



Potensi Produksi Gas Metana (CH₄) dari Kegiatan Landfilling di TPA Bengkala Kabupaten Buleleng dengan Kombinasi Pemodelan LandGEM, IPCC, dan LCA

Luh Asri Ningsih Widhi Nurjaya, Tuhu Agung Rachmanto*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Email Korespondensi: tuhu.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 31 Agustus 2023

Disetujui: 15 September 2023

Diterbitkan: 30 Oktober 2023

Kata Kunci:

Landfill, Gas Metana, Timbulan Sampah, Komposisi Sampah, Densitas Sampah, LandGEM, IPCC, OpenLCA

ABSTRAK

Permasalahan sampah semakin memburuk tiap tahun akibat pertumbuhan penduduk yang menyebabkan akumulasi sampah dan penggunaan Tempat Pembuangan Sampah (TPA) kota. Untuk mengatasi ini, penelitian menggunakan model gabungan LandGEM (*Landfill Gas Emission Model*), IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), dan LCA (*Life Cycle Assessment*) di TPA Bengkala. Tujuannya adalah mengukur potensi gas metana dalam penimbunan sampah di TPA ini, karena minimnya data mengenai gas ini di lokasi tersebut. Validasi data dilakukan dengan membandingkan model LandGEM dan IPCC, sementara LCA digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penanganan sampah di lokasi tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata harian sampah yang dihasilkan mencapai 1,95 liter/orang atau 0,36 kg. Densitas rata-rata sampah di TPA Bengkala adalah 185,23 kg/m³. Komposisi sampah mengindikasikan 36% berasal dari sampah taman dan hanya 2,35% dari tekstil. Emisi gas metana sekitar 3,80 Gg/tahun dalam skenario CAA-*Conventional default*, 1,93 Gg/tahun dalam skenario *Inventory default*, dan sekitar 0,99 Gg/tahun berdasarkan validasi model IPCC. Puncak produksi gas metana diperkirakan terjadi pada 2034. Dalam aspek dampak lingkungan, skenario pengelolaan sampah dengan metode *sanitary landfill* (skenario 0) lebih efisien dibanding opsi lain. Namun, pendekatan berkelanjutan dengan daur ulang dan pengomposan cenderung lebih baik, seperti yang ditunjukkan skenario 2, dibandingkan dengan pengolahan termal (skenario 1 dan 3).

Received: 31 August 2023

Accepted: 15 September 2023

Published: 30 October 2023

Keywords:

Landfill, Methane Gas, Waste Generation, Waste Composition, Waste Density, LandGEM, IPCC, OpenLCA

ABSTRACT

*The waste problem is getting worse every year due to population growth which causes the accumulation of waste and the use of city landfills (TPA). To overcome this, the research uses a combined model LandGEM (Landfill Gas Emission Model), IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), and LCA (Life Cycle Assessment) at the Bengkala Landfill. The aim is to measure the potential of methane gas in landfilling at this TPA, due to the lack of data on this gas at that location. Data validation was carried out by comparing the LandGEM and IPCC models, while LCA was used to evaluate the environmental impact of waste handling at that location. The results showed that the average daily waste generated reached 1.95 liters/person or 0.36 kg. The average density of waste in the Bengkala TPA is 185.23 kg/m³. The waste composition indicated that 36% came from garden waste and only 2.35% from textiles. Methane gas emissions are around 3.80 Gg/year in the default CAA-*Conventional* scenario, 1.93 Gg/year in the default *Inventory* scenario, and around 0.99 Gg/year based on IPCC model validation. The peak production of methane gas is expected to occur in 2034. In terms of environmental impact, the scenario of waste management using the sanitary landfill method (scenario 0) is more efficient than the other options. However, a sustainable approach with recycling and composting tends to be better, as scenario 2 shows, compared to thermal treatment (scenarios 1 and 3).*

1. PENDAHULUAN

Masalah sampah yang semakin buruk setiap tahun memang menjadi perhatian serius di banyak negara, termasuk Indonesia. Pertambahan jumlah penduduk merupakan faktor utama yang berkontribusi pada pertumbuhan pembangunan sampah dan tempat pembuangan akhir (TPA) di perkotaan (Maziya, 2017). Peningkatan produksi sampah yang tidak diantisipasi dengan pengelolaan sampah yang efektif dapat menimbulkan berbagai masalah, baik secara langsung maupun tidak langsung. Masalah yang muncul antara lain adalah pencemaran lingkungan, penyebaran penyakit, kerugian ekonomi, dan kerusakan ekosistem. Oleh karena itu, diperlukan upaya serius untuk mengatasi masalah ini (Haryadi et al., 2018).

Kota-kota besar seringkali menghadapi masalah sampah yang lebih kompleks karena jumlah penduduk yang tinggi dan kepadatan permukiman (Sasmitha et al., 2022). Konsep *zero waste* atau pengelolaan sampah dengan tujuan meminimalisir volume sampah menjadi sangat penting. Pendekatan ini mendorong untuk menghindari pembuangan sampah ke TPA dan lebih mengutamakan daur ulang, pengurangan, dan penggunaan kembali sampah (Musyafiq & Cahyo, 2018).

Di Indonesia, terdapat beberapa masalah dalam pengelolaan sampah. Salah satunya adalah kurangnya landasan hukum yang kuat yang mengatur pengelolaan sampah secara menyeluruh. Hal ini berkontribusi pada kurangnya keseragaman dan konsistensi dalam pengelolaan sampah di berbagai daerah. Beberapa TPA masih mengadopsi metode pembakaran terbuka, yang menghasilkan polusi udara dan pencemaran lingkungan yang serius. Diperlukan pengelolaan TPA yang lebih modern dan ramah lingkungan, seperti metode pengolahan dengan menggunakan teknologi terkini. (Mahyudin, 2017).

Strategi terbaru dalam pengelolaan limbah melihat limbah sebagai sumber daya dengan nilai ekonomi dan berbagai aplikasi yang memungkinkan. Pendekatan ini melibatkan pemanfaatan kembali dan daur ulang sampah untuk menghasilkan produk baru, sehingga dapat menciptakan lapangan kerja dan memberikan manfaat ekonomi. Secara keseluruhan, pengelolaan sampah yang efektif dan berkelanjutan merupakan tantangan yang kompleks. Diperlukan kerjasama antara pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta untuk mengembangkan kebijakan dan praktik yang berkelanjutan dalam pengelolaan sampah. (Annisa, 2015).

Gas metana merupakan salah satu isu yang ditimbulkan oleh pembuangan sampah terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Alfian & Phelia, 2021). Jika sampah tidak ditangani dengan baik, maka akan menumpuk di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), yang akan mengakibatkan sejumlah masalah (Axmalia & Mulasari, 2020). Gas metana (CH₄) dan gas pencemar lainnya akan dihasilkan oleh timbunan sampah tersebut (Artiningrum, 2017). Konsentrasi gas metana yang tinggi dapat menurunkan kandungan oksigen di atmosfer bumi. Hingga 19,5% lebih sedikit oksigen yang mungkin ada di udara karena gas metana. Ketika gas metana dan udara digabungkan pada konsentrasi yang lebih besar, kebakaran dan ledakan dapat terjadi (Kurniasari et al., 2014).

Timbulan sampah adalah volume dan berat sampah yang dihasilkan oleh suatu masyarakat setiap hari oleh setiap individu, setiap bangunan, dan setiap ruas jalan (Sofriadi et al., 2017). Sebaran setiap komponen yang termasuk dalam sampah digambarkan dengan komposisinya (Anifah et al., 2021). Kepadatan (densitas) dihitung dengan membandingkan berat dan volume sampah (Wardiha et al., 2013). Kepadatan sampah merupakan komponen penting yang terintegrasi dengan sistem perencanaan pengelolaan sampah (Hapsari & Herumurti, 2017).

Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Metode estimasi otomatis yang dapat digunakan untuk menghitung jumlah emisi dari pembuangan limbah padat kota (sampah) (Monice & Perinov, 2018). Untuk evaluasi tempat pembuangan sampah kota, dibuat perangkat lunak pemodelan LandGEM sebagai salah satu model terintegrasi (Rahmi et al., 2017). Perangkat lunak Landgem yang disetujui USEPA (2005) dan IPCC (2006) digunakan untuk menghitung jumlah gas metana yang dihasilkan oleh TPA (Sasmitha et al., 2016).

LandGEM adalah perangkat lunak yang dirancang khusus untuk menganalisis emisi gas dari tempat pembuangan sampah. Dengan menggunakan model matematis yang canggih, LandGEM dapat mengestimasi jumlah dan jenis gas yang dihasilkan dari aktivitas pembusukan sampah di tempat pembuangan. Kelebihan utama LandGEM adalah kemampuannya dalam memberikan perkiraan yang akurat mengenai emisi gas seperti metana dan karbondioksida dari tempat pembuangan sampah tertentu. Dalam penelitian ini, LandGEM digunakan untuk menganalisis kontribusi emisi gas dari lokasi sampah yang diteliti.

Di Indonesia, karena belum ada standar komposisi sampah yang secara khusus ditetapkan untuk tempat pembuangan akhir (TPA), pendekatan yang terus digunakan adalah mengestimasi emisi gas metana (CH₄) dengan merujuk pada pedoman baku IPCC tahun 2006 (Kustiasih et al., 2014). Pedoman Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional 2006 (IPCC) menawarkan petunjuk komprehensif tentang cara menghitung emisi GRK tahunan dari tempat pembuangan akhir (Plocoste et al., 2016). Jadi, dalam beberapa tahun terakhir, model matematis telah banyak digunakan untuk menentukan dan memperkirakan produksi biogas dari TPA. Dalam hal ini, beberapa model matematis telah dikembangkan, model peluruhan orde nol seperti model IPCC (Nikkhah et al., 2018).

Panduan IPCC menyediakan kerangka kerja dan metodologi yang diakui secara global untuk mengukur emisi gas rumah kaca dan dampak perubahan iklim. Metode yang dijelaskan dalam panduan ini memiliki legitimasi ilmiah yang kuat dan digunakan secara luas oleh komunitas ilmiah dan praktisi di seluruh dunia. Kelebihan utama penggunaan panduan IPCC adalah keseragaman dan konsistensi analisis emisi gas rumah kaca, yang memungkinkan perbandingan lintas wilayah dan waktu. Dalam penelitian ini, panduan IPCC digunakan sebagai acuan utama untuk mengukur emisi gas rumah kaca yang terkait dengan aktivitas tertentu.

Dengan menggunakan *Software* OpenLCA, simulasi LCA dilakukan untuk memperkirakan kemungkinan dampak dari setiap kilogram sampah yang dihasilkan (Anastasia & Azis, 2020). Unit fungsionalnya adalah satu ton MSW yang terkumpul. Data inventaris siklus hidup dihasilkan menggunakan model yang berbeda atau diambil dari literatur.

Perangkat lunak sumber terbuka OpenLCA 2.0.0 digunakan untuk mengembangkan sistem produk. OpenLCA 2.0.0 menyertakan metode penilaian dampak (Mehta et al., 2018).

OpenLCA adalah perangkat lunak sumber terbuka yang digunakan untuk melakukan analisis siklus hidup (Life Cycle Assessment/LCA). LCA adalah pendekatan sistematis yang mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau aktivitas dari tahap produksi hingga pembuangan. Kelebihan utama OpenLCA adalah fleksibilitasnya dalam mengintegrasikan berbagai data lingkungan dan sosial untuk memberikan pandangan komprehensif tentang dampak suatu produk atau aktivitas. Dalam penelitian ini, OpenLCA digunakan untuk melakukan analisis siklus hidup terkait dengan dampak lingkungan dari aktivitas yang diselidiki.

Kecamatan Kubutambahan, Kabupaten Buleleng, Bali menjadi lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bengkala. Sekitar 16 mil memisahkan TPA Bengkala dari inti kota Singaraja. Terdapat 4 Blok TPA dan 1 Blok Eksisting di dalam lahan seluas 4,8 Ha yang membentuk TPA Bengkala. Kabupaten Buleleng merupakan sumber sampah yang dikirim ke TPA Bengkala, dengan rata-rata keluaran sampah per hari 475 m³/hari..

Dengan menggunakan kombinasi pemodelan LandGEM, IPCC, dan OpenLCA, dilakukan kajian terhadap potensi produksi gas metana pada kegiatan penimbunan di TPA Bengkala Kabupaten Buleleng, berdasarkan kondisi yang telah dibahas dan kurangnya data penilaian atau validasi. Untuk mengukur keberadaan gas metana di TPA Bengkala, Kabupaten Buleleng.

Analisis jumlah gas metana yang dihasilkan metode penimbunan sampah TPA dilakukan sebagai bagian dari penelitian. Validasi data dilakukan dengan membandingkan model LandGEM dan IPCC. Untuk mengetahui apakah alternatif pengelolaan sampah di TPA sudah tepat dan mampu menyelesaikan permasalahan lingkungan yang ada saat ini, dilakukan juga penilaian dampak lingkungan pengelolaan sampah di TPA Bengkala dengan menggunakan LCA.

2. METODE

2.1 Penentuan Lokasi dan Pengumpulan Data

Identifikasi TPA Bengkala sebagai lokasi penelitian dan pengumpulan data serta informasi tentang karakteristik TPA Bengkala, seperti luas lahan, tahun pembukaan, timbunan sampah, dan metode landfilling yang digunakan.

2.2 Analisis Timbulan, Komposisi, dan Densitas Sampah

Pendekatan SNI 19-3964-1994, yang melibatkan pengambilan sampel limbah selama 8 hari, merupakan strategi pengambilan sampel yang digunakan dalam penelitian ini. Jumlah penduduk Kabupaten Buleleng yang sangat besar dan informasi volume sampah yang dikirim ke TPA Bengkala di Kabupaten Buleleng juga dapat digunakan untuk merencanakan statistik timbulan sampah kota.

Menggunakan data dari pengambilan sampel, hitung produksi, komposisi, dan kepadatan sampah sesuai dengan SNI-19-3964-1994.

Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung timbulan sampah untuk membantu menentukan produksi

sampah setiap orang dengan membandingkannya dengan data populasi:

$$M_t = Fp \times T \times P_t \times 365 \text{ hari} \quad (1)$$

Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung proporsi masing-masing komposisi:

$$\% \text{ sampel (jenis sampah)} = \frac{\text{Jumlah sampel (kg)}}{\text{Total jumlah sampel (kg)}} \times 100 \quad (2)$$

Data komposisi sampah diperlukan untuk prosedur pemasukan data Model IPCC.

Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung kepadatan sampah (Densitas sampah) :

$$\text{Densitas Sampah} = \frac{\text{Berat sampah (Kg)}}{\text{Volume Sampah (m}^3\text{)}} \times 10 \quad (3)$$

Untuk memilih timbulan sampah yang tepat perlu diketahui kepadatan sampah..

