

# Estimasi Emisi Gas dari Kegiatan *Landfilling* di TPA Bengkulu dengan Model LandGEM

Luh Asri Ningsih Widhi Nurjaya<sup>1\*</sup>, Silvana Dwi Nurhediana<sup>1,2</sup>, Erwan Adi Saputro<sup>1,2</sup>, Mohd Jumain Jalil<sup>3</sup>, dan Ni Ketut Sari<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Program Penelitian Magister Ilmu Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, UPN Veteran Jawa Timur, Indonesia; e-mail: [asriningsih022@gmail.com](mailto:asriningsih022@gmail.com)

<sup>2</sup>Low Carbon Technology Research Centre, UPN Veteran Jawa Timur, Indonesia

<sup>3</sup>Center for Chemical Engineering Penelitanes, College of Engineering, Universiti Teknologi MARA, Masai, Johor, Malaysia

<sup>4</sup>Program Penelitian Teknik Kimia, Fakultas Teknik dan Sains, UPN Veteran Jawa Timur, Indonesia

## ABSTRAK

Pengelolaan sampah di TPA Bengkulu, Kabupaten Buleleng, menjadi tantangan utama pemerintah daerah karena peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas ekonomi yang meningkatkan volume sampah dan emisi gas. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi emisi gas rumah kaca dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bengkulu di Kabupaten Buleleng menggunakan model LandGEM. Data karakteristik TPA Bengkulu, seperti luas lahan, metode *landfilling*, dan timbunan sampah dikumpulkan untuk digunakan dalam model LandGEM. Pemodelan ini memperkirakan produksi gas berdasarkan data timbunan sampah. Hasil menunjukkan bahwa emisi gas total, metana, CO<sub>2</sub> dan NMOC meningkat secara signifikan dari tahun 2016 hingga mencapai puncaknya pada tahun 2034, sebelum akhirnya menurun. Pada tahun 2034, total emisi gas mencapai 14,2433 Gg/Tahun dengan skenario CAA-Konvensional dan 7,2238 Gg/Tahun dengan inventory default. Gas metana pada skenario CAA-Konvensional mencapai puncaknya sebesar 3,8045 Gg/Tahun pada tahun 2034, sementara inventory default mencapai 1,9296 Gg/Tahun, Gas karbondioksida pada skenario CAA-Konvensional mencapai puncaknya sebesar 10,4387 Gg/Tahun pada tahun 2034, sedangkan untuk inventory default adalah 5,2943 Gg/Tahun, Gas NMOC pada skenario CAA-Konvensional mencapai puncaknya sebesar 0,0245 Gg/Tahun pada tahun 2034, dua kali lipat dibandingkan dengan inventory default yang mencapai 0,0124 Gg/Tahun. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemantauan dan pengelolaan emisi gas dari TPA Bengkulu sangat penting untuk mengurangi dampak lingkungan dan memanfaatkan potensi gas metana sebagai sumber energi alternatif. Implementasi strategi mitigasi yang efektif berdasarkan hasil model LandGEM dapat membantu dalam pengembangan pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan pengurangan emisi gas rumah kaca.

**Kata kunci:** Emisi Gas, LandGEM, Landfill

## ABSTRACT

Waste management at the Bengkulu landfill, Buleleng Regency, is a major challenge for the local government due to the increase in population and economic activity which increases the volume of waste and gas emissions. This research aims to estimate greenhouse gas emissions from the Bengkulu Final Disposal Site (TPA) in Buleleng Regency using the LandGEM model. Data on Bengkulu landfill characteristics, such as land area, *landfilling* method, and waste generation were collected for use in the LandGEM model. This modeling estimates gas production based on waste generation data. The results show that total gas emissions, methane, CO<sub>2</sub>, and NMOC increased significantly from 2016 to peak in 2034, before finally decreasing. In 2034, total gas emissions will reach 14.2433 Gg/Year with the CAA-Conventional scenario and 7.2238 Gg/Year with the default inventory. Methane gas in the CAA-Conventional scenario reaches a peak of 3.8045 Gg/Year in 2034, while the default inventory reaches 1.9296 Gg/Year, carbon dioxide gas in the CAA-Conventional scenario reaches a peak of 10.4387 Gg/Year in 2034, while the default inventory is 5.2943 Gg/Year, NMOC Gas in the CAA-Conventional scenario reaches a peak of 0.0245 Gg/Year in 2034, double compared to the default inventory which reaches 0.0124 Gg/Year. This research concludes that monitoring and managing gas emissions from the Bengkulu landfill is very important to reduce environmental impacts and utilize the potential of methane gas as an alternative energy source. Implementation of effective mitigation strategies based on LandGEM model results can help in the development of sustainable waste management and reduction of greenhouse gas emissions.

**Keywords:** Gas Emissions, LandGEM, Landfill

**Citation:** Nurjaya, L. A. N. W., Nurhediana, S. D., Saputro, E. A., Jalil, M. J., dan Sari, N. K. (2025). Estimasi Emisi Gas dari Kegiatan *Landfilling* di TPA Bengkulu dengan Model LandGEM, 23(2), 295-304, doi:10.14710/jil.23.2.295-304

## 1. PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah padat atau sampah menjadi salah satu tantangan utama bagi pemerintah daerah, khususnya di wilayah Kabupaten Buleleng. Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bengkala merupakan salah satu lokasi utama penampungan sampah di Kabupaten Buleleng. Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan aktivitas ekonomi, volume sampah yang masuk ke TPA terus bertambah, yang secara langsung berdampak pada peningkatan emisi gas dari proses degradasi limbah tersebut (Borisova et al., 2023).

Peningkatan populasi dan kegiatan ekonomi secara langsung berkorelasi dengan peningkatan produksi limbah, yang menyebabkan lonjakan sampah yang masuk ke tempat pembuangan sampah seperti TPA (Balogun-Adeleye et al., 2019). Masuknya limbah ini secara signifikan berdampak pada emisi gas dari proses degradasi, terutama metana dan CO<sub>2</sub>, yang merupakan komponen utama emisi gas TPA (Mishra et al., 2020). Tempat pembuangan sampah dikenal sebagai sumber emisi metana yang signifikan, dengan degradasi limbah yang menghasilkan gas yang menimbulkan ancaman bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Sasana et al., 2022). Penelitian telah menunjukkan bahwa dinamika biodegradasi limbah di tempat pembuangan sampah menghasilkan konsentrasi dan tingkat emisi metana dan CO<sub>2</sub> yang bervariasi, dengan emisi yang lebih tinggi diamati selama musim tertentu dan fase TPA tertentu (I et al., 2021). Selain itu, komposisi limbah dan kondisi lokasi memainkan peran penting dalam menentukan emisi metana dari tempat pembuangan sampah, menekankan perlunya model yang akurat untuk memperkirakan potensi pembangkitan gas dan emisi gas rumah kaca (Rafey & Siddiqui, 2023).

