

# Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Sistem Pengolahan Air Limbah Domestik sebagai Dasar Pendekatan Perencanaan Sanitasi Rendah Karbon di Kota Bandung

Aiman Muin\*, Prayatni Soewondo, Adyati Pradini Yudison

Program Magister Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

\*Koresponden email: aimanmuin5@gmail.com

Diterima: 25 Juli 2025

Disetujui: 05 Agustus 2025

## Abstract

Amid global commitments to reducing greenhouse gas (GHG) emissions, the wastewater sector is still often overlooked as a significant emission source. This study aims to estimate and compare GHG emissions, specifically methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), from two domestic wastewater treatment systems in Bandung City: communal systems (WWTPs) and individual systems (septic tanks). The estimation method refers to the IPCC 2019 Refinement approach. In this method, default emission factors and locally adjusted factors for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O are used, in accordance with the specific conditions of each system. Activity data were obtained from primary surveys concerning the number of users, usage frequency, and system characteristics, and supplemented by secondary data from government institutions regarding levels of urbanization and the extent of system utilization. The analysis reveals that, on average, communal WWTPs generate higher CH<sub>4</sub> emissions (7.5 kg/person/year) compared to septic tanks (4.4 kg/person/year), while septic tanks produce higher N<sub>2</sub>O emissions (0.1 kg/person/year) than WWTPs (0.02 kg/person/year). Nevertheless, total CO<sub>2</sub>-equivalent (CO<sub>2</sub>e) emissions from septic tank systems are 33.45 kilotons greater than those from communal WWTPs in aggregate, due to the considerably larger number of users. This study emphasizes the importance of integrating GHG mitigation strategies into sanitation planning by reinforcing communal systems and enhancing technology in individual systems.

**Keywords:** *greenhouse gas, communal wastewater treatment plant, septic tank, wastewater treatment system, methane, nitrous oxide*

## Abstrak

Di tengah komitmen global terhadap penurunan emisi gas rumah kaca (GRK), sektor air limbah masih sering diabaikan sebagai sumber emisi yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi dan membandingkan emisi GRK, khususnya metana (CH<sub>4</sub>) dan dinitrogen oksida (N<sub>2</sub>O), dari dua sistem air limbah domestik di Kota Bandung: sistem komunal (IPAL) dan sistem individual (tangki septik). Metode estimasi mengacu pada pendekatan IPCC 2019 *Refinement*. Dalam metode ini digunakan faktor emisi *default* dan faktor yang telah disesuaikan secara lokal untuk CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O, sesuai dengan kondisi spesifik tiap sistem. Data aktivitas diperoleh dari survei primer mengenai jumlah pengguna, frekuensi pemakaian dan karakteristik sistem, serta data sekunder dari instansi pemerintah terkait tingkat urbanisasi dan derajat pemanfaatan sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa secara rata-rata, sistem IPAL menghasilkan emisi CH<sub>4</sub> lebih tinggi (7,5 kg/org/tahun) dibanding tangki septik (4,4 kg/org/tahun), sedangkan tangki septik menghasilkan emisi N<sub>2</sub>O lebih tinggi (0,1 kg/org/tahun) dibanding IPAL (0,02 kg/org/tahun). Meskipun demikian, emisi total CO<sub>2</sub>e dari sistem tangki septik justru lebih besar 33,45 kiloton dari IPAL Komunal secara agregat karena jumlah penggunanya jauh lebih banyak. Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi dimensi mitigasi GRK ke dalam perencanaan sanitasi, melalui penguatan sistem komunal dan peningkatan teknologi pada sistem individual.

**Kata Kunci:** *gas rumah kaca, IPAL komunal, tangki septik, sistem pengolahan air limbah, metana, dinitrogen oksida*

## 1. Pendahuluan

Isu perubahan iklim telah mendorong berbagai sektor untuk mengkaji ulang kontribusinya terhadap emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Salah satu sektor yang relatif terabaikan namun berpotensi signifikan adalah sektor sanitasi domestik. Sistem pengelolaan air limbah domestik, terutama di wilayah urban negara berkembang, menjadi sumber utama emisi metana (CH<sub>4</sub>) dan dinitrogen oksida (N<sub>2</sub>O). Emisi ini terbentuk dari proses dekomposisi bahan organik dalam lingkungan anaerobik (IPCC, 2019). Meskipun kontribusi

absolutnya lebih kecil dibanding sektor energi atau transportasi, emisi dari sektor sanitasi memiliki relevansi strategis dalam konteks pengelolaan lingkungan perkotaan dan pembangunan rendah karbon.

Sektor air limbah domestik masih menghadapi tantangan besar dalam pencapaian target nasional maupun global terkait pengurangan emisi Gas Rumah Kaca. Program *Open Defecation Free* (ODF) telah dideklarasikan di berbagai wilayah. Namun, studi oleh Buana dan Soewondo (2024) menunjukkan bahwa capaian tersebut sering kali hanya bersifat administratif. Program ini tidak diikuti oleh penguatan sistem pengolahan limbah cair.

