

Penerapan Sistem *Milk Run* Untuk Mengurangi Emisi Gas Buang Menggunakan Metode *Vehicle Routing Problem* Pada Industri Otomotif

Heri Erdana¹, Tri Ngudi Wiyatno², Firda Anisah³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa

Jl. Inspeksi Kalimalang No.9, Cibatu, Cikarang Selatan, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat 17530

Email: heri.erdana@gmail.com, tringudi@pelitabangsa.ac.id, firda@pelitabangsa.ac.id

ABSTRAK

Aktivitas distribusi material di PT XYZ pada kondisi eksisting umumnya menerapkan sistem pengiriman langsung (*Single Delivery*), di mana setiap armada truk hanya melayani satu titik *supplier* menuju lokasi tujuan (*Plant 1* atau *Plant 2*) dalam satu kali perjalanan. Pola ini menyebabkan rendahnya utilitas kapasitas kendaraan serta tingginya biaya operasional dan volume emisi gas buang. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengiriman *Milk-Run* menggunakan pendekatan *Vehicle Routing Problem* (VRP) guna menemukan rute distribusi yang lebih efisien (solusi heuristik), memangkas jarak tempuh, menekan biaya transportasi, serta mengurangi emisi gas buang CO₂. Pendekatan algoritma *Nearest Insert* dan *Nearest Neighbor* digunakan untuk menentukan urutan kunjungan *supplier* dengan tetap memperhatikan batasan kapasitas kendaraan (*Capacity Constraints*). Hasil perancangan menunjukkan bahwa penerapan metode *Milk-Run* berpotensi mengkonsolidasikan rute pengiriman lintas plant secara efektif. Berdasarkan perbandingan kinerja, rute usulan mampu mengurangi jumlah kebutuhan armada truk dari 184 truk menjadi 92 truk per bulan (efisiensi 50,00%), memangkas total jarak tempuh dari 9.638,00 km menjadi 5.058,20 km per bulan (penurunan 47,52%), serta menekan konsumsi bahan bakar solar dari 1.721,86 liter menjadi 1.044,03 liter per bulan (penurunan 39,37%). Selain itu, efisiensi ini berdampak langsung pada penurunan volume emisi gas buang CO₂ sebesar 1.731,11 kg CO₂ per bulan (menjadi 2.798,00 kg CO₂ atau turun 38,22%) serta menghemat total biaya operasional transportasi perusahaan dari Rp294.111.744,00 menjadi Rp207.000.000,00 per bulan (penghematan sebesar Rp87.111.744,00 atau 29,62%).

Kata kunci: Distribusi, *Milk Run*, *Vehicle Routing Problem* (VRP), *Nearest Insert*, *Nearest Neighbor*, Emisi Karbon.

ABSTRACT

Material distribution activities at PT XYZ under existing conditions generally apply a *Single Delivery* system, where each transport truck only serves one supplier point to a destination location (*Plant 1* or *Plant 2*) in a single trip. This pattern leads to low vehicle capacity utilization, high operational costs, and large volumes of exhaust emissions. This study aims to design a *Milk-Run* distribution system using the *Vehicle Routing Problem* (VRP) approach to optimize distribution routes, reduce travel distances, lower transportation costs, and decrease carbon dioxide (CO₂) emissions. The *Nearest Insert* and *Nearest Neighbor* algorithms are applied to determine the sequence of supplier visits while adhering to vehicle *Capacity Constraints*. The design results indicate that the *Milk-Run* method is projected to consolidate cross-plant delivery routes effectively. Based on performance comparisons, the proposed routes reduce the monthly truck fleet requirement from 184 trucks to 92 trucks (a 50.00% efficiency), cut total travel distance from 9,638.00 km to 5,058.20 km per month (a 47.52% decrease), and lower diesel fuel consumption from 1,721.86 liters to 1,044.03 liters per month (a 39.37% decrease). Furthermore, this efficiency directly reduces CO₂ exhaust emissions by 1,731.11 kg CO₂ per month (reaching 2,798.00 kg CO₂ or a 38.22% reduction) and saves the company's total operational transportation costs from IDR 294,111,744.00 to IDR 207,000,000.00 per month (achieving savings of IDR 87,111,744.00 or 29.62%).

