

BAB 5

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kontribusi emisi gas rumah kaca (GRK) dari operasional Sewage Treatment Plant (STP) pada hunian vertikal menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dengan batas sistem gate-to-gate. Analisis dilakukan berdasarkan pedoman IPCC 2019 Refinement dengan mempertimbangkan emisi langsung (Scope 1) yang berasal dari proses biologis serta emisi tidak langsung (Scope 2) dari konsumsi energi listrik. Seluruh emisi kemudian dikonversi ke dalam indikator Global Warming Potential (GWP) dalam satuan kg CO₂-ekuivalen.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa operasional STP menghasilkan emisi gas rumah kaca yang berasal dari konsumsi energi listrik, proses degradasi bahan organik, serta transformasi senyawa nitrogen selama pengolahan air limbah domestik berlangsung. Emisi tidak langsung dari penggunaan energi listrik menjadi kontributor terbesar terhadap total nilai GWP, terutama pada unit aerasi yang memiliki kebutuhan energi paling tinggi dibandingkan unit proses lainnya.

Nilai emisi gas rumah kaca yang diperoleh dalam penelitian ini masih berada pada rentang hasil penelitian internasional terkait sistem pengolahan air limbah biologis. Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil analisis yang diperoleh masih konsisten dengan karakteristik operasional instalasi pengolahan air limbah domestik berbasis lumpur aktif.

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa faktor emisi listrik dan Methane Correction Factor (MCF) merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap total nilai emisi gas rumah kaca. Sementara itu, faktor emisi N₂O dan debit air limbah per kapita memberikan pengaruh yang relatif lebih kecil terhadap hasil perhitungan GWP.

Berdasarkan hasil analisis LCA, strategi mitigasi emisi yang direkomendasikan meliputi optimalisasi konsumsi energi pada sistem aerasi, pengendalian kondisi operasi proses biologis, peningkatan efisiensi peralatan pendukung, pemanfaatan energi terbarukan, serta monitoring kinerja lingkungan STP secara berkala. Upaya tersebut diharapkan dapat membantu menurunkan

kontribusi emisi gas rumah kaca dari sistem pengolahan air limbah domestik pada kawasan hunian vertikal.

Pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) pada penelitian ini mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kontribusi emisi gas rumah kaca pada sistem pengolahan air limbah domestik. Metode ini memungkinkan integrasi emisi langsung (Scope 1) dan emisi tidak langsung (Scope 2) ke dalam satu indikator lingkungan berupa Global Warming Potential (GWP), sehingga hubungan antara kondisi operasional sistem dan dampak perubahan iklim dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.

Melalui pendekatan tersebut, identifikasi hotspot emisi serta evaluasi efisiensi operasional sistem STP dapat dilakukan secara lebih sistematis. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa penggunaan metode LCA dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pengelolaan infrastruktur bangunan yang lebih efisien, rendah karbon, dan berkelanjutan pada kawasan hunian vertikal.

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Beban organik air limbah domestik (*Total Organically Degradable Material / TOW*) menunjukkan kecenderungan meningkat selama periode penelitian. Nilai TOW meningkat dari 8.194,3 kg BOD/tahun pada tahun 2023 menjadi 10.110,5 kg BOD/tahun pada tahun 2025. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh bertambahnya jumlah penghuni apartemen dari 449 menjadi 554 orang, sehingga beban pencemar organik yang masuk ke sistem pengolahan air limbah domestik juga mengalami peningkatan.
2. Emisi metana (CH_4) mengalami peningkatan seiring bertambahnya beban organik air limbah domestik. Emisi CH_4 yang dihasilkan dari proses degradasi bahan organik meningkat dari 245,83 kg/tahun pada tahun 2023 menjadi 303,32 kg/tahun pada tahun 2025. Meskipun sistem pengolahan yang digunakan merupakan proses biologis aerobik dengan nilai *Methane Correction Factor* (MCF) yang relatif rendah, yaitu sebesar 0,05, peningkatan jumlah bahan organik yang masuk ke dalam sistem tetap memengaruhi besarnya potensi pembentukan metana.

