

Perencanaan Strategi Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca pada Sektor Energi

(Greenhouse Gas Emission Reduction Strategy Planning In the Energy Sector)

Nabila Salma Putri^{1*}, Eka Budiarti², Haryono Setiyo Huboyo³, Nurandani Haryanti⁴

Universitas Diponegoro, Jawa Tengah, Indonesia^{1,2,3,4}

nabsalll@students.undip.ac.id^{1,2,3,4}



Riwayat Artikel

Diterima pada 04 Desember 2023

Revisi 1 pada 15 Desember 2023

Revisi 2 pada 21 Desember 2023

Revisi 3 pada 28 Desember 2023

Disetujui pada 05 Januari 2024

Abstract

Purpose: This study aims to inventory and forecast Greenhouse Gas (GHG) emissions and to formulate effective emission reduction strategies in the transportation and industrial sectors of Kendal Regency, with projections extending from 2024 to 2033.

Methodology: The study employs Tier 1 and Tier 2 calculation methodologies based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines. Emission projections are modeled under a Business-as-Usual (BAU) scenario. Mitigation strategies are developed through the assessment of international best practices, which are then adapted to suit local conditions.

Result: By 2033, GHG emissions in the transportation sector are projected to reach approximately 1,596,350 tons of CO₂ equivalent (CO₂e), while emissions from the industrial sector are estimated at 111,530.09 tons of CO₂e. The proposed mitigation strategies for the transportation sector have the potential to reduce emissions by up to 28%, whereas strategies for the industrial sector could achieve reductions of up to 76%.

Conclusions: Comprehensive mitigation strategies have the potential to significantly reduce GHG emissions in Kendal Regency. A combination of technological innovation and policy-based interventions presents a strong framework for achieving substantial emission reductions across both sectors.

Limitations: This study is limited by the availability and accuracy of local emission factor data, as well as by assumptions used in the BAU projections. These factors may not fully account for future policy shifts or unexpected technological advancements.

Contribution: The study offers a localized GHG emissions model tailored for Kendal Regency and provides actionable, evidence-based recommendations to policymakers and stakeholders, thereby supporting the advancement of regional climate action objectives.

Keywords: *Emission Inventory, Emission Reduction Strategy, Greenhouse Gas, Industrial Sector, Kendal Regency, Transportation Sector.*

How to Cite: Putri, N, S., Budiarti, E., Huboyo, H, S., Haryanti, N. (2024). Perencanaan Strategi Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca pada Sektor Energi. *Jurnal Teknologi Riset Terapan*, 2(1), 37-53.

1. Pendahuluan

Pemanasan global yang disebabkan oleh greenhouse gas atau yang dikenal dengan Gas Rumah Kaca (GRK) menjadi permasalahan lingkungan yang krusial di tengah peningkatan ekonomi dunia yang sangat pesat (Pachauri & Reisinger, 2007). Gas rumah kaca merupakan gas yang terkandung dalam atmosfer, baik alami maupun antropogenik yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor

P.71/MENLHK/SETJEN/KUM.1/12/2017 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Sistem Registri Nasional Pengendalian Iklim). Emisi GRK sendiri terdiri dari Karbon Dioksida (CO₂), Metana (CH₄), Dinitrogen Mono Oksida (N₂O), Hidro Fluorocarbon (HFCs), Sulfur Hexaflorida (SF₆), Perfluoro Karbon (PFCs), dan gas-gas turunan lainnya. Dengan meningkatnya emisi GRK ini, permasalahan pemanasan global semakin parah sehingga akan menimbulkan berbagai macam perubahan seperti cuaca ekstrim, penurunan gletser, kepunahan spesies, kenaikan permukaan air laut, serta perubahan pada hasil pertanian (Florides & Christodoulides, 2009).

Dalam permasalahan tersebut, Indonesia mendapatkan dua konsekuensi perubahan iklim yaitu, sebagai sisi yang terdampak oleh adanya perubahan iklim dan sebagai penyumbang emisi Gas Rumah Kaca. Untuk menanggulangi permasalahan tersebut, Indonesia membuat komitmen untuk menurunkan angka gas rumah kaca yang ditunjukkan dengan adanya ratifikasi Protokol Kyoto pada 3 Desember 2004 melalui Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2004. Selain itu, adanya Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan Paris Agreement To The United Nations Framework Convention On Climate Change (Persetujuan Paris Atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa Mengenai Perubahan Iklim) juga sebagai bentuk komitmen penurunan emisi gas rumah kaca yang lain (Yando, Panusunan, & Fauzan, 2023). Di dalam undang-undang tersebut, Indonesia menargetkan untuk mencapai penurunan emisi GRK sebesar 29% dengan upaya sendiri/dalam negeri dan sampai dengan 41% dengan bantuan internasional pada tahun 2030 (Mardiono, Nanra, & Rican, 2023).

Kendal merupakan Kabupaten di Indonesia yang turut andil menyumbang emisi gas rumah kaca. Sektor energi, terkhusus pada sub sektor industri dan transportasi merupakan sumber yang banyak memengaruhi tingginya pencemaran emisi GRK di kabupaten ini. Hal ini diakibatkan karena aktivitas industri yang sangat menjanjikan pada wilayah ini. Ditambah lagi, terjadi peningkatan infrastruktur penunjang aktivitas industri tersebut seperti transportasi darat dan juga transportasi sebagai bentuk pengoptimalan pembangunan dari pemerintah daerah Kendal. Menurut Lundin (2009), sektor industri telah menyumbang emisi GRK yang sebagian besar berjenis CO₂ sebagai akibat dari penggunaan energi fosil baik untuk pemenuhan energi maupun non energi. Kegiatan industrialisasi berdampak terhadap peningkatan produksi emisi CO₂ di dunia. Sementara itu, dengan terjadinya peningkatan kepadatan lalu lintas akibat kebutuhan kendaraan transportasi, menyebabkan peningkatan emisi gas buang yang berasal dari kendaraan bermotor. Emisi gas buang tersebut akan menyebabkan pencemaran lingkungan (Adak, Sahu, & Elumalai, 2016). Berdasarkan Boedoyo (2008), sektor transportasi adalah salah satu penghasil emisi karbon yang signifikan dengan peningkatan proyeksi emisi karbon sebesar 10% dalam satu tahun. Karena hal-hal tersebut, sub sektor transportasi di Kabupaten Kendal tercatat telah menyumbangkan emisi GRK sebesar 449,89 Gg CO₂ pada sektor transportasi dan 95,78 Gg CO₂ pada sektor manufaktur dan konstruksi di tahun 2021. Angka ini mengalami peningkatan dibandingkan tahun-tahun sebelumnya (Melvi, Nurhayati, Batubara, Septama, & Ulvan, 2023).

Penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui pendekatan terpadu yang memproyeksikan sekaligus merancang strategi mitigasi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) secara spesifik pada sektor transportasi dan industri di tingkat kabupaten, yaitu Kabupaten Kendal. Berbeda dengan studi sebelumnya yang cenderung fokus hanya pada salah satu sektor atau pada skala nasional, penelitian ini mengkombinasikan analisis inventarisasi dan proyeksi jangka panjang (2024–2033) dengan strategi mitigasi yang disesuaikan secara lokal, seperti optimalisasi semi-BRT, pengembangan Advanced Traffic Control Systems (ATCS), serta penerapan teknologi Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS). Misalnya, studi oleh Bao et al. (2022), hanya memfokuskan mitigasi emisi pada sektor transportasi perkotaan di Tiongkok tanpa integrasi dengan sektor industri (*Journal of Cleaner Production*). Mutascu (2023), menilai potensi biomassa untuk industri namun tidak mengaitkannya dengan proyeksi multi-tahun dalam konteks lokal (*Renewable and Sustainable Energy Reviews*). Li et al. (2021), membahas strategi ITS untuk pengurangan emisi transportasi, tetapi tidak mengaitkan hasilnya dengan proyeksi spesifik wilayah kabupaten (Transportation Research Part D).

