



Research Articles

Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di TPA Benowo Menggunakan Model LandGem

Estimation of Green House Gas (GHG) Emissions at Benowo Landfill Using the LandGem Model

Rimadhani Prilindatami, Okik Hendriyanto Cahyonugroho*

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

**corresponding author, email: okikhc@upnjatim.ac.id*

Manuscript received: 31-10-2023. Accepted: 20-12-2023

ABSTRACT

Gas rumah kaca (GRK) merupakan salah satu gas berbahaya yang mengakibatkan pemanasan global. Adapun gas rumah kaca diantaranya yaitu gas metana dan karbon dioksida. Dalam jumlah yang banyak, gas tersebut dapat mengakibatkan kerusakan atmosfer. Emisi gas rumah kaca didominasi oleh kegiatan pengelolaan sampah di TPA. TPA Benowo merupakan salah satu TPA yang mengelola sampah penduduk Kota Surabaya. Semakin banyak sampah yang ditumpuk di TPA, maka semakin banyak pula gas yang timbul. Sehingga perlu dilakukan estimasi terkait timbulnya gas metana dan gas karbon dioksida di TPA. LandGem yaitu salah satu model yang mampu mengestimasi gas rumah kaca yang akan muncul di TPA. Pada penelitian ini dilakukan estimasi gas rumah kaca di TPA Benowo menggunakan 3 skenario. Skenario ini diterapkan untuk mengetahui pengaruh cuaca (nilai k) di TPA. Didapatkan hasil bahwa skenario 3 yang menggunakan nilai k sebesar 0,7 (wet area) memiliki estimasi gas metana dan karbon dioksida tertinggi dibanding skenario yang lain yakni sebesar $6,801 \times 10^7$ m³/tahun. Hal tersebut terjadi karena nilai k bermakna bahwa area TPA memiliki curah hujan yang tinggi dan terdapat bioreaktor atau sistem sirkulasi lindi. Nilai tersebut dianggap sebagai nilai yang baik bagi pertumbuhan bakteri di TPA.

Kata kunci: Gas Rumah Kaca; Karbon Dioksida; LandGem; Metana; TPA

ABSTRAK

Greenhouse gases (GHG) are one of the dangerous gases that cause global warming. Greenhouse gases include methane gas and carbon dioxide. In large quantities, this gas can cause damage to the atmosphere. Greenhouse gas emissions are dominated by waste management activities at landfills. Benowo Landfill is one of the Landfills that manages the waste of the residents of Surabaya City. The more waste that is piled up in the landfill, the more gas is produced. So it is necessary to estimate the occurrence of methane gas and carbon dioxide gas in landfills. LandGem is a model that is able to estimate greenhouse gases that will appear in landfills. In this research, greenhouse gas estimates were carried out at the Benowo landfill using 3 scenarios. This scenario is applied to determine the influence of weather (k value) on the landfill. The results showed that scenario 3 which uses a k value of 0.7 (wet

area) has the highest estimate of methane and carbon dioxide compared to the other scenarios, namely 6.801×10^7 m³/year. This happens because the *k* value means that the landfill area has high rainfall and there is a bioreactor or leachate circulation system. This value is considered a good value for bacterial growth in landfills.

Key words: Greenhouse Gases; Carbon Dioxide; LandGem; Methane; Landfill

PENDAHULUAN

Meningkatnya gas rumah kaca (GRK) menjadi salah satu faktor penyebab suhu bumi meningkat dan kemudian menyebabkan pemanasan global. Salah satu sumber produksi gas rumah kaca adalah pengelolaan limbah yang menyumbang sebesar 4% terhadap emisi gas rumah kaca di bumi (Vergara & Tchobanoglous, 2012; Aswad & Cahyonugroho, 2018). Sumber emisi gas rumah kaca terbesar dari kegiatan pengelolaan sampah timbul dari pengangkutan sampah dari sumber ke TPA dan penimbunan sampah di TPA (Masrifatus, et al., 2021). Gas TPA biasanya mengandung metana sebesar 45% hingga 60% dan karbon dioksida sebesar 40% hingga 60% (IPCC, 2006).

TPA Benowo Kota Surabaya merupakan TPA yang akan diteliti pada penelitian ini. Jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo adalah 1500 – 1600 ton/hari (Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya, 2023). Komponen sampah terbesar yang dikirim ke TPA Benowo adalah sampah kertas sebesar 28%, sampah plastik sebesar 23,3%, dan sampah organik sebesar 10,3% (Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya, 2019). TPA Benowo menggunakan sistem *controlled landfill*, yaitu sampah ditutup dengan *geomembrane* setelah tumpukannya penuh. Jumlah gas metana yang dikeluarkan di TPA Benowo pada tahun 2017 adalah sebesar 8.421 Gigagram (Jaisyullah, 2017). Sedangkan emisi karbon dioksida pada tahun 2013 sebesar 191 Gigagram (Auvaria, 2013). Meskipun berbagai upaya pengelolaan sampah di TPA Benowo telah dilakukan, namun jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan masih cukup tinggi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis dan evaluasi emisi gas rumah kaca dari TPA di Benowo.

