

ANALISIS POTENSI EMISI GAS RUMAH KACA DARI AIR LIMBAH INDUSTRI PENGILANGAN

Narafa Nur Khairiyah^{1*}, Nindy Callista Elvania²

^{1,2}Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Bojonegoro, narafanur@gmail.com

ABSTRAK

Emisi gas rumah kaca (GRK) merupakan salah satu tantangan paling mendesak di zaman ini, yang mempengaruhi seluruh aspek lingkungan dan iklim global. Emisi ini menimbulkan tantangan lingkungan dan iklim yang signifikan. Pengelolaannya seringkali melibatkan pertimbangan yang kompleks, dan pengembangan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) adalah salah satu contoh dari hasil yang bertentangan tersebut. Studi ini bertujuan untuk mengukur dan menganalisis potensi emisi gas rumah kaca dari air limbah kilang dan peluang pemulihan energinya. Metode yang digunakan dalam studi ini melibatkan analisis laboratorium parameter COD dan penerapan estimasi emisi berbasis IPCC. Berdasarkan Pedoman IPCC 2006 menggunakan pendekatan TOW dan EF, potensi emisi metana yang diperkirakan adalah 2.560.747,47 kg CH₄/tahun (setara dengan 3.576.888 m³ CH₄/tahun). Jika sepenuhnya dipulihkan dan dimanfaatkan, metana ini dapat menghasilkan sekitar 13,56 GWh listrik per tahun dengan efisiensi konversi 38%. Hasil ini menunjukkan bahwa air limbah kilang minyak memiliki potensi signifikan baik sebagai sumber emisi gas rumah kaca maupun sebagai sumber energi terbarukan, yang menyoroti pentingnya pengelolaan air limbah berkelanjutan dalam mengurangi emisi industri.

Kata kunci : *Air Limbah, Emisi, Gas Rumah Kaca, Industri Pengilangan*

Penerbit : Fakultas Teknik Universitas Pasifik Morotai

1 PENDAHULUAN

Emisi gas rumah kaca (GRK) merupakan salah satu tantangan paling mendesak di zaman ini, yang mempengaruhi seluruh aspek lingkungan dan iklim global [1]. Dua komponen utama GRK adalah karbon dioksida dan metana, di mana gas metana memiliki potensi pemanasan global lebih dari 25 kali lipat dibandingkan karbon dioksida (CO₂) selama kurun waktu 100 tahun [2]. Emisi sering kali mengarah pada solusi pengelolaan yang memiliki hasil yang saling bertentangan, dan pembangunan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) adalah contohnya. Tren urbanisasi global saat ini memperburuk masalah pembuangan air limbah, yang telah menjadi titik fokus pengendalian pencemaran air selama hampir lima dekade [3]. Munculnya IPAL telah berhasil mengatasi tingkat dan keparahan fenomena eutrofikasi di seluruh dunia, tetapi juga menjadi sumber utama GRK yang dapat dihasilkan selama proses pengolahan air limbah [4][5]. Pengolahan air limbah menyumbang lebih dari 1,6% emisi GRK global dan mengonsumsi hampir 3% listrik global [6]. Akibatnya, penggunaan energi yang signifikan di IPAL merupakan sumber utama emisi gas rumah kaca (GRK), sehingga pengurangan konsumsi energi di IPAL menjadi sangat penting [7]. Selain jumlah energi yang besar digunakan di IPAL, proses pengolahan air limbah, pemeliharaan sistem, pencernaan lumpur, dan produksi serta transportasi

bahan bakar dan bahan kimia secara signifikan berkontribusi terhadap emisi GRK yaitu nitrogen dioksida (N₂O), metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂) [8]. Peningkatan emisi dari air limbah dapat memperburuk konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, yang merupakan salah satu penyebab utama perubahan iklim [2]. Tren global dan industri ini tercermin dalam profil emisi nasional Indonesia, yang terus meningkat meskipun ada upaya mitigasi.

Mengacu pada laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2024, total emisi GRK nasional Indonesia pada tahun 2023 tercatat sebesar 1.360.346,59 Gg CO₂e, meningkat sebesar 96,59 juta ton CO₂e dibandingkan tingkat emisi tahun 2000 sebagai awal inventarisasi GRK dilakukan dan meningkat 414,36 juta ton CO₂e dibanding tingkat emisi tahun 2010 sebagai tahun dasar perhitungan emisi GRK pada NDC (Nationally Determined Contribution). Pada tahun 2023, sektor limbah berkontribusi sebesar 136.335,38 Gg CO₂e atau sekitar 10,02% dari total emisi GRK nasional. Pada sektor limbah cair industri, penghitungan emisi GRK sudah menggunakan data spesifik, beberapa jenis industri sudah menggunakan parameter yang didapatkan dari industri secara langsung seperti debit air limbah, COD (Chemical Oxygen Demand) dan tipe pengolahan limbah yang digunakan [9].