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan strategi upaya penanggulangan untuk mengurangi emisi GRK di Kabupaten Kendal yang juga untuk mendukung pemerintah dalam pemenuhan target penurunan

emisi GRK. Tugas Akhir ini berusaha memenuhi kekosongan penelitian mengenai reduksi emisi GRK pada sektor energi (sub sektor transportasi dan industri) di Kabupaten Kendal.

2. Tinjauan Pustaka

Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dikenal sebagai pendorong utama perubahan iklim, dengan karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O) sebagai kontributor yang paling signifikan. Sektor transportasi dan industri merupakan salah satu sumber emisi GRK antropogenik terbesar karena ketergantungannya pada bahan bakar fosil dan proses yang boros energi (Rahmawati & Hadian, 2022). Untuk memahami sumber emisi dan dampaknya, diperlukan penerapan metode inventarisasi yang terstandarisasi, seperti yang diusulkan oleh Panel Antarpemerintah untuk Perubahan Iklim (IPCC), yang menekankan pentingnya pendekatan Tingkat 1 dan Tingkat 2 untuk pelaporan emisi yang konsisten dan dapat diperbandingkan di berbagai wilayah. Metodologi ini menjadi dasar bagi pemantauan yang akurat dan berfungsi sebagai alat penting untuk mengembangkan kebijakan mitigasi yang ditargetkan (Yang et al., 2023).

Proyeksi emisi di masa depan umumnya menggunakan skenario Business as Usual (BAU), yang didasarkan pada asumsi bahwa pola aktivitas ekonomi dan konsumsi energi tidak mengalami perubahan signifikan. Skenario ini menjadi dasar teori dalam pemodelan emisi, yang bertujuan memprediksi tren jangka panjang dari berbagai sektor. Dalam literatur, pendekatan ini membantu mengidentifikasi potensi risiko lingkungan dan mendorong kebijakan mitigasi yang lebih adaptif sesuai konteks lokal. Pemodelan BAU juga sering diintegrasikan dengan pendekatan bottom-up untuk memberikan gambaran yang lebih rinci terkait sumber emisi spesifik di suatu wilayah (Chen et al., 2023).

Strategi mitigasi GRK dalam konteks transportasi dan industri tidak hanya berbasis teknologi tetapi juga memerlukan pendekatan manajerial dan kebijakan yang terintegrasi. Teori manajemen lingkungan menyoroti pentingnya sinergi antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat dalam penerapan kebijakan pengurangan emisi (Yando et al., 2023). Literasi teknologi seperti Advanced Traffic Control Systems (ATCS) dan Intelligent Transportation Systems (ITS) menjadi instrumen penting yang mendukung teori efisiensi operasional transportasi. Dalam sektor industri, adaptasi teknologi ramah lingkungan dan kebijakan insentif untuk penggunaan bioenergi menjadi bagian dari kerangka teori mitigasi yang komprehensif (Sloot, Lehmann, & Ardone, 2023).

3. Research Methods

Perencanaan ini dilaksanakan selama 4 bulan dari bulan September 2024 hingga Januari 2025 di Kabupaten Kendal, Jawa Tengah. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang dikumpulkan dengan cara survei lapangan, baik dengan (Yang et al., 2023) pengamatan, wawancara, dan pengukuran langsung. Data primer yang diperlukan dalam perencanaan adalah sebagai berikut yakni Sub Sektor Transportasi: meliputi, data jarak tempuh kendaraan, traffic counting kendaraan dan data penanganan emisi GRK pada sub sektor transportasi. Sub Sektor Industri Meliputi Data penanganan emisi GRK pada sub sektor industri

Sementara itu, data sekunder diperoleh dari dinas atau instansi terkait. Berikut merupakan data sekunder yang dibutuhkan dalam perencanaan yakni Sub Sektor Transportasi: Jumlah dan jenis kendaraan, Data *traffic counting*, Panjang dan jenis jalan, Faktor emisi, dan Panjang dan lebar ruas jalan. Sub Sektor Industri: Jenis industri, Lokasi industri, Jumlah pekerja, Faktor Emisi, dan Konsumsi bahan bakar. Setelah data-data tersebut diperoleh, dilanjutkan tahap analisis data yang mencakup inventarisasi emisi, proyeksi pertumbuhan emisi, dan perencanaan strategi reduksi emisi (Abu, 2024).

4. Hasil dan pembahasan

4.1. Subsektor Transportasi

4.1.1 Proyeksi Kendaraan

Laju pertumbuhan populasi kendaraan merupakan salah satu variabel yang penting dalam perhitungan inventarisasi emisi GRK. Hasil proyeksi populasi kendaraan akan digunakan untuk memperkirakan jumlah populasi kendaraan pada 10 tahun kedepan yaitu tahun 2024-2033. Data yang digunakan sebagai

data batas bawah adalah data 5 tahun 2019-2023. Data tersebut akan diolah untuk proyeksi 10 tahun kedepan yaitu tahun 2024-2033. Proyeksi tersebut akan dilakukan menggunakan metode BAU (business as usual). Terdapat tiga metode untuk menghitung proyeksi populasi jumlah kendaraan yaitu aritmatika, geometrik, dan least square. Pemilihan metode perhitungan proyeksi disesuaikan dengan nilai R square yang paling mendekati angka satu ialah metode yang akan dipilih. Namun, apabila dari ketiga metode tersebut memiliki dua atau lebih nilai R square = 1 maka metode dipilih berdasarkan nilai standar deviasi yang terkecil. Setelah dilakukan perhitungan dan analisis didapatkan metode terpilih yaitu *least square*. Berikut merupakan persamaan menghitung proyeksi kendaraan menggunakan metode *least square*:

$$P_n = a + bx$$

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum Y \cdot X)}{(n(\sum X^2)) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{n(\sum Y \cdot X) - (\sum X)(\sum Y)}{(n(\sum X^2)) - (\sum X)^2}$$

Berikut merupakan hasil proyeksi kendaraan di Kabupaten Kendal untuk 10 tahun kedepan:

Tabel 3. 1 Proyeksi Kendaraan 10 Tahun Kedepan

Tahun	Jumlah Kendaraan				Total
	Mobil	Motor	Angkutan Umum	Truk	
2024	37049	440534	3342	2188	481836
2025	38931	453433	3330	2272	496630
2026	40812	466331	3318	2355	511423
2027	42693	479229	3307	2439	526217
2028	44575	492127	3295	2522	541010
2029	46456	505025	3283	2605	555803
2030	48337	517923	3271	2689	570597
2031	50219	530821	3259	2772	585390
2032	52100	543719	3248	2856	600184
2033	53981	556617	3236	2939	614977

Kemudian dapat dilakukan perhitungan inventarisasi emisi GRK untuk sektor transportasi dengan menggunakan data jumlah kendaraan dan VKT (*Vehicle Kilometer Travelled*). Inventarisasi emiri GRK sektor transportasi dibagi menjadi tiga sumber yaitu sumber garis, sumber total, dan sumber area.

4.1.2 Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sumber Garis.

