

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Sampah

Berdasarkan Undang-undang No. 18 Tahun 2008 mengenai Pengelolaan Sampah, yang dimaksud dengan sampah adalah sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat. Sampah terbagi menjadi 3 jenis yaitu:

1. Sampah rumah tangga, sampah yang berasal dari kegiatan sehari-hari dalam rumah tangga, tidak termasuk tinja dan sampah spesifik.
2. Sampah sejenis rumah tangga, sampah yang berasal dari kawasan komersial, kawasan industri, kawasan khusus, fasilitas sosial, fasilitas umum, dan fasilitas lainnya.
3. Sampah spesifik, yaitu sampah yang mengandung bahan berbahaya beracun, sampah yang mengandung limbah bahan berbahaya dan beracun, sampah yang timbul akibat bencana, puing bongkaran bangunan, sampah yang secara teknologi belum dapat diolah dan sampah yang timbul secara tidak periodik.

2.1.1 Sumber dan Timbulan Sampah

Sumber sampah terbagi menjadi dua kelompok yaitu, sampah dari permukiman atau sampah rumah tangga dan sampah dari non-permukiman sejenis sampah rumah tangga, seperti dari pasar atau daerah komersial. Sumber sampah pada pengelolaan sampah kota di Indonesia dibagi berdasarkan, permukiman atau rumah tangga dan sejenisnya, pasar, kegiatan komersial seperti pertokoan, kegiatan perkantoran, hotel dan restoran, kegiatan dari institusi seperti industri, rumah sakit, untuk sampah yang sejenis sampah permukiman, penyapuan jalan dan taman-taman (Damanhuri, 2010).

2.1.2 Komposisi Sampah

Komposisi sampah dinyatakan sebagai % berat (berat basah) atau % volume (basah), dapat terdiri dari kertas, kayu, kulit, karet, plastik, logam, kaca, kain,

makanan, dan lain-lain. Sampah basah atau dikenal dengan sampah organik merupakan sampah yang cepat terdegradasi (cepat membusuk). Sampah yang membusuk merupakan sampah yang mudah untuk terdekomposisi karena adanya aktivitas mikroorganisme. Hasil dari pembusukan ini dapat menimbulkan bau yang tidak enak seperti amoniak dan asam-asam volatil lainnya. Selain menghasilkan bau yang tidak enak, hasil dari pembusukan ini dapat menghasilkan gas-gas hasil dekomposisi seperti gas metan (Damanhuri, 2010).

2.1.3 Karakteristik Sampah

Menurut sifatnya karakteristik sampah terbagi menjadi dua, yaitu karakteristik fisika dan karakteristik kimia. Karakteristik fisika seperti densitas, kadar air, kadar volatil, kadar abu dan nilai kalor. Karakteristik kimia menggambarkan susunan kimia sampah yang terdiri dari unsur C, N, O, P, H, S dan sebagainya (Damanhuri, 2010). Karakteristik limbah merupakan faktor yang menentukan tingkat emisi Gas Rumah Kaca. Karakteristik padat mencakup: *degradable organic carbon* (DOC), *fossil carbon*, faktor koreksi penyetaraan (*corresponding*) emisi CH₄ (MCF). Karakteristik limbah yang menentukan besarnya gas CH₄ (DOC) dapat terbentuk selama proses degradasi komponen organik/kerbon yang terdapat pada limbah. Besarnya DOC pada sampah padat kota (MSW) bergantung pada komposisi (%berat) dan *dry matter content* (kandungan berat kering) masing-masing komponen sampah.

2.2 Proyeksi Timbulan Sampah

Perhitungan prediksi jumlah timbulan sampah dapat dilakukan berdasarkan SNI 19-3983-1995 menggunakan data volume sampah klasifikasi kota Liter/orang/hari dan hasil proyeksi penduduk yang dapat dilakukan menggunakan persamaan aritmatik, geometri dan *least square*. Perhitungan proyeksi timbulan sampah berdasarkan SNI 19-3983-1995 dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Sulastri et al., 2016).

$$\text{Timbulan sampah} \times \text{populasi} = \text{volume sampah}$$

Laju pertumbuhan atau peningkatan kota, industri, pertanian, pendapatan dan pertumbuhan penduduk berpengaruh terhadap perubahan timbulan sampah pada tahun berikutnya. Sehingga metode proyeksi timbulan sampah dapat juga dilakukan berdasarkan SNI M 361991-03 dengan persamaan sebagai berikut (Damanhuri, 2010).

$$Q_n = Q_t (1 + C_s)$$

$$C_s = \frac{(1 + (C_i + C_p + C_{qn})/3)}{(1 + p)}$$

Dimana :