2.3 Pemodelan Menggunakan LandGEM

Berdasarkan perkiraan total sampah yang masuk setiap tahunnya, dilakukan analisis timbulan gas metana di area TPA Bengkala Kabupaten Buleleng, yang berfungsi hingga tahun penutupan TPA. Spreadsheet LandGEM dimaksudkan untuk digunakan analisis laju pembentukan emisi gas metana di kawasan TPA Bengkala Kabupaten Buleleng. Pilihan standar LandGEM digunakan untuk parameter model untuk kebutuhan analitis, yang kemudian disesuaikan dengan keadaan lokasi penelitian..

2.4 Perhitungan Emisi Gas Metana Menggunakan IPCC

Untuk menghitung emisi gas metana di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) menggunakan pendekatan dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), terdapat beberapa langkah yang perlu diikuti. Berikut adalah panduan umum untuk melakukan perhitungan tersebut:

Langkah 1: Pengumpulan Data

Kumpulkan data yang diperlukan untuk perhitungan emisi gas metana di TPA, termasuk luas lahan TPA, volume sampah yang dibuang, dan faktor emisi metana dari sampah yang terdekomposisi di TPA.

Langkah 2: Hitung Emisi Gas Metana dari Sampah

Gunakan faktor emisi metana yang diberikan oleh IPCC untuk menghitung jumlah gas metana yang dihasilkan dari dekomposisi sampah di TPA. Faktor emisi ini biasanya dinyatakan dalam satuan persentase dari volume sampah yang dibuang.

Langkah 3: Konversi Emisi Gas Metana ke Dalam Satuan CO₂e

Konversikan emisi metana yang dihitung dalam langkah sebelumnya ke dalam satuan ekuivalen karbon dioksida (CO₂e) menggunakan faktor GWP (Global Warming Potential) metana. GWP metana adalah 25 selama periode 100 tahun yang digunakan oleh IPCC. Jadi, kalikan emisi metana yang dihasilkan dari langkah sebelumnya dengan faktor GWP 25 untuk mendapatkan jumlah emisi dalam satuan CO₂e.

2.5 Analisis Potensi Dampak Menggunakan OpenLCA

Tujuan penggunaan metode LCA adalah untuk mengevaluasi dampak lingkungan yang dihasilkan oleh masing-masing skenario pengelolaan sampah yang direncanakan. Tujuan ini akan memberikan informasi yang

berguna dalam menentukan pengelolaan sampah yang paling berkelanjutan atau berwawasan lingkungan.

Dalam analisis LCA untuk skenario pengelolaan sampah, langkah-langkah umum meliputi: 1) Mendefinisikan tujuan dan lingkup dengan jelas, termasuk sumber daya dan dampak lingkungan yang akan dievaluasi. 2) Mengidentifikasi serta menghitung semua input dan output terkait siklus hidup masing-masing skenario pengelolaan sampah melalui pengumpulan data dari produksi hingga akhir produk. 3) Menilai dampak menggunakan metode seperti ReCiPe, CML-IA, IMPACT, atau Eco-indicator, dan mengevaluasi dampak lingkungan seperti emisi gas rumah kaca, penggunaan energi, polusi air, dan degradasi lahan. 4) Menginterpretasi hasil analisis untuk membandingkan dan memahami konsekuensi lingkungan dari masing-masing skenario, membantu dalam pengambilan keputusan untuk pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kabupaten Buleleng memiliki 58 rukun tetangga, 551 dusun/banjar, 129 desa, 19 kelurahan, dan 9 kelurahan. Kecamatan Kubutambahan, Kabupaten Buleleng, Bali menjadi lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bengkala. Sekitar 16 mil memisahkan TPA Bengkala dari inti kota Singaraja. Terdapat 4 Blok TPA dan 1 Blok Eksisting di dalam lahan seluas 4,8 Ha yang membentuk TPA Bengkala. Kabupaten Buleleng merupakan sumber sampah yang dikirim ke TPA Bengkala, dengan rata-rata keluaran sampah per hari 475 m³/hari. Sistem *Sanitary Landfill* digunakan oleh TPA Bengkala untuk mengolah sampah. Karena sampah organik merupakan mayoritas sampah di Indonesia, teknologi ini paling cocok digunakan di sana karena memungkinkan pengolahan lindi diatur secara ketat. Lapisan kedap air dibangun di bagian bawah *sanitary landfill* dan dilengkapi dengan pipa pengumpul dan distribusi lindi.

3.1 Timbulan Sampah

Data sampah yang masuk ke TPA Bengkala dari tahun 2016 sampai dengan tahun 2022 digunakan untuk menghitung timbulan sampah.

Tabel 1. Data sampah yang masuk TPA Bengkala

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)
2016	811.923	41.632,14	41.632.140	114,06	114.060,6
2017	816.654	44.857,89	44.857.890	122,90	122.898,3
2018	819.660	51.547,98	51.547.980	141,23	141.227,3
2019	823.395	52.583,19	52.583.190	144,06	144.063,5
2020	826.499	52.603,65	52.603.650	144,12	144.119,6
2021	827.192	56.241,24	56.241.240	154,09	154.085,6
2022	827.981	57.158,97	57.158.970	156,60	156.599,9

Timbulan sampah penduduk Kabupaten Buleleng pada tahun 2016- 2022, dapat dihitung dengan rumus (1) Perhitungan timbulan sampah penduduk Kabupaten Buleleng tahun 2016, sebagai berikut:

$$M_t = Fp \times T \times P_t \times 365 \text{ hari}$$

$$41.632.140 \text{ K} = 47 \% \times T \times 811.923 \times 365 \text{ hari}$$

$$T = \frac{41.632.140 \text{ kg}}{47 \% \times 811.923 \times 365 \text{ hari}}$$

$$T = 0,30 \frac{\text{kg}}{\text{orang.hari}}$$

Timbulan sampah dalam satuan berat harus dibagi dengan kepadatan sampah untuk menghitung timbulan sampah dalam satuan volume. Sampah yang dihitung memiliki kepadatan 185,23 kg/m³.

Tabel 2. Hasil perhitungan Timbulan sampah Penduduk Kabupaten Buleleng 2016-2022

Tahun	Timbulan sampah (kg/Orang/Hari)	Densitas Sampah (Kg/m3)	Timbulan Sampah (Liter/Orang/Hari)
2016	0,30	185,23	1,61
2017	0,32	185,23	1,73
2018	0,37	185,23	1,98
2019	0,37	185,23	2,01
2020	0,37	185,23	2,00
2021	0,40	185,23	2,14
2022	0,40	185,23	2,17
Rata-rata	0,36	185,23	1,95

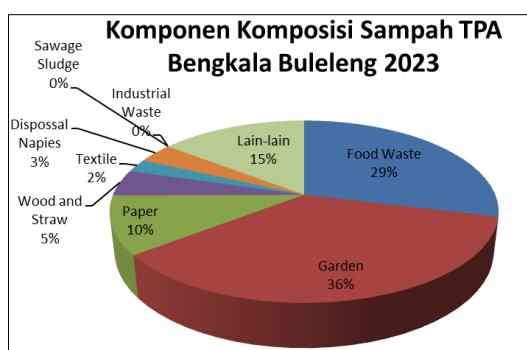
Berdasarkan hasil pada tabel 2. menunjukkan bahwa timbulan sampah per orang meningkat setiap tahun. Beberapa faktor yang mempengaruhi laju penciptaan sampah adalah peningkatan populasi, industrialisasi, urbanisasi, dan ekspansi ekonomi. SNI 19-3664-1994 menunjukkan bahwa satuan timbulan sampah Kabupaten Buleleng (Kota Sedang): 1,5–3 L/orang/hari atau 0,3–0,4 Kg/orang/hari. Timbulan sampah rata-rata penduduk Kabupaten Buleleng adalah 1,95 L/orang/hari atau 0,36 kg/orang/hari.

