidatif pada vegetasi sekitar.

Meskipun metode CML-IA Baseline mencakup kategori dampak lain seperti asidifikasi dan toksisitas manusia (*human toxicity*), penelitian ini membatasi fokus pada GWP dan POCP. Pembatasan ini dilakukan karena data *Life Cycle Inventory* (LCI) yang digunakan hanya bersumber dari emisi (CH_4) hasil luaran LandGEM v3.1. Kategori *human toxicity* menghasilkan nilai nol karena senyawa (CH_4) murni tidak memiliki faktor karakterisasi toksisitas langsung dalam metode CML-IA Baseline, serta tidak adanya input emisi senyawa toksik lain seperti logam berat dalam batasan sistem *gate-to-gate* penelitian ini.

3.6 Rekomendasi Mitigasi Dampak Lingkungan Emisi Gas TPA

Tingginya nilai GWP dan POCP pada tahun puncak 2027 memerlukan langkah mitigasi taktis dan struktural di TPA Griyo Mulyo Jabon melalui tiga alternatif solusi:

1. **Gas Recovery & Flaring:** Pemasangan jaringan pipa perforasi vertikal dan horizontal untuk menyedot gas metana aktif menggunakan blower vakum, dilanjutkan pembakaran terkendali dengan *enclosed flaring*. Konversi (CH_4) menjadi (CO_2) menurunkan nilai GWP dari 25 menjadi 1. Sistem ini mampu mereduksi dampak pemanasan global sebesar 80–90% sekaligus mencegah pembentukan kabut asap fotokimia di udara bebas [15].
2. **Landfill Gas to Energy (LFGTE):** Aliran (CH_4) yang ditangkap dialirkan ke unit pemurnian (*gas conditioning*) sebagai bahan bakar generator pembangkit listrik. Transisi sistem pengumpulan gas dan pemanfaatan energi ini krusial untuk meminimalkan risiko lingkungan lokal serta mendukung target penurunan emisi nasional, sekaligus memberikan nilai reduksi karbon (*carbon financing*) [14].
3. **Optimalisasi Biocover:** Penggunaan tanah penutup campuran kompos matang di atas permukaan sel sampah. Lapisan ini menstimulasi bakteri metanotrof untuk mengoksidasi (CH_4) menjadi (CO_2) secara biologis. Penerapan *biocover* menjadi teknologi mitigasi yang efektif dan ekonomis dalam menurunkan emisi gas rumah kaca pada skala TPA regional [16].

4. Kesimpulan

Simulasi menggunakan model LandGEM v3.1 menunjukkan bahwa emisi gas metana (CH_4) di UPTD TPA Griyo Mulyo Jabon meningkat konsisten sejak tahun 2006 dan diproyeksikan mencapai puncaknya pada tahun 2027 sebesar 8.690 Mg/tahun, dengan laju emisi pada tahun evaluasi 2025 sebesar 7.717 Mg/tahun.

Hasil analisis komparatif menunjukkan bahwa metode IPCC Tier 1 menghasilkan estimasi yang lebih tinggi (*overestimate*) pada tahun evaluasi 2025, yaitu sebesar 11.055,7 Mg/tahun. Deviasi ini dinilai

wajar secara ilmiah akibat adanya asumsi pelepasan instan (*instantaneous release*) pada model IPCC Tier 1. Kuantifikasi emisi tahun 2025 setara dengan beban gas rumah kaca sebesar 213.360 Mg CO₂-eq/tahun berdasarkan LandGEM v3.1 dan 309.559,6 Mg CO₂-eq/tahun berdasarkan IPCC Tier 1. Terakhir, simulasi *Life Cycle Assessment* (LCA) menggunakan openLCA dengan metode CML-IA Baseline mengonfirmasi beban dampak lingkungan pada tahun puncak berupa *Global Warming Potential* (GWP) sebesar $2,43 \times 10^8$ kg CO₂-eq dan *Photochemical Oxidation Potential* (POCP) sebesar $5,21 \times 10^4$ kg C₂H₄-eq.

5. Daftar Pustaka

- [1] Santoso, Moch. Rendra Dani, and Elsa Rosyidah. "Peningkatan Kapasitas TPA Melalui Proyeksi Timbulan Sampah Dan Pertumbuhan Penduduk." *Nusantara Technology and Engineering Review*, 2024.
- [2] Antaranews (2015). Sampah Plastik Indonesia Setara dengan Jumlah Produksi. Melalui <https://www.antaranews.com/search?search=sampah+plastik>, 7 Agustus 2021.
- [3] Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Sidoarjo. (2023). *Laporan Kinerja Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah (IKPLHD) Kabupaten Sidoarjo*. Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Sidoarjo
- [4] Njoku, P. O., Odiyo, J. O., & Durowoju, O. S. (2018). Analysis of landfill gas composition and its localized emergency risks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4), 215–227
- [5] Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI. (2021). *Peraturan Menteri LHK Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Sekretariat Negara
- [6] Hidayatullah, Farisa, Surahma Asti Mulasari, and Lina Handayani. "Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Hidrogen Sulfida (H₂S) dan Amonia (NH₃) Pada Masyarakat di TPA Piyungan." *Jurnal Kesehatan Lingkungan: Jurnal dan Aplikasi Teknik Kesehatan Lingkungan*, 2021.
- [7] Solomon, S. (2007, December). IPCC (2007): Climate change the physical science basis. In *Agu fall meeting abstracts* (Vol. 2007, pp. U43D-01).
- [8] Wijaya, S. P., Ainun, S., & Permadi, D. A. (2021, September). Methane emission estimation and dispersion modeling for a landfill in West Java, Indonesia. In *Journal of the Civil Engineering Forum* (Vol. 7, No. 3, pp. 239-252). Petra Christian University.
- [9] Amini, A., & Kraatz, S. (2023). The importance of particularising the model to estimate landfill gas emissions: A comparative review. *Journal of Environmental Management*, 324, 116273.
- [10] Ghosh, P., Shah, G., Chandra, R., Sahota, S., Kumar, H., Vijay, V. K., & Thakur, I. S. (2019). Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India. *Bioresource technology*, 272, 611-615.
- [11] Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards* (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- [12] Klöpffer, W., & Grahl, B. (2014). *Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice*. John Wiley & Sons.
- [13] Ndizeye, Y., Dongjie, N., Umuhzoza, M., Head, S., Mulwa, F., & Collins, M. (2021). Integrated LCA and OPEN LCA-CML baseline analysis on environmental impact associated with the plastic packaging waste management system of Rubavu city Rwanda. *International Journal of Scientific Advances*, 2(2), 152-160.
- [14] Kurniawan, T. A., Liang, X., Singh, D., Othman, M. H. D., Goh, H. H., Gikas, P., ... & Shoqeir, J. A. (2022). Harnessing landfill gas (LFG) for electricity: A strategy to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions in Jakarta (Indonesia). *Journal of environmental management*, 301, 113882.
- [15] Citrasari, N., Rachman, I., & Matsumoto, T. (2025). Sustainable methane emission reduction from landfills: the role of capture and flaring technologies. *Sustainability and Climate Change*, 18(3), 153-167.
- [16] Scheutz, C., Kjeldsen, P., Bogner, J. E., De Visscher, A., Gebert, J., Hilger, H. A., ... & Spokas, K. (2009). Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste management & research*, 27(5), 409-455.
- [17] Aisha, Nina Widyaswasti. "Pengaruh Bank Sampah Terhadap Jumlah Sampah Plastik Di Indonesia." *Jurnal Alternatif - Jurnal Ilmu Hubungan Internasional*, 2023.