Keywords: Distribution, *Milk-Run*, *Vehicle Routing Problem* (VRP), *Nearest Insert*, *Nearest Neighbor*, Carbon Emission.

Pendahuluan

Perkembangan industri manufaktur menuntut perusahaan meningkatkan efisiensi aktivitas operasional, termasuk logistik dan transportasi. Aktivitas transportasi berperan penting dalam menjamin ketersediaan material dari *supplier* ke fasilitas produksi, tetapi juga menjadi salah satu sumber emisi gas rumah kaca akibat penggunaan bahan bakar kendaraan. United States Environmental Protection Agency (EPA) melaporkan bahwa pada tahun 2022 sektor transportasi menyumbang sekitar 29% dari total emisi gas rumah kaca di Amerika Serikat, sedangkan kendaraan *medium and heavy duty trucks* menyumbang sekitar 23% emisi sektor transportasi [1]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efisiensi transportasi berkaitan dengan pengendalian biaya, konsumsi bahan bakar, dan emisi.

Dalam aktivitas logistik manufaktur, pengiriman material yang dilakukan secara terpisah oleh setiap *supplier* dapat menyebabkan perjalanan berulang, sehingga meningkatkan jumlah perjalanan, jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, dan biaya transportasi. Salah satu alternatif untuk mengatasi kondisi tersebut adalah sistem *milk run*, yaitu pola transportasi yang menggabungkan pengiriman dari beberapa *supplier* dalam satu rangkaian perjalanan. Penelitian Yang *et al.* [2] menunjukkan bahwa sistem *milk run* pada logistik komponen otomotif dapat dimodelkan sebagai permasalahan rute kendaraan dengan mempertimbangkan *time window*, sehingga rute dapat dioptimalkan dan jumlah kendaraan dapat dikurangi. Penerapan *milk run* perlu didukung oleh optimasi rute dengan mempertimbangkan lokasi *supplier*, jarak, jumlah permintaan, kapasitas kendaraan, dan tujuan pengiriman. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Vehicle Routing Problem (VRP)*. Penelitian Yang [3] menunjukkan bahwa VRP dapat digunakan untuk menentukan konfigurasi rute *milk run* dengan mempertimbangkan biaya transportasi, biaya persediaan, dan jenis kendaraan. Sementara itu, Quan *et al.* [4] menunjukkan bahwa optimasi rute *milk run* dapat mengurangi jarak perjalanan, biaya transportasi, konsumsi energi, dan biaya emisi karbon.

Permasalahan terkait efisiensi transportasi ini juga dihadapi oleh PT XYZ, sebuah perusahaan manufaktur yang berlokasi di Kawasan Industri KIIC Karawang. Saat ini, pola pengiriman material dari para *supplier* menuju fasilitas produksi perusahaan (Plant 1 dan Plant 2) masih menerapkan sistem *Single Delivery*, di mana setiap *supplier* melakukan pengiriman barang secara terpisah menggunakan kendaraannya masing-masing. Pola pengiriman yang tidak terintegrasi ini menyebabkan frekuensi perjalanan menjadi sangat tinggi, akumulasi jarak tempuh mencapai 9.638 km per bulan, serta konsumsi bahan bakar mencapai 1.721,86 liter per bulan. Kondisi tersebut berdampak pada tingginya biaya pengiriman harian hingga mencapai Rp294,11 juta per bulan serta menghasilkan emisi CO₂ sebesar 4.529,11 kg per bulan. Rendahnya utilisasi kapasitas kendaraan dan tidak adanya koordinasi rute antar *supplier* menjadi faktor utama tingginya pemborosan sumber daya tersebut.

