

Kinerja Tangki Septik dan Implikasinya terhadap Emisi Metana dan Pemulihan Energi

Nisrina Arifah Hibatullah^{1*}, Prayatni Soewondo¹, Neni Sintawardani²

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²Pusat Riset Teknologi Nirlimbah, Badan Riset dan Inovasi Nasional Bandung, Indonesia

*Koresponden email: nisrinarhb@gmail.com

Diterima: 11 Desember 2025

Disetujui: 19 Desember 2025

Abstract

Decentralized septic tank-based sanitation systems remain the primary choice for domestic wastewater management in developing countries, including Indonesia. However, substandard designs and minimal maintenance result in low treatment performance, environmental pollution, and significant greenhouse gas (GHG) emissions. This study used six domestic septic tank units in Bandung City, using a reverse engineering approach and first-order reaction kinetics modeling to estimate influent pollutant loads, organic load removal efficiencies, and methane generation potential. Variation results showed a high Hydraulic Retention Time (HRT) (2–27 days) and an average Chemical Oxygen Demand (COD) concentration of 9,556 mg/L, far exceeding design standards. Units with long HRTs had COD removal efficiencies of up to 91% and methane production potential of up to 490 m³/year, but all gas was released as fugitive emissions due to the lack of a capture and subsequent treatment system. Scenario modeling based on IPCC guidelines shows that the implementation of technical standards (SNI 2398:2017) and Scheduled Fecal Sludge Treatment (LLTT) can reduce methane emissions by up to 90% (from 13.52 Gg/year to 2.09 Gg/year) and recover 50.3 GWh/year of energy through sludge treatment at Fecal Sludge Treatment Plants (IPLT). These findings confirm that minimal intervention with the integration of sludge management and energy recovery is an effective strategy for climate mitigation and household sanitation systems.

Keywords: *methane emissions, ipcc, sanitation, septic tank, wastewater*

Abstrak

Sistem sanitasi terdesentralisasi (SPALDS) berbasis tangki septik masih menjadi pilihan utama pengelolaan air limbah domestik di negara berkembang, termasuk Indonesia. Namun desain yang tidak sesuai standar dan minimnya pemeliharaan menyebabkan kinerja pengolahan rendah, pencemaran lingkungan, serta emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang signifikan. Penelitian ini menggunakan enam unit tangki septik domestik di Kota Bandung melalui pendekatan rekayasa balik dan pemodelan kinetika reaksi orde satu untuk mengestimasi beban pencemar influen, efisiensi penyisihan beban organik serta potensi pembentukan metana. Hasil variasi menunjukkan Waktu Retensi Hidraulik (HRT) yang besar (2–27 hari) dan konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD) mempengaruhi rata-rata 9,556 mg/L, jauh melampaui standar desain. Unit dengan HRT panjang memiliki efisiensi penyisihan COD hingga 91% dan potensi produksi metana mencapai 490 m³/tahun, namun seluruh gas terlepas sebagai emisi fugitif akibat ketidadaan sistem penangkapan dan pengelolaan lanjutan. Pemodelan skenario berdasarkan pedoman *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menunjukkan bahwa penerapan standar teknis (SNI 2398:2017) dan Layanan Lumpur Tinja Terjadwal (LLTT) dapat menurunkan emisi metana hingga 90% (dari 13,52 Gg/tahun menjadi 2,09 Gg/tahun) serta memulihkan energi sebesar 50,3 GWh/tahun melalui pengolahan lumpur di Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT). Temuan ini menegaskan bahwa intervensi minimal dengan integrasi manajemen lumpur dan pemulihan energi merupakan strategi efektif untuk mitigasi iklim dan sistem sanitasi rumah tangga.

Kata Kunci: *Emisi metana, ipcc, limbah cair, sanitasi, septic tank, limbah cair*

1. Pendahuluan

Sistem sanitasi terdesentralisasi khususnya tangki septik, masih menjadi tumpuan utama pengelolaan air limbah domestik di negara berkembang, termasuk Indonesia seperti di Kota Bandung, karena biaya dan operasionalnya lebih rendah dibandingkan sistem terpusat. Namun, dalam praktiknya, banyak tangki septik hanya berfungsi sebagai penampung lumpur tanpa pengolahan biologis memadai, sehingga efluen yang dibuang ke badan air masih mengandung beban organik tinggi (Yulistyorini et al., 2019) dan lumpur jarang

disedot secara berkala. Studi *Shit Flow Diagram* (SFD) Kota Bandung (Bao et al., 2020) menunjukkan sebagian besar efluen sistem setempat langsung menuju saluran drainase, sementara banyak tangki tidak kedap air dan tidak memenuhi SNI 03-2398-2017 (dimensi, penutupan, ventilasi, dan saluran perembesan), sehingga berkontribusi pada pencemaran air tanah dangkal di permukiman padat. Akibat desain yang buruk dan kurangnya pemeliharaan, kapasitas efektif berkurang, waktu tinggal hidrolis menurun, penguraian organik tidak optimal, dan tangki septik yang seharusnya memutus rantai penularan penyakit justru menjadi sumber pencemaran lingkungan dan emisi gas rumah kaca.

HRT adalah parameter kunci yang menentukan lamanya kontak biomassa dengan substrat, sehingga sangat memengaruhi efektivitas degradasi organik di tangki septik. HRT yang terlalu singkat akibat volume kecil atau debit berlebih dapat menyebabkan washout, degradasi tidak optimal, efluen masih tercemar, dan potensi energi metana hilang. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan HRT, misalnya dari 24 menjadi 72 jam pada tangki septik baffled (Nasr & Mikhaeil, 2013), mampu menaikkan efisiensi penghilangan COD secara signifikan, sehingga kinerja pengolahan dan produksi biogas menjadi lebih baik. Di Indonesia, sektor limbah menyumbang sekitar 11% emisi GRK, dengan limbah cair domestik menghasilkan 24.986 Gg CO₂eq per tahun 2022 (KLHK, 2023), terutama dalam bentuk metana dari proses anaerobik yang tidak terkelola. Septic tank secara alami memproduksi metana, tetapi tanpa sistem penangkapan dan pemanfaatan, gas ini terlepas sebagai emisi fugitif dan membuat teknologi tersebut tidak berkelanjutan dari sisi jejak karbon (Boiocchi et al., 2023).