Perhitungan emisi sumber garis dilakukan untuk mengetahui beban emisi pada ruas jalan-jalan utama di Kabupaten Kendal. Ruas jalan yang digunakan dalam perhitungan sumber garis yaitu jalan-jalan utama dengan jumlah 25 jalan. Perhitungan beban emisi sumber garis perlu memperhatikan beberapa data pendukung seperti konsumsi bahan bakar rata-rata dalam kota, berat jenis bahan bakar, dan panjang ruas jalan. Selain digunakan untuk menentukan beban emisi, data-data tersebut nantinya juga diperlukan untuk menghitung nilai faktor emisi dikarenakan faktor emisi untuk setiap jalan berbeda. Selain tiga data tersebut, untuk menghitung faktor emisi eksisting juga memerlukan nilai faktor emisi jenis kendaraan untuk setiap pemakaian 1 kg BBM. Berikut merupakan data faktor emisi:

Tabel 3. 2 Faktor Emisi Kendaraan Metode Tier-2

Pencemaran	Roda Dua	Mobil	Bus	Truk
CO ₂ (g/kg BMM)	3180	3180	3172	3172
CH ₄ (g/kg BMM)	0,26	0,07	0,06	0,01
N ₂ O (g/kg BMM)	0,002	0,005	0,031	0,031

Sumber: KLH, 2012

Tabel 3. 3 Rata-Rata Konsumsi BBM dalam Kota

Mobil (km/L)	Motor (km/L)	Bus (Angkutan Umum) (km/L)	Truk (km/L)
8,4	28	3,5	4,2

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12, 2010

Untuk menghitung faktor emisi eksisting setiap jalan, memerlukan konsumsi bahan bahan bakar dalam satu rute. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung konsumsi bahan bakar:

$$\text{Konsumsi BBM setiap kendaraan} = \frac{\text{panjang jalan}}{\text{konsumsi BBM dalam kota}} \times \text{berat jenis BBM}$$

Sehingga untuk menghitung faktor emisi setiap parameter pencemar, dilakukan dengan mengalikan konsumsi BBM untuk melewati jalan tersebut dengan faktor emisi kendaraan:

$$\text{FES} = \text{Faktor emisi kendaraan} \times \text{konsumsi BBM}$$

Setelah diketahui nilai FES, dapat dilakukan perhitungan beban emisi. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung beban emisi pada sumber garis:

$$\text{Emisi GRK} = \text{Jumlah Kendaraan} \times \text{Panjang jalan} \times \text{FES}$$

Dari perhitungan yang telah dilakukan, berikut merupakan beban emisi sumber garis:

Tabel 3. 4 Beban Emisi Sumber Garis

Tahun	CO ₂ (ton)	CH ₄ (ton)	N ₂ O (ton)	CO ₂ eq (ton)
2024	389.889	379	541	390.809
2025	390.878	388	554	391.820
2026	391.870	397	567	392.834
2027	392.865	406	581	393.852
2028	393.862	416	595	394.873
2029	394.863	425	609	395.897
2030	395.866	435	624	396.925
2031	396.872	446	639	397.957
2032	397.881	456	655	398.992
2033	398.893	467	671	400.031

4.1.3 Inventarasi Emisi Gas Rumah Kaca Sumber Total

Perhitungan sumber emisi total merupakan perhitungan emisi yang berasal dari seluruh kegiatan transportasi di Kabupaten Kendal. Pada perhitungan beban emisi sumber total, data yang digunakan dalam menggambarkan aktivitas kendaraan adalah data jumlah kendaraan yang didapatkan dari UPPD SAMSAT Kabupaten Kendal. Untuk menghitung beban emisi pada sumber total, diperlukan perhitungan VKT sumber total terlebih dahulu. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung VKT sumber total:

$$\text{VKT sumber total} = \text{jumlah kendaraan} \times \text{odometer kendaraan}$$

Setelah melakukan perhitungan VKT sumber total, selanjutnya mencari jumlah konsumsi BBM untuk tiap kategori kendaraan. Perhitungan konsumsi BMM didapatkan melalui pembagian nilai VKT total yang telah dihitung dengan konsumsi rata-rata kendaraan untuk 10 tahun kedepan. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung konsumsi bahan bakar pada sumber total:

$$\text{Konsumsi BBM total} = (\text{VKT sumber total}) / (\text{Konsumsi BBM spesifik})$$

Setelah didapatkan konsumsi BBM sumber total untuk semua tahun, dapat dilakukan perhitungan beban emisi. Perencanaan ini dilakukan dengan mempertimbangkan kategori berdasarkan dari jenis bahan bakar yaitu bensin dan solar. Hal ini didasari pada studi yang telah dilakukan oleh Jinca (2009), sebagaimana dikutip oleh Lopulalan (2015), diasumsikan bahwa motor dan mobil menggunakan bensin, sementara bus dan truk menggunakan bahan bakar solar (diesel). Persamaan untuk menghitung beban emisi pada sumber total adalah sebagai berikut:

$$\text{Beban emisi} = \text{konsumsi BBM} \times \text{Faktor emisi bahan bakar} \times \text{nilai kalor}$$

Adapun faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan beban emisi sumber total adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 5 Faktor Emisi Bahan Bakar

Jenis Bahan Bakar	CO2	CH4	N2O
	(kg/CO2/TJ)	kg CH4/TJ	Kg NO2/TJ
Premium	69.300	33	3,2
Pertamax	69.300	33	3,2
Pertamax Plus	71.500	33	3,2
Pertalite	0	0	0
Solar	74.100	4	3,9
Bio Solar	74.100	4	3,9
Marine Fuel Oil	77.400	1	2
BBG	56.100	92	3
Avgas	69.300	1	2
Kerosine	71.900	1	2
Nilai kalor solar	0,000036		
Nilai kalor bensin	0,000033		

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup, 2012

Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan beban emisi gas rumah kaca sumber total untuk 10 tahun kedepan. Berikut merupakan hasil perhitungan emisi gas rumah kaca sumber total:

Tabel 3. 6 Beban Emisi Sumber Total

Tahun	CO2 (ton)	CH4 (ton)	N2O (ton)	CO2eq (ton)
2024	477.263	4.313	6.452	488.028
2025	493.638	4.477	6.674	504.789
2026	510.012	4.641	6.897	521.550
2027	526.386	4.805	7.120	538.311
2028	542.761	4.969	7.343	555.072
2029	559.135	5.133	7.565	571.833
2030	575.510	5.297	7.788	588.595
2031	591.884	5.461	8.011	605.356
2032	608.259	5.625	8.233	622.117
2033	624.633	5.789	8.456	638.878

4.1.4 Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sumber Area

Emisi sumber area pada sektor transportasi adalah emisi yang berada di jalan-jalan kecil pada suatu wilayah. Untuk menghitung beban emisi pada sumber area, diperlukan perhitungan VKT sumber total terlebih dahulu. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung VKT sumber area:

$$\text{VKT sumber area} = \text{VKT sumber total} - \text{VKT sumber garis}$$

Setelah melakukan perhitungan VKT sumber area, selanjutnya mencari jumlah konsumsi BBM untuk tiap kategori kendaraan. Perhitungan konsumsi BMM didapatkan melalui pembagian nilai VKT total yang telah dihitung dengan konsumsi rata-rata kendaraan untuk 10 tahun kedepan. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung konsumsi bahan bakar pada sumber area:

$$\text{Konsumsi BBM area} = (\text{VKT sumber area}) / (\text{Konsumsi BBM spesifik})$$

Setelah didapatkan konsumsi BBM sumber area untuk semua tahun, dapat dilakukan perhitungan beban emisi. Perencanaan ini dilakukan dengan mempertimbangkan kategori berdasarkan dari jenis bahan bakar yaitu bensin dan solar. Diasumsikan bahwa motor dan mobil menggunakan bensin, sementara bus dan truk menggunakan bahan bakar solar (diesel). Persamaan untuk menghitung beban emisi pada sumber area adalah sebagai berikut:

$$\text{Beban emisi} = \text{konsumsi BBM} \times \text{Faktor emisi bahan bakar} \times \text{nilai kalor}$$