Model pemantauan udara yang bisa digunakan untuk memprediksi emisi gas rumah kaca yang timbul akibat penumpukan sampah di TPA adalah Model LandGem versi 3.02. LandGem adalah aplikasi perangkat lunak berbasis *Microsoft Excel* yang dikembangkan oleh EPA yang menggunakan persamaan laju peluruhan orde pertama untuk menghitung perkiraan pembentukan metana. Diasumsikan bahwa pembentukan metana mencapai puncaknya segera setelah penempatan limbah awal dan laju pembentukan metana kemudian menurun karena bahan organik dikonsumsi oleh bakteri (Kumar & Samadder, 2017). LandGem atau biasa disebut dengan *Landfill Gas Emission* digunakan untuk memperkirakan tingkat emisi total gas di TPA, metana, karbon dioksida, senyawa organik non metana, dan polutan udara lain dari TPA (Alexander, et al., 2005). Apabila dibandingkan dengan model lain yang sejenis, model LandGem memiliki tingkat akurasi paling tinggi, yakni sebesar 0,92 (Sil, et al., 2014). Dengan menggunakan metode ini, diharapkan dapat memberikan hasil yang akurat dan dapat dijadikan dasar dalam mengurangi emisi gas rumah kaca di TPA Benowo.

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam memahami potensi emisi gas rumah kaca di TPA Benowo dan memberikan strategi pengelolaan sampah yang lebih efektif dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Penelitian ini juga dapat memberikan informasi dan masukan yang berguna bagi pemerintah dan lembaga untuk mengembangkan kebijakan dan

program yang lebih baik dalam pengelolaan sampah di TPA Benowo dan tempat-tempat pembuangan sampah lainnya di Indonesia.

BAHAN DAN METODE

Gambaran Umum Lokasi Penelitian

TPA Benowo terletak di Kecamatan Pakal Kota Surabaya dengan luas lahan sekitar 374.600 m² (Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya, 2017). Pengolahan sampah di TPA Benowo dikelola oleh PT Sumber Organik sejak bulan Oktober tahun 2012. Sampah yang masuk setiap harinya di TPA Benowo harus melalui jembatan timbang. Hingga sekarang, TPA Benowo dapat menampung sampah sekitar 1600 ton/hari (Syukri, 2021). Terdapat banyak terminal titik pembuangan sampah. Rata-rata ketinggian tumpukan sampah dimasing-masing terminal yakni setinggi 8 hingga 12 meter.

Analisis Timbulan dan Komposisi Sampah di TPA Benowo

Data timbulan sampah di TPA didapatkan dengan menggunakan metode *Weight Volume Analysis* karena pada TPA Benowo terdapat jembatan timbang. Sehingga data bersih sampah yang diangkut oleh truk akan langsung didapat pada data jembatan timbang. Pengambilan data timbulan sampah di TPA Benowo didapatkan melalui metode wawancara. Data timbulan sampah yang dibutuhkan untuk *running* model LandGem adalah dari tahun 2020 hingga tahun 2032. Data dari tahun tersebut akan digunakan sebagai data dasar dalam perhitungan estimasi GRK yang akan ditimbul.

Komposisi sampah di TPA didapatkan dengan cara melakukan pengukuran komposisi sampah sesuai dengan metode SNI 19-3964-1994. Metode tersebut dijelaskan bahwa pengambilan sampel komposisi sampah dilakukan selama 8 hari. Pada penelitian ini, pengambilan data komposisi sampah dilakukan di 4 hari minggu pertama dan 4 hari minggu kedua. Pengambilan data dilakukan pada hari senin, Selasa, Rabu dan Kamis. Hal tersebut bertujuan sebagai data pembandingan pada minggu pertama dan minggu kedua.

Sampling dilakukan pada zona unloading di TPA Benowo. Sampah yang diambil adalah sampah yang baru datang dan diunloading oleh truk sampah. Sampah diambil sebanyak 100 kg/hari dari zona tersebut kemudian dipisah menjadi 9 jenis bagian untuk mengetahui komposisinya. Sembilan jenis tersebut yakni sisa makanan dan daun, kayu, kertas, plastik, logam, kain tekstil, karet kulit, kaca, dan lainnya (Badan Standardisasi Nasional, 1994).

Analisis Proyeksi Penduduk Kota Surabaya

Perhitungan proyeksi penduduk dihitung mulai tahun 2020 hingga tahun 2032. Tahun 2020 dipilih sebagai tahun awal karena untuk mempermudah proses perhitungan proyeksi. Sedangkan tahun 2032 dipilih sebagai tahun akhir karena diperkirakan sistem pengolahan di TPA Benowo akan mengalami perubahan setiap 10 tahun sekali. Perhitungan proyeksi penduduk dilakukan menggunakan tiga metode, yakni metode aritmatika, geometri dan least square. Berdasarkan ketiga metode tersebut, akan dipilih satu metode yang menghasilkan nilai koefisien relasi (r) yang mendekati atau sama dengan angka 1. Hal tersebut menandakan bahwa hasil perhitungan metode tersebut memiliki korelasi yang kuat. Metode ini juga akan

diterapkan pada perhitungan proyeksi timbunan sampah di TPA. Sehingga nantinya akan didapatkan data proyeksi timbunan sampah dari tahun 2020 hingga tahun 2032.