Studi mengenai kuantifikasi emisi ini seringkali terkendala oleh sulitnya akses pengambilan sampel di lapangan, terutama pada tangki septik beton yang tertutup rapat di permukiman padat. Hal ini menyebabkan evaluasi kinerja sering kali hanya didasarkan pada kualitas efluen (outlet), tanpa mengetahui seberapa besar beban pencemar awal yang sebenarnya masuk dan berapa emisi nyata yang dilepaskan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem pengolahan yang mengintegrasikan proses anaerobik seperti sistem biofilm atau *settler-based reactor* dapat meningkatkan efisiensi penyisihan organik sambil memungkinkan produksi biogas, sebagai bagian dari strategi sanitasi berkelanjutan (Lohani et al., 2015); (S. P. Singh et al., 2023).

Di Indonesia dan wilayah tropis pada umumnya, penelitian empiris mengenai hubungan antara HRT, efisiensi penyisihan polutan, dan potensi energi dari tangki septik domestik masih sangat terbatas. Hal ini menimbulkan kebutuhan untuk studi lokal yang sistematis dan kuantitatif. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada enam unit tangki septik domestik di Kota Bandung, dengan menggunakan pendekatan kombinasi *reverse engineering* (rekayasa balik) untuk mengevaluasi kinerja tangki septik eksisting di Kota Bandung, di mana beban influen direkonstruksi menggunakan model kinetika reaksi.

Teknik rekonstruksi semacam ini telah dibahas dalam literatur terkait prediksi biodegradasi berbasis COD dan model kinetika orde satu, seperti yang dijelaskan oleh Mohamed et al., (2018) dalam kajian teoritisnya mengenai perhitungan biometana dari substrat organik. Selanjutnya, penelitian ini menerapkan pemodelan skenario berbasis Neraca Massa untuk mengkomparasi jejak karbon antara kondisi eksisting dengan kondisi ideal yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) dan integrasi Layanan Lumpur Tinja Terjadwal (LLTT). Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan data empiris yang kuat mengenai pengaruh desain dan operasi terhadap efektivitas pengolahan, pemanfaatan energi dan keberlanjutan pada sistem sanitasi rumah tangga.

2. Metode Penelitian

Lokasi Penelitian

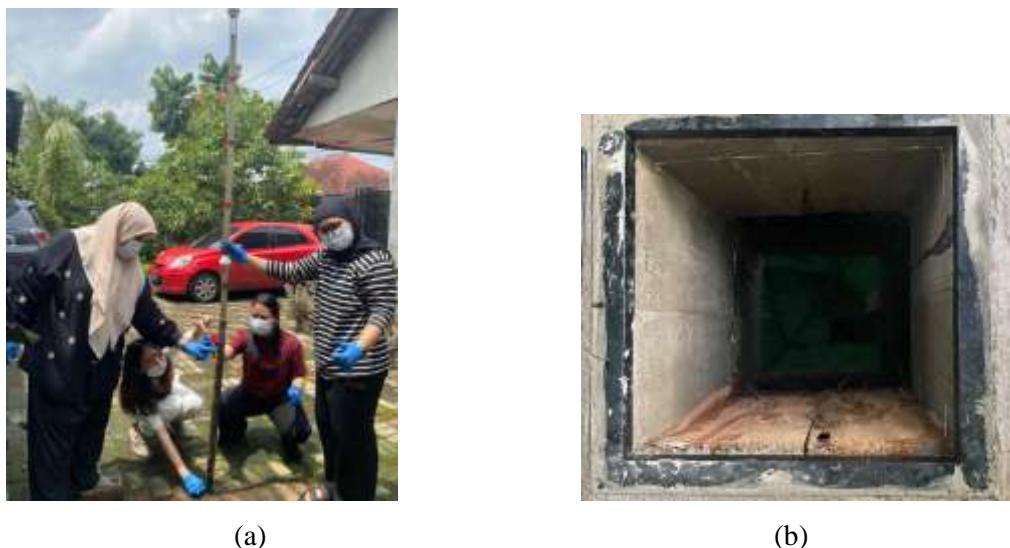
Penelitian dilakukan pada 6 (enam) unit tangki septik rumah tangga yang berlokasi di Kota Bandung. Pemilihan sampel dipilih secara *purposive* didasarkan pada variasi jumlah pengguna dan dimensi dan bentuk tangki untuk mendapatkan representasi profil hidrolis yang beragam.

Tabel 1. Spesifikasi tangki septik

Tangki	Volume (m ³)	Pengguna (orang)	HRT (Hari)
ST 1	5,6	9	25
ST 2	2,2	6	2
ST 3	4,76	4	27
ST 4	0,9	4	5
ST 5	0,6	5	4
ST 6	1,5	4	8

Pengumpulan Data

Data primer dikumpulkan melalui pengukuran langsung di lapangan yang meliputi dimensi tangki, pengukuran cairan di dalam tangki menggunakan *septic checker* serta survei jumlah pengguna (untuk estimasi debit air limbah), pengambilan sampel lumpur dan air limbah juga dilakukan. Parameter kualitas air yang dianalisis berfokus pada *Chemical Oxygen Demand* (COD) sebagai indikator utama beban organik, yang diukur berdasarkan metode standar. Data Sekunder juga didapatkan melalui studi literatur.



Gambar 1. (a) Metode pengukuran dan pengambilan sampel air dan lumpur (b) *manhole* tangki septik

Analisis Data dan Pemodelan Kinerja

Mengingat kendala teknis dalam pengambilan sampel pada saluran masuk (inlet), penelitian ini menerapkan pendekatan pemodelan matematika untuk mengevaluasi kinerja pengolahan.

Analisis Kondisi Eksisting melalui Perhitungan Balik

Pertama, pengukuran konsentrasi COD pada lapisan permukaan tersedia secara empiris pada sebagian unit sampel. Untuk unit tangki yang hanya memiliki data konsentrasi campuran (mixture), dilakukan imputasi data menggunakan pendekatan Rasio Distribusi Vertikal (R_v). Pendekatan ini didasarkan pada prinsip stratifikasi zona dalam tangki septik konvensional (Lee, et al., 1998.), di mana terjadi pemisahan fisik antara zona lumpur di dasar dan zona cairan jernih di permukaan akibat gaya gravitasi. Nilai (R_v) ditentukan sebesar 0,12 yang diturunkan dari data empiris tangki referensi (ST 3) yang menunjukkan profil sedimentasi normal. Penggunaan rasio ini pada tangki lain dijustifikasi berdasarkan asumsi kesamaan karakteristik fisik limbah domestik dan perilaku pengendapan partikel (*settling velocity*) pada sistem dengan desain serupa.