Di Indonesia, mayoritas rumah tangga masih menggunakan sistem individual berupa tangki septik. Sistem ini seringkali tidak dilengkapi pengolahan lanjutan, dan infrastrukturnya tidak memenuhi standar teknis. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2023), lebih dari 70% rumah tangga menggunakan tangki septik dan hanya sebagian kecil yang terhubung ke sistem komunal (IPAL). Sebagian besar tangki septik tidak dilengkapi ventilasi yang memadai dan memiliki frekuensi penyedotan lumpur yang rendah. Situasi ini menciptakan kondisi anaerobik yang memicu emisi metana secara berkelanjutan (Boiocchi et al., 2023). Selain itu, akumulasi senyawa organik tanpa proses dekomposisi yang terkendali juga akan memberikan kontribusi pada peningkatan emisi  $N_2O$ .

Kota Bandung merupakan salah satu contoh tipikal dari tantangan sanitasi urban di Indonesia. Jumlah penduduk lebih dari 2,5 juta jiwa dan kepadatan tinggi, kota ini menghadapi tekanan besar terhadap infrastruktur pengolahan air limbah yang belum sepenuhnya terintegrasi. Bandung telah memiliki IPAL Bojongsoang yang beroperasi sejak 1986. Namun, cakupan pelayanannya masih sangat terbatas. Hal ini menjadi tantangan mengingat pesatnya perkembangan Kota Bandung dan pertumbuhan kota di sekitarnya.

Beberapa studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa sistem individual yang tidak dikelola dengan baik dapat menghasilkan emisi metana yang jauh lebih tinggi dibanding sistem komunal dengan pengolahan terpusat (Graham & Polizzotto, 2013). Namun demikian, data empiris emisi dari konteks perkotaan di Indonesia masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan data tersebut dengan melakukan estimasi emisi  $CH_4$  dan  $N_2O$  dari sistem komunal dan individual di Bandung.

Studi ini juga mengkaji faktor-faktor teknis dan operasional seperti jenis pengolahan, keberadaan ventilasi, umur sistem dan frekuensi penyedotan, yang diduga berkontribusi terhadap variasi emisi antar lokasi. Melalui perhitungan metode IPCC menggunakan data lokal dan nasional, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dan praktis bagi pengembangan kebijakan sanitasi rendah karbon yang berbasis bukti di tingkat lokal.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui metode estimasi emisi GRK berdasarkan panduan IPCC (IPCC, 2019; IPCC, 2006). Metode ini dipilih karena telah terbukti dalam beragam studi dan meta-analisis (Boiocchi et al., 2023). Fokus perhitungan terbatas pada dua jenis gas rumah kaca utama, yaitu metana ( $CH_4$ ) dan dinitrogen oksida ( $N_2O$ ). Pemilihan dua gas ini didasarkan pada karakteristik umum sistem pengolahan limbah domestik di Indonesia yang dominan menghasilkan  $CH_4$  dari proses anaerobik dan  $N_2O$  dari nitrifikasi-denitrifikasi (IPCC, 2019).

### 2.1 Lokasi dan Sampel Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Kota Bandung, Provinsi Jawa Barat, yang memiliki kompleksitas antara sistem individual dan sistem komunal. Lokasi sampel tangki septik dipilih secara purposif pada tiga kecamatan. Ketiganya merepresentasikan variasi sistem pengolahan: Buahbatu (11 unit), Coblong (11 unit), dan Kiaracondong (10 unit). Sedangkan lokasi IPAL, masing-masing tersebar di kecamatan Coblong, Mandalajati dan Sukajadi. Selain itu, kriteria seperti keterjangkauan teknis, aksesibilitas serta kesediaan responden menjadi pertimbangan dalam memilih cakupan area. Gambar 1 memperlihatkan contoh *septik tank* individual (a) dan IPAL skala komunal (b).



**Gambar 1.** Tampak unit sistem (a) Tangki septik; (b) IPAL komunal sistem ABR.

## 2.2 Pengumpulan Data

Data primer diperoleh melalui survei lapangan dan wawancara terstruktur dengan pengelola dan pengguna fasilitas sistem. Setiap unit IPAL dan tangki septik yang dikunjungi didokumentasikan aspek teknisnya, seperti jenis sistem, jumlah sambungan, kondisi operasional dan volume air limbah. Wawancara dan survei di lokasi penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Wawancara dan survei (a) Rumah tangga dengan tangki septik; (b) IPAL komunal.

Sumber data aktivitas dan parameter didasarkan pada dokumen resmi dari instansi pemerintah, termasuk BPS, DLH, dan Dinas PUPR. Data mencakup jumlah penduduk, klasifikasi urbanisasi, derajat pemanfaatan sistem, serta rencana pembangunan sistem pengolahan air limbah. Data yang terkumpul kemudian digunakan untuk menghitung estimasi emisi  $CH_4$  dan  $N_2O$  berdasarkan formula IPCC, yang mengintegrasikan parameter seperti *emission factor*, *chemical oxygen demand (COD)*, *nitrogen load*, *treatment pathway* dan *removal efficiency*.

