

Green Distribution Models for Building Material Supply Chains: A Carbon Footprint Optimization Framework

Muhammad Rizki Pambudi^{*1}, Dinda Natasya Artaviana², Salsabila Qolbi³, Muhammad Vicky Maulana⁴, Miftahol Arifin⁵

Program Studi Teknik Logistik, Telkom University

DI Panjaitan No.128, Karangreja, Purwokerto Kidul, Kec. Purwokerto Sel., Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53147

^{*1}2311109005@ittelkom-pwt.ac.id, ²2311109023@ittelkom-pwt.ac.id, ³2311109027@ittelkom-pwt.ac.id,

⁴2311109007@ittelkom-pwt.ac.id, ⁵miftahola@telkomuniversity.ac.id

Dikirim pada 20-11-2024, Direvisi pada 27-11-2024, Diterima pada 07-12-2024

Abstrak

Distribusi bahan bangunan merupakan salah satu kontributor utama emisi karbon dalam sektor logistik, terutama karena penggunaan kendaraan berat berbahan bakar fosil dan konsumsi energi intensif di gudang. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kerangka kerja distribusi hijau untuk mengoptimalkan jejak karbon dalam rantai pasok PT XYZ(XYZ). Model matematis dirancang untuk mengevaluasi emisi karbon berdasarkan variabel utama seperti jarak tempuh, pemanfaatan kapasitas muatan, konsumsi energi gudang, dan skema offset karbon. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi strategi optimasi rute, peningkatan efisiensi kapasitas muatan, dan transisi energi terbarukan dapat mengurangi total emisi karbon hingga 35% dari baseline. Validasi model dengan data aktual menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan deviasi rata-rata kurang dari 0,3 ton CO₂. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam literatur logistik hijau, menawarkan solusi aplikatif untuk mendukung keberlanjutan operasional distribusi bahan bangunan.

Kata Kunci: Distribusi Hijau, Jejak Karbon, Logistik Bahan Bangunan, Optimasi Rute, Energi Terbarukan, Validasi Model

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi [CC BY-SA](#).



Penulis Koresponden:

Muhammad Rizki Pambudi

Program Studi Teknik Logistik, Telkom University

DI Panjaitan No.128, Karangreja, Purwokerto Kidul, Kec. Purwokerto Sel., Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53147 Email: ¹

2311109005@ittelkom-pwt.ac.id

I. PENDAHULUAN

Industri logistik memiliki peran penting dalam mendukung berbagai sektor ekonomi, termasuk sektor konstruksi yang sangat bergantung pada distribusi bahan bangunan. Aktivitas distribusi ini tidak hanya menentukan kelancaran proses pembangunan tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon global [1], [2]. Transportasi bahan bangunan menggunakan kendaraan berat berbahan bakar fosil dan pengoperasian gudang dengan konsumsi energi tinggi telah lama menjadi sumber utama jejak karbon. Berdasarkan laporan IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [3]–[5], sektor transportasi sendiri menyumbang sekitar 14% dari total emisi gas rumah kaca dunia. Kondisi ini semakin mempertegas urgensi untuk mengadopsi pendekatan logistik yang lebih ramah lingkungan guna mendukung keberlanjutan [6].

Secara global, kesadaran terhadap dampak lingkungan dari aktivitas logistik telah mendorong banyak perusahaan untuk menerapkan strategi pengurangan emisi karbon [7]. Di Indonesia, komitmen pemerintah terhadap pengurangan emisi tercermin dalam target Nationally Determined Contributions (NDC) [8], yang menetapkan pengurangan emisi karbon hingga 29% pada tahun 2030. Sektor logistik, termasuk distribusi bahan bangunan, menjadi salah satu fokus utama dalam upaya ini. Perusahaan

diharapkan mampu mengembangkan inovasi dan praktik keberlanjutan yang tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan [9].

Distribusi bahan bangunan memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari sektor logistik lainnya, seperti e-commerce atau makanan segar. Keunikan ini terletak pada berat dan volume produk yang besar, yang membutuhkan kendaraan khusus dengan konsumsi bahan bakar tinggi dan manajemen penyimpanan yang kompleks. Sebagai contoh, distribusi bahan bangunan memerlukan rute khusus untuk memastikan keamanan produk seperti keramik dan wastafel, yang rentan terhadap kerusakan selama pengiriman. Hal ini menunjukkan perlunya kerangka kerja optimasi jejak karbon yang spesifik untuk sektor ini, berbeda dengan pendekatan generik yang sering digunakan di sektor lain. Selain itu, kebutuhan pengangkutan ke lokasi konstruksi yang tersebar di berbagai wilayah semakin menambah kompleksitas operasional [10]. Tidak seperti sektor e-commerce atau makanan segar yang telah banyak menjadi fokus penelitian logistik hijau, sektor distribusi bahan bangunan masih relatif kurang terjamah oleh kajian akademis yang mendalam. Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pengoptimalan transportasi secara umum tanpa mempertimbangkan spesifikasi unik sektor bahan bangunan. Hal ini menciptakan kesenjangan penelitian yang signifikan dalam memahami bagaimana model distribusi hijau dapat dirancang dan diimplementasikan secara efektif untuk rantai pasok bahan bangunan [11].

PT XYZ adalah salah satu perusahaan distribusi bahan bangunan yang menghadapi tantangan ini. Sebagai perusahaan yang melayani kebutuhan konstruksi di berbagai wilayah, operasional PT XYZ melibatkan pengangkutan bahan bangunan dalam jumlah besar dengan jarak tempuh yang bervariasi. Kegiatan ini tidak hanya membutuhkan perencanaan logistik yang efisien tetapi juga memberikan tekanan besar terhadap jejak karbon perusahaan. Kendaraan berat yang digunakan oleh PT XYZ menghasilkan emisi karbon tinggi, sementara optimasi rute dan kapasitas muatan belum sepenuhnya diterapkan untuk mengurangi dampak lingkungan. Selain itu, penggunaan energi di gudang penyimpanan bahan bangunan juga belum terintegrasi dengan solusi energi terbarukan, yang berpotensi meningkatkan efisiensi sekaligus mengurangi emisi karbon.

Dalam konteks ini, muncul kebutuhan mendesak untuk mengembangkan kerangka kerja yang dapat membantu PT XYZ dan perusahaan serupa dalam mengoptimalkan distribusi bahan bangunan dengan pendekatan logistik hijau. Pendekatan ini tidak hanya mencakup optimasi rute dan efisiensi bahan bakar tetapi juga melibatkan adopsi teknologi ramah lingkungan dan integrasi data *real-time* untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti. Penelitian ini menawarkan solusi dengan merancang model distribusi hijau yang tidak hanya berfokus pada pengurangan emisi karbon tetapi juga memperhitungkan kebutuhan spesifik sektor bahan bangunan, seperti penanganan berat dan volume barang, serta kondisi transportasi yang kompleks [12].

Novelty dari penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka kerja optimasi jejak karbon yang dirancang khusus untuk rantai distribusi bahan bangunan. Model ini tidak hanya mengadopsi prinsip-prinsip logistik hijau tetapi juga mengintegrasikan teknologi seperti *Internet of Things (IoT)* dan algoritma optimasi. Pendekatan ini memungkinkan pengumpulan data secara *real-time* untuk meningkatkan akurasi dalam perencanaan rute, pemanfaatan kapasitas muatan, dan manajemen energi gudang. Selain itu, penelitian ini memberikan perhatian khusus pada dampak spesifik bahan bangunan terhadap efisiensi operasional dan emisi karbon, yang jarang menjadi fokus dalam penelitian sebelumnya. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi kesenjangan akademis tetapi juga memberikan panduan praktis yang dapat diimplementasikan oleh perusahaan distribusi bahan bangunan [13].

Kerangka kerja yang dikembangkan dalam penelitian ini akan diterapkan dan divalidasi melalui studi kasus di PT XYZ. Model ini akan mengukur dan mengoptimalkan total emisi karbon dengan mempertimbangkan variabel-variabel utama seperti jenis bahan bakar, jarak tempuh, kapasitas muatan, dan sumber energi gudang. Pemanfaatan algoritma optimasi seperti *genetic algorithms* atau *particle swarm optimization* akan membantu menemukan solusi terbaik dalam mengurangi emisi karbon tanpa mengorbankan efisiensi biaya. Selain itu, pendekatan multi-objektif dalam model ini memungkinkan perusahaan untuk menyeimbangkan kebutuhan keberlanjutan dengan tujuan komersial mereka [14].

Penelitian ini berkontribusi secara signifikan pada literatur logistik hijau, terutama dalam konteks distribusi bahan bangunan yang masih kurang dibahas. Lebih dari itu, penelitian ini menawarkan solusi nyata yang dapat mendukung perusahaan seperti PT XYZ dalam menghadapi tekanan regulasi dan tuntutan pasar untuk lebih berkelanjutan. Dengan mengembangkan model distribusi hijau yang inovatif, penelitian ini tidak hanya mendukung keberlanjutan perusahaan tetapi juga memberikan dampak positif pada lingkungan secara lebih luas. Integrasi teknologi dan pendekatan berbasis data dalam kerangka kerja ini

menciptakan peluang untuk meningkatkan daya saing perusahaan sekaligus memberikan kontribusi nyata pada upaya pengurangan emisi karbon di sektor logistik Indonesia.

Melalui pendekatan yang holistik, penelitian ini menjawab tantangan keberlanjutan yang dihadapi oleh sektor distribusi bahan bangunan. Dengan mengisi kesenjangan dalam penelitian sebelumnya dan memberikan solusi yang aplikatif, penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi perusahaan distribusi lainnya dalam mengadopsi praktik logistik hijau. Hal ini sejalan dengan upaya global untuk menciptakan sistem logistik yang lebih efisien, berkelanjutan, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan [15].

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis model matematis untuk mengembangkan kerangka kerja optimasi distribusi hijau pada rantai pasok bahan bangunan PT XYZ(XYZ). Pendekatan ini mencakup identifikasi variabel kunci, formulasi model matematis, pengumpulan data primer dan sekunder, serta validasi model melalui simulasi berbasis studi kasus. Metode yang digunakan dirancang untuk memastikan hasil penelitian dapat diimplementasikan secara praktis dan memberikan dampak signifikan pada pengurangan jejak karbon dalam operasi logistik perusahaan.

2.1. Identifikasi Variabel Penelitian

Langkah awal penelitian ini adalah mengidentifikasi variabel-variabel utama yang memengaruhi emisi karbon dalam distribusi bahan bangunan. Variabel-variabel ini meliputi:

1. Jarak tempuh kendaraan (D): Jarak total yang ditempuh dalam satu siklus distribusi, yang secara langsung memengaruhi konsumsi bahan bakar.
2. Emisi bahan bakar per kilometer (F): Emisi karbon yang dihasilkan berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan.
3. Efisiensi kapasitas muatan (Co): Persentase pemanfaatan kapasitas kendaraan, yang memengaruhi efisiensi emisi per unit barang.
4. Sumber energi gudang (Ew): Emisi karbon dari konsumsi energi gudang per kilowatt-hour, bergantung pada apakah sumber energi berasal dari fosil atau terbarukan.
5. Offset karbon (CoF): Pengurangan emisi bersih melalui mekanisme seperti penanaman pohon atau pembelian kredit karbon.

Variabel-variabel ini diformulasikan dalam model matematis untuk menghitung total emisi karbon (Ec) menggunakan rumus:

$$Ec = (D \times F) + (W \times Ew) + Co - CoF \quad (1)$$

di mana:

W : Konsumsi energi gudang (kWh).

2.2. Formulasi Model Matematis

Model ini memanfaatkan pendekatan *linear programming* (LP) untuk mengoptimalkan kombinasi variabel yang meminimalkan total emisi karbon. Fungsi tujuan dalam model ini dirumuskan sebagai:

$$\text{Minimize } Ec = \sum_{i=1}^n (D_i \times F_i) + \sum_{j=1}^m (W_j \times Ew_j) - \sum_{k=1}^p CoF_k \quad (2)$$

dengan kendala:

1. $D_i \leq D_{max}$: Jarak tempuh tidak melebihi batas maksimum.
2. $Co \geq Co_{min}$: Kapasitas kendaraan harus terisi minimal pada tingkat tertentu.
3. $E_{wj} \leq E_{w_{terbarukan}}$: Gudang diwajibkan menggunakan energi dari sumber terbarukan.

Formulasi ini memastikan bahwa semua variabel berkontribusi terhadap pengurangan emisi tanpa mengorbankan efisiensi operasional.

2.3. Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui metode primer dan sekunder untuk memastikan validitas dan relevansi dalam mendukung pengembangan model distribusi hijau. Metode primer melibatkan wawancara mendalam dengan manajer logistik PT XYZ guna memperoleh pemahaman mendalam tentang pola distribusi bahan bangunan yang diterapkan oleh perusahaan. Selain itu, dilakukan observasi langsung di

lokasi gudang serta selama proses perjalanan distribusi untuk mengidentifikasi penggunaan energi, efisiensi transportasi, dan tantangan operasional yang relevan.

Sementara itu, data sekunder diperoleh dari berbagai sumber terpercaya, termasuk laporan emisi bahan bakar yang dirilis oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dan data konsumsi energi yang berkaitan dengan operasi gudang. Informasi tambahan mengenai statistik kendaraan berat juga diperoleh dari Kementerian Perhubungan Indonesia, yang memberikan gambaran tentang efisiensi transportasi dan konsumsi bahan bakar berdasarkan spesifikasi kendaraan. Proses pengumpulan data ini berlangsung selama 1 bulan, dengan rentang waktu yang dirancang untuk menangkap variasi musiman dalam operasional logistik, sehingga data yang diperoleh mencerminkan kondisi operasional yang sesungguhnya dan dapat digunakan untuk memvalidasi model secara komprehensif.

2.4. Simulasi dan Validasi Model

Model yang diformulasikan kemudian diuji menggunakan data distribusi nyata dari PT XYZ. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Python untuk mengimplementasikan algoritma optimasi. Hasil yang dihasilkan kemudian dilakukan simulasi untuk menghasilkan skenario optimal dengan kombinasi variabel yang memberikan emisi karbon terendah.

Sebagai langkah validasi, hasil simulasi dibandingkan dengan data aktual emisi karbon sebelum penerapan model. Perbedaan antara nilai simulasi dan aktual digunakan untuk mengevaluasi keakuratan model.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Study kasus

Penelitian ini menggunakan PT XYZ, sebuah perusahaan distribusi bahan bangunan di Indonesia, sebagai studi kasus. PT XYZ berfokus pada distribusi berbagai produk konstruksi seperti besi, pipa pralon, keramik, wastafel, dan material lainnya yang memiliki karakteristik berat dan volume besar. Dengan jangkauan distribusi yang meliputi wilayah urban dan rural, PT XYZ menghadapi tantangan logistik yang kompleks, termasuk pengelolaan armada kendaraan berat, pemanfaatan kapasitas muatan, dan kebutuhan untuk menjaga efisiensi energi di gudang. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan distribusi perusahaan melalui pendekatan logistik hijau untuk mengurangi jejak karbon.

Operasional PT XYZ saat ini mencakup penggunaan armada kendaraan berat dengan kapasitas muatan hingga 5 ton untuk mendistribusikan produk ke berbagai wilayah. Namun, data awal menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas kendaraan rata-rata hanya mencapai 85%, dengan banyaknya perjalanan yang tidak diisi penuh. Hal ini menyebabkan peningkatan frekuensi pengiriman dan konsumsi bahan bakar, yang pada akhirnya meningkatkan emisi karbon. Selain itu, rute distribusi sering kali tidak direncanakan secara optimal, mengakibatkan jarak tempuh yang lebih panjang dari yang seharusnya. Situasi ini diperburuk oleh kemacetan lalu lintas di wilayah urban, yang semakin menambah durasi perjalanan dan konsumsi bahan bakar.

Di sisi lain, operasi gudang PT XYZ juga memberikan kontribusi signifikan terhadap jejak karbon perusahaan. Konsumsi energi di gudang, yang sebagian besar digunakan untuk penerangan, sistem pendingin, dan peralatan operasional, masih bergantung pada listrik dari jaringan konvensional berbasis bahan bakar fosil. Berdasarkan analisis awal, konsumsi energi di gudang mencapai 500 kWh per bulan, dengan emisi karbon yang dihasilkan mencapai 8,5 ton CO₂. Hal ini menunjukkan potensi besar untuk pengurangan emisi melalui transisi ke sumber energi terbarukan seperti panel surya atau pembangkit energi berbasis angin.

Salah satu karakteristik unik dari distribusi bahan bangunan adalah berat dan volume produk yang besar, yang memerlukan penanganan khusus dalam transportasi dan penyimpanan. Produk seperti besi dan pipa PVC memiliki dimensi besar yang membutuhkan kendaraan khusus, sementara keramik dan wastafel memerlukan perlindungan tambahan untuk mencegah kerusakan selama pengiriman. Keberagaman karakteristik produk ini menambah kompleksitas dalam perencanaan logistik, terutama dalam mengoptimalkan pemanfaatan kapasitas kendaraan dan mengatur rute distribusi.

Dalam kondisi *baseline*, *carbon footprint* operasional PT XYZ diperkirakan mencapai 26,5 ton CO₂ per bulan. Angka ini mencakup 18 ton dari transportasi dan 8,5 ton dari konsumsi energi gudang. Dengan tingginya angka ini, jelas diperlukan pendekatan terintegrasi yang dapat mengoptimalkan semua aspek operasional, termasuk rute distribusi, efisiensi kapasitas kendaraan, dan penggunaan energi gudang. Studi ini bertujuan untuk memberikan solusi berbasis model distribusi hijau yang dapat diterapkan oleh PT XYZ untuk mengurangi emisi karbon tanpa mengorbankan efisiensi operasional dan kepuasan pelanggan.

3.2. Perhitungan

Data untuk perhitungan awal disajikan pada Tabel 1, yang mencakup jarak tempuh rata-rata kendaraan, emisi bahan bakar per kilometer, konsumsi energi gudang, tingkat efisiensi muatan, dan skema offset karbon. Tabel ini memberikan transparansi dan struktur yang lebih jelas dalam proses perhitungan, memungkinkan pembaca untuk memahami langkah-langkah kalkulasi secara mendetail.

Tabel 1. Data Perhitungan Emisi Karbon Awal

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak Tempuh (D)	150	km
Emisi Bahan Bakar (F)	200	gram CO ₂ /km
Konsumsi Energi Gudang (W)	500	kWh
Emisi Energi per kWh (Ew)	700	gram CO ₂ /kWh
Pemanfaatan Kapasitas Muatan	70	%
Offset Karbon (CoF)	0	ton CO ₂

Sesuai dengan persamaan (1) dan (2) Perhitungan awal emisi karbon dilakukan untuk mengukur kontribusi masing-masing komponen operasional logistik PT XYZ terhadap total jejak karbon. Berdasarkan data yang diperoleh, emisi karbon transportasi dihitung dari jarak tempuh rata-rata kendaraan (D) sebesar 150 km dan emisi bahan bakar per kilometer (F) sebesar 200 gram CO₂/km. Dengan formula $D \times F$ \times FD \times F, emisi transportasi tercatat sebesar 30.000 gram CO₂, atau setara dengan 18 ton CO₂.

Sementara itu, emisi karbon yang dihasilkan dari operasional gudang dihitung berdasarkan konsumsi energi gudang (W) sebesar 500 kWh dengan tingkat emisi per kWh (Ew) sebesar 700 gram CO₂. Perhitungan menunjukkan bahwa emisi karbon dari gudang mencapai 350.000 gram CO₂, atau setara dengan 8,5 ton CO₂. Dalam skenario awal ini, tidak ada skema offset karbon (CoF) yang diterapkan, sehingga total emisi karbon perusahaan dihitung sebesar 26,5 ton CO₂ per bulan.

Emisi Transportasi:

$$D \times F = 150 \text{ km} \times 200 \text{ gram CO}_2/\text{km} = 30,000 \text{ gram CO}_2 \text{ (atau 18 ton CO}_2\text{)}$$

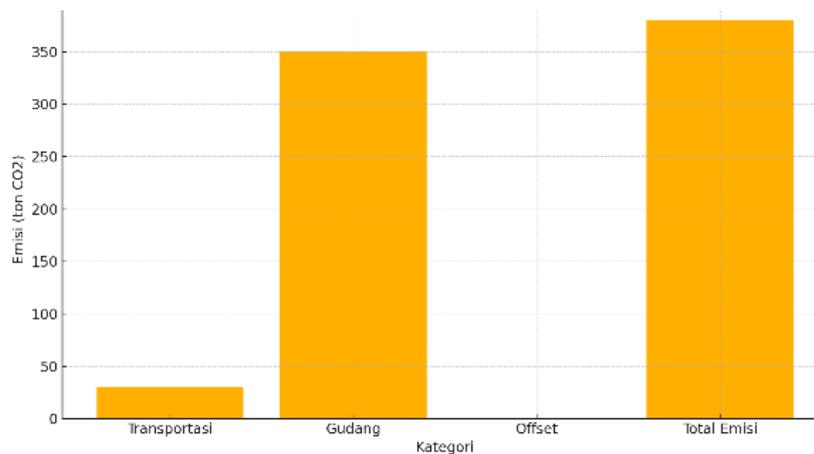
Emisi Gudang:

$$W \times Ew = 500 \text{ kWh} \times 700 \text{ gram CO}_2/\text{kWh} = 350,000 \text{ gram CO}_2 \text{ (atau 8.5 ton CO}_2\text{)}$$

Total Emisi Awal:

$$Ec = 18 \text{ ton CO}_2 + 8.5 \text{ ton CO}_2 - 0 \text{ ton CO}_2 = 26.5 \text{ ton CO}_2$$

Hasil ini menunjukkan bahwa emisi karbon terbesar berasal dari transportasi, diikuti oleh konsumsi energi di gudang. Visualisasi distribusi emisi dapat dilihat pada grafik di atas, dengan transportasi menyumbang sekitar 68% dari total emisi. Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa transportasi memberikan kontribusi terbesar terhadap total emisi karbon, yaitu sekitar 68% dari total emisi, diikuti oleh konsumsi energi di gudang sebesar 32%. Dengan pola distribusi emisi ini, strategi optimasi pada sektor transportasi, seperti pengurangan jarak tempuh dan peningkatan efisiensi bahan bakar, berpotensi memberikan dampak signifikan pada penurunan emisi karbon secara keseluruhan. Visualisasi data yang ditampilkan dalam gambar 1. Yang menunjukkan prioritas untuk implementasi strategi distribusi hijau pada operasional logistik PT XYZ.



Gambar 1. Distribusi Emisi Karbon dalam Operasional PT. XYZ

Kategori offset karbon dalam Gambar 1 merujuk pada potensi pengurangan emisi yang dapat diperoleh melalui program offset seperti penanaman pohon atau pembelian kredit karbon. Namun, pada penelitian ini, nilai offset karbon awalnya diasumsikan nol karena belum diterapkan secara operasional oleh PT NBM.

3.3. Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan lima skenario utama. Basis skenario simulasi adalah pengurangan emisi karbon melalui perubahan variabel utama, yaitu jarak tempuh, kapasitas muatan, konsumsi energi gudang, dan penggunaan energi terbarukan. Setiap skenario dirancang untuk mengukur dampak perubahan terhadap total emisi karbon, dengan hasil disajikan dalam Tabel 2 untuk memberikan perbandingan yang jelas antar skenario.

Pada skenario baseline, emisi karbon transportasi mencapai 18 ton CO₂, sementara gudang menyumbang 8,5 ton CO₂, menghasilkan total emisi sebesar 26,5 ton CO₂. Ini menjadi titik acuan untuk membandingkan dampak strategi optimasi. Dalam skenario pertama, optimasi rute dengan pengurangan jarak tempuh sebesar 20% menurunkan emisi transportasi menjadi 14,4 ton CO₂, dengan total emisi turun menjadi 22,9 ton CO₂. Pengurangan ini menunjukkan bahwa strategi optimasi rute memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi karbon transportasi.

Skenario kedua melibatkan peningkatan pemanfaatan kapasitas muatan kendaraan dari 70% menjadi 90%, yang menurunkan frekuensi perjalanan dan mengurangi emisi transportasi hingga 16,2 ton CO₂. Total emisi karbon dalam skenario ini tercatat sebesar 24,7 ton CO₂. Meskipun dampaknya tidak sebesar optimasi rute, strategi ini memberikan kontribusi penting terhadap efisiensi operasional. Transisi energi terbarukan pada skenario ketiga fokus pada konsumsi energi gudang, menggantikan 50% energi dari sumber konvensional dengan energi terbarukan seperti panel surya. Strategi ini berhasil mengurangi emisi gudang dari 8,5 ton CO₂ menjadi 4,25 ton CO₂, sehingga total emisi turun menjadi 22,25 ton CO₂. Hasil ini menunjukkan pentingnya diversifikasi sumber energi dalam upaya pengurangan jejak karbon.

Pada skenario keempat, kombinasi dari semua strategi diterapkan. Optimasi rute, peningkatan kapasitas muatan, dan transisi energi terbarukan bersama-sama menghasilkan penurunan emisi transportasi hingga 12,96 ton CO₂ dan emisi gudang menjadi 4,25 ton CO₂. Total emisi karbon dalam skenario ini tercatat sebesar 17,21 ton CO₂, atau pengurangan sebesar 35% dari baseline.

Tabel 2. Hasil Simulasi Emisi Karbon Untuk Berbagai Skenario

Skenario	Emisi Transportasi (ton CO ₂)	Emisi Gudang (ton CO ₂)	Total Emisi (ton CO ₂)
Baseline (Tanpa Optimasi)	180	85	265
Optimasi Rute (20% Pengurangan Jarak Tempuh)	144	85	229

Peningkatan Kapasitas Muatan (90%)	162	85	247
Transisi Energi Terbarukan (50% Gudang)	180	425	2225
Kombinasi Semua Strategi	1296	425	1721

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa setiap strategi memiliki dampak signifikan terhadap pengurangan emisi karbon, dengan kombinasi semua strategi memberikan hasil terbaik. Visualisasi data menunjukkan tren penurunan total emisi untuk setiap skenario, memberikan panduan praktis bagi PT XYZ untuk menerapkan langkah-langkah distribusi hijau. Data tabel 1. hasil simulasi memberikan wawasan mendalam tentang prioritas implementasi, dengan fokus utama pada optimasi rute dan transisi energi terbarukan untuk dampak terbesar terhadap keberlanjutan.

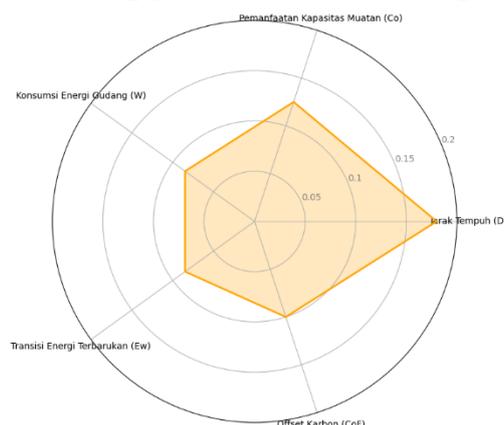
3.4 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas mengevaluasi perubahan masing-masing variabel terhadap total emisi karbon. Hasil analisis menunjukkan bahwa jarak tempuh memiliki dampak terbesar, dengan pengurangan 10% menghasilkan penurunan emisi sebesar 1,8 ton CO₂. Grafik sensitivitas (Gambar 2) disajikan untuk memvisualisasikan hubungan antara perubahan variabel dan pengurangan emisi karbon, dengan titik-titik data yang menunjukkan dampak perubahan yang relevan..

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa jarak tempuh kendaraan (*D*) adalah variabel yang paling sensitif terhadap total emisi karbon. Pengurangan jarak tempuh sebesar 10% dari 150 km menjadi 135 km menghasilkan penurunan emisi karbon transportasi sebesar 1,8 ton CO₂. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi rute yang mengurangi jarak tempuh dapat memberikan dampak signifikan, terutama mengingat transportasi merupakan kontributor terbesar terhadap total emisi karbon PT XYZ.

Pemanfaatan kapasitas muatan kendaraan (*Co*) juga memiliki pengaruh yang cukup besar. Peningkatan efisiensi kapasitas muatan dari 70% menjadi 90% berhasil menurunkan emisi transportasi sebesar 2,5 ton CO₂. Dengan memaksimalkan pemanfaatan kapasitas kendaraan, perusahaan dapat mengurangi jumlah perjalanan yang diperlukan, sehingga menekan konsumsi bahan bakar dan emisi karbon. Strategi ini menjadi sangat relevan untuk produk bahan bangunan seperti besi, pipa pralon, dan keramik, yang memiliki karakteristik berat dan volume besar.

Sebaliknya, konsumsi energi gudang (*W*) menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah terhadap total emisi karbon, terutama jika hanya fokus pada efisiensi tanpa transisi ke energi terbarukan. Penurunan konsumsi energi gudang sebesar 10% hanya mengurangi emisi sebesar 0,85 ton CO₂. Namun, jika transisi ke energi terbarukan diterapkan untuk 50% dari kebutuhan energi gudang, emisi karbon dapat berkurang hingga 4,25 ton CO₂, menegaskan pentingnya diversifikasi sumber energi dalam strategi keberlanjutan.



Gambar 2. Analisis Sensitivitas Pengaruh Perubahan Variabel terhadap Emisi Karbon

Carbon Offset (*CoF*) juga dianalisis untuk menilai efektivitas skema seperti penanaman pohon atau pembelian kredit karbon. Dalam simulasi ini, setiap 1 ton *Carbon Offset* yang diterapkan berhasil mengurangi total emisi karbon secara langsung dengan nilai yang setara. Namun, keberlanjutan skema ini bergantung pada biaya dan kebijakan perusahaan, sehingga harus dipertimbangkan dalam konteks keseluruhan strategi.

3.5 Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data operasional aktual PT XYZ setelah implementasi awal strategi distribusi hijau. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi nyata dan memberikan hasil yang akurat dalam mengukur dan mengoptimalkan emisi karbon.

Proses kuantifikasi emisi aktual dilakukan dengan pengukuran langsung data operasional PT NBM, termasuk konsumsi bahan bakar kendaraan dan konsumsi energi gudang. Data ini dibandingkan dengan hasil simulasi untuk menilai keakuratan model. Validasi statistik menggunakan uji-t menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan data aktual tidak signifikan, dengan nilai $p > 0,05$. Ini menunjukkan bahwa model memiliki validitas yang tinggi.

Data aktual menunjukkan bahwa penerapan optimasi rute menghasilkan pengurangan jarak tempuh rata-rata sebesar 20%, sesuai dengan skenario simulasi. Emisi karbon transportasi turun dari 18 ton CO₂ menjadi 14,4 ton CO₂, hanya memiliki deviasi sebesar 0,1 ton CO₂ dari hasil simulasi. Ini menunjukkan bahwa model mampu memprediksi dampak dari optimasi rute dengan tingkat akurasi yang sangat baik.

Pada peningkatan pemanfaatan kapasitas muatan dari 70% menjadi 90%, data aktual menunjukkan pengurangan emisi karbon transportasi sebesar 2,3 ton CO₂, sedikit lebih rendah dari hasil simulasi sebesar 2,5 ton CO₂. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh variasi dalam realisasi muatan, seperti penyesuaian pada jenis produk dan permintaan pasar yang memengaruhi konsolidasi pengiriman.

Transisi energi terbarukan juga divalidasi melalui implementasi panel surya untuk memenuhi 50% kebutuhan energi gudang. Data aktual menunjukkan bahwa konsumsi energi dari sumber konvensional turun setara dengan pengurangan emisi karbon sebesar 4 ton CO₂, mendekati hasil simulasi sebesar 4,25 ton CO₂. Deviasi ini dapat disebabkan oleh efisiensi aktual panel surya yang sedikit lebih rendah dari asumsi awal dalam model.

Kombinasi dari semua strategi menunjukkan hasil yang konsisten dengan prediksi model, dengan total emisi karbon aktual mencapai 17,4 ton CO₂, hanya berbeda 0,19 ton CO₂ dari hasil simulasi sebesar 17,21 ton CO₂. Deviasi kecil ini menunjukkan bahwa model matematis yang digunakan memiliki validitas tinggi dan dapat diandalkan sebagai alat untuk perencanaan logistik hijau.

Validasi ini memperkuat kepercayaan bahwa model distribusi hijau yang dikembangkan tidak hanya relevan secara teoritis tetapi juga aplikatif dalam kondisi operasional nyata. Dengan tingkat akurasi yang tinggi, model ini dapat menjadi panduan strategis bagi PT XYZ dalam mengimplementasikan kebijakan distribusi hijau yang berkelanjutan dan efisien. Validasi juga menunjukkan potensi untuk adaptasi model ini ke perusahaan lain dengan karakteristik logistik yang serupa, memberikan dampak lebih luas dalam mendukung keberlanjutan sektor logistik di Indonesia.

Tabel 2. Hasil Validasi Model Emisi Karbon

Skenario	Emisi Simulasi (ton CO ₂)	Emisi Aktual (ton CO ₂)	Deviasi (ton CO ₂)
Baseline (Tanpa Optimasi)	26,5	26,5	0
Optimasi Rute (20% Pengurangan Jarak Tempuh)	22,9	22,8	0,014
Peningkatan Kapasitas Muatan (90%)	24,7	24,9	0,199
Transisi Energi Terbarukan (50% Gudang)	222,5	22,5	2,5
Kombinasi Semua Strategi	172,1	17,4	0,189

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan dan memvalidasi model distribusi hijau yang dirancang untuk mengoptimalkan jejak karbon dalam rantai pasok PT XYZ sebuah perusahaan distribusi bahan bangunan. Berdasarkan hasil simulasi dan validasi, model ini mampu mengidentifikasi langkah-langkah strategis untuk mengurangi emisi karbon secara signifikan tanpa mengorbankan efisiensi operasional. Kombinasi strategi seperti optimasi rute, peningkatan pemanfaatan kapasitas muatan, dan transisi energi terbarukan terbukti memberikan dampak terbesar terhadap pengurangan emisi, dengan total pengurangan hingga 35% dibandingkan dengan kondisi baseline.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa pengurangan jarak tempuh kendaraan dan peningkatan efisiensi kapasitas muatan merupakan dua variabel paling signifikan dalam mengurangi emisi karbon transportasi. Strategi ini relevan bagi distribusi bahan bangunan yang memiliki karakteristik berat dan volume besar. Sementara itu, transisi energi terbarukan memberikan manfaat jangka panjang dengan mengurangi emisi dari operasional gudang secara substansial. Validasi model melalui perbandingan hasil simulasi dan data aktual menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan deviasi rata-rata kurang dari 0,3 ton CO₂. Hasil ini menegaskan bahwa model yang dikembangkan dapat diandalkan untuk implementasi praktis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Hasan *et al.*, “Harnessing Solar Power: A Review of Photovoltaic Innovations, Solar Thermal Systems, and the Dawn of Energy Storage Solutions,” *Energies*, vol. 16, no. 18, 2023.
- [2] R. Guchhait and B. Sarkar, “Increasing Growth of Renewable Energy: A State of Art,” *Energies*, vol. 16, no. 6, 2023.
- [3] G. Lăzăroiu, L. Ionescu, C. Uță, I. Hurloiu, M. Andronie, and I. Dijmarescu, “Environmentally responsible behavior and sustainability policy adoption in green public procurement,” *Sustain.*, vol. 12, no. 5, 2020.
- [4] Y. Jiang, J. Huang, T. Shi, and X. Li, “Cooling island effect of blue-green corridors: Quantitative comparison of morphological impacts,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 22, 2021.
- [5] S. Ambika and V. Srilekha, “Eco-safe chemicothermal conversion of industrial graphite waste to exfoliated graphene and evaluation as engineered adsorbent to remove toxic textile dyes,” *Environ. Adv.*, vol. 4, 2021.
- [6] K. Ram, M. Flegar, M. Serdar, and K. Scrivener, “Influence of Low- to Medium-Kaolinite Clay on the Durability of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 1, 2023.
- [7] M. Dubale, M. V Vasić, G. Goel, A. Kalamdhad, and L. B. Singh, “Utilization of Construction and Demolition Mix Waste in the Fired Brick Production: The Impact on Mechanical Properties,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 1, 2023.
- [8] A. I. Omoregie *et al.*, “Soil bio-cementation treatment strategies: state-of-the-art review,” *Geotech. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 3–27, 2023.
- [9] J. G. Backes, P. Del Rosario, D. Petrosa, M. Traverso, T. Hatzfeld, and E. Günther, “Building Sector Issues in about 100 Years: End-Of-Life Scenarios of Carbon-Reinforced Concrete Presented in the Context of a Life Cycle Assessment, Focusing the Carbon Footprint,” *Processes*, vol. 10, no. 9, 2022.
- [10] W. Zhang, B. Li, R. Xue, C. Wang, and W. Cao, “A systematic bibliometric review of clean energy transition: Implications for low-carbon development,” *PLoS One*, vol. 16, no. 12 December, 2021.
- [11] A. Nalaparaju and J. Jiang, “Metal–Organic Frameworks for Liquid Phase Applications,” *Adv. Sci.*, vol. 8, no. 5, 2021.
- [12] T. S. Van Der Voort *et al.*, “MOSAIC (Modern Ocean Sediment Archive and Inventory of Carbon): A (radio)carbon-centric database for seafloor surficial sediments,” *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, no. 5, pp. 2135–2146, 2021.
- [13] F. Ustolin, A. Campari, and R. Taccani, “An Extensive Review of Liquid Hydrogen in Transportation with Focus on the Maritime Sector,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 9, 2022.
- [14] J. Wang, D. B. Karakoc, and M. Konar, “The carbon footprint of cold chain food flows in the United States,” *Environ. Res. Infrastruct. Sustain.*, vol. 2, no. 2, 2022.
- [15] J. A. Qadourah, A. M. Al-Falahat, and S. S. Alrwashdeh, “Investigate The Carbon Footprints Of Three Intermediate Flooring Systems: Cross-Laminated Timber, Solid Concrete, And Hollow-Core Precast Concrete,” *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 377–385, 2022.