3.2 Komposisi Sampah

Untuk memastikan jenis sampah yang dihasilkan di TPA Bengkala di Kabupaten Buleleng diambil sampel sampah tersebut. Data sampling digunakan untuk komposisi sampah saat memasukkan data ke dalam software IPCC dengan komposisi berdasarkan Tabel 3. Gambar 1 menampilkan unsur-unsur penyusun komposisi sampah di TPA Bengkala Kabupaten Buleleng.

Tabel 3. Komponen Komposisi Sampah di TPA Bengkala

No	Parameter/Komponen DOC (Berat Basah)	Persentase (%)
1	Sampah Makanan	28,83
2	Sampah Taman	35,71
3	Kertas	10,35
4	Kayu dan Jerami	4,66
5	Tekstil	2,35
6	Pembuangan Popok	3,53
7	Lumpur Sawage	0,00
8	Limbah industri	0,00
9	Lain-lain	14,57
	Total	100,00



Gambar 1. Diagram Komposisi sampah Di TPA Bengkala Buleleng 2023

Tabel 5. Input Proyeksi Timbulan Sampah

Year	(Mg/ Year)	(Short tons/ year)
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

Berikut Tabel hasil perhitungan *methane generate* default CAA dan *Inventory*.

Tabel 6. Hasil perhitungan gas metana dengan LandGEM

Tahun	Methane Generate (Gg/Tahun)	
	CAA-Konvensional	Inventory default
2016	0,00	0,00
2017	0,23	0,11
2018	0,47	0,22
2019	0,73	0,35
2020	0,99	0,47
2021	1,23	0,59
2022	1,48	0,72
2023	1,73	0,84
2024	1,97	0,96
2025	2,19	1,07
2026	2,41	1,18
2027	2,62	1,29
2028	2,82	1,40
2029	3,01	1,50
2030	3,20	1,60
2031	3,37	1,69
2032	3,54	1,78
2033	3,70	1,87
2034	3,80	1,93
2035	3,62	1,85
2036	3,44	1,78
2037	3,27	1,71
2038	3,11	1,64
2039	2,96	1,58
2040	2,82	1,52

Berdasarkan hasil pada tabel 6. menunjukkan bahwa, hasil perhitungan estimasi produksi gas metana menggunakan model LandGEM untuk skenario CAA-Konvensional dan Inventori *Default*. Angka-angka ini mencerminkan perkiraan jumlah gas metana yang dihasilkan dari sampah selama periode waktu yang ditentukan. Gas metana dihasilkan mulai dari tahun 2017 hingga 2040. Pada tahun 2016, tidak ada gas metana yang dihasilkan. Produksi gas metana meningkat seiring waktu, dan pada umumnya, estimasi gas metana yang dihasilkan dalam skenario CAA-Konvensional lebih tinggi daripada skenario Inventori *Default*. Puncak produksi gas metana terjadi pada tahun 2034, dengan estimasi 3,80 Gg/tahun untuk CAA-Konvensional dan 1,93 Gg/tahun untuk Inventori *Default*. Setelah puncak tersebut, produksi gas metana cenderung

3.3 Densitas Sampah

Ini sama dengan densitas campuran saat menghitung densitas untuk masing-masing komposisi. Uraian berikut menggambarkan bagaimana kepadatan sampah dihitung:

Densitas sampah Hari ke-1

$$\begin{aligned} \text{Volume kotak sampling} &= p \times L \times T \\ &= 1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0,40 \\ &= 0,40\text{ m}^3 \end{aligned}$$

Berat Sampah (tanpa kotak sampling) = 70 kg

Densitas Sampah= (Massa Sampah)/(Volume Sampah)

Densitas Sampah= (70 kg)/(0,40 m³)

Densitas Sampah= 175 kg/ m³

Tabel 4. Perhitungan Densitas Sampah di TPA Bengkala

Tanggal Sampling	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m3)	Berat sampah (tanpa kotak densitas) (kg)	Densitas sampah (kg/m3)
13-Mar-23	1	1	0,40	0,40	70	175,00
14-Mar-23	1	1	0,31	0,31	55	177,42
15-Mar-23	1	1	0,25	0,25	51	204,00
16-Mar-23	1	1	0,33	0,33	60	181,82
17-Mar-23	1	1	0,35	0,35	65	185,71
18-Mar-23	1	1	0,36	0,36	67	186,11
19-Mar-23	1	1	0,34	0,34	63	185,29
20-Mar-23	1	1	0,37	0,37	69	186,49
Rata-rata						185,23

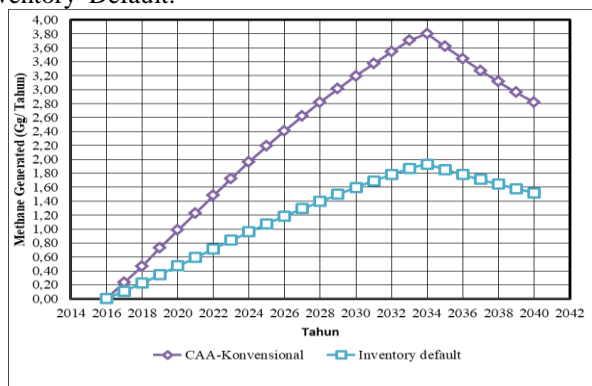
Berdasarkan hasil pada tabel 4. menunjukkan bahwa bahwa pengambilan sampel hari pertama menghasilkan nilai kerapatan sampah terendah yaitu 175 kg/m³, sedangkan hari ketiga menghasilkan nilai kerapatan sampah terbesar yaitu 204 kg/m³. Di TPA Bengkala, sampah memiliki kepadatan rata-rata 185,23 kg/m³.

3.4 Perhitungan Potensi Gas Metana 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. Dengan Nilai *Default Constant* (K) yang digunakan adalah 0,05 per tahun dan Lo 170 m³/mg Untuk CAA Konvensional dan Untuk *Inventory Konvensional* Nilai *Default Constant* (K) yang digunakan adalah 0,04 per tahun dan Lo 100 m³/mg.

menurun. Periode waktu produksi gas metana dalam model LandGEM mencakup 80 tahun.

Berikut ini grafik perbandingan emisi gas metan dengan model landGEM Default CAA-Konvensional dan Inventory Default.



Gambar 2. Grafik perbandingan hasil perhitungan gas metana dengan LandGEM

Dari Gambar 2. dapat diketahui nilai puncak emisi gas metan berada pada tahun 2034 untuk default CAA-Konvensional dan Default Inventory. Puncak produksi gas metana setahun setelah penutupan TPA (Tempat Pembuangan Akhir) dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu :

- Proses dekomposisi limbah organik: Saat sampah organik terdekomposisi, bakteri anaerobik menghasilkan metana sebagai produk sampingan. Setelah penutupan TPA, proses dekomposisi tersebut masih berlanjut, dan ada kemungkinan bahwa masih ada jumlah besar sampah organik yang belum terurai sepenuhnya di dalam TPA. Proses dekomposisi ini dapat mencapai puncaknya karena sampah organik yang tertinggal dalam TPA telah mencapai kondisi optimal untuk pertumbuhan bakteri metanogen.
- Peningkatan suhu: Setelah penutupan TPA, akses udara ke dalam TPA terbatas, yang dapat menyebabkan peningkatan suhu di dalamnya. Peningkatan suhu mempercepat proses dekomposisi dan produksi metana oleh bakteri metanogen.
- Perubahan kondisi di dalam TPA: Setelah penutupan TPA, dapat terjadi perubahan dalam kondisi mikrobiologis dan fisik di dalamnya. Mungkin terdapat peningkatan kelembaban, pH, atau ketersediaan nutrisi yang menguntungkan pertumbuhan bakteri metanogen, sehingga menghasilkan puncak produksi metana.