## 2.3 Estimasi Emisi GRK

Pendekatan estimatif IPCC ini digunakan untuk menghitung emisi GRK secara teoritis berdasarkan data aktivitas dan faktor emisi yang telah disesuaikan dengan kondisi lokal. Emisi metana dihitung berdasarkan parameter TOW (*Total Organically Degradable Material in Wastewater*). Nilai TOW diasumsikan berasal dari BOD tahunan per kapita, dikalikan jumlah populasi. Nilai ini kemudian dikoreksi dengan faktor konversi gas dan efisiensi sistem pengolahan (IPCC, 2019), serta dikurangi oleh faktor pengurangan dari data lokal. Estimasi emisi metana ( $CH_4$ ) dilakukan menggunakan persamaan 1.

$$CH_{4emisi} = (TOW - S) \times (B_0 \times MCF) \times (1 - R) \quad (1)$$

Dengan:

TOW = Total BOD yang masuk ke sistem (kg BOD/tahun)

S = Komponen organik dihilangkan dari air limbah (kg BOD/tahun)

$B_0$  = Maksimum produksi metana per kg BOD (*default* 0,6 kg  $CH_4$ /kg BOD)

MCF = *Methane correction factor*, bergantung pada jenis sistem (*default*: 0,55–0,8)

R = Fraksi metana yang ditangkap dan digunakan atau dibakar (umumnya 0)

Sementara untuk emisi dinitrogen oksida dihitung berdasarkan total nitrogen yang dikuantifikasi melalui konsumsi protein tahunan per kapita (IPCC, 2019) dan diestimasi menggunakan persamaan 2 berikut:

$$N_2O_{emisi} = [\Sigma(U \times T \times EF)] \times TN \times \frac{44}{28} \quad (2)$$

Dengan:

U = Fraksi populasi dalam kelompok pendapatan

T = Derajat pemanfaatan masing-masing sistem

EF = Faktor emisi  $N_2O$  dari sistem pengolahan (*default* 0,005 kg  $N_2O$ -N/kg-N)

TN = Total nitrogen dalam limbah domestik (kg N/tahun)

$\frac{44}{28}$  = Faktor konversi; 1,571 (konversi  $N_2O$ -N ke  $N_2O$ )

Nilai TOW dan TN dihitung menggunakan data dari KLHK (2024) serta angka default IPCC. Estimasi memperhitungkan dominasi sistem tangki septik sebesar 41,24%, dengan rata-rata 4 pengguna per unit. Sebaliknya, sistem IPAL komunal (22,43%) melayani 100 rumah tangga atau 400–500 orang per unit.

Perhitungan mempertimbangkan perbedaan kondisi operasional masing-masing sistem. Koreksi dilakukan berdasarkan faktor metana (MCF) dan efisiensi pengolahan nitrogen. Hasil yang diperoleh dikonversi menjadi emisi spesifik (g CO<sub>2</sub>e/orang/hari) dengan memperhitungkan jumlah pengguna sistem dan koefisien potensi pemanasan global (GWP): 28 untuk CH<sub>4</sub> dan 265 untuk N<sub>2</sub>O (IPCC, 2019). Konversi dilakukan agar hasil dapat dibandingkan dengan standar internasional dan digunakan untuk penyusunan kebijakan mitigasi berbasis data lokal.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Nilai Emisi GRK dari Sistem Pengolahan Air Limbah

Perhitungan emisi GRK menggunakan persamaan (1) dan (2) untuk sistem tangki septik dan IPAL di Kota Bandung menghasilkan variabilitas angka yang cukup signifikan antar sistem. Hasil estimasi emisi GRK menunjukkan bahwa sistem IPAL komunal menghasilkan emisi CH<sub>4</sub> lebih tinggi, tapi tidak dengan N<sub>2</sub>O yang mana tangki septik individual menghasilkan lebih tinggi dibandingkan sistem IPAL komunal. Estimasi ini mencakup seluruh populasi Kota Bandung berdasarkan data pemerintah setempat per tahun 2023-2024 dan representasi sampel sistem yang dominan. Lalu, hasil dihitung ke dalam satuan kilogram gas per orang per tahun. Rata-rata emisi untuk masing-masing sistem disajikan pada **Tabel 1** berikut.

