OPEN ACCESS
Journal Homepage: http://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jwl

JURNAL WILAYAH DAN LINGKUNGAN
P-ISSN: 2338-1604 dan E-ISSN: 2407-8751
Volume 13 Nomor 2, Agustus 2025, 1-19
https://doi.org/10.14710/jwl.13.2.1-19

Skenario Mitigasi Gas Rumah Kaca: Studi Kasus Pengurangan Emisi Kota Probolinggo

Greenhouse Gas Mitigation Scenario: A Case Study of Emission Reduction in Probolinggo City

Adjie Pamungkas[1]
Departemen Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian (FTSPK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Gita Rama Mahardhika
Monash University Indonesia, Tangerang, Indonesia

Anggi Dela Ayu Puspita
Development Initiative for Indonesia (DIFI), Surabaya, Indonesia

Meirli Kurniawan
Pemerintah Kota Probolinggo, Probolinggo, Indonesia

Ihsani Merdikawati
Pemerintah Kota Probolinggo, Probolinggo, Indonesia

Aricandra Nurkholishari
Pemerintah Kota Probolinggo, Probolinggo, Indonesia

Achsan Jamalurrusid
Pemerintah Kota Probolinggo, Probolinggo, Indonesia

Artikel Masuk : 11 September 2023
Artikel Diterima : 9 April 2025
Tersedia Online : 13 Oktober 2025

Abstrak: Perubahan iklim berdampak luas terhadap sektor lingkungan, sosial, dan ekonomi, serta berpotensi mengganggu stabilitas pembangunan jangka panjang. Mitigasi perubahan iklim memerlukan strategi yang terintegrasi, termasuk pada tingkat lokal melalui penyusunan Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAD-GRK). Kota Probolinggo telah menyusun RAD-GRK periode 2013–2020 dan kini membutuhkan pembaruan data dan strategi untuk periode selanjutnya. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan memproyeksikan emisi GRK Kota Probolinggo hingga tahun 2030, serta menyusun skenario mitigasi berbasis data. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif melalui inventarisasi berbasis

[1] Korespondensi Penulis: Departemen Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian (FTSPK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
Email: adjiepaper@gmail.com

How to Cite
Pamungkas, A., Mahardhika, G. R., Puspita, A. D. A., Kurniawan, M., Merdekawati, I., Nurkholishari, A., & Jamalurrusid, A. (2025). Skenario Mitigasi Gas Rumah Kaca: Studi Kasus Pengurangan Emisi Kota Probolinggo. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan, 13*(2), 1-19. https://doi.org/10.14710/jwl.13.2.1-19

© 2025 LAREDEM

aktivitas dan proyeksi ekonomi, menggunakan kalkulator emisi ICLEI dengan tahun dasar 2019. Hasil menunjukkan proyeksi emisi GRK pada tahun 2030 sebesar 1.300.964 ton CO_2e, dengan kapasitas serapan ruang terbuka hijau (RTH) sebesar 811.879 ton CO_2e. Dari total emisi tersebut, disusun empat skenario mitigasi, dengan skenario keempat atau skenario progresif dengan penurunan emisi tertinggi sebesar 15,19% yang disepakati oleh Pemerintah Kota Probolinggo menjadi target penurunan emisinya pada 2030. Target penurunan emisi tersebut ditranslasikan melalui strategi mitigasi mencakup efisiensi energi, pemanfaatan CH_4, pengurangan pupuk nitrogen, pengurangan limbah, dan peningkatan RTH.

Kata Kunci: Emisi GRK; Mitigasi; Perubahan Iklim; Probolinggo; Proyeksi; RAD-GRK.

Abstract: *Climate change has wide-ranging impacts on environmental, social, and economic sectors, and poses a potential threat to the long-term stability of development. Effective climate change mitigation requires integrated strategies, including at the local level through the formulation of Regional Action Plans for Greenhouse Gas Emission Reduction (RAD-GRK). The City of Probolinggo had implemented its RAD-GRK for the 2013–2020 period and now requires updated data and strategies for the next planning cycle. This study aims to calculate and project Probolinggo City's GHG emissions through 2030 and to develop data-driven mitigation scenarios. A quantitative approach was used through activity-based inventory and economic projection methods, utilizing the ICLEI Emissions Calculator with 2019 as the base year. The results show that the projected GHG emissions in 2030 will reach 1,300,964 tons of CO_2e, while the carbon sequestration capacity of green open space (RTH) is estimated at 811,879 tons of CO_2e. From this total, four mitigation scenarios were developed, with the fourth or progressive scenario—yielding the highest emission reduction of 15.19%—officially adopted by the Probolinggo City Government as its emissions reduction target for 2030. This target is translated into mitigation strategies including energy efficiency, CH_4 utilization, reduction of nitrogen-based fertilizers, waste minimization, and expansion of green open spaces.*

Keywords*: GHG Emissions; Mitigation; Climate Change; Probolinggo; Projection; RAD-GRK*

Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan ancaman global yang nyata dihadapi oleh negara-negara di seluruh dunia termasuk Indonesia (Legionosuko et al., 2019). Dampak perubahan iklim mengancam ragam sektor mulai dari sektor kelautan dan pesisir, sektor air, sektor pertanian, hingga sektor kesehatan yang dapat mempengaruhi stabilitas ekonomi makro, regional, nasional bahkan internasional (Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional, 2021). Dampak multisektor dari perubahan iklim ini dapat diminimasi dengan komitmen mitigasi dan adaptasi yang terkoordinasi dari tingkat internasional hingga lokal. Di tingkat internasional, Perjanjian Paris telah mendorong hampir semua negara untuk menetapkan *Nationally Determined Contributions* (NDCs) yang berisi target pengurangan emisi (New Climate Institute, 2019; Roelfsema et al., 2020). Namun, meskipun jumlah kebijakan iklim global meningkat pesat dan membantu memperlambat kenaikan emisi gas rumah kaca, upaya yang dilakukan saat ini masih jauh dari cukup untuk mencapai target Perjanjian Paris sehingga diperlukan peningkatan ambisi kebijakan dan implementasi di semua negara (Hoppe et al., 2023).

Selama tiga dekade terakhir, kebijakan iklim telah menghasilkan dampak nyata, termasuk dalam mengurangi konsumsi energi, memperlambat deforestasi, serta menurunkan biaya teknologi rendah karbon (Hoppe et al., 2023). Tanpa kebijakan mitigasi ini, emisi global diperkirakan akan meningkat beberapa miliar ton CO_2e lebih tinggi per tahun (Hoppe et al., 2023). Terdapat beragam instrumen kebijakan telah diterapkan untuk menekan emisi, masing-masing dengan kelebihan dan keterbatasan. Contoh kebijakan iklim skala nasional adalah penetapan harga karbon (*carbon pricing*), sistem perdagangan emisi, yang mendorong pengurangan emisi secara bertahap, tetapi dampaknya masih terbatas

karena kendala politik dan ekonomi (Tvinnereim & Mehling, 2018). Instrumen lainnya yang berkembang secara global adalah insentif energi terbarukan melalui subsidi, pendanaan penelitian, dan pengecualian pajak dalam investasi energi bersih (Bölük & Kaplan, 2022).

Selain kebijakan nasional, kota-kota di seluruh dunia memainkan peran penting dalam implementasi strategi mitigasi. Daerah perkotaan bertanggung jawab atas sebagian besar emisi melalui transportasi, bangunan, industri, dan limbah (United Nations Development Programme (UNDP), 2024; United States Environmental Protection Agency (US-EPA), 2025). Banyak kota telah mengadopsi Rencana Aksi Iklim atau strategi pengurangan emisi yang selaras dengan target nasional dan studi C40 Cities (2018a) menunjukkan bahwa kebijakan lokal yang sudah diterapkan berhasil mengurangi emisi hingga ratusan juta ton secara kolektif, dan beberapa kota bahkan telah mencapai puncak emisi mereka dan mulai menurun. Tinjauan sistematis terhadap 234 studi kasus kota dan regional mengungkapkan bahwa tindakan yang terkait dengan perencanaan penggunaan lahan, ekonomi sirkular, dan manajemen limbah memiliki dampak mitigasi yang paling signifikan (Burley Farr et al., 2023). Oleh karena itu, menyelaraskan tindakan mitigasi diperkotaan berdasarkan intervensi yang ter terbukti efektif merupakan peluang utama untuk meningkatkan hasil. Riset Sethi et al. (2020) mengidentifikasi 41 solusi berbeda di seluruh sektor, dengan potensi terbesar dalam efisiensi bangunan, transportasi bersih, dan intervensi teknologi limbah/energi. Beberapa kota yang berhasil dalam pengurangan emisi antara lain Paris, yang mengurangi emisi sebesar 25% antara tahun 2004–2018 dengan mengadopsi kombinasi efisiensi bangunan, transportasi berkelanjutan, dan energi bersih (C40 Cities, 2018b).

