

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tren timbulan limbah padat global terus meningkat, terutama di kawasan perkotaan dan wisata. Produksi limbah dunia telah mencapai lebih dari 2,01 miliar ton per tahun dan diproyeksikan meningkat menjadi 3,40 miliar ton pada tahun 2050 apabila tidak dilakukan intervensi yang efektif (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012). Secara umum, komposisi limbah didominasi bahan organik dan plastik yang berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan dan emisi gas rumah kaca (GRK) (Bertolazzi et al., 2024). Di Indonesia, timbulan limbah rumah tangga tahun 2023 mencapai sekitar 67,8 juta ton dengan rata-rata 0,75 kg/orang/hari, didominasi limbah organik sebesar 59% dan plastik 14% (SIPSN, 2024; Afnan et al., 2025b).

Di Bali, timbulan limbah mencapai 1,0–1,2 kg/orang/hari dan didominasi oleh fraksi organik serta plastik yang dipengaruhi aktivitas pariwisata (Suryawan et al., 2025; SIPSN, 2024). Sampah plastik, terutama kemasan sekali pakai, botol minuman, dan kantong plastik, banyak ditemukan di kawasan pesisir dan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan (Bertolazzi et al., 2024; Sulistyorini & Kurniawan, 2025). Christiawan dan Pratama (2019) melaporkan bahwa sampah musiman di pesisir Kecamatan Kuta didominasi plastik yang berasal dari arus laut dan aktivitas wisata, sehingga menurunkan kualitas lingkungan dan estetika kawasan pesisir. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai upaya pengelolaan limbah telah dikembangkan, termasuk pengolahan berbasis masyarakat dan pemanfaatan refuse-derived fuel (RDF) (Afnan et al., 2025c).

Selain menjadi masalah lingkungan, sektor limbah padat juga menghasilkan emisi GRK, khususnya gas metana (CH_4) dari proses dekomposisi anaerobik di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Secara global, sektor limbah menyumbang sekitar 3–5% emisi GRK (Oo et al., 2024). Meskipun kontribusinya lebih kecil dibanding sektor energi, metana memiliki potensi pemanasan global sekitar 28 kali lebih besar dibanding karbon dioksida. Oleh karena itu, penerapan *circular economy*, pengomposan, bio-konversi, dan pemulihan energi dinilai penting untuk menekan emisi sektor limbah (Gunamantha, 2011, 2020; Gunamantha & Sarto, 2012; Gunamantha et al., 2023, 2026; Oo et al., 2024).

Kajian sebelumnya menunjukkan bahwa setiap satu ton *Municipal Solid Waste* (MSW) dapat menghasilkan sekitar 89,7 kg CO_2e (Oo et al., 2024), sedangkan satu ton limbah organik segar berpotensi menghasilkan hingga 506 kg CO_2e akibat degradasi bahan organik (Salam et al., 2025). Dominasi fraksi organik menjadi faktor utama peningkatan emisi CH_4 dan CO_2 dari TPA. Selain itu, gas landfill juga berpotensi mencemari udara, air tanah, dan menghasilkan lindi (*leachate*) (Ghosh, Kumar, & Das, 2023). Penelitian Gunamantha et al. (2023) menyebutkan bahwa “dalam skenario dasar di mana sampah organik hanya ditumpuk pada controlled landfill, kontribusi emisi gas rumah kaca dapat mencapai 2.562 Gg $\text{CO}_2\text{-e}$, sedangkan penerapan strategi mitigasi melalui pengomposan terpusat hanya mampu memberikan pengurangan emisi sebesar 0,158 Gg $\text{CO}_2\text{-e}$ ”. Temuan tersebut menunjukkan bahwa landfill konvensional masih menjadi sumber utama emisi GRK sektor limbah.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa emisi metana dari TPA masih sering terhitung lebih rendah dari kondisi aktual sehingga kontribusinya terhadap pemanasan global kerap terabaikan (Wang et al., 2024). Dalam upaya mitigasi, pendekatan *waste-to-energy* dinilai lebih efektif dibandingkan sistem landfill konvensional tanpa pemulihan energi. Gunamantha dan Sarto (2012) menyatakan bahwa “penggunaan opsi energi dari sampah (*waste-to-energy*) secara signifikan memberikan kontribusi yang lebih baik terhadap kategori dampak pemanasan global dibandingkan dengan sistem penimbunan sampah konvensional di TPA tanpa pemulihan energi”. Selain itu,

penerapan teknologi bio-konversi yang tepat juga mampu menekan emisi GRK dan polutan udara dari limbah organik (Gunamantha et al., 2026).