Q_n = Timbulan sampah pada n tahun mendatang

Q_t = Timbulan sampah pada tahun awal perhitungan

C_s = Peningkatan/Pertumbuhan Kota

C_i = Laju pertumbuhan sektor industri

C_p = Laju pertumbuhan sektor pertanian

C_{qn} = Laju peningkatan pendapatan per kapita

P = Laju pertumbuhan penduduk

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Susilo (2013), prediksi timbulan sampah dapat dilakukan berdasarkan pertambahan jumlah sampah di tahun sebelumnya. Melalui data *tren* jembatan timbang untuk mengetahui laju kenaikan timbulan sampah (%) di TPA, metode yang digunakan adalah persamaan geometri sebagai berikut.

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

Dimana :

P_n = volume sampah pada tahun n proyeksi

P_o = volume sampah pada tahun awal proyeksi

r = rata-rata laju kenaikan timbulan sampah (%)

n = selang waktu proyeksi (tahun)

2.3 Gas Rumah Kaca (GRK) dan Pemanasan Global

Gas di atmosfer memiliki fungsi untuk menyerap radiasi infra merah dan menentukan suhu di atmosfer. Gas-gas di atmosfer yang bersifat seperti rumah kaca

dikenal dengan istilah “**Gas Rumah Kaca (GRK)**”, dapat diartikan sebagai gas alami maupun dari kegiatan manusia (*antropogenik*) yang terkandung dalam atmosfer yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah. Cahaya matahari yang melewati atmosfer bumi menyebabkan permukaan bumi terasa hangat. Gelombang pendek yang diterima permukaan bumi dari sebagian bentuk radiasi matahari dipancarkan kembali ke atmosfer dalam bentuk radiasi gelombang panjang (radiasi infra merah). Radiasi gelombang panjang yang dipancarkan Gas Rumah Kaca pada lapisan atmosfer yang berada dekat dengan permukaan bumi dapat diserap sehingga menimbulkan efek panas. Peristiwa tersebut dikenal dengan istilah “**Efek Rumah Kaca**” (KLH,2012).

2.4 Gas yang Berperan Dalam Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

Berdasarkan *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), terdapat 6 (enam) jenis gas utama yang digolongkan sebagai GRK yaitu: Karbondioksida (CO_2), Dinitrogen Oksida (N_2O), Metana (CH_4), Sulfurheksaflorida (SF_6), Perflorokarbon (PFCs) dan Hideoflorokarbon (HFCs). Menurut Scoot & Thomas (dalam Achamad, 2011) kontribusi Gas Rumah Kaca dalam pemanasan global dapat dilihat pada **Tabel 2.1** berikut.

Tabel 2.1 Kontribusi Gas Rumah Kaca Terhadap Pemanasan Global

Gas Rumah Kaca	Kontribusi pada pemanasan global	Sumber emisi
CO_2	61%	Pembakaran bahan bakar fosil dan penebangan hutan
CH_4	15%	Aktivitas biologis dan dekomposisi <i>landfills</i>
N_2O	4%	Pupuk, pembakaran bahan bakar fosil
CFC	12%	Aerosol propelan, pendingin dan aktivitas industri
O_3 dan gas-gas lainnya	8%	Reaksi-reaksi kimia dari pembakaran

Sumber : Scoot J. Callan and J. M. Thomas, 2000

Global Warming Potential (GWP) merupakan gas-gas yang memiliki potensi terhadap pemanasan global dan di perhitungkan dalam CO₂ dengan rentang tahun per 100 tahun. Nilai GWP menggambarkan indikasi berapa ton emisi CO₂ yang setara dengan satu ton dari setiap GRK lainnya (Susilawati, 2014). Nilai GWP digunakan dalam mengkonversi data emisi Gas Rumah Kaca non-CO₂ menjadi karbon dioksida ekuivalen (CO_{2-e}). Nilai GWP dapat dilihat pad **Tabel 2.2** berikut.

Tabel 2.2 Nilai GWP yang digunakan pada Perhitungan Inventarisasi GRK

No.	Gas	GWP (CO _{2-e})
1.	CO ₂	1
2.	Methane (CH ₄)	21
3.	Nitrous Oxide (N ₂ O)	310
4.	PFC-14 (CF ₄)	6,500
5.	PFC-116 (C ₂ F ₆)	9,200
6.	Sulfur hexafluoride (SF ₆)	23.900

Sumber: Budiharto et all., 2017

GRK utama yang berperan dalam perubahan iklim Global adalah gas Karbondioksida (CO₂), Metana (CH₄) dan Dinitrogen Oksida (N₂O). Berdasarkan 3 (tiga) jenis GRK utama, masing-masing memiliki waktu tinggal yang berbeda di atmosfer. Waktu tinggal emisi GRK dapat dilihat pada **Tabel 2.3** berikut (Lintangrino, 2016).