Keberhasilan mitigasi gas rumah kaca sangat bergantung pada koordinasi antara kebijakan nasional dan implementasi lokal. Pemerintah Indonesia telah menetapkan Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) melalui Peraturan Presiden (PERPRES) Nomor 61 Tahun 2011 Tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca, yang berfungsi sebagai kerangka kerja nasional untuk upaya penurunan emisi GRK (Sekretariat RAN-GRK, 2019). Di tingkat lokal, pemerintah daerah diwajibkan untuk menyusun Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAD-GRK) yang sejalan dengan kebijakan nasional, memastikan bahwa strategi mitigasi diadopsi dan diimplementasikan sesuai dengan kondisi spesifik daerah.

Kota Probolinggo adalah salah satu contoh bagaimana strategi mitigasi diterapkan di tingkat daerah. Kota ini telah menyusun RAD-GRK pertama pada periode 2013–2020 melalui Peraturan Walikota Probolinggo Nomor 37 Tahun 2013 Tentang RAD Penurunan Emisi GRK, dengan menargetkan pengurangan emisi di sektor transportasi, industri, pemukiman, dan pengelolaan limbah. Namun, perhitungan terbaru menunjukkan bahwa pada tahun 2022, emisi kota ini justru meningkat menjadi sebesar 140.196 ton CO_2e, menjadi 761.293 ton CO_2e, yang menunjukkan bahwa strategi yang diterapkan dalam RAD-GRK sebelumnya belum cukup efektif. Oleh karena itu, perencanaan ulang strategi mitigasi diperlukan untuk memastikan target emisi yang lebih efektif. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menginventarisasi emisi eksisting Kota Probolinggo, memproyeksi emisi ke depannya, dan menyusun strategi mitigasi yang tepat.

Metodologi

Pendekatan Penelitian

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi GRK di atmosfer, terutama akibat aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan praktik pertanian tertentu (European Commission, n.d.; United States Environmental Protection Agency (US-EPA), 2025). Gas-gas ini, termasuk karbon

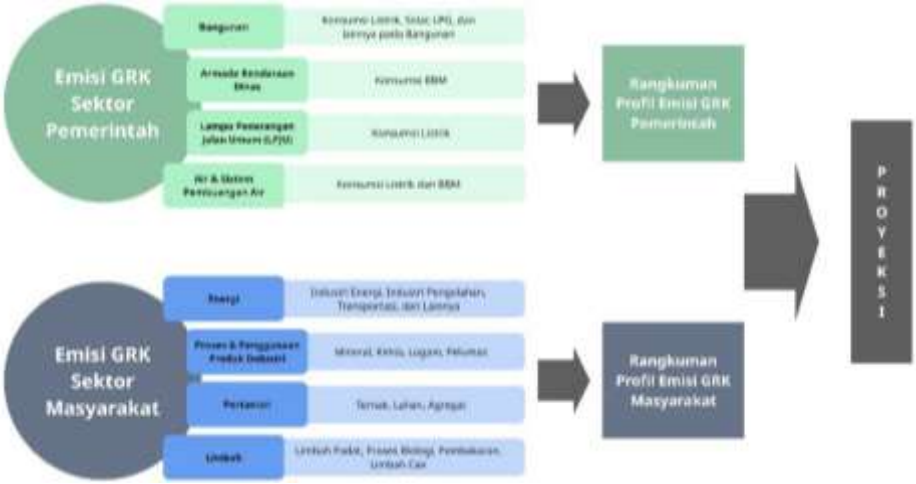
dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O), memerangkap panas di atmosfer dan menyebabkan peningkatan suhu global (Denchak, 2023; Terrascope, 2024; Vaz Jr, 2022). Dampak dari perubahan iklim meliputi peningkatan suhu rata-rata, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem (World Meteorological Organization (WMO), 2025).

Emisi GRK merupakan kombinasi antara kegiatan manusia dengan koefisien yang menunjukkan banyaknya emisi yang terkandung dalam satu satuan kegiatan (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006). GRK dipancarkan dari berbagai sumber, termasuk produksi listrik, transportasi, industri, pertanian, dan kehutanan (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022). berdasarkan data global, sektor produksi listrik dan panas menyumbang sekitar 34% dari total emisi GRK, diikuti oleh sektor industri sebesar 24%, pertanian, kehutanan, dan penggunaan lahan lainnya (AFOLU) sebesar 22%, transportasi sebesar 15%, bangunan sebesar 6%, dan pengelolaan limbah sebesar 3% (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022).

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menghitung, memproyeksikan, dan menganalisis skenario mitigasi emisi GRK di Kota Probolinggo. Metodologi yang digunakan mengikuti pedoman internasional yang diakui, termasuk 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories dan Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC) yang dikembangkan oleh ICLEI (Ranganathan et al., 2004; The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006). Guna mengukur dan mengelola emisi GRK, dilakukan inventarisasi emisi yang mencakup identifikasi sumber emisi dan kuantifikasinya. Metodologi yang umum digunakan adalah pendekatan berbasis aktivitas, di mana data aktivitas dikalikan dengan faktor emisi yang sesuai (Fong et al., 2014). Rumus dasar untuk perhitungan emisi adalah:

$$Emisi = Data\ Kegiatan \times Faktor\ Emisi$$

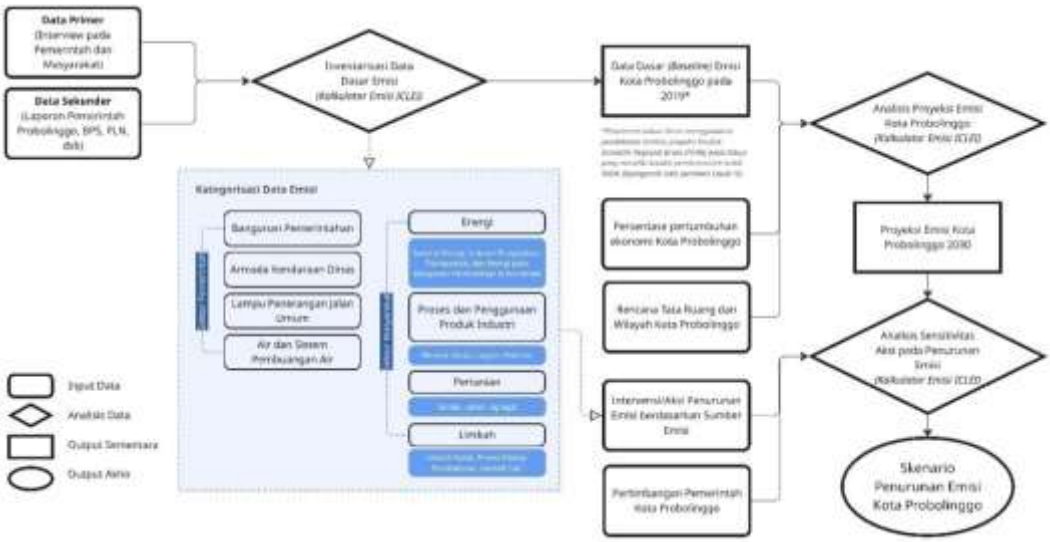
Data Kegiatan adalah data suatu kegiatan yang menghasilkan GRK dalam sektor tertentu sedangkan Faktor Emisi adalah suatu faktor atau koefisien untuk mengonversi data kegiatan ke dalam emisi (ton CO_2 equivalen). Pada penelitian ini kalkulator yang digunakan adalah kalkulator yang dikembangkan oleh ICLEI – Local Government for Sustainability dan Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) yang membagi komponen data kegiatan emisinya berdasarkan IPCC meliputi sektor produksi dan penggunaan energi (industri pengolahan, transportasi, permukiman dan komersial), proses dan produk industri, pertanian kehutanan dan penggunaan lahan, serta pengolahan limbah (Carreño, 2020). Kalkulator/perangkat ini juga membedakan perhitungan emisi menjadi lingkup pemerintah dan lingkup masyarakat dengan rincian komponen data kegiatan yang tertera pada **Gambar 1**.



