



Evaluasi Pelaksanaan Program Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca di PT X dalam Mencapai Net Zero Emission 2050

Fauzan Anditya Hafids¹, Mas Agus Mardiyanto², Adhi Yuniarto³, Yayat Nurhidayat⁴,
Abdu Fadli Assomadi⁵

¹Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia

²Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia

³Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia

⁴Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia

⁵Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia, assomadi@its.ac.id

Corresponding Author: assomadi@its.ac.id⁵

Abstract: *The issue of climate change encourages the industrial sector, including medical device manufacturing companies such as PT X in Bekasi Regency, to implement a decarbonization strategy to achieve the Net Zero Emissions (NZE) 2050 target. This study aims to evaluate the implementation of the greenhouse gas (GHG) emission reduction program that has been carried out by PT X, identify the necessary improvement factors, and determine the priorities of mitigation strategies based on the Science Based Targets initiative (SBTi) approach of near-term targets. The methods used in this study include inventory of GHG emissions (scope 1, 2, and 3), analysis of Business as Usual (BaU) with actuality, and determination of mitigation strategies using the Marginal Abatement Cost Curve (MACC) and Analytic Hierarchy Process (AHP) approaches. The results of the study show that PT X has succeeded in reducing emissions by 440 tCO_{2e} from the BaU condition, but has not met the SBTi roadmap target in 2024 with a difference of 56 tCO_{2e}. The priority mitigation strategy prepared through AHP shows that the use of Renewable Energy Certificate (REC) (47.3%) and the addition of Photovoltaic (PV) capacity (42%) are the two most effective options compared to the replacement of refrigerant and operational vehicles (10.7%). With an average Consistency Ratio (CR) value of 0.0504, the AHP results were declared methodologically valid. This research makes a practical contribution to the development of PT X's decarbonization roadmap and enriches the literature related to scientific evidence-based NZE strategies in the manufacturing industry sector.*

Keyword: *Mitigation Actions, Net Zero Emissions 2050, SBTi Roadmap.*

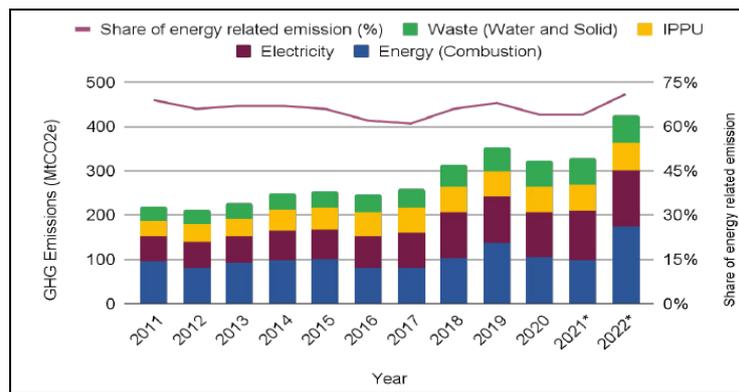
Abstrak: Isu perubahan iklim mendorong sektor industri, termasuk perusahaan manufaktur alat medis seperti PT X di Kabupaten Bekasi, untuk menerapkan strategi dekarbonisasi guna mencapai target *Net Zero Emissions* (NZE) 2050. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi program pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang telah dilakukan PT X, mengidentifikasi faktor perbaikan yang diperlukan, serta menentukan prioritas strategi mitigasi berdasarkan pendekatan *Science Based Targets initiative* (SBTi) *near-term target*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi inventarisasi emisi GRK (scope 1, 2, dan 3), analisis *Business as Usual* (BaU) dengan aktual, dan penentuan strategi mitigasi dengan pendekatan *Marginal Abatement Cost Curve* (MACC) dan *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa PT X berhasil menurunkan emisi sebesar 440 tCO₂e dari kondisi BaU, namun belum memenuhi target roadmap SBTi tahun 2024 dengan selisih sebesar 56 tCO₂e. Strategi mitigasi prioritas yang disusun melalui AHP menunjukkan bahwa penggunaan *Renewable Energy Certificate* (REC) (47,3%) dan penambahan kapasitas *Photovoltaic* (PV) (42%) merupakan dua opsi paling efektif dibandingkan penggantian refrigerant dan kendaraan operasional (10,7%). Dengan nilai *Consistency Ratio* (CR) rata-rata sebesar 0,0504, hasil AHP dinyatakan valid secara metodologis. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan roadmap dekarbonisasi PT X dan memperkaya literatur terkait strategi NZE berbasis bukti ilmiah di sektor industri manufaktur.

Kata Kunci: Aksi Mitigasi, *Net Zero Emissions* 2050, Roadmap SBTi

PENDAHULUAN

Perkembangan industri dan sektor industri menjadi salah satu penyebab pencemaran lingkungan. Penggunaan sumber energi dan sumber daya oleh sektor industri dapat menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan (Purwendah et al., 2023). Dalam beberapa dekade terakhir, perhatian besar telah diberikan pada isu ini, tidak hanya oleh pemerintah dan masyarakat, tetapi juga oleh perusahaan yang semakin memperhatikan pengelolaan lingkungan (Rumambi, 2023). Salah satu penyebab dari pencemaran lingkungan tersebut adalah peningkatan jumlah emisi yang semakin membesar.

Menurut data dari *Indonesia Energy Transition Outlook 2024*, emisi dari sektor industri di Indonesia menunjukkan tren peningkatan yang signifikan dalam kurun waktu lebih dari satu dekade. Seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.1, emisi sektor ini mengalami lonjakan dua kali lipat dari tahun 2011 hingga 2022. Peningkatan ini sangat erat kaitannya dengan pertumbuhan ekonomi nasional yang mendorong peningkatan aktivitas industri dan konsumsi energi. Pada tahun 2022, total emisi dari sektor industri telah melampaui angka 400 juta ton CO₂e. Dari jumlah tersebut, sekitar 60% hingga 70% berasal dari konsumsi energi, baik melalui pembakaran langsung maupun penggunaan listrik yang dihasilkan dari bahan bakar fosil. Lonjakan emisi sebesar 30% dari tahun 2011 dibandingkan tahun 2022 menunjukkan bahwa konsumsi energi oleh sektor industri terus meningkat, baik secara langsung maupun tidak langsung. Jika tren ini terus berlanjut tanpa adanya intervensi atau kebijakan mitigasi yang efektif, maka emisi dari sektor industri akan menjadi kontributor utama terhadap percepatan perubahan iklim di Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah strategis untuk menekan emisi, seperti transisi ke energi bersih, efisiensi energi, dan penerapan teknologi rendah karbon di sektor industri.