Tabel 2.3 Lama Waktu Tinggal GRK

Gas	Waktu Tinggal di Atmosfer (Tahun)	Potensial Pemanasan Global (CO _{2-eq})
Karbon Dioksida (CO ₂)	5-2000	1
Metana (CH ₄)	12	25
Dinitrogen Oksida (N ₂ O)	144	298

Sumber: IPCC 3nd Assesment report , 2007

Berdasarkan **Tabel 2.3** dapat dilihat bahwa gas CO₂ memiliki waktu tinggal lebih lama dibandingkan dengan gas CH₄, namun dikarenakan gas CH₄ memiliki nilai

potensial pemanasan global yang lebih besar dibandingkan gas CO₂ maka efek pemanasan global yang ditimbulkan akan lebih tinggi dibandingkan dengan CO₂.

2.5 Sumber Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

Sumber emisi GRK pada kegiatan pengelolaan sampah, yaitu:

1. Tempat Pembuangan Akhir (TPA) limbah padat.

Pembuangan limbah padat atau *Solid Waste Disposal Site* (SWDS) pada limbah padat domestik dibedakan menjadi:

- a) TPA yang dikelola/*control landfill/sanitary landfill* (*Managed SWDS*)
- b) TPA yang tidak dikelola atau *open dumping* (*Un-managed SWDS*)
- c) TPA yang tidak dapat dikategorikan sebagai *managed* maupun *un-managed SWDS* karena termasuk pada kualifikasi diantara keduanya (*Uncategorized SWDS*)

2. Pengolahan limbah padat secara biologi yang diolah dengan cara pengomposan.
3. Insinerasi limbah padat dan pembakaran terbuka melalui proses insinerasi dan *open burning* (pembakaran terbuka).
4. Pengolahan dan pembuangan limbah cair yang mencakup limbah domestik dan limbah industri.
5. Limbah lainnya (B3 dan limbah rumah sakit).

2.6 Kontribusi Sampah Terhadap Gas Rumah Kaca (GRK)

Sampah memiliki kontribusi terhadap meningkatnya emisi GRK dengan melepaskan gas metana (CH₄). Selain gas CH₄ sampah memiliki kontribusi penyumbang GRK dalam bentuk CO₂ (karbondioksida). Pembentukan emisi GRK dari sampah kota di TPA secara umum dapat menghasilkan gas CH₄ dan CO₂. Proses penguraian anaerobik dari komponen-komponen DOC (*Degradable Organic Carbon Compound*) di dalam sampah dapat menghasilkan gas CH₄. Selain mengemisikan gas CH₄, proses tersebut juga dapat mengemisikan gas CO₂ dan gas-gas lainnya seperti CO, N₂, O₂, H₂ dan H₂O. Gas-gas tersebut pada umumnya disebut dengan *Landfill Gas* (LFG) (KLH, 2012). Emisi GRK yang dihasilkan dari pengelolaan limbah padat memiliki kontribusi yang signifikan terhadap perubahan iklim global. Pengelolaan sampah *open dumping* dan *landfill* merupakan metode

pengelolaan limbah yang umum digunakan dan merupakan sumber emisi metana antropogenik tertinggi ketiga (Nirmala dan Janya, 2013).

Metana merupakan penyumbang GRK yang memiliki efek 20-30 kali lipat dibandingkan gas CO₂ yang terbentuk dari adanya proses dekomposisi anaerob pada sampah organik. Emisi Gas Rumah Kaca yang dihasilkan dari adanya pengelolaan sampah menurut IPCC 2006 dapat dilihat pada **Tabel 2.4** berikut.

Tabel 2.4 Emisi Gas Rumah Kaca Berdasarkan Pengelolaan Sampah

No.	Jenis Kegiatan	Emisi GRK
1.	Pembuangan sampah perkotaan (Tempat Pemrosesan Akhir TPA)	CH ₄
2.	Pengolahan sampah secara biologi	CH ₄ , N ₂ O
3.	Insinerasi dan <i>Open Burning</i> (Pembakaran Terbuka)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

Sumber : IPCC, 2006

2.7 Gas Metana (CH₄)

Gas metana terbentuk dari adanya proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme pada kondisi tanpa udara (anaerob). Jumlah metana dapat meningkat dari adanya proses kegiatan manusia seperti, kegiatan persawahan, perternakan dan pengelolaan sampah di TPA. Metana yang dihasilkan di TPA dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi seperti energi listrik dan bahan bakar ketel uap karena jumlahnya yang cukup banyak (Riza, 2019).