Dalam konteks perubahan iklim, gas metana memiliki potensi pemanasan global yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida, terutama dalam periode 20 tahun (Smith, Johnson, & Martinez, 2024). Oleh sebab itu, pengendalian emisi metana dari TPA menjadi bagian penting dalam mitigasi perubahan iklim dan perlindungan kualitas lingkungan.

Permasalahan emisi GRK dari sektor limbah saat ini menjadi perhatian global. Pengelolaan limbah melalui TPA terbuka diketahui menghasilkan emisi metana dalam jumlah besar dan sering kali terestimasi lebih rendah dari kondisi sebenarnya (Bogner et al., 2024). Garg et al. (2023) melaporkan bahwa hanya sekitar 13% negara yang memiliki kebijakan komprehensif terkait mitigasi metana dari sektor limbah. Bogner et al. (2007) juga menunjukkan bahwa peningkatan pendapatan dan timbulan limbah berhubungan dengan kenaikan emisi GRK.

Di Indonesia, praktik *open dumping* dan keterbatasan fasilitas pengolahan limbah menyebabkan emisi metana terus meningkat dan berkontribusi terhadap emisi GRK nasional (Ramadhan et al., 2020). Pertumbuhan penduduk dan urbanisasi juga diperkirakan meningkatkan emisi CO₂ sehingga menjadi tantangan dalam pencapaian target *Nationally Determined Contributions* (NDC) nasional (Sari et al., 2022). Penelitian di Semarang menunjukkan bahwa pengelolaan limbah yang belum optimal masih menjadi sumber utama emisi metana (Nurhidayat et al., 2023).

Sebagian besar limbah perkotaan di Indonesia masih dibuang ke TPA terbuka dengan pengendalian emisi yang terbatas, sehingga sektor limbah menyumbang sekitar 7,7% emisi nasional dalam dokumen NDC (Kristanto & Koven, 2019). Penelitian di Depok menunjukkan bahwa emisi sebesar 1,96 ton CO₂e per ton limbah dapat ditekan hingga 35% melalui daur ulang dan pengolahan limbah organik (Kristanto & Koven, 2019). Kondisi serupa terjadi di Bali yang masih bergantung pada TPA konvensional seperti TPA Suwung dan TPA Mandung. Dengan timbulan limbah lebih dari 4.000 ton per hari, pengendalian emisi metana melalui pemilahan, pengomposan, dan

pengelolaan landfill menjadi semakin penting (Oo et al., 2024; Kristanto & Koven, 2019).

Di tingkat daerah, Provinsi Bali telah menerapkan teknologi biogas rumah tangga untuk mengelola limbah organik, namun penerapannya masih terbatas sehingga emisi metana tetap tinggi (Silaen et al., 2020). Bößner et al. (2019) menyatakan bahwa keberhasilan teknologi biogas dipengaruhi oleh aspek sosial, ekonomi, dan kebijakan, sehingga mitigasi emisi limbah di tingkat lokal masih menghadapi berbagai kendala.

Berbagai strategi mitigasi telah dikembangkan untuk menekan emisi TPA, seperti *Waste-to-Energy* (WtE), *Refuse Derived Fuel* (RDF), landfill mining, dan sistem biocover. Teknologi RDF dan WtE dilaporkan mampu menurunkan emisi lebih dari 50% dibanding sistem konvensional (Sari et al., 2025), sedangkan landfill mining berpotensi mengurangi emisi CH₄ sekaligus menghasilkan kompos dan bahan bakar alternatif (Kurniawan et al., 2024). Selain itu, sistem *biocover* efektif menekan emisi metana melalui oksidasi mikroba pada lapisan penutup tanah, khususnya di daerah tropis (Scheutz et al., 2014).