Salah satu strategi yang efektif untuk mengatasi ketidakefisienan pola *Single Delivery* adalah penerapan sistem *Milk Run*. Sistem *Milk Run* mengonsolidasikan pengambilan barang dari beberapa *supplier* dalam satu rangkaian rute perjalanan kendaraan terpadu. Untuk merancang rute *Milk Run* yang efisien, penelitian ini menerapkan pendekatan *Vehicle Routing Problem (VRP)*, khususnya *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*. Kombinasi metode *Saving Matrix* digunakan untuk mengelompokkan *supplier* ke dalam *cluster* berdasarkan potensi penghematan jarak, sedangkan algoritma *Nearest Neighbor* dan *Nearest Insert* digunakan untuk menentukan urutan kunjungan yang paling efisien dengan mempertimbangkan batasan kapasitas muatan kendaraan. Selain itu, dampak lingkungan diukur dengan mengalkulasi penurunan emisi gas buang CO₂ berdasarkan metodologi Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan VRP dan *Milk Run* dalam optimasi logistik, namun sebagian besar fokus pada aspek efisiensi biaya dan jarak semata. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada integrasi perancangan rute *Milk Run* lintas fasilitas (Plant 1 dan Plant 2) yang tidak hanya mengoptimalkan efisiensi operasional (jarak, biaya, dan jumlah armada), tetapi juga secara eksplisit mengukur potensi penurunan emisi karbon (CO₂) sebagai kontribusi terhadap *Green Supply Chain Management* pada industri manufaktur. Penelitian ini bertujuan untuk merancang rute *Milk Run* terbaik dari alternatif heuristik yang dievaluasi (*Saving Matrix*, *Nearest Neighbor*, *Nearest Insert*) menggunakan metode VRP, menganalisis perbandingan kinerja operasional antara kondisi eksisting dan rute usulan, serta mengestimasi besarnya potensi pengurangan emisi gas buang CO₂ di PT XYZ.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif dan optimasi. Penelitian dilaksanakan di PT XYZ, Kawasan Industri KIIC, Kabupaten Karawang, Jawa Barat, mulai Januari 2026 sampai dengan selesai. Objek penelitian adalah aktivitas distribusi material dari beberapa *supplier* menuju Plant 1 dan Plant 2. *Supplier* yang diamati meliputi JAEIL, SL, USRA, CGS, DPP, dan SMI dengan pola pengiriman harian maupun mingguan. Data penelitian diperoleh melalui observasi dan dokumentasi. Observasi dilakukan untuk mengetahui kondisi distribusi secara langsung, meliputi pola pengiriman, penggunaan kendaraan, frekuensi perjalanan, serta rute yang digunakan. Dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan data operasional perusahaan periode Januari–Juni 2026. Data yang diperoleh meliputi lokasi *supplier*, tujuan pengiriman, jumlah pallet, frekuensi pengiriman, jenis dan kapasitas kendaraan, jarak tempuh, biaya transportasi, serta data untuk menghitung konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang. Data tersebut kemudian disusun untuk menentukan variabel penelitian, yaitu lokasi *supplier*, jumlah pallet, frekuensi pengiriman, jenis dan kapasitas kendaraan, jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, serta biaya operasional. Periode Januari–Juni 2026 dipilih karena memiliki pola pengiriman yang relatif stabil serta dapat menggambarkan kondisi operasional perusahaan. Data historis yang digunakan merupakan data operasional perusahaan yang telah melalui validasi internal sehingga terdokumentasi dan dapat digunakan sebagai dasar analisis rute pengiriman.

Dalam pemodelan transportasi logistik, data seperti jarak antar lokasi, kapasitas kendaraan, serta kebutuhan pengiriman diperlukan untuk menghasilkan rute yang sesuai dengan kondisi operasional. Pada PT XYZ, data distribusi yang digunakan mencakup jarak antar *supplier* dan Plant 1 maupun Plant 2, jumlah pallet, kapasitas kendaraan, serta frekuensi pengiriman. Jarak antar Plant yang digunakan dalam penelitian ini adalah 3 km. Struktur data tersebut menjadi dasar dalam pembentukan rute *Milk Run* menggunakan pendekatan *Vehicle Routing Problem (VRP)*. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memahami konsep logistik, sistem *Milk Run*, *Vehicle Routing Problem (VRP)*, metode *Saving Matrix*, *Nearest Neighbor*, *Nearest Insert*, serta perhitungan emisi CO₂ berdasarkan standar Intergovernmental Panel on Climate Change