Sumber: ICLEI – Local Governments for Sustainability, 2020 (Diadaptasi oleh Penulis)

Gambar 1. Rincian Komponen Perhitungan Pada Kalkulator Emisi

Proses analisis dalam penelitian ini mengikuti kerangka analitis sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 2**, yang dimulai dari pengumpulan data kegiatan emisi berdasarkan sektor dan lingkup (pemerintah dan masyarakat), kemudian dilakukan inventarisasi emisi GRK tahun dasar sebagai titik acuan. Selanjutnya, dilakukan proyeksi emisi hingga tahun 2030 dengan mempertimbangkan pertumbuhan ekonomi. Tahap akhir dari proses ini adalah analisis sensitivitas untuk menilai efektivitas setiap aksi terhadap penurunan emisi, serta penyusunan strategi mitigasi berbasis hasil diskusi para pemangku kepentingan. Pendekatan ini memungkinkan penelitian ini untuk tidak hanya mengukur kondisi eksisting, tetapi juga merancang arah kebijakan yang lebih strategis dan berbasis data dalam upaya penurunan emisi di Kota Probolinggo.



Sumber: Tim Penulis, 2025

Gambar 2. Tahapan Analisis

Pengumpulan Data

Berdasarkan klasifikasi data emisi yang tertuang pada **Gambar 1**, terdapat dua proses pengumpulan data yang dilakukan pada penelitian ini yakni data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara langsung dan pengumpulan dokumen dari pemerintah kota dan masyarakat, khususnya dari SKPD (Satuan Kerja Perangkat Daerah). Data ini mencakup konsumsi energi (listrik, bahan bakar), armada kendaraan dinas, operasional lampu penerangan jalan umum (PJU), serta sistem air bersih dan pembuangan air limbah. Dokumen pendukung berupa: (1) Rekening listrik bangunan dinas; (2) Kuitansi pembelian BBM; dan (3) Kontrak kerjasama pengelolaan limbah dan air. Data tersebut dikumpulkan dari 21 dinas, 5 badan pemerintah, 5 kecamatan dan 18 kelurahan, 3 institusi lainnya seperti RSUD, Inspektorat, dan Sekretariat DPRD.

Di sisi lain, data sekunder diperoleh dari laporan dokumentasi pemerintah dan instansi swasta yang menyuplai energi dan layanan publik, seperti BPS, PLN, Pertamina, dan pengelola air limbah. Jenis data ini mencakup konsumsi energi sektor industri, transportasi masyarakat, permukiman, dan limbah dengan referensi utama berasal dari Dokumen Probolinggo Dalam Angka, Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah, Rencana Tata Ruang dan Wilayah, hingga Laporan Status Lingkungan Hidup.

Penentuan Tahun Dasar dan Pendekatan Proyeksi

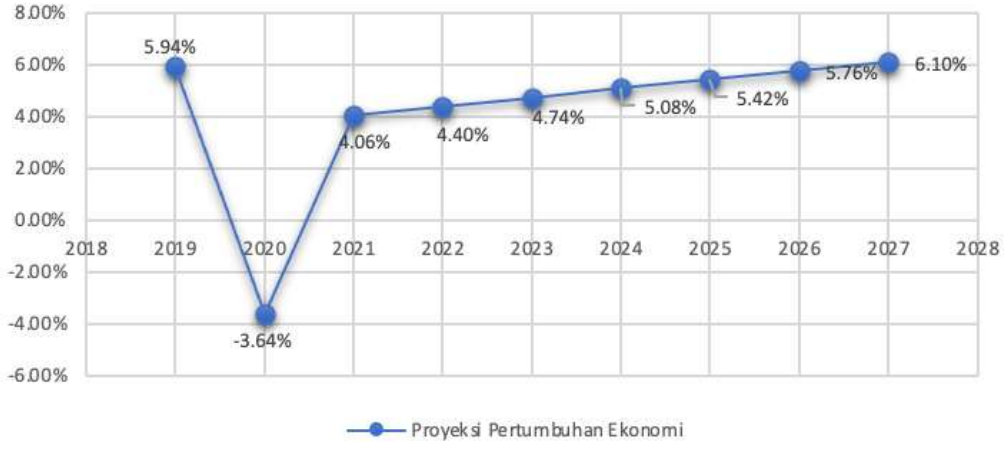
Proses penentuan tahun dan pendekatan proyeksi diputuskan dengan mencari kesepakatan dengan Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Penelitian dan Pengembangan (Bappeda Litbang) Kota Probolinggo melalui proses konsultasi. Pada konteks penentuan tahun dasar, digunakan pendekatan analisis proyeksi Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) sehingga menemukan konsensus bahwa tahun dasar yang digunakan adalah 2019. Tahun 2019 memiliki kondisi yang tergolong 'normal' dalam hal cuaca, bencana, kondisi sosial ekonomi politik karena tidak dalam kondisi pandemi Covid-19 yang menyebabkan beberapa kegiatan terganggu, serta memiliki data yang hampir lengkap dibandingkan tahun-tahun sebelumnya.

Sedangkan asumsi yang digunakan untuk untuk proyeksi emisi GRK di lingkup pemerintah menggunakan skenario *Business as Usual* (BaU) (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014). Skenario ini menggunakan hasil analisis rata-rata pertumbuhan ekonomi tahun 2015-2019 sebesar 5,90% (Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Probolinggo, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019). Berdasarkan hasil kesepakatan, angka ini diasumsikan sebagai kinerja kegiatan riil Kota Probolinggo tanpa melihat kondisi saat pandemi Covid-19. Sementara itu, pendekatan proyeksi untuk sub sektor lahan tidak bisa menggunakan skenario BaU melalui pertumbuhan ekonomi, karena peningkatan lahan tidak bisa dihitung dengan tren. Maka dari itu proyeksi untuk sub sektor lahan menggunakan rencana pola ruang dari Rencata Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Probolinggo tahun 2020-2040.

Penentuan Tahun Awal Proyeksi

Dari hasil analisis 2015 hingga 2019, rata-rata percepatan pertumbuhan tiap tahun sebesar 0,34% (Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Probolinggo, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019). Percepatan pertumbuhan ini digunakan sebagai bahan proyeksi PDRB, sehingga didapatkan informasi bahwa di tahun 2026 Kota Probolinggo memiliki pertumbuhan ekonomi yang sama dengan tahun 2019 yakni 5,76%. Maka, dapat ditetapkan tahun 2026

sebagai tahun awal proyeksi emisi GRK di Kota Probolinggo. Rincian analisis tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Sumber: Tim Penulis, 2025

Gambar 3. Hasil Analisis Proyeksi PDRB Kota Probolinggo

Analisis Sensitivitas dan Penyusunan Skenario

Analisis sensitivitas merupakan suatu metode evaluasi untuk menilai seberapa besar pengaruh perubahan suatu variabel input terhadap hasil akhir dari suatu model atau sistem, dalam konteks ini terhadap tingkat penurunan emisi (Saltelli et al., 2008). Usulan aksi-aksi disusun berdasarkan kondisi eksisting sumber emisi dan potensi emisi yang dihasilkan. Sensitivitas digambarkan sebagai tingkatan atau derajat suatu sistem dipengaruhi atau responsif terhadap rangsangan terhadap tingkat penurunan emisi. Semakin tinggi sensitivitas, semakin besar pengaruh aksi terhadap pengurangan emisi sehingga direkomendasikan menjadi aksi prioritas.

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, skenario mitigasi disusun untuk diajukan pada pemangku kebijakan dalam menurunkan emisi. Penyusunan skenario ini mempertimbangkan kondisi eksisting sumber emisi, potensi emisi yang dihasilkan, serta tingkat sensitivitas masing-masing intervensi. Tujuan utama adalah mengidentifikasi kombinasi intervensi yang paling efektif dan feasible dalam mencapai target penurunan emisi. Empat skenario utama yang dapat disusun adalah:

1. **Skenario Moderat**: Seluruh intervensi dilakukan dengan besaran atau frekuensi yang sama, tanpa mempertimbangkan tingkat sensitivitasnya. Skenario ini memberikan gambaran dasar tentang potensi penurunan emisi ketika semua intervensi diterapkan secara merata.
2. **Skenario Optimis**: Mirip dengan skenario moderat, namun intervensi dengan sensitivitas tinggi ditingkatkan intensitasnya. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa meningkatkan intervensi yang paling responsif akan menghasilkan penurunan emisi yang lebih signifikan.
3. **Skenario Pesimis**: Seperti skenario moderat, tetapi intervensi yang sulit dilaksanakan atau memiliki hambatan signifikan dikurangi frekuensinya.