3. Emisi dinitrogen oksida (N₂O) yang dihasilkan dari proses transformasi nitrogen berada pada kisaran 0,0105–0,0438 kg/tahun. Secara kuantitatif, jumlah emisi N₂O relatif lebih kecil dibandingkan emisi gas rumah kaca lainnya. Namun demikian, N₂O tetap memberikan kontribusi terhadap nilai *Global Warming Potential* (GWP) karena memiliki faktor karakterisasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida.
4. Konsumsi energi listrik menjadi sumber emisi terbesar dalam operasional STP. Penggunaan energi listrik tahunan berada pada kisaran 40.925,72–43.383,90 kWh/tahun dan menghasilkan emisi karbon dioksida sebesar 35.606,25–37.743,99 kg CO₂/tahun berdasarkan faktor emisi sistem kelistrikan JAMALI sebesar 0,87 kg CO₂/kWh. Hasil tersebut menunjukkan bahwa emisi tidak langsung (*Scope 2*) merupakan kontributor dominan terhadap total emisi gas rumah kaca pada sistem STP.
5. Total dampak pemanasan global sistem STP berada pada kisaran 42.296,1–43.862,0 kg CO₂-eq/tahun. Hasil *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) menunjukkan bahwa total emisi gas rumah kaca mengalami peningkatan seiring bertambahnya jumlah penghuni dan volume air limbah domestik yang diolah. Meskipun demikian, peningkatan total emisi masih relatif terkendali karena sistem pengolahan tetap beroperasi dalam kondisi yang stabil dan efisien selama periode penelitian.
6. Nilai emisi berdasarkan *functional unit* menunjukkan kecenderungan penurunan yang mengindikasikan peningkatan efisiensi kinerja lingkungan sistem. Berdasarkan normalisasi terhadap *functional unit* sebesar 1 m³ air limbah domestik terolah, nilai *Global Warming Potential* (GWP) menurun dari 1,29 kg CO₂-eq/m³ pada tahun 2023 menjadi 1,08 kg CO₂-eq/m³ pada tahun 2025. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan volume air limbah domestik tidak diikuti oleh peningkatan dampak lingkungan per satuan volume limbah, sehingga sistem STP masih menunjukkan kinerja lingkungan yang relatif efisien selama periode penelitian.
7. Kontributor utama terhadap dampak pemanasan global pada sistem STP berasal dari konsumsi energi listrik, terutama pada unit aerasi. Hasil analisis kontribusi menunjukkan bahwa emisi CO₂ dari penggunaan energi listrik

menyumbang lebih dari 80% terhadap total nilai *Global Warming Potential* (GWP), diikuti oleh emisi CH₄ dari proses degradasi bahan organik serta emisi N₂O dari proses nitrifikasi–denitrifikasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan energi menjadi faktor penting dalam upaya menurunkan dampak perubahan iklim pada sistem pengolahan air limbah domestik.

8. Pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) terbukti efektif digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan pada sistem STP skala gedung. Metode ini mampu mengintegrasikan berbagai sumber emisi gas rumah kaca secara kuantitatif ke dalam satu indikator lingkungan yang komprehensif, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kontribusi operasional STP terhadap potensi pemanasan global. Dengan pendekatan tersebut, hasil analisis dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan untuk pengelolaan infrastruktur bangunan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Keberadaan Sewage Treatment Plant (STP) pada kawasan hunian vertikal memiliki peran penting dalam mendukung pengendalian pencemaran lingkungan perkotaan, khususnya terhadap pencemaran badan air akibat air limbah domestik. Selain berfungsi menurunkan kandungan pencemar organik dan nutrien, sistem STP juga menjadi bagian penting dalam mendukung pengelolaan lingkungan berkelanjutan pada kawasan dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi. Namun demikian, operasional STP juga memiliki konsekuensi terhadap terbentuknya emisi gas rumah kaca yang berasal dari penggunaan energi listrik maupun proses biologis selama pengolahan berlangsung. Oleh karena itu, pengelolaan STP pada hunian vertikal tidak hanya perlu mempertimbangkan kualitas efluen, tetapi juga efisiensi energi dan potensi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama operasional sistem berlangsung.

5.2. Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa rekomendasi yang dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kinerja lingkungan sistem *Sewage Treatment Plant* (STP) pada hunian vertikal adalah sebagai berikut:

1. Sistem aerasi merupakan unit dengan konsumsi energi listrik terbesar dalam operasional STP. Upaya peningkatan efisiensi dapat dilakukan melalui penggunaan blower dengan konsumsi daya yang lebih rendah, penggantian diffuser dengan efisiensi transfer oksigen yang lebih baik, serta penerapan sistem kontrol otomatis berbasis kebutuhan oksigen terlarut (*dissolved oxygen control*). Optimalisasi pada unit aerasi berpotensi menurunkan konsumsi energi listrik sekaligus mengurangi emisi CO₂ tidak langsung dari penggunaan listrik. Upaya mitigasi emisi gas rumah kaca pada sistem Sewage Treatment Plant (STP) perlu dilakukan secara terintegrasi melalui peningkatan efisiensi energi dan pengendalian kondisi biologis proses pengolahan air limbah. Berdasarkan hasil penelitian, unit aerasi menjadi kontributor terbesar terhadap nilai Global Warming Potential (GWP) karena tingginya konsumsi energi listrik yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan oksigen mikroorganisme selama proses biodegradasi bahan organik berlangsung. Optimalisasi sistem aerasi dapat dilakukan melalui pengaturan suplai udara sesuai kebutuhan oksigen terlarut (*dissolved oxygen*), penggunaan blower dengan efisiensi energi yang lebih baik, serta pemanfaatan fine bubble diffuser untuk meningkatkan efisiensi transfer oksigen. Pengendalian tersebut berpotensi menurunkan konsumsi energi listrik sekaligus mengurangi emisi CO₂ tidak langsung dari penggunaan listrik. Selain itu, pengendalian kondisi biologis dalam sistem pengolahan juga penting dilakukan untuk meminimalkan pembentukan emisi CH₄ dan N₂O. Pengaturan sludge retention time (SRT), stabilitas beban organik, serta pemantauan parameter operasional secara berkala dapat membantu menjaga proses biologis tetap berlangsung dalam kondisi optimal sehingga pembentukan zona anaerob yang memicu produksi metana dapat diminimalkan. Dalam jangka panjang, pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti panel surya (*solar photovoltaic*) pada sistem operasional bangunan dapat menjadi alternatif untuk menurunkan emisi karbon dari konsumsi energi listrik. Selain mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca, penerapan strategi tersebut juga dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pengelolaan lingkungan pada kawasan hunian vertikal.

2. Stabilitas proses biologis sangat memengaruhi potensi pembentukan emisi CH_4 dan N_2O pada sistem pengolahan air limbah. Pengendalian beban organik, pengaturan *sludge retention time* (SRT), serta pemantauan konsentrasi oksigen terlarut secara berkala perlu dilakukan untuk menjaga kondisi operasi tetap stabil. Dengan kondisi biologis yang lebih terkendali, potensi pembentukan emisi gas rumah kaca selama proses pengolahan air limbah dapat diminimalkan.
3. Penggunaan pompa dengan efisiensi energi yang lebih tinggi, penerapan sistem kontrol otomatis, serta pemeliharaan rutin pada peralatan elektromekanis dapat membantu menurunkan konsumsi energi listrik secara keseluruhan. Upaya tersebut berpotensi memberikan kontribusi yang cukup signifikan terhadap penurunan emisi tidak langsung (*Scope 2*) dari operasional STP.
4. Integrasi sumber energi terbarukan, seperti panel surya (*solar photovoltaic*), dapat menjadi alternatif untuk mengurangi emisi karbon yang berasal dari konsumsi energi listrik. Pemanfaatan energi terbarukan berpotensi menurunkan faktor emisi listrik sehingga nilai *Global Warming Potential* (GWP) pada sistem STP juga dapat dikurangi.
5. Pencatatan data operasional secara berkala, meliputi konsumsi energi listrik, debit air limbah, kualitas influen, kualitas efluen, serta produksi lumpur, perlu dilakukan secara konsisten untuk meningkatkan akurasi evaluasi kinerja lingkungan sistem STP. Data operasional yang terdokumentasi dengan baik juga dapat mendukung proses pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan bangunan yang lebih berkelanjutan.
6. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan kategori dampak lingkungan lainnya, seperti eutrofikasi (*eutrophication*) dan pengasaman (*acidification*), sehingga evaluasi dampak lingkungan sistem pengolahan air limbah dapat dilakukan secara lebih menyeluruh. Selain itu, penelitian berikutnya juga dapat membandingkan kinerja lingkungan dari berbagai teknologi pengolahan air limbah domestik untuk memperoleh alternatif sistem yang lebih efisien dan berkelanjutan. Integrasi metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan analisis biaya siklus

hidup (Life Cycle Costing / LCC) juga dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai keterkaitan aspek lingkungan dan ekonomi dalam pengelolaan sistem pengolahan air limbah domestik.

7. Pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) dapat digunakan sebagai metode evaluasi kinerja lingkungan yang sistematis dalam pengelolaan fasilitas bangunan, khususnya pada sistem pengolahan air limbah domestik yang beroperasi secara kontinu. Penerapan strategi mitigasi emisi yang tepat berpotensi membantu menurunkan jejak karbon sektor bangunan sekaligus meningkatkan efisiensi operasional dalam jangka panjang.