Selanjutnya, kinerja hidrolis dievaluasi dengan menghitung Waktu Tinggal Hidrolis (*Hydraulic Retention Time*) (τ) aktual:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (\text{pers. 1})$$

Dengan V merupakan volume efektif cairan dan Q merupakan debit harian air limbah yang masuk ke dalam tangki. Nilai HRT ini kemudian digunakan untuk merekonstruksi konsentrasi beban pencemar yang masuk (C_{in}) menggunakan model kinetika reaksi orde satu (*First Order Decay*) dengan asumsi reaktor tercampur sempurna (*CSTR*). Persamaan yang digunakan adalah:

$$C_{in} = C_{out} \times (1 + k \times \tau) \quad (\text{pers. 2})$$

Dimana C_{in} merupakan estimasi konsentrasi COD influen (mg/L), C_{out} merupakan konsentrasi COD efluen hasil pengukuran atau imputasi (mg/L), k merupakan konstanta laju reaksi degradasi organik. Penelitian ini mengadopsi nilai k sebesar $0.39/\text{hari}^{-1}$ yang merupakan konstanta spesifik untuk degradasi limbah domestik pada temperatur tropis, mengacu pada studi Okereke (1997). Kemudian, Mengingat tingginya variabilitas emisi pada sistem pengolahan setempat secara spasial dan temporal (Somlai et al.,

2019), pendekatan pemodelan dengan analisis sensitivitas diterapkan untuk mengakomodasi ketidakpastian parameter di lapangan.

Terakhir, untuk memvalidasi bahwa proses biologis terjadi, potensi produksi metana teoretis dihitung berdasarkan massa COD yang berhasil disisihkan ($MCOD_{removed}$). Potensi produksi gas metana (CH_4) teoritis dihitung berdasarkan neraca massa COD yang berhasil disisihkan dalam tangki menggunakan pendekatan stoikiometri:

$$VCH_4 = MCOD_{rem} \times Y_{CH_4} \text{ (pers.3)}$$

Mengacu pada validasi model yang dilakukan oleh Santiago-Díaz et al., (2021), faktor konversi atau *yield* (Y_{CH_4}) ditetapkan sebesar 0,35 L CH_4 /g COD pada kondisi standar.

Untuk mengevaluasi implikasi kebijakan, dilakukan analisis komparatif dengan skala kota menggunakan dua skenario model berdasarkan pedoman IPCC 2019 Refinement. Skenarionya ada seperti pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Skenario perhitungan emisi

Skenario 1 (Kondisi Eksisting)	Skenario 2 (Kondisi Ideal)
Beban organik yang masuk menggunakan rata rata C_{in}	Beban organik yang masuk menggunakan nilai beban organik yang sama dengan kondisi eksisting
Efluen langsung ke perairan terbuka (% penyisihan 50% dari default IPCC)	<p>Distribusi Neraca Massa:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 65% Beban: Tersisihkan sebagai lumpur dalam tangki (mengacu pada efisiensi penyisihan COD tangki septik konvensional dalam Nasr & Mihkaeil, (2013)). • Dari 65% lumpur tersebut, 30% dipindahkan ke IPLT dengan penyedotan karena berdasarkan rekomendasi, lumpur harus dijaga agar tidak melebihi 30% dari volume tangki (Mahon et al., 2022). • 35% beban: Dilepas sebagai efluen, merupakan pengurangan dari 65% beban organic yang berhasil disisihkan atau didegradasi. • 35% Beban: Terdegradasi secara biologis di dalam sistem (<i>biological loss</i>). 35% ini didapatkan dari lumpur tangki-lumpur yang dibawa ke IPLT

Total emisi dihitung dengan menjumlahkan emisi langsung dari sistem (*on-site*) dan emisi tidak langsung dari pembuangan efluen (*disposal pathway*) menggunakan persamaan:

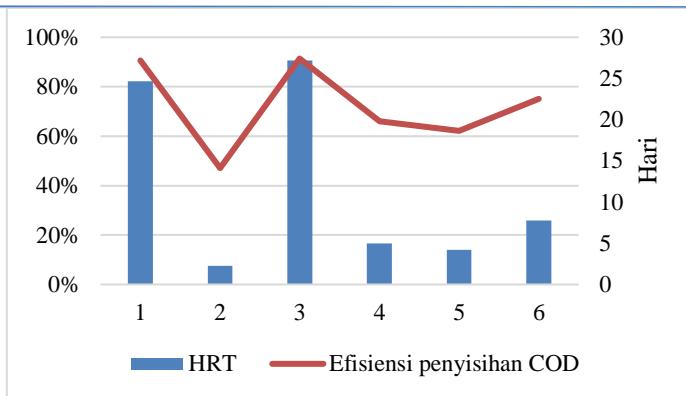
$$\text{Emisi } CH_4 = [\sum_j (TOW - Sj) \times EFj - Rj \text{ (pers. 4)}$$

Total emisi tahunan ditentukan oleh beban organik total yang masuk ke sistem (TOW kg COD/tahun), dikurangi dengan fraksi organik yang disisihkan sebagai lumpur (S) dan jumlah metana yang dipulihkan atau dibakar (R). Hasil neraca massa tersebut dikalikan dengan Faktor Emisi (EF) yang merupakan fungsi dari kapasitas produksi metana maksimum (B_0) dan *Methane Correction Factor* (MCF) yang merepresentasikan derajat kondisi anaerobik sistem spesifik.

3. Hasil dan Pembahasan

Evaluasi Kinerja Hidrolis dan Karakteristik Influen

Data yang diperoleh menunjukkan variasi yang cukup besar pada HRT antar tangki, mulai dari 2 hingga 27 hari. Variasi ini mengindikasikan bahwa tidak ada standar desain yang diterapkan di lapangan, di mana tangki dengan HRT lebih dari 20 hari memiliki ukuran yang cukup besar 4,76-5,6 m³ dengan rasio air dalam tangki lebih besar dibandingkan lumpur. Sedangkan tangki dengan HRT kurang dari 2 hari menunjukkan adanya masalah yaitu HRT yang tidak optimal.