Emisi gas dari tempat pembuangan sampah, khususnya metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), memainkan peran penting dalam perubahan iklim global (Pheakdey et al., 2023). Dekomposisi limbah organik di tempat pembuangan sampah juga mengarah pada produksi senyawa organik non-metana (NMOC), berdampak pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat (Pérez et al., 2023). Penelitian telah menunjukkan bahwa emisi CH<sub>4</sub> dari tempat pembuangan sampah padat kota dapat menjadi besar, dengan potensi manfaat pemulihan energi dari penangkapan gas ini (BP et al., 2023). Selain itu, penutupan sel TPA telah ditemukan secara signifikan mengurangi emisi CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>, mengenai pentingnya praktik pengelolaan TPA yang tepat (Balaban et al., 2023). Memperkirakan dan memantau emisi gas dari tempat pembuangan sampah sangat penting untuk mengembangkan strategi mitigasi yang efektif untuk meminimalkan dampak lingkungan dan berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim secara keseluruhan.

Model LandGem adalah alat yang digunakan untuk memprediksi emisi gas TPA dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti jenis limbah, biodegradabilitas, potensi emisi metana, dan

derajat pemisahan (Hosseini et al., 2018). Ini memperkirakan jumlah total gas yang dihasilkan di tempat pembuangan sampah selama periode tertentu, membantu dalam desain sistem pengumpulan gas untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2005). LandGem telah digunakan dalam berbagai penelitian untuk memperkirakan metana dan tingkat pembangkitan gas total di tempat pembuangan sampah, memberikan wawasan berharga untuk perencanaan produksi energi dan manajemen lingkungan (Rafey & Siddiqui, 2023). Selain itu, ada panduan untuk menawarkan petunjuk langkah demi langkah tentang penggunaan perangkat lunak LandGem, meningkatkan aksesibilitas dan kegunaannya bagi peneliti dan praktisi (United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2005). Aplikasi model meluas ke membantu dalam pengembangan strategi untuk produksi energi dan aplikasi lainnya di dalam lokasi TPA, menekankan pentingnya memahami dan memprediksi emisi gas untuk praktik pengelolaan limbah berkelanjutan (Xie et al., 2022).

Model LandGem, yang banyak digunakan untuk memperkirakan emisi gas TPA, digunakan dalam berbagai penelitian untuk menilai kontribusi gas rumah kaca dari tempat pembuangan sampah. Di Bulgaria, sebuah penelitian di TPA Harmanli mengungkapkan variasi yang signifikan dalam emisi metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dengan konsentrasi CH<sub>4</sub> yang lebih tinggi dibandingkan dengan CO<sub>2</sub> (Borisova et al., 2023). Demikian pula, sebuah penelitian di Phnom Penh, Kamboja, menyoroti dampak skenario TPA yang berbeda pada generasi CH<sub>4</sub> dan emisi gas rumah kaca, menekankan potensi untuk mengurangi emisi melalui praktik pengelolaan yang lebih baik (Pheakdey et al., 2023). Selanjutnya, penelitian di India berfokus pada memperkirakan penyimpanan karbon di tempat pembuangan sampah dan mengukur produksi metana, menunjukkan pentingnya mengatasi emisi gas TPA untuk mengurangi perubahan iklim (BP et al., 2023). Selain itu, sebuah penelitian di Indonesia di TPA Talang Gulo menunjukkan potensi pemanfaatan gas metana sebagai sumber energi, menekankan manfaat ekonomi dan lingkungan dari mengubah gas TPA menjadi listrik (Sinaga et al., 2023).

Total gas landfill adalah campuran gas yang dihasilkan dari degradasi anaerobik bahan organik di tempat pembuangan akhir, terdiri dari metana (CH<sub>4</sub>), karbondioksida (CO<sub>2</sub>), dan senyawa organik non-metana (NMOCs) (Pujotomo & Qosim, 2017). LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) digunakan untuk memperkirakan emisi gas ini berdasarkan data jumlah sampah, komposisi sampah, dan karakteristik operasi TPA (Rahmi et al., 2017). Metana adalah gas utama dengan potensi pemanasan global yang 28-36 kali lebih besar daripada CO<sub>2</sub> dalam jangka waktu 100 tahun, sehingga penting untuk mengestimasi emisi metana guna memahami dampak lingkungan dari TPA Bengkala (Ramadhani, 2022). LandGEM

menggunakan persamaan matematis yang mempertimbangkan tingkat dekomposisi limbah organik dan faktor koreksi iklim untuk mengestimasi emisi metana tahunan (Rafey & Siddiqui, 2023).

Karbon dioksida juga dihasilkan selama proses degradasi limbah organik, baik anaerobik maupun aerobik, dan meskipun CO<sub>2</sub> tidak memiliki potensi pemanasan global yang sebesar metana, pemantauan emisi CO<sub>2</sub> tetap penting karena kontribusinya terhadap total emisi gas rumah kaca (Wahyudi, 2019). NMOCs adalah senyawa organik volatil selain metana yang termasuk hidrokarbon, alkohol, aldehida, dan senyawa organik lainnya yang dapat berdampak negatif terhadap kualitas udara dan kesehatan manusia (Manheim et al., 2021).

Latar belakang penelitian ini didasarkan pada meningkatnya volume sampah dan dampaknya terhadap emisi gas rumah kaca di TPA Bengkulu, yang menimbulkan kekhawatiran lingkungan dan kesehatan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengestimasi emisi total gas landfill, metana, karbon dioksida, dan senyawa organik non-metana menggunakan model LandGEM, guna memberikan dasar yang kuat bagi pengelolaan limbah yang lebih efektif dan pengembangan strategi mitigasi emisi yang berkelanjutan di TPA Bengkulu.

## 2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi emisi gas dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bengkulu di Kabupaten Buleleng menggunakan model LandGEM. Tahapan penelitian mencakup penentuan lokasi, pengumpulan data, dan pemodelan menggunakan LandGEM. Penentuan lokasi dan pengumpulan data dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik TPA Bengkulu yang relevan, sedangkan pemodelan menggunakan LandGEM digunakan untuk menganalisis dan memperkirakan laju pembentukan emisi gas di kawasan TPA ini. Detail dari masing-masing tahapan metode penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

### 2.1. Penentuan Lokasi dan Pengumpulan Data

Penelitian ini akan dilakukan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Bengkulu, yang terletak di Desa Bengkulu, Kecamatan Kubutambahan, Kabupaten Buleleng, Bali. TPA Bengkulu merupakan TPA terbesar di Kabupaten Buleleng dan menjadi fokus utama dalam pengelolaan sampah di wilayah tersebut.