**Tabel 1.** Emisi GRK dari pengolah sistem air limbah domestik

Sistem	Jumlah sampel (orang)	CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	
		(kg/tahun)	(kg/org/tahun)	(kg/tahun)	(kg/org/tahun)
Tangki Septik	128	632	4,39	13	0,09
IPAL	1200+	9.060	7,55	24	0,02

**Tabel 1** menampilkan emisi CH<sub>4</sub> dari sistem IPAL mencapai 7,55 kg/orang/tahun, hampir dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan tangki septik yang mencatat 4,39 kg/orang/tahun. Nilai ini mengindikasikan bahwa sistem IPAL dalam konteks studi ini belum optimal dalam mengendalikan produksi metana. Tingginya emisi CH<sub>4</sub> pada IPAL disebabkan oleh beberapa hal. Di antaranya adalah unit pra-pengolahan yang bersifat anaerob dan tidak sepenuhnya tertutup. Selain itu, tidak tersedianya sistem pembakaran gas (seperti *flaring*) dan tingginya beban organik mempercepat proses metanogenesis, terutama jika tidak ada aerasi memadai. Hal ini didukung oleh temuan dari Daelman et al. (2012) yang menunjukkan bahwa IPAL tanpa pengendalian gas dapat menjadi sumber signifikan emisi CH<sub>4</sub>, terutama dari tahapan pra-pengolahan.

Sementara dari sisi N<sub>2</sub>O, tangki septik menunjukkan emisi sebesar 0,09 kg/orang/tahun, lebih tinggi dibanding IPAL yang hanya menghasilkan intensitas 0,02 kg/orang/tahun. Fenomena ini berkaitan dengan kondisi mikrobiologis dalam sistem septik. Proses nitrifikasi yang tidak sempurna, akibat terbatasnya oksigen dan waktu tinggal hidrolis, menghasilkan N<sub>2</sub>O sebagai produk antara (Yoshida et al., 2014).

Kinerja sistem pengolahan air limbah domestik komunal sangat menentukan besaran emisi gas rumah kaca yang dihasilkan. Studi oleh Rachmayadi dan Sururi (2024) menunjukkan bahwa salah satu IPAL komunal di Kota Cimahi mengalami berbagai permasalahan teknis dan operasional seperti kerusakan media bioball, akumulasi lumpur, serta blower aerasi yang tidak berfungsi. Kondisi tersebut berdampak langsung pada penurunan efisiensi penyisihan polutan, di mana efisiensi pengurangan COD dan BOD hanya mencapai sekitar 30%, jauh di bawah standar teknis. Temuan ini memperkuat argumen bahwa sistem komunal yang tidak dikelola secara optimal justru dapat menjadi sumber emisi GRK yang signifikan, terutama bila terjadi proses degradasi anaerobik akibat suplai oksigen yang tidak memadai.

Secara keseluruhan, temuan ini memperlihatkan bahwa kedua sistem memiliki tantangan emisi yang berbeda: IPAL cenderung lebih bermasalah pada CH<sub>4</sub>, sementara tangki septik lebih rentan terhadap pelepasan N<sub>2</sub>O. Strategi mitigasi yang ditargetkan sesuai karakteristik sistem masing-masing menjadi penting. Temuan ini kemudian ditinjau lebih lanjut dalam data numerik pada **Tabel 2**, yang memuat beberapa data penelitian lain sebagai perbandingan lintas studi dari berbagai wilayah dan negara yang menggunakan metode dan meneliti objek sistem yang serupa.

Dalam aspek emisi gas rumah kaca, Kota Bandung menunjukkan rentang estimasi emisi tahunan dari sistem air limbah domestik khususnya tangki septik sebesar 4,4 kg CH<sub>4</sub>/org/tahun dan 0,1 kg N<sub>2</sub>O/org/tahun. Angka ini menunjukkan kontribusi emisi yang relatif tinggi untuk kedua gas dibandingkan lokasi lain dalam tinjauan ini.

**Tabel 2.** Tinjauan perbandingan lintas studi GRK dengan metode IPCC

Area studi	CH <sub>4</sub> (kg/org/tahun)	N <sub>2</sub> O (kg/org/tahun)	Jenis sistem	Referensi
Bandung	4,4	0,1	Konvensional	Studi ini
Kampala, Uganda	1,8	0,05	Septic tanks & Pit latrines	Johnson et al. (2022)
Jepang	0,09	0,01	Johkasou	UNFCCC (2023)
Global	6,7 – 244,8	-	Non-sewered systems	Cheng et al. (2022)

Dibandingkan dengan Kota Bandung, estimasi emisi CH<sub>4</sub> dari Kampala, Uganda (1,8 kg/org/tahun) memang lebih rendah, meskipun keduanya sama-sama menggunakan sistem tangki septik tropis. Perbedaan estimasi emisi dapat dikaitkan dengan variasi praktik operasional. Beberapa faktor seperti frekuensi penyedotan lumpur, kepadatan pengguna sistem, dan tingkat akumulasi bahan organik di dalam tangki berperan penting. Johnson et al. (2022) mencatat bahwa sistem tangki di Kampala umumnya memiliki *pit latrines* yang lebih terbuka dan berisiko mengemisikan CH<sub>4</sub> lebih rendah akibat ventilasi yang lebih baik, namun juga lebih tergantung pada kondisi sosial-ekonomi setempat, yang dapat menyebabkan inkonsistensi dalam performa sistem pengolahan.