Gambar 2. Hubungan HRT dengan efisiensi penyisihan COD

Masalah ini dapat mengurangi efisiensi penguraian mikroorganisme anaerobik karena singkatnya waktu kontak limbah dengan lumpur sehingga biomassa terhanyut bersama air limbah yang keluar melalui outlet, sehingga proses degradasi bahan organik menjadi tidak optimal (Lesmana., 2018). Hal ini menyebabkan penurunan penyisihan bahan organik secara signifikan, disebutkan dalam penelitiannya, volume tangki septik yang dibutuhkan untuk retensi air limbah dengan debit 120L/hari selama 15 jam adalah sebesar 0,075 m³. Studi oleh Nasr & Mikhaeil, (2013) menunjukkan kecilnya efisiensi penyisihan COD yaitu 53,4% pada HRT 24 jam dibandingkan dengan HRT 72 jam dengan kemampuan penyisihan mencapai 63,3% di tangki septic konvensional. Rendahnya efisiensi pengolahan pada sistem septic dengan HRT yang lebih pendek menunjukkan bahwa proses anaerobik memerlukan waktu tinggal yang cukup untuk dapat mengurai bahan organik secara efisien. Selain itu, rendahnya kinerja penyisihan organik pada tangki septik eksisting dapat disebabkan oleh akumulasi lumpur, yang mengurangi kinerja efektif tangki yang sejalan dengan temuan Moonkawin et al., (2023), dalam studinya terhadap tangki septik dengan interval penyedotan 4 - 23 tahun, ditemukan bahwa akumulasi lumpur secara drastis menurunkan volume efektif, menyebabkan efisiensi penyisihan BOD rata-rata hanya mencapai 37%. Hal ini mengonfirmasi bahwa tanpa penyedotan lumpur terjadwal, fungsi pengolahan akan menurun secara signifikan.

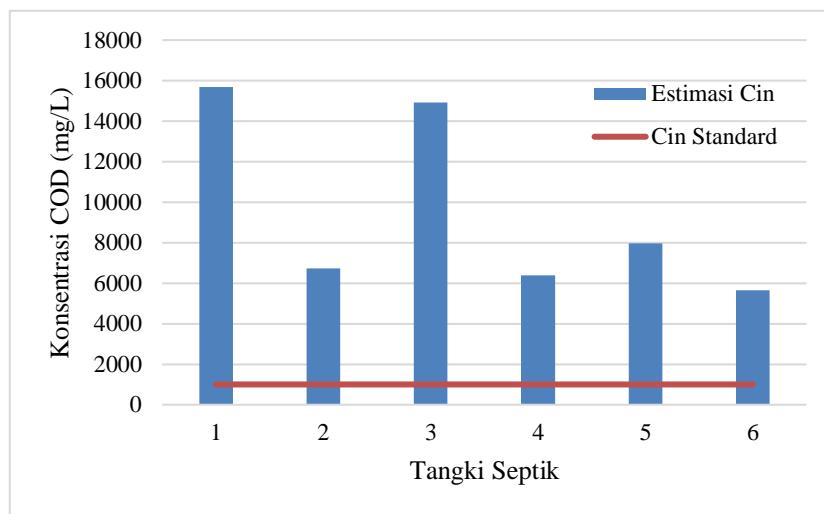
Estimasi Beban Pencemar Influen

Visualisasi pada **Gambar 3** memperlihatkan perbedaan yang signifikan antara beban pencemar aktual dengan standar pada kriteria desain. Garis oranye merepresentasikan ambang batas konsentrasi COD tipikal untuk air limbah domestik tercampur (1.000 mg/L) sebagaimana diasumsikan dalam standar perencanaan. Sebaliknya, batang biru menunjukkan bahwa seluruh unit tangki septic sampel menerima beban influen yang jauh melampaui ambang batas tersebut, dengan nilai rata-rata mencapai 9556 mg/L. Kondisi ini secara visual mengonfirmasi hipotesis bahwa sistem eksisting beroperasi dengan rasio pengenceran air yang sangat rendah karena limbah yang masuk ke dalam tangki hanya berasal dari toilet (*blackwater*) dan diperparah oleh fenomena pelarutan lumpur lama (*sludge hydrolysis*) akibat absennya penyedotan rutin.

Studi lain di Indonesia menunjukkan bahwa lumpur tinja dari tangki septic memiliki variabilitas COD yang sangat tinggi, dengan nilai COD bisa mencapai 30.000 - 60.000 mg/L pada lumpur padat. Rasio VSS/TSS ditemukan berkisar 0,55 – 0,75, menandakan bahwa sebagian besar padatan adalah organik yang *biodegradable*. Estimasi konsentrasi COD influen yang tinggi pada studi ini selaras dengan profil karakteristik lumpur tinja di Indonesia yang dilaporkan oleh (Harahap et al., 2021) Tingginya rasio VSS/TSS (>0.6) pada lumpur eksisting mengindikasikan bahwa materi organik yang tertahan di dalam tangki masih memiliki potensi degradasi biologis yang besar, namun terhambat oleh kondisi operasional yang tidak optimal.

Mengacu pada mekanisme degradasi anaerobik yang dijelaskan oleh Elmitwalli, (2013) dan Korsak & Moreno, (2006), lumpur tinja yang terakumulasi dalam jangka panjang akan mengalami degradasi enzimatik, di mana fraksi organik partikulat dipecah menjadi senyawa organik terlarut. Pada tangki septic yang tidak mengalami penyedotan rutin seperti pada kasus ini, laju akumulasi padatan melebihi laju stabilisasi, menyebabkan zona lumpur mendominasi volume tangki. Akibatnya, senyawa organik yang terlarut tersebut tidak memiliki waktu tinggal air yang cukup untuk menjernihkan efluen melainkan terakumulasi dalam fasa cair atau hanyut terbawa aliran (*washout*). Hal inilah yang menyebabkan beban organik dalam cairan tangki terukur sangat tinggi, merepresentasikan gabungan beban harian dan akibat

penguraian lumpur padat menjadi cairan. Sementara itu, tumpukan lumpur juga terus memproduksi gas yang kemudian dapat lepas secara tidak terkontrol.