Adapun faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan beban emisi sumber area sama dengan faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan sumber total. Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan beban emisi gas rumah kaca sumber area untuk 10 tahun kedepan. Berikut merupakan hasil perhitungan emisi gas rumah kaca sumber total:

Tabel 3. 7 Beban Emisi Sumber Area

Tahun	CO2 (ton)	CH4 (ton)	N2O (ton)	CO2eq (ton)
2024	413.535	3.829	5.890	423.254
2025	428.289	3.981	6.097	438.366
2026	442.996	4.131	6.304	453.431
2027	457.656	4.281	6.510	468.448
2028	472.267	4.431	6.716	483.414

Tahun	CO2 (ton)	CH4 (ton)	N2O (ton)	CO2eq (ton)
2029	486.828	4.581	6.920	498.329
2030	501.337	4.730	7.124	513.191
2031	515.792	4.878	7.328	527.998
2032	530.192	5.027	7.530	542.748
2033	544.535	5.174	7.732	557.441

4.1.5 Prediksi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Transportasi

Setelah dilakukan perhitungan beban emisi dilakukan pada semua jenis kendaraan didapatkan bahwa sektor transportasi dari beban emisi sumber total pada tahun 2024 menyumbang gas CO₂ sebesar 447.263 ton/tahun, CH₄ sebesar 172,51 ton/tahun, dan N₂O sebesar 21,65 ton/tahun. Kemudian beban emisi sumber garis menyumbang gas CO₂ sebesar 389.889 ton/tahun, CH₄ sebesar 15,17 ton/tahun, dan N₂O sebesar 1,81 ton/tahun. Sumber area menyumbang gas CO₂ sebesar 413.535 ton/tahun, CH₄ sebesar 153,18 ton/tahun, dan N₂O sebesar 19,76 ton/tahun. Kemudian untuk mendapatkan perhitungan emisi bentuk CO₂e, setiap polutan harus dilakukan dengan GWP (Global Warning Potensial). Berikut merupakan prediksi emisi GRK CO₂e pada sektor transportasi untuk 10 tahun kedepan:

Tabel 3. 8 Prediksi Emisi GRK Sektor Transportasi

Beban Emisi Total (Ton CO ₂ e)				
Tahun	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
2024	1.280.687	8.522	12.882	1.302.091
2025	1.312.804	8.845	13.325	1.334.975
2026	1.344.878	9.169	13.768	1.367.815
2027	1.376.907	9.493	14.211	1.400.611
2028	1.408.891	9.816	14.653	1.433.359
2029	1.440.826	10.139	15.095	1.466.060
2030	1.472.712	10.462	15.536	1.498.711
2031	1.504.548	10.785	15.978	1.531.310
2032	1.536.332	11.107	16.418	1.563.857
2033	1.568.061	11.430	16.859	1.596.350

4.2 Subsektor Industri

Inventarisasi emisi GRK pada sub sektor industri dilakukan dengan dua pendekatan yaitu, konsumsi bahan bakar dan pendekatan tenaga kerja atau *industrial pollution projection system* (IPPS). Inventarisasi emisi GRK dengan bahan bakar dilakukan dengan menggunakan perhitungan IPCC tier 1 dimana faktor emisi yang digunakan ialah *default* IPCC (Hsu, Chen, & Feng, 2024). Sementara inventarisasi GRK dengan perhitungan tenaga kerja diterapkan untuk industri-industri yang data konsumsi bahan bakarnya tidak diketahui. Metode IPPS ini merupakan metode perhitungan emisi yang dikembangkan oleh *World Bank* (1985) dengan mengombinasikan data jumlah pekerja dan jenis industri.

4.2.1 Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca dengan Pendekatan Bahan Bakar

Penggunaan bahan bakar industri diperoleh dari data Dinas Perindustrian dan dan Ketenagakerjaan Kabupaten Kendal pada tahun 2024 semester pertama. Berdasarkan daya yang didapat, Industri menggunakan beberapa jenis bahan bakar yang terdiri dari Solar/HSD/ADO, batubara, LPG, pertamax, serta listrik. Dengan mengetahui jumlah bahan bakar yang digunakan pada suatu industri, diperoleh emisi GRK dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Emisi GRK} \left(\frac{\text{kg}}{\text{tahun}} \right) = \text{konsumsi energi (satuan fisik)} \times \text{nilai kalor} \left(\frac{\text{TJ}}{\text{sat. fisik}} \right) \times \text{faktor emisi} \left(\frac{\text{kg}}{\text{Tj}} \right)$$

Adapun berikut nilai kalor dan faktor emisi yang digunakan dalam inventarisasi perencanaan ini :

Tabel 3. 9 Faktor Emisi Industri Manufaktur

Jenis Bahan Bakar	Faktor Emisi (kg/Tj)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Solar	74100	4	0,36
LPG	63100	1	0,1
Batu Bara	96100	10	1,5
Premium	69.300	33	3,2

Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup, 2012

Tabel 3. 10 Nilai Kalor Bahan Bakar Industri

Bahan Bakar	Nilai Kalor
LPG	47.3x10 ⁻⁶ TJ/kg
Solar	36x10 ⁻⁶ TJ/liter
Batu Bara	18.9x10 ⁻³ TJ/ton
Premium	33x10 ⁻⁶ TJ/liter

Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup, 2012

Dari perhitungan emisi GRK yang telah dilakukan, diketahui bahwa pembakaran bahan bakar batu bara dari PT. Industri Gula Nusantara menghasilkan emisi GRK terbesar. Hal ini terjadi karena pembakaran bahan bakar batu bara menghasilkan emisi terbesar per kg pembakarannya. Adapun berikut hasil perhitungan emisi GRK pada sub sektor industri dengan pendekatan bahan bakar :

Tabel 3. 11 Emisi GRK pada Sub Sektor Industri dengan Pendekatan Konsumsi Bahab Bakar

No.	Jenis Perusahaan	Beban Emisi (Ton/Tahun)			Emisi GRK (CO ₂ eq Ton/Tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	CV Merapi	35,19	0,01	0,01	38,42
2	PT Eclat Textile International	5,41	0,01	0,01	8,64
3	PT Evergen Resources	2,14	0,01	0,01	5,37
4	PT Industri Gula Nusantara	39.377,85	4,11	0,64	39.671,32
5	PT Maju Bersama Gemilang	10,68	0,01	0,01	13,91
6	PT Mas Arya Indonesia	1.209,85	0,07	0,01	1.214,58
7	PT Rimba Partikel Indonesia	26,05	0,01	0,01	29,28
8	PT Tri Sinar Purnama	6.405,31	0,63	0,12	6.456,82
9	PT Kayu Lapis Indonesia	1.462,16	0,09	0,02	1.470,37
10	PT Berkat Karunia Semesta	2.474,94	0,12	0,03	2.486,88

4.2.2 Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca dengan Pendekatan Tenaga Kerja

Data tenaga kerja dan jenis industri diperoleh dari Dinas Perindustrian dan Ketenagakerjaan Kabupaten Kendal. Dengan mengkombinasikan kedua data tersebut, diperoleh emisi GRK dengan menggunakan metode IPPS. Berikut merupakan rumus inventarisasi emisi GRK dengan metode IPPS :

$$PL = \frac{PI \times TEM}{1000 \times 2204,6 \times \text{ratio}}$$

Keterangan :

PL = beban emisi (ton/tahun)

PI = intensitas polusi (lb/1000 pekerja/tahun)

TEM = jumlah pekerja (orang)

