

Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca di TPA Benowo Menggunakan Metode IPCC

Muhammad Ilham Muzakki*, Raden Kokoh Haryo Putro

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, UPN “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 20034010075@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 7 Oktober 2024

Disetujui: 21 Oktober 2024

Abstract

In 2010, Indonesia ranked fourth in terms of waste generation. As a result, the waste sector is estimated to potentially contribute 296 Mt CO₂ eq (10.32%) of total greenhouse gas (GHG) emissions by 2030, with a projected annual growth rate of 6.3% using the business-as-usual (BAU) projection from 2010 to 2030. Around seventy per cent of all waste is organic, making household waste one of the main sources of urban waste. This study was conducted at the Benowo Landfill in the city of Surabaya. The SNI 19-3964-1994 method was used to sample the composition and generation of waste at the landfill. Waste generation projections were made up to 2030, taking into account population growth. This study compares methane gas emissions from three scenarios: Scenario 1, direct landfilling of waste; Scenario 2, waste reduction through composting and 3R processing; and Scenario 3, waste processing at the landfill through gasification. Based on inventory calculations using the 2006 IPCC guidelines, the landfill scenario produces the highest greenhouse gas emissions (CO₂ and CH₄), with the highest CH₄ emissions and the lowest CO₂ emissions. The gasification scenario has the highest CO₂ emissions and the lowest CH₄ emissions due to the use of aerobic systems and combustion.

Keywords: carbon dioxide; greenhouse gases; ipcc guidelines 2006; inventory; methane

Abstrak

Tahun 2010, Indonesia penghasil sampah yang berada di ranking keempat. Sehingga, pada sektor sampah diperkirakan berpotensi menyumbang emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 296 MTon CO₂ eq (10,32%) dari total emisi (GRK) pada dekade 2030 dengan proyeksi pertumbuhan tahunan sebesar 6,3% menggunakan proyeksi Business As Usual (BAU) dari tahun 2010 hingga 2030. Sekitar tujuh puluh persen dari semua sampah adalah organik, menjadikan sampah rumah tangga sebagai salah satu sumber utama sampah perkotaan. Penelitian ini dilaksanakan berada pada lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo Kota Surabaya. Metode SNI 19-3964-1994 digunakan untuk proses sampling komposisi dan timbulan sampah di TPA. Proyeksi produksi sampah dengan pertimbangan pertumbuhan penduduk dilakukan sampai 2030 ke depan. Penelitian ini membandingkan emisi gas metana dari tiga skenario: skenario 1, sampah langsung ditimbun di TPA skenario 2, sampah direduksi melalui komposting dan pengolahan 3R dan skenario 3, sampah diolah di TPA melalui gasifikasi. Melalui perhitungan inventarisasi dengan pedoman IPCC 2006, emisi (GRK) CO₂ dan CH₄ tertinggi berasal dari skenario landfilling, dengan emisi CH₄ terbesar dan CO₂ terkecil. Skenario gasifikasi menghasilkan emisi CO₂ terbesar dan CH₄ terkecil, karena menggunakan sistem aerobik dan pembakaran.

Kata Kunci: gas rumah kaca; ipcc guidelines 2006; inventarisasi; karbon dioksida; metana

1. Pendahuluan

Menurut Perpres No. 98 Tahun 2021, emisi (GRK) merupakan gas yang terdapat di atmosfer, baik yang bersumber dari proses alami maupun hasil kegiatan antropogenik berperan dalam memancarkan dan menyerap cahaya inframerah [10]. Secara alamiah, timbulan gas rumah kaca terbentuk dari beberapa fenomena alam yang terjadi seperti gunung meletus, proses dekomposisi oleh mikroorganisme serta penguapan air laut oleh panas matahari. Namun produksi gas rumah kaca juga mengalami peningkatan yang drastis disebabkan oleh kegiatan manusia. Peningkatan produksi (GRK) berakibat pada perubahan komposisi atmosfer sehingga menyebabkan terjadinya pemanasan global. Gas rumah kaca yang mempunyai konsentrasi paling besar di atmosfer adalah karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan nitrogen (N₂O) [14].