Tujuannya adalah untuk menjaga kelayakan implementasi dengan mengurangi fokus pada intervensi yang kurang memungkinkan dilakukan.

4. **Skenario Progresif**: Meningkatkan intervensi yang memiliki sensitivitas tinggi dan mengurangi atau menghilangkan intervensi yang tidak *feasible*, disesuaikan dengan konteks lokal dan keterbatasan sumber daya. Skenario ini bertujuan untuk memaksimalkan efektivitas penurunan emisi sambil mempertimbangkan realitas implementasi di lapangan.

Hasil dan Pembahasan

Baseline dan Proyeksi Emisi GRK Kota Probolinggo pada Lingkup Pemerintah

Sumber emisi lingkup pemerintah terdiri dari penggunaan listrik, gas, liquefied petroleum gas (LPG), solar, bisolar, bensin, dan pertamax minyak tanah. Emisi terbesar yaitu penggunaan listrik yang menghasilkan 3.778 ton CO_2e/tahun. Emisi penggunaan listrik ini dapat dirinci menjadi 2.108 ton CO_2e/tahun pada listrik bangunan, 577 ton CO_2e/tahun pada PJU, serta 1.093 ton CO2e/tahun pada listrik air dan sistem pembuangan air. Penghasil emisi terbesar kedua adalah jenis energi bensin menghasilkan 762 ton CO_2e /tahun. Dari hasil proyeksi berdasarkan persentase pertumbuhan ekonomi, dapat diketahui bahwa total emisi CO_2e lingkup pemerintah di Kota Probolinggo tahun 2030 meningkat dari sebesar 4.737 ton menjadi 5.855 ton. Rincian data emisi tahun dasar dan tahun proyeksi ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Profil Emisi pada Lingkup Pemerintah Kota Probolinggo

Sektor	Emisi Tahun Dasar CO_2e (ton)	Emisi Proyeksi 2030 CO_2e (ton)	Persentase Emisi Sub-sektor terhadap Total
Bangunan			
Listrik	2.108	2.606	44,51%
Gas	0	0	0,00%
Solar	21	26	0,44%
Minyak tanah	0	0	0,00%
Armada Kendaraan			
Bensin	762	942	16,09%
Solar	158	195	3,33%
Biopertamax	9	11	0,19%
Biosolar	0	0	0,00%
Penerangan Jalan			
Listrik PJU	577	713	12,18%
Air dan Sistem Pembuangan Air			
Listrik	1.093	1.351	23,07%
Solar	9	11	0,19%
Bensin	0	0	0,00%
Total	4.737	5.855	

Sumber: Hasil Analisis Tim Penulis, 2022

Baseline dan Proyeksi Emisi GRK Kota Probolinggo pada Lingkup Masyarakat

Sumber emisi lingkup masyarakat dibagi dalam empat kategori berdasarkan sumbernya yakni energi, produk dan proses industri, peternakan, serta limbah. Tabulasi kondisi emisi eksisting dan proyeksi di Kota Probolinggo pada lingkup masyarakat tercantum pada **Tabel 2** di bawah ini.

https://doi.org/10.14710/jwl.13.2.1-19

Tabel 2. Profil Emisi pada Lingkup Masyarakat Kota Probolinggo

Sektor	Emisi Tahun Dasar CO_2e (ton)	Emisi Proyeksi 2030 CO_2e (ton)	Persentase Emisi Sub-sektor terhadap Total
Energi			
Industri Energi	0	0	0,00%
Industri Pengolahan	49.909	61.683	7,65%
Transportasi	373.885	462.092	57,33%
Lainnya	317.858	392.847	48,47%
Produk dan Proses Industri			
Industri Mineral	237.553	293.596	36,43%
Industri Kimia	0	0	0,00%
Industri Logam	0	0	0,00%
Industri Non Energi	0	0	0,00%
Peternakan			
Ternak	16.638	20.563	2,55%
Lahan	-287.029	-489.087	-60,68%
Sumber Emisi Agregat	17.777	21.971	2,73%
Limbah			
Limbah Padat	5.806	6.644	0,82%
Pengolahan Biologi	23	29	0,00%
Insinerasi dan Pembakaran Terbuka	0.14	0.17	0,00%
Pengolahan Limbah Cair	28.873	35.685	4,43%
Total	761.292,68	806.023,47	

Sumber: Hasil Analisis Tim Penulis, 2022

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas digambarkan sebagai tingkatan atau derajat dimana suatu sistem dipengaruhi atau responsif terhadap rangsangan terhadap tingkat penurunan emisi (Smith et al., 2008). Semakin tinggi sensitivitas maka aksi semakin direkomendasikan menjadi aksi prioritas karena memiliki pengaruh besar. Sebaliknya, semakin rendah sensitivitas suatu sistem, maka tingkat prioritas aksinya semakin rendah. Berikut adalah hasil analisis sensitivitas penurunan emisi GRK di Kota Probolinggo (**Tabel 3**).

Tabel 3. Analisis Sensitivitas Penurunan Emisi GRK di Kota Probolinggo

No	Jenis Aksi	Dampak Pengurangan pada Sub-sektor	Dampak Pengurangan pada Sektor	Dampak Pengurangan secara Global
1	Realisasi pola ruang berdasarkan RTRW Kota Probolinggo Tahun 2020-2040 (Pemenuhan RTH seluas 30% yang terdiri dari 20% RTH publik dan 10% RTH individu)*	-98%	1698,86%	37,13%
2	Pengurangan konsumsi BBM transportasi masyarakat 10%	10,00%	4,94%	4,81%
3	Pengurangan konsumsi karbonat pada industri keramik sebesar 10%	10,00%	10,00%	3,12%

No	Jenis Aksi	Dampak Pengurangan pada Sub-sektor	Dampak Pengurangan pada Sektor	Dampak Pengurangan secara Global
4	Pengurangan konsumsi listrik 10% di permukiman masyarakat (rumah tangga) melalui *solar cell*/ penghematan listrik	10,00%	3,03%	2,95%
5	Pengurangan konsumsi listrik di sektor bisnis dan pelayanan sosial sebesar 10%	10,00%	1,23%	1,20%
6	Pengurangan konsumsi listrik industri pengolahan sebesar 10%	9,31%	0,63%	0,61%
7	Pengurangan timbulan limbah sebesar 10% (pengurangan sampah dengan melakukan pembatasan, pendauran ulang dan pemanfaatan kembali)	10,00%	1,51%	0,07%
8	Pemanfaatan 10% CH4 dari total produksi emisi tempat pemrosesan akhir atau TPA (penanganan sampah dengan melakukan pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pemrosesan akhir sampah di TPA/TPST/SPA)	10,00%	1,51%	0,07%
9	Pengurangan konsumsi listrik pemerintah sebesar 10%	10,01%	4,49%	0,03%
10	Pengurangan konsumsi listrik pengolahan air limbah dan distribusi air bersih sebesar 10%	13,38%	3,11%	0,02%
11	Pengurangan pemakaian urea 10%	10,00%	1,14%	0,02%
12	Pengurangan konsumsi BBM pada pemerintah sebesar 10%	10,00%	1,97%	0,01%
13	Pengurangan konsumsi penerangan jalan sebesar 10%	10,00%	1,22%	0,01%
14	Pemanfaatan CH4 timbulan peternakan sebesar 10%	10,00%	0,35%	0,01%
15	Pengurangan pemakaian pupuk N buatan 10%	10,00%	0,00%	0,00%

Sumber: Hasil Analisis Tim Penulis, 2022

Tabel 3 menunjukkan jenis aksi dan besar pengaruhnya terhadap penurunan emisi yang diurutkan dari yang terbesar ke terkecil. Aksi nomor 2-15 diterapkan dengan frekuensi 10% terlebih dahulu dan dalam formulasi skenario dapat dilipatgandakan atau direduksi berdasarkan pertimbangan kondisi. Sedangkan untuk aksi nomor 1 sedikit berbeda karena tidak bisa digandakan atau dikurangi karena mengikuti aturan yang ditetapkan oleh RTRW Kota Probolinggo Tahun 2020-2040. Hal tersebut yang menyebabkan nilai signifikansinya berbeda dengan aksi yang lain.