Analisis Proyeksi Timbunan Sampah di TPA Benowo

Perhitungan proyeksi timbunan sampah juga dihitung dari tahun 2020 hingga tahun 2032. Tahun 2020 dipilih sebagai tahun awal dan tahun 2032 sebagai tahun akhir. Perhitungan ini mengacu pada hasil proyeksi penduduk dan standarisasi besaran timbunan sampah berdasarkan klasifikasi kota. Merujuk pada SNI 19-3983-1995, Kota Surabaya termasuk Kota Sedang yang memiliki besaran timbunan sampah sebesar 2,75 – 3,25 L/orang/hari. Pada penelitian ini dipilih satuan 3 L/orang/hari, sehingga perhitungan proyeksi timbunan sampah di Kota Surabaya untuk 10 (sepuluh) tahun ke depan yakni sebagai berikut (Sulastri dkk, 2016):

1. Proyeksi jumlah penduduk selama 10 tahun ke depan.
2. Timbunan sampah per hari di Kota Surabaya (3 L/orang/hari) dan untuk setahun dikali dengan 365 hari.
3. Berdasarkan hasil perhitungan proyeksi penduduk apabila Kota Surabaya masih berada dalam kategori klasifikasi kota sedang (dengan jumlah penduduk antara 100.000 hingga 500.000 jiwa), maka besaran timbunan sampah per kapita/hari diasumsikan tetap, yaitu 3 L/kapita/hari.

Perhitungan Estimasi GRK Menggunakan Model LandGem

Proses *running* Model LandGem telah tertera pada buku panduan Model LandGem EPA versi 3.02 tahun 2005 yang bisa diakses pada web EPA. Setelah proses *running* telah dijalankan maka akan keluar hasil estimasi GRK berupa tabel data dan grafik. Adapun data yang dibutuhkan untuk menjalankan Model LandGem yakni sebagai berikut (Alexander et al., 2005):

1. Tahun buka dan tahun tutup TPA. Pada penelitian ini tahun buka diisi tahun 2020, sedangkan tahun tutup diisi tahun 2033
2. Timbunan sampah dari tahun buka hingga tahun tutup
3. Parameter model yang akan digunakan. Hal ini disesuaikan dengan variabel yang telah direncanakan

Data sampah masuk yang digunakan yakni sampah masuk dari tahun 2020 hingga tahun 2032. Sampah masuk di TPA tahun 2020 hingga tahun 2032 didapatkan dengan cara mengalikan proyeksi penduduk Kota Surabaya dengan jumlah timbunan per orang per hari menurut SNI 19-3983-1995. Kota Surabaya termasuk kota sedang, sehingga data proyeksi penduduk akan dikalikan dengan satuan 0,7 kg/orang/hari. Selanjutnya data tersebut akan disesuaikan hingga satuannya menjadi ton/tahun.

Estimasi emisi gas rumah kaca berupa gas metana dan gas karbon dioksida ini dilakukan dengan 3 skenario. Detail skenario yang digunakan pada penelitian ini tertera pada Tabel 1 berikut. Penerapan skenario ini digunakan untuk mengetahui pengaruh cuaca atau nilai k dalam proses pembentukan gas di TPA. Skenario pertama digunakan nilai k sebesar 0,02. Nilai tersebut digunakan untuk TPA yang berada di area gersang, curah hujan yang rendah yakni kurang dari 25 inci per tahun. Skenario kedua digunakan nilai k sebesar 0,04. Nilai tersebut digunakan untuk TPA yang berada di area konvensional, curah hujan normal yakni sekitar 25

inci per tahun. Skenario ketiga digunakan nilai k sebesar 0,7. Nilai tersebut digunakan untuk TPA yang berada di area basah, curah hujan yang sangat tinggi (lebih dari 25 inci per tahun) dan terdapat bioreaktor atau sistem sirkulasi lindi (Alexander et al., 2005).

Tabel 1. Variasi Skenario Penelitian

Skenario	Konsentrasi metana (%)	Cuaca (nilai k)
1	50%	0,02
2	50%	0,04
3	50%	0,7

Sumber: LandGem EPA, 2005

HASIL DAN PEMBAHASAN

Timbulan dan Komposisi Sampah di TPA Benowo

Data timbulan sampah di TPA Benowo yang diperoleh yakni data berat sampah yang masuk di TPA Benowo dari tahun 2020 hingga tahun 2022. Berat sampah yang dimaksud adalah berat sampah bersih yang diangkut masing-masing truk saat melewati jembatan timbang. Data berat bersih sampah yang masuk tersebut disajikan pada Tabel 2 berikut. Terlihat dari Tabel 2 bahwa data berat bersih sampah yang masuk ke TPA Benowo mengalami peningkatan dari tahun 2020 hingga tahun 2022. Hal tersebut selaras dengan peningkatan pada data penduduk yang tertera BPS Kota Surabaya.