Sementara itu, data dari Jepang menggambarkan sistem dengan kontrol dan efisiensi teknis yang tinggi. Sistem Johkasou di Jepang menunjukkan angka emisi yang sangat rendah, yakni 0,09 kg CH<sub>4</sub> dan 0,01 kg N<sub>2</sub>O per orang per tahun (UNFCCC, 2023). Capaian ini mencerminkan efisiensi desain dan keberhasilan penerapan sistem biofiltrasi. Jadwal penyedotan lumpur yang ketat juga menjadi faktor keberhasilannya. Seperti disebut oleh Truhlar et al. (2019), strategi ini efektif dalam membatasi akumulasi bahan organik dan mengurangi produksi metana melalui proses anaerob yang tidak terkontrol.

Dalam cakupan global, melalui studi oleh Cheng et al. (2022), menunjukkan bahwa sistem sanitasi non-pipa (*non-sewered sanitation systems*) secara global berkontribusi signifikan terhadap emisi GRK, dengan nilai estimasi CH<sub>4</sub> yang bervariasi, tergantung pada desain dan praktik operasional sistem. Rentang nilai 6,7 – 244,8 kg CH<sub>4</sub>/org/tahun yang cukup besar ini mencerminkan kompleksitas dalam generalisasi sistem tangki septik secara global. Hal ini dikarenakan heterogenitas dalam desain tangki (termasuk kehadiran ruang ventilasi, pemisahan ruang limbah padat-cair), frekuensi penyedotan lumpur, serta pengaruh signifikan dari faktor iklim mikro lokal terhadap dinamika biologis di dalam tangki.

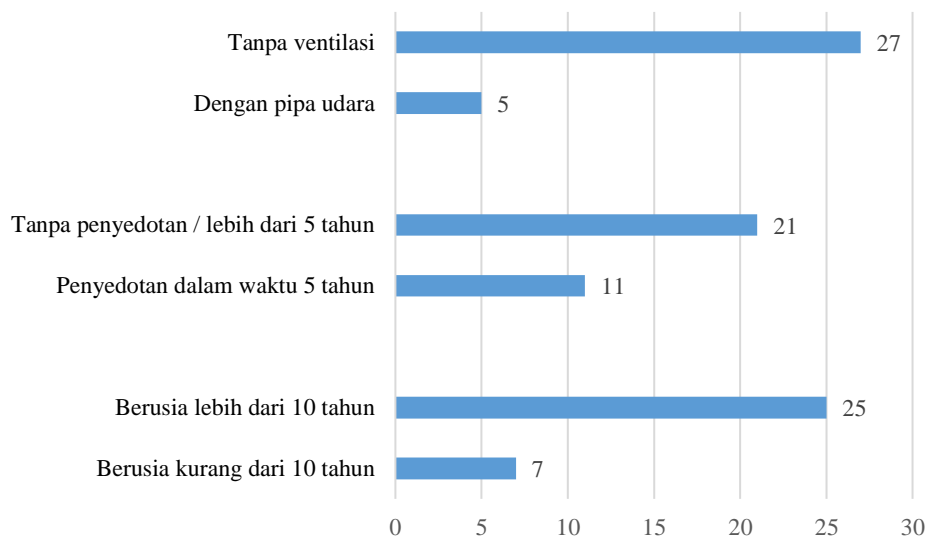
### 3.2 Faktor Teknis dan Operasional terhadap GRK

Perbedaan emisi GRK tidak hanya disebabkan oleh jenis sistem (komunal vs individual), tetapi juga sangat dipengaruhi oleh faktor teknis dan operasional dari masing-masing sistem. Berdasarkan hasil observasi lapangan, sejumlah aspek seperti desain penutup tangki, keberadaan ventilasi, umur sistem serta frekuensi penyedotan lumpur teridentifikasi sebagai faktor yang dapat memengaruhi besarnya emisi metana.

Temuan ini sejalan dengan hasil analisis oleh Boiocchi et al. (2023), yang menekankan bahwa praktik operasional, seperti manajemen lumpur dan pengendalian gas, sangat penting dalam mengoptimalkan produksi biogas dan meminimalkan emisi dari sistem pengolahan terdesentralisasi seperti tangki septik. **Gambar 3** merupakan data hasil survei dan wawancara pada lokasi sampel penelitian khusus sistem tangki septik.

Ventilasi, misalnya, merupakan komponen teknis penting dalam desain tangki septik. Beberapa studi melaporkan bahwa sistem dengan ventilasi cenderung melepaskan CH<sub>4</sub> secara lebih terkontrol, menghindari akumulasi gas yang berlebihan dan potensi pelepasan tiba-tiba (IPCC, 2019). Meski demikian, ventilasi tanpa diikuti oleh sistem pengolahan lanjutan hanya memindahkan gas ke atmosfer tanpa mitigasi yang memadai (Daelman et al., 2012). Oleh karena itu, keberadaan ventilasi harus dikombinasikan dengan teknologi lanjutan seperti biofilter atau sistem penangkapan gas.