Langkah awal dalam penelitian ini adalah pengumpulan data dan informasi yang relevan mengenai Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bengkulu. Data yang dikumpulkan mencakup beberapa aspek penting, yaitu karakteristik TPA dan emisi gas yang dihasilkan. Pada bagian karakteristik TPA, informasi yang dihimpun meliputi luas lahan, tahun pembukaan, metode *landfilling* yang diterapkan, serta estimasi timbunan sampah yang dikelola di lokasi tersebut. Sementara itu, untuk emisi gas, fokus penelitian mencakup perhitungan total

emisi gas metana (CH<sub>4</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan senyawa organik non-metana (Non-Methane Organic Compounds atau NMOC) yang dihasilkan dari proses pengelolaan sampah di TPA.

Data dan informasi tersebut akan diperoleh dari berbagai sumber terpercaya, di antaranya catatan dan dokumentasi resmi yang dikeluarkan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Buleleng, hasil pengukuran langsung di lapangan, serta wawancara dengan petugas TPA dan masyarakat sekitar. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang menyeluruh mengenai kondisi pengelolaan sampah di TPA Bengkulu.

Keakuratan dan kelengkapan data yang dikumpulkan sangat penting dalam penelitian ini. Informasi tersebut tidak hanya digunakan untuk memahami kondisi eksisting TPA Bengkulu tetapi juga menjadi dasar dalam merumuskan strategi yang tepat guna meningkatkan pengelolaan TPA.

### 2.2. Pemodelan Menggunakan LandGEM

Berdasarkan perkiraan jumlah sampah yang masuk setiap tahun, penelitian ini menganalisis timbulan Emisi Gas berupa Total emisi gas metana (CH<sub>4</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan Non Methane Organic Compounds (NMOC) yang dihasilkan dari TPA di TPA Bengkulu, Kabupaten Buleleng, selama masa operasionalnya hingga ditutup. Model LandGEM digunakan untuk menghitung laju pembentukan emisi gas di TPA.

Model LandGEM menggunakan parameter standar sebagai acuan awal untuk analisis, dan kemudian disesuaikan dengan kondisi di lokasi penelitian. Persamaan Laju Dekomposisi Orde Pertama digunakan untuk menghitung produksi metana tahunan (QCH<sub>4</sub>) dengan mempertimbangkan beberapa faktor, seperti:

- Selisih waktu (i): Selisih waktu antara tahun perhitungan dan tahun sebelumnya.
  - Tahun perhitungan (n): Selisih antara tahun perhitungan dan tahun pertama penerimaan sampah.
  - Kenaikan waktu (j): Kenaikan waktu 0,1 tahun.
  - Laju pembentukan metana (k): Kecepatan pembentukan metana per tahun.
  - Potensi kapasitas pembangkitan metana (L<sub>0</sub>): Jumlah metana yang dapat dihasilkan per satuan massa sampah.
  - Massa sampah yang diterima (m<sub>i</sub>): Jumlah sampah yang diterima pada tahun ke-i.
  - Umur bagian sampah (t<sub>ij</sub>): Lama waktu sampah yang diterima pada tahun ke-i terpapar di TPA.
- Persamaan Laju Dekomposisi Orde Pertama:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 K L_0 \left( \frac{m_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Perbedaan parameter *K* dan *L<sub>0</sub>*:

- K** (Laju degradasi metana): Parameter ini menentukan kecepatan pembentukan gas metana dari limbah. Pada skenario CAA-

Konvensional, nilai  $K$  lebih tinggi (0,05/tahun) dibandingkan inventory default (0,04/tahun), mencerminkan kondisi degradasi yang lebih cepat karena faktor lingkungan yang lebih mendukung.

- **Lo** (Potensi kapasitas metana): Mengacu pada jumlah maksimum metana yang dapat dihasilkan oleh limbah per satuan massa. Nilai  $Lo$  pada skenario CAA-Konvensional (170 m<sup>3</sup>/Mg) lebih besar daripada inventory default (100 m<sup>3</sup>/Mg), menandakan komposisi limbah yang lebih kaya bahan organik dengan potensi pembentukan gas lebih tinggi.

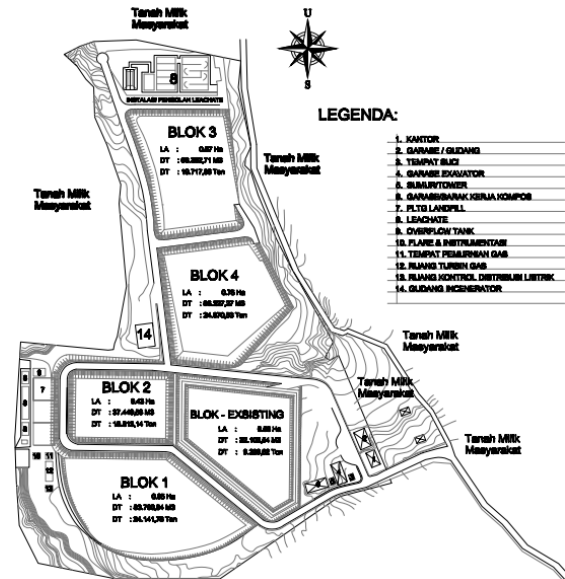
Efek dari perbedaan ini terlihat pada proyeksi yang menunjukkan bahwa skenario CAA-Konvensional menghasilkan emisi lebih tinggi dibandingkan dengan inventory default, Penyesuaian nilai parameter ini dalam simulasi memberikan wawasan tentang bagaimana perubahan operasional di TPA memengaruhi emisi gas.

Pengujian regresi non-linear dilakukan untuk menganalisis hubungan antara variabel waktu (tahun) dengan nilai Total Gas Landfill, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan NMOC pada metode CAA Konvensional dan Inventory Default. Analisis ini bertujuan untuk menentukan kekuatan dan pola korelasi yang menggambarkan pengaruh signifikan variabel waktu terhadap emisi gas yang dihasilkan. Prosedur pengujian melibatkan penyesuaian model non-linear yang sesuai dengan karakteristik data. Hasil regresi kemudian dievaluasi berdasarkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan tingkat signifikansi untuk menilai kesesuaian model serta validitas hubungan antara variabel independen dan dependen. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dinamika emisi gas dalam kaitannya dengan perubahan waktu pada masing-masing metode. (tambah sitasi)

Dengan menggunakan Model LandGEM dan parameter yang disesuaikan, penelitian ini bertujuan untuk memperkirakan emisi gas metana secara akurat di TPA Bengkala, sehingga dapat membantu dalam pengelolaan TPA dan meminimalisir dampak lingkungannya.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kabupaten Buleleng, yang terletak di provinsi Bali, Indonesia, memiliki luas wilayah 1.365,88 km<sup>2</sup>, setara dengan 24,25% dari total luas Pulau Bali. Kabupaten ini terbagi menjadi 9 kecamatan, 129 desa, 19 kelurahan, dan 58 rukun tetangga. Kecamatan Kubutambahan di Kabupaten Buleleng menjadi lokasi TPA Bengkala, yang berjarak sekitar 25,7 km dari pusat kota Singaraja. TPA Bengkala memiliki luas 4,8 Ha dan terdiri dari 4 blok utama dan 1 blok eksisting.