Berdasarkan dokumen *Nationally Determined Contribution* (NDC), Indonesia tahun 2010 penghasil emisi gas rumah kaca Indonesia mencapai 1.334 MTon CO₂eq. Pada tahun 2010, operasi konversi lahan dan kebakaran hutan dan lahan menyumbang 48,5% dari total emisi GRK (gas rumah kaca) Indonesia,

menjadikannya sumber utama emisi dengan 88 MTON CO₂eq (6,59%) dari total emisi (GRK) di Indonesia pada tahun 2010, produksi sampah berada di peringkat keempat [1]. Meskipun tingkat emisi (GRK) dari sektor limbah tidak sebesar sektor-sektor lain, seperti kebakaran hutan (48,50%) dan energi (33,97%), sektor limbah memiliki potensi besar untuk terus menghasilkan emisi (GRK) di kemudian hari. Industri limbah berpotensi menyumbang emisi (GRK) sebesar 296 MTON CO₂eq (10,32%) dari total emisi (GRK) pada dekade 2030 dengan proyeksi pertumbuhan tahunan sebesar 6,3% menggunakan proyeksi Business As Usual (BAU) dari tahun 2010 hingga 2030.

Ada hubungan linier antara potensi emisi (GRK) dengan peningkatan produksi sampah. Sekitar tujuh puluh persen dari semua sampah adalah organik, menjadikan sampah rumah tangga sebagai salah satu sumber utama sampah perkotaan [9]. Hanya 60%-70% dari total sampah perkotaan Indonesia yang diperkirakan dilayani oleh perusahaan pengelola sampah yang dimungkinkan oleh pemerintah untuk diangkut ke tempat pembuangan sampah.

2. Metode Penelitian

Gambaran Umum Wilayah Studi

Penelitian ini dilaksanakan berada pada lokasi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Benowo Kelurahan Sumber Rejo, Kecamatan Pakal, Kota Surabaya. Status terkini TPA Benowo saat ini berada di bawah naungan Pemerintah Kota dan dikelola oleh PT. Sumber Organik. Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau Pemerintah Kota menyatakan bahwa produksi sampah di Kota Surabaya mengalami peningkatan mencapai sekitar 9896,78 m³/hari, dengan TPA Benowo mengolah rata-rata 1628 ton/hari sampah [13].

Kajian Produksi dan Komposisi Sampah di TPA Benowo

Data timbulan sampah di TPA Benowo yang diperoleh yakni data berat sampah yang masuk di TPA Benowo. Massa total limbah bersih setiap truk saat melewati alat penimbangan adalah berat limbah (*Weight Volume Analysis*). Pengambilan data timbulan sampah dilakukan selama 8 hari. Hal tersebut sesuai dengan jadwal pengambilan data komposisi sampah.

Komposisi sampah didapatkan dengan sampel langsung dengan teknik SNI 19-3964-1994 selama delapan hari di TPA Benowo. Sampah yang diambil adalah sampah yang baru tiba dan dibongkar oleh truk sampah [2]. Sebanyak 100 kg sampah diambil dan dimasukkan ke dalam *density box* berukuran 0,5 m x 0,5 m x 1 m kemudian dihitung untuk mendapatkan data densitas dari sampah tersebut [11]. Sampah di dapatkan menggunakan anjuran metode analisis *load-count* dan *mass-volume* yang dimodifikasi agar dapat diterapkan sesuai dengan kondisi di lapangan. Adapun prosedur sampling komposisi yang diterapkan adalah sebagai berikut ini.

1. Ditentukan area unloading muatan truk sampah
2. Penentuan muatan di perkirakan 10% dari sampah yang sudah di kumpulkan dalam area unloading muatan truk sampah. Sampah di ambil 100 kg pada bagian yang tercampur sebelumnya
3. Pisahkan semua komposisi dari sampah yang tercampur berdasarkan komposisi yang sudah ditentukan ke dalam komposisi yang telah dipilih
4. Hitung berat masing-masing komposisi sampah dan catat

Proyeksi Penduduk Kota Surabaya

Penelitian ini memperkirakan jumlah penduduk di Kota Surabaya sampai tahun 2030. Proyeksi 2030 ini, dihitung dengan mempertimbangkan proyeksi penduduk Kota Surabaya sebagai data pendukung. Dengan menggunakan metodologi kuadrat terkecil, aritmatika, dan geometri, proyeksi penduduk Kota Surabaya dipilih sebagai pendekatan terbaik berdasarkan *correlation factor* (r) dan *standard deviation value* (s) [5].