Produksi metana tergantung pada komposisi sampah, dimana setiap kilogram sampah dapat menghasilkan 0,5 m³ CH₄ dan menyumbang pemanasan global sebesar 15%. Gas metan yang terbentuk di TPA bergerak secara datar dan tegak menuju ke atmosfer. Secara global emisi gas CH₄ di TPA pada negara maju adalah sebesar 66%, negara transisi secara ekonomi mengemisikan sebanyak 15% dan 20% yang berasal dari negara berkembang. Lamanya metan berada di atmosfer berada pada jangka waktu 7-10 tahun mengakibatkan peningkatan suhu sekitar 1,3°C (Sudarman, 2010).

2.8 Pembentukan Gas di TPA

Pembentukan gas di TPA terjadi dalam kondisi anaerob (tanpa oksigen). Limbah padat perkotaan (MSW) yang tersimpan pada saat pertama kali *landfill* akan mengalami tahap dekomposisi aerobik. Kurang dari 1 tahun kondisi anaerob mulai terbentuk dan bakteri penghasil metana mulai menguraikan limbah serta menghasilkan metana. Terbentuknya LFG terjadi melalui empat fase, yaitu (EPA, 2017):

1. Fase I.

Fase pertama dekomposisi, bakteri aerobik hidup dengan mengkonsumsi oksigen sehingga terjadi pemecahan rantai molekul panjang dimana karbohidrat, protein, dan lipid terbentuk menjadi limbah organik. Produk yang dihasilkan pada fase ini adalah karbon dioksida. Banyaknya oksigen yang ada dapat mempengaruhi lamanya dekomposisi pada fase 1 dan dapat terjadi dalam hitungan hari atau bulan.

2. Fase II.

Fase II terjadi pada saat kondisi anaerob dimana oksigen di TPA telah terpakai. Bakteri mengubah senyawa yang dibentuk oleh bakteri aerob menjadi asam asetat, laktat, asam format dan alkohol seperti metanol dan etanol. Ketika asam bercampur dengan *mois-ture* yang terdapat di tanah menyebabkan nutrisi menjadi larut dan nitrogen serta fosfor tersedia. Hal tersebut menjadikan bakteri di TPA menjadi beragam jenis. Karbon dioksida dan hidrogen merupakan gas produk sampingan dari fase II ini.

3. Fase III.

Bakteri anaerob mengkonsumsi asam organik yang sebelumnya di produksi pada fase II, kemudian menghasilkan asetat dan asam organik. TPA menjadi lingkungan yang netral dimana bakteri penghasil metana terbentuk dengan mengkonsumsi karbon dioksida dan asetat.

4. Fase IV.

Dekomposisi pada fase IV ini terjadi pada saat komposisi dan tingkat produksi LFG tetap relatif konstan. LFG mengandung sekitar 50% sampai 55% metana dalam satuan volume, 45% sampai 50% karbon dioksida dan 2% sampai 5%

gas lainnya seperti sulfida. LFG biasanya diproduksi selama 20 tahun pada tingkat yang stabil di fase IV. Produksi gas dapat berlangsung lebih lama apabila jumlah organik yang terdapat pada limbah ada dalam jumlah yang besar.

2.8.1 Kondisi yang Mempengaruhi Pembentukan Gas di TPA

Kondisi yang dapat mempengaruhi pembentukan gas di TPA, antara lain:

1. Komposisi limbah. Semakin banyak limbah organik maka semakin besar LFG yang dihasilkan.
2. Usia sampah. Limbah yang ditimbun kurang dari 10 tahun dapat menghasilkan lebih banyak LFG dibandingkan dengan limbah yang terkubur lebih dari 10 tahun. Hal tersebut terjadi dari adanya dekomposisi bakteri, volatilisasi dan reaksi kimia. Puncak produksi gas biasanya terjadi dari 5 hingga 7 tahun setelah limbah ditimbun.
3. Oksigen. Metana dapat diproduksi apabila oksigen tidak tersedia di TPA.
4. Kadar air. Kondisi tidak jenuh menudukung penguraian bakteri terjadi sehingga meningkatkan produksi gas. Kelembaban juga berpengaruh dalam menghasilkan gas.
5. Temperatur. Tingginya suhu mengakibatkan meningkatnya aktivitas bakteri dalam produksi gas. Selain itu naiknya temperatur juga dapat meningkatkan penguapan dan reaksi kimia.