Penyusunan strategi mitigasi membutuhkan estimasi emisi yang akurat agar kontribusi metana dari degradasi limbah organik dapat dihitung secara kuantitatif (Smith et al., 2021). Salah satu metode yang banyak digunakan ialah *First Order Decay* (FOD) IPCC karena relatif sederhana, fleksibel, dan mampu memanfaatkan data historis timbulan serta komposisi limbah tanpa memerlukan pengukuran lapangan yang mahal (Smith et al., 2021). Metode ini juga telah banyak diterapkan dalam inventarisasi GRK dan perencanaan mitigasi emisi landfill (Zhu et al., 2013; Lee et al., 2020).

Namun demikian, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa parameter default IPCC perlu disesuaikan dengan kondisi lokal agar hasil estimasi lebih representatif. Penteado et al. (2012) dan Heyer et al. (2018) menjelaskan bahwa parameter seperti *Methane Correction Factor* (MCF) dan *Degradable Organic Carbon* (DOC) dipengaruhi oleh iklim, komposisi limbah, dan sistem pengelolaan TPA. Kim et al. (2023) juga menyebutkan bahwa pendekatan *default* belum sepenuhnya menggambarkan kondisi aktual landfill. Penelitian di Rumania dan Bali menunjukkan

adanya perbedaan signifikan antara hasil model dan emisi aktual akibat sensitivitas parameter lokal seperti umur landfill dan komposisi limbah (Popița et al., 2015; Gunamantha & Yuningrat, 2012). Selain itu, Gunamantha et al. (2023), Permadi et al. (2024), Kim dan Yi (2009), serta Scheutz et al. (2022) menekankan pentingnya kalibrasi dan validasi parameter lokal untuk meningkatkan akurasi estimasi emisi metana, terutama pada wilayah tropis.

Di Indonesia, penerapan metode *First Order Decay* (FOD) masih banyak menggunakan parameter default IPCC meskipun karakteristik iklim tropis basah dan dominasi limbah organik berpotensi menghasilkan emisi berbeda dari asumsi global. Penggunaan parameter lokal dinilai mampu meningkatkan akurasi estimasi, tetapi penerapan model FOD berbasis kondisi lokal pada TPA tingkat kabupaten masih terbatas sehingga data pendukung mitigasi emisi berbasis ilmiah belum memadai.

Kondisi tersebut juga terjadi di Tabanan yang mengalami peningkatan timbulan limbah dari 79.235,89 ton pada 2015 menjadi 86.571,07 ton pada 2024. Peningkatan ini dipengaruhi pertumbuhan penduduk yang mencapai lebih dari 467.000 jiwa, sehingga tekanan terhadap sistem pengelolaan limbah, khususnya di TPA Mandung, semakin besar. TPA Mandung masih memiliki keterbatasan teknis karena belum sepenuhnya menerapkan *sanitary landfill* dan sistem pengendalian gas maupun lindi belum optimal. Komposisi sampah yang didominasi limbah organik sekitar 60–65% juga meningkatkan potensi pembentukan gas metana akibat dekomposisi anaerobik (Sukma et al., 2024).

Keterbatasan sistem penangkapan gas menyebabkan sebagian besar metana terlepas langsung ke atmosfer, padahal gas ini memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi dibanding karbon dioksida. TPA Mandung dengan luas sekitar 8 hektar juga masih memiliki keterbatasan pada sistem drainase, pengendalian gas, dan penutupan landfill (Widyarsana & Subagia, 2025). Operasional TPA yang masih terbuka turut meningkatkan risiko pencemaran lingkungan, termasuk limpasan lindi ke badan air sekitar (Huda, Hadi, & Subhani, 2020). Oleh sebab itu, pengembangan teknologi

pengelolaan *gas landfill* dan *Waste-to-Energy* menjadi penting dalam mendukung mitigasi emisi (Sari et al., 2025).