Formulasi Skenario Penurunan Emisi

Berdasarkan hasil analisis, dapat disusun beberapa usulan formulasi skenario penurunan emisi yang kemudian akan dipilih dalam proses diskusi bersama dinas/pemerintahan kota. Berikut merupakan empat skenario penurunan emisi yang diusulkan dengan dampak penurunan emisinya pada tahun 2023 (**Tabel 4**).

https://doi.org/10.14710/jwl.13.2.1-19

Tabel 4. Formulasi Skenario Penurunan Emisi

Skenario	Detail Skenario	Dampak Penurunan
Skenario 1 (Moderat)	Skenario ini adalah penggabungan semua usulan aksi yang dilaksanakan dalam persentase yang normal (tidak ekstrem, atau tidak terlalu besar) sehingga visibilitas penerapannya tinggi. Skenario 1 ini menerapkan aksi-aksi dengan perubahan 10% dari status quo dengan rincian aksi meliputi: (1) pengurangan konsumsi listrik pemerintah; (2) pengurangan konsumsi BBM pemerintah; (3) pengurangan konsumsi penerangan jalan; (4) pengurangan konsumsi listrik sistem pengolahan air limbah dan distribusi air; (5) pengurangan konsumsi listrik industri pengolahan; (6) pengurangan konsumsi BBM pada transportasi masyarakat; (7) pengurangan konsumsi listrik di sektor bisnis dan pelayanan sosial; (8) pengurangan konsumsi listrik di permukiman masyarakat (rumah tangga); (9) pengurangan konsumsi karbonat pada industri keramik; (10) pemanfaatan CH4 timbulan peternakan; (11) pengurangan pemakaian urea; (12) pengurangan pemakaian pupuk N buatan; (12) pengurangan timbulan limbah; (13) pemanfaatan CH4 dari total produksi emisi TPA; dan (14) mempertahankan/meningkatkan RTH sebesar 30% (20% RTH publik dan 10% RTH individu dari permukiman)	Penurunan emisi sebesar 12,11% pada 2030 sehingga emisi menjadi 713.573,92 Ton CO_2e
Skenario 2 (Optimis)	Skenario ini merupakan skenario 1 yang dimodifikasi dimana usulan aksi yang memiliki visibilitas untuk ditingkatkan penerapannya dan memiliki dampak pengurangan yang tinggi akan digandakan presentase penerapannya menjadi 20% dari status quo meliputi: (1) pengurangan konsumsi BBM transportasi masyarakat; (2) pengurangan konsumsi listrik di sektor bisnis dan pelayanan sosial; (3) pengurangan konsumsi listrik di permukiman masyarakat (rumah tangga); dan (4) pengurangan konsumsi karbonat pada industri keramik	Penurunan emisi sebesar 24,53% pada 2030 sehingga emisi menjadi 612.745,21 Ton CO_2e
Skenario 3 (Pesimis)	Skenario ini merupakan skenario 1 yang dimodifikasi dimana usulan aksi yang memiliki visibilitas peneapannya rendah akan diturunkan persentase penerapannya menjadi 5% dari status quo meliputi: (1) pengurangan konsumsi karbonat pada industri keramik	Penurunan emisi sebesar 10,30% pada 2030 sehingga emisi menjadi 728.253,73 Ton CO_2e
Skenario 4 (Progresif)	Skenario ini merupakan skenario 1 yang dimodifikasi, yaitu usulan kegiatan yang sensitif menurunkan emisi ditingkatkan penerapannya menjadi 15 – 20% meliputi: (1) pengurangan konsumsi listrik pemerintah sebesar 15%; (2) pengurangan konsumsi BBM pemerintah sebesar 15%; (3) pengurangan konsumsi penerangan jalan sebesar 15%; (4) pengurangan konsumsi listrik sistem pengolahan air limbah dan distribusi air sebesar 15%; (5) pengurangan konsumsi BBM transportasi masyarakat sebesar 15%; (6) pengurangan konsumsi listrik 20% di permukiman masyarakat (rumah tangga) melalui *solar cell*/penghematan listrik; (7) mempertahankan/meningkatkan RTH sebesar 30% (20% RTH publik atau 10% RTH individu dari permukiman)	Penurunan emisi sebesar 15,19% pada 2030 sehingga emisi menjadi 688.913,73 Ton CO_2e

Sumber: Hasil Analisis Tim Penulis, 2022

Empat skenario yang sudah dilakukan percobaan yaitu skenario 1 (moderat), skenario 2 (optimis), skenario 3 (pesimis) dan skenario 4 (progresif). Proses deliberasi pada pemerintahan Kota Probolinggo menetapkan bahwa kajian penurunan emisi GRK serta aksi adaptasi dan mitigasi dampak perubahan iklim Kota Probolinggo menggunakan

skenario 4. Pada skenario 4 dihasilkan total penurunan emisi GRK di Kota Probolinggo pada 2030 menurun menjadi 688.913,73 Ton CO_2e atau menurun sekitar 15,19%.

Aksi-aksi pada sektor masyarakat dari hasil penyusunan skenario masih bersifat umum sehingga diperlukan eksplorasi dan pendetailan menjadi kegiatan spesifik sebagai pedoman pelaksanaan RAD-GRK sebagai berikut:

1. **Pengurangan konsumsi BBM transportasi masyarakat sebesar 15%,** upaya-upaya pengurangan konsumsi BBM pada transportasi masyarakat dilakukan melalui kegiatan transportasi rendah emisi atau *green transportation.* Praktik *green transportation* misalnya penggunaan transportasi tidak bermotor, peralihan kendaraan pribadi ke transportasi umum, dan peningkatan budaya berjalan kaki (Bagheri et al., 2020; Lu et al., 2022; Luttik & Maters, 2022; Prasara & Bridhikitti, 2022; University of Oxford, 2021). Aksi ini dapat dikemas dalam program-program menarik seperti *car free day*, *bike to school, bike to work*, dan program-program sejenisnya (Fitrahadi et al., 2024). Untuk mendukung aksi di atas, diperlukan program-program tambahan meliputi perbaikan kendaraan umum, pengadaan dan peremajaan transportasi publik, penerapan tarif umum dan tarif pelajar, pembangunan serta pengembangan jalur sepeda dan jalur pejalan kaki (University of Oxford, 2021). Sosialisasi pemakaian kendaraan ramah lingkungan dan ajakan untuk berjalan kaki perlu dilakukan. Kemudian, diperlukan regulasi untuk mengurangi penggunaan kendaraan pribadi seperti pembatasan kendaraan pada jalan tertentu serta intensifikasi dan evaluasi pajak progresif kepemilikan kendaraan roda empat.
2. **Meningkatkan pengendalian penggunaan energi pada bangunan pemerintah dan PJU,** upaya efisiensi PJU dapat secara signifikan mengurangi konsumsi listrik. Retrofitting atau pemugaran efisiensi di gedung-gedung publik terbukti menghasilkan penghematan energi dan beralih ke lampu hemat energi seperti LED juga berdampak besar; lampu jalan LED mengonsumsi ~40–60% lebih sedikit listrik dibanding lampu konvensional (Bowman et al., 2021; Li & Makumbe, 2017). Selain itu, kampanye hemat energi dan manajemen energi terpadu di instansi pemerintah mampu menekan pemakaian energi hingga kisaran 10–30% melalui perubahan perilaku dan optimasi operasional (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2025). Berbagai upaya efisiensi misalnya penerapan hemat energi melalui pembatasan jam operasional hingga pemanfaatan alternatif penghematan, lomba *eco office, eco* pesantren serta Adiwiyata, edaran himbauan penggantian ke alat hemat energi, dan kampanye kreatif hemat energi. Pengendalian penggunaan energi pada PJU dilakukan dengan penggantian jenis lampu yang hemat energi seperti jenis lampu LED.
3. **Pengurangan konsumsi listrik industri pengolahan sebesar 10% dan pengurangan konsumsi listrik di sektor bisnis dan pelayanan sosial sebesar 10%.** Upaya peningkatan efisiensi energi dan penerapan manajemen energi di sektor industri dan jasa diperlukan dibuktikan dengan riset yang menunjukkan upaya ini dapat memangkas emisi karbon hingga 34%, dengan potensi penghematan konsumsi energi sebesar 5–15% melalui audit energi dan implementasi sistem seperti ISO 50001/14001, serta penurunan intensitas energi hingga 20% dalam dua tahun pada perusahaan yang menerapkannya (Energy Star, 2024). Penerapan teknologi rendah karbon dengan insentif yang tepat juga berperan penting; misalnya, peralihan ke energi terbarukan dalam proses industri berpotensi mengurangi emisi sektor industri hingga 77% (Kamran et al., 2024) dan standar lingkungan seperti ISO 14001 turut mendorong perbaikan berkelanjutan dalam efisiensi energi perusahaan, terutama bila dikombinasikan dengan audit dan investasi teknologi hijau (Laskurain et al., 2017). Kedua sektor ini harus didorong untuk melakukan upaya-upaya penghematan energi melalui program seperti: (1) himbauan kepada produsen untuk menghasilkan produk hemat energi dan proporsi tukar tambah; (2) audit energi tiap tahapan proses produksi dan produksi industri; (3) penerapan ISO 14001 dalam proses industri; (4)

memfasilitasi dan memberi insentif untuk penerapan teknologi rendah karbon; dan (5) penyediaan dan pengadaan energi baru terbarukan.