Namun, setelah mencapai puncak produksi, produksi metana cenderung menurun seiring berjalannya waktu. Beberapa alasan mengapa produksi metana menurun setelah puncaknya meliputi:

- Penurunan sumber makanan: Setelah beberapa waktu, jumlah sampah organik yang tersisa di dalam TPA akan berkurang secara signifikan. Kurangnya sumber makanan yang cukup bagi bakteri metanogen akan mengakibatkan penurunan produksi metana.
- Menurunnya kondisi lingkungan: Proses dekomposisi limbah organik di dalam TPA mengubah kondisi lingkungan secara bertahap. Perubahan pH, kelembaban, dan ketersediaan nutrisi dapat menjadi tidak

menguntungkan bagi pertumbuhan bakteri metanogen. Hal ini dapat menghambat produksi metana.

- Kemungkinan metana terlepas: Setelah penutupan TPA, upaya pengendalian emisi gas rumah kaca biasanya dilakukan. Sistem penangkapan dan pemrosesan gas metana dapat dipasang untuk mengurangi emisi. Oleh karena itu, meskipun masih ada produksi metana di dalam TPA, sebagian besar metana mungkin tertangkap atau dialirkan untuk mencegah pelepasan langsung ke atmosfer.

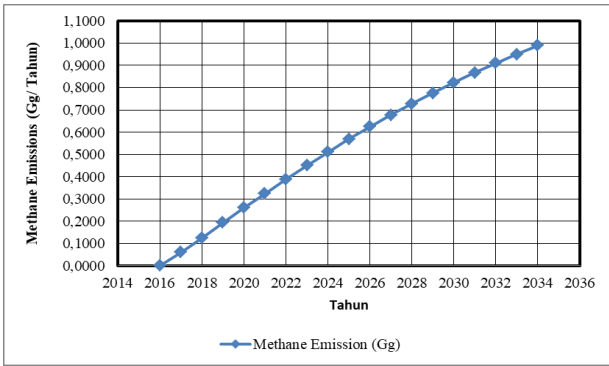
3.5 Validasi Hasil dengan Model IPCC

Metana adalah salah satu gas yang memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi daripada karbon dioksida. Ketika sampah organik terdekomposisi di lingkungan yang kekurangan oksigen, seperti di TPA yang tertutup, metana dilepaskan ke atmosfer. Teknik IPCC digunakan untuk memperkirakan emisi gas metana, dari berbagai sumber. Metode ini melibatkan estimasi berdasarkan data yang tersedia tentang aktivitas manusia, seperti produksi sampah, dan faktor emisi yang memperhitungkan karakteristik lokal, praktik pengelolaan sampah, dan kondisi lingkungan. Skenario dimana sampah langsung ditampung di TPA Bengkala tanpa dilakukan pengomposan atau daur ulang pada sumbernya digunakan untuk menghitung emisi gas metana dalam penelitian ini. Estimasi emisi gas metana dari sampah di TPA Bengkala adalah sebagai berikut.

Tabel 7. Hasil perhitungan emisi gas metana

Tahun	Methane Emission (Gg)
2016	0,0000
2017	0,0612
2018	0,1239
2019	0,1931
2020	0,2599
2021	0,3232
2022	0,3881
2023	0,4507
2024	0,5114
2025	0,5692
2026	0,6244
2027	0,6772
2028	0,7277
2029	0,7760
2030	0,8223
2031	0,8668
2032	0,9095
2033	0,9505
2034	0,9901

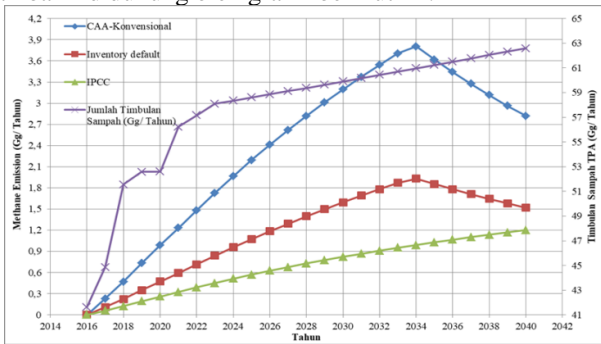
Berdasarkan hasil pada tabel 7. menunjukkan bahwa peningkatan produksi sampah yang dikirim ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) berhubungan dengan peningkatan emisi gas metana. Peningkatan produksi sampah yang dikirim ke TPA dapat menjadi faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas metana. Metana merupakan salah satu gas rumah kaca yang memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi daripada karbon dioksida. Gas metana dapat dihasilkan dari proses pembusukan sampah organik yang terjadi di TPA. Grafik berikut menunjukkan estimasi emisi metana dengan menggunakan teknik IPCC.



Gambar 3. Perkiraan emisi gas metan berdasarkan IPCC (Sumber : Hasil Analisis, 2023)

Nilai emisi gas metana meningkat setiap tahunnya, seperti terlihat pada Gambar 3 di atas. Karena model IPCC menggunakan orde nol, nilai emisi gas metana dalam perhitungan ini naik setiap tahunnya. Namun, beberapa tahun ke depan, ketika TPA ditutup, jumlah sampah yang terdegradasi akan habis dan nilai emisi gas akan turun.

Hasil model landGEM dan IPCC yang terlihat pada Gambar 4 didukung oleh grafik berikut ini.



Gambar 4. Grafik hasil perhitungan emisi gas metana dengan LandGEM dan IPCC

Model LandGEM memiliki nilai emisi metana yang lebih tinggi dan mencapai nilai puncaknya pada tahun 2034, sedangkan nilai emisi metana model IPCC terus cenderung stabil karena model ini menggunakan formula orde nol sedangkan LandGEM menggunakan Orde 1. Terlihat jelas dari Gambar 4 bahwa hasil perhitungan emisi gas metana dengan model LandGEM dan IPCC memiliki range yang tidak terlalu besar.

Secara umum, perhitungan emisi gas metan menggunakan model LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) dan model IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) dapat memberikan hasil yang relatif serupa, meskipun dengan beberapa perbedaan signifikan dalam rentang dan pola emisi.

Model LandGEM adalah model yang dikembangkan khusus untuk mengestimasi emisi gas metan dari TPA. Model ini mengadopsi persamaan kinetika orde pertama (Orde 1) untuk memprediksi produksi dan pelepasan gas metan dari TPA. Persamaan orde pertama menjelaskan bahwa produksi gas metan secara bertahap meningkat seiring dengan waktu, mencapai puncaknya pada suatu titik dan kemudian melambat. Dalam model LandGEM, puncak emisi gas metan biasanya terjadi beberapa waktu setelah TPA mulai beroperasi. Ini karena pada awalnya, proses

dekomposisi sampah membutuhkan waktu untuk memicu produksi gas metan yang signifikan. Setelah puncak, emisi gas metan cenderung menurun atau tetap stabil seiring dengan berkurangnya ketersediaan bahan organik yang terdekomposisi di TPA.