(IPCC). Selanjutnya dilakukan pengumpulan dan pengolahan data distribusi aktual dengan pola *Single Delivery* sebagai kondisi awal (*baseline*). Perancangan rute *Milk Run* diawali dengan penyusunan matriks jarak antar lokasi supplier dan Plant. Selanjutnya, metode *Saving Matrix* digunakan untuk mengelompokkan supplier ke dalam rute berdasarkan nilai penghematan jarak dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan. Setelah kelompok rute terbentuk, urutan kunjungan supplier ditentukan menggunakan metode *Nearest Neighbor* dan *Nearest Insert*. Kedua metode tersebut menghasilkan alternatif urutan rute yang selanjutnya dibandingkan berdasarkan total jarak tempuh. Hasil perancangan rute kemudian dibandingkan dengan kondisi *Single Delivery*. Evaluasi dilakukan berdasarkan jumlah perjalanan, total jarak tempuh (km), jumlah kendaraan, tingkat pemanfaatan kapasitas kendaraan (*capacity utilization*), biaya operasional transportasi (Rp), konsumsi bahan bakar, serta emisi gas buang CO₂ (kg CO₂). Rute dengan hasil kinerja yang lebih efisien berdasarkan indikator tersebut digunakan sebagai dasar rekomendasi penerapan sistem *Milk Run* di PT XYZ. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian.

Sistem Logistik dan Transportasi

Logistik merupakan kegiatan pengelolaan aliran material, informasi, dan dana dari *supplier* hingga konsumen yang mencakup transportasi, penyimpanan, persediaan, penanganan material, serta informasi [5]. Logistik berperan dalam mengelola pergerakan dan penyimpanan barang untuk mendukung kelancaran rantai pasok [6]. Salah satu kegiatan utama dalam logistik adalah transportasi, yaitu proses pemindahan barang atau orang dari satu lokasi ke lokasi lainnya [7], [8]. Dalam kegiatan distribusi, transportasi menghubungkan lokasi asal dengan tujuan pengiriman. Efektivitasnya dipengaruhi oleh jarak tempuh, kapasitas kendaraan, rute, waktu pengiriman, serta biaya operasional.

Sistem Milk Run

Sistem *Milk Run* merupakan pola transportasi yang menggabungkan beberapa titik pengambilan atau pengiriman dalam satu perjalanan kendaraan. Penerapannya mempertimbangkan jumlah titik, jarak, waktu perjalanan, serta kapasitas kendaraan [9]. Soesilo dan Valentin [10] menunjukkan bahwa *Milk Run* dapat mengintegrasikan pengambilan material dari beberapa sumber dalam satu perjalanan sehingga berpotensi mengurangi jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, biaya transportasi, dan emisi. Dalam penelitian ini, *Milk Run* digunakan untuk menggabungkan pengiriman material dari beberapa supplier dalam satu rangkaian perjalanan dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan dan kebutuhan material.

Vehicle Routing Problem (VRP)

Vehicle Routing Problem (VRP) merupakan permasalahan penentuan rute kendaraan untuk melayani sejumlah lokasi dengan tujuan memperoleh rute yang optimal [11]. VRP mempertimbangkan permintaan pada setiap lokasi, kapasitas kendaraan, serta jarak perjalanan dengan tujuan meminimalkan total jarak dan biaya operasional [12]. Utami *et al.* [13] menjelaskan bahwa optimasi rute diperlukan untuk memperoleh pola perjalanan yang lebih efisien. Dalam penelitian ini, VRP digunakan untuk menentukan rute kendaraan dalam melayani beberapa supplier.

Metode Saving Matrix

Saving Matrix merupakan metode untuk menentukan rute distribusi dengan menghitung penghematan jarak apabila beberapa titik yang sebelumnya dilayani secara terpisah digabungkan dalam satu rute [14]. Penggabungan tersebut tetap

mempertimbangkan kapasitas kendaraan agar muatan tidak melebihi kemampuan angkut. Rumus nilai penghematan (*saving*) dihitung sebagai berikut:

$$2d(D, x) + 2d(D, y) - [d(D, x) + d(x, y) + d(y, D)] \quad (1)$$

$$= d(D, x) + d(D, y) - d(x, y) \quad (2)$$

Perhitungan ini dilandaskan pada asumsi simetris, di mana jarak antara titik x dan y bernilai sama dengan arah sebaliknya ($d(x, y) = d(y, x)$). Secara umum, formula perumusan penghematan jarak (*saving*) dapat digeneralisasikan melalui persamaan:

$$S(x, y) = d(D, x) + d(D, y) - d(x, y) \quad (3)$$

Dalam penelitian ini, *Saving Matrix* digunakan untuk membentuk *cluster* supplier pada rute *Milk Run* berdasarkan penghematan jarak dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan. Hasil *cluster* menjadi dasar penentuan urutan rute menggunakan *Nearest Neighbor* dan *Nearest Insert*.

Algoritma Nearest Insert

Metode *Nearest Insert* menentukan urutan rute dengan menyisipkan supplier yang belum dikunjungi ke dalam rute yang telah terbentuk berdasarkan tambahan jarak terkecil [15]. Dalam penelitian ini, metode *Nearest Insert* digunakan untuk menentukan alternatif urutan rute *Milk Run* berdasarkan *cluster* hasil *Saving Matrix*. Total jarak rute selanjutnya dihitung untuk dibandingkan dengan metode *Nearest Neighbor* serta kondisi distribusi aktual.

Algoritma Nearest Neighbor

Metode *Nearest Neighbor* menentukan urutan kunjungan berdasarkan *supplier* yang memiliki jarak terdekat dari posisi kendaraan saat ini. Pemilihan dilakukan secara berulang hingga seluruh *supplier* dalam rute dikunjungi [16]. Dalam penelitian ini, metode *Nearest Neighbor* digunakan untuk menentukan alternatif urutan rute *Milk Run* berdasarkan *cluster* hasil *Saving Matrix*. Total jarak rute kemudian dibandingkan dengan hasil *Nearest Insert* dan kondisi distribusi aktual.

Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)

Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) merupakan pengembangan VRP yang mempertimbangkan keterbatasan kapasitas kendaraan. Jumlah material yang dibawa harus sesuai dengan kapasitas maksimum kendaraan [17]. CVRP bertujuan menentukan rute distribusi yang efisien dengan mempertimbangkan hubungan antara jumlah permintaan dan kapasitas kendaraan [18]. Dalam penelitian ini, CVRP digunakan sebagai batasan agar total muatan pada setiap rute *Milk Run* tidak melebihi kapasitas kendaraan. Secara matematis, model dasar CVRP yang diterapkan pada permasalahan ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

Fungsi Tujuan (*Objective Function*):

Meminimalkan total jarak tempuh perjalanan.

$$\text{Minimasi } Z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ijk} \quad (4)$$

Batasan (*Constraints*):

1. Setiap kendaraan maksimal keluar dari depot/gudang satu kali.

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} \leq 1, \forall k \in K \quad (5)$$

2. Setiap titik supplier hanya dikunjungi tepat satu kali oleh satu kendaraan.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ijk} = 1, \forall j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

3. Keseimbangan aliran: jika kendaraan datang ke suatu titik, ia harus pergi dari titik tersebut.

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ijk} - \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{jik} = 0, \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}, \forall k \in K \quad (7)$$

4. Batasan kapasitas muatan: total muatan tidak melebihi kapasitas maksimum kendaraan.

$$\sum_{i=1}^n q_i \sum_{j=0}^n x_{ijk} \leq Q_k, \forall k \in K \quad (8)$$

Keterangan:

c_{ij} = Jarak dari titik i ke titik j .

x_{ijk} = Variabel keputusan bernilai 1 jika kendaraan k melakukan perjalanan dari i ke titik j , dan 0 jika sebaliknya.

q_i = Permintaan muatan pada titik i .

Q_k = Kapasitas maksimal kendaraan k .

Pemodelan CVRP pada penelitian ini memfokuskan kendala utama pada pembatasan kapasitas angkut muatan kendaraan (*capacity constraint*) dan penghematan jarak tempuh. Adapun kendala operasional dinamis di lapangan—seperti jendela waktu pengiriman supplier (*time window*), waktu bongkar muat (*loading/unloading time*), batas jam kerja pengemudi,

serta dinamika kemacetan lalu lintas diasumsikan berada dalam batas toleransi operasional yang fleksibel dan tidak dimasukkan secara eksplisit dalam formulasi model dasar ini.