4. **Pengurangan konsumsi listrik 20% di permukiman masyarakat,** pemanfaatan energi di masyarakat sulit untuk dikontrol namun apabila dapat dikurangi memiliki potensi yang besar. Peningkatan efisiensi energi rumah tangga dapat dicapai melalui edukasi dan adopsi teknologi hemat energi. Program edukasi dan kampanye perilaku terbukti efektif dimana sebuah inisiatif pendidikan energi di Amerika Serikat menghasilkan pengurangan konsumsi listrik rumah tangga 3–5% (Mena-Worth, 2016) dan laporan pembandingan pemakaian listrik mampu menurunkan penggunaan listrik sekitar 2% secara konsisten (Allcott & Rogers, 2014). Kombinasi pendekatan edukasi (untuk mengubah kebiasaan) dan teknologi efisien (seperti LED) memberikan hasil optimal dalam menekan konsumsi listrik rumah tangga. Upaya-upaya efisiensi energi ini misalnya: (1) sosialisasi hemat energi; (2) himbauan edaran penggantian alat rumah tangga ke alat hemat energi; (3) stimulan bantuan lampu LED untuk masyarakat; dan (4) lomba hemat energi.
5. **Pengurangan konsumsi karbonat pada industri keramik sebesar 5%,** karakter industri di Kota Probolinggo besar pada jenis industri keramik yang menggunakan karbonat dalam bahan bakunya. Industri keramik menghasilkan emisi karbon proses akibat dekomposisi bahan baku berkadar karbonat saat pembakaran, yang dapat mencapai 62 kg CO_2 per ton ubin (González et al., 2016). Mengingat potensi emisi yang ditimbulkan oleh karbonat, diperlukan strategi untuk menekan penggunaannya dalam proses produksi.
6. **Pemanfaatan CH_4 timbulan peternakan sebesar 10% dan pemanfaatan 10% CH_4 dari total produksi emisi TPA,** metana timbulan dari peternakan dan TPA berbahaya apabila langsung dilepaskan ke atmosfer. Penangkapan dan pemanfaatan gas metana (CH_4) dari kotoran ternak dan tempat pembuangan akhir (TPA) merupakan langkah penting menurunkan emisi GRK, mengingat CH_4 memiliki potensi pemanasan sekitar 25 kali lipat dibanding CO_2 (Kumamoto, 2017). Praktek penangkapan CH_4 misalnya melalui teknologi digester anaerob dimana limbah ternak dapat diolah menjadi biogas sehingga CH_4 yang dihasilkan tidak lepas ke atmosfer melainkan digunakan sebagai energi. Hal ini secara drastis mengurangi emisi bersih; pemanfaatan biogas sebagai bahan bakar dapat menurunkan emisi gas rumah kaca hingga ~91% dibanding penggunaan bensin fosil (Tanigawa, 2017). Demikian pula, pemasangan sistem penangkapan gas metana di TPA mampu menangkap dan menghancurkan sekitar 50–90% metana yang dihasilkan dari sampah (Burrows, 2024; Maylor, 2024). Potensi pada Kota Probolinggo adalah memanfaatkan CH_4 menjadi alternatif gas untuk kegiatan memasak. Kegiatan yang dapat dilakukan meliputi instalasi konversi gas metana untuk dimanfaatkan sebagai biogas dan pengadaan tabung digester sebagai tempat pengolahan biogas. Sebagai pendukung, diperlukan usaha pelatihan pada kelompok ternak dan kader dalam pengolahan biogas, kampanye bahaya CH_4 dan potensinya bagi manusia, serta kerjasama pengolalaan CH_4 bersama mitra melalui *Corporate Social Responsibility* (CSR).
7. **Pengurangan pemakaian urea sebesar 10% dan pengurangan pemakaian pupuk N buatan sebesar 10%.** Penggunaan pupuk nitrogen sintetis (seperti urea) secara berlebihan menimbulkan emisi N_2O yang tinggi, padahal N_2O adalah gas rumah kaca berdaya pemanasan ratusan kali lipat CO_2 (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), n.d.). Optimalisasi pemupukan dan pengurangan dosis pupuk kimia dapat mengurangi emisi N_2O secara signifikan. Riset menunjukkan bahwa aplikasi pupuk organik dapat menggantikan sebagian pupuk N sintetis tanpa menurunkan hasil, sekaligus menekan emisi N_2O dari tanah (Xie et al., 2022) Praktik pertanian organik atau terpadu yang mengurangi ketergantungan pada pupuk N buatan juga cenderung menurunkan emisi N_2O dan meningkatkan kandungan karbon

tanah, sehingga berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim di sektor pertanian. Selain itu, diperlukan kegiatan pendukung seperti pembinaan ke kelompok tani terkait pertanian organik, sistem pengendalian hama terpadu, optimalisasi kegiatan pertanian tumpangsari dan wanatani, pemanfaatan pupuk organik melalui integrasi dengan hasil kelompok ternak, kampanye kreatif pertanian organik, hingga pengurangan subsidi urea.

8. **Pengurangan timbulan limbah sebesar 10%,** limbah memiliki peran signifikan dalam emisi karbon terutama jika tidak ada penanganan khusus sehingga diperlukan pengurangan timbulan sampah. Program yang dapat diterapkan misalnya pemanfaatan kembali sampah seperti pemilahan sampah, pemanfaatan sampah, dan penerapan 3R (*reduce, reuse, recycle*) pada sampah organik dan anorganik. Pemanfaatan kembali sampah dapat diwujudkan dengan adanya bank sampah, TPST, dan rumah kompos di kawasan permukiman. Pengurangan timbulan sampah dan penerapan prinsip 3R berdampak langsung pada penurunan emisi GRK sektor limbah. Melalui upaya mengurangi jumlah sampah yang berakhir di TPA (melalui pengurangan produksi sampah serta peningkatan daur ulang/kompos), emisi metana dari TPA dapat ditekan. Hoy et al. (2023) menyebutkan strategi penanganan sampah organik memberikan pengaruh terbesar: misalnya, pengolahan sampah organik melalui digesti anaerob atau komposting mampu menurunkan emisi kumulatif sektor sampah global hingga ~59–72%. Sementara itu, upaya pengurangan produksi sampah hingga separuh berpotensi menurunkan emisi ~68%, dan peningkatan pengelolaan TPA (seperti pemasangan penangkap gas) sekitar 33% (Nurani et al., 2020). Meski kontribusi per unit tampak kecil, replikasi luas program 3R berbasis komunitas dapat secara signifikan menekan emisi GRK dari sektor persampahan seiring dengan berkurangnya sampah yang dihasilkan dan dibuang ke lingkungan. Selain itu, perlu adanya kader atau kelompok masyarakat yang dilatih sebagai aktor pelaksana 3R di lingkungan masyarakat. Sosialisasi dampak perubahan iklim akibat pembakaran sampah perlu dilakukan untuk mengurangi praktik pembakaran sampah.
9. **Mempertahankan/meningkatkan RTH sebesar 30%,** RTH di perkotaan berperan penting sebagai penyerap karbon alami. Vegetasi di RTH menyerap CO_2 melalui fotosintesis dan menyimpannya sebagai biomassa, sehingga membantu mengurangi konsentrasi GRK di atmosfer. Studi menunjukkan bahwa tutupan hijau perkotaan dapat mengimbangi sekitar 0,5–2,2% emisi karbon kota per tahun melalui penyerapan oleh tanaman (Zhang et al., 2022). Meskipun persentasenya relatif kecil dibanding total emisi perkotaan, penambahan RTH tetap merupakan strategi mitigasi penting karena memiliki berbagai manfaat sampingan. Infrastruktur hijau seperti taman, hutan kota, dan atap hijau tidak hanya menyerap karbon, tetapi juga menurunkan efek *urban heat island* sehingga kebutuhan energi untuk pendinginan berkurang (Steenberg et al., 2023), yang berarti penurunan emisi tidak langsung dari pembangkit listrik. Artinya, *urban greening* berkontribusi ganda sebagai penyerap karbon langsung dan sebagai upaya adaptasi yang mengurangi konsumsi energi fosil, keduanya mendukung penurunan emisi secara keseluruhan. Upaya peningkatan RTH dapat dilakukan melalui: (1) penerapan *green building* pada kawasan industri dan komersial; (2) intensifikasi vegetasi pada ruang terbuka publik kota; (3) sosialisasi Peraturan Daerah tentang RTRW terkait proporsi RTH; (4) identifikasi dan penetapan lahan potensial untuk pengembangan RTH taman sebagai upaya program pemenuhan RTH; dan (5) perwujudan RTH publik berupa taman di kawasan sarana dan prasarana umum, permukiman, perdagangan jasa, perkantoran, dan industri masing-masing sebesar 10%.