**Gambar 1.** Layout TPA Bengkala, Kabupaten Buleleng  
Sumber: DLH Kabupaten Buleleng

Kabupaten Buleleng merupakan sumber utama sampah yang dibuang ke TPA Bengkala, dengan rata-rata 475 m<sup>3</sup> sampah per hari. TPA Bengkala menggunakan sistem Sanitary Landfill untuk mengolah sampah, yang merupakan metode yang tepat untuk Indonesia karena mayoritas sampah di negara ini adalah sampah organik. Sistem ini memungkinkan pengelolaan lindi (cairan hasil dekomposisi sampah) secara terkontrol.

Sanitary Landfill memiliki beberapa komponen penting, yaitu:

- Lapisan kedap air, Lapisan ini dibangun di bagian bawah TPA untuk mencegah lindi mencemari tanah dan air bawah tanah.
- Pipa pengumpul dan distribusi lindi, Pipa ini digunakan untuk mengumpulkan dan mengangkut lindi ke tempat pengolahan.
- Pipa distribusi gas, Pipa ini digunakan untuk menyalurkan gas metana yang dihasilkan dari dekomposisi sampah organik.

Penggunaan Sanitary Landfill di TPA Bengkala diharapkan dapat membantu dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan dan meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan.

#### 3.1. Perhitungan Potensi Gas dengan LandGEM

Nilai default yang akan digunakan adalah CAA-*Conventional Default* (dengan asumsi tidak ada lindi tambahan), berdasarkan cuaca di wilayah Kabupaten Buleleng yang memiliki suhu rata-rata 30°C dan curah hujan yang tinggi. Nilai default Constant ( $K$ ) yang digunakan pada CAA Konvensional adalah 0,05 per tahun, default inventori adalah 0,04 per tahun, dan default nilai kapasitas pembentukan metana ( $Lo$ ). Semakin tinggi nilai Konstan ( $K$ ), semakin cepat tingkat produksinya. Inventaris default adalah 100 m<sup>3</sup>/mg, tetapi CAA-Konvensional adalah 170 m<sup>3</sup>/mg. Untuk informasi tambahan yang mendalam, lihat tabel berikut setelah menambahkan input pengguna ke

dalam model LandGEM dan statistikantisipasi timbulan sampah dalam mg/tahun seperti yang ditunjukkan di atas.

**Tabel 1.** Input Proyeksi Timbulan Sampah

Tahun	(Mg/ Tahun)	(Short Tons/ Tahun)
2016	41632,140	45795,354
2017	44857,890	49343,679
2018	51547,980	56702,778
2019	52583,190	57841,509
2020	52603,650	57864,015
2021	56241,240	61865,364
2022	57158,970	62874,867
2023	58092,917	63902,209
2024	58348,526	64183,378
2025	58605,259	64465,785
2026	58863,122	64749,435
2027	59122,120	65034,332
2028	59382,258	65320,483
2029	59643,539	65607,893
2030	59905,971	65896,568
2031	60169,557	66186,513
2032	60434,303	66477,734

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Berdasarkan proyeksi timbulan sampah yang disajikan pada Tabel 1, terlihat adanya peningkatan yang signifikan dalam jumlah sampah yang masuk ke TPA Bengkulu dari tahun 2016 hingga 2032. Pada tahun 2016, timbulan sampah tercatat sebesar 41.632,140 Mg atau 45.795,354 short tons per tahun, dan angka ini terus meningkat setiap tahunnya. Pada tahun 2022, timbulan sampah mencapai 57.158,970 Mg atau 62.874,867 short tons per tahun. Proyeksi untuk tahun 2032 menunjukkan timbulan sampah akan mencapai 60.434,303 Mg atau 66.477,734 short tons per tahun. Peningkatan yang konsisten ini mencerminkan pertumbuhan populasi dan aktivitas ekonomi di Kabupaten Buleleng, yang pada gilirannya meningkatkan volume sampah yang perlu dikelola. Data ini menjadi dasar penting dalam pemodelan emisi gas menggunakan LandGEM, karena timbulan sampah yang tinggi berkontribusi langsung terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dari TPA. Estimasi ini penting untuk perencanaan pengelolaan sampah yang lebih efektif dan pengembangan strategi mitigasi untuk mengurangi dampak lingkungan.

Dengan mengetahui proyeksi timbulan sampah dan menggunakan model LandGEM untuk mengestimasi emisi gas, pihak pengelola TPA dapat merancang sistem penangkapan gas yang lebih efisien, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan memanfaatkan gas metana sebagai sumber energi alternatif.

Berdasarkan Tabel 2, hasil perhitungan total gas landfill (Gg/Tahun) dari TPA Bengkulu menggunakan model LandGEM menunjukkan Pada tahun 2034, total gas landfill untuk skenario CAA-Konvensional mencapai puncaknya sebesar 14,2433 Gg/Tahun,

sedangkan untuk skenario inventory default hanya mencapai 7,2238 Gg/Tahun. Ini menunjukkan bahwa skenario CAA-Konvensional menghasilkan hampir dua kali lipat emisi gas landfill dibandingkan dengan inventory default pada puncaknya. Setelah tahun 2034, total gas landfill pada kedua skenario mulai menurun, dengan penurunan yang lebih tajam pada skenario CAA-Konvensional. Pada tahun 2040, total gas landfill untuk skenario CAA-Konvensional adalah 10,552 Gg/Tahun, sedangkan untuk skenario inventory default adalah 5,682 Gg/Tahun.