Di tingkat daerah, inventarisasi emisi GRK sektor limbah di Kabupaten Tabanan masih terbatas dan umumnya hanya memuat data timbulan sampah tanpa estimasi emisi metana berbasis metode ilmiah. Kajian menggunakan metode FOD IPCC pada TPA Mandung juga masih sangat terbatas sehingga kontribusi sektor limbah terhadap emisi GRK daerah belum diketahui secara pasti. Padahal secara nasional, pengendalian emisi telah diperkuat melalui komitmen NDC, program LCDI, UU Nomor 18 Tahun 2008, Perpres Nomor 97 Tahun 2017, dan Perpres Nomor 98 Tahun 2021 yang mendorong pengurangan sampah, sanitary landfill, dan pemanfaatan gas landfill.

Namun, implementasi di tingkat daerah masih terkendala keterbatasan data emisi berbasis lokasi yang tersusun secara ilmiah. Hingga saat ini, Kabupaten Tabanan belum memiliki inventarisasi emisi GRK sektor limbah yang disusun secara mandiri dan berkelanjutan. Data yang tersedia umumnya masih terbatas pada timbulan dan pengelolaan sampah melalui Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional tanpa estimasi emisi metana berbasis model degradasi limbah. Kondisi ini menunjukkan masih adanya kesenjangan antara kebijakan mitigasi nasional dan kapasitas teknis daerah dalam menyediakan data emisi yang terukur dan terverifikasi.

Pemetaan *World Wide Fund for Nature* juga menunjukkan bahwa inventarisasi GRK mandiri baru dilakukan di beberapa daerah seperti Denpasar, Yogyakarta, dan Semarang, sedangkan Kabupaten Tabanan belum memiliki inventarisasi sektoral tersendiri. Data emisi yang tersedia masih mengacu pada inventarisasi tingkat provinsi yang bersifat umum dan belum merepresentasikan kondisi lokal, terutama sektor limbah yang dipengaruhi komposisi sampah, pola timbulan, dan sistem pengelolaan setempat. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan sebagai dasar penyusunan inventarisasi emisi metana berbasis parameter lokal untuk mendukung kebijakan daerah yang lebih tepat sasaran.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan metode *First Order Decay* (FOD) IPCC yang disesuaikan dengan karakteristik lokal TPA Mandung, seperti dominasi

limbah organik, iklim tropis basah, dan sistem operasional TPA yang masih berkembang menuju pengelolaan terkendali. Penelitian ini menghasilkan inventarisasi emisi metana berbasis lokasi (*site-specific inventory*) yang sebelumnya belum tersedia di Kabupaten Tabanan, sekaligus menghubungkan hasil estimasi dengan evaluasi strategi mitigasi emisi.

Urgensi penelitian didasarkan pada meningkatnya kontribusi sektor limbah terhadap emisi metana yang memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida dalam jangka pendek. Tingginya timbulan limbah organik di Bali yang masih berakhir di TPA menjadikan sektor limbah sebagai salah satu sumber penting emisi GRK. Kabupaten Tabanan sendiri belum memiliki inventarisasi emisi metana TPA yang terukur dan terstandar, sehingga strategi mitigasi dan pengelolaan limbah berpotensi belum optimal. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung pencapaian target NDC dan pembangunan rendah karbon LCDI melalui penyediaan estimasi emisi metana berbasis metode IPCC yang lebih sesuai dengan kondisi lokal.