Model IPCC adalah model yang dikembangkan oleh Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim (IPCC). Model ini menggunakan persamaan orde nol (Orde 0) untuk mengestimasi emisi gas metan dari TPA. Persamaan orde nol menyatakan bahwa emisi gas metan dari TPA akan tetap stabil seiring dengan waktu, dengan asumsi bahwa kondisi operasional TPA, termasuk pengelolaan gas metan, tetap konstan. Dalam model IPCC, emisi gas metan cenderung stabil setelah periode tertentu sejak TPA mulai beroperasi. Ini disebabkan oleh anggapan bahwa sistem pengelolaan gas metan di TPA terus berjalan dengan efektif, termasuk pemantauan dan pemulihan gas metan yang lepas ke atmosfer. Dalam model ini, emisi gas metan tidak mencapai puncak seperti dalam model LandGEM karena tidak ada peningkatan bertahap dalam produksi gas metan seiring waktu.

Jadi, perbedaan utama antara model LandGEM dan IPCC terletak pada persamaan kinetika yang digunakan untuk mengestimasi emisi gas metan dari TPA. Model LandGEM menggunakan persamaan orde pertama, yang menghasilkan peningkatan produksi gas metan yang relatif lambat dan mencapai puncak pada suatu titik sebelum menurun. Sementara itu, model IPCC menggunakan persamaan orde nol, yang menghasilkan emisi gas metan yang stabil seiring waktu, dengan asumsi sistem pengelolaan gas metan yang efektif.

3.6 Analisis Dampak Lingkungan

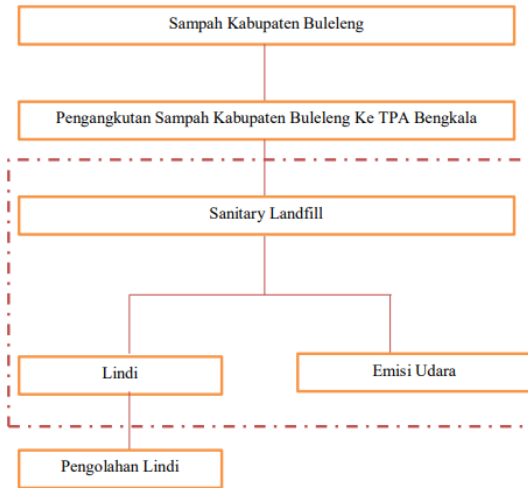
Analisis Siklus Hidup (*Life Cycle Assessment* atau LCA) adalah suatu metode yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau proses dari awal hingga akhir siklus hidupnya. Dalam konteks pengelolaan sampah, LCA dapat digunakan untuk membandingkan dan mengevaluasi dampak lingkungan dari berbagai skenario pengelolaan sampah.

Penentuan Tujuan dan Batasan

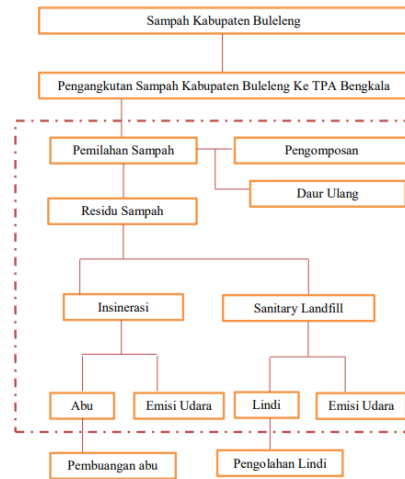
Menentukan dampak lingkungan yang timbul dari setiap skenario pengelolaan limbah yang direncanakan merupakan tujuan dari penerapan pendekatan LCA. Jumlah sampah pada tahun 2017 dan tahun prediksi yaitu 2034 merupakan fungsi satuan yang digunakan untuk *Life Cycle Inventory* (LCI) dalam parameter penelitian ini. Beberapa batasan pengelolaan sampah yang akan direncanakan adalah:

Penentuan Inventarisasi Data Daur Hidup

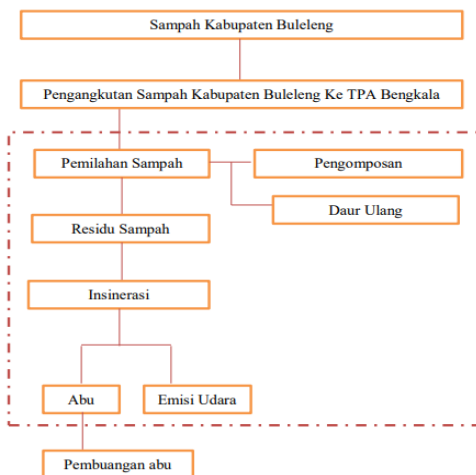
Metode *Life Cycle Inventory* (LCI) merupakan inventarisasi data sumber daya dan energi yang dibutuhkan untuk memproses setiap skenario. LCI diperiksa untuk tahun 2017 serta tahun (2034). LCI dihitung dengan membagi proporsi sampah dengan jumlah total sampah pada tahun 2017 dan 2034. Untuk menginventarisir data metode LCA, data hasil perhitungan diubah menjadi data dan dimasukkan ke dalam program OpenLCA 2.0.0.



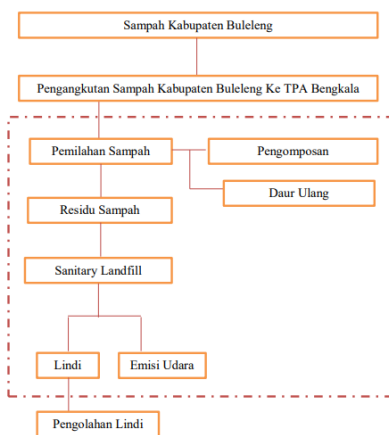
Gambar 5. Batasan Skenario 0



Gambar 8. Batasan Skenario 3



Gambar 6. Batasan Skenario 1 (Sumber : Hasil Analisis, 2023)



Gambar 7. Batasan Skenario 2

Database OpenLCA 2.0.0 akan diperbarui dengan data yang dikumpulkan. Pendekatan baseline CML-IA dari program OpenLCA 2.0.0 akan diterapkan pada penelitian ini.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Life Cycle Inventory

Jenis Sampah	Komposisi Sampah	Timbulan Sampah (Ton)		Kuantitas Sampah Tiap Komposisi (Ton)	
		2017	2034	2016	2034
Sampah Taman	49,20%	44.857,89	60.967,295	22.070,08	29.995,909
Sisa Makanan Kertas-Karton	17,70%	44.857,89	60.967,295	7.939,85	10.791,211
Kaca	9,40%	44.857,89	60.967,295	4.216,64	5.730,926
Plastik	1,70%	44.857,89	60.967,295	762,58	1.036,444
Logam	13,90%	44.857,89	60.967,295	6.235,25	8.474,454
B3	0,20%	44.857,89	60.967,295	89,72	121,935
Kain (Tekstil)	0,60%	44.857,89	60.967,295	269,15	365,804
Karet & Kulit	2,70%	44.857,89	60.967,295	1.211,16	1.646,117
Lain-lain	0,60%	44.857,89	60.967,295	269,15	365,804
Total	100,00%	44.857,89	60.967,295	1.794,32	2.438,692

Life Cycle Impact Assessment

Estimasi dampak dibuat dalam studi ini menggunakan OpenLCA 2.0.0. Pendekatan standar CML-IA digunakan dalam OpenLCA untuk menghitung besarnya dampak yang terjadi dalam penelitian ini. Diputuskan untuk mengadopsi pendekatan baseline CML-IA karena memenuhi persyaratan analisis. Outcome adalah pengaruh untuk setiap unit fungsi. Spesifikasi LCIA untuk situasi saat ini dan perkiraan untuk setiap penilaian dampak adalah sebagai berikut:

Tabel 9. Dampak Lingkungan Skenario 0

Dampak Lingkungan Skenario 0			
Dampak Lingkungan	2017	2034	Satuan
Penipisan Abiotik	-2,45E-02	-4,16E-06	Kg Sb eq
Penipisan Abiotik (Bahan Bakar Fosil)	-4,87E+04	-8,27E+05	Mj
Pengasaman	-2,01E+01	-3,41E+02	Kg SO ₂ eq
Eutrofikasi	-4,09E+00	-6,56E+01	Kg PO ₄ - - - eq
Ecotox akuatik air tawar	-1,94E+00	1,18E+03	Kg 1,4 DB eq
Pemanasan global	7,75E+06	2,17E+09	Kg CO ₂ eq
Toksistasitas Manusia	8,72E+04	2,45E+07	Kg 1,4 DB eq
Ekotoksistasitas air laut	-5,17E+05	-8,25E+06	Kg 1,4 DB eq
Penipisan lapisan ozon (ODP)	6,36E+01	1,78E+04	Kg CFC - 11 eq
Oksidasi fotokimia	1,92E+03	5,39E+05	Kg C ₂ H ₄ eq
Ekotoksistasitas darat	4,57E+01	1,33E+04	Kg 1,4 DB eq

Tabel 10. Dampak Lingkungan Skenario 1

Dampak Lingkungan Skenario 1			
Dampak Lingkungan	2017	2034	Satuan
Penipisan Abiotik	3,62E-07	6,16E-06	Kg Sb eq
Penipisan Abiotik (Bahan Bakar Fossil)	1,04E+15	1,76E+16	Mj
Pengasaman	2,30E+11	3,91E+12	Kg SO ₂ eq
Eutrofikasi	1,45E+10	2,47E+11	Kg PO ₄ - - - eq
Ecotox akuatik air tawar	6,47E+10	1,10E+12	Kg 1,4 DB eq
Pemanasan global	4,85E+13	8,25E+14	Kg CO ₂ eq
Toksisitas Manusia	3,83E+12	6,51E+13	Kg 1,4 DB eq
Ekotoksisitas air laut	3,80E+15	6,47E+16	Kg 1,4 DB eq
Penipisan lapisan ozon (ODP)	3,70E-04	6,34E-03	Kg CFC - 11 eq
Oksidasi fotokimia	1,46E+10	2,48E+11	Kg C ₂ H ₄ eq
Ekotoksisitas darat	1,20E+10	2,03E+11	Kg 1,4 DB eq

Tabel 11. Dampak Lingkungan Skenario 2

Dampak Lingkungan Skenario 2			
Dampak Lingkungan	2017	2034	Satuan
Penipisan Abiotik	8,02E-08	1,36E-06	Kg Sb eq
Penipisan Abiotik (Bahan Bakar Fossil)	3,23E+14	5,49E+15	Mj
Pengasaman	7,17E+10	1,22E+12	Kg SO ₂ eq
Eutrofikasi	4,52E+09	7,69E+10	Kg PO ₄ - - - eq
Ecotox akuatik air tawar	2,02E+10	3,43E+11	Kg 1,4 DB eq
Pemanasan global	1,51E+13	2,57E+14	Kg CO ₂ eq
Toksisitas Manusia	1,19E+12	2,03E+13	Kg 1,4 DB eq
Ekotoksisitas air laut	1,19E+15	2,02E+16	Kg 1,4 DB eq
Penipisan lapisan ozon (ODP)	8,21E-05	1,40E-03	Kg CFC - 11 eq
Oksidasi fotokimia	4,55E+09	7,73E+10	Kg C ₂ H ₄ eq
Ekotoksisitas darat	3,73E+09	6,35E+10	Kg 1,4 DB eq

Tabel 12. Dampak Lingkungan Skenario 3

Dampak Lingkungan Skenario 3			
Dampak Lingkungan	2017	2034	Satuan
Penipisan Abiotik	2,61E-07	4,45E-06	Kg Sb eq
Penipisan Abiotik (Bahan Bakar Fossil)	7,48E+14	1,27E+16	Mj
Pengasaman	1,66E+11	2,82E+12	Kg SO ₂ eq
Eutrofikasi	1,05E+10	1,78E+11	Kg PO ₄ - - - eq
Ecotox akuatik air tawar	4,67E+10	7,94E+11	Kg 1,4 DB eq
Pemanasan global	3,50E+13	5,95E+14	Kg CO ₂ eq
Toksisitas Manusia	2,77E+12	4,70E+13	Kg 1,4 DB eq
Ekotoksisitas air laut	2,75E+15	4,67E+16	Kg 1,4 DB eq
Penipisan lapisan ozon (ODP)	2,70E-04	4,58E-03	Kg CFC - 11 eq
Oksidasi fotokimia	1,05E+10	1,79E+11	Kg C ₂ H ₄ eq
Ekotoksisitas darat	8,64E+09	1,47E+11	Kg 1,4 DB eq

Interpretasi

Langkah terakhir dari studi LCA adalah interpretasi, yang melibatkan penilaian tentang kemungkinan skenario pengelolaan sampah di TPA Bengkulu akan menyebabkan kerusakan lingkungan. Hasil kajian LCA yang dilakukan dengan menggunakan program OpenLCA dalam hal pengelolaan sampah di TPA Bengkulu diinterpretasikan sebagai berikut:

1. Skenario 0 (*Sanitary Landfill*): Hasil analisis menunjukkan bahwa skenario ini memiliki dampak lingkungan terkecil dibandingkan dengan skenario lainnya. *Sanitary landfill* merupakan metode penimbunan sampah yang dilakukan dengan tata cara yang terkendali dan meminimalkan pencemaran lingkungan. Dalam

konteks ini, skenario ini adalah pilihan yang paling menguntungkan dari segi dampak lingkungan.

2. Skenario 2 (Daur Ulang, Pengomposan, dan *Sanitary Landfill*): Hasil analisis menunjukkan bahwa skenario ini memiliki dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan skenario 0. Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan proses daur ulang dan pengomposan yang dapat memerlukan energi dan sumber daya tambahan. Meskipun demikian, dampaknya masih lebih rendah dibandingkan dengan skenario 1 dan 3.
3. Skenario 1 dan 3 (Pengolahan Termal): Hasil analisis menunjukkan bahwa skenario-skenario ini memiliki dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan skenario 0 dan 2. Hal ini disebabkan oleh penggunaan proses insinerasi yang menghasilkan polusi udara. Proses insinerasi menggunakan energi tambahan dan dapat menghasilkan emisi yang berpotensi mencemari lingkungan.

Berdasarkan interpretasi tersebut, bahwa skenario pengelolaan sampah yang menggunakan metode *sanitary landfill* (skenario 0) memiliki dampak lingkungan terkecil. Namun, jika diinginkan pendekatan yang lebih berkelanjutan dengan memperhitungkan daur ulang dan pengomposan, skenario 2 dapat menjadi pilihan yang lebih baik dibandingkan dengan skenario-skenario yang melibatkan pengolahan termal (skenario 1 dan 3).