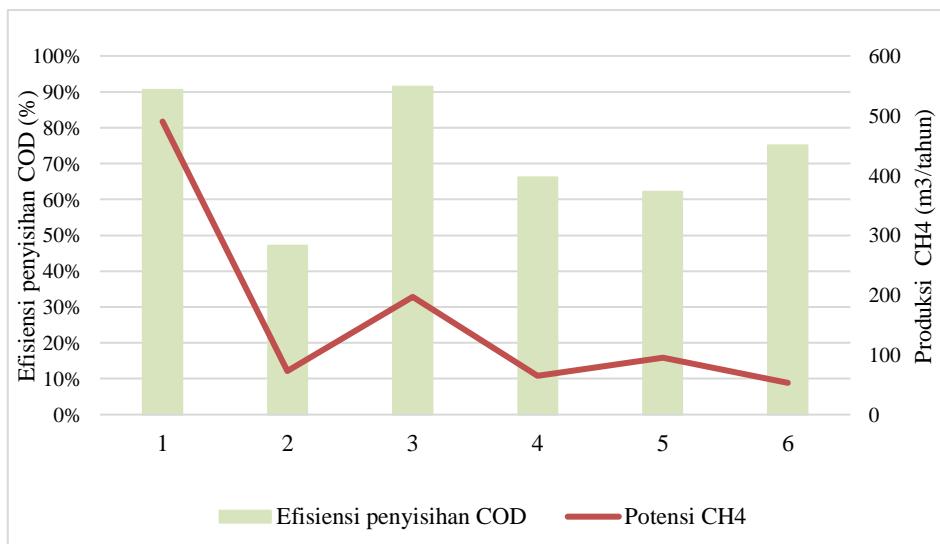


Gambar 3. Perbandingan estimasi influen COD(*mixture*) pengukuran dengan standard COD

Validasi Kinerja Biologis dan Potensi Emisi Metana

Potensi Pembentukan Metana Teoritis

Untuk memvalidasi aktivitas biologis di dalam tangki, dilakukan analisis korelasi antara kinerja penyisihan beban organik (efisiensi *removal*) dengan potensi pembentukan gas metana teoritis V_{CH4} . Pendekatan ini didasarkan pada prinsip neraca massa, di mana beban COD yang berhasil disisihkan dari fase cair ($MCOD_{removed}$), diasumsikan terkonversi menjadi produk akhir berupa biomassa dan biogas melalui proses degradasi anaerobik.



Gambar 4. Korelasi antara Efisiensi Penyisihan COD dan Potensi Produksi Gas Metana Teoritis

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tangki septik eksisting memiliki potensi pembentukan metana yang signifikan, berkisar antara 53 - 490 $m^3/tahun$ pada tiap unit tangki. Unit dengan efisiensi penyisihan tertinggi, yaitu ST 1 dan ST 3 (mencapai 91%), memiliki potensi produksi metana yang paling signifikan, masing-masing sebesar 490 dan 197 $m^3/tahun$. Tingginya konversi ini mengindikasikan bahwa proses *methanogenesis* berjalan aktif, di mana biomassa bakteri memiliki waktu kontak yang cukup untuk mendegradasi substrat organik menjadi gas. Hal ini sejalan dengan studi (Elmitwalli, 2013) yang menyatakan bahwa pada sistem dengan waktu retensi panjang, lumpur akan mengalami stabilisasi lanjut yang dikonversi menjadi metana dengan efisiensi hingga 60%.

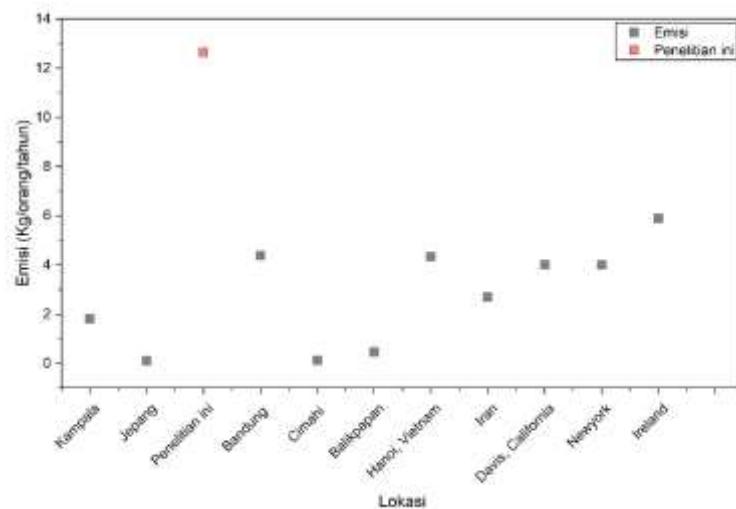
Tingginya produksi gas pada unit-unit ini bukan disebabkan oleh akumulasi lumpur, melainkan karena waktu kontak yang panjang. Volume cairan yang besar memungkinkan proses degradasi anaerobik

berjalan lebih tuntas. Mengacu pada studi Nasr & Mikhail (2013), perpanjangan waktu tinggal (HRT) dari 24 jam menjadi 72 jam terbukti meningkatkan efisiensi penyisihan COD secara signifikan, yang secara stoikiometri berkorelasi langsung dengan peningkatan volume gas metana yang terbentuk. Sebaliknya, pada unit dengan rasio lumpur tinggi dan HRT singkat, produksi gas metana justru lebih rendah. Hal ini mengindikasikan terjadinya kegagalan proses metanogenesis akibat *washout*, di mana biomassa bakteri dan substrat organik hanyut terbawa efluen sebelum sempat terkonversi menjadi biogas.