Parameter Chemical Oxygen Demand (COD) menjadi indikator penting dalam menentukan potensi pembentukan emisi GRK dari air limbah. COD mengukur total bahan organik yang tersedia untuk oksidasi kimia (baik yang dapat terurai secara hayati maupun yang tidak dapat terurai secara hayati). Secara umum, air limbah dengan konsentrasi COD yang lebih tinggi umumnya menghasilkan lebih banyak metana dibandingkan air limbah dengan tingkat COD yang lebih rendah [10][11]. Oleh karena itu, pengendalian nilai COD tidak hanya berfungsi menjaga kualitas air buangan agar memenuhi baku mutu, tetapi juga menjadi langkah strategis dalam menurunkan potensi emisi GRK dari sektor air limbah industri pengilangan. Fakta tersebut menegaskan bahwa emisi GRK dari limbah cair, termasuk yang dihasilkan dari kegiatan industri pengilangan, merupakan salah satu sumber emisi GRK yang tidak dapat diabaikan. Oleh karena itu, analisis potensi emisi GRK dari air limbah industri pengilangan menjadi penting untuk dilakukan sebagai dasar upaya pengendalian emisi dan kontribusi terhadap target nasional pengurangan emisi GRK. Namun, studi kuantitatif yang menganalisis potensi emisi GRK dari air limbah kilang di Indonesia masih terbatas. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengukur dan menganalisis potensi emisi gas rumah kaca dari air limbah kilang dan peluang pemulihan energinya.

2 METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif untuk memperkirakan potensi emisi gas rumah kaca (GRK) dari air limbah kilang minyak dengan menggunakan analisis COD berbasis laboratorium dan model estimasi dari IPCC 2006 [12]. Penelitian dilaksanakan di PT. X yang terletak di Cepu, Jawa Tengah pada 3 s/d. 31 Januari 2025. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah COD (Chemical Oxygen Demand). Pengujian COD dilakukan menggunakan metode yang ditetapkan dalam SNI 6989.73:2009. Pengambilan sampel dan pengawetan mengikuti prosedur SNI 6989.73:2009 untuk memastikan integritas sampel.

Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain pemanas, buret otomatis, labu ukur, pipet, labu erlenmeyer, gelas piala, dan tabung reaksi. Untuk bahan yang digunakan adalah sampel air limbah, aquades, asam sulfat (H_2SO_4), perak sulfat (Ag_2SO_4), standar digestion: $K_2Cr_2O_7$, peraksi Ag_2SO_4 , indikator ferroin, standart Ferro Ammonium Sulfat (FAS).

Untuk menghitung TOW (*Total Organic Wastewater*) dan EF (*Emission Factor*) dari limbah industri kilang minyak berdasarkan Pedoman IPCC 2006:

1. TOW (*Total Organics Wastewater*)

TOW merupakan singkatan dari *Total Organic Wastewater*, total organik air limbah dalam jangka waktu satu tahun, dan satuannya dinyatakan dalam kg COD/tahun. Nilainya ditentukan berdasarkan perhitungan jumlah populasi yang dilayani serta nilai COD spesifik negara:

$$TOW_i = P_i \times W_i \times COD_i$$

Dimana:

TOW= Total organik air limbah (kgCOD/tahun)

P_i = total produksi (t/tahun)

W_i = Volume air limbah (m^3/t produk)

COD_i = Konsentrasi COD kg ($kgCOD/m^3$)

2. EF (*Emission Factor*)

Berdasarkan metodologi IPCC 2006, faktor emisi (EF) didefinisikan sebagai massa CH_4 , yang diemisikan per kg COD *biodegradable* influen untuk proses pengolahan dan air limbah tertentu. Faktor ini dihitung dengan mengalikan kapasitas maksimum penghasil CH_4 dan COD *biodegradable* (potensi penghasil metana, B_0) dengan faktor koreksi metana (MCF):

$$EF = B_0 \times MCF$$

Dimana:

EF= Faktor emisi

B_0 = kapasitas produksi metana maksimum ($kgCH_4/kgCOD$)

MCF= Faktor koreksi metana (-)

3 HASIL

3.1 Total Bahan Organik yang dapat Terurai dalam Air Limbah

Perhitungan Total Organik dalam Air Limbah (TOW) dilakukan untuk menentukan jumlah bahan organik yang berpotensi menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK)—khususnya metana—dari proses pengolahan air limbah industri kilang. Nilai TOW dihitung menggunakan data total produksi tahunan kilang, volume air limbah yang dihasilkan per unit produk, dan konsentrasi COD dalam air limbah.