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung, memproyeksikan, dan merumuskan strategi mitigasi emisi GRK di Kota Probolinggo melalui pendekatan kuantitatif berbasis inventarisasi aktivitas dan proyeksi ekonomi. Perhitungan dilakukan menggunakan kalkulator emisi ICLEI dan mengacu pada pedoman IPCC serta GPC dengan berbasis tahun dasar 2019 yang menunjukkan bahwa total emisi GRK Kota Probolinggo mencapai 1.053.058 ton CO_2e, sementara kapasitas daya serap ruang terbuka hijau (RTH) hanya sebesar 766.029 ton CO_2e.

Proyeksi emisi menunjukkan peningkatan hingga 1.300.964 ton CO_2e pada tahun 2030, sedangkan daya serap RTH diperkirakan hanya meningkat menjadi 811.879 ton CO_2e. Kesenjangan antara emisi dan daya serap ini mengindikasikan kebutuhan mendesak akan strategi mitigasi yang lebih ambisius dan terukur. Hasil inventarisasi juga menunjukkan bahwa sektor masyarakat, terutama sektor energi dan transportasi, merupakan kontributor emisi terbesar, diikuti oleh sektor industri, limbah, dan pertanian.

Empat skenario mitigasi disusun berdasarkan pendekatan sensitivitas dan realisme kebijakan. Skenario keempat, yakni skenario progresif, dipilih sebagai strategi paling optimal dengan proyeksi penurunan emisi sebesar 15,19% pada tahun 2030. Strategi ini mencakup intervensi spesifik seperti efisiensi energi di sektor pemerintahan dan rumah tangga, pemanfaatan gas CH_4 dari peternakan dan TPA, pengurangan konsumsi pupuk nitrogen, pengelolaan limbah berwawasan lingkungan, serta peningkatan luasan RTH.

Namun demikian, capaian penurunan tersebut masih berada di bawah target nasional sebesar 29%, menunjukkan adanya kesenjangan antara ambisi nasional dan kapasitas pelaksanaan di tingkat daerah. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan tiga hal utama: (1) penguatan kapasitas institusi daerah dalam perencanaan dan pelaporan emisi berbasis data; (2) integrasi lintas sektor dalam penyusunan RAD-GRK yang adaptif terhadap kondisi lokal; dan (3) dukungan regulatif dan insentif dari pemerintah pusat untuk mendorong implementasi kebijakan yang konsisten dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

Allcott, H., & Rogers, T. (2014). The Short-Run and Long-Run Effects of Behavioral Interventions: Experimental Evidence from Energy Conservation. *American Economic Review*, *104*(10). https://doi.org/https://doi.org/10.1257/aer.104.10.3003

Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Probolinggo. (2015). *Kota Probolinggo Dalam Angka 2015*. https://probolinggokota.bps.go.id/id/publication/2015/11/20/1789a5cd0b0fb6540ddc69a4/kota-probolinggo-dalam-angka-2015.html

Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Probolinggo. (2016). *Kota Probolinggo Dalam Angka 2016*. https://probolinggokota.bps.go.id/id/publication/2016/07/15/f74edd8141b3014d0e31ec2c/kota-probolinggo-dalam-angka-2016.html

Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Probolinggo. (2017). *Kota Probolinggo Dalam Angka 2017*. https://probolinggokota.bps.go.id/id/publication/2017/08/11/e5ac39b185da1596e728c988/kota-probolinggo-dalam-angka-2017.html

Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Probolinggo. (2018). *Kota Probolinggo Dalam Angka 2018*. https://probolinggokota.bps.go.id/id/publication/2018/08/16/2e3e073d09f89164360cd127/kota-probolinggo-dalam-angka-2018.html

Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Probolinggo. (2019). *Kota Probolinggo Dalam Angka 2019*. https://probolinggokota.bps.go.id/id/publication/2019/08/16/50555cb23691b82aa15639d6/kota-probolinggo-dalam-angka-2019.html

Bagheri, M., Mladenović, M. N., Kosonen, I., & Nurminen, J. K. (2020). Analysis of potential shift to low-carbon urban travel modes: A computational framework based on high-resolution smartphone data. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(15). https://doi.org/10.3390/SU12155901

Bölük, G., & Kaplan, R. (2022). Effectiveness of renewable energy incentives on sustainability: evidence from dynamic panel data analysis for the EU countries and Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(18), 26613–26630. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17801-y

Bowman, C., Yu, S., Song, J., & O'Neill, J. (2021). *Building Energy Efficiency Retrofits: Policies and Market Transformation*.

Burley Farr, K., Song, K., Yeo, Z. Y., Johnson, E., & Hsu, A. (2023). Cities and regions tackle climate change mitigation but often focus on less effective solutions. *Communications Earth and Environment*, *4*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-023-01108-6

Burrows, L. (2024). *EPA underestimates methane emissions from landfills, urban areas*. Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences. https://seas.harvard.edu/news/2024/05/epa-underestimates-methane-emissions-landfills-urban-areas

C40 Cities. (2018a). *27 C40 Cities Have Peaked Their Greenhouse Gas Emissions*. https://www.c40knowledgehub.org/s/article/27-C40-Cities-have-peaked-their-greenhouse-gas-emissions

C40 Cities. (2018b). *City of Paris passes its new Air Quality, Energy & Climate Action Plan*. C40 Cities. https://www.c40.org/news/city-of-paris-passes-its-new-air-quality-energy-climate-action-plan/

Carreño, C. (2020). *The Value of Using Notation Keys in City Scale Greenhouse Gas Emission Inventories: Learning From Absent Data*. https://www.thegpsc.org/knowledge-products/climate-change/value-using-notation-keys-city-scale-greenhouse-gas-emission

Denchak, M. (2023). *Greenhouse Effect 101*. Natural Resources Defense Council (NRDC). https://www.nrdc.org/stories/greenhouse-effect-101

Energy Star. (2024). *Energy Efficiency Reduces Industrial Carbon Emissions*. United States Environmental Protection Agency (EPA). https://www.energystar.gov/industrial_plants/decarbonizing_industry/energy_efficiency_reduces_industrial_carbon_emissions

European Commission. (n.d.). *Causes of climate change*. Retrieved April 3, 2025, from https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en

Fitrahadi, M., Andriansyah, T., Fahnur, I., Hariani, M., & Widjaja, A. (2024). Implementation of Car-Free Days in Support of Sustainable Development to Reduce Vehicle CO2 Emissions in Urban Areas. *Journal Transnational Universal Studies*, *2*(11). https://doi.org/https://doi.org/10.58631/jtus.v2i11.132

Fong, W., Sotos, M., Doust, M., Schultz. S, Marques, A., Deng-Beck, C., Kovac, A., Bhatia, P., Russell, B., Morris, E., Staden, M., Arikan, Y., Eichel, A., Dickinson, J., Desai, R., & Hoornweg, D. (2014). *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories: An Accounting and Reporting Standard for Cities*. https://www.wri.org/research/global-protocol-community-scale-greenhouse-gas-emission-inventories