Chatterjee et al., (2019) melaporkan bahwa lumpur tangki septik yang terurai sebagian (*partially digested*) memiliki potensi produksi biogas yang tinggi karena kandungan substrat organik yang telah terhidrolisis. Artinya, secara biologis, tangki-tangki ini berfungsi aktif sebagai bioreaktor, namun ketiadaan sistem penangkap gas menyebabkan seluruh potensi energi ini berubah status menjadi emisi. Kondisi ini menimbulkan sebuah paradoks karena, tangki septik yang berkinerja optimal dalam melindungi badan air dengan efisiensi penyisihan bahan organic yang besar justru memiliki potensi jejak karbon terbesar jika gas yang dihasilkan tidak dikelola dan terlepas sebagai emisi fugitif. Gwenzi et al., (2023) juga menyatakan bahwa meskipun teknologi sanitasi setempat (seperti tangki septik/cubluk) adalah pilihan utama untuk melindungi kesehatan masyarakat, teknologi tersebut sekaligus menjadi hotspot polusi untuk kontaminan dan emisi gas rumah kaca (metana).

Estimasi Jejak Karbon dan Implikasi Skenario Perbaikan

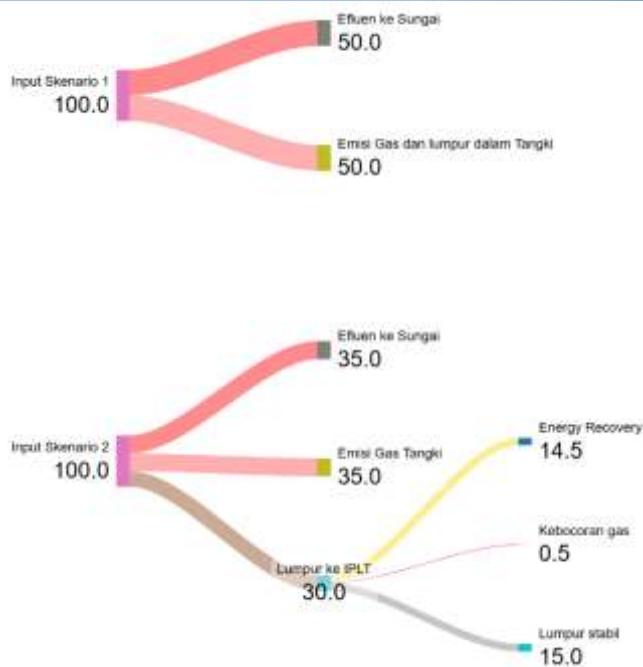
Adanya *trade-off* pada sistem eksisting yaitu unit dengan kinerja penyisihan organik terbaik (seperti ST 1, efisiensi 91%) justru memiliki potensi pembentukan gas metana terbesar akibat tidak adanya pengelolaan lanjutan. Studi LCA (Humaira & Rahmah, 2024) membandingkan berbagai sistem dan menemukan bahwa sistem *on-site* individual memiliki Jejak karbon yang sangat tinggi (0,71 kg CO₂eq/m³), jauh lebih tinggi dibandingkan sistem komunal atau terpusat. Selain itu, kondisi sanitasi pada area studi yang telah melampaui batas desainnya, dengan interval penyedotan yang panjang menyebabkan akumulasi padatan dan tidak maksimalnya proses penguraian bahan organik seperti pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Perbandingan emisi penelitian dengan studi lain

Sumber: Kampala (Johnsons, 2022), Jepang (UNFCC, 2023), Bandung (Muin et al., 2025), Cimahi (Christina et al., 2022), Balikpapan, Hanoi (Huynh et al., 2021), Iran (Nayeb et al., 2019), California (Leverenz et al., 2010), Newyork (Truhlar et al., 2016), Ireland (Somlai et al., 2019)

Gambar 5. memperlihatkan posisi emisi metana tanki septik Bandung dibandingkan beberapa studi di kota lain di dunia, baik berdasarkan pengukuran langsung maupun estimasi teoritis. Hasilnya, baik perhitungan teoritis maupun pengukuran langsung pada penelitian ini nilainya lebih besar dibandingkan penelitian lain di wilayah lain. Untuk mengatasi permasalahan ini, penelitian ini memodelkan skenario perbaikan (skenario 2) yang mentransformasi sistem dari hanya pembuangan menjadi pengelolaan terintegrasi. Skenario ini mengasumsikan penerapan standar teknis tangki septik (SNI 2398:2017) yang dikombinasikan dengan Layanan Lumpur Tinja Terjadwal (LLTT), sehingga lumpur dapat dipindahkan ke instalasi terpusat (IPLT) untuk pemulihan energi dengan berbasis neraca massa (**Gambar 6**).



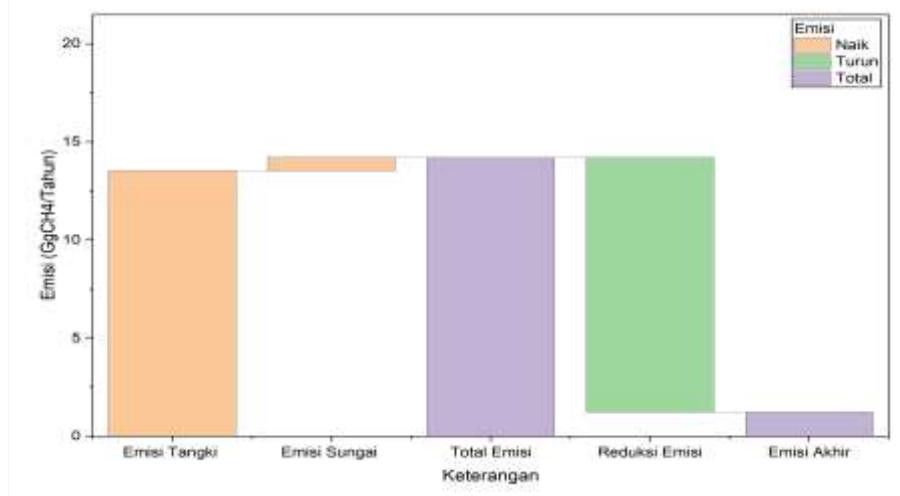
Gambar 6. Skenario pengolahan sistem sanitasi eksisting (1) dan perbaikan (2)

Hasil simulasi model neraca massa menunjukkan perbedaan signifikan dampak lingkungan antara kedua scenario. Pada skenario 1, terlihat bahwa beban organik terdistribusi secara tidak terkontrol dengan separuh dari massa organik terakumulasi di dalam tangki septik. Massa ini terdegradasi secara anaerobik dan terlepas sebagai Emisi Fugitif ke atmosfer sehingga menjadi emisi gas rumah kaca yang signifikan. Selain itu, fraksi massa yang tersisa lolos sebagai efluen. Berdasarkan data efisiensi yang rendah dan HRT yang tidak optimal, efluen ini diklasifikasikan sebagai polusi tinggi, berkontribusi pada risiko *eutrofikasi* dan degradasi kualitas air di badan air penerima.(Brewton et al., 2022).