Nilai total produksi industri kilang diperoleh dari laporan produksi tahunan fasilitas tersebut, dengan tingkat produksi harian sebesar 118.000 barel per hari. Dengan asumsi kilang beroperasi efektif selama 300 hari per tahun, total produksi tahunan dihitung sebagai berikut:

Perhitungan : $P_t = P_h \times H_o$

118.000 barel/hari \times 300 hari/tahun = 35.400.000 barel/tahun

Keterangan:

P_t = total produksi tahunan (barel/tahun)

P_h = produksi harian (barel/hari)

H_o = hari operasi efektif (hari/tahun)

Selanjutnya, total produksi dalam barel dikonversi menjadi ton menggunakan faktor konversi minyak mentah berdasarkan Tabel Lampiran HEESI Indonesia 2025 yang diterbitkan oleh Pusat Data dan Informasi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (Pusdatin ESDM), yang menyatakan bahwa 1 barel = 0,136 ton.

Maka:

35.400.000 barel/tahun \times 0,136 ton/barel = 4.814.400 ton/tahun

Volume air limbah yang dihasilkan per unit produk diperoleh dari catatan operasional instalasi pengolahan air limbah (WWTP) di fasilitas kilang. Berdasarkan pengamatan, volume air limbah rata-rata yang dihasilkan adalah 91,8 m³/ton produk.

Nilai COD ditentukan melalui pengujian laboratorium menggunakan titrasi refluks tertutup. metode (SNI 6989.73:2009). Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh data sebagai berikut:

A = 3,17 mL (volume titrasi blanko)

B = 3,10 mL (volume titrasi sampel)

N = 0,05 (normalitas larutan fero amonium sulfat)

Volume sampel = 2,5 mL (volume total campuran digesti = 7,5 mL)

Faktor pengenceran = 10

Dengan demikian,

$$\begin{aligned} COD &= \frac{(A - B) \times N \times 8000}{mL\ sample} \times \text{dilution} \\ &= \frac{(3,17 - 3,10) \times 0,05 \times 8000}{2,5} \times 10 \\ &= \frac{28}{2,5} \times 10 = 11,2 \times 10 \\ &= 112 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

Ketiga data utama ini—produksi, volume air limbah, dan COD—kemudian digunakan untuk menghitung Total Organik dalam Air Limbah (TOW) menggunakan rumus dari Pedoman IPCC 2006:

$$TOW_i = P_i \times W_i \times COD_i$$

Dimana:

TOW= Total organik air limbah (kgCOD/tahun)

P_i = total produksi (t/tahun)

W_i = Volume air limbah (m³/t produk)

COD_i = Konsentrasi COD kg (kgCOD/m³)

Nilai yang dihasilkan mewakili total bahan organik yang dapat terurai dalam air limbah kilang, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Total Bahan Organik yang Dapat Terurai Dalam Air Limbah Untuk Setiap Industri Pengilangan

Sektor	Limbah			
Kategori	pengolahan air limbah dan pembuangan industri			
Kode Kategori	4D2			
Lembar	1 dari 3: Total Bahan Organik yang Dapat Terdegradasi dalam Air Limbah untuk Setiap Kilang Minyak			
	A	B	C	D
Kilang minyak	Total produk industri (P i) (t produk /tahun)	Air limbah yang dihasilkan (W i) (m ³ / produk)	Kebutuhan Oksigen Kimiawi (COD i) (kgCOD / m ³)	Jumlah Total Bahan Organik yang Dapat Terdegradasi dalam Air Limbah untuk Setiap Kilang Minyak (TOW i) (kgCOD /tahun) D = A x B x C
Kilang minyak Total	4.814.400	91,8	0,112	49.592.678,78 49.592.678,78

Nilai TOW yang diperoleh dari hasil perhitungan menunjukkan jumlah total bahan organik yang terkandung dalam air limbah industri pengilangan. Informasi ini menjadi dasar penting dalam menentukan potensi pencemaran air limbah industri pengilangan terhadap lingkungan, terutama terkait kontribusinya terhadap emisi GRK seperti metana yang dapat terbentuk melalui proses dekomposisi anaerobik bahan organik pada IPAL. Semakin tinggi nilai COD, semakin besar pula potensi pembentukan gas metana [12]. Oleh karena itu, nilai TOW yang diperoleh digunakan sebagai data aktivitas utama dalam tahap selanjutnya untuk menghitung estimasi emisi GRK berdasarkan metode yang direkomendasikan oleh IPCC Guidelines 2006.