Gambar 1. Emisi dari Sektor Industri (*Indonesia Energy Transition Outlook, 2024*)

Gambar 1 di atas menunjukkan tren emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di Indonesia dari tahun 2011 hingga 2022, diukur dalam satuan juta ton setara karbon dioksida (MtCO₂e). Grafik ini mengelompokkan emisi berdasarkan sumbernya, yaitu Energi (Pembakaran), Listrik, IPPU (*Industrial Processes and Product Use*), serta Limbah (Cair dan Padat), yang masing-masing direpresentasikan dengan warna biru, merah marun, kuning, dan hijau. Selain itu, terdapat garis ungu yang menunjukkan persentase kontribusi emisi yang berasal dari sektor energi secara keseluruhan terhadap total emisi. Pada grafik tersebut menggambarkan bahwa total emisi GRK mengalami peningkatan secara konsisten dari tahun ke tahun. Kontribusi terbesar terhadap emisi berasal dari sektor Energi (Pembakaran) dan Listrik, yang menunjukkan ketergantungan tinggi terhadap bahan bakar fosil dalam sistem energi nasional. Persentase emisi terkait energi juga menunjukkan tren meningkat, yang menandakan bahwa sektor energi menjadi penyumbang utama emisi GRK di Indonesia. Hal ini menegaskan pentingnya transisi energi menuju sumber yang lebih bersih dan berkelanjutan sebagai bagian dari strategi mitigasi perubahan iklim nasional.

Dalam upaya mengatasi perubahan iklim, pemerintah sangat mendorong pengurangan emisi dengan menetapkan berbagai target dalam *Nationally Determined Contribution (NDC)* yang telah diratifikasi berdasarkan Perjanjian Paris. Akan tetapi, target dalam NDC masih memerlukan penguatan. Menurut kesepakatan *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* tahun 2014, meskipun setiap negara diharapkan mencapai target NDC pada tahun 2030 dan membatasi kenaikan suhu global di bawah 2°C, dampak perubahan iklim masih beresiko menimbulkan kerugian ekonomi sebesar 0,2 dari PDB global setiap tahun. Oleh karena itu, negara-negara di seluruh dunia sepakat bahwa ambisi dan target iklim perlu ditingkatkan. Peningkatan emisi karbon mendorong Pemerintah Indonesia untuk mengesahkan Perjanjian Paris dengan meratifikasinya melalui Undang-Undang Nomor 16 tahun 2016 tentang Pengesahan *Paris Agreement To The United Nations Framework Convention On Climate Change (UNFCCC)*. Perjanjian ini bertujuan untuk mencapai *Net Zero Emissions (NZE)* pada tahun 2060 atau lebih cepat (Hidayati, 2024).

NZE atau nol emisi karbon adalah kondisi di mana jumlah emisi karbon yang dilepaskan ke atmosfer tidak lebih besar dari kapasitas bumi untuk menyerapnya. Konsep NZE pertama kali muncul secara tertulis pada COP21 di Paris tahun 2015. Persetujuan Paris yang dihasilkan mencakup berbagai isu yang akan ditangani oleh setiap negara yang meratifikasinya, serta menetapkan tujuan utama yang harus dicapai melalui implementasi Persetujuan Paris (IRID, 2024). Menurut Rachmatika (2022), NZE merupakan inisiatif lingkungan berskala global yang diperkenalkan melalui perjanjian Paris pada tahun 2015 dibuat sebagai tanggapan terhadap perubahan iklim global. NZE menjadi tujuan yang dikejar oleh bergagai negara di dunia untuk menurunkan emisi karbon guna membatasi pemanasan global pada tahun 2050.

Menurut *World Resource Institute* Indonesia (2021) dan Hidayati (2024), beberapa program dari sektor industri yang dapat dilakukan dalam mencapai target NZE tahun 2050

antara lain pengurangan pembangkit berbahan baku batubara, meningkatkan investasi energi bersih, efisiensi energi, dekarbonisasi industri, pengembangan *electric vehicle* (kendaraan listrik), peningkatan penyediaan dan pemanfaatan transportasi umum, mengatasi deforestasi dan kerusakan lahan, penggunaan energi terbarukan, teknologi rendah karbon, optimasi rantai pasokan, penggunaan material ramah lingkungan, retrofit building dengan sistem HVAC menggunakan teknologi refrigerant non *Global Warming Potential* (GWP) dan non *Ozone Depletion Potential* (ODP) serta penggunaan *Renewable Energy Certificate* (REC).

PT X merupakan salah satu perusahaan manufaktur alat medis di Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, Indonesia yang dalam operasionalnya menggunakan sumber tenaga listrik dari PLN. Sebagai dukungan untuk mencapai target NZE, sejak tahun 2023 PT X telah melakukan beberapa kegiatan program *improvement* untuk menurunkan emisi yaitu dengan penggunaan energi listrik dari solar panel/*photovoltaic* (PV) berkapasitas 718,2 kWp, interkoneksi sistem chiller, perbaikan jalur kompresor, pemasangan inverter pada pompa chiller, meningkatkan standar suhu ruangan dari 23°C menjadi 25°C, pemasangan solenoid valve di mesin produksi, pemasangan sensor lampu di area tempat ibadah dan toilet, dan mengimplementasikan Sistem Manajemen Energi berdasarkan ISO 50001:2018.