Skenario 2 merupakan skenario ideal mengacu pada pedoman yang diatur dalam Permen PUPR No.4 Tahun 2017. Mayoritas beban organik dialihkan ke IPLT dan di dalam IPLT, lumpur mengalami dekomposisi lanjutan melalui *Anaerobic Digester* (AD), sebuah teknologi yang dapat memulihkan energi. Fraksi ini kemudian terpecah di dalam IPLT menjadi energi dan residu lumpur. Diasumsikan bahwa 14,5% dari total beban awal terkonversi menjadi biogas, sementara 15% tersisa sebagai lumpur stabil. Asumsi konversi massa biologis ini didasarkan pada karakteristik lumpur tinja eksisting yang telah mengalami stabilisasi parsial di dalam tangki septic. Hal ini sejalan dengan temuan (Chatterjee et al., 2019) yang menyatakan bahwa lumpur septic memiliki potensi produksi biogas spesifik yang lebih rendah dibandingkan lumpur segar akibat waktu penyimpanan yang lama (*long storage time*). Selain itu, Harahap et al., (2021) melaporkan tingginya fraksi padatan inorganik pada lumpur tinja di Indonesia, yang membatasi persentase reduksi volatil solid pada kisaran 40-50% dari beban masuk. Hanya 10% massa yang lolos sebagai efluen, mengindikasikan kepatuhan terhadap baku mutu. Sisanya, yaitu degradasi biologis merupakan degradasi di sistem septic tank domestik yang sudah terkelola.

Mitigasi Emisi dan Pemulihan Energi

Komparasi hasil pemodelan menunjukkan potensi mitigasi emisi yang masif, terangkum dalam **Gambar 7** yang memperlihatkan penurunan total emisi metana proyeksian dari 13,52 Gg CH₄/Tahun menjadi 2,19 Gg CH₄/Tahun pada skenario 2. Penurunan signifikan sebesar 91% ini membuktikan bahwa pengalihan beban organik dari sistem *unmanaged* ke *managed* adalah strategi mitigasi iklim yang paling efektif di sektor sanitasi. (Muin et al., 2025) dalam temuannya menyatakan CO₂e dari sistem tangki septic sebesar 33,45 ktCO₂eq/tahun yang mana setara dengan emisi pada scenario 2 dan lebih besar dibandingkan dengan emisi dari IPAL komunal yang disebabkan oleh jumlah pengguna tangki septic yang lebih besar.



Gambar 7. Proyeksi emisi berdasarkan metode IPCC

Mitigasi emisi dicapai melalui perubahan fundamental dalam cara metana diperlakukan. Adanya transfer beban organik terkelola dipindahkan dari septic tank rumah tangga ke IPLT (74%). Skenario 2 selanjutnya mengubah lumpur tinja dari polutan menjadi sumber energi, mendukung konsep *resource recovery* dan *circular economy*. Dari fraksi sludge terkelola, potensi energi yang dapat dipulihkan adalah sebesar 22.9 GWh/Tahun. Angka ini berasal dari konversi biogas metana di digester AD menjadi energi listrik. Potensi pemulihan energi dari pengolahan air limbah saat ini di India ditemukan sebesar $15,3 \times 10^5$ MWh untuk pembakaran dan $8,6 \times 10^5$ MWh per tahun untuk pencernaan anaerobic (Singh et al., 2020). Pemanfaatan metana ini sangat penting, karena nilai energi yang terpulihkan memberikan nilai ekonomi bagi investasi infrastruktur IPLT, mengubah perspektif pengeluaran (biaya pengolahan) menjadi potensi pendapatan. Integrasi *Anaerobic Digestion* (AD) dalam rantai layanan sanitasi diakui secara global sebagai teknologi inti untuk memecahkan krisis sanitasi sekaligus menghasilkan energi. Zawartka et al., (2020) mengembangkan model LCA untuk sistem pengumpulan-pengangkutan-pengolahan air limbah dan juga menunjukkan bahwa elemen septic tank memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca sepanjang daur hidup, terutama pada fase penggunaan ketika metana tidak tertangkap.

Pentingnya pemenuhan baku mutu efluen pada Skenario 2 tidak hanya untuk mereduksi beban organik, tetapi juga mencegah dampak ekologis lanjutan. Brewton et al., (2022) menyoroti bahwa koneksi hidrologis antara sistem septic yang buruk dengan badan air permukaan merupakan pendorong utama eutrofikasi dan ledakan alga berbahaya. Oleh karena itu, skenario perbaikan harus menjamin kualitas efluen yang aman sebelum dilepas ke lingkungan. Transformasi menuju Skenario Ideal (Skenario 2) mengubah tujuan pengelolaan dari sekadar pembuangan menjadi pemulihan sumber daya. Sebagaimana diulas oleh (Boiocchi et al., 2025), (Yu et al., 2023), (Zawartka et al., 2020), (Pratama et al., 2021) jejak karbon sistem desentralisasi dapat diminimalisir secara signifikan jika dikombinasikan dengan strategi pemulihan energi biogas. Integrasi pengumpulan lumpur ke instalasi terpusat (IPLT) berbasis Anaerobic Digestion menjadi kunci keberlanjutan sistem sanitasi masa depan (Almansa et al., 2023).

4. Kesimpulan

Sistem sanitasi *on-site* di lokasi studi beroperasi dalam kondisi *overloading* beban organik, diperparah oleh interval penyedotan lumpur yang sangat panjang (> 5 tahun). Kondisi ini menciptakan kontradiksi di mana unit dengan retensi hidrolis panjang justru menjadi kontributor emisi fugitif terbesar, menghasilkan total estimasi emisi metana sebesar 13,52 Gg/Tahun. Penerapan skenario perbaikan sederhana, yaitu apabila menerapkan regulasi pemerintah yang ada saat ini yaitu mengintegrasikan standar teknis (SNI 2398:2017) dengan Layanan Lumpur Tinja Terjadwal (LLTT), terbukti efektif menurunkan potensi emisi metana secara signifikan hingga 91%. Total emisi diproyeksikan turun menjadi 1,22 Gg/Tahun. Transformasi menuju sistem terpusat (IPLT) memberikan manfaat ganda (*co-benefits*) berupa potensi pemulihan energi listrik sebesar 22.9 GWh/Tahun. Temuan ini menegaskan bahwa manajemen lumpur tinja tidak hanya vital untuk perlindungan badan air dan mitigasi iklim, tetapi juga bernilai ekonomi sebagai sumber energi terbarukan dalam kerangka *circular bioeconomy*.