3.2 Estimasi Faktor Emisi Gas Metana untuk Air Limbah Industri

Penentuan faktor emisi metana merupakan tahap penting dalam menghitung emisi gas rumah kaca (GRK) dari air limbah industri [13]. Faktor emisi metana digunakan untuk memperkirakan jumlah metana yang dilepaskan dari setiap unit bahan organik yang dapat terdegradasi dalam air limbah. Menurut Pedoman IPCC 2006, besarnya emisi metana dipengaruhi oleh dua parameter kunci: kapasitas produksi metana maksimum (B_0) dan faktor koreksi metana (MCF). Nilai B_0 mewakili potensi maksimum bahan organik dalam air limbah untuk menghasilkan metana selama degradasi anaerobik. Parameter ini dinyatakan dalam kilogram CH_4 per kilogram COD (Kebutuhan Oksigen Kimia). Nilai B_0 bervariasi tergantung pada jenis air limbah dan komposisi bahan organik [14], [15]. Meskipun parameter B_0 telah dipelajari, hanya sedikit penelitian yang dilakukan di sektor industri, dan data yang tersedia masih terbatas. Kapasitas produksi metana maksimum (B_0) mengacu pada

potensi produksi CH₄ dalam kondisi eksperimental ideal, yang mungkin tidak secara akurat mencerminkan lingkungan pengolahan atau konfigurasi sistem yang sebenarnya. Hal ini terkait erat dengan pemilihan proses dan biasanya menunjukkan fluktuasi minimal [16]. Berbagai negara menggunakan data ini dalam inventarisasi GHG nasional mereka; oleh karena itu, nilai yang direkomendasikan dari Pedoman Praktik Baik (GPG) — 0,25 kg CH₄ per kg COD atau 0,6 kg CH₄ per kg BOD — umumnya diterapkan dalam perhitungan emisi [17].

Nilai MCF mencerminkan efisiensi pembentukan metana berdasarkan kondisi operasional sistem pengolahan air limbah—semakin anaerobik kondisinya, semakin tinggi nilai MCF. Dalam penelitian ini, nilai standar dari pedoman IPCC (2006) digunakan, yaitu:

$$B_0 = 0,25 \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}$$

$$MCF = 0,8 \text{ (faktor koreksi metana untuk sistem kolam anaerobik)}$$

Faktor emisi dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$EF = B_0 \times MCF$$

$$EF = 0,25 \times 0,8 = 0,20 \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}$$

Keterangan:

EF = faktor emisi metana (kg CH₄/kg COD)

B₀ = kapasitas produksi metana maksimum (kg CH₄/kg COD)

MCF = faktor koreksi metana (fraksi)

Tabel 2 menyajikan data hasil perhitungan faktor emisi metana yang berasal dari air limbah kilang minyak.

Tabel 2. Faktor Emisi Metana dari Limbah Air Kilang Minyak

Sektor	Limbah		
Kategori	Pengolahan dan Pembuangan Air Limbah Industri		
Kode Kategori	4D2		
Lembaran	2 dari 3: Faktor Emisi Metana dari Air Limbah Kilang Minyak		
LANGKAH 2	A	B	C
Jenis perawatan	Potensi Produksi Metana Maksimum	Faktor Koreksi Metana untuk Sistem Pengolahan	Faktor Emisi
	(B ₀) (kg CH ₄ / kg COD)	(MCF) (-)	(EF) (kg CH ₄ /kg C OD) C = A x B
	0,25	0,8	0,20
Total			0,20

Berdasarkan hasil pada Tabel 2, faktor emisi (EF) untuk air limbah kilang minyak ditentukan sebesar 0,20 kg CH₄/kg COD. Nilai ini mewakili jumlah metana yang dihasilkan per unit bahan organik yang terdegradasi dalam kondisi pengolahan anaerobik. Informasi ini sangat penting, karena berfungsi sebagai parameter kunci untuk langkah selanjutnya: menghitung total emisi metana dari air limbah kilang minyak dengan mengalikan EF ini dengan nilai TOW yang telah ditentukan sebelumnya.

3.3 Estimasi Emisi Gas Metana dari Limbah Air Industri

Emisi metana bersih yang dihasilkan dari proses pengolahan air limbah dihitung dengan mempertimbangkan nilai TOW, jumlah lumpur yang dibuang (*sludge/S*), factor emisi sistem pengolahan (EF), dan metana yang dipulihkan (*Recovered CH₄/R*). Perhitungan mengikuti metodologi yang diuraikan dalam pedoman IPCC 2006.

Metana memiliki Potensi Pemanasan Global (GWP) yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan karbon dioksida. Menurut Laporan Penilaian Keempat IPCC (AR4), yang berfungsi sebagai referensi dalam Pedoman IPCC 2006, GWP₁₀₀ untuk CH₄ adalah 25. Nilai ini digunakan dalam laporan ini untuk menjaga konsistensi dengan metodologi IPCC 2006.