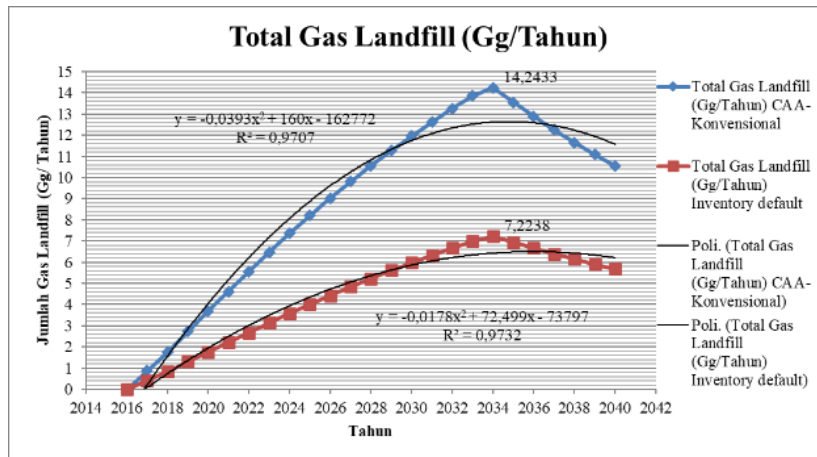
**Tabel 2.** Estimasi Hasil Perhitungan Total Gas Landfill dengan LandGEM

Tahun	Total Gas Landfill (Gg/Tahun)	
	CAA-Konvensional	Inventory Default
2016	0,0000	0,0000
2017	0,8643	0,4085
2018	1,7534	0,8327
2019	2,7380	1,3059
2020	3,6961	1,7707
2021	4,6078	2,2175
2022	5,5507	2,6824
2023	6,4666	3,1381
2024	7,3572	3,5852
2025	8,2097	4,0172
2026	9,0259	4,4347
2027	9,8077	4,8385
2028	10,5567	5,2289
2029	11,2747	5,6066
2030	11,9630	5,9721
2031	12,6232	6,3257
2032	13,2566	6,6682
2033	13,8647	6,9997
2034	14,2433	7,2238
2035	13,5486	6,9406
2036	12,8878	6,6684
2037	12,2593	6,4070
2038	11,6614	6,1558
2039	11,0927	5,9144
2040	10,552	5,682

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 1 menunjukkan grafik perbandingan hasil perhitungan total gas landfill (Gg/Tahun) antara skenario CAA-Konvensional dan inventory default menggunakan model LandGEM. Grafik ini menggambarkan tren peningkatan emisi gas landfill dari tahun 2016 hingga mencapai puncaknya pada tahun 2034, diikuti dengan penurunan emisi pada tahun-tahun berikutnya.

Pada grafik tersebut, garis biru mewakili total gas landfill pada skenario CAA-Konvensional, sementara garis merah mewakili skenario inventory default. Kedua garis menunjukkan peningkatan yang cukup stabil dari tahun 2016 hingga sekitar tahun 2024. Setelah itu, peningkatan emisi pada skenario CAA-Konvensional lebih tajam dibandingkan dengan inventory default, mencerminkan nilai konstan (K) dan kapasitas pembentukan metana (Lo) yang lebih tinggi dalam skenario CAA-Konvensional.



**Gambar 2.** Grafik Perbandingan Hasil Perhitungan Total Gas Landfill dengan LandGEM  
 Sumber: Hasil Analisis Model LandGEM, 2024

Regresi non-linear yang ditampilkan pada grafik menunjukkan korelasi yang kuat antara tahun dan total gas landfill, dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,9707 untuk skenario CAA-Konvensional dan 0,9732 untuk inventory default.

**Tabel 3.** Estimasi Hasil Perhitungan Jumlah Gas Metana ( $CH_4$ ) dengan LandGEM

Tahun	Gas Metana ( $CH_4$ ) (Gg/Tahun)	
	CAA-Konvensional	Inventory default
2016	0,0000	0,0000
2017	0,2309	0,1091
2018	0,4683	0,2224
2019	0,7313	0,3488
2020	0,9873	0,4730
2021	1,2308	0,5923
2022	1,4826	0,7165
2023	1,7273	0,8382
2024	1,9652	0,9576
2025	2,1929	1,0730
2026	2,4109	1,1846
2027	2,6197	1,2924
2028	2,8198	1,3967
2029	3,0116	1,4976
2030	3,1954	1,5952
2031	3,3718	1,6897
2032	3,5410	1,7811
2033	3,7034	1,8697
2034	3,8045	1,9296
2035	3,6190	1,8539
2036	3,4425	1,7812
2037	3,2746	1,7114
2038	3,1149	1,6443
2039	2,9630	1,5798
2040	2,8185	1,5179

Sumber: Hasil Analisis, 2024

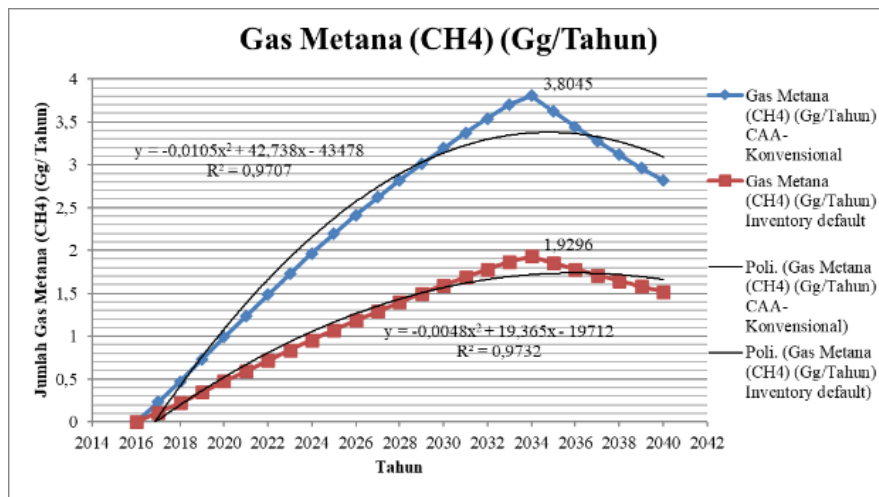
Berdasarkan Tabel 3, hasil perhitungan jumlah gas metana ( $CH_4$ ) dari TPA Bengkala menggunakan model LandGEM menunjukkan Pada tahun 2034, gas metana mencapai puncaknya sebesar 3,8045 Gg/Tahun untuk skenario CAA-Konvensional dan 1,9296 Gg/Tahun untuk inventory default. Setelah mencapai puncaknya, emisi gas metana menurun untuk kedua skenario, dengan penurunan yang lebih cepat pada skenario CAA-Konvensional. Pada tahun 2040, emisi gas metana untuk skenario CAA-Konvensional adalah 2,8185 Gg/Tahun, sementara untuk inventory default adalah 1,5179 Gg/Tahun.

Gambar 2 menunjukkan grafik perbandingan hasil perhitungan gas metana ( $CH_4$ ) antara skenario CAA-Konvensional dan inventory default menggunakan model LandGEM. Grafik ini menggambarkan peningkatan emisi gas metana dari tahun 2016 hingga mencapai puncaknya pada tahun 2034, diikuti dengan penurunan emisi pada tahun-tahun berikutnya.