5. Daftar Pustaka

- Almansa, X. F., Starostka, R., Raskin, L., Zeeman, G., De Los Reyes, F., Waechter, J., Yeh, D., & Radu, T. (2023). Anaerobic Digestion as a Core Technology in Addressing the Global Sanitation Crisis: Challenges and Opportunities. *Environmental Science and Technology*, 57(48), 19078–19087. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05291>
- Boiocchi, R., Mainardis, M., Rada, E. C., Ragazzi, M., & Salvati, S. C. (2025). Trends of N₂O production during decentralized wastewater treatment: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114627>
- Brewton, R. A., Kreiger, L. B., Tyre, K. N., Baladi, D., Wilking, L. E., Herren, L. W., & Lapointe, B. E. (2022). Septic system–groundwater–surface water couplings in waterfront communities contribute to harmful algal blooms in Southwest Florida. *Science of the Total Environment*, 837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155319>
- Chatterjee, P., Ghangrekar, M. M., & Rao, S. (2019). Biogas Production from Partially Digested Septic Tank Sludge and its Kinetics. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 387–398. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0065-0>
- Christina, B., Dwi, N., Dan, N., & Syifa, N. (n.d.). *Volume 2 , Nomor 2 (2022) Cair Domestik Sebagai Energi Listrik Di Kota Cimahi*.
- Elmitwalli, T. (2013). Sludge accumulation and conversion to methane in a septic tank treating domestic wastewater or black water. *Water Science and Technology*, 68(4), 956–964. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.337>
- Gwenzi, W., Marumure, J., Makuvava, Z., Simbanegavi, T. T., Njomou-Ngounou, E. L., Nya, E. L., Kaetzl, K., Noubactep, C., & Rzymski, P. (2023). The pit latrine paradox in low-income settings: A sanitation technology of choice or a pollution hotspot? In *Science of the Total Environment* (Vol. 879). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163179>
- Harahap, J., Gunawan, T., Suprayogi, S., & Widayastuti, M. (2021). A review: Domestic wastewater management system in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 739(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/739/1/012031>
- Humaira, A. N. S., & Rahmah, U. A. (2024). Climate change impact assessment of various wastewater treatment facilities: A case study in Bandung City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1353(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1353/1/012002>
- 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 and Technology*, 55(2), 1209–1217. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03418>
- Korsak, L., & Moreno, L. (2006). Evaluation of anaerobic sludge activity in wastewater treatment plants in Nicaragua. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 95, 571–579. <https://doi.org/10.2495/WP060561>
- Leverenz, H. L., Tchobanoglous, P. E. G., Jeannie, P. E., & Darby, L. (2010). *Evaluation Of Greenhouse Gas Emissions From Septic Systems DEC1R09 Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from Septic Systems ii*. www.werf.org/werf@werf.org
- Mahon, J. Mac, Knappe, J., & Gill, L. W. (2022). Sludge accumulation rates in septic tanks used as part of the on-site treatment of domestic wastewater in a northern maritime temperate climate. *Journal of Environmental Management*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114199>
- Moonkawin, J., Huynh, L. T., Schneider, M. Y., Fujii, S., Echigo, S., Nguyen, L. P. H., Hoang, T. H. T., Huynh, H. T., & Harada, H. (2023). Challenges to Accurate Estimation of Methane Emission from Septic Tanks with Long Emptying Intervals. *Environmental Science and Technology*, 57(43), 16575–16584. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05724>

Muin, A., Soewondo, P., & Yudison, A. P. (2025). *Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Sistem Pengolahan Air Limbah Domestik sebagai Dasar Pendekatan Perencanaan Sanitasi Rendah Karbon di Kota Bandung*. X(4).

Nasr, F. A., & Mikhaeil, B. (2013). Treatment of domestic wastewater using conventional and baffled septic tanks. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(16), 2337–2343. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.767285>

Nayeb, H., Mirabi, M., Motiee, H., Alighardashi, A., & Khoshgard, A. (2019). Estimating greenhouse gas emissions from Iran's domestic wastewater sector and modeling the emission scenarios by 2030. *Journal of Cleaner Production*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117673>

Okereke, C. D. (1997). Process Kinetics Of Septic Tanks. In *Environment Protection Engineering* (Vol. 23).

Pratama, M. A., Amrina, U., & Kristanto, G. A. (2021). Estimation of greenhouse gases from sewage from on-site sewage management system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/724/1/012031>

Santiago-Díaz, Á. L., Mugica-Álvarez, V., de los Cobos-Vasconcelos, D., Vaca-Mier, M., & Salazar-Peláez, M. L. (2021). Performance evaluation and kinetic modeling of an upflow anaerobic sludge blanket septic tank for domestic wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(47), 67414–67428. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15141-5>

Singh, V., Phuleria, H. C., & Chandel, M. K. (2020). Estimation of energy recovery potential of sewage sludge in India: Waste to watt approach. *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122538>

Somlai, C., Knappe, J., & Gill, L. (2019). Spatial and temporal variation of CO₂ and CH₄ emissions from a septic tank soakaway. *Science of the Total Environment*, 679, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.449>

Truhlar, A. M., Rahm, B. G., Brooks, R. A., Nadeau, S. A., Makarsky, E. T., & Walter, M. T. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Septic Systems in New York State. *Journal of Environmental Quality*, 45(4), 1153–1160. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0478>

Yu, S., Deng, S., Zhou, A., Wang, X., & Tan, H. (2023). Life cycle assessment of energy consumption and GHG emission for sewage sludge treatment and disposal: a review. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 11). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1123972>

Zawartka, P., Burchart-Korol, D., & Blaut, A. (2020). Model of Carbon Footprint Assessment for the Life Cycle of the System of Wastewater Collection, Transport and Treatment. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62798-y>