2204,6 = konversi dari satuan lb ke ton

Ratio = perubahan nilai IPPS industri di Amerika dan Indonesia

Adapun intensitas polusi yang tersedia hanya diperuntukkan untuk parameter SO₂, VOC, NO₂, CO, TSP, dan PM₁₀. Maka dari itu, untuk memperoleh faktor emisi GRK diperoleh dengan menghitung rasio dari faktor emisi IPCC 2006 parameter CO untuk bahan bakar solar. Berikut merupakan perhitungan rumus rasio IPCC antara gas CO dan gas GRK :

$$\text{Rasio IPCC CO-GRK} = \frac{\text{Faktor IPCC CO}}{\text{Faktor IPCC GRK}}$$

Berikut merupakan tabel faktor IPCC 2006 untuk CO, CO₂, CH₄, dan N₂O :

Tabel 3. 12 Faktor IPCC 2006 untuk Bahan Bakar Solar

Bahan Bakar	CO		CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	Nilai	EF ID	Nilai	EF ID	Nilai	EF ID	Nilai	EF ID
Solar	5,61	11742	2168	12065	0,01	118490	0,006	118464

Setelah diperoleh nilai faktor rasio antara gas CO dan GRK, faktor IPPS dari emisi GRK pada setiap jenis industri diperoleh dengan rumus berikut :

$$PI \text{ IPPS GRK} = \frac{PI \text{ IPPS CO}}{\text{Rasio IPCC CO-GRK}}$$

Dengan begitu, diperoleh beban emisi GRK pada masing-masing jenis usaha sebagai berikut :

Tabel 3. 13 Emisi GRK Sub Sektor Industri Tahun 2024 dengan Metode IPPS

No	Jenis Usaha	Beban Emisi (Ton/Tahun)			Total Beban Emisi GRK (CO ₂ eq Ton/Tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	Kertas, wadah karton, dan kotak kardus	150,58	0,01	0,01	153,81
2	Mesin dan peralatan pertanian	176	0,01	0,01	179,23
3	Mesin dan turbin	296,31	0,02	0,01	299,79
4	Pabrik penggergajian dan pabrik kayu lainnya	2.179,99	0,12	0,07	2.203,85
5	Pembuatan produk logam	171,15	0,01	0,01	174,38
6	Pemintalan, penenunan, dan penyempurnaan tekstil	127,13	0,01	0,01	130,36
7	Penyemakan kulit dan pakaian kulit	151,47	0,01	0,01	154,70
8	Perabotan dan perlengkapan	11,21	0	0	11,21
9	Peralatan Listrik dan peralatan rumah tangga	12,35	0	0	12,35
10	Peralatan profesional dan ilmiah	0,28	0	0	0,28
11	Produk Karet	0,13	0	0	0,13
12	Produk kayu dan gabus	11.830,87	0,63	0,38	11.959,86
13	Produk kimia	10.686,99	0,57	0,34	10.802,56

14	Produk konveksi	0,53	0	0	0,53
15	Produk makanan	57,85	0	0	57,85
16	Produk plastik	2,46	0	0	2,46
17	Produk susu	17,72	0	0	17,72
18	Produsen tembakau	978,4	0,05	0,03	988,59
19	Resin sintesis, bahan plastic, dan serat buatan	14.649,42	0,78	0,47	14.808,98
20	Semen, kapur, dan plester	494,08	0,03	0,02	500,79
21	Sepeda motor dan sepeda	14,97	0	0	14,97
22	Teksil jadi kecuali pakaian jadi	0,99	0	0	0,99

4.2.3 Prediksi Emisi Gas Rumah Kaca Subsektor Industri

Hasil inventarisasi emisi gas rumah kaca subsektor industri dengan metode IPCC pada tahun 2023 akan digunakan untuk menentukan jumlah emisi yang dihasilkan industri Kabupaten Kendal selama 10 tahun ke depan. Perhitungan data pada tugas akhir ini didasarkan pada laporan jumlah penggunaan bahan bakar industri (Zairina, Wibisono, Ngaliman, Indrayani, & Satriawan, 2023). Data penggunaan bahan bakar diperoleh melalui data Disperinaker Kendal yang akan digunakan untuk mengetahui jumlah emisi periode 2024-2034. Diperkirakan jumlah emisi yang dihasilkan oleh industri akan tetap konstan, mengingat kapasitas produksi yang ada saat ini diprediksi tidak akan mengalami perubahan signifikan.

Prediksi emisi berdasarkan metode IPPS bergantung pada pertumbuhan jumlah pekerja. Pertumbuhan tenaga kerja dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi yang mempengaruhi jenis industri sehingga dapat membatasi penyerapan tenaga kerja di industri tersebut (Weerathunga & Seneviratne, 2023). Namun karena keterbatasan penelitian, tugas akhir ini tidak menganalisis dampak pertumbuhan ekonomi pada masing-masing industri terhadap pertumbuhan tenaga kerja. Oleh karena itu, perhitungan pertumbuhan angkatan kerja pada studi tugas akhir ini didasarkan pada rata-rata pertumbuhan angkatan kerja berdasarkan industri yang ada di Kabupaten Kendal (Tanha et al., 2024).

Tabel 3. 14 Prediksi Emisi Gas Rumah Kaca Subsektor Industri

Tahun	CO ₂ eq (Ton/Tahun)			Total CO ₂ eq Ton/Tahun
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
2024	93.020,40	183,25	664,54	93.868,24
2025	94.999,80	185,75	679,88	95.865,38
2026	96.980,10	188,25	698,82	97.867,20
2027	98.765,60	190,75	715,89	99.672,22
2028	100.768,00	193,50	735,04	101.696,87
2029	102.748,00	196,00	753,97	103.697,61
2030	104.728,00	198,75	772,90	105.699,68
2031	106.513,00	201,00	789,97	107.504,45
2032	108.516,00	203,75	809,12	109.529,10
2033	110.496,00	206,50	828,05	111.530,09

4.3 Prediksi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi Kabupaten Kendal

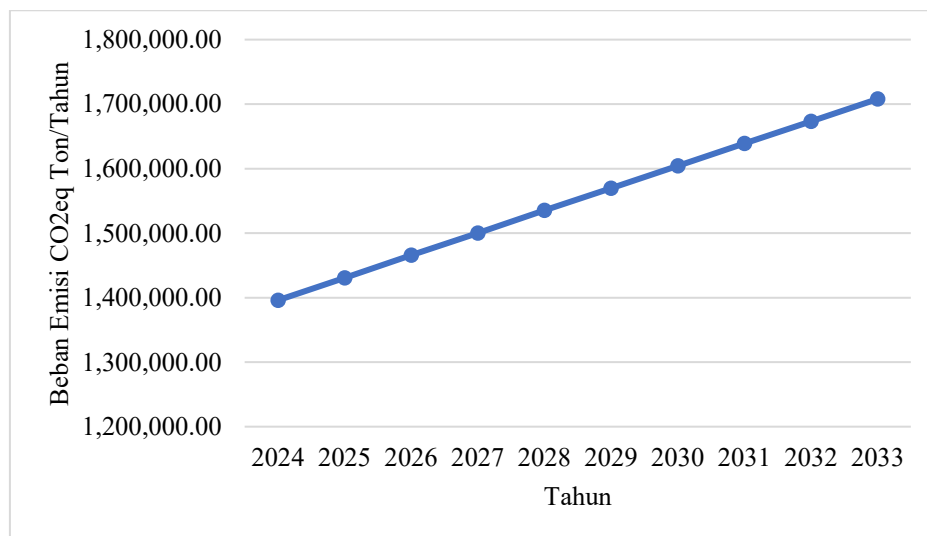
Perhitungan keberhasilan target reduksi emisi didapatkan dengan membandingkan emisi setelah dilakukan skenario aksi mitigasi dengan emisi pada kondisi tanpa aksi yang digunakan sebagai *baseline*. *Baseline* yang digunakan yakni hasil penjumlahan prediksi emisi CO₂e tahun 2024-2033 pada sektor

energi yang telah diinventarisasikan. Sektor penggunaan energi yang dianalisis berasal dari aktivitas sub sektor transportasi dan sub sektor industri. Berikut merupakan prediksi beban emisi gas rumah kaca sektor energi pada tahun 2024-2033.