2.8.2 Migrasi Gas Landfill (LFG)

Gas yang telah di produksi pada permukaan *landfill* di TPA pada umumnya bergerak menjauh dari TPA. Gas cenderung untuk bergerak (bermigrasi) untuk memperluas dan mengisi ruang yang tersedia. Bergeraknya gas dapat melalui pori-pori dalam timbunan sampah dan penutup timbunan sampah, seperti penutup tanah. Kecenderungan gas alami *landfill* seperti metan yang lebih ringan dibandingkan udara adalah dengan bergerak ke atas, biasanya dapat melalui permukaan tanah. Pergerakan LFG dapat dihambat dengan menggunakan penutup *landfill* limbah padat seperti tanah dan dilakukan penutupan harian. Pergerakan gas yang terhambat dari adanya penutup menyebabkan gas cenderung untuk bermigrasi

secara horizontal ke area lain, dimana dapat melanjutkan jalur Bergeraknya ke atas. Karbon dioksida merupakan gas yang lebih padat dibandingkan udara, sehingga dapat berkumpul di bawah permukaan. Faktor utama yang dapat mempengaruhi migrasi LFG yaitu:

1. Difusi (Konsentrasi). Menggambarkan kecenderungan alami gas untuk mencapai konsentrasi seragam di suatu ruang tertentu. Gas yang terdapat pada *landfill* bergerak dari area dengan konsentrasi tinggi menuju area dengan konsentrasi gas yang lebih rendah.
2. Tekanan. Gas yang terakumulasi di TPA menciptakan area dengan tekanan yang tinggi yaitu, gerakan gas yang dibatasi oleh sampah yang telah dipadatkan atau dengan penutup tanah dan area gas yang tidak dibatasi sehingga memiliki tekanan yang lebih rendah. Variasi tekanan di TPA menghasilkan gas yang bergerak dari area bertekanan tinggi menuju area bertekanan rendah atau dikenal sebagai konveksi. Tekanan di TPA semakin meningkat diikuti dengan semakin banyaknya gas yang dihasilkan. Hal tersebut menyebabkan tekanan di bawah permukaan TPA menjadi lebih tinggi dibandingkan tekanan atmosfer atau tekanan udara rendah. Apabila tekanan di TPA lebih tinggi yang terjadi adalah gas cenderung bergerak ke udara ambien atau udara dalam ruangan.
3. Permeabilitas. Merupakan ukuran seberapa baik gas dan cairan mengalir melalui ruang atau pori-pori yang terdapat dalam sampah dan tanah. Tanah kering dan berpasir sangat permeabel yaitu banyak ruang pori terhubung, tanah liat lembab cenderung lebih sedikit memiliki ruang pori yang terhubung. Gas lebih cenderung untuk bergerak melalui area yang memiliki permeabilitas tinggi seperti area pasir atau kerikil dibandingkan area yang memiliki permeabilitas rendah seperti *clay* atau lumpur. Gas dalam TPA tertutup cenderung bergerak secara horizontal dibandingkan vertikal apabila menggunakan penutup TPA yang memiliki permeabilitas rendah seperti tanah liat.

2.8.3 Faktor yang Mempengaruhi Pembentukan Gas di TPA

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi pembentukan gas di TPA antara lain (Anonim, 2001):