Tabel 2. Data Berat Bersih Sampah

Tahun	Berat Bersih Sampah (ton/tahun)
2020	734.387
2021	735.913
2022	737.685

Sumber: TPA Benowo, 2023



Gambar 1. Tumpukan sampah di TPA Benowo Tahun 2023

Sumber: Peneliti, 2023

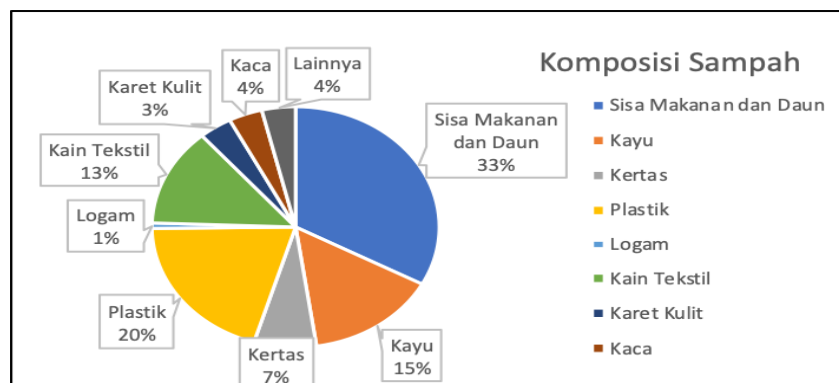
Data komposisi sampah TPA Benowo yang didapatkan sebanyak 9 jenis sampah, antara lain yakni sisa makanan dan daun, kayu, kertas, plastik, logam, kain tekstil, karet kulit, kaca, dan lainnya. Data tersebut disajikan pada Tabel 3 berikut. Terlihat pada Tabel 3 bahwa selama 8 hari, sampah sisa makanan dan daun menjadi sampah yang terbanyak dibandingkan dengan sampah jenis lain. Sampah sisa makanan dan daun memiliki bobot terbanyak selama 7 hari. Hal ini disusul dengan sampah plastik yang memiliki bobot terbanyak kedua yakni selama 5 hari. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis sampah sisa makanan dan daun, dan plastik menjadi penyumbang sampah terbesar di TPA Benowo.

Tabel 3. Data Komposisi Sampah Selama 8 Hari

Jenis Sampah	Minggu ke 1				Minggu ke 2				Rata-rata
	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	
Sisa Makanan dan Daun	14,2	39,4	25,5	34,6	36,6	48,3	37,4	27	32,9
Kayu	19,6	8,2	14,5	6,8	15,6	7,5	28,6	17,6	14,8
Kertas	7,5	7,6	6,6	7,2	7,6	8,2	5	6,4	7,0
Plastik	28,6	21,4	26,2	17,4	20,6	12	6,8	28	20,1
Logam	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,8	1,6	0,7
Kain Tekstil	19,6	8,7	12,4	18,8	7,8	18,4	9,6	10	13,2
Karet Kulit	6,2	4,3	3,6	6	4,6	1,6	2,4	1	3,7
Kaca	1,4	4,2	6,3	4	3,2	1,4	5	4,8	3,8
Lainnya	2,4	5,6	4,2	4,7	3,4	2	4,4	3,6	3,8
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Sumber: Hasil Analisis, 2023

Rata-rata komposisi sampah selama 8 hari di TPA Benowo telah disajikan berupa diagram gambar seperti pada Gambar 2 berikut. Terlihat dari Gambar 2 bahwa sampah di TPA Benowo didominasi oleh sampah sisa makanan dan daun yakni sebanyak 32,9%, kemudian disusul oleh sampah plastik sebanyak 20,1%, sampah kayu sebanyak 14,8% dan sampah kain tekstil sebanyak 13,2%. Banyaknya sampah sisa makanan disebabkan oleh berbagai faktor yakni tingkat perekonomian dan pendapatan penduduk kota. Masyarakat dengan tingkat ekonomi menengah akan lebih banyak menghasilkan sampah sisa makanan (77%) dibandingkan dengan masyarakat ekonomi atas (64.07%) dan masyarakat ekonomi bawah (64.38%) (KLHK, 2012).



Gambar 2. Grafik Komposisi Sampah TPA Benowo
 Sumber: Hasil Analisis, 2023

Analisis Proyeksi Penduduk Kota Surabaya

Proyeksi penduduk yang dibutuhkan untuk penelitian ini yakni proyeksi penduduk untuk 10 tahun kedepan. Hal itu direncanakan karena dianggap TPA Benowo mengalami perubahan sistem pengolahan sampah setiap 10 tahun sekali. Tahun 2020 dianggap sebagai tahun awal dalam perhitungan proyeksi penduduk ini, sesuai data BPS Kota Surabaya. Perhitungan proyeksi ini dilakukan dengan 3 metode, yakni metode aritmatika, geometri dan *least square*. Setelah dilakukan perhitungan, maka didapatkan nilai koefisien relasi (r) dari masing-masing metode. Nilai tersebut ditampilkan pada Tabel 4 berikut. Terlihat pada Tabel 4 bahwa nilai koefisien relasi (r) dari metode geometri mendapatkan nilai yang mendekati 1. Sehingga metode geometri dipilih sebagai metode perhitungan proyeksi penduduk pada penelitian ini.