Secara filosofis, penelitian ini didasarkan pada aspek ontologi, epistemologi, dan aksiologi. Secara ontologis, emisi metana dari TPA dipahami sebagai fenomena nyata akibat dekomposisi anaerobik limbah organik. Secara epistemologis, pengetahuan mengenai emisi diperoleh melalui pendekatan kuantitatif menggunakan metode FOD IPCC dengan data historis timbulan dan komposisi limbah serta penyesuaian parameter lokal. Secara aksiologis, penelitian ini diarahkan untuk menghasilkan informasi emisi yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar penyusunan strategi mitigasi dan kebijakan pengelolaan limbah padat di Kabupaten Tabanan dan Provinsi Bali.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, permasalahan yang dapat diidentifikasi adalah sebagai berikut:

1. Sektor limbah padat masih menjadi salah satu sumber emisi gas rumah kaca, khususnya metana, akibat dekomposisi anaerobik organik di TPA.
2. Karakteristik limbah padat di daerah tropis yang didominasi fraksi organik berpotensi menghasilkan emisi metana yang lebih tinggi dibandingkan asumsi parameter global.
3. Inventarisasi emisi gas rumah kaca dari sektor limbah di tingkat kabupaten masih sangat terbatas, sehingga kontribusi sektor ini terhadap total emisi daerah belum dapat diukur secara akurat.
4. TPA Mandung sebagai TPA utama di Kabupaten Tabanan belum memiliki data emisi metana yang terhitung secara kuantitatif dan terstandar menggunakan metode yang diakui secara internasional.
5. Penggunaan parameter default dalam metode estimasi emisi berpotensi menghasilkan ketidakpastian perhitungan, khususnya apabila tidak merepresentasikan kondisi lokal.
6. Keterbatasan data emisi berbasis lokasi menyulitkan perumusan strategi mitigasi pengelolaan limbah padat yang efektif dan tepat sasaran di tingkat daerah.
7. Kebijakan pengelolaan limbah padat daerah belum sepenuhnya didukung oleh basis data emisi gas rumah kaca yang terukur dan berkelanjutan.

1.3 Pembatasan Masalah

Dari identifikasi masalah yang ditetapkan dalam penelitian ini, maka dirasa perlu dilakukan pembatasan masalah agar dalam pengkajian yang dilakukan lebih terfokus kepada masalah-masalah yang ingin dipecahkan. Penelitian ini menitikberatkan pada estimasi kuantitatif emisi metana (CH_4) dari sektor limbah padat yang ditimbun di TPA Mandung, Kabupaten Tabanan, menggunakan metode *First Order Decay* (FOD) sesuai pedoman IPCC dengan mempertimbangkan parameter lokal yang tersedia.

Ruang lingkup kajian diarahkan pada proses dekomposisi anaerobik limbah padat organik yang ditimbun di TPA sebagai sumber utama pembentukan metana. Oleh karena itu, perhitungan emisi dibatasi pada gas metana (CH_4) sebagai komponen dominan emisi GRK dari sektor limbah padat, tanpa memasukkan pembahasan rinci mengenai gas rumah kaca lain seperti CO_2 non-biogenik dan dinitrogen oksida (N_2O), yang berada di luar fokus utama model FOD dan tujuan penelitian ini.

Selanjutnya, penelitian ini berfokus pada analisis kuantitatif kontribusi dan sensitivitas komposisi limbah padat terhadap estimasi emisi metana, serta proyeksi timbulan limbah dan implikasinya terhadap potensi emisi CH_4 berdasarkan tren data historis. Pendekatan ini digunakan agar analisis dilakukan secara konsisten melalui data numerik dan pemodelan matematis. Evaluasi strategi mitigasi dilakukan berdasarkan hasil estimasi emisi dan sensitivitas parameter untuk menentukan alternatif mitigasi yang paling relevan dan aplikatif secara teknis. Oleh sebab itu, penelitian ini tidak membahas aspek kelayakan finansial, sosial, maupun evaluasi kebijakan secara mendalam karena memerlukan pendekatan metodologis yang berbeda dan berada di luar ruang lingkup penelitian.