Tabel 16 Prediksi Beban Emisi Sektor Energi tahun 2024-2033

Tahun	Prediksi Emisi CO ₂ e (Ton/Tahun)		
	Transportasi	Industri	Penggunaan Energi
2024	1.302.091	93.868,24	1.395.959,24
2025	1.334.975	95.865,38	1.430.840,38
2026	1.367.815	97.867,20	1.465.682,20
2027	1.400.611	99.672,22	1.500.283,22
2028	1.433.359	101.696,87	1.535.055,87
2029	1.466.060	103.697,61	1.569.757,61
2030	1.498.711	105.699,68	1.604.410,68
2031	1.531.310	107.504,45	1.638.814,45
2032	1.563.857	109.529,10	1.673.386,10
2033	1.596.350	111.530,09	1.707.880,09

Berdasarkan tabel di atas, hasil prediksi emisi tersebut selanjutnya dapat disajikan dalam bentuk infografis, dengan maksud sebagai informasi yang memudahkan dalam pembacaan prediksi emisi. Berikut merupakan infografis yang memuat prediksi emisi sektor penggunaan energi di Kabupaten Kendal:



Gambar 1 Prediksi Emisi CO₂e Sektor Energi Tahun 2024-2033

4.4 Strategi

4.4.1 Peningkatan Semi BRT

Berdasarkan penelitian Hodges (2010), pelaksanaan shifting kendaraan pribadi ke kendaraan umum dapat mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan oleh individu pengendara. Peningkatan BRT merupakan salah satu strategi reduksi yang diusulkan pada sektor transportasi di Kabupaten Kendal. Strategi ini mendorong minat masyarakat agar beralih dari kendaraan pribadi ke kendaraan umum. Strategi peningkatan Semi BRT direncanakan akan menambah tiga rute yaitu Terminal Bahurekso – Terminal Sukorejo, Terminal Sukorejo – Terminal Bodja, dan Terminal Bodja – Terminal Mangkang.

Reduksi emisi dari shifting kendaraan umum dapat mencapai hingga 9-15% dari total emisi bergantung pada perilaku masyarakat itu sendiri. Setelah dilakukan analisis dan perhitungan, pada perencanaan ini

strategi peningkatan Semi BRT dapat menurunkan emisi sebesar 1% dari total emisi GRK pada sektor transportasi.

4.4.2 *Pembangunan ATCS/ITS*

Sistem ITS merupakan salah satu bentuk aksi penurunan emisi gas rumah kaca di sektor transportasi. Dengan diterapkannya ITS, pengemudi dapat mencari rute terbaik untuk mengurangi kemacetan dan waktu tempuh sehingga sampai tujuan dengan lancar. Dengan demikian, nilai konsumsi bahan bakar dapat berkurang sehingga jumlah beban emisi yang dihasilkan menurun. Pemilihan penerapan ITS sejalan dengan aksi mitigasi nasional yang terdapat dalam Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011. Selain itu, penerapan ITS juga sejalan dengan Rencana Aksi Daerah Provinsi Jawa Tengah dan Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Kabupaten Kendal Tahun 2023.

Menurut Jatmiko (2013), pada ATCs yang telah terpasang di Kota Tangerang dapat mereduksi emisi CO₂ saat kendaraan berhenti sebesar 15,26% dan dapat mengurangi emisi CO₂ saat kendaraan berjalan sebesar 6,208%. Kemudian, berdasarkan Libde dkk. (2017), ATCS yang terpasang di Alabama, Amerika Serikat didapatkan hasil dapat mengurangi antrian kendaraan hingga 7,2% dan dapat mengurangi waktu delay kendaraan hingga 11%.

Pembangunan ATCS direncanakan akan dilakukan pada 6 titik persimpangan pada ruas jalan utama di Kabupaten Kendal. Yang mana, setelah dilakukan analisis dan perhitungan pada perencanaan ini strategi pembangunan ATCS dapat mengurangi emisi hingga 24% dari total emisi GRK pada sektor transportasi.

4.4.3 *Pelatihan Smart Driving*

Pelatihan Smart Driving merupakan salah satu upaya penurunan emisi GRK pada sektor transportasi. Pelaksanaan Pelatihan Smart Driving sejalan dengan Peraturan Presiden Nomor 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca, Rencana Aksi Daerah Provinsi Jawa Tengah dan Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Kabupaten Kendal Tahun 2023.

Menurut Sinaga (2013), Teknik smart driving, berdasarkan pelatihan yang telah dilakukan di Kota Semarang dan Kota Tegal dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 40%. Pada perencanaan ini, *smart driving* direncanakan dengan target pelatihan pengemudi kendaraan jenis sepeda motor, mobil, dan truk. . Setelah dilakukan analisis dan perhitungan, pada perencanaan ini strategi pelatihan *smart driving* dapat menurunkan emisi hingga 15% dari total emisi GRK pada sektor transportasi.

4.4.4 *Optimalisasi Biomassa*

Substitusi energi yang ramah lingkungan merupakan strategi yang tercantum dalam RAD-GRK Kabupaten Kendal dan dalam Peraturan Presiden Nomor 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Sebagai substitusi pembakaran batu bara, co-firing biomassa dianggap sebagai salah satu strategi tepat dikarenakan pembakaran batu bara pada sub sektor industri di Kabupaten Kendal menghasilkan emisi yang besar. Pada perencanaan ini, co-firing biomassa akan diterapkan pada industri PT Industri Gula dan PT Tri Sinar Putra yang mana menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Jenis biomassa yang direncanakan berasal dari bahan tempurung kelapa dengan jumlah sebesar 30%.

4.4.5 *Penggunaan Biofuel Berkelanjutan*

Penggunaan bahan bakar konvensional seperti solar berpotensi menyumbangkan emisi GRK di atmosfer. Karena itu, diperlukan alternatif dengan menggunakan energi baru terbarukan yang mana lebih ramah lingkungan. Seruan penggunaan energi baru terbarukan tercantum dalam Peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral Nomor 32 Tahun 2008. Di dalam peraturan tersebut tertulis bahwa penggunaan bahan bakar nabati bersifat wajib. Salah satu jenis bahan bakar nabati atau biofuel yang dapat menjadi alternatif ialah biodiesel. BBN jenis biodiesel yang dipasarkan pada saat ini adalah jenis

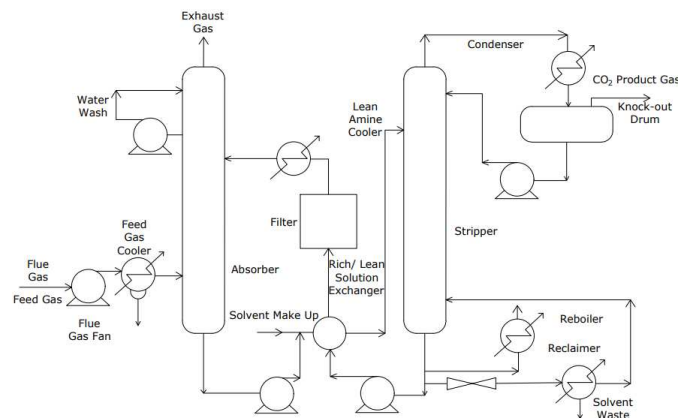
B30 dengan campuran 30% Biodiesel dan 70% solar murni. Berdasarkan penelitian, Biodiesel B30 mampu menurunkan emisi CO₂ sebesar 28,19% dibandingkan dengan solar murni.