Tabel 4. Perbandingan Nilai Koefisien Relasi (r)

Metode	r
Aritmatika	0.92326
Geometri	0.99909
<i>Least Square</i>	0.99906

Sumber: Hasil Analisis, 2023

Data perhitungan proyeksi penduduk Kota Surabaya menggunakan metode geometri tertera pada Tabel 5 berikut. Terlihat pada Tabel 5 bahwa perhitungan proyeksi penduduk Kota Surabaya mengalami peningkatan disetiap tahunnya. Laju pertumbuhan penduduk Kota Surabaya berdasarkan perhitungan yakni sebesar 0,21%. Hal tersebut akan selalu meningkat seiring berjalannya waktu, terkecuali adanya wabah penyakit seperti pada tahun 2019 lalu.

Tabel 5. Proyeksi Penduduk Kota Surabaya

Tahun	Penduduk (jiwa)
2020	2.874.314
2021	2.880.284
2022	2.887.223
2023	2.893.685
2024	2.900.161
2025	2.906.651
2026	2.913.157
2027	2.919.676
2028	2.926.211
2029	2.932.760
2030	2.939.323
2031	2.945.902
2032	2.952.495

Sumber: Hasil Analisis, 2023

Analisis Proyeksi Timbulan Sampah di TPA Benowo

Perhitungan proyeksi timbulan sampah pada penelitian ini juga dimulai tahun 2020 hingga tahun 2033. Perhitungan ini mengacu pada hasil perhitungan proyeksi penduduk dan standarisasi besaran timbulan sampah berdasarkan klasifikasi kota yang merujuk pada SNI 19-3983-1995. Berdasarkan SNI tersebut, Kota Surabaya termasuk dalam Kota Sedang yang memiliki timbulan sampah sebesar 3 L/orang/hari. Tabel 6 berikut merupakan hasil

perhitungan proyeksi timbunan sampah di TPA Benowo pada tahun 2020 hingga tahun 2032. Terlihat pada Tabel 6 bahwa setiap tahunnya timbunan sampah yang dihasilkan akan selalu meningkat. Hal tersebut terjadi seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk. Terbukti dengan timbunan sampah pada tahun 2020 sebanyak 3.147.374 m³/tahun, sedangkan tahun 2032 meningkat pesat sebanyak 3.232.982 m³/tahun.

Tabel 6. Proyeksi Timbunan Sampah TPA Benowo

Tahun	Proyeksi Penduduk (Jiwa)	Proyeksi Timbunan Sampah (L/hari)	Proyeksi Timbunan Sampah (m ³ /hari)	Proyeksi Timbunan Sampah (m ³ /tahun)
2020	2.874.314	8.622.942	8.622,94	3.147.374
2021	2.880.284	8.640.852	8.640,85	3.153.911
2022	2.887.223	8.661.669	8.661,67	3.161.509
2023	2.893.685	8.681.055	8.681,06	3.168.585
2024	2.900.161	8.700.483	8.700,48	3.175.676
2025	2.906.651	8.719.953	8.719,95	3.182.783
2026	2.913.157	8.739.471	8.739,47	3.189.907
2027	2.919.676	8.759.028	8.759,03	3.197.045
2028	2.926.211	8.778.633	8.778,63	3.204.201
2029	2.932.760	8.798.280	8.798,28	3.211.372
2030	2.939.323	8.817.969	8.817,97	3.218.559
2031	2.945.902	8.837.706	8.837,71	3.225.763
2032	2.952.495	8.857.485	8.857,49	3.232.982

Sumber: Hasil Analisis, 2023

Analisis Estimasi GRK Menggunakan Model LandGem

Menjalankan Model LandGem diperlukan data sampah yang masuk disetiap tahunnya. Data sampah yang diperlukan yakni mulai tahun 2020 hingga tahun 2032. Data sampah tahun 2020 hingga tahun 2032 didapatkan dengan perhitungan. Perhitungan sampah masuk ini dilakukan dengan cara mengkalikan jumlah penduduk ditiap tahun dengan berat sampah yang dihasilkan tiap orang per hari sesuai SNI 19-3983-1995. Kota Surabaya termasuk kota sedang sehingga data proyeksi penduduk akan dikalikan dengan 0,7 kg/orang/hari. Tabel 7 berikut merupakan data sampah yang akan dimasukkan pada Model LandGem setelah dilakukan perhitungan diatas.

Tabel 7. Data Sampah Input LandGem

Tahun	Sampah Masuk (ton/tahun)
2020	734.387
2021	735.913
2022	737.685
2023	739.337
2024	740.991
2025	742.649
2026	744.312
2027	745.977
2028	747.647
2029	749.320
2030	750.997
2031	752.678
2032	754.362

Sumber: Hasil Analisis, 2023

Setelah semua data yang dibutuhkan telah terpenuhi. Selanjutnya memasukkan setiap data pada Model LandGem sesuai dengan Gambar 3 berikut. Kolom dua yang berisi *Determine Model Parameters* yakni keadaan TPA sesuai dengan variasi skenario yang telah direncanakan. Parameter yang digunakan yakni *inventory* karena sampah yang masuk di TPA Benowo kurang dari 2 juta ton/tahun. Konsentrasi metana dimasukkan 50% karena pada Model LandGem diasumsikan gas di TPA terdiri dari 50% gas metana dan 50% gas karbon dioksida. Penggunaan konsentrasi metana diluar kisaran 40 hingga 60% tidak disarankan pada model ini (Alexander et al., 2005).