Frekuensi penyedotan lumpur juga menjadi indikator penting dalam memahami dinamika emisi. Tangki yang tidak disedot secara berkala menunjukkan tingkat emisi CH<sub>4</sub> yang lebih tinggi dibandingkan tangki yang dikelola dengan jadwal penyedotan rutin. Menurut González et al. (2019), tangki septik idealnya disedot setiap 2–3 tahun untuk menjaga efisiensi pengolahan dan meminimalkan produksi gas. Ketidakteraturan dalam penyedotan tidak hanya menurunkan kapasitas sistem, tetapi juga meningkatkan kemungkinan produksi dan pelepasan metana secara berlebihan (Graham & Polizzotto, 2013).



**Gambar 3.** Histogram karakteristik sistem tangki septik yang diteliti di Kota Bandung

Faktor operasional lainnya yang tidak kalah penting adalah usia sistem. Sistem yang telah beroperasi lebih dari satu dekade cenderung menunjukkan akumulasi lumpur yang tinggi dan kerusakan struktural seperti kebocoran, yang berkontribusi pada difusi gas secara tidak terkendali. Hal ini telah dikonfirmasi oleh Huynh et al. (2021), yang melaporkan bahwa septic tank lama menunjukkan peningkatan pelepasan  $CH_4$  akibat kondisi anaerobik berkepanjangan dan minimnya perawatan berkala. Selain itu, kerusakan struktural akibat usia seperti kebocoran menyebabkan difusi metana secara tidak terkendali ke lingkungan, sebagaimana dicatat oleh Yoshida et al. (2014).

### 3.3 Implikasi untuk Perencanaan Sanitasi Rendah Karbon

Berdasarkan hasil perhitungan emisi sistem IPAL komunal dan tangki septik individual di Kota Bandung, estimasi total emisi gas rumah kaca yang dikonversi ke satuan ekuivalen karbon dioksida ( $CO_2e$ ) menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Sistem IPAL komunal menghasilkan total emisi sebesar 216,9 kg  $CO_2e$  per orang per tahun, Sebaliknya, sistem tangki septik menunjukkan total emisi yang lebih rendah, yaitu 149,5 kg  $CO_2e$  per orang per tahun. Selisih sekitar 67,5 kg  $CO_2e$  per orang per tahun ini menegaskan bahwa sistem IPAL komunal menyumbang emisi yang lebih tinggi sekitar 45% dibanding tangki septik. Angka-angka tersebut selanjutnya dikalikan dengan data jumlah pengguna aktif dari masing-masing sistem (BPS, 2025), data lebih rinci dapat dilihat pada **Tabel 3** berikut.

**Tabel 3.** Total emisi GRK dengan estimasi skala Kota Bandung

Sistem	Jumlah pengguna (orang)	$CO_2e$ (kg/orang/tahun)	$CO_2e$ (kt/tahun)
Tangki Septik	1.068.930	149,5	159,58
IPAL	581.419	216,9	126,13

Maka, total emisi GRK ( $CO_2-e$ ) dari sistem tangki septik mencapai 159,58 kiloton  $CO_2-e$  per tahun, lebih tinggi dibandingkan IPAL Komunal sebesar 126,13 kiloton  $CO_2-e$ , memberikan tantangan sekaligus peluang besar dalam merancang strategi sanitasi rendah karbon. Meskipun emisi per kapita dari IPAL komunal lebih tinggi, sistem individual menyumbang emisi total yang lebih besar karena digunakan oleh lebih banyak orang. Hal ini menunjukkan bahwa dalam perencanaan mitigasi GRK sektor sanitasi, fokus tidak dapat semata-mata diarahkan pada efisiensi teknologi per unit sistem, melainkan juga harus mempertimbangkan skala adopsi dan cakupan populasi pengguna.

Selama ini, perencanaan sanitasi konvensional masih berfokus pada aspek kesehatan masyarakat dan akses layanan. Dimensi mitigasi perubahan iklim belum sepenuhnya dijadikan indikator utama. Padahal, emisi GRK dari sistem air limbah domestik, terutama sistem individual seperti tangki septik, terbukti signifikan dan tidak dapat diabaikan. Dokumen *Enhanced Nationally Determined Contribution* (NDC) Indonesia tahun 2022 menyiratkan bahwa emisi dari sektor limbah cair akan ditangani melalui sistem manajemen yang lebih baik dan integrasi ke dalam perencanaan pengembangan nasional dan lokal (KLHK, 2022). Oleh karena itu, integrasi indikator emisi GRK ke dalam dokumen perencanaan seperti RPJMD (Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah), Peraturan Daerah Sanitasi, hingga Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi GRK (RAD-GRK) menjadi urgensi strategis yang tidak dapat ditunda.