Pada tahun 2024, PT X mencatat penggunaan listrik yang signifikan sebelum dan sesudah dilakukan aksi mitigasi perubahan iklim dengan program pengurangan emisi. Data yang dimiliki oleh PT X, bahwa sebelum aksi mitigasi dilakukan, konsumsi listrik perusahaan mencapai 333.446 kWh. Setelah implementasi aksi mitigasi program pengurangan emisi diterapkan, konsumsi listrik menurun menjadi 195.268 kWh. Dengan demikian, terjadi penghematan energi sebesar 138.178 kWh, yang setara dengan penurunan konsumsi energi sebesar 41,44%. Data ini menunjukkan bahwa langkah-langkah perbaikan yang dilakukan berhasil meningkatkan efisiensi penggunaan listrik di lingkungan PT X. Berdasarkan hal tersebut, program-program pengurangan emisi GRK yang telah dilakukan berhasil menurunkan penggunaan listrik sebesar 138.178 kWh atau berdasarkan Kementerian ESDM Gatrik Jawa Madura Bali (1 kWh = 0,8 kgCO₂e) setara dengan 110.542,4 kgCO₂e atau sekitar 110,5 tCO₂e. Faktor pendukung dalam mengoptimalkan program tersebut yaitu kebijakan pemerintah terkait pengurangan emisi GRK dan kebijakan manajemen PT X untuk melakukan perlindungan lingkungan. Masalah yang dihadapi PT X saat ini yaitu terkait dengan kesesuaian antara implementasi program pengurangan emisi GRK dengan standar atau kaidah ilmiah global yang berlaku, dalam hal ini standar atau kaidah ilmiah yang dimaksud adalah *roadmap Science Based Targets initiative (SBTi) near term target*. Sehingga diperlukan penelitian tentang evaluasi implementasi program pengurangan emisi GRK di PT X dalam mencapai *Net Zero Emissions 2050* dan penentuan strategi yang bisa dilakukan oleh PT X dalam mencapai target *Net Zero Emissions 2050*.

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan pemahaman mengenai kesesuaian antara implementasi program PT X dengan standar atau kaidah ilmiah dalam mencapai *NZE 2050*, dapat mengetahui faktor yang harus diperbaiki oleh PT X dalam melakukan implementasi program untuk mencapai *NZE 2050*, dan dapat menentukan serta menetapkan strategi yang bisa diimplementasikan oleh PT X dalam mencapai *Net Zero Emissions 2050* berdasarkan kaidah ilmiah dari *Science Based Target initiative (SBTi) target*.

Perubahan iklim dan isu keberlanjutan telah mendorong banyak perusahaan, termasuk PT X, untuk mulai menerapkan strategi dekarbonisasi yang sejalan dengan upaya global mencapai *Net Zero Emissions (NZE)* pada tahun 2050. Dalam konteks ini, PT X sebagai perusahaan manufaktur alat medis yang berlokasi di Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, Indonesia, tengah mengimplementasikan berbagai program pengurangan emisi GRK. Namun demikian, efektivitas dari implementasi program tersebut dalam mencapai target *NZE 2050* masih perlu dievaluasi secara ilmiah. Oleh karena itu, penelitian ini berangkat dari tiga rumusan masalah utama: pertama, apakah implementasi program PT X telah sesuai dengan standar atau kaidah ilmiah; kedua, apa saja faktor yang perlu diperbaiki dalam pelaksanaan

program tersebut; dan ketiga, bagaimana strategi yang tepat dapat ditentukan untuk mendukung pencapaian NZE 2050.

Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan mampu membantu PT X dalam meningkatkan efektivitas implementasi program pengurangan emisi dan dalam merumuskan strategi dekarbonisasi yang terarah berdasarkan roadmap Science Based Target initiative (SBTi). Bagi para praktisi dan pengambil kebijakan di bidang keberlanjutan, studi ini memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan terkait penerapan program NZE di sektor industri manufaktur. Sementara itu, dari sisi akademis, penelitian ini juga dapat memperkaya literatur ilmiah dan menjadi referensi bagi studi-studi sejenis di masa mendatang.

Adapun ruang lingkup penelitian ini meliputi berbagai batasan waktu, variabel, lokasi, serta aspek yang ditinjau. Penelitian dilakukan pada rentang waktu Januari hingga Juni 2025 dan mengambil lokasi di PT X. Variabel utama dalam penelitian ini adalah implementasi program pengurangan emisi GRK serta kesesuaian dengan Net Zero Standard SBTi near-term target. Penelitian meninjau aspek lingkungan, teknis, dan finansial, dimana ketiganya saling berhubungan dan memainkan peran krusial dalam mendukung keberhasilan program dekarbonisasi perusahaan.

Batasan penelitian juga telah ditetapkan secara jelas. Inventarisasi emisi GRK yang dilakukan mencakup scope 1 (emisi langsung), scope 2 (emisi tidak langsung dari konsumsi energi), dan scope 3 (emisi tidak langsung lainnya) untuk periode tahun 2023–2024. Namun, target penurunan emisi difokuskan pada scope 1 dan scope 2. Penelitian ini menelaah program-program pengurangan emisi yang telah dilaksanakan selama periode tersebut, dengan parameter utama berupa emisi karbon dioksida (CO₂). Data primer yang digunakan diperoleh melalui pencatatan proses-proses yang menggunakan energi serta hasil kuesioner dan wawancara dengan stakeholder PT X. Sedangkan data sekunder mencakup data penggunaan energi, produksi energi dari solar panel, volume produksi, invoice listrik PLN, serta roadmap Net Zero Standard SBTi. Baseline emisi GRK ditetapkan pada tahun 2023, dan proyeksi dilakukan hingga tahun 2034 dalam kondisi *Business as Usual* (BaU), yakni tanpa adanya aksi mitigasi tambahan. Dengan pendekatan ini, penelitian bertujuan memberikan gambaran komprehensif mengenai posisi PT X saat ini dan langkah-langkah strategis yang perlu diambil guna memastikan pencapaian target NZE 2050 secara berkelanjutan dan ilmiah.

METODE

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis implementasi program pengurangan emisi GRK di PT X, perusahaan manufaktur alat medis di Kabupaten Bekasi, dalam rangka mendukung target NZE 2050. Data dikumpulkan melalui kuesioner dan wawancara dengan pimpinan, staf teknis perusahaan, serta perwakilan Dinas Lingkungan Hidup. Penilaian strategi mitigasi emisi dilakukan berdasarkan tiga aspek: lingkungan (potensi penurunan emisi sesuai Science Based Targets initiative/SBTi), teknis (kemudahan operasional dan kesiapan teknologi), dan finansial (dengan pendekatan *Marginal Abatement Cost*/MAC, maksimal Rp 30.000/ton CO₂e).