Sebelum menghitung total emisi metana bersih dari pengolahan air limbah kilang, diperlukan dua perhitungan pendahuluan: jumlah lumpur yang dibuang dari sistem pengolahan dan jumlah metana yang berhasil dipulihkan. Parameter ini penting karena memengaruhi bagian bahan organik yang sebenarnya diubah menjadi metana. Lumpur yang dibuang mewakili bahan organik yang tidak terurai menjadi gas dan oleh karena itu harus dikurangi dari nilai TOW sebelum perhitungan emisi [18]. Sementara itu, metana yang dipulihkan mewakili bagian gas yang tidak lolos ke atmosfer dan juga harus dikurangi dari total emisi untuk mendapatkan nilai emisi bersih.

1. Perhitungan

Lumpur yang Dibuang Lumpur adalah endapan padatan organik yang terbentuk selama proses pengolahan air limbah [19]. Komponen ini penting untuk dipertimbangkan karena bahan organik yang terkandung dalam lumpur tidak mengalami degradasi anaerobik menjadi gas metana [20]. Oleh karena itu, jumlah lumpur yang dibuang harus dikurangi dari nilai TOW sebelum menghitung emisi metana, menggunakan rumus berikut:

$$= Q \times (S_i - S_e) \times 1000$$

Q = laju aliran air limbah (m³/hari)

S_i = konsentrasi padatan influen (mg/L)

S_e = konsentrasi padatan limbah (mg/L)

Faktor 1000 digunakan untuk mengkonversi m³ → L

Keterangan:

Q = 105.437 m³/hari

S_i = 77,2 mg/L

S_e = 68,8 mg/L

Perhitungan:

$$\begin{aligned} S &= 105.437 \times (77,2 - 68,8) \times 1000 = 885.670.800 \text{ mg/day} \\ &= 885.670.800 \text{ mg/day} \times 365 = 323.269,84 \text{ kg/year} \end{aligned}$$

2. Perhitungan Metana yang Dipulihkan

Selain memperhitungkan lumpur yang dibuang, perlu juga menghitung jumlah metana yang berhasil dipulihkan dari sistem pengolahan air limbah. Gas ini biasanya ditangkap dari proses pengolahan anaerobik dan digunakan kembali sebagai biogas, sehingga mencegah pelepasannya ke atmosfer. Metana yang dipulihkan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$R = Q \times C \times \eta$$

Catatan:

R = volume metana yang dipulihkan (m³/tahun)

Q = total volume biogas yang diproduksi (m³/tahun)

C = fraksi metana dalam biogas (-)

η = efisiensi pemulihan metana (-)

Diberikan:

Q = 383.000 m³/tahun

C = 0,52 (fraksi CH₄ dalam biogas)

η = 1 (efisiensi pemulihan metana)

Perhitungan:

$$R = 383.000 \times 0,52 \times 1 = 199.160 \text{ m}^3/\text{year}$$

Untuk keperluan perhitungan massa, volume metana dikonversi ke kilogram menggunakan densitas metana sebesar 0,716 kg/m³.

$$199.160 \times 0,716 = 142.598,56 \text{ kgCH}_4/\text{year}$$

Tabel 3. Estimasi Emisi CH₄ dari Air Limbah Industri

Limbah											
Kategori	Pengolahan dan Pembuangan Air Limbah Industri										
Kode kategori	4D2										
Lembar	3 dari 3: Estimasi Emisi CH ₄ dari Air Limbah Industri										
		A	B	C	D	E					
Industri Pemurnian	Jenis Perawatan atau Pembuangan	Jalur Total Bahan Organik yang Dapat Terdegradasi dalam Air Limbah untuk Setiap Industri Pengilangan (TOW _i)	Lumpur yang Dibuang di Setiap Industri Pengilangan (S _i)	yang di Setiap Industri Pengilangan (EF _i)	Faktor untuk Setiap Sistem Pengolahan (R _i)	Emisi CH ₄ yang Dipulihkan di Setiap Industri Pengilangan (CH ₄)	Emisi Bersih di Setiap Industri Pengilangan (E)				
Satuan		(kgCOD /thn)	(kgCOD / thn)	(kgCH ₄ / kgBOD)	(kg CH ₄ /thn)	(kg CH ₄ /thn)	E=[(A – B) x C] – D				
		Lembar 1 dari 3		Lembar 2 dari 3							
Industri Pemurnian		13.840.000	323.269,84	0,20	142.598,56	2.560.747,47					
Total						2.560.747,47					

Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian gas metana dapat dipulihkan dari proses pengolahan air limbah, sebagian besar masih dilepaskan ke atmosfer. Informasi ini penting untuk mengevaluasi potensi emisi

gas rumah kaca (GRK) di sektor industri pengolahan minyak dan dapat berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan air limbah dan implementasi teknologi pengurangan emisi metana.