4.4.6 Carbon Capture, Utilization, and Storage

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) merupakan rencana jangka panjang yang digagas oleh pemerintah dalam rangka mereduksi emisi gas rumah kaca. Selain itu, di dalam RAD-GRK Provinsi Jawa Tengah juga tertuang penggunaan CCUS sebagai strategi penurunan emisi GRK. Teknologi ini mampu menangkap lebih dari 90% CO₂ yang diemisikan. Dalam perencanaan ini, pemasangan teknologi Carbon Capture diterapkan pada industri yang menggunakan bahan bakar batu bara dan industri besi. Pada Kabupaten Kendal, industri yang masuk dalam persyaratan tersebut di antaranya adalah PT Industri Gula, PT Tri Sinar Putra, dan CV Merapi. Pemasangan CCUS pada PT Industri Gula dan PT Tri Sinar Putra mempertimbangkan bahwa kedua perusahaan ini menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Sementara untuk CV Merapi, pemasangan CCUS dilakukan dengan mempertimbangkan bahwa perusahaan ini memiliki izin berusaha pengecoran besi dan baja.

Penangkapan carbon yang direncanakan pada perencanaan ini menggunakan metode *post-combustion capture*. Sistem post-combustion adalah proses yang digunakan untuk memisahkan CO₂ dari gas buang yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar di udara. Dalam sistem ini, biasanya diterapkan pelarut kimia untuk menangkap gas CO₂ tersebut. Hal ini dikarenakan efisiensi dan selektivitasnya yang tinggi, serta penggunaan dan biaya energi terendah jika dibandingkan dengan proses penangkapan post-combustion lainnya (Nurullah et al., 2024).

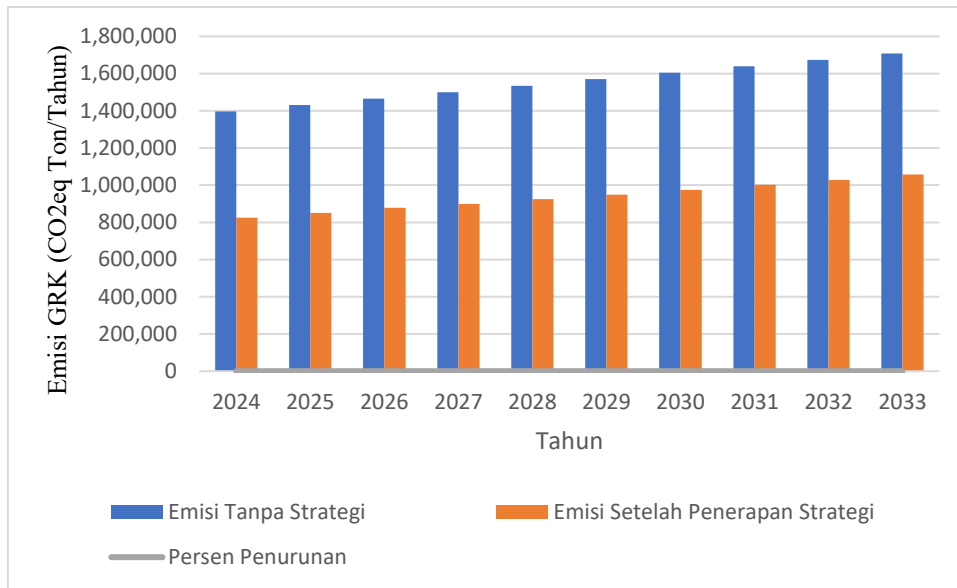
Adapun teknologi *carbon capture* yang digunakan yaitu, MHI KM-CDR. Pada metode MHI KM-CDR, gas buang hasil pembakaran bahan bakar akan melewati Flue Gas Quencher untuk didinginkan suhunya hingga mencapai temperatur 45oC dan untuk memisahkan senyawa CO₂ dari gas buang tersebut. Setelah itu, gas akan ditangkap dengan absorben chemical solvent dengan jenis KS-1 solvent. Absorben ini dipilih karena lebih stabil dan lebih rendah korosif dibandingkan absorben jenis lain (George, 2021). Setelah CO₂ pada gas buang ditangkap, selanjutnya gas dialirkan melalui regenerator untuk memisahkan solvent dan CO₂. Terakhir, CO₂ akan dikompresi dan dikeringkan dengan compressor. Adapun alur penangkapan CO₂ pada perencanaan ini seperti gambar berikut :



Gambar 3. 1 Skema Operasi CO₂ Capture

4.5 Prediksi Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca

Setelah direncanakan strategi pengurangan Emisi GRK dari sektor transportasi dan industri seperti di atas, kemudian dapat dilakukan prediksi penurunan emisi GRK di Kabupaten Kendal utamanya di sektor transportasi dan industri. Berikut merupakan grafik rekapitulasi prediksi penurunan emisi GRK dari sektor transportasi dan industri pada tahun 2024 hingga tahun 2024:



Gambar 3. 2 Grafik Prediksi Penurunan Emisi GRK Sektor Transportasi dan Industri

Dapat dilihat berdasarkan grafik di atas, penurunan emisi GRK sektor transportasi dan industri di Kabupaten Kendal pada tahun 2030 mencapai angka 975.507,2 CO2eq Ton/Tahun. Target NDC yang ditetapkan sebanyak 29% dari tahun baseline 2024. Dimana penurunan emisi GRK yang ditargetkan pada tahun 2030 sebanyak 991.131,06 CO2eq Ton/Tahun. Dengan begitu, penurunan emisi GRK dengan strategi yang direncanakan telah memenuhi target.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan dapat disimpulkan beberapa hal, diantaranya sebagai berikut: perhitungan inventarisasi emisi gas rumah kaca menunjukkan nilai beban emisi dari sektor energi terus meningkat setiap tahunnya. Pada sektor transportasi, emisi GRK mencapai angka 1.596.350 CO2eq Ton/Tahun pada tahun 2033. Sementara pada sektor industri, emisi GRK mencapai angka 111.530,09 CO2eq Ton/Tahun pada tahun 2033. Penentuan strategi reduksi emisi gas rumah kaca dilakukan dengan menggunakan metode SWOT dan QSPM, kemudian ditentukan prioritas strategi reduksi emisi gas rumah kaca yang paling banyak mereduksi emisi GRK. Pada sektor transportasi, prioritas strategi yang diterapkan adalah pelatihan smart driving, pembangunan ATCS/ITS, dan peningkatan BRT. Sementara pada sektor industri, prioritas strategi yang diterapkan adalah penggunaan biofuel berkelanjutan, optimalisasi biomassa, dan pemasangan carbon capture utilization and storage. Prediksi penurunan emisi gas rumah kaca sektor transportasi dan industri mencapai 31%. Sektor transportasi menurunkan emisi GRK sebesar 28%. Sementara itu, sektor industri mereduksi emisi GRK sebesar 76%.