USER INPUTS Landfill Name or Identifier: TPA Benowo

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year: 2020
 Landfill Closure Year: 2032
 Have Model Calculate Closure Year? Yes No
 Waste Design Capacity: megarams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k (year⁻¹): Inventory And Area - 0.02
 Potential Methane Generation Capacity, L₀ (m³/Mg): Inventory And Area - 100
 NMOC Concentration (ppmv as hexane): Inventory No or Unknown Co-disposal - 600
 Methane Content (% by volume): User-specified value: 50

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1: Methane
 Gas / Pollutant #2: Carbon dioxide

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	Input Units (short tons/year)	Calculated Units (Mg/year)
2020	734.387	667.625
2021	735.913	669.011
2022	737.685	670.623
2023	739.337	672.124
2024	740.991	673.628
2025	742.649	675.136
2026	744.312	676.647
2027	745.977	678.161
2028	747.647	679.679
2029	749.320	681.200
2030	750.997	682.725
2031	752.678	684.253
2032	754.362	685.784
2033		
2034		
2035		
2036		
2037		
2038		

USER INPUTS Landfill Name or Identifier: TPA Benowo

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year: 2020
 Landfill Closure Year: 2032
 Have Model Calculate Closure Year? Yes No
 Waste Design Capacity: megarams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k (year⁻¹): Inventory Conventional - 0.04
 Potential Methane Generation Capacity, L₀ (m³/Mg): Inventory Conventional - 100
 NMOC Concentration (ppmv as hexane): Inventory No or Unknown Co-disposal - 600
 Methane Content (% by volume): User-specified value: 50

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1: Methane
 Gas / Pollutant #2: Carbon dioxide

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	Input Units (short tons/year)	Calculated Units (Mg/year)
2020	734.387	667.625
2021	735.913	669.011
2022	737.685	670.623
2023	739.337	672.124
2024	740.991	673.628
2025	742.649	675.136
2026	744.312	676.647
2027	745.977	678.161
2028	747.647	679.679
2029	749.320	681.200
2030	750.997	682.725
2031	752.678	684.253
2032	754.362	685.784
2033		
2034		
2035		
2036		
2037		
2038		

USER INPUTS Landfill Name or Identifier: TPA Benowo

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year: 2020
 Landfill Closure Year: 2032
 Have Model Calculate Closure Year? Yes No
 Waste Design Capacity: megarams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k (year⁻¹): Inventory Wet - 0.7
 Potential Methane Generation Capacity, L₀ (m³/Mg): Inventory Wet - 96
 NMOC Concentration (ppmv as hexane): Inventory No or Unknown Co-disposal - 600
 Methane Content (% by volume): User-specified value: 50

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

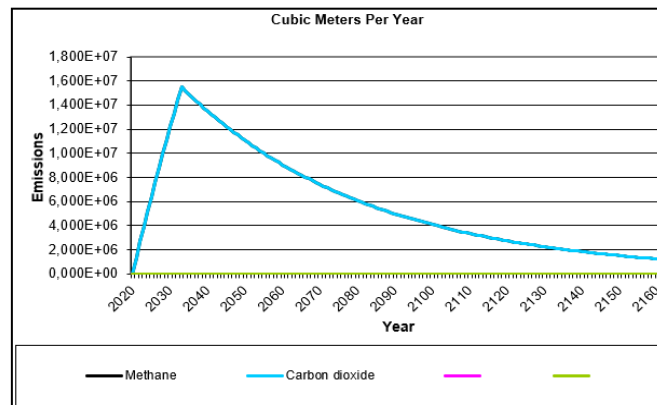
Gas / Pollutant #1: Methane
 Gas / Pollutant #2: Carbon dioxide

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	Input Units (short tons/year)	Calculated Units (Mg/year)
2020	734.387	667.625
2021	735.913	669.011
2022	737.685	670.623
2023	739.337	672.124
2024	740.991	673.628
2025	742.649	675.136
2026	744.312	676.647
2027	745.977	678.161
2028	747.647	679.679
2029	749.320	681.200
2030	750.997	682.725
2031	752.678	684.253
2032	754.362	685.784
2033		
2034		
2035		
2036		
2037		
2038		

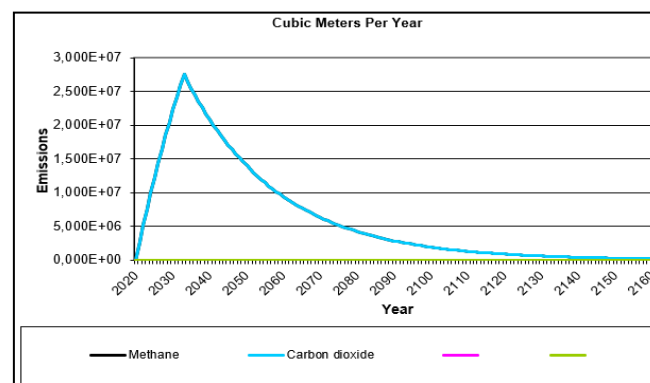
Gambar 3. Input Data LandGem Masing-Masing Skenario
 Sumber: Hasil Analisis, 2023