Garis biru pada grafik mewakili skenario CAA-Konvensional, sementara garis merah mewakili inventory default. Kedua garis menunjukkan tren peningkatan emisi metana yang stabil dari tahun 2016 hingga sekitar tahun 2024. Setelah itu, peningkatan emisi pada skenario CAA-Konvensional lebih tajam dibandingkan dengan inventory default, mencerminkan perbedaan dalam parameter K dan Lo yang digunakan.

Regresi non-linear yang ditampilkan pada grafik menunjukkan korelasi yang kuat antara tahun dan emisi gas metana, dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,9707 untuk skenario CAA-Konvensional dan 0,9732 untuk inventory default.





**Gambar 3.** Grafik Perbandingan Hasil Perhitungan Gas Metana dengan LandGEM  
 Sumber: Hasil Analisis, 2024

**Tabel 4.** Estimasi Hasil Perhitungan Gas Karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dengan LandGEM

Tahun	Gas Karbondioksida (CO <sub>2</sub> ) (Gg/Tahun)	
	CAA-Konvensional	Inventory default
2016	0,0000	0,0000
2017	0,6334	0,2994
2018	1,2850	0,6103
2019	2,0066	0,9571
2020	2,7088	1,2977
2021	3,3770	1,6252
2022	4,0680	1,9659
2023	4,7393	2,2999
2024	5,3920	2,6275
2025	6,0168	2,9441
2026	6,6150	3,2502
2027	7,1880	3,5461
2028	7,7369	3,8322
2029	8,2631	4,1090
2030	8,7675	4,3769
2031	9,2514	4,6361
2032	9,7156	4,8870
2033	10,1613	5,1300
2034	10,4387	5,2943
2035	9,9296	5,0867
2036	9,4454	4,8872
2037	8,9847	4,6956
2038	8,5465	4,5115
2039	8,1297	4,3346
2040	7,7332	4,1646

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Berdasarkan Tabel 4, hasil perhitungan gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dari TPA Bengkulu menggunakan model LandGEM menunjukkan Pada tahun 2034, gas karbondioksida mencapai puncaknya sebesar 10,4387 Gg/Tahun untuk skenario CAA-Konvensional dan 5,2943 Gg/Tahun untuk inventory default. Setelah mencapai puncaknya, emisi gas karbondioksida menurun untuk kedua skenario, dengan penurunan yang lebih cepat pada skenario CAA-Konvensional. Pada tahun 2040, emisi gas karbondioksida untuk skenario CAA-Konvensional adalah 7,7332 Gg/Tahun, sedangkan untuk inventory default adalah 4,1646 Gg/Tahun.

Gambar 3 menunjukkan grafik perbandingan hasil perhitungan gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) antara

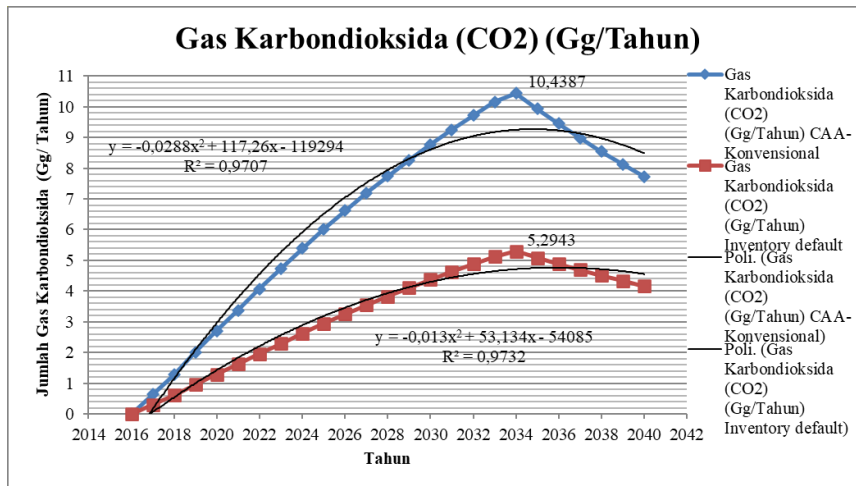
skenario CAA-Konvensional dan inventory default menggunakan model LandGEM. Grafik ini menggambarkan peningkatan emisi gas karbondioksida dari tahun 2016 hingga mencapai puncaknya pada tahun 2034, diikuti dengan penurunan emisi pada tahun-tahun berikutnya.

Garis biru pada grafik mewakili skenario CAA-Konvensional, sementara garis merah mewakili inventory default. Kedua garis menunjukkan tren peningkatan emisi karbondioksida yang stabil dari tahun 2016 hingga sekitar tahun 2024. Setelah itu, peningkatan emisi pada skenario CAA-Konvensional lebih tajam dibandingkan dengan inventory default, mencerminkan perbedaan dalam parameter K dan Lo yang digunakan.

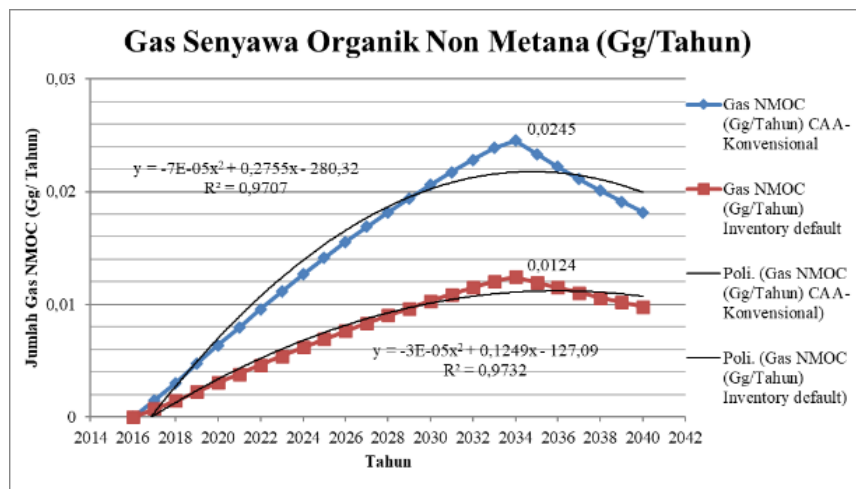
Regresi non-linear yang ditampilkan pada grafik menunjukkan korelasi yang kuat antara tahun dan emisi gas karbondioksida, dengan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,9707 untuk skenario CAA-Konvensional dan 0,9732 untuk *inventory default*.