3.4 Estimasi Produksi Metana dari Air Limbah dan Konversi Metana menjadi Energi Listrik

Bagian ini menyajikan analisis data mengenai potensi emisi metana dari air limbah kilang minyak dan peluang pemanfaatannya sebagai sumber energi untuk pembangkitan listrik. Analisis dilakukan berdasarkan parameter-parameter kunci yang memengaruhi produksi biogas, yaitu nilai COD, hasil CH₄, dan fraksi metana dalam biogas.

Nilai COD mewakili konsentrasi bahan organik yang dapat terurai secara hayati dalam air limbah, sedangkan hasil CH₄ dan fraksi metana digunakan untuk memperkirakan jumlah metana yang dihasilkan. Selanjutnya, jumlah metana tersebut diubah menjadi energi listrik berdasarkan nilai kalor metana dan efisiensi sistem pembangkit listrik.

1. Estimasi Produksi Metana dari Air Limbah

Berdasarkan perhitungan sebelumnya, total emisi metana bersih dari pengolahan air limbah kilang adalah 2.560.747,47 kg CH₄/tahun. Dengan menggunakan densitas metana sebesar 0,716 kg/m³, perhitungan berikut dilakukan:

$$Volume\ CH_4 = \frac{2.560.747,47}{0,716} = 3.576.888\ m^3/year$$

2. Konversi Metana Menjadi Energi Listrik

Nilai kalor metana: 35,8 MJ/m³

Efisiensi pembangkitan daya: 38%

$$\begin{aligned} \text{Electrical energy} &= 3.576.888 \times 35\ \text{MJ/m}^3 \times 0,38 \\ &= 48.815.452\ \frac{\text{MJ}}{\text{year}} \approx 13,56\ \text{GWh/year} \end{aligned}$$

Oleh karena itu, dari air limbah kilang, diperkirakan dapat dihasilkan energi listrik sebesar 13,56 GWh/tahun jika seluruh gas metana yang dihasilkan dimanfaatkan sepenuhnya.

Tabel 4. Potensi Energi Listrik dan Produksi Gas Metana dari Limbah Cair Kilang Minyak

NO	Parameter	Nilai	Satuan	Referensi
1	Produksi minyak mentah	12.240.000	barel/tahun	Pusdatin ESDM (2025)
2	Pembangkitan air limbah	91,8	m ³ /t produk	Data operasional WWTP
3	Konsentrasi COD	112	mg/L	SNI 6989.73:2009
4	Total emisi CH ₄	2.560.747,47	kg/tahun	Perhitungan IPCC (2006)
5	Volume CH ₄	3.5776.888	m ³ /tahun	konversi densitas CH ₄
6	Nilai kalor metana	35,8	MJ/m ³	IEA (2023)
7	Efisiensi pembangkitan daya	0,38	-	Alnavis dkk., (2024)
8.	Energi listrik yang dihasilkan	13.56	GWh/tahun	Hasil perhitungan

Berdasarkan Tabel 4, dapat diamati bahwa air limbah dari industri pengolahan minyak berpotensi menghasilkan energi listrik sekitar 13,56 GWh/tahun dari gas metana yang dihasilkan selama proses pengolahan. Nilai COD

yang tinggi menunjukkan jumlah bahan organik yang mudah terurai secara biologis yang substansial, sedangkan efisiensi pembangkitan listrik menentukan proporsi energi yang dapat secara efektif diubah menjadi listrik [21]. Data ini memberikan ilustrasi yang jelas tentang hubungan antara produksi industri, potensi emisi gas rumah kaca, dan peluang untuk memanfaatkan energi terbarukan yang berasal dari air limbah kilang minyak.

4 PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis data yang disajikan pada Tabel 4, air limbah dari industri pengolahan minyak mengandung konsentrasi bahan organik yang relatif tinggi, ditunjukkan oleh nilai COD sebesar 112 mg/L. Konsentrasi ini mencerminkan potensi degradasi biologis yang signifikan yang dapat menghasilkan gas metana melalui dekomposisi anaerobik.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa proses pengolahan air limbah di industri kilang minyak dapat menghasilkan sekitar 2.560.747 kg CH₄ per tahun (setara dengan 3.576.888 m³ CH₄ per tahun). Jumlah ini setara dengan sekitar 13,56 GWh energi listrik per tahun jika seluruh metana dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik dengan efisiensi konversi 38%. Nilai ini menunjukkan bahwa air limbah kilang minyak memiliki potensi yang cukup besar untuk berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) jika metana tidak dikendalikan atau dimanfaatkan [22].