Optimasi Rute

Optimasi rute merupakan proses menentukan urutan perjalanan yang paling efisien dari beberapa alternatif rute. Pada kegiatan distribusi, optimasi dapat digunakan untuk mengurangi jarak tempuh, waktu perjalanan, jumlah kendaraan, dan biaya transportasi [19]. Dalam penelitian ini, metode *heuristik* (*Saving Matrix*, *Nearest Neighbor*, dan *Nearest Insert*) digunakan untuk memperoleh pola perjalanan *Milk Run* yang mendekati optimal (near-optimal) dan jauh lebih efisien dibandingkan kondisi distribusi aktual.

Kapasitas Kendaraan

Kapasitas kendaraan merupakan kemampuan maksimum kendaraan untuk membawa muatan dalam satu perjalanan. Kapasitas menjadi faktor penting dalam penyusunan rute karena jumlah barang yang diangkut tidak boleh melebihi kemampuan kendaraan [20]. Marpaung *et al.* [21] juga menjelaskan bahwa kapasitas kendaraan merupakan salah satu batasan dalam CVRP. Dalam penelitian ini, kapasitas digunakan untuk menentukan kombinasi *supplier* yang dapat digabungkan dalam satu rute *Milk Run*.

Jarak Tempuh

Jarak tempuh merupakan panjang perjalanan kendaraan dari satu titik menuju titik lainnya. Jarak menjadi parameter penting dalam distribusi karena berkaitan dengan konsumsi bahan bakar, waktu perjalanan, biaya transportasi, dan emisi gas buang [22]. Manihuruk *et al.* [23] menunjukkan bahwa total jarak tempuh dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan rute distribusi yang lebih optimal. Oleh karena itu, jarak tempuh digunakan sebagai salah satu indikator untuk membandingkan efisiensi rute aktual dan rute usulan.

Biaya Transportasi

Biaya transportasi merupakan biaya yang dikeluarkan dalam proses pemindahan barang dari lokasi asal menuju tujuan. Biaya tersebut dipengaruhi oleh jarak, kendaraan, konsumsi bahan bakar, kapasitas angkut, serta aktivitas operasional [24]. Helmi *et al.* [25] menunjukkan bahwa perancangan rute yang lebih efisien dapat mengurangi biaya transportasi. Dalam penelitian ini, biaya transportasi digunakan sebagai salah satu indikator perbandingan antara pola *Single Delivery* dan *Milk Run*.

Dalam penelitian ini, biaya transportasi dihitung berdasarkan asumsi tarif sewa kendaraan per perjalanan (*fixed charter rate per trip*) yang umum berlaku di kawasan industri Karawang, Cikarang, yaitu sebesar Rp3.000.000 per perjalanan untuk armada Wing Box dan Rp1.500.000 per perjalanan untuk armada CDD/CDE. Tarif ini diasumsikan bersifat *all-inclusive* (sudah mencakup jasa pengemudi, bahan bakar, biaya tol, dan perawatan armada), sehingga diperhitungkan secara tetap (*fixed cost per trip*) untuk mempermudah pemodelan estimasi biaya operasional.

Emisi Gas Buang

Emisi gas buang merupakan hasil pembakaran bahan bakar pada mesin kendaraan yang dapat menghasilkan berbagai zat pencemar dan berkontribusi terhadap pencemaran udara serta perubahan iklim [26]. Basyari dan Pranoto [27] juga menjelaskan bahwa kendaraan bermotor menghasilkan berbagai polutan, seperti karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC). Dalam penelitian ini, emisi gas buang digunakan sebagai indikator dampak lingkungan dari aktivitas distribusi. Pengukuran tingkat emisi gas buang kendaraan dilakukan untuk menguantifikasi dampak lingkungan dari aktivitas transportasi logistik. Estimasi emisi karbon dihitung berdasarkan total konsumsi bahan bakar minyak (BBM) kendaraan dan faktor emisi spesifik jenis bahan bakar yang mengacu pada standar Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Persamaan perhitungan emisi gas buang CO₂ dirumuskan sebagai berikut:

Hasil Dan Pembahasan

Pengumpulan Data dan Profil Distribusi Eksisting Data penelitian diperoleh langsung dari PT XYZ, mencakup lokasi enam *supplier* (JAEIL, SL, USRA, CGS, DPP, dan SMI), jumlah permintaan (*demand*) dalam satuan palet, kapasitas armada, frekuensi pengiriman (harian dan mingguan), biaya operasional, serta jarak tempuh menuju lokasi tujuan (Plant 1 dan Plant 2). Saat ini, kondisi operasional distribusi eksisting PT XYZ menerapkan pola pengiriman langsung (*Single Delivery / Point-to-Point*).



Gambar 2. Skema Rute Distribusi Eksisting PT XYZ

Pada skema ini, satu armada truk diberangkatkan dari masing-masing *supplier* hanya untuk melayani satu titik tujuan (Plant 1 atau Plant 2) dalam sekali perjalanan, lalu kembali ke titik asal tanpa membawa muatan (*empty trip*). Pola *Single Delivery* tersebut memicu tingginya frekuensi perjalanan dan ketidakefisienan jarak tempuh. Data operasional eksisting ini selanjutnya diolah menggunakan pendekatan *Milk Run berbasis Vehicle Routing Problem (VRP)* guna merancang usulan rute distribusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Data Operasional Eksisting distribusi di PT XYZ mencakup data permintaan material (*demand*) dalam satuan palet dan kubikasi (m³), spesifikasi jenis armada, frekuensi pengiriman, biaya operasional transportasi, serta jarak tempuh dari titik *supplier* menuju Plant 1 dan Plant 2. Aktivitas distribusi eksisting terbagi menjadi dua kelompok frekuensi, yaitu pengiriman harian (*daily delivery*) dan pengiriman mingguan (*weekly delivery*).

Rincian operasional pengiriman harian dan mingguan disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Data Operasional Pengiriman Harian (*Daily Delivery*) Eksisting

Supplier	Tujuan	Permintaan (Palet)	Kubikasi (m ³)	Jenis Tipe Armada	Jumlah Truk	Biaya / Perjalanan (Rp)	Jarak (km)
JAEL	Plant 1	21	38,22	Wing Box	1	3.000.000	46
JAEL	Plant 2	22	40,04	Wing Box	1	3.000.000	52
SL	Plant 1	3	5,46	CDD/CDE	1	1.500.000	52
SL	Plant 2	2	3,64	CDD/CDE	1	1.500.000	58
USRA	Plant 1	10	25,48	Pickup By KASAI	1	1.162.464	50
USRA	Plant 2	1	1,82	Gran Max	1	600.000	56
CGS	Plant 2	1	1,82	Gran Max Pickup	1	600.000	54
DPP	Plant 2	7	12,74	CDD/CDE	1	1.500.000	54
Total / Hari		51	129,2		8	12.862.464	422

Tabel 2. Data Operasional Pengiriman Mingguan (*Weekly Delivery*) Eksisting

Supplier	Tujuan	Permintaan (Palet)	Kubikasi (m ³)	Frekuensi / Minggu	Jenis Armada	Biaya / Minggu (Rp)	Total Jarak / Minggu (km)
CGS	Plant 1	8	14,56	1× / minggu	CDD/CDE	1.500.000	50
SMI	Plant 1	7	12,74	3× / minggu	CDD/CDE	4.500.000	144
Total / Minggu		15	27,3			6.000.000	194

Berdasarkan data operasional harian dan mingguan, akumulasi biaya dan jarak tempuh bulanan (dengan asumsi 21 hari kerja efektif per bulan / 4 minggu) dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Total Biaya dan Jarak Pengiriman Bulanan Eksisting

Kategori Pengiriman	Pengeluaran Biaya / Bulan (Rp)	Total Jarak Tempuh / Bulan (km)
Pengiriman Harian (Daily)	270.111.744	8.862
Pengiriman Mingguan (Weekly)	24.000.000	776
Total Eksisting	294.111.744	9.638

Hasil analisis terhadap sistem pengiriman eksisting menunjukkan beberapa titik inefisiensi utama yaitu