Berdasarkan Tabel 5, hasil perhitungan gas NMOC (Non-Methane Organic Compounds) dari TPA Bengkulu menggunakan model LandGEM menunjukkan Pada tahun 2034, gas NMOC mencapai puncaknya sebesar 0,0245 Gg/Tahun untuk skenario CAA-Konvensional dan 0,0124 Gg/Tahun untuk inventory default. Setelah mencapai puncaknya, emisi gas NMOC menurun untuk kedua skenario, dengan penurunan yang lebih cepat pada skenario CAA-Konvensional. Pada tahun 2040, emisi gas NMOC untuk skenario CAA-Konvensional adalah 0,0182 Gg/Tahun, sedangkan untuk inventory default adalah 0,0098 Gg/Tahun.

Gambar 4 menunjukkan grafik perbandingan hasil perhitungan gas NMOC (Non-Methane Organic Compounds) antara skenario CAA-Konvensional dan inventory default menggunakan model LandGEM. Grafik ini menggambarkan peningkatan emisi gas NMOC dari tahun 2016 hingga mencapai puncaknya pada tahun 2034, diikuti dengan penurunan emisi pada tahun-tahun berikutnya.



**Gambar 4.** Grafik Perbandingan Hasil Perhitungan Gas Karbondioksida dengan LandGEM  
 Sumber : Hasil Analisis, 2024



**Gambar 5.** Grafik Perbandingan Hasil Perhitungan Gas Metana dengan LandGEM  
 Sumber: Hasil Analisis, 2024

**Tabel 5.** Estimasi Hasil Perhitungan Gas NMOC dengan LandGEM

Tahun	Gas NMOC (Gg/Tahun)	
	CAA-Konvensional	Inventory default
2016	0,0000	0,0000
2017	0,0015	0,0007
2018	0,0030	0,0014
2019	0,0047	0,0022
2020	0,0064	0,0030
2021	0,0079	0,0038
2022	0,0096	0,0046
2023	0,0111	0,0054
2024	0,0127	0,0062
2025	0,0141	0,0069
2026	0,0155	0,0076
2027	0,0169	0,0083
2028	0,0182	0,0090
2029	0,0194	0,0097
2030	0,0206	0,0103
2031	0,0217	0,0109
2032	0,0228	0,0115
2033	0,0239	0,0121
2034	0,0245	0,0124
2035	0,0233	0,0120
2036	0,0222	0,0115
2037	0,0211	0,0110
2038	0,0201	0,0106
2039	0,0191	0,0102
2040	0,0182	0,0098

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Garis biru pada grafik mewakili skenario CAA-Konvensional, sementara garis merah mewakili inventory default. Kedua garis menunjukkan tren peningkatan emisi gas NMOC yang stabil dari tahun 2016 hingga sekitar tahun 2024. Setelah itu, peningkatan emisi pada skenario CAA-Konvensional lebih tajam dibandingkan dengan inventory default, mencerminkan perbedaan dalam parameter K dan Lo yang digunakan.

Regresi non-linear yang ditampilkan pada grafik menunjukkan korelasi yang kuat antara tahun dan emisi gas NMOC, dengan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,9707 untuk skenario CAA-Konvensional dan 0,9732 untuk inventory default.

Penurunan emisi CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan NMOC setelah mencapai puncak pada tahun 2034 di TPA Bengkala dapat dijelaskan oleh berkurangnya ketersediaan bahan organik yang terurai secara anaerob. Limbah organik mengalami dekomposisi bertahap, dan setelah sebagian besar substrat habis, aktivitas mikroorganisme anaerob menurun, sehingga produksi gas landfill berkurang secara signifikan. Proses ini dipengaruhi oleh perubahan kondisi



lingkungan di dalam tumpukan sampah, seperti penurunan kelembapan akibat stabilisasi limbah, yang memperlambat aktivitas mikroba anaerob. Hal ini sejalan dengan temuan Rafey & Siddiqui (2023) dan Hosseini et al. (2018), yang menyatakan bahwa ketersediaan bahan organik merupakan faktor utama yang memengaruhi intensitas produksi gas landfill. Penelitian Pheakdey et al. (2023) juga menekankan pentingnya kelembapan dalam mendukung pembentukan gas.

Faktor lain yang berkontribusi terhadap penurunan emisi adalah pengelolaan dan penutupan TPA, seperti penutupan sel atau penambahan lapisan tanah. Langkah-langkah ini menciptakan lingkungan anaerob yang lebih stabil, yang dapat mengurangi emisi gas hingga 50% (Balaban et al., 2023). Selain itu, penurunan ini juga disebabkan oleh menurunnya laju dekomposisi (K), di mana bahan organik yang lebih mudah terurai habis terlebih dahulu, sesuai dengan karakteristik eksponensial yang digunakan dalam model LandGEM (Xie et al., 2022). Difusi gas dan hilangnya gas secara alami turut menjadi faktor yang signifikan dalam menurunkan emisi, sebagaimana dicatat oleh Manheim et al. (2021). Kombinasi dari proses biologis, kimiawi, dan fisik ini secara kolektif menjelaskan pola penurunan emisi gas landfill setelah puncak produksi di TPA.

Hasil analisis di TPA Bengkulu ini diperkuat oleh penelitian serupa di lokasi lain. Borisova et al. (2023) menunjukkan pola emisi CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> di TPA Harmanli, Bulgaria, yang mengalami peningkatan hingga puncak sebelum menurun, mirip dengan pola yang diamati di Bengkulu. Faktor operasional dan metode penutupan TPA disebut sebagai faktor kunci yang memengaruhi tingkat emisi. Penelitian Pheakdey et al. (2023) lebih lanjut menyoroti pentingnya pengelolaan TPA yang lebih baik, seperti pemanfaatan metana dan optimalisasi sistem penutupan, untuk menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan.

Potensi pemanfaatan gas metana juga relevan, sebagaimana dibahas oleh Sinaga et al. (2023) dalam penelitian mereka di TPA Talang Gulo, Jambi. Potensi serupa dapat diterapkan di TPA Bengkulu untuk mendukung upaya mitigasi emisi gas rumah kaca. Selain itu, validasi model LandGEM oleh Hosseini et al. (2018) memberikan dasar yang kuat untuk memproyeksikan emisi gas TPA dengan mempertimbangkan parameter laju dekomposisi (K) dan kapasitas pembentukan metana (Lo). Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dinamika emisi di TPA Bengkulu, tetapi juga memberikan dasar untuk pengembangan strategi mitigasi yang lebih efektif.