1. Metode Aritmatika

Proyeksi penduduk dengan metode aritmatika mengandaikan jika pertumbuhan penduduk tetap bertambah dengan laju yang tetap pada tahun berikutnya. Namun, untuk proyeksi jangka panjang, hasilnya mungkin kurang akurat jika ada perubahan signifikan dalam faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan penduduk. Sehingga didapatkan rumus sebagai berikut:

$$P_n = P_0 + K_a (T_n - T_0)$$

dengan, $K_a = \frac{T_2 - T_1}{P_0 - P_1}$

Keterangan:

- P_n : Perkiraan total penduduk pada tahun ke- n
- P_0 : Total penduduk pada tahun dasar
- P_1 : Jumlah penduduk pada tahun ke-1
- P_2 : Total penduduk pada tahun terakhir
- Ka : Laju perubahan jumlah penduduk per tahun
- T_n : Tahun yang diinginkan untuk proyeksi penduduk
- T_0 : Tahun dasar untuk perhitungan proyeksi

2. Metode Geometri

Metode Geometri ini didasarkan pada konsep bahwa pertumbuhan total penduduk akan meningkat secara konsisten dan berkesinambungan tanpa memperhitungkan kemungkinan penurunan atau fluktuasi dalam jumlah penduduk.

$$P_n = P_0 (1 + r)^n$$

Keterangan:

- P_n : Perkiraan total penduduk pada tahun ke-n
- P_0 : Total penduduk pada tahun dasar
- r : Laju pertumbuhan penduduk per tahun
- n : Total interval tahun

3. Metode *Least Square*

Metode *least square* digunakan untuk menentukan kesamaan antara jumlah penduduk (Y) dan tahun (X) didapat dari garis lurus dan *trendline* data yang ada. Berikut ini rumus perhitungan metode Least Square:

$$Y = a + bx$$

$$\text{dengan, } a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

Keterangan:

- Y : Nilai variable garis regresi
- X : Variabel *independent* (bebas)
- a : Konstanta
- n : Jumlah data

Proyeksi Timbulan Sampah Kota Surabaya

Setelah perkiraan populasi Kota Surabaya pada tahun 2030 tersedia, rata-rata pembangkitan sampah (Kg/orang/hari) dapat digunakan untuk memproyeksikan pembangkitan sampah TPA di TPA Benowo, sesuai SNI 19-2454-2002. Rumus perhitungan proyeksi timbulan sampah TPA Benowo tahun 2030 sebagai berikut ini [9].

$$M_t = F_p \times T \times P_t \times 365$$

Keterangan:

- M_t : Jumlah timbulan sampah tahun t (kg)
- F_p : Faktor pelayanan (%)
- T : Produksi sampah rata-rata (kg/orang.hari) atau (m³/orang.hari)
- P_t : Proyeksi total penduduk tahun t

Pemilihan Skenario Timbulan Emisi Gas CO₂ dan CH₄

Adapun dasar pemilihan skenario untuk pengelolaan sampah di Kota Surabaya adalah sebagai berikut.

1. Skenario 1 berarti sejak sampah masuk ke tempat pembuangan sampah, sampah itu menumpuk. Pada skenario ini, perhitungan emisi gas metana dilakukan dengan mengasumsikan bahwa sampah diangkut dari sumber kemudian masuk ke TPA Benowo 100% langsung ditimbun tanpa melalui proses komposting atau daur ulang di sumbernya.
2. Skenario 2 berarti sampah yang telah dikurangi dengan menggunakan metode pengomposan di sumbernya. Proses ini membantu mengurangi jumlah sampah yang diproduksi dan dibuang di tempat pembuangan sampah. Skenario 2 pada perhitungan ini dilihat dari adanya proses reduksi

menggunakan metode komposting dan 3R berisi sampah makanan, kebun dan kertas sebelum melalui proses pengangkutan ke TPA Benowo. Jumlah reduksi sampah yang dibawa ke TPA Benowo diasumsi besarnya reduksi komposting 34,34 % dan 3R 13,59 % yang ada di TPS3R Kota Surabaya.

3. Skenario 3 berarti sampah yang masuk kedalam TPA dimanfaatkan sebagai penghasil listrik dengan teknologi pengolahan gasifikasi diperkirakan bahwa dengan menggunakan teknologi gasifikasi, emisi dari proses konversi limbah menjadi energi dapat sangat diturunkan, mengurangi pengaruh buruk terhadap lingkungan yang. Dalam skenario ini, jumlah sampah yang akan di gasifikasi adalah 56% dari total timbulan sampah yang masuk ke dalam TPA dan sisa yang akan di timbun atau di Landfill adalah 44%.

Rumus Perhitungan Emisi Gas Rumah

Teknik yang dipilih pada studi ini menggunakan Pedoman IPCC 2006 untuk Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional (Tier II) [6].