González, I., Barba-Brioso, C., Campos, P., Romero, A., & Galán, E. (2016). Reduction of CO2 diffuse emissions from the traditional ceramic industry by the addition of Si-Al raw material. *Journal of Environmental Management*, *180*, 190–196. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.039

Hoppe, J., Hinder, B., Rafaty, R., Patt, A., & Grubb, M. (2023). Three Decades of Climate Mitigation Policy: What Has It Delivered? *Annual Review of Environment and Resources*, *48*, 615–650. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321

Hoy, Z. X., Sin Woon, K., Cheong Chin, W., Fan, Y. Van, & Yoo, S. J. (2023). Curbing global solid waste emissions toward net-zero warming futures. In *Science (American Association for the Advancement of Science)* (Vol. 382, Issue 6672). https://doi.org/https://doi.org/10.1126/science.adg3177

Kamran, M., Sajid, J., Sajid, M. N., Ahmad, M. M., Ismail, M. A., & Sajid, M. B. (2024). Energy efficiency and greenhouse gas emission reduction potential of solar PV and biomass-based systems for a food processing plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, *60*. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104674

Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional. (2021). *Kebijakan Pembangunan Berketahanan Iklim (Climate Resilience Development Policy) 2020-2045*. https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2021/11/0_Executive-Summary.pdf

Kumamoto, M. (2017). *Composting: Rethinking Food Waste*. Greenleaf Communities. https://www.greenleafcommunities.org/composting-rethinking-food-waste/

Laskurain, I., Ibarloza, A., Larrea, A., & Allur, E. (2017). Contribution to energy management of the main standards for environmental management systems: The case of ISO 14001 and EMAS. *Energies*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/en10111758

Legionosuko, T., Madjid, M. A., Asmoro, N., & Samudro, E. G. (2019). Posisi dan Strategi Indonesia dalam Menghadapi Perubahan Iklim guna Mendukung Ketahanan Nasional. *Jurnal Ketahanan Nasional*, *25*(3), 295. https://doi.org/10.22146/jkn.50907

Li, J., & Makumbe, P. (2017, August 7). *LED street lighting: Unburdening our cities*. World Bank Blogs. https://blogs.worldbank.org/en/energy/led-street-lighting-unburdening-our-cities

Lu, T., Xu, Y., Chen, L., Lu, L., & Ren, R. (2022). The Potential of Carbon Emissions Reductions of Public Bikes. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(22). https://doi.org/10.3390/su142214831

Luttik, J., & Maters, E. (2022). Best practices in greening transportation at Wageningen University & Research. *Journal of Sustainability Perspectives*, *2*(2). https://doi.org/10.14710/jsp.2022.15474

Maylor, C. (2024). *Landfill methane projects lead in carbon market quality with CCP approval*. 3Degrees. https://3degreesinc.com/insights/landfill-methane-projects-a-leader-in-carbon-market-standards-with-ccp-approval

Mena-Worth, R. (2016). *Children can help parents make energy-saving decisions at home, study suggests*. Standford Graduate School of Education. https://ed.stanford.edu/news/children-can-help-parents-make-energy-saving-decisions-home-study-suggests

New Climate Institute. (2019). *Indonesia Assessment of Subnational and Non-State Climate Action*. https://newclimate.org/sites/default/files/2019/09/19-9117_Factsheet_Indonesia_Country.pdf

Nurani, I. W., Wibowo, S. B., Prihastopo, Z. I., Pelangi, A. P., & Sunardi, S. (2020). Contribution of waste bank in reducing greenhouse gas emissions in Bandung Regency. *E3S Web of Conferences*, *200*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020002004

Peraturan Presiden (PERPRES) Nomor 61 Tahun 2011 Tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (2011). https://peraturan.bpk.go.id/Details/41199/perpres-no-61-tahun-2011

Peraturan Walikota Probolinggo Nomor 37 Tahun 2013 Tentang RAD Penurunan Emisi GRK (2013).

Prasara, A. J., & Bridhikitti, A. (2022). Carbon footprint and cost analysis of a bicycle lane in a municipality. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *8*(2), 197–208. https://doi.org/10.22034/GJESM.2022.02.04

Ranganathan, J., Corbier, L., Schmitz, S., Oren, K., Dawson, B., Spannagle, M., Boileau, P., Frederick, R., Vanderborght, B., Thomson, F., Kitamura, K., Woo, C., Pankhida, N., Segalen, L., Koch, J., Bhattacharjee, S., Cummis, C., Breidenich, C., Eaton, R., … Cook, E. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition)*. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg_project_accounting.pdf

Roelfsema, M., van Soest, H. L., Harmsen, M., van Vuuren, D. P., Bertram, C., den Elzen, M., Höhne, N., Iacobuta, G., Krey, V., Kriegler, E., Luderer, G., Riahi, K., Ueckerdt, F., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Frank, S., Fricko, O., Gidden, M., … Vishwanathan, S. S. (2020). Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement. *Nature Communications*, *11*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-020-15414-6

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, A. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons, Ltd.

Sekretariat RAN-GRK. (2019). *Laporan Implementasi Perencanaan Pembangunan Rendah Karbon*.

Sethi, M., Lamb, W., Minx, J., & Creutzig, F. (2020). Climate change mitigation in cities: A systematic scoping of case studies. In *Environmental Research Letters* (Vol. 15, Issue 9). IOP Publishing Ltd. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab99ff

Smith, E. D., Szidarovszky, F., Karnavas, W. J., & Bahill, A. T. (2008). Sensitivity Analysis, a Powerful System Validation Technique. In *The Open Cybernetics and Systemics Journal* (Vol. 2).

Steenberg, J. W. N., Ristow, M., Duinker, P. N., Lapointe-Elmrabti, L., MacDonald, J. D., Nowak, D. J., Pasher, J., Flemming, C., & Samson, C. (2023). A national assessment of urban forest carbon storage and sequestration in Canada. *Carbon Balance and Management*, *18*(1). https://doi.org/10.1186/s13021-023-00230-4

Tanigawa, S. (2017). *Fact Sheet - Biogas: Converting Waste to Energy*. https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy

Terrascope. (2024). *Understanding Greenhouse Gases and Climate Change*. https://www.terrascope.com/blog/understanding-greenhouse-gases-and-climate-change

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokono, J. Minx, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schllömer, C. Stechow, & T. Zwickel, Eds.). Cambridge University Press.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)* (P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Khourdajie, A. Hasija, J. Malley, R. Fradera, M. Belkacemi, G. Lisboa, D. McCollum, P. Vyas, M. Pathak, R. Diemen, S. Luz, & S. Some, Eds.).

Tvinnereim, E., & Mehling, M. (2018). Carbon pricing and deep decarbonisation. *Energy Policy*, *121*, 185–189. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.020

United Nations Development Programme (UNDP). (2024). *Cities have a key role to play in tackling climate change – here's why*. Climate Promise. https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/cities-have-key-role-play-tackling-climate-change-heres-why

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (n.d.). *Global warming potential values under the temporary measures*. Retrieved April 8, 2025, from https://cdm.unfccc.int/Reference/CDM_note

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2025). *Local Topics - Energy Efficiency in Government Operations and Facilities*. https://www.epa.gov/statelocalenergy/local-topics-energy-efficiency-government-operations-and-facilities

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (2025). *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions

University of Oxford. (2021). *Get on your bike: Study shows walking, cycling and e-biking make a significant impact on carbon emissions*. https://www.ox.ac.uk/news/2021-02-02-get-your-bike-study-shows-walking-cycling-and-e-biking-make-significant-impact

Vaz Jr, S. (2022). *Renewable Carbon: Science, Technology and Sustainability* (1st ed.). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2021-0-02011-3

World Meteorological Organization (WMO). (2025). *Greenhouse gases*. https://wmo.int/topics/greenhouse-gases

Xie, L., Li, L., Xie, J., Wang, J., Anwar, S., Du, C., & Zhou, Y. (2022). Substituting Inorganic Fertilizers with Organic Amendment Reduced Nitrous Oxide Emissions by Affecting Nitrifiers' Microbial Community. *Land*, *11*(10). https://doi.org/10.3390/land11101702

Zhang, Y., Meng, W., Yun, H., Xu, W., Hu, B., He, M., Mo, X., & Zhang, L. (2022). Is urban green space a carbon sink or source? - A case study of China based on LCA method. *Environmental Impact Assessment Review*, *94*. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106766