Kota Bandung, dengan mayoritas penduduknya yang masih bergantung pada sistem tangki septik individual, dapat menjadi pelopor dalam penerapan konsep sanitasi rendah karbon, yakni pendekatan terpadu yang menggabungkan perluasan akses layanan dengan upaya penurunan emisi melalui inovasi teknologi, tata kelola berkelanjutan dan peningkatan kesadaran masyarakat. Penguatan sistem komunal seperti IPAL dapat dilakukan melalui integrasi unit biodigester anaerobik dan proses nitrifikasi-denitrifikasi, yang tidak hanya menurunkan emisi  $\text{CH}_4$  tetapi juga memungkinkan pemanfaatan biogas sebagai energi alternatif (Huynh et al., 2021).

Di sisi lain, sistem individual dapat ditingkatkan melalui adopsi tangki septik berbasis biofilter atau bioenzim, serta penerapan teknologi sensor untuk pemantauan emisi secara *real-time*. Langkah teknis seperti standar ventilasi wajib, umur sistem dan frekuensi penyedotan lumpur juga dapat dijadikan prasyarat dalam izin bangunan model yang telah berhasil diterapkan di negara berkembang seperti Thailand dan Sri Lanka (UN-Habitat, 2020).

Perbedaan signifikan hasil emisi antara sistem komunal dan individual memperkuat temuan bahwa sistem tangki septik, meskipun secara ekonomi mudah diterapkan, memiliki potensi emisi GRK yang besar. Jika tidak dikelola dengan teknologi yang tepat, sistem ini berpotensi menjadi sumber tersembunyi emisi GRK. Kebijakan yang tidak berpihak pada keberlanjutan akan memperburuk kondisi tersebut, terutama di kawasan urban padat (Gao et al., 2014). Temuan ini menyediakan dasar empiris yang kuat bagi reformasi kebijakan sanitasi di tingkat kota, sejalan dengan rekomendasi IPCC (2019) dan WHO (2021) yang menekankan pentingnya pelaporan dan perhitungan emisi di sektor limbah domestik.

### 3.4 Keterbatasan dan Rekomendasi Penelitian Lanjutan

Studi ini menggunakan pendekatan estimasi berbasis metode default IPCC 2019, yang meskipun sesuai standar internasional, memiliki keterbatasan dalam menangkap variasi aktual lapangan, seperti perbedaan praktik operasional, desain sistem dan kondisi lingkungan spesifik di tiap lokasi. Model ini mengandalkan data asumsi umum, sehingga hasil perhitungan lebih bersifat representatif, bukan observasional.

Untuk meningkatkan akurasi, studi lanjutan disarankan mengombinasikan pendekatan IPCC dengan data lokal yang lebih detail, termasuk karakteristik yang lebih komprehensif mengenai air limbah dan lumpur tinja, terutama rasio COD/N. Hal ini dapat mendukung pengembangan faktor emisi lokal yang lebih relevan untuk konteks Indonesia.

Penelitian ke depan perlu memperluas cakupan wilayah studi. Selain itu, perlu dipertimbangkan skenario teknologi mitigasi seperti penggunaan tangki septik berbasis biofilter, pemanfaatan biogas, atau pendekatan pengolahan terdesentralisasi. Evaluasi yang komprehensif terhadap potensi penurunan emisi dari masing-masing opsi penting untuk mendukung perencanaan sanitasi rendah karbon di tingkat kota dan nasional.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem air limbah domestik, khususnya tangki septik individual, merupakan kontributor signifikan terhadap emisi gas rumah kaca di lingkungan urban seperti Kota Bandung. Hasilnya menunjukkan bahwa secara per kapita sistem komunal menghasilkan emisi  $\text{CH}_4$  sebesar 7,5 kg/orang/tahun dan  $\text{N}_2\text{O}$  sebesar 0,02 kg/orang/tahun. Sedangkan, emisi sistem individual sebesar 4,4 kg/orang/tahun untuk  $\text{CH}_4$  dan 0,1 kg  $\text{N}_2\text{O}$ /orang/tahun. Secara agregat, sistem tangki septik menghasilkan emisi yang lebih besar karena cakupan penggunaannya yang dominan di Bandung. Dari sistem tangki septik mencapai 159,58 kiloton  $\text{CO}_2\text{-e}$  per tahun, lebih tinggi dibandingkan IPAL Komunal sebesar 126,13 kiloton  $\text{CO}_2\text{-e}$ .

Maka dari itu, strategi mitigasi GRK sektor air limbah harus terintegrasi dalam dokumen perencanaan seperti RPJMD, Perda, dan RAD-GRK. Kota Bandung berpotensi menjadi pelopor sanitasi rendah karbon di Indonesia jika mampu menggabungkan penguatan sistem komunal dengan modernisasi sistem individual. Temuan ini memberikan landasan ilmiah bagi pengembangan strategi sanitasi rendah karbon yang mendukung agenda nasional dan global pengendalian iklim.