Potensi emisi yang tinggi juga dipengaruhi oleh skala produksi industri yang besar, sekitar 12,24 juta barel per tahun, yang menghasilkan volume air limbah yang substansial. Semakin besar skala produksi, semakin besar jumlah air limbah yang dihasilkan, dan akibatnya, semakin tinggi potensi pembentukan metana. Oleh karena itu, pengelolaan air limbah yang efisien menjadi sangat penting untuk meminimalkan dampak lingkungan [23].

Hasil penelitian ini juga menyoroti peluang besar untuk pemanfaatan metana sebagai sumber energi terbarukan. Melalui implementasi sistem pengolahan anaerobik tertutup dan teknologi pemulihan biogas, industri dapat menangkap metana yang dihasilkan, mengubahnya menjadi energi listrik, dan sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) ke atmosfer. Upaya ini sejalan dengan strategi mitigasi perubahan iklim industri dan mendukung target pengurangan emisi nasional. Indonesia telah menetapkan target ambisius untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 31,89% pada tahun 2030 tanpa bantuan internasional, dan sebesar 43,2% dengan dukungan internasional. Target-target ini diuraikan dalam Kontribusi yang Ditentukan Secara Nasional (Nationally Determined Contribution/NDC) Indonesia tahun 2022, sebuah dokumen yang mencerminkan komitmen negara untuk menurunkan emisi GRK sesuai dengan perjanjian global. Komitmen ini dimulai dengan pengajuan NDC pertama Indonesia kepada UNFCCC pada tahun 2016 sebagai bagian dari implementasi Perjanjian Paris, yang mewajibkan semua negara yang meratifikasi untuk menetapkan target pengurangan emisi GHG hingga tahun 2030 [24].

Secara keseluruhan, diskusi ini menekankan hubungan erat antara skala produksi industri, potensi emisi metana, dan peluang untuk memanfaatkan energi terbarukan dari air limbah. Strategi mitigasi yang direkomendasikan meliputi:

1. Meningkatkan efisiensi sistem pengolahan air limbah industri bertujuan untuk memastikan bahwa proses pengolahan secara efektif mengurangi bahan organik, nutrisi, dan polutan lainnya sebelum limbah dibuang ke lingkungan.
2. Penerapan teknologi penangkapan dan pemanfaatan biogas sangat penting karena biogas yang dihasilkan selama pengolahan air limbah anaerobik mengandung metana (CH_4), yang jika tidak ditangkap, akan dilepaskan ke atmosfer sebagai gas rumah kaca.
3. Optimalisasi kapasitas dan ketersediaan unit pengolahan air limbah industri memastikan bahwa sistem pengolahan dapat menangani volume air limbah sesuai dengan kapasitas produksi, mencegah kondisi kelebihan beban yang dapat mengurangi kinerja pengolahan dan menyebabkan pencemaran lingkungan.

Dengan menerapkan strategi-strategi ini, industri pengolahan minyak di Indonesia tidak hanya dapat mengurangi emisi gas rumah kaca tetapi juga mendukung transisi energi nasional dengan memanfaatkan air limbah sebagai sumber energi terbarukan yang berkelanjutan.

5 KESIMPULAN

Studi ini menyajikan estimasi kuantitatif potensi emisi gas rumah kaca (GRK) dari air limbah kilang menggunakan metodologi IPCC. Analisis data menunjukkan bahwa air limbah pada inlet IPAL kilang memiliki kandungan organik yang tinggi (COD 112 mg/L, SNI 6989.73:2009), yang mengindikasikan adanya potensi biodegradasi anaerob. Dengan menggunakan pendekatan Total Organic Wastewater (TOW) dan faktor emisi (EF) berdasarkan Pedoman IPCC 2006, estimasi emisi metana sebesar 2.560.747,47 kg CH_4 /tahun (setara dengan 3.576.888 m³ CH_4 /tahun), yang merepresentasikan kontribusi GRK yang signifikan. Metana ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan, dengan potensi menghasilkan energi sebesar 13,56 GWh/tahun pada efisiensi konversi 38%. Oleh karena itu, penerapan sistem pengolahan anaerob tertutup dapat mengurangi emisi sekaligus menyediakan energi berkelanjutan untuk operasi kilang. Temuan ini mendukung mitigasi GRK Indonesia dan menegaskan pentingnya integrasi pemulihan biogas dalam sistem pengelolaan air limbah kilang. Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pemantauan fluks CH_4 secara berkelanjutan serta kajian energi berbasis penilaian daur hidup yang komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Gavurova, M. Rigelsky, and V. Ivankova, "Greenhouse Gas Emissions and Health in the Countries of the European Union," vol. 9, no. December, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3389/fpubh.2021.756652.
- [2] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis," 2021.
- [3] X. Wang *et al.*, "Impact hotspots of reduced nutrient discharge shift across the globe with population and dietary changes," *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1038/s41467-019-10445-0.
- [4] H. Nayeb, M. Mirabi, H. Motiee, A. Alighardashi, and A. Khoshgard, "Estimating greenhouse gas emissions from Iran's domestic wastewater sector and modeling the emission scenarios by 2030," *J. Clean. Prod.*, vol. 236, p. 117673, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117673.
- [5] T. Wang *et al.*, "Evaluation of the role of urban domestic wastewater treatment systems for greenhouse gases emissions in China," *Ecol. Inform.*, vol. 81, no. March, 2024, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102571.
- [6] L. Lu, J. S. Guest, C. A. Peters, X. Zhu, G. H. Rau, and Z. J. Ren, "Wastewater treatment for carbon capture and utilization," *Nat. Sustain.*, vol. 1, no. 12, pp. 750–758, 2018, doi: 10.1038/s41893-018-0187-9.