Limitasi dan Studi Lanjutan

Penelitian ini memiliki keterbatasan terutama dalam ketersediaan data primer yang lebih rinci mengenai faktor emisi lokal, sehingga sebagian besar perhitungan masih mengandalkan data sekunder dan asumsi umum dari IPCC. Selain itu, model proyeksi yang digunakan dalam skenario Business as Usual (BAU) belum mempertimbangkan dinamika kebijakan baru dan potensi inovasi teknologi yang dapat terjadi dalam jangka pendek. Oleh karena itu, studi lanjutan disarankan untuk memperkuat basis data lokal melalui survei langsung di lapangan serta memasukkan variabel adaptif terkait kebijakan energi hijau dan perkembangan teknologi transportasi dan industri agar hasil proyeksi dan mitigasi lebih akurat dan aplikatif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini, khususnya Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Kendal atas penyediaan data yang relevan, serta tim ahli dari bidang transportasi dan industri yang telah

memberikan masukan berharga selama proses analisis. Terima kasih juga disampaikan kepada institusi akademik dan seluruh rekan sejawat yang telah berkontribusi melalui diskusi dan saran yang konstruktif, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

Referensi

- Abu, S. E. (2024). Audit committee characteristics and firm financial performance of quoted industrial goods firms in Nigeria. *International Journal of Financial, Accounting, and Management*, 5(4), 459-472. <https://doi.org/10.35912/ijfam.v5i4.1718>
- Adak, P., Sahu, R., & Elumalai, S. P. (2016). Development of emission factors for motorcycles and shared auto-rickshaws using real-world driving cycle for a typical Indian city. *Science of the total environment*, 544, 299-308. [10.1016/j.scitotenv.2015.11.099](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.099)
- Bao, J., He, X., Deng, Y., Zhang, N., Zhang, X., An, B., & He, G. (2022). Parametric analysis and multi-objective optimization of a new combined system of liquid carbon dioxide energy storage and liquid natural gas cold energy power generation. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132591. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132591>
- Boedoyo, M. S. (2008). Penerapan teknologi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 9(1).
- Chen, Z., Chen, S., Dai, W., Wang, Y., Evrendilek, F., Liu, J., . . . Zhang, G. (2023). Insights into optimal gas-ash-energy nexus: Oxy-steam combustion of spent pot lining. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138707>
- Florides, G. A., & Christodoulides, P. (2009). Global warming and carbon dioxide through sciences. *Environment international*, 35(2), 390-401.
- George, A. A. (2021). Social and cultural influences and their implications for sustainable tourism: A case study of Trinidad & Tobago's tourism and the growth of the LGBTQ traveler segment. *Journal of Sustainable Tourism and Entrepreneurship*, 2(3), 147-157. <https://doi.org/10.35912/joste.v2i3.554>
- Hodges, T. (2010). *Public transportation's role in responding to climate change*: Diane Publishing.
- Hsu, C.-c., Chen, S.-H., & Feng, X.-c. (2024). Analysis of Product Quality and Customer Satisfaction: A Case Study of the Automotive Parts Industry. *International Journal of Financial, Accounting, and Management*, 6(2), 245-259. [10.35912/ijfam.v6i2.2153](https://doi.org/10.35912/ijfam.v6i2.2153)
- Iklim, P. M. L. H. d. K. N. P. M. S. K. T. t. P. S. R. N. P. (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.71/MENLHK/SETJEN/KUM.1/12/2017 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Sistem Registri Nasional Pengendalian Iklim). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.71/MENLHK/SETJEN/KUM.1/12/2017 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Sistem Registri Nasional Pengendalian Iklim.
- Jatmiko, W. (2013). Analisis Dampak Pemasangan ATCS Terhadap Emisi Gas Buang (CO₂) di Jl. Jend. Sudirman Kota Tangerang. *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Kota*, 9(02), 134-143. <https://doi.org/10.14710/pwk.v9i2.6518>
- Jinca, M. Y. (2009). Keterpaduan Sistem Jaringan Antar Moda Transportasi Di Pulau Sulawesi. *Jurnal Transportasi*, 9(1). [10.26593/jt.v9i1.341.%p](https://doi.org/10.26593/jt.v9i1.341.%p)
- Li, C., Dixit, P., Welch, B., Nigam, A., Soriano, B., Lee, J., . . . Karavalakis, G. (2021). Yard tractors: Their path to zero emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, 102972. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102972>
- Lopulalan, M. C. (2015). Penentuan Faktor Emisi Spesifik Untuk Estimasi Dan Pemetaan Tapak Karbon Dari Sektor Transportasi Dan Industri Di Kabupaten Banyuwangi. *Institut Sepuluh November, Surabaya*.
- Lundin, N. (2009). Feasibility Study on EU-CHINA Low Carbon Technology and Investment Demonstration Zones.
- Mardiono, D. A., Nanra, S., & Rican, D. (2023). Rancang Bangun Pengaman Pintu Menggunakan RFID Dengan Mikrokontroler Atmega 328. doi:<https://doi.org/10.35912/jatra.v1i1.1872>
- Melvi, M., Nurhayati, N., Batubara, M. A. M., Septama, H. D., & Ulvan, A. (2023). Unjuk Kerja Teknologi Akses Jamak TD-CDMA dan TD-SCDMA pada Infrastruktur Jaringan High Altitude Platform Stations. *Jurnal Teknologi Riset Terapan*, 1(1), 51-59. doi:[10.35912/jatra.v1i1.1790](https://doi.org/10.35912/jatra.v1i1.1790)

- Mutascu, M. (2023). Is biomass energy really sustainable in the United States? *Renewable and sustainable energy reviews*, 181, 113325. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113325>
- Nurullah, A., Gozali, E. O. D., Hamzah, R. S., Bakti, H., Khasman, R., & Maharani, M. A. (2024). An assessment of banking sector performance in Indonesia. *International Journal of Financial, Accounting, and Management*, 5(4), 421-431. <https://doi.org/10.35912/ijfam.v5i4.1452>
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). *Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Ipcc.*
- Rahmawati, Y., & Hadian, H. N. (2022). The influence of debt equity ratio (DER), earning per share (EPS), and price earning ratio (PER) on stock price. *International Journal of Financial, Accounting, and Management*, 3(4), 289-300. <https://doi.org/10.35912/ijfam.v3i4.225>
- Sinaga, N. (2013). Pelatihan teknik mengemudi smart driving untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dan menekan biaya transportasi angkutan darat.
- Sloot, D., Lehmann, N., & Ardone, A. (2023). Would employees accept curtailments in heating and air conditioning, and why? An empirical investigation of demand response potential in office buildings. *Energy Policy*, 181, 113705. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113705>
- Tanha, M., Amin, M. R., Masum, M. Y., Bairagi, M., Rahman, M. H., & Hasan, M. Z. (2024). Cashless Mobile Financial Services: Rapid growing financial sector in Bangladesh's Financial Industry. *Annals of Management and Organization Research*, 6(2), 107-125. [10.35912/amor.v6i2.2108](https://doi.org/10.35912/amor.v6i2.2108)
- Weerathunga, V. M., & Seneviratne, S. C. (2023). Management control systems and business performance: Evidence from Sri Lankan apparel industry. *International Journal of Financial, Accounting, and Management*, 4(4), 411-426. <https://doi.org/10.35912/ijfam.v4i4.1167>
- Yando, J. R., Panusunan, P., & Fauzan, F. (2023). Penggunaan Filler Tanah (Silt) sebagai Perencanaan Campuran Aspal Beton AC-WC. doi:<https://doi.org/10.35912/jatra.v1i1.1873>
- Yang, J., Tang, S., Song, B., Jiang, Y., Zhu, W., Zhou, W., & Yang, G. (2023). Optimization of integrated anaerobic digestion and pyrolysis for biogas, biochar and bio-oil production from the perspective of energy flow. *Science of The Total Environment*, 872, 162154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162154>
- Zairina, S., Wibisono, C., Ngaliman, N., Indrayani, I., & Satriawan, B. (2023). The influence of product quality, prices, and promotions on buyer decisions in the Small and Medium industry handicrafts of Tanjungpinang City. *Journal of Multidisciplinary Academic Business Studies*, 1(1), 13-25. <https://doi.org/10.35912/jomabs.v1i1.1778>