1. Emisi CH₄ pada proses *Landfilling*

$$DDOC_m \text{ terdeposit} = MSW \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (1)$$

$$L_0 = DDOC_m \text{ terdeposit} \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

$$\text{Emisi Gas CH}_4 \text{ pada tahun } t = (\text{CH}_4 \text{ generated} - R_t) \times (1 - OX) \quad (3)$$

Keterangan:

DDOC _m	: Jumlah massa yang dapat terurai (ton atau Gg)
MSW	: Jumlah timbulan sampah berdasarkan komposisi (ton)
DOC	: Karbon organik yang dapat terurai (Default 15%)
DOC _f	: Fraksi DOC terurai (Default 0,5)
MCF	: Faktor koreksi CH ₄ terdekompos aerobik (Default 0,5)
Σ CH ₄ generated	: Contoh tertentu dari kerusakan organik yang tersimpan dalam limbah dapat menghasilkan CH ₄ dalam waktu kurang dari setahun (DDOC).
L ₀	: Gas CH ₄ yang terbentuk
F	: Fraksi dari CH ₄ di TPA (Default 0,5)
R _t	: Recovery CH ₄ di TPA
OX	: Faktor oksidasi (Default 0,1)

2. Emisi CH₄ pada proses *Composting*

$$\text{Emisi CH}_4 = \Sigma (M_i \times E_{fi}) \times 10^{-3} - R$$

Keterangan:

M _i	: Massa total sampah yang dikomposkan (Gg/tahun)
E _{fi}	: Faktor emisi pada proses pengomposan (g.CH ₄ /Kg)
R	: Total <i>recovery</i> emisi CH ₄ (Gg.CH ₄) (Default 0)

3. Emisi CO₂ pada proses gasifikasi

Emisi CH₄ umumnya dianggap tidak signifikan karena kondisi pembakaran di gasifikasi, seperti suhu tinggi dan waktu tinggal yang lama, yang memastikan pembakaran sempurna. Sebagai hasilnya, emisi utama dari pembakaran sampah adalah CO₂. Adapun rumus perhitungan gasifikasi adalah sebagai berikut:

$$\text{Emisi CO}_2 \text{ pada tahun } t = IW_t \times CCW \times FCF \times EF \times \frac{44}{12}$$

Keterangan:

IW _t	: Jumlah sampah yang dibakar
CCW	: Fraksi kandungan karbon dalam sampah (Default 40%)
FCF	: Fraksi karbon fosil dalam sampah (Default 40%)
EF	: Efisiensi pembakaran
44/12	: Konversi C kedalam CO ₂

3. Hasil dan Pembahasan

Komposisi Sampah dan Timbulan

Berat sampah masuk ke TPA Benowo digunakan untuk mendapatkan jumlah produksi sampah di TPA. Pengambilan data produksi sampah dilakukan selama 8 hari. Adapun berat sampah pada timbangan truk sampah dan komposisi adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Persentase Komposisi Sampah

Komposisi Sampah	Hari ke (Kg)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Food Waste	6,25	22,85	14,08	21,80	21,20	22,22	21,69	15,66
Garden	7,95	16,55	11,42	12,80	23,90	26,08	15,71	11,34
Wood and Straw	19,60	8,20	14,50	14,50	7,50	7,50	17,60	10,25
Paper	7,50	7,60	6,60	6,60	8,20	8,20	5,00	6,40
Textile	7,25	3,31	4,34	3,35	7,18	11,96	2,95	2,80
Disposal Napies	12,35	5,39	8,06	9,05	11,22	6,44	6,65	11,53
Rubber and Leather	6,20	4,30	3,60	6,00	1,60	1,60	2,40	1,00
Plastic	28,60	21,40	26,20	17,40	12,00	12,00	17,80	32,33
Metal	0,50	0,60	0,70	0,50	0,60	0,60	0,80	1,60
Glass	1,40	4,20	6,30	4,00	3,20	1,40	5,00	4,80
Residue	2,40	5,60	4,20	4,00	3,40	2,00	4,40	2,29
Total	100	100	100	100	100	100	100	100
Persentase Total	18%	16%	12%	7%	5%	9%	3%	21%

Sumber: Analisis Penulis (2024)

Timbulan sampah dapat ditentukan pertimbangan dari pertumbuhan penduduk juga. Ini menginisialkan pada perhitungan proyeksi penduduk yang menghasilkan rata-rata *standard deviation value* dan *correlation factor*. Sehingga dari perhitungan 3 metode proyeksi penduduk menghasilkan faktor korelasi yang mendekati nilai 1 adalah metode *Least Square*

Tabel 2. Uji Kesesuaian

Perbandingan Korelasi (r)	
Aritmatika	0,4139
Geometri	0,2620
Least Square	0,4139

Sumber: Analisis Penulis (2024)

Untuk memperkirakan timbulan sampah berdasarkan populasi, dikumpulkan informasi tentang sampah yang telah melewati TPA Benowo selama lima tahun terakhir dan proyeksi sampai tahun 2030. Adapun hasil dari proyeksi jumlah timbulan sampah masuk ke TPA Benowo sebagai berikut cara menerapkan metode kuadrat terkecil.