#### 4. KESIMPULAN

Proyeksi timbulan sampah di TPA Bengkulu menunjukkan peningkatan signifikan dari tahun 2016 hingga 2032, yang mengindikasikan kebutuhan mendesak untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah guna memitigasi dampak

lingkungan akibat emisi gas. Berdasarkan skenario CAA-Konvensional, total emisi gas diproyeksikan mencapai puncaknya pada 2034 sebesar 14,2433 Gg/Tahun, hampir dua kali lipat dari estimasi pada inventory default yang hanya mencapai 7,2238 Gg/Tahun. Tren serupa terlihat pada emisi gas metana, di mana skenario CAA-Konvensional memproyeksikan puncak emisi sebesar 3,8045 Gg/Tahun, lebih tinggi dibandingkan inventory default yang mencapai 1,9296 Gg/Tahun. Setelah mencapai puncak, terjadi penurunan emisi metana pada kedua skenario, dengan penurunan lebih signifikan pada skenario CAA-Konvensional.

Polanya juga terlihat pada emisi karbon dioksida dan *Non-Methane Organic Compounds* (NMOC). Pada skenario CAA-Konvensional, emisi karbon dioksida mencapai puncaknya sebesar 10,4387 Gg/Tahun, lebih dari dua kali lipat dibandingkan inventory default sebesar 5,2943 Gg/Tahun. Sementara itu, emisi NMOC mencapai puncaknya pada 0,0245 Gg/Tahun pada skenario CAA-Konvensional, dibandingkan inventory default yang hanya mencapai 0,0124 Gg/Tahun. Setelah mencapai puncak, kedua jenis emisi ini menunjukkan penurunan yang mengikuti pola yang sama dengan metana. Hasil proyeksi ini menekankan pentingnya penerapan strategi yang tepat untuk meminimalkan emisi gas landfill secara efektif dan berkelanjutan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Buleleng yang sudah membantu dalam keperluan data dan memperbolehkan untuk melakukan penelitian di TPA Bengkulu Kabupaten Buleleng. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada dosen pembimbing yang selalu memberikan arahan, bimbingan dan saran sehingga penelitian ini dapat selesai dengan baik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Balaban, M., Balaban Radić, V., Bjelić, D., Bursać, A., Jaćimović, M., Gegić, B., Lukač, A., Marić, D., Nešković Markić, D., Šobot Pešić, Ž., & Jovičić, Ž. (2023). Calculation of emissions into the air of non-road mobile machinery from the landfill. *Quality of Life*, 14(1-2), 21-29. <https://doi.org/10.7251/qol2301021b>
- Balogun-Adeleye, R. M., Longe, E. O., & Aiyesimoju, K. O. (2019). A model for the accurate estimation of methane emissions in landfills. *Nigerian Journal of Technology*, 38(3), 784-791. <https://doi.org/10.4314/njt.v38i3.34>
- Borisova, D., Kostadinova, G., Petkov, G., Dospatliev, L., Ivanova, M., Dermendzhieva, D., & Beev, G. (2023). Assessment of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Emissions from a Gas Collection System of a Regional Non-Hazardous Waste Landfill, Harmanli, Bulgaria, Using the Interrupted Time Series ARMA Model. *Atmosphere*, 14(1089), 1-29. <https://doi.org/10.3390/atmos14071089>
- BP, N., Tabaroei, A., & Garg, A. (2023). Methane Emission and Carbon Sequestration Potential from Municipal Solid Waste Landfill, India. *Sustainability (Switzerland)*, 303

- 15(7125), 1-17.  
<https://doi.org/10.3390/su15097125>
- Hosseini, S. S., Yaghmaeian, K., Yousefi, N., & Mahvi, A. H. (2018). Estimation of landfill gas generation in a municipal solid waste disposal site by LandGEM mathematical model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(4), 493-506. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.009>
- I, O. F., Osarumwense, J. O., & O., E. F. (2021). Degradation Profile and Dioxygenase Activity of *Carnobacterium Gallinarum* (Mt350233) and *Enterococcus Faecalis* (MT345788) Isolated from Landfill Soil in Benin City. *Scientia Africana*, 20(3), 101-118.
- Manheim, D. C., Yeşiller, N., & Hanson, J. L. (2021). Gas Emissions from Municipal Solid Waste Landfills: A Comprehensive Review and Analysis of Global Data. *Journal of the Indian Institute of Science*, 101(4), 1-33. <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00234-4>
- Mishra, P., Singh, N., Shrama, C., & Pathak, A. K. (2020). Landfill emissions and their impact on the environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(8), 617-622. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2x.8985>
- Pérez, T., Vergara, S. E., & Silver, W. L. (2023). Assessing the climate change mitigation potential from food waste composting. *Scientific Reports*, 13(7608), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34174-z>
- Pheakdey, D. V., Noudeng, V., & Xuan, T. D. (2023). Landfill Biogas Recovery and Its Contribution to Greenhouse Gas Mitigation. *Energies*, 16(4689), 1-19. <https://doi.org/10.3390/en16124689>
- Pujotomo, I., & Qosim, M. N. (2017). Pengelolaan Emisi Gas Landfill (Biogas) Sebagai Energi Terbarukan. *Jurnal Sutet*, 7(1), 42-47. <https://doi.org/10.33322/sutet.v7i1.166>
- Rafey, A., & Siddiqui, F. Z. (2023). Modelling and simulation of landfill methane model. *Cleaner Energy Systems*, 5(100076), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100076>
- Rahmi, H., Sasmita, A., & Yenie, E. (2017). Analisis Produksi Gas Metana (CH<sub>4</sub>) dan Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) dari Tempat Pembuangan Akhir Kota Pekanbaru. *Jom FTEKNIK*, 4(1), 1-8.
- Ramadhani, E. D. (2022). Potensi Gas Metana TPA Tamangapa Menggunakan Model LandGEM dan IPCC 2006. *Science*, 7(1), 1-8.
- Sasana, H., Prasetyanto, P. K., Priyono, N., & Novitaningtyas, I. (2022). The Importance of Sustainable Waste Management Due to Socio-Economic Changes. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(3), 170-174. <https://doi.org/10.32479/ijeep.12665>
- Sinaga, F., Napitupulu, D. M., & Syarifuddin, H. (2023). Estimasi Produksi Gas Metana Untuk Pemanfaatan Sebagai Sumber Energi Di TPA Talang Gulo, Jambi. *Jurnal Daur Lingkungan*, 6(1), 12-21. <https://doi.org/10.33087/daurling.v6i1.184>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2005). *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) user's guide [Online]*. May, 1-55.
- Wahyudi, J. (2019). Emisi Gas Rumah Kaca (Grk) Dari Pembakaran Terbuka Sampah Rumah Tangga Menggunakan Model Ipcc. *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan Dan IPTEK*, 15(1), 65-76. <https://doi.org/10.33658/jl.v15i1.132>
- Xie, H., Zuo, X., Chen, Y., Yan, H., & Ni, J. (2022). Numerical model for static chamber measurement of multi-component landfill gas emissions and its application. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(49), 74225-74241. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20951-2>