Penelitian menggunakan kombinasi data primer dan sekunder, termasuk data energi, produksi, dan roadmap dekarbonisasi perusahaan. Emisi GRK dianalisis untuk scope 1, 2, dan 3, lalu dibandingkan antara kondisi *Business as Usual* (BaU) dan target SBTi. Strategi mitigasi dirumuskan melalui MACC dan diprioritaskan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP), dengan mempertimbangkan efektivitas penurunan emisi GRK, kelayakan teknis, dan efisiensi biaya. Hasilnya adalah rekomendasi strategi dekarbonisasi yang aplikatif, efisien, dan mendukung pencapaian target NZE 2050 PT X secara berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Inventarisasi Gas Rumah Kaca PT X

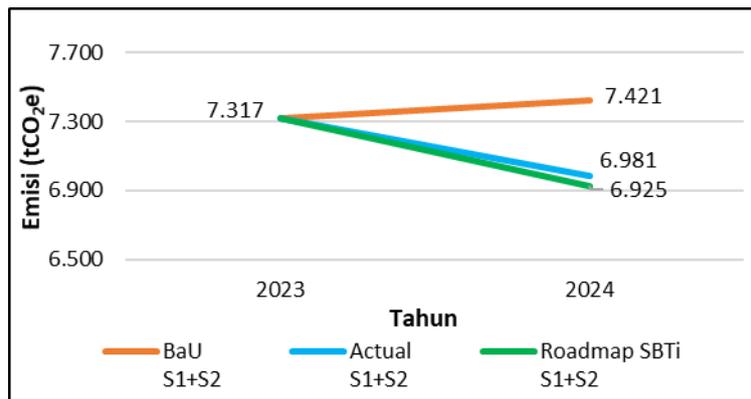
Kegiatan inventarisasi emisi GRK PT X mencakup emisi scope 1 (langsung), scope 2 (tidak langsung dari energi), dan scope 3 (tidak langsung lainnya), dengan tujuan untuk mengetahui profil emisi perusahaan selama tahun 2023 hingga 2024 dalam dua kondisi: BaU dan kondisi aktual pasca mitigasi. Aksi mitigasi yang difokuskan pada scope 2 telah dilakukan sejak 2023 dan dibandingkan dengan roadmap NZE SBTi near term target untuk memastikan kesesuaian ilmiah. Tahun 2023 ditetapkan sebagai tahun dasar (baseline year) karena data tahun 2022 tidak lengkap dan aktivitas operasional belum optimal, sementara tahun 2023 mencerminkan kondisi konvensional perusahaan sebelum adanya pengurangan emisi. Emisi tahun 2023 juga digunakan sebagai baseline dalam pengajuan target NZE ke SBTi, sebagai bentuk komitmen PT X untuk mencapai netralitas karbon pada 2050 dan mendukung target NDC Indonesia. Inventarisasi GRK yang dilakukan terdiri dari emisi GRK pada kondisi BaU dan kondisi aktual. Emisi GRK kondisi BaU merujuk pada jumlah emisi GRK yang dihasilkan oleh suatu perusahaan apabila kegiatan operasionalnya terus berjalan seperti biasa tanpa adanya intervensi, perubahan teknologi, atau kebijakan mitigasi lingkungan, atau dapat disebut kondisi konvensional. Sedangkan kondisi aktual yaitu kondisi saat ini atau kondisi dimana perusahaan setelah melakukan kegiatan intervensi atau aksi mitigasi dalam hal pengurangan emisi GRK. Emisi aktual atau emisi setelah aksi mitigasi di perusahaan merujuk pada jumlah emisi GRK yang dihasilkan setelah perusahaan menerapkan strategi pengurangan emisi.

Tabel 1. Inventarisasi GRK PT X Tahun 2023-2024

Tahun	Scope 1 BaU	Scope 2 BaU	Scope 2 Aktual	Scope 3 BaU	Unit
2023	37	7.280	7.280	2.078.927.375	tCO _{2e}
2024	53	7.368	6.928	954.446.698	tCO _{2e}

Berdasarkan Tabel 1 mengenai inventarisasi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) PT X tahun 2023–2024, terlihat bahwa emisi paling dominan berasal dari cakupan/scope 3, yaitu emisi tidak langsung lainnya yang berasal dari sumber-sumber di luar kendali langsung perusahaan, hal ini dapat terjadi karena disebabkan oleh timbulan emisi yang berasal dari proses pengiriman produk ke konsumen PT X yang berada di benua Amerika dan Afrika. Pada tahun 2023, emisi scope 3 mencapai 2.078.927.375 tCO_{2e}, jauh lebih tinggi dibandingkan scope 1 sebesar 37 tCO_{2e} dan scope 2 sebesar 7.280 tCO_{2e}. Sementara itu, pada tahun 2024, terjadi penurunan signifikan pada emisi scope 3 menjadi 954.446.698 tCO_{2e}, hal ini terjadi karena jumlah konsumen dan produk yang dijual lebih sedikit dibandingkan tahun 2023. Emisi scope 1 meningkat menjadi 53 tCO_{2e}, sedangkan emisi scope 2 mengalami penurunan dari 7.368 tCO_{2e} (BaU) menjadi 6.928 tCO_{2e} (aktual). Penurunan emisi pada scope 2 mencerminkan keberhasilan awal dari strategi dekarbonisasi PT X, meskipun emisi scope 1 masih menunjukkan peningkatan yang perlu ditindaklanjuti. Inventarisasi ini menjadi dasar penting dalam evaluasi efektivitas program mitigasi dan perencanaan langkah strategis menuju target Net Zero Emissions.

Perbandingan Emisi GRK Kondisi BaU dan Aktual dengan Roadmap SBTi Tahun 2023-2024



Gambar 2. Emisi GRK BaU, Aktual, dan Roadmap NZE 2050 SBTi Near Term Target

Sesuai pada Gambar 2. emisi GRK PT X pada tahun 2024 dalam kondisi BaU tercatat sebesar 7.421 tCO₂e, sedangkan emisi aktual setelah aksi mitigasi mencapai 6.981 tCO₂e, dan target roadmap NZE 2050 SBTi sebesar 6.925 tCO₂e. Upaya dekarbonisasi PT X berhasil menurunkan emisi sebesar 440 tCO₂e dari kondisi BaU, menunjukkan kemajuan positif. Namun, emisi aktual masih 56 tCO₂e lebih tinggi dari target SBTi, sehingga diperlukan inovasi program pengurangan emisi agar target berdasarkan SBTi dapat tercapai.

Faktor Perbaikan dalam Mencapai Net Zero Emissions 2050

Aksi mitigasi yang dilakukan PT X pada tahun 2024 telah berhasil menurunkan emisi GRK mendekati target roadmap NZE SBTi. Untuk mencapai target tersebut secara optimal, diperlukan perbaikan melalui dua fokus utama: optimalisasi konsumsi energi (scope 2) dan pengurangan emisi langsung (scope 1). Optimalisasi konsumsi energi dapat dilakukan dengan menggunakan energi terbarukan, seperti pembelian listrik dari Renewable Energy Certificate (REC) dan peningkatan kapasitas PLTS. Sementara itu, pengurangan emisi langsung dapat dicapai melalui penggunaan refrigeran ramah lingkungan, dan kendaraan listrik. Dengan fokus pada kedua aspek ini, diharapkan emisi GRK dari scope 1 dan 2 dapat ditekan lebih signifikan.

Inovasi Strategi untuk Mencapai Net Zero Emissions 2050

Industri manufaktur merupakan kontributor utama pembangunan ekonomi global sekaligus penghasil besar emisi CO₂. Seiring meningkatnya komitmen global terhadap netralitas karbon, termasuk kampanye *Race to Zero* oleh PBB, hanya sebagian kecil perusahaan yang telah menyelaraskan strategi bisnisnya dengan target pembatasan suhu global 1,5°C. Tantangan utama adalah bagaimana transisi ini akan dikelola secara teknis dan finansial. PT X menyusun strategi mitigasi GRK berdasarkan kebijakan dan kapabilitas internal, dengan fokus pada efisiensi energi dan peningkatan penggunaan energi terbarukan. Strategi yang dipilih mempertimbangkan kelayakan teknis, dampak lingkungan, dan efisiensi biaya. Strategi utama yang direkomendasikan meliputi:

1. Pembelian Renewable Energy Certificate (REC). PT X dapat membeli REC sebagai bukti penggunaan energi bersih. REC memungkinkan perusahaan mengklaim penggunaan energi terbarukan tanpa harus membangun pembangkit sendiri. Ini mendukung target keberlanjutan, meningkatkan citra perusahaan, dan mendorong investasi di sektor energi bersih.
2. Penambahan Kapasitas Solar Panel (PV). Menambah kapasitas panel surya untuk mengurangi ketergantungan pada listrik berbasis fosil. Selain bebas emisi, investasi ini menawarkan penghematan biaya jangka panjang, meningkatkan ketahanan energi, dan memperkuat reputasi perusahaan sebagai pelaku transisi energi bersih.

3. Penggantian Tipe Refrigerant dan Kendaraan Mobil Operasional. Mengganti tipe refrigerant HFC-134a dengan HFO-1234yf yang memiliki ODP nol dan GWP jauh lebih rendah, serta masa tinggal di atmosfer yang lebih pendek. Selain itu, mengganti mobil operasional berbahan bakar fosil dengan kendaraan listrik untuk mengurangi emisi scope 1 dan menurunkan biaya operasional, sesuai kebijakan nasional dalam Perpres No. 55/2019.

Ketiga strategi ini dipilih berdasarkan pertimbangan teknis dan finansial serta sejalan dengan target lingkungan PT X dalam standar *Science Based Targets initiative* (SBTi). Strategi ini diharapkan dapat mendukung transisi menuju dekarbonisasi dan pencapaian NZE 2050 secara berkelanjutan.

Analisis Cerdas: Biaya vs Manfaat dari Setiap Strategi Mitigasi Emisi

1. Strategi Penggunaan Renewable Energy Certificate (REC)
PT X menerapkan strategi bertahap penggunaan REC sebagai upaya mengurangi emisi GRK dari konsumsi listrik (scope 2). Sertifikat REC menjamin bahwa listrik yang digunakan berasal dari energi terbarukan dan dicatat secara transparan melalui sistem APX TIGRs oleh PLN. Strategi dimulai dengan penggunaan 30% REC pada tahun 2025 hingga 2027, 40% pada tahun 2028 hingga 2029, 50% pada tahun 2030 hingga 2031, 60% pada tahun 2032 hingga 2033 dan 65% pada tahun 2034. Dengan skenario ini, emisi dapat dikurangi hingga 36.195 tCO_{2e} pada tahun 2034. Total biaya penggunaan kombinasi REC hingga 2034 mencapai Rp109,94 miliar, sedikit lebih tinggi dibanding penggunaan listrik fosil murni (Rp108,61 miliar), menghasilkan *Marginal Abatement Cost* (MAC) sebesar Rp36.679 per tCO_{2e}. Meskipun ada selisih biaya, strategi ini dinilai efektif dan akuntabel untuk mendukung target Net Zero Emissions (NZE) 2050 sesuai *Science Based Targets initiative* (SBTi).
2. Penambahan Kapasitas Solar Panel (PV)
PT X telah memasang PLTS atap berkapasitas 718 kWp dan berencana menambah kapasitas secara signifikan. Empat skenario ekspansi disimulasikan, dan skenario optimal (Skenario 4) mengusulkan peningkatan kapasitas hingga 6.642 kWp (8,25x lipat dari eksisting), dengan total pengurangan emisi hingga 62.209 tCO_{2e} pada 2034 dan biaya investasi Rp19,5 miliar. Keunggulan strategi ini adalah potensi balik modal (*payback*) dalam 3 tahun dan penghematan biaya listrik hingga Rp87,3 miliar hingga 2034. Bahkan, nilai MAC untuk strategi ini adalah -Rp860.094/tCO_{2e}, yang menunjukkan keuntungan finansial sekaligus kontribusi besar pada pengurangan emisi scope 2.
3. Penggantian Tipe Refrigerant dan Kendaraan Operasional
PT X mengganti refrigerant HFC-134a (GWP 1.530) dengan HFO-1234yf (GWP 0,501), serta mengganti 6 mobil operasional berbahan bakar fosil dengan mobil listrik Wuling New Cloud EV. Langkah ini bertujuan mengurangi emisi scope 1 (emisi langsung). Strategi ini diproyeksikan menurunkan emisi sebesar 976 tCO_{2e} hingga 2034 dengan total biaya Rp2,57 miliar, terdiri dari biaya mobil listrik dan refrigerant. Nilai MAC sebesar Rp2.630.900/tCO_{2e}, yang meskipun cukup tinggi, tetap menunjukkan efisiensi dalam konteks pengurangan emisi langsung. Namun, strategi ini belum cukup untuk memenuhi target keseluruhan roadmap SBTi karena tidak mencakup emisi listrik (scope 2).

Maka dari implementasi strategi mitigasi emisi gas rumah kaca (GRK) di PT X menunjukkan kontribusi yang signifikan terhadap upaya dekarbonisasi dan pencapaian target NZE 2050. Tiga strategi utama yang diterapkan, yaitu penggunaan Renewable Energy Certificate (REC), penambahan kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap, serta konversi tipe refrigerant dan kendaraan operasional, memiliki peran penting yang saling melengkapi. Strategi penambahan PLTS atap terbukti menjadi langkah paling efisien, baik

dari segi pengurangan emisi maupun keuntungan ekonomis, karena tidak hanya menurunkan emisi scope 2 secara signifikan, tetapi juga menghasilkan penghematan biaya jangka panjang. Sementara itu, penggunaan REC memberikan kemudahan dalam pelaporan emisi dan fleksibilitas bagi perusahaan dalam melakukan transisi menuju energi bersih tanpa perlu membangun infrastruktur energi terbarukan sendiri. Di sisi lain, penggantian refrigerant dan kendaraan operasional lebih menitikberatkan pada pengurangan emisi langsung (scope 1), meskipun dampaknya secara keseluruhan masih terbatas jika tidak disertai strategi tambahan. Secara keseluruhan, kombinasi ketiga strategi ini mencerminkan komitmen PT X yang kuat dalam mengintegrasikan keberlanjutan ke dalam operasionalnya, melalui pendekatan yang bertahap, terukur, dan selaras dengan prinsip efisiensi energi serta tanggung jawab lingkungan jangka panjang.

Efisien dan Berdampak: Menyusun Prioritas Mitigasi Emisi Melalui MACC

PT X menggunakan pendekatan *Marginal Abatement Cost Curve* (MACC) untuk mengevaluasi dan memprioritaskan strategi mitigasi emisi gas rumah kaca (GRK) berdasarkan biaya dan efektivitas pengurangan emisi. MACC memungkinkan identifikasi strategi yang paling hemat biaya hingga tahun 2034 dengan memperhitungkan biaya per ton emisi CO₂ yang dikurangi. Tiga aksi mitigasi utama yang dianalisis dalam upaya pencapaian NZE oleh PT X mencerminkan pendekatan strategis berbasis efektivitas biaya dan dampak lingkungan. Aksi pertama adalah penambahan kapasitas solar panel (PV), yang terbukti sebagai strategi paling efisien secara ekonomi dan lingkungan. Dengan investasi awal sebesar Rp19,5 miliar, strategi ini mampu mengurangi emisi hingga 62.209 ton CO₂ ekuivalen (tCO₂e) dan memberikan potensi penghematan sebesar Rp53,5 miliar. Menariknya, strategi ini memiliki nilai *Marginal Abatement Cost* (MAC) sebesar -Rp860.094 per tCO₂e, yang menunjukkan keuntungan finansial karena nilai negatifnya berasal dari *cost saving* yang diperoleh, dengan estimasi balik modal dalam tiga tahun.

Strategi kedua adalah penggunaan *Renewable Energy Certificate* (REC), yang memberikan fleksibilitas dalam pelaporan emisi dan transisi ke energi bersih. Dengan biaya sebesar Rp1,33 miliar, strategi ini diproyeksikan mampu menurunkan emisi sebesar 36.195 tCO₂e. Diperoleh nilai MAC sebesar Rp36.679/tCO₂e menunjukkan bahwa strategi ini masih tergolong layak secara finansial, terutama sebagai solusi jangka menengah yang memungkinkan perusahaan menunjukkan komitmen keberlanjutan tanpa perlu membangun infrastruktur energi terbarukan sendiri.

Sementara itu, strategi ketiga adalah penggantian tipe refrigerant dan kendaraan operasional. Dengan total biaya Rp2,57 miliar, aksi ini dapat menurunkan emisi sebesar 976 tCO₂e, namun dengan MAC yang cukup tinggi, yakni Rp2.630.900/tCO₂e. Strategi ini berfokus pada pengurangan emisi langsung (scope 1) melalui konversi kendaraan berbahan bakar fosil ke mobil listrik dan penggunaan refrigerant yang ramah lingkungan. Meskipun memberikan kontribusi terhadap pengurangan emisi, dampaknya masih terbatas karena belum mencakup emisi tidak langsung (scope 2), sehingga kontribusinya terhadap pencapaian total target NZE relatif kecil dibanding strategi lainnya.

Urutan prioritas berdasarkan hasil MACC menempatkan penambahan PLTS sebagai strategi utama, disusul penggunaan REC, dan terakhir penggantian tipe refrigerant dan kendaraan listrik. Peningkatan ini menjadi dasar dalam pengisian kuesioner dan wawancara dengan lima stakeholder kunci: pimpinan PT X, karyawan PT X yang berposisi sebagai kepala seksi, dan perwakilan Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Bekasi. Kriteria responden mencakup pengalaman kerja dan posisi strategis dalam operasional maupun pengelolaan lingkungan. Melalui pendekatan MACC dan metode AHP, PT X dapat menyusun roadmap mitigasi emisi yang realistis, terukur, dan selaras dengan target *Net Zero Emissions* (NZE) 2050 secara strategis dan berbasis data.

Analisis Prioritas Strategi Aksi Mitigasi Emisi GRK PT X Menggunakan AHP

Dalam upaya mencapai target NZE 2050, PT X mengimplementasikan AHP untuk menentukan strategi mitigasi emisi GRK yang paling optimal. Metode AHP memungkinkan pengambilan keputusan berbasis kriteria yang kompleks, yaitu aspek lingkungan, teknis, dan finansial, berdasarkan kuesioner dan wawancara dari pimpinan, karyawan PT X, dan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bekasi.

Penelitian ini menganalisis tiga strategi utama mitigasi emisi GRK yang berpotensi diterapkan oleh PT X, yaitu penggunaan Renewable Energy Certificate (REC), penambahan kapasitas solar panel (*Photovoltaic/PV*), dan penggantian tipe refrigerant serta kendaraan operasional. Ketiga strategi tersebut dievaluasi melalui pendekatan *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, dengan mempertimbangkan tiga aspek penilaian utama, yakni lingkungan, teknis, dan finansial. Setiap strategi dibandingkan secara berpasangan berdasarkan ketiga aspek tersebut, kemudian dikonversikan ke dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan untuk menentukan bobot prioritas masing-masing strategi.

Hasil penilaian pada Level 2 yakni penilaian terhadap kriteria utama menunjukkan bahwa aspek lingkungan memperoleh bobot tertinggi sebesar 0,4878, disusul oleh aspek teknis sebesar 0,3154, dan aspek finansial sebesar 0,1968. Temuan ini mengindikasikan bahwa PT X lebih memfokuskan pengambilan keputusan mitigasi pada aspek pengurangan emisi yang selaras dengan roadmap SBTi. Selain itu, hasil pengukuran konsistensi penilaian dari seluruh responden menghasilkan rata-rata Consistency Ratio (CR) sebesar 0,0504, jauh di bawah batas toleransi standar 0,1. Nilai ini menunjukkan bahwa proses evaluasi telah dilakukan secara logis, stabil, dan dapat diterima secara metodologis, sehingga keputusan yang diambil bersifat valid dan dapat diandalkan dalam menyusun strategi mitigasi GRK perusahaan.

Hasil Pembobotan Prioritas Aksi Mitigasi

Tabel 2. Bobot Prioritas Strategi Aksi Mitigasi per Aspek

Strategi	Lingkungan Teknis Finansial		
Penggunaan REC	0,3374	0,7536	0,3598
Penambahan Kapasitas PV	0,5782	0,1239	0,5040
Penggantian Tipe Refrigerant & Kendaraan Operasional	0,0844	0,1225	0,1361

Pada Tabel 2 di atas menampilkan bobot prioritas masing-masing strategi aksi mitigasi emisi gas rumah kaca (GRK) berdasarkan tiga aspek penilaian utama, yaitu lingkungan, teknis, dan finansial. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa setiap strategi memiliki kekuatan yang berbeda tergantung pada aspek yang digunakan sebagai dasar evaluasi. Pada aspek lingkungan, strategi penambahan kapasitas solar panel (PV) memperoleh bobot tertinggi sebesar 0,5782, menunjukkan bahwa strategi ini dinilai paling efektif dalam mendukung upaya penurunan emisi GRK sesuai dengan target *Science Based Targets initiative (SBTi)*. Strategi penggunaan Renewable Energy Certificate (REC) berada di posisi kedua dengan bobot 0,3374, dan penggantian refrigerant dan kendaraan operasional menempati posisi terakhir dengan bobot 0,0844, yang menandakan kontribusinya terhadap pengurangan emisi dianggap paling rendah dalam konteks lingkungan.

Pada aspek teknis, penggunaan REC menjadi strategi paling unggul dengan bobot sangat tinggi sebesar 0,7536. Hal ini mengindikasikan bahwa strategi ini dinilai paling mudah diimplementasikan secara operasional, karena tidak memerlukan infrastruktur baru atau keahlian teknis tambahan. Sebaliknya, strategi PV dan penggantian refrigerant serta kendaraan operasional memperoleh bobot yang hampir sama dan jauh lebih rendah, masing-masing sebesar 0,1239 dan 0,1225. Ini menunjukkan bahwa kedua strategi tersebut dinilai memiliki tingkat kompleksitas teknis yang lebih tinggi.

Sementara itu, pada aspek finansial, penambahan kapasitas PV kembali menjadi strategi paling unggul dengan bobot 0,5040, yang berarti strategi ini dinilai paling efisien dari sisi biaya jangka panjang, terutama karena potensi penghematan energi. Strategi penggunaan REC menyusul dengan bobot 0,3598, masih tergolong layak secara finansial meskipun tidak memberikan penghematan langsung. Strategi penggantian refrigerant dan kendaraan operasional menempati posisi terakhir dengan bobot 0,1361, mencerminkan biaya implementasi yang relatif tinggi dibandingkan dengan manfaat emisi yang dihasilkan. Secara keseluruhan, tabel ini menunjukkan bahwa penambahan kapasitas PV lebih dominan dalam aspek lingkungan dan finansial, sedangkan penggunaan REC paling unggul secara teknis, menjadikannya pilihan paling praktis dalam jangka pendek. Sementara itu, strategi penggantian refrigerant dan kendaraan tetap penting untuk pengurangan emisi langsung (scope 1), namun kontribusinya relatif lebih kecil dibanding dua strategi lainnya.

Tabel 3. Total Bobot dan Peringkat Akhir Strategi Mitigasi

Strategi Aksi Mitigasi	Bobot Total Persentase Peringkat		
Penggunaan REC	0,4731	47,3%	1
Penambahan Kapasitas PV	0,4203	42,0%	2
Penggantian Tipe Refrigerant & Kendaraan Operasional	0,1066	10,7%	3

Pada Tabel 3 ini menyajikan hasil akhir dari proses penilaian prioritas strategi mitigasi emisi gas rumah kaca (GRK) yang dilakukan oleh PT X menggunakan pendekatan *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Tabel ini menunjukkan bobot total, persentase kontribusi, dan peringkat dari tiga strategi mitigasi yang dianalisis, yaitu penggunaan Renewable Energy Certificate (REC), penambahan kapasitas solar panel (PV), serta penggantian refrigerant dan kendaraan operasional. Hasil penilaian menunjukkan bahwa strategi penggunaan REC menempati peringkat pertama dengan bobot total sebesar 0,4731 atau setara dengan 47,3% dari keseluruhan preferensi. Hal ini mencerminkan bahwa strategi REC dinilai paling unggul secara keseluruhan, terutama karena kemudahannya dalam implementasi teknis dan kontribusinya dalam mengurangi emisi tidak langsung (scope 2) melalui transisi ke energi bersih tanpa memerlukan investasi infrastruktur yang besar.

Di posisi kedua, penambahan kapasitas PV memperoleh bobot total 0,4203 atau 42%. Meskipun selisihnya tidak terlalu jauh dari REC, strategi ini dinilai lebih tinggi dalam aspek lingkungan dan finansial. PV dinilai sangat efektif dalam mengurangi emisi secara langsung dan menghasilkan efisiensi biaya dalam jangka panjang, meskipun memerlukan investasi awal yang cukup besar dan kesiapan teknis yang lebih tinggi dibandingkan REC. Sementara itu, strategi penggantian refrigerant dan kendaraan operasional berada di posisi terakhir dengan bobot 0,1066 atau 10,7%. Meskipun strategi ini memiliki kontribusi terhadap pengurangan emisi langsung (scope 1), terutama dari refrigerant dengan Global Warming Potential (GWP) tinggi dan bahan bakar fosil, dampaknya terhadap keseluruhan target NZE relatif lebih kecil dan dinilai kurang unggul dibanding dua strategi lainnya. Secara keseluruhan, narasi dari tabel ini menunjukkan bahwa PT X lebih memprioritaskan strategi mitigasi berbasis energi terbarukan, baik melalui pembelian REC maupun pemanfaatan energi surya, sebagai upaya utama dalam mencapai target Net Zero Emissions 2050. Strategi ini tidak hanya dinilai efektif secara lingkungan, tetapi juga realistis secara teknis dan ekonomis.

Berdasarkan hasil analisis prioritas strategi mitigasi emisi GRK menggunakan metode AHP, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *Renewable Energy Certificate* (REC) menempati peringkat tertinggi. Strategi ini dinilai paling efektif karena memberikan kemudahan teknis dalam implementasi, fleksibilitas dalam pelaporan emisi, serta kontribusi signifikan terhadap penurunan emisi tidak langsung (scope 2). Selain itu, REC

memungkinkan perusahaan untuk bertransisi menuju penggunaan energi terbarukan tanpa harus melakukan investasi fisik besar.

Di posisi kedua, strategi penambahan kapasitas solar panel (Photovoltaic/PV) juga memperoleh prioritas tinggi. Strategi ini dinilai unggul dalam aspek lingkungan dan finansial, dengan potensi pengurangan emisi hingga 62.209 tCO_{2e} dan menghasilkan *cost saving* yang sangat signifikan, tercermin dari nilai MAC negatif sebesar -Rp860.094/tCO_{2e}. Hal ini menunjukkan bahwa selain berdampak besar terhadap pengurangan emisi, strategi PV juga efisien dari sisi biaya jangka panjang.

Sementara itu, strategi penggantian tipe refrigerant dan kendaraan operasional, meskipun berdampak positif terhadap emisi langsung (scope 1), menunjukkan kontribusi relatif kecil terhadap keseluruhan target dekarbonisasi perusahaan. Dengan bobot hanya 10,7%, strategi ini tetap penting namun bukan prioritas utama dibandingkan dua strategi lainnya yang lebih berdampak secara luas dan sistemik. Temuan ini sejalan dengan literatur ilmiah, seperti yang disampaikan oleh Fawzy et al. (2020) dan Sofia et al. (2020), yang menyatakan bahwa strategi berbasis energi terbarukan, seperti REC dan PV, merupakan solusi paling siap diterapkan dan paling berdampak dalam pengurangan emisi gas rumah kaca. Dengan demikian, PT X telah berada pada jalur strategi mitigasi yang tepat, seiring dengan tren global menuju transisi energi bersih dan keberlanjutan operasional.

KESIMPULAN

Implementasi program pengurangan emisi yang telah dilakukan PT X pada tahun 2024 dalam mencapai NZE 2050 terbukti telah berhasil menurunkan emisi GRK sebesar 440 tCO_{2e} dari kondisi BaU, namun program pengurangan emisi GRK yang telah dilakukan tersebut belum dapat sesuai dengan roadmap NZE 2050 SBTi near-term target. Emisi GRK aktual PT X sebesar 6.981 tCO_{2e} sedangkan roadmap SBTi pada tahun 2024 sebesar 6.925 tCO_{2e}. Selisih emisi GRK antara roadmap NZE 2050 SBTi dengan kondisi aktual pada tahun 2024 yaitu sebesar 56 tCO_{2e}.

Faktor perbaikan yang dapat dilakukan oleh PT X dalam mencapai target NZE SBTi, diantaranya yaitu optimalisasi konsumsi energi (scope 2) dan pengurangan emisi langsung (scope 1). Upaya dalam melakukan optimalisasi konsumsi energi (scope 2) dapat dilakukan dengan penggunaan energi listrik yang berasal dari energi baru terbarukan dengan detail rincian penggunaan 30% pada tahun 2025 hingga tahun 2027, 40% pada tahun 2028 hingga tahun 2029, 50% pada tahun 2030 hingga tahun 2031, 60% pada tahun 2032 hingga tahun 2033 dan 65% pada tahun 2034. Selain itu dapat menambah kapasitas PLTS (PV) terpasang dengan kapasitas 5.924 kWp pada tahun 2025. Sedangkan upaya dalam melakukan pengurangan emisi langsung (scope 1) dapat dilakukan dengan penggunaan tipe refrigerant yang lebih ramah lingkungan yaitu HFO-1234yf sebanyak 590 kg dan penggantian kendaraan listrik untuk kendaraan operasional sebanyak 6 mobil.

Berdasarkan pendekatan AHP prioritas pemilihan strategi aksi mitigasi secara berturut-turut untuk menurunkan tingkat emisi GRK dalam mencapai Net Zero Emissions 2050 sesuai dengan SBTi Near Term target yaitu pertama aksi mitigasi dengan Penggunaan Renewable Energy Certificate (REC) yang memiliki bobot akhir 47,3%, kedua aksi mitigasi dengan Penambahan Kapasitas PV yang memiliki bobot akhir 42%, dan aksi mitigasi yang terakhir yaitu Penggantian Tipe Refrigerant HFC-134a dengan Tipe Refrigerant HFO-1234yf dan Penggantian Kendaraan BBM dengan Listrik untuk Mobil Operasional Perusahaan dengan bobot akhir 10,7%.

REFERENSI

Dewan Energi Nasional. (2024). Indonesia Energy Transition Outlook 2024.
Direktorat Jenderal Pajak. (2021). Undang-Undang Nomor 7 Tahun 2021 tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan.

- Divisi PPR. (2024). Upaya PLN dalam mendukung transisi energi dan pertumbuhan PLTS Atap. Direktorat Ritel dan Niaga PLN.
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2069–2094.
- Hidayati, F. (2024). Langkah strategis mewujudkan target industri NZE 2050. Institute Essential Services Reform.
- Indonesia Research Institute for Decarbonization (IRID). 2024.
- Purwendah, E. K., Djatmiko, A., & Pudyastiwi, E. (2023). Problematika penegakan hukum lingkungan di Indonesia. *Jurnal Pacta Sunt Servanda*, 4, 110–119.
- Rachmatika, A., et al. (2022). Policy Brief Just Energy Transition Partnership (JETP) Indonesia.
- Rumambi, F. J. (2023). Dampak lingkungan terhadap kualitas pendidikan: Peran manajemen lingkungan berkelanjutan. *JMBA Jurnal Manajemen dan Bisnis*, 9(2), 10–19.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Science-Based Targets initiative. (2023). *SBTi Net Zero Standard Criteria: Corporate Manual Version 2.1*.
- IPCC. (2023). *Sixth Assessment Report 6 (AR6)*. Perserikatan Bangsa-Bangsa.
- Sofia, D., et al. (2020). Mitigation strategies for reducing air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 19226–19235.
- WRI Indonesia. (2021). *Menyusun target aksi iklim bagi perusahaan*.