

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perubahan iklim menjadi salah satu isu lingkungan yang terus mendapat perhatian dalam beberapa dekade terakhir karena dampaknya yang semakin nyata terhadap sistem ekologi dan kehidupan manusia. Peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi berkaitan erat dengan akumulasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer, terutama karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O). Laporan United Nations Environment Programme (UNEP) menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca global terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun dan telah mencapai sekitar 57,7 miliar ton CO₂-ekuivalen pada tahun 2024. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengendalian emisi perlu dilakukan secara terintegrasi pada berbagai sektor aktivitas manusia.

Pertumbuhan ekonomi, peningkatan konsumsi energi, serta perkembangan infrastruktur perkotaan menyebabkan kawasan Asia menjadi salah satu wilayah dengan kontribusi emisi gas rumah kaca yang cukup besar. Aktivitas industri, penggunaan energi, dan limbah domestik menjadi beberapa sektor yang berperan terhadap peningkatan emisi global. Laporan *United Nations Environment Programme* (UNEP) menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca dunia terus mengalami peningkatan dan mencapai sekitar 57,7 miliar ton CO₂-ekuivalen pada tahun 2024. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengendalian emisi perlu dilakukan secara terintegrasi pada berbagai sektor aktivitas manusia, termasuk pada sistem pengolahan air limbah domestik.

Besarnya emisi tersebut dipengaruhi oleh berbagai aktivitas, mulai dari perubahan tata guna lahan, konsumsi energi, hingga aktivitas domestik yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan pembangunan perkotaan. Kondisi ini mendorong pemerintah Indonesia untuk memperkuat upaya mitigasi melalui berbagai kebijakan pengendalian emisi, termasuk komitmen penurunan emisi gas rumah kaca dalam skema Nationally Determined Contribution (NDC).

Perkembangan kawasan perkotaan turut memengaruhi pola pembentukan emisi di tingkat lokal. Keterbatasan lahan dan tingginya kebutuhan ruang

menyebabkan pembangunan hunian vertikal seperti apartemen dan rumah susun berkembang cukup pesat, termasuk di Kota Surabaya. Peningkatan jumlah hunian vertikal berbanding lurus dengan bertambahnya volume air limbah domestik yang dihasilkan setiap hari. Oleh karena itu, sistem pengolahan air limbah yang efektif dan berkelanjutan menjadi kebutuhan penting dalam pengelolaan lingkungan perkotaan.

Sistem pengolahan air limbah domestik pada kawasan hunian vertikal berkembang seiring meningkatnya kebutuhan pengelolaan sanitasi perkotaan yang lebih terintegrasi. Pada awalnya, pengolahan air limbah domestik di kawasan permukiman masih dilakukan secara individual menggunakan septic tank konvensional. Namun, meningkatnya kepadatan bangunan dan keterbatasan lahan di kawasan perkotaan menyebabkan pendekatan tersebut dinilai kurang efektif dalam mengendalikan pencemaran lingkungan secara kolektif.

Perkembangan teknologi Wastewater Treatment Plant (WWTP) dan Sewage Treatment Plant (STP) kemudian menjadi solusi yang banyak diterapkan pada bangunan komersial dan hunian vertikal modern. Sistem ini memungkinkan pengolahan air limbah dilakukan secara terpusat dengan efisiensi pengolahan yang lebih baik dibandingkan sistem individual. Selain menurunkan beban pencemar organik, keberadaan STP juga mendukung pengelolaan air limbah domestik yang lebih terkendali pada kawasan dengan tingkat kepadatan tinggi.

Di Indonesia, pengelolaan air limbah domestik diatur dalam berbagai kebijakan, antara lain Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik. Kebijakan tersebut menekankan pentingnya pengolahan air limbah sebelum dibuang ke lingkungan guna mencegah pencemaran badan air dan mendukung pengelolaan lingkungan berkelanjutan.

Selain berkaitan dengan pengendalian pencemaran air, operasional STP juga mulai menjadi perhatian dalam isu perubahan iklim karena berpotensi menghasilkan emisi gas rumah kaca dari penggunaan energi listrik maupun proses biologis selama pengolahan berlangsung. Oleh karena itu, evaluasi dampak lingkungan sistem pengolahan air limbah tidak hanya difokuskan pada kualitas

efluen, tetapi juga pada kontribusi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama operasional sistem berlangsung.