4. SIMPULAN

1. Berdasarkan hasil studi dan pengambilan sampel di TPA Bengkulu, diperoleh hasil sebagai berikut: Rata-rata jumlah sampah yang dihasilkan per hari adalah 1,95 liter atau 0,36 kg per orang. Kepadatan rata-rata sampah adalah 185,23 kg/m³, dan di TPA Bengkulu komposisi terbesar adalah sampah taman mencapai 36%, sedangkan terkecil adalah sampah tekstil hanya 2,35%.
2. Hasil estimasi perkiraan produksi gas metana dari proses TPA di TPA Bengkulu menunjukkan produksi akan mencapai puncaknya pada tahun 2034, dengan emisi gas metana sebesar 3,80 Gg/tahun untuk standar CAA-Konvensional dan 1,93 Gg/tahun untuk default Inventaris, serta untuk hasil model IPCC sebesar 0,99 Gg/tahun.
3. Skenario pengelolaan sampah yang menggunakan metode *sanitary landfill* (skenario 0) memiliki dampak lingkungan terkecil. Namun, jika diinginkan pendekatan yang lebih berkelanjutan dengan memperhitungkan daur ulang dan pengomposan, skenario 2 dapat menjadi pilihan yang lebih baik dibandingkan dengan skenario-skenario yang melibatkan pengolahan termal (skenario 1 dan 3).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih Penulis sampaikan kepada pemerintah Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Buleleng dan masyarakat sekitar TPA Desa Bengkulu Kabupaten Buleleng atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan selama proses penelitian berlangsung sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik tanpa adanya halangan untuk mendapatkan data

timbunan, komposisi dan densitas Sampah. Selain itu, Penulis berterima kasih kepada Dinas Kependudukan Kabupaten Buleleng untuk memberikan bantuan terhadap proses penelitian dalam memberikan data penduduk kabupaten Buleleng sehingga penulis dapat menghitung proyeksi timbunan sampah yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfian, R., & Phelia, A. (2021). EVALUASI EFEKTIFITAS SISTEM PENGANGKUTAN DAN PENGELOLAAN SAMPAH DI TPA SARIMUKTI KOTA BANDUNG. *Journal of Infrastructural in Civil Engineering (JICE)*, 02(01), 16–23.
- Anastasia, T. T., & Azis, M. M. (2020). Life cycle assessment (LCA) kegiatan bank sampah di pedesaan (Bank Sampah Asoka Berseri, Desa Sokosari, Tuban). *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*, 4(3), 537–551.
- Anifah, E. M., Rini, I. D. W. S., Hidayat, R., & Ridho, M. (2021). ESTIMASI EMISI GAS RUMAH KACA (GRK) KEGIATAN PENGELOLAAN SAMPAH DI KELURAHAN KARANG JOANG, BALIKPAPAN. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 13(1), 17–33.
- Annisa, B. (2015). ASESMEN POTENSI RECOVERY ENERGI DARI SAMPAH PERKOTAAN DI TPA (TEMPAT PEMROSESAN AKHIR) SAMPAH UNTUK INFRASTRUKTUR PERSAMPAHAN BERKELANJUTAN. *Annual Civil Engineering Seminar 2015*, 235–242.
- Artiningrum, T. (2017). POTENSI EMISI METANA (CH₄) DARI TIMBULAN SAMPAH KOTA BANDUNG. *Geoplanart*, 1(1), 36–44.
- Axmalia, A., & Mulasari, S. A. (2020). *The Impact of Landfills Toward Public Health*. 6(2), 171–176.
- Hapsari, D. S. A., & Herumurti, W. (2017). Laju Timbunan dan Komposisi Sampah Rumah Tangga di Kecamatan Sukolilo Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), C421–C424.
- Haryadi, N. R., Sasmita, A., & Asmura, J. (2018). Proyeksi Timbunan Sampah dari Kegiatan Landfilling di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kecamatan Mandau. *Jom FTEKNIK*, 5(1), 1–6.
- Kurniasari, O., Damanhuri, E., Padmi, T., & Kardena, E. (2014). TANAH PENUTUP LANDFILLMENGUNAKAN SAMPAH LAMA SEBAGAI MEDIA OKSIDASI METANA UNTUK MENGURANGI EMISI GAS METANA. *Jurnal Bumi Lestari*, 14(1), 46–52.
- Kustiasih, T., Setyawati, L. M., Anggraini, F., Darwati, S., & Aryenti. (2014). FAKTOR PENENTU EMISI GAS RUMAH KACA DALAM PENGELOLAAN SAMPAH PERKOTAAN Determinant Factor of Greenhouse Gas Emission In Urban Waste Management. *Jurnal Pemukiman*, 9(2), 78–90.
- Mahyudin, R. P. (2017). KAJIAN PERMASALAHAN PENGELOLAAN SAMPAH DAN DAMPAK LINGKUNGAN DI TPA (TEMPAT PEMROSESAN AKHIR). *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(1), 66–74.
- Maziya, F. B. (2017). Emisi Gas Rumah Kaca (Grk) Karbon Dioksida (Co₂) Kegiatan Pengelolaan Sampah Kecamatan Genteng Kota Surabaya. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(2), 1–9. <https://doi.org/10.20527/jukung.v3i2.4022>
- Mehta, Y. D., Shastri, Y., & Joseph, B. (2018). Economic analysis and life cycle impact assessment of municipal solid waste (MSW) disposal: A case study of Mumbai , India. *Waste Management & Research*, 1–13. <https://doi.org/10.1177/0734242X18790354>
- Monice, & Perinov. (2018). Analisis Pemanfaatan Energi Dari Pengolahan Metode Landfill Di TPA Muara Fajar Pekanbaru. *Rang Teknik Journal*, 1(2), 215–220.
- Musyafiq, A. A., & Cahyo, B. N. (2018). PEMILIHAN TEKNOLOGI WASTE TO ENERGY UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SAMPAH (STUDI KASUS: TPA MOJOREJO KABUPATEN SUKOHARJO JAWA TENGAH). *Prosiding SNST Ke-9, 1(1)*, 13–18.
- Nikkhah, A., Khojastehpour, M., & Abbaspour-Fard, M. H. (2018). Hybrid landfill gas emissions modeling and life cycle assessment for determining the appropriate period to install biogas system. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.080>
- Plocoste, T., Jacoby Koaly, S., Petit, R.-H., & Roussas, A. (2016). Estimation of Methane Emission from a Waste Dome in a Tropical Insular Area. *International Journal of Waste Resources*, 6(2), 1–7. <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000211>
- Rahmi, H., Sasmita, A., & Yenie, E. (2017). Analisis produksi gas metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂) dari tempat pembuangan akhir Kota Pekanbaru. *Jom FTEKNIK*, 4(1), 1–8.
- Sasmita, A., Andesgur, I., & Rahmi, H. (2016). Potensi Produksi Gas Metana Dari Kegiatan Landfilling di TPA Muara Fajar , Pekanbaru. *Seminar Nasional Teknik Kimia –Teknologi Oleo Petro Kimia Indonesia*, 169–176. <https://www.researchgate.net/publication/319006888%0APotensi>
- Sasmita, A., Asmura, J., & Nurmaida, B. (2022). Analisis Emisi CH₄ dan Potensi Energi dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Muara Fajar 2 Kota Pekanbaru. *Rekayasa (Journal of Science and Technology)*, 15(1), 64–70.
- Sofriadi, D., Suhendrayatna, & Fatimah, E. (2017). ESTIMASI EMISI KARBON DARI SAMPAH PERMUKIMAN DENGAN METODE IPCC DI KECAMATAN ULEE KARENG, BANDA ACEH. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 1, 339–348.
- Wardiha, M. W., Putri, P. S. A., Setyawati, L. M., & Muhajirin. (2013). TIMBULAN DAN KOMPOSISI SAMPAH DI KAWASAN PERKANTORAN DAN WISMA (Studi Kasus: Werdhapura Village Center, Kota Denpasar, Provinsi Bali). *Jurnal Presipitasi*, 10(1), 7–17.