Berdasarkan hasil running Model LandGem didapatkan hasil estimasi gas metana dan karbon dioksida berupa grafik. Gambar 4 berikut yakni hasil running Model LandGem pada skenario pertama dengan nilai k sebesar 0,02 (*arid area*). Terlihat bahwa gas metana dan karbon dioksida mengalami titik puncak tertinggi pada tahun 2033 dan mengalami penurunan hingga tahun 2160. Peningkatan jumlah gas metana dan karbon dioksida ini akan terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah sampah. Hal tersebut terjadi karena tahun 2032 dianggap sebagai tahun akhir TPA beroperasi, sehingga pada tahun 2033 TPA tidak lagi menerima sampah. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa titik puncak gas metana dan gas karbon dioksida di TPA Benowo yakni sebesar $1,552 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{tahun}$.



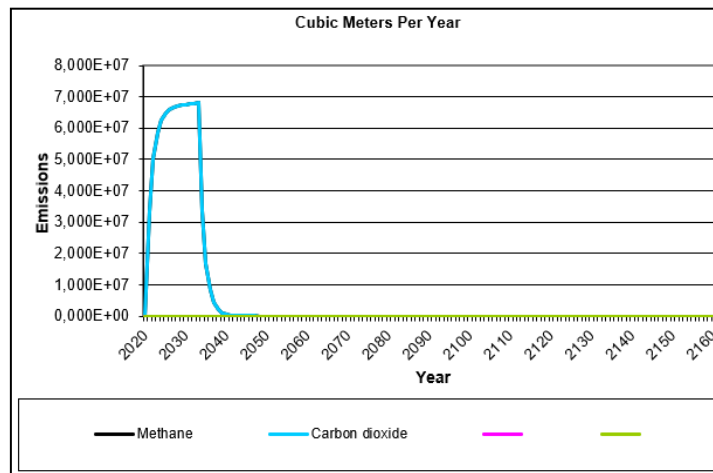
Gambar 4. Grafik Estimasi Gas Skenario 1
 Sumber: Hasil Analisis, 2023

Gambar 5 berikut yakni hasil running Model LandGem pada skenario kedua dengan nilai k sebesar 0,04 (*conventional*). Terlihat bahwa gas metana dan karbon dioksida mengalami titik puncak tertinggi pada tahun 2033 dan mengalami penurunan hingga tahun 2160. Peningkatan jumlah gas metana dan karbon dioksida ini akan terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah sampah. Hal tersebut terjadi karena tahun 2032 dianggap sebagai tahun akhir TPA beroperasi, sehingga pada tahun 2033 TPA tidak lagi menerima sampah. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa titik puncak gas metana dan gas karbon dioksida di TPA Benowo yakni sebesar $2,753 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{tahun}$.



Gambar 5. Grafik Estimasi Gas Skenario 2
 Sumber: Hasil Analisis, 2023

Gambar 6 berikut yakni hasil running Model LandGem pada skenario ketiga dengan nilai k sebesar 0,7 (*wet area*). Terlihat bahwa gas metana dan karbon dioksida mengalami titik puncak tertinggi pada tahun 2033. Peningkatan jumlah gas metana dan karbon dioksida ini akan terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah sampah. Hal tersebut terjadi karena tahun 2032 dianggap sebagai tahun akhir TPA beroperasi, sehingga pada tahun 2033 TPA tidak lagi menerima sampah. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa titik puncak gas metana dan gas karbon dioksida di TPA Benowo yakni sebesar $6,801 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{tahun}$. Estimasi gas metana dan gas karbon dioksida terendah yakni pada tahun 2058 sebesar $1,708 \text{ m}^3/\text{tahun}$ dan kemudian gas tersebut diperkirakan habis pada tahun 2059.



Gambar 6. Grafik Estimasi Gas Skenario 3
 Sumber: Hasil Analisis, 2023

Perbedaan nilai estimasi antara gas metana dan karbon dioksida dipengaruhi oleh data pada tabel *Determine Model Parameters*. Data yang dimasukkan ditujukan untuk membandingkan perbedaan hasil estimasi gas metana dan gas karbon dioksida pada berbagai macam cuaca atau kondisi. Berdasarkan hasil pada model LandGem dapat disimpulkan bahwa skenario 3 yang memasukkan nilai k sebesar 0,7 (*wet area*) memiliki estimasi gas tertinggi dibanding skenario yang lain. Hal tersebut terjadi karena nilai k tersebut bermakna bahwa suatu area TPA memiliki curah hujan yang tinggi dan terdapat bioreaktor atau sistem sirkulasi lindi. Nilai tersebut dianggap sebagai nilai yang baik bagi pertumbuhan bakteri di TPA.

Keberadaan gas metana dan gas karbon dioksida di TPA diakibatkan karena adanya bakteri pengurai sampah yang dapat mendekomposisi senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Curah hujan yang sangat tinggi mengakibatkan kondisi tumpukan sampah dalam kondisi aerobik (sedikit atau tidak ada oksigen) sehingga pertumbuhan mikroorganisme atau bakteri meningkat. Gas di TPA yang timbul juga dipengaruhi oleh jenis sampah yang ada. Apabila mayoritas jenis sampah di TPA yaitu sampah organik, maka gas yang dihasilkan akan semakin banyak.