Salah satu sistem yang umum digunakan pada bangunan hunian vertikal adalah Sewage Treatment Plant (STP). Sistem ini berfungsi mengolah air limbah domestik melalui rangkaian proses fisik dan biologis sebelum dialirkan ke lingkungan penerima. Meskipun berperan dalam menurunkan beban pencemar, operasional STP juga berpotensi menghasilkan emisi gas rumah kaca, baik secara langsung maupun tidak langsung. Emisi tidak langsung umumnya berkaitan dengan penggunaan energi listrik selama proses aerasi dan pengoperasian peralatan, sedangkan emisi langsung dapat muncul dari proses biologis, seperti degradasi bahan organik dan transformasi nitrogen.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai kontribusi sistem pengolahan air limbah terhadap emisi gas rumah kaca mulai berkembang. Zang et al. (2015) menjelaskan bahwa konsumsi energi pada unit aerasi menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi besarnya nilai Global Warming Potential (GWP) pada instalasi pengolahan air limbah. Proses aerasi membutuhkan suplai oksigen secara kontinu agar mikroorganisme dapat menguraikan bahan organik secara optimal, sehingga konsumsi energi listrik pada unit ini relatif tinggi.

Selain konsumsi energi, proses biologis dalam pengolahan air limbah juga dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca secara langsung. Proses nitrifikasi, denitrifikasi, maupun pengolahan lumpur berpotensi menghasilkan metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Walaupun jumlah emisi kedua gas tersebut relatif kecil secara massa, kontribusinya terhadap pemanasan global tetap signifikan karena memiliki nilai potensi pemanasan global yang lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida (Flores-Alsina et al., 2014).

Beberapa penelitian di Indonesia telah membahas emisi gas rumah kaca dari sektor pengolahan air limbah, baik pada skala kota maupun regional (Muttaqien, 2019; Kristanto et al., 2021; Novia, 2021). Namun, sebagian besar penelitian masih menghitung emisi secara terpisah dan belum mengintegrasikan CO_2 , CH_4 , dan N_2O dalam satu kerangka evaluasi lingkungan yang menyeluruh. Selain itu, penerapan metode Life Cycle Assessment (LCA) pada sistem pengolahan air limbah domestik di Indonesia masih relatif terbatas.

Penelitian terdahulu juga lebih banyak difokuskan pada instalasi pengolahan air limbah komunal, regional, atau industri. Sementara itu, karakteristik operasional STP pada bangunan hunian vertikal memiliki kondisi yang berbeda, terutama dari sisi kapasitas pengolahan, pola beban limbah, serta konsumsi energi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kajian mengenai kontribusi emisi gas rumah kaca dari operasional STP pada apartemen masih perlu dikembangkan, khususnya dalam konteks kawasan perkotaan di Indonesia.

Sebagian besar studi sebelumnya juga masih menilai emisi secara parsial dan belum mempertimbangkan keterkaitan antarunit proses dalam menghasilkan emisi gas rumah kaca. Padahal, total emisi dalam sistem pengolahan air limbah dipengaruhi oleh kombinasi antara konsumsi energi dan proses biologis yang berlangsung selama pengolahan. Oleh karena itu, evaluasi yang mempertimbangkan seluruh aliran input dan output sistem menjadi penting untuk memperoleh gambaran dampak lingkungan yang lebih representatif.

Pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dinilai relevan untuk digunakan karena mampu mengevaluasi kontribusi emisi dari setiap tahapan proses secara sistematis dan terukur. Melalui pendekatan ini, emisi karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O) dapat dianalisis dalam satu kerangka penilaian yang sama berdasarkan kategori Global Warming Potential (GWP).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari operasional Sewage Treatment Plant (STP) pada hunian vertikal menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA). Analisis difokuskan pada kontribusi emisi CO₂, CH₄, dan N₂O dari setiap unit proses pengolahan air limbah.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai kontribusi operasional STP terhadap emisi gas rumah kaca pada kawasan hunian vertikal di Kota Surabaya. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi pengelolaan dan mitigasi emisi pada sektor pengolahan air limbah domestik di kawasan perkotaan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, operasional Sewage

Treatment Plant (STP) pada hunian vertikal tidak hanya berkaitan dengan pengolahan air limbah, tetapi juga berpotensi menghasilkan emisi gas rumah kaca dari penggunaan energi maupun proses biologis yang berlangsung di dalam sistem. Untuk memperoleh gambaran dampak lingkungan secara lebih menyeluruh, penelitian ini menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dalam mengevaluasi kontribusi emisi dari setiap unit proses pengolahan.

Berdasarkan kondisi tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besar emisi gas rumah kaca berupa karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O) yang dihasilkan dari setiap unit proses pada sistem STP hunian vertikal?
2. Bagaimana kontribusi masing-masing unit proses terhadap nilai Global Warming Potential (GWP) pada sistem pengolahan air limbah domestik?
3. Berapa nilai total Global Warming Potential (GWP) sistem STP berdasarkan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dengan mempertimbangkan penggunaan energi listrik dan proses biologis selama pengolahan air limbah berlangsung?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kontribusi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari operasional Sewage Treatment Plant (STP) pada hunian vertikal menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA). Melalui pendekatan tersebut, diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai besarnya dampak lingkungan yang timbul dari proses pengolahan air limbah domestik.