1. Komposisi sampah. Semakin banyak sampah organik yang di timbun, maka semakin banyak gas yang di hasilkan dari adanya penguraian bakteri. Kandungan nutrisi seperti natrium, kalium, kalsium dan magnesium yang terdapat pada sampah organik dapat membantu bakteri berkembang. Ketika beberapa limbah mengandung senyawa yang membahayakan bakteri, maka lebih sedikit gas yang dihasilkan. Misalnya, ketika limbah memiliki konsentrasi garam yang tinggi maka bakteri penghasil metana dapat dihambat dalam pembentukan gas.
2. Oksigen. Semakin banyak oksigen yang terdapat pada TPA, maka bakteri aerobik yang lebih lama dapat menguraikan limbah yang terjadi pada fase I. Limbah yang ditimbun secara longgar dapat mengakibatkan semakin banyak oksigen tersedia, sehingga bakteri yang bergantung pada oksigen dapat hidup lebih lama dan menghasilkan karbondioksida serta air dalam waktu yang lebih lama. Pembentukan metana akan terjadi lebih awal apabila limbah berada pada kondisi sangat padat. Hal ini karena, bakteri aerob digantikan oleh bakteri anaerob yang memproduksi metana pada fase III. Oksigen yang tersedia di TPA akan memperlambat produksi metana.
3. Kadar air. Tingkat pembentukan gas lebih tinggi apabila curah hujan yang tinggi dan kondisi TPA yang permeabel mencangkup tambahan air ke TPA. Adanya air dalam TPA mengakibatkan meningkatnya pembentukan gas karena adanya pertumbuhan bakteri dan mengangkut nutrisi ke semua area. Alternatif untuk memperlambat produksi gas dapat dilakukan dengan melakukan pemadatan limbah yang dapat mengurangi kadar air yang masuk ke limbah.
4. Suhu. Kondisi suhu yang lebih dingin dapat menghambat aktivitas bakteri. Aktivitas bakteri pada biasanya menyurut di bawah 50 derajat *Fahrenheit* (F). Temperatur yang hangat dapat meningkatkan aktivitas bakteri untuk produksi gas di TPA. Kondisi TPA yang tertutup biasanya dapat mempertahankan suhu stabil untuk memaksimalkan produksi gas.
5. Usia sampah. Limbah baru yang ditimbun dapat menghasilkan lebih banyak gas dibandingkan dengan gas yang telah lama ditimbun. Puncak pembentukan gas biasanya terjadi pada 5 hingga 7 tahun setelah limbah dibuang. Gas diproduksi

dalam waktu 20 tahun setelah limbah dibuang, namun sejumlah kecil gas dapat dipancarkan selama 50 tahun lebih. Limbah yang terdekomposisi lambat dapat menghasilkan metana setelah 5 tahun dan terus mengeluarkan gas metana dalam periode 40 tahun. Banyaknya bahan organik menjadi faktor penting dalam beberapa lamanya pembentukan gas berlangsung.

2.9 Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK)

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.73/MENLHK/SETJEN/KUM.1/12/2007 tentang Pedoman Penyelenggaraan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional, penyelenggaraan inventarisasi Gas Rumah Kaca merupakan suatu proses yang berkesinambungan untuk memperoleh data dan informasi mengenai tingkat, status, dan kecenderungan perubahan emisi Gas Rumah Kaca secara berkala dari berbagai sumber emisi dan penyerapnya. Pelaksanaan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Indonesia mengacu pada pedoman *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines* tahun 2006. Pemilihan metode Inventarisasi GRK berdasarkan tingkat ketelitian (*Tier*) dilihat berdasarkan kedalaman metode yang dipergunakan. Semakin dalam metode yang dipergunakan, maka inventarisasi GRK yang dihasilkan semakin rinci dan akurat. Permasalahan keterbatasan data dan sumberdaya yang tidak memungkinkan untuk mempergunakan *Tier* yang tinggi dapat menggunakan metode *Tier* yang paling rendah. Tingkat ketelitian (*Tier*) dalam inventarisasi GRK terbagi menjadi tiga yaitu (KLH,2012) :

- a) *Tier 1*. Metode perhitungan emisi menggunakan persamaan dasar (*basic equation*) dan faktor emisi *default* atau *IPCC default values* (yaitu faktor emisi yang disediakan dalam *IPCC Guideline*).
- b) *Tier 2*. Perhitungan emisi menggunakan persamaan yang lebih rinci, diperoleh dari hasil pengukuran langsung dan data aktivitas berasal dari sumber data nasional dan/atau daerah.
- c) *Tier 3*. Metode perhitungan emisi menggunakan metode yang paling rinci (dengan pendekatan *modeling* dan *sampling*). Menggunakan pendekatan *modeling* faktor emisi lokal dapat divariasikan sesuai dengan keberagaman

kondisi yang ada sehingga emisi dan serapan akan memiliki tingkat kesalahan lebih rendah.

Estimasi emisi GRK menggunakan parameter *default* IPCC 2006 memiliki perkiraan ketidakpastian yang didasarkan pada penilaian ahli. Rentang ketidakpastian berdasarkan IPCC 2006 dapat dilihat pada **Tabel 2.5** sebagai berikut.