Penelitian ini tidak bertujuan menyusun inventarisasi emisi gas rumah kaca lintas sektor pada tingkat kabupaten, tetapi difokuskan pada subsektor limbah padat di TPA Mandung sebagai studi kasus. Fokus tersebut dilakukan agar hasil analisis mampu menggambarkan kondisi emisi secara lebih rinci dan terukur pada skala fasilitas. Dengan ruang lingkup tersebut, penelitian diarahkan untuk menghasilkan estimasi, analisis, dan evaluasi emisi yang lebih fokus, terukur, serta konsisten secara metodologis dalam kerangka penelitian deskriptif kuantitatif berbasis pemodelan.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah, dan pembatasan masalah, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besaran estimasi emisi gas rumah kaca, khususnya metana (CH_4), yang dihasilkan dari sektor limbah padat di TPA Mandung, Kabupaten Tabanan, berdasarkan metode FOD sesuai pedoman IPCC dengan mempertimbangkan penggunaan parameter lokal?
2. Bagaimana variasi komposisi limbah padat berkontribusi terhadap perubahan hasil estimasi emisi metana, dan fraksi komposisi limbah padat manakah yang menunjukkan tingkat sensitivitas paling tinggi dalam perhitungan emisi metana di TPA Mandung?
3. Strategi mitigasi emisi metana apa yang paling relevan dan aplikatif untuk diterapkan di TPA Mandung, berdasarkan hasil estimasi emisi dan analisis sensitivitas parameter lokal tanpa analisis kelayakan finansial dan sosial secara mendalam?
4. Bagaimana proyeksi timbulan limbah padat dan implikasinya terhadap potensi emisi metana di TPA Mandung pada periode mendatang, berdasarkan tren data historis timbulan limbah padat yang tersedia?

1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengestimasi besaran emisi gas rumah kaca, khususnya metana (CH_4), yang dihasilkan dari sektor limbah padat di TPA Mandung, Kabupaten Tabanan, menggunakan metode FOD sesuai pedoman IPCC, dengan memasukkan parameter lokal yang terukur secara kuantitatif, sehingga diperoleh nilai emisi yang merepresentasikan kondisi aktual lokasi penelitian.
2. Menganalisis kontribusi variasi komposisi limbah padat terhadap perubahan hasil estimasi emisi metana, serta mengidentifikasi fraksi komposisi limbah padat yang memiliki tingkat sensitivitas paling tinggi terhadap besaran emisi metana yang dihasilkan di TPA Mandung, berdasarkan pendekatan analisis sensitivitas numerik.
3. Mengevaluasi alternatif strategi mitigasi emisi metana yang paling relevan dan aplikatif untuk diterapkan di TPA Mandung, berdasarkan hasil perhitungan

estimasi emisi dan analisis sensitivitas parameter lokal, tanpa melakukan analisis kelayakan finansial dan sosial secara mendalam.

4. Menyusun proyeksi timbulan limbah padat pada periode mendatang berdasarkan tren data historis timbulan limbah padat yang tersedia, serta menganalisis implikasinya terhadap potensi emisi metana di TPA Mandung, menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat ilmiah penelitian ini memberikan kontribusi dalam kajian emisi gas rumah kaca sektor limbah melalui estimasi numerik emisi metana menggunakan metode FOD IPCC dengan penyesuaian parameter lokal. Hasil penelitian diharapkan memperkaya referensi ilmiah mengenai pengaruh komposisi limbah padat dan sensitivitas parameter lokal terhadap emisi metana di TPA, terutama pada wilayah tropis.
2. Manfaat praktis penelitian ini menghasilkan informasi mengenai besaran dan proyeksi emisi metana di TPA Mandung yang dapat digunakan sebagai dasar teknis dalam penyusunan strategi mitigasi emisi berbasis data. Analisis sensitivitas membantu mengidentifikasi komponen limbah dan parameter operasional yang paling berpengaruh terhadap emisi sehingga mendukung pengelolaan TPA yang lebih efektif.
3. Manfaat kebijakan dari hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai pendukung inventarisasi emisi gas rumah kaca daerah, khususnya sektor limbah, serta sebagai dasar penyusunan kebijakan pengelolaan limbah padat dan mitigasi emisi metana di Kabupaten Tabanan. Proyeksi timbulan limbah dan emisi yang dihasilkan juga dapat menjadi acuan pemerintah daerah dalam merancang pengendalian emisi berkelanjutan.