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung besarnya emisi gas rumah kaca berupa karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O) yang dihasilkan dari setiap unit proses pada sistem STP hunian vertikal.
2. Menganalisis kontribusi relatif masing-masing unit proses terhadap nilai Global Warming Potential (GWP) dalam sistem pengolahan air limbah domestik.

3. Menentukan nilai total Global Warming Potential (GWP) sistem STP berdasarkan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dengan mempertimbangkan emisi langsung dari proses biologis serta emisi tidak langsung yang berasal dari penggunaan energi selama operasional berlangsung.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademik maupun praktis bagi berbagai pihak yang berkaitan dengan pengelolaan lingkungan dan pengolahan air limbah domestik. Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Pemerintah.

Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu sumber informasi dalam penyusunan inventarisasi emisi gas rumah kaca (GRK) pada sektor limbah domestik, khususnya yang berasal dari operasional *Sewage Treatment Plant* (STP). Informasi mengenai kontribusi emisi dari sistem pengolahan air limbah dapat mendukung implementasi kebijakan pengendalian emisi, termasuk pelaksanaan Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Nilai Ekonomi Karbon.

Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah daerah dalam menyusun strategi penurunan emisi melalui Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAD-GRK). Secara lebih luas, penelitian ini memiliki keterkaitan dengan upaya pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), terutama pada Tujuan 6 (*Clean Water and Sanitation*) dan Tujuan 13 (*Climate Action*).

2. Bagi Akademisi.

Penelitian ini diharapkan dapat menambah referensi ilmiah dalam bidang teknik lingkungan, khususnya terkait penerapan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) pada sistem pengolahan air limbah domestik. Selain itu, hasil penelitian juga dapat digunakan sebagai bahan pengembangan untuk penelitian lanjutan mengenai analisis dampak lingkungan, pengelolaan

limbah berkelanjutan, serta evaluasi kinerja sistem pengolahan air limbah berbasis pendekatan siklus hidup.

3. Bagi Perusahaan/ Pengelola Hunian Vertikal.

Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pertimbangan dalam upaya meningkatkan kinerja operasional STP, terutama yang berkaitan dengan efisiensi penggunaan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Melalui hasil analisis yang diperoleh, pengelola bangunan dapat mengidentifikasi unit proses yang memberikan kontribusi emisi terbesar sehingga perbaikan operasional dapat dilakukan secara lebih terarah.

Selain itu, informasi yang dihasilkan dari penelitian ini juga dapat mendukung penerapan konsep bangunan berkelanjutan serta menjadi bagian dari upaya peningkatan kinerja lingkungan pada kawasan hunian vertikal.

4. Bagi Masyarakat.

Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman masyarakat mengenai keterkaitan antara aktivitas domestik, produksi air limbah, dan dampaknya terhadap lingkungan. Informasi mengenai potensi emisi gas rumah kaca dari sistem pengolahan air limbah juga dapat mendorong penerapan perilaku yang lebih ramah lingkungan, terutama dalam penggunaan air dan pengelolaan limbah pada kawasan hunian vertikal.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada sistem *Sewage Treatment Plant* (STP) di Apartemen Graha Golf Surabaya dengan batas sistem (*system boundary*) gate-to-gate. Ruang lingkup tersebut mencakup seluruh tahapan pengolahan air limbah domestik, mulai dari aliran masuk (*influent*) hingga air hasil olahan (*effluent*) yang difokuskan pada parameter emisi CO₂, CH₄, dan N₂O karena ketiga gas tersebut merupakan komponen utama gas rumah kaca yang paling banyak digunakan dalam evaluasi Global Warming Potential (GWP) pada sistem pengolahan air limbah domestik berdasarkan pedoman IPCC. Pemilihan parameter tersebut juga disesuaikan dengan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) yang digunakan dalam penelitian untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim secara kuantitatif.

Parameter dampak lingkungan lainnya, seperti eutrofikasi, acidification, maupun human toxicity, tidak dianalisis dalam penelitian ini karena keterbatasan data inventori dan ruang lingkup penelitian yang difokuskan pada kategori dampak perubahan iklim. Dengan pembatasan tersebut, analisis dapat dilakukan secara lebih mendalam terhadap kontribusi emisi gas rumah kaca pada operasional sistem STP hunian vertikal.

Data penelitian terdiri atas hasil pengujian kualitas efluen, data operasional STP, serta data inventori yang berkaitan dengan penggunaan energi listrik dan bahan kimia selama proses pengolahan berlangsung. Seluruh data tersebut dianalisis menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk memperoleh gambaran kuantitatif mengenai kontribusi emisi gas rumah kaca dari sistem pengolahan air limbah domestik.

Penelitian ini menggunakan data operasional STP periode 2023–2025 sehingga memungkinkan dilakukan evaluasi kecenderungan emisi gas rumah kaca dari waktu ke waktu. Rentang data tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai pengaruh kondisi operasional terhadap nilai GWP serta membantu mengidentifikasi potensi peningkatan kinerja sistem dalam upaya pengurangan dampak lingkungan.