- [7] H. Wang *et al.*, “Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa,” *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 873–881, 2016.
- [8] L. Li, G. Lee, and D. Kang, “Energy Consumption and Greenhouse Gas (GHG) Emissions in Urban Wastewater Treatment Facilities: A Case Study of Seoul Metropolitan City (SMC),” *Water (Switzerland)*, vol. 17, no. 4, pp. 1–19, 2025, doi: 10.3390/w17040464.
- [9] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, “Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV) Tahun 2024,” 2024.
- [10] A. Slaney and P. Garrity, “Greenhouse Gas Emissions from Industrial Wastewater Treatment,” Lower Hutt, New Zealand, 2015.
- [11] M. R. J. Daelman, E. M. Van Voorthuizen, U. G. J. M. Van Dongen, E. I. P. Volcke, and M. C. M. Van Loosdrecht, “Methane emission during municipal wastewater treatment,” *Water Res.*, vol. 46, no. 11, pp. 3657–3670, 2012, doi: 10.1016/j.watres.2012.04.024.
- [12] IPCC, *Chapter 6 Wastewater Treatment and Discharge*, vol. 5. 2006.
- [13] Y. Chen, H. Li, and L. Lu, “Methane emissions from industrial wastewater treatment systems decoupling from industrial growth in China over the past two decades,” *npj Clim. Atmos. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, 2025, doi: 10.1038/s41612-025-01074-0.
- [14] J. Filer, H. H. Ding, and S. Chang, “Biochemical methane potential (BMP) assay method for anaerobic digestion research,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 5, 2019, doi: 10.3390/w11050921.
- [15] IPCC, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. 2000. doi: 10.1002/9780470743157.ch17.
- [16] S. O. Akpasi, J. S. Akpan, U. O. Amune, A. A. Olaseinde, and S. L. Kiambi, “Methane Advances : Trends and Summary from Selected Studies,” pp. 276–313, 2024.
- [17] Z. Y. Ma, P. Feng, Q. X. Gao, Y. N. Lu, J. R. Liu, and W. T. Li, “CH₄ emissions and reduction potential in wastewater treatment in China,” *Adv. Clim. Chang. Res.*, vol. 6, no. 3–4, pp. 216–224, 2015, doi: 10.1016/j.accre.2015.11.006.
- [18] X.-L. Yu *et al.*, “Strategic carbon emission assessment in sludge treatment: A dynamic tool for low-carbon transformation,” *Environ. Int.*, vol. 193, no. July, p. 109124, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.envint.2024.109124.
- [19] D. Elalami, H. Carrere, F. Monlau, K. Abdelouahdi, A. Oukarroum, and A. Barakat, “Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production : Recent research advances and trends COD FOG FA TS US VS WAS,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, no. July, p. 109287, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109287.
- [20] K. J. Taiwo, A. V. Oancea, N. S. Kotha, and J. G. Usack, “Enhancing Wastewater Treatment Sustainability Through Integrated Anaerobic Digestion and Hydrothermal Carbonization: A Life-Cycle Perspective,” *Sustain.*, vol. 17, no. 16, pp. 1–20, 2025, doi: 10.3390/su17167545.
- [21] A. Ishaq *et al.*, “The influence of various chemical oxygen demands on microbial fuel cells performance using leachate as a substrate,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-32090-x.
- [22] X. He, H. Li, J. Chen, H. Wang, and L. Lu, “Quantifying greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants: A critical review,” *Environ. Sci. Ecotechnology*, vol. 27, 2025, doi: 10.1016/j.ese.2025.100606.
- [23] F. Hou *et al.*, “Methane Production Mechanism and Control Strategies for Sewers: A Critical Review,” *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 24, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3390/w16243618.
- [24] Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim, “Kemajuan Aksi Perubahan Iklim Indonesia: Leading by Examples.” Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ditjenppi.org/indonesia/direktorat/setditjen/kemajuan-aksi-perubahan-iklim-indonesia-leading-by-examples>