Tabel 3. Proyeksi Timbulan Sampah dan Jumlah Penduduk

Tahun	Penduduk (jiwa)	Timbulan (ton/tahun)	Timbulan (kg/tahun)
2020	2874314	577414	577414370
2021	2880284	578958	578958210
2022	2987263	580502	580502050
2023	3009286	582046	582045890
2024	3028545	597863	597863057
2025	3043841	600883	600882621
2026	3059137	603902	603902184
2027	3074433	606922	606921747
2028	3089729	609941	609941311
2029	3105025	612961	612960874
2030	3120321	615980	615980438

Sumber: Data Konsolidasi Bersih Kota Surabaya (2023) dan Analisis Penulis (2024)

Berdasarkan hasil perhitungan proyeksi timbulan sampah berdasarkan jumlah penduduk menunjukkan bahwa timbulan rata-rata untuk penduduk Kota Surabaya sebesar 0,57 Kg/Orang/hari. Hal ini sesuai dengan ketentuan dari SNI 19-2454-2002 timbulan sampah berdasarkan besar atau kecilnya sebuah kota adalah 0,4 – 0,5 Kg/Orang/hari [2].

Perhitungan Emisi Skenario 1

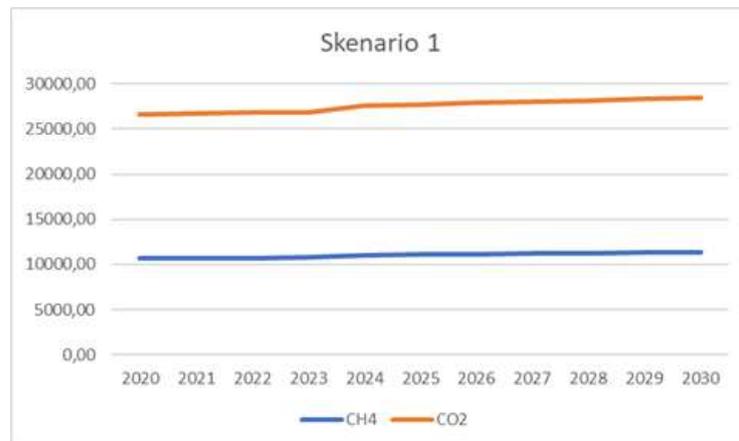
Dengan menggunakan skenario 1, produksi gas metana dihitung dengan asumsi bahwa limbah mencapai TPA Benowo dan kemudian ditumpuk tanpa pertimbangan pengolahan lanjutan. Berikut ini adalah contoh bagaimana perhitungan pelepasan metana untuk limbah organik (*food waste*) di tahun 2020.

$$\begin{aligned} \text{DDOC}_m \text{ terdeposit (food waste)} &= \text{MSW} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times \text{MCF} \\ &= 108919,05 \text{ Ton} \times 0,21 \times 0,5 \times 0,5 \\ &= 5522,67 \text{ Ton atau Gigagram} \\ \text{Gas CH}_4 \text{ yang terbentuk (food waste)} &= \text{DDOC}_m \text{ terdeposit} \times F \times 16/12 \\ &= 5522,67 \text{ Ton} \times (0,5) \times 16/12 \\ &= 3672,57 \text{ Ton atau Gigagram} \\ \text{Emisi Gas CH}_4 \text{ pada tahun 2024} &= (\text{CH}_4 \text{ generated} - \text{Rt}) \times (1 - \text{OX}) \\ \text{(Akumulasi semua komposisi)} &= (11853,26 \text{ Ton} - 0) \times (1 - 0,1) \\ &= 10667,93 \text{ Ton atau Gigagram} \end{aligned}$$

Tabel 4. Hasil Perhitungan Emisi CH₄ dan CO₂ Terakumulasi

Tahun	Akumulasi Emisi	
	Metana (CH ₄)	Karbon Dioksida (CO ₂)
2020	10667,93	26669,83
2021	10696,46	26741,14
2022	10724,98	26812,45
2023	10753,50	26883,75
2024	11045,73	27614,32
2025	11101,52	27753,79
2026	11157,30	27893,26
2027	11213,09	28032,73
2028	11268,88	28172,20
2029	11324,67	28311,67
2030	11380,45	28451,14

Sumber: Analisis Penulis (2024)



Gambar 1. Grafik Emisi Gas CH₄ dan CO₂ Skenario 1

Perhitungan Emisi Skenario 2

Skenario 2 mempertimbangkan adanya proses reduksi menggunakan metode komposting dan 3R berisi sampah makanan, kebun dan kertas sebelum melalui proses pengangkutan ke TPA Benowo. Diperkirakan volume sampah yang sampai ke Tempat Pembuangan Benowo dengan penelitian yang menghitung besarnya reduksi komposting 34,34 %, dan 3R 13,59 % yang ada di TPS3R Super Depo Suterejo [8]. Sehingga berat sampah berdasarkan komposisi sampah dan persen reduksi adalah sebagai berikut.