Tabel 2.5 Rentang Angka Ketidakpastian Terhadap Parameter Faktor Emisi

Data Aktivitas dan Faktor Emisi	Rentang Ketidakpastian
Jumlah total sampah padat kota (MSW _T)	<ul style="list-style-type: none"> • ± 10% untuk data yang berkualitas tinggi (data dari semua TPA yang sudah menggunakan timbangan) • 30% untuk data aktivitas dikumpulkan secara reguler dari angka pembentukan limbah • Lebih dari dua kalinya untuk data dengan kualitas buruk
Fraksi sampah kota yang dibawa ke TPA	<ul style="list-style-type: none"> • ± 10% untuk data berkualitas tinggi (data dari semua TPA yang sudah menggunakan timbangan) • ± 30% untuk data adalah data sampah yang dibawa ke TPA yang dikumpulkan langsung dari TPA • Lebih dari dua kalinya untuk data dengan kualitas buruk
Komposisi limbah	<ul style="list-style-type: none"> • ± 10% untuk data berkualitas tinggi (dari sampling reguler untuk semua TPA yang representatif) • ± 30% untuk data berasal dari studi atau sampling reguler • Lebih dari dua kalinya untuk data dengan kualitas buruk
DOC (karbon organik terdegradasi)	<ul style="list-style-type: none"> • ± 10% bila menggunakan hasil eksperimen yang dilakukan dalam waktu yang cukup lama • ± 20% apabila menggunakan angka <i>default</i> IPCC
MCF (faktor koreksi gas metana)	Apabila menggunakan angka <i>default</i> IPCC
1.0	-10%; +0%
0.8	± 20%

Data Aktivitas dan Faktor Emisi	Rentang Ketidakpastian
0.5	± 20%
0.4	± 30%
0.6	-50%;+60%
F (faksi gas metana di TPA) = 0.5	± 5% apabila menggunakan angka <i>default</i> IPCC
R (<i>recovery</i> gas metana)	<ul style="list-style-type: none"> • Angka ketidakpastian bervariasi bergantung bagaimana gas CH₄ di <i>recovery</i> • ± 10% jika terdapat alat ukur gas metana yang di <i>recovery</i> • ± 50% jika tidak ada alat ukur gas metana yang di <i>recovery</i>
OX (angka oksidasi)	Angka oksidasi dimasukkan ke dalam perhitungan tingkat ketidakpastian jika digunakan angka selain nol.
T _{1/2} (waktu paruh)	Apabila angka spesifik nasional, harus dipertimbangkan dalam perhitungan tingkat ketidakpastian.

Sumber : KLH, 2012

Menurut IPCC 2006, tingkat emisi GRK dari TPA di tentukan dengan menggunakan metode *first order decay* (FOD). Penggunaan metode neraca masa tidak disarankan dikarenakan metode neraca massa tidak dapat dibandingkan dengan metode FOD yang memiliki hasil perhitungan emisi tahunan yang lebih akurat. Penggunaan metoda FOD dalam inventarisasi emisi GRK dari pengelolaan limbah padat yang ditimbun di TPA memerlukan data historis yang cukup panjang. Perhitungan emisi *landfill* TPA di Indonesia dapat menggunakan pendekatan nilai *Tier 1* dikarenakan penyediaan data-data yang belum cukup tersedia, sehingga dapat menghindari data historis yang cukup panjang (KLH, 2012).

2.10 Models Landfill Gas (LFG) Metana

Model LFG menggambarkan secara sederhana perubahan kompleks yang terjadi selama proses dekomposisi *landfill* dalam pembentukan gas metana dari waktu ke waktu. Beberapa model yang dapat digunakan dalam memperkirakan pembentukan LFG adalah sebagai berikut.

1. German EPER model

Merupakan model yang digunakan untuk memperkirakan pembentukan metana hanya dari operasional TPA dan tidak digunakan untuk TPA non-operasional. *Model EPER* hanya memperhitungkan masuknya sampah tahun lalu dalam memperkirakan pembentukan metana, meskipun proses pembusukan sampah organik pada kondisi anaerobik memerlukan waktu bertahun-tahun. *German EPER model* melebih-lebihkan emisi metana dalam 10 tahun pertama operasi dan meremehkan emisi metana selama 5 tahun terakhir operasi (Gheorghe et al., 2019). Perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut.

$$Q = (M) \times (DOC) \times (DOC_f) \times (F) \times (D)$$

Keterangan :

Q = Produksi metana (kt/yr)

M = Timbulan limbah (Mt/yr)

DOC = Karbon organik yang dapat terurai (kg/tonne)

DOC_f = Fraksi DOC yang dapat terdekomposisi pada kondisi anaerobik, fraksi

F = Fraksi metana dalam *landfill*

D = Faktor efisiensi pengumpulan

Dengan memasukkan data limbah rata-rata 10 tahun, *German EPER model* hanya dapat memberikan perkiraan emisi hingga 9 tahun setelah penutupan (Scharff dan Jacobs, 2006).