Namun demikian, studi ini memiliki beberapa keterbatasan. Perhitungan emisi dilakukan berdasarkan pendekatan default IPCC 2019 yang bersifat estimatif dan mengandalkan data sekunder serta asumsi umum. Model ini belum sepenuhnya mencerminkan kondisi lapangan yang kompleks, seperti perbedaan desain sistem, kualitas lumpur tinja, dan dinamika lingkungan mikro. Oleh karena itu, hasil penelitian ini bersifat representatif dan masih memerlukan validasi lebih lanjut melalui pendekatan observasional dan penggunaan faktor emisi lokal yang lebih rinci.

Untuk ke depan, diperlukan penelitian lanjutan yang mengeksplorasi pengembangan teknologi mitigasi berbasis konteks wilayah serta evaluasi skenario kebijakan yang adaptif terhadap kondisi sosial, teknis, dan ekologis masing-masing kota.

## 5. Ucapan Terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh responden yang tersebar di lima kecamatan Kota Bandung (Buahbatu, Coblong, Kiaracondong, Mandalajati dan Sukajadi), Dinas Lingkungan Hidup Kota Bandung atas dukungan data dan akses lokasi penelitian.

## 6. Daftar Pustaka

- Badan Pusat Statistik. (2023). Statistik Sanitasi Lingkungan Indonesia 2023. BPS.
- Boiocchi, R., Mainardis, M., Rada, E. C., Ragazzi, M., & Salvati, S. C. (2023). *Carbon Footprint and Energy Recovery Potential of Primary Wastewater Treatment in Decentralized Areas: A Critical Review on Septic and Imhoff Tanks*. *Energies*, 16(24), 7938. <https://doi.org/10.3390/en16247938>
- Buana, R., & Soewondo, P. (2024). Persepsi Perilaku Sanitasi Masyarakat di Kawasan Semi-Perkotaan Pasca Deklarasi Open Defecation Free dengan Pendekatan IBM-WASH dan KAP. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(4).
- Cheng, S., Long, J., Evans, B., Zhan, Z., Li, T., Chen, C., Mang, H.P., Li, Z., 2022. Non-negligible greenhouse gas emissions from non-sewered sanitation systems: a meta-analysis. *Environ. Res.* 212 (Pt D), 113468 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113468>.
- Daelman, M. R. J., van Voorthuizen, E. M., van Dongen, U. G. J. M., Volcke, E. I. P., & van Loosdrecht, M. C. M. (2012). *Methane emission during municipal wastewater treatment*. *Water Research*, 46(11), 3657–3670. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.024>
- Gao, B., Ju, X., Su, F., Meng, Q., Oenema, O., Christie, P., ... & Zhang, F. (2014). *Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study*. *Science of the Total Environment*, 472, 112-124.
- González, I. N., Cisneros, B. J., Hernández, N. A., & Rojas, R. M. (2019). Adaptation and mitigation synergies to improve sanitation: a case study in Morelos, Mexico. *Journal of Water and Climate Change*, 10(3), 671-686.
- Graham, J. P., & Polizzotto, M. L. (2013). *Pit latrines and their impacts on groundwater quality: a systematic review*. *Environmental Health Perspectives*, 121(5), 521–530. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206028>
- Huynh, L. T., Harada, H., Fujii, S., Nguyen, L. P. H., Hoang, T.-H. T., & Huynh, H. T. (2021). *Greenhouse Gas Emissions from Blackwater Septic Systems*. *Environmental Science & Technology*, 55, 1209–1217.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories., data diperoleh melalui situs internet: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 5 (Waste)*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Johnson, J., Zakaria, F., Nkurunziza, A.G., Way, C., Camargo-Valero, M.A., Evans, B., 2022. Whole-system analysis reveals high greenhouse-gas emissions from citywide sanitation in Kampala. *Uganda. Communications Earth & Environment* 3 (1), 80. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00413-w>.
- KLHK. (2022). Enhanced Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, data diperoleh melalui situs internet: [https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022\\_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf).
- KLHK. (2024). Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV) 2023. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, data diperoleh melalui situs internet: <https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/frontend/pedoman/detail/100>.
- Rachmayadi, F., & Sururi, M. R. (2024). Identifikasi Kinerja IPAL Komunal Domestik Terbangun Sebelum Tahun 2012 di Kota Besar Indonesia (Studi Kasus IPAL RW 17 Melong Kota Cimahi). *Journal Serambi Engineering*, 9(2), 8542-8553.
- Truhlar, A. M., Ortega, K. L., & Walter, M. T. (2019). *Seasonal and diel variation in greenhouse gas emissions from septic system leach fields*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 6043-6052.
- UN Habitat (2020) *World cities report 2020: the value of sustainable urbanization*. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), Nairobi
- UNFCCC (2023). Japan. 2023 National Inventory Report (NIR). <https://unfccc.int/documents/627900>

- 
- WHO. (2021). *Guidelines on Sanitation and Health*. World Health Organization.  
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241514705>
- Yoshida, H., Mønster, J., & Scheutz, C. (2014). Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from a municipal wastewater treatment plant. *Water research*, 61, 108-118.