Tabel 5. Proyeksi Sampah Masuk Pada Setiap Proses Skenario 2

Tahun	Proses Pengolahan		
	Komposting (ton)	3R (ton)	Landfill (ton)
2020	198284,09	78470,61	300659,66
2021	198814,25	78680,42	301463,54
2022	199344,40	78890,23	302267,42
2023	199874,56	79100,04	303071,29
2024	205306,17	81249,59	311307,29
2025	206343,09	81659,95	312879,58
2026	207380,01	82070,31	314451,87
2027	208416,93	82480,67	316024,15
2028	209453,85	82891,02	317596,44
2029	210490,76	83301,38	319168,73
2030	211527,68	83711,74	320741,01

Sumber: Analisis Penulis (2024)

Pada proses skenario 2 memiliki potensi signifikan dalam menghasilkan emisi CH₄ dan CO₂ dibandingkan dengan proses reduksi pemilahan 3R. Sehingga perhitungan emisi menggunakan berat sampah pada proses komposting dan di urutkan berdasarkan persen komposisi sampah. Ini adalah ilustrasi bagaimana emisi untuk gas rumah kaca dari produksi kompos di tahun 2024 dihitung per CH₄.

$$\begin{aligned} \text{Emisi CH}_4 &= \sum (M_i \times E_{fi}) \times 10^{-3} - R \\ &= 466355,49 \times 10^{-3} - 0 \\ &= 466,36 \text{ Ton atau Gigagram} \end{aligned}$$

Sementara itu, sisa buangan sampah yang tidak terkelola dan di buang ke *Landfill* dapat dihitung menggunakan rumus *Landfill* adalah sebagai berikut contoh pada komposisi (*food waste*).

$$\begin{aligned} \text{DDOCm terdeposit (food waste)} &= \text{MSW} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times \text{MCF} \\ &= 56714,15 \text{ Ton} \times 0,21 \times 0,5 \times 0,5 \\ &= 2054,04 \text{ Ton atau Gigagram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gas CH}_4 \text{ yang terbentuk} &= \text{DDOCm terdeposit} \times F \times 16/12 \\ &= 5522,67 \text{ Ton} \times (0,5) \times 16/12 \\ &= 1365,94 \text{ Ton atau Gigagram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisi Gas CH}_4 \text{ pada tahun 2024} &= (\text{CH}_4 \text{ generated} - R_t) \times (1 - OX) \\ \text{(Akumulasi semua komposisi)} &= (4408,57 \text{ Ton} - 0) \times (1 - 0,1) \\ &= 3967,71 \text{ Ton atau Gigagram} \end{aligned}$$

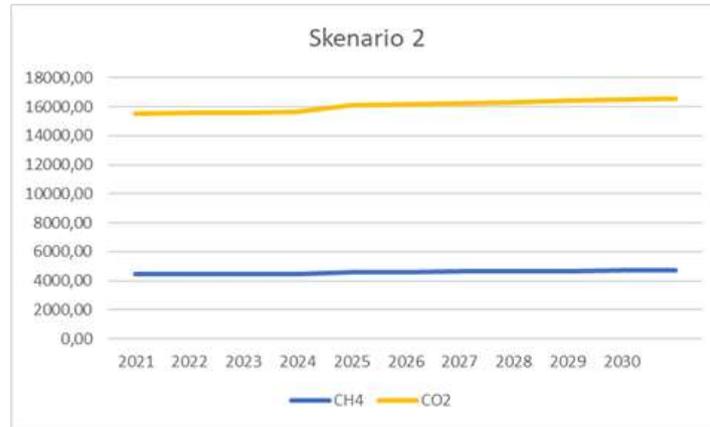
Akumulasi hasil perhitungan emisi CH₄ dan CO₂ diperoleh dari penjumlahan emisi yang dihasilkan dalam proses komposting dan landfill pada Skenario 2. Penggabungan ini, emisi GRK yang dihasilkan untuk kedua proses pengolahan sampah tersebut catat atau diinventarisasikan secara komprehensif ditunjukkan pada **Tabel 6** berikut ini.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Emisi CH₄ dan CO₂ Terakumulasi Skenario 2

Tahun	Akumulasi Emisi			
	Komposting		Landfill	
	Metana (CH ₄)	Karbon Dioksida (CO ₂)	Metana (CH ₄)	Karbon Dioksida (CO ₂)
2020	466,3555	1165,89	3967,71	9919,273
2021	467,6024	1169,01	3978,32	9945,794
2022	468,8493	1172,12	3988,93	9972,315
2023	470,0962	1175,24	3999,53	9998,837
2024	482,8711	1207,18	4108,22	10270,56
2025	485,3099	1213,27	4128,97	10322,43
2026	487,7487	1219,37	4149,72	10374,3
2027	490,1875	1225,47	4170,47	10426,17

Tahun	Akumulasi Emisi			
	Komposting		Landfill	
	Metana (CH ₄)	Karbon Dioksida (CO ₂)	Metana (CH ₄)	Karbon Dioksida (CO ₂)
2028	492,6263	1231,57	4191,22	10478,05
2029	495,0651	1237,66	4211,97	10529,92
2030	497,5038	1243,76	4232,72	10581,79

Sumber: Analisis Penulis (2024)



Gambar 2. Grafik Emisi Gas CH₄ dan CO₂ Total Skenario 2

Perhitungan Emisi Skenario 3

Pada Skenario 3, perhitungan emisi gas metana dilakukan dengan asumsi bahwa sampah diangkut langsung dari sumbernya ke TPA Benowo. Di TPA ini, sampah akan diolah menggunakan teknologi gasifikasi. Melalui penerapan teknologi gasifikasi, emisi yang dihasilkan ketika sampah berubah ke energi dapat ditekan secara signifikan, mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan. Dalam skenario ini, sampah yang akan di gasifikasi adalah 56 % dari sebanyak 44% dari sampah yang dibuang di tempat pembuangan sampah, sisa sampah ditimbun di sana atau di tempat lain [13]. Sehingga perbandingan jumlah timbulan sampah ditunjukkan **Tabel 7**.

Tabel 7. Proyeksi Sampah Masuk Pada Setiap Proses Skenario 3

Tahun	Proses Pengolahan	
	Gasifikasi (ton)	Landfill (ton)
2020	323352,05	254062,32
2021	324216,60	254741,61
2022	325081,15	255420,90
2023	325945,70	256100,19
2024	334803,31	263059,75
2025	336494,27	264388,35
2026	338185,22	265716,96
2027	339876,18	267045,57
2028	341567,13	268374,18
2029	343258,09	269702,78
2030	344949,05	271031,39

Sumber: Analisis Penulis (2024)

Pada Skenario 3, proses gasifikasi dan landfill sebagai fokus utama dalam perhitungan karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄). Buangan emisi CO₂ terjadi di proses gasifikasi dengan tidak memperhitungkan pengolahan emisi CO₂ pada proses gasifikasi tersebut. Sejalan dengan pedoman IPCC, proses gasifikasi tidak menghasilkan emisi gas CH₄ yang signifikan. Pendekatan ini didasarkan pada fakta bahwa gasifikasi sebagai teknologi konversi termal. Berikut contoh perhitungan emisi gas CO₂ pada tahun 2024 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Emisi CO}_2 \text{ pada tahun 2024} &= \text{IWt} \times \text{CCW} \times \text{FCF} \times \text{EF} \times 44/12 \\
 &= 19012,75 \times 0,4 \times 0,4 \times 95\% \times 44/12 \\
 &= 10596,44 \text{ Ton CO}_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Konversi Emisi CH}_4 \text{ setara CH}_4 &= \text{Emsi CO}_2 / \text{GWP CO}_2 \\ &= 10596,44 / 28 \\ &= 378,44 \text{ Ton atau Gigagram} \end{aligned}$$

Total emisi gas rumah kaca dari dua metode pembuangan sampah ditunjukkan secara rinci dengan menggabungkan emisi metan dan karbon dioksida, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 8** berikut.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Emisi CH₄ dan CO₂ Terakumulasi Skenario 3

Tahun	Akumulasi Emisi			
	Gasifikasi		Landfill	
	Metana (CH ₄)	Karbon Dioksida (CO ₂)	Metana (CH ₄)	Karbon Dioksida (CO ₂)
2020	3027,55	105964,37	3352,78	8381,95
2021	3035,65	106247,69	3361,74	8404,36
2022	3043,74	106531,01	3370,71	8426,77
2023	3051,84	106814,33	3379,67	8449,18
2024	3134,77	109717,02	3471,52	8678,79
2025	3150,60	110271,15	3489,05	8722,62
2026	3166,44	110825,29	3506,58	8766,45
2027	3182,27	111379,43	3524,11	8810,29
2028	3198,10	111933,56	3541,65	8854,12
2029	3213,93	112487,70	3559,18	8897,95
2030	3229,77	113041,83	3576,71	8941,79

Sumber: Analisis Penulis (2024)



Gambar 3. Grafik Emisi Gas CH₄ dan CO₂ Total Skenario 3

Perbandingan Skenario Emisi Gas Rumah Kaca

Tiga skenario diwakili oleh pelepasan gas metana yang telah diperkirakan dan dibandingkan satu sama lain.

Tabel 9. Akumulasi Perbandingan Emisi Pada Setiap Skenario

Emisi	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
CH ₄	121334,5	50432,0	38133,7
CO ₂	303336,3	126080,0	433515,9

Sumber: Analisis Penulis (2024)

4. Kesimpulan

Hasil inventarisasi dan proyeksi gas metan dan gas karbon dioksida periode 2020 – 2030 melalui perhitungan IPCC tier II dari Pedoman IPCC 2006, yang menghasilkan total kondisi sampah TPA Benowo yang identik dengan skenario. Pada skenario landfilling sebesar 121335 gigagram CH₄ memiliki nilai CH₄ yang paling tinggi dan Skenario gasifikasi memiliki tingkat CH₄ paling rendah yaitu sebesar 38133 gigagram CH₄. Sedangkan skenario gasifikasi memiliki tingkat emisi CO₂ paling tinggi yaitu sebesar 433515 gigagram CO₂ dan skenario komposting memiliki tingkat CO₂ terendah yaitu sebesar 126080 gigagram CO₂. Sedangkan emisi GRK (CH₄ dan CO₂) tertinggi berasal dari skenario landfilling dengan emisi CH₄ terbesar dan CO₂ terkecil. Skenario gasifikasi menghasilkan emisi CO₂ terbesar dan CH₄ terkecil, karena menggunakan sistem aerobik dan pembakaran.

5. Referensi

- [1] Awalludin, A., & Wiryono. (2019). *A study of mitigation and adaptation to climate change by using nuclear energy in Indonesia*. Prosiding Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir. Pontianak, 10 Oktober 2019.
- [2] Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Teknik Operasional Sampah Perkotaan SNI 19-2454-2002*. Jakarta.
- [3] Damanhuri, E., & Padmi, T. (2013). Municipal Solid Waste Management in Indonesia. *Municipal Solid Waste Management in Asia and the Pacific Islands*, 139.
- [4] Data Konsolidasi Bersih. (2023). *Jumlah Penduduk Kota Surabaya*. Data Konsolidasi Bersih.
- [5] Hendri, A., & Indriani, W. (2022). *Analisis Sistem Jaringan Pipa Distribusi SPAM di Kecamatan Inuman Kabupaten Kuantan Singingi*. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sipil*, 1(1), 10-17.
- [6] IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA(pp), 1585.
- [7] Kiswadayani, A. V., Susanawati, L. D., & Wirosedarmo, R. (2016). *Komposisi sampah dan potensi emisi gas rumah kaca pada pengelolaan sampah domestik: Studi Kasus TPA Winongo Kota Madiun*. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 2(3), 9-17.
- [8] Kusuma, D. S., & Wibawani, S. (2024). *Strategi Pengelolaan Sampah di Super Depo Sutorejo Kota Surabaya*. *NeoRespublica: Jurnal Ilmu Pemerintahan*, 5(2), 929-941.
- [9] Nudin, I. (2013). Kebijakan pemerintah kabupaten Tangerang tentang pengelolaan sampah di TPA Jatiwaringin Tangerang.
- [10] Peraturan Presiden. (2021). Peraturan Presiden No. 98 tahun 2021 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca. Jakarta.
- [11] Prilindatami, R., & Cahyonugroho, O. H. (2023). *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*. *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 9(4), 710-722.
- [12] Purwaningrum, P. (2016). *Upaya mengurangi timbulan sampah plastik di lingkungan*. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 141-147.
- [13] Sucahyo, F. M., & Fanida, E. H. (2021). *Inovasi Pengelolaan Sampah Menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Oleh Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau (DKRTH) Surabaya (Studi Kasus di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo Surabaya)*. *Publika*, 39-52.
- [14] Tosiani, A. (2015). *Buku kegiatan serapan dan emisi karbon. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan dan Tata Lingkungan, Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumberdaya Hutan*.
- [15] Wardhani, M. K., & Harto, A. D. (2018). *Studi komparasi pengurangan timbulan sampah berbasis masyarakat menggunakan prinsip bank sampah di Surabaya, Gresik dan Sidoarjo*. *Jurnal Pamator: Jurnal Ilmiah Universitas Trunojoyo*, 11(1), 52-63.