2. TNO Model

Perhitungan produksi LFG adalah berdasarkan karbon organik yang terdegradasi dalam limbah. TNO merupakan model orde pertama dengan parameter yang diperhitungkan adalah metana dan pengukuran CO₂ untuk memvalidasi model. Perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut (Atabi et al., 2014).

$$Q = (\text{DOC}_f) \times (1.87) \times (M) \times (\text{DOC}) (k)^{e-(kt)}$$

Keterangan :

Q = produksi metana (kt/yr)

DOC = karbon organik yang dapat terurai (kg/tonne)

DOC_f = fraksi DOC yang dapat terdekomposisi pada kondisi anaerobik, fraksi

M = timbunan limbah (Mt/yr)

K = laju pertumbuhan metana (/tahun)

T = waktu pembuangan limbah (tahun)

3. LandGEM model

LandGEM merupakan model dekomposisi orde satu dengan mengestimasi laju gas di *landfill* berdasarkan dari potensi kapasitas metana ($Lo \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$) yang dihasilkan dari timbunan sampah dan laju pembusukkan sampah k (thn^{-1}). Model *LandGEM* hanya menghitung estimasi produksi gas-gas yang terkandung pada *landfill* dan tidak termasuk estimasi emisi ke atmosfer. Estimasi metana yang dihitung adalah berdasarkan pada estimasi produksi metana dengan mempertimbangkan jumlah metana yang teroksidasi pada *landfill* (Made et al., 2010). Perhitungan *LandGEM* adalah sebagai berikut.

$$QCH_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 KLo \left(\frac{Mi}{10} \right) e^{-Kt_{ij}}$$

Keterangan :

QCH₄ = emisi gas metana (m³/tahun)

n = total periode waktu penimbunan sampah

K = laju pertumbuhan metana (/tahun)

Lo = potensi produksi metana (m³/ton)

Mi = Massa sampah yang diterima pada tahun ke-i (ton)

t_{ij} = waktu penimbunan sampah (tahun)

2.11 Pemilihan Model LFG

Rekapitulasi pada masing-masing model LFG dapat dilihat pada **Tabel 2.6** Berikut.

Tabel 2.6 Rekapitulasi Models LFG

Model	Keterangan
<i>EPER</i>	<i>EPER Germany</i> melebih-lebihkan emisi metana pada 10 tahun pertama operasi dan emisi metana yang terlalu rendah pada 5 tahun terakhir setelah beroperasi.
<i>TNO</i>	TNO merupakan model yang lebih sederhana dengan jumlah parameter yang terbatas. Pembusukan limbah secara eksponensial.
<i>LandGEM</i>	Estimasi emisi metana pada MSW yang lebih tinggi dibandingkan model estimasi lainnya.

Sumber : Voicu et al., 2019

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Thomson et al. (2009) mengenai perbandingan berbagai model dalam pengukuran emisi metana di berbagai lokasi TPA, menyatakan bahwa *LandGEM* memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan model lainnya dalam memperkirakan emisi metana. Oleh karena itu, model yang dipilih pada penelitian ini adalah dengan menggunakan *LandGEM*. Hasil perbandingan *LandGEM* dengan model lainnya dapat dilihat pada **Tabel 2.7** berikut.

Tabel 2.7 Perbandingan Perbedaan Model Estimasi *landfill* Gas

<i>Tipe Model</i>	<i>Error median</i>	<i>Correlation (r)</i>	<i>Mean realtive error (%)</i>
<i>German EPER model</i>	238	0.85	312
<i>TNO model</i>	322	0.87	289
<i>LandGEM model</i>	-86	0.92	-81

Sumber : Thomson et al., 2009

Menurut Surayawan dan Afifah (2020), program *LandGEM* lebih dapat diandalkan dalam mengukur tingkat emisi dengan menampilkan nilai yang konservatif dan terdekat serta determinan yang lebih representatif pada emisi gas di TPA. Hasil akhir pemodelan *LandGEM* memberikan perkiraan tingkat emisi *total* gas, CH₄,

CO₂ dan senyawa organik nonmetana (NMOCs) serta polutan udara individu dari tempat pembuangan sampah. *LandGEM* dilengkapi dengan hasil akhir berupa estimasi *total* gas yang dihasilkan selama masa operasional TPA dan dapat memperkirakan *total* gas maupun CH₄ yang masih dapat diproduksi setelah masa operasional TPA berakhir. Sehingga, *output* yang dihasilkan pada pemodelan *LandGEM* diharapkan dapat melengkapi data terkait dengan potensi emisi CH₄ setelah masa operasional TPA Sarimukti yang direncanakan berakhir pada tahun 2023.