Jumlah kandungan gas metana dan karbon dioksida yang tinggi ini perlu perhatian khusus. Mengingat apabila gas ini terkumpul dalam kandungan yang tinggi akan berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan sekitar. Oleh karena itu perlunya pengolahan atau pemanfaatan gas berbahaya ini. Sebagian TPA di Indonesia telah memanfaatkan gas-gas

berbahaya tersebut dengan mengubahnya menjadi energi listrik, atau biasa disebut dengan PLTSA (Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Akhir). Menurut berita Suara Surabaya tahun 2023, diketahui bahwa PLTSA di TPA Benowo telah menghasilkan listrik sejumlah 122,04 GWh sejak beroperasi. Listrik yang dihasilkan dari PLTSA digunakan kembali untuk kegiatan operasional dan sebagian dijual kepada PLN.

KESIMPULAN

Jumlah sampah yang masuk TPA dipengaruhi oleh jumlah penduduk di kota tersebut. Semakin banyak jumlah penduduk maka semakin banyak pula sampah yang masuk di TPA. Hingga tahun 2022 lalu, TPA Benowo telah menerima sampah sebanyak 584.211 ton/tahun. Jumlah tersebut akan terus bertambah seiring dengan pertambahan jumlah penduduk Kota Surabaya. Komposisi sampah di TPA Benowo didominasi oleh jenis sampah sisa makanan dan daun sebanyak 32,9%, kemudian disusul oleh sampah plastik sebanyak 20,1% dan sampah kayu sebanyak 14,8%. Hal ini terjadi karena mayoritas penduduk Kota Surabaya tingkat ekonomi menengah sehingga menghasilkan sampah makanan lebih banyak. Estimasi gas metana dan gas karbon dioksida menggunakan Model LandGem dipengaruhi oleh banyak hal, salah satunya yakni cuaca. Hasil estimasi gas metana dan gas karbon dioksida tertinggi yakni pada skenario 3 yang menggunakan nilai k sebesar 0,7 (*wet area*) yakni sebesar $6,801 \times 10^7$ m³/tahun. Hal ini terjadi karena keadaan sampah di TPA dalam kondisi aerobik sehingga bakteri pengurai lebih banyak menghasilkan gas.

Ucapan Terimakasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian ini yakni Pak Okik, Pak Ali, Pak Usup, Pak Rohman serta para pegawai TPA Benowo sehingga penelitian dapat berjalan dengan lancar. Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada *reviewers* JSTL sehingga artikel lebih sempurna dan dapat diterbitkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, A., Burklin, C., & Singleton, A. (2005). Landfill gas emissions model. United States Environmental Protection Agency, Version 3.02 user's guide. *U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development*, (May), 48. Retrieved from <http://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>
- Aswad, G., & Cahyonugroho, O.H. (2018). Potensi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Aktivitas Angkutan Umum di Terminal Tamanan Kota Kediri. *J. Envirotek*, 10(1), 46-52.
- Auvaria, S. (2013). Life Cycle Assessment (LCA) pada Pengelolaan Sampah di TPA Benowo Kota Surabaya.
- Badan Standardisasi Nasional. (1994). SNI 19-3964-1994: Metode pengambilan dan pengukuran contoh timbulan dan komposisi sampah perkotaan. In *Badan Standardisasi Nasional*. Indoensia.
- Badan Standardisasi Nasional. SNI 19-3983-1995: Spesifikasi timbulan sampah untuk kota kecil dan kota sedang di Indonesia. , Standar Nasional Indonesia (1995). Indonesia.
- Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya. (2017). Laporan Kajian Daya Dukung Lingkungan Hidup Taman Kota di Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya. (2019). Kajian Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kota Surabaya Tahun 2019. *Dinas Lingkungan Hidup Pemerintah Kota Surabaya*, 1–64.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol 5 Chapter 3 Solid Waste Disposal. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 4, 6.1-6.49. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20604432>
- Jaisyullah, U. A. (2017). *Program Pengelolaan Emisi Gas Rumah Kaca di TPA Benowo*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Masrifatus, E., Dwi, I., Setyo, W., Hidayat, R., & Ridho, M. (2021). Estimasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kegiatan Pengelolaan Sampah di Kelurahan Karang Joang, Balikpapan. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 13(1), 17–33.
- Sil, A., Kumar, S. and Kumar, R. (2014). Formulating LandGem model for estimation of landfill gas under Indian scenario. *Int. J. Environmental Technology and Management*, 17(2/3/4), 293–299.
- Sulastris Tampuyak, C. A. dan M. N. S. (2016). Analisis Proyeksi Pertumbuhan Penduduk dan Kebutuhan Fasilitas Persampahan di Kota Palu 2015-2025. *Jurnal Katalogis*, 4(4), 94–104.
- Syukri, A. M. (2021). Collaborative Governance Dalam Pengelolaan Sampah Pada Super Depo Suterejo Kota Surabaya.
- Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). Municipal solid waste and the environment: A global perspective. In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 37). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050511-122532>.