Rendahnya Utilisasi Kapasitas Transportasi: Skema *Single Delivery* menyebabkan beberapa pengiriman dengan muatan sangat kecil (misalnya USRA ke Plant 2 dan CGS ke Plant 2 yang hanya membawa 1 palet) tetap mewajibkan pengoperasian satu unit armada secara murni. Hal ini memicu tingginya rasio undercapacity pada kendaraan. Perjalanan Tanpa Muatan (*Empty Return Trips*): Setiap armada yang menyelesaikan pengiriman langsung kembali ke titik asal *supplier* tanpa membawa

muatan balik, sehingga menambah akumulasi jarak tempuh non-produktif. Tingginya Total Jarak dan Biaya: Akumulasi jarak tempuh sebesar 9.638 km/bulan berimplikasi langsung pada tingginya biaya logistik bulanan perusahaan mencapai Rp294.111.744 serta berkontribusi signifikan terhadap tingkat emisi karbon kendaraan.

Perhitungan Emisi Gas Buang Baseline (CO₂)

Estimasi emisi gas buang karbon dioksida (CO₂) dihitung berdasarkan standar faktor emisi Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 1996), yaitu 2,68 kg CO₂/liter untuk bahan bakar Diesel/Solar dan 2,31 kg CO₂/liter untuk Gasoline/Bensin.

Secara matematis, total emisi gas buang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$E = j \times EF \times Q \quad (9)$$

Dimana:

E = Total emisi gas buang (kgCO₂)

j = Jumlah armada kendaraan (unit)

EF = Faktor emisi gas buang berdasarkan jenis bahan bakar (kgCO₂/liter)

Q = Total konsumsi bahan bakar (liter)

Hasil kalkulasi konsumsi bahan bakar dan akumulasi emisi CO₂ operasional eksisting dirangkum pada Tabel 4

Tabel 4. Rekapitulasi Jarak Tempuh, Konsumsi BBM, dan Estimasi Emisi CO₂ Bulanan Baseline

Supplier & Tujuan	Jenis Armada	Efisiensi BBM (km/liter)	Jarak / Bulan (km)	Konsumsi BBM (Liter)	Emisi CO ₂ (kgCO ₂)
JAEL > Plant 1	Wing Box	3,5	966,0	276,00	739,68
JAEL > Plant 2	Wing Box	3,5	1092,0	312,00	836,16
SL > Plant 1	CDD/CDE	7	1092,0	156,00	418,08
SL > Plant 2	CDD/CDE	7	1218,0	174,00	466,32
USRA > Plant 1	Pickup	3,5	1050,0	300,00	804,00
USRA > Plant 2	Gran Max	10	1176,0	117,60	271,66
CGS > Plant 2	Gran Max	10	1134,0	113,40	261,95
DPP > Plant 2	CDD/CDE	7	1134,0	162,00	434,16
CGS > Plant 1 (Weekly)	CDD/CDE	7	200,0	28,57	76,57
SMI > Plant 1 (Weekly)	CDD/CDE	7	576,0	82,29	220,53
Total Baseline			9638,0	1721,86	4529,11

Berdasarkan hasil kalkulasi pada Tabel 4, total emisi karbon yang dihasilkan dari aktivitas pengiriman PT XYZ pada kondisi *baseline* mencapai 4529,11 kg CO₂/bulan dengan total konsumsi BBM sebesar 1721,86 liter/bulan. Angka emisi yang tinggi ini mengonfirmasi pentingnya perancangan ulang rute pengiriman berbasis *Milk Run VRP*.

Perancangan Rute Usulan Berbasis Milk Run dan VRP

Untuk mengatasi inefisiensi akibat pola pengiriman terpisah (*Single Delivery*), dirancang usulan rute distribusi baru mengintegrasikan konsep *Milk Run* dan pendekatan *Vehicle Routing Problem (VRP)*. Metode *Milk Run* menggabungkan beberapa titik penjemputan dari beberapa *supplier* ke dalam satu rangkaian rute perjalanan melingkar (*circuit route*) sebelum menuju titik tujuan (Plant 1 atau Plant 2).

Matriks Jarak dan Matriks Penghematan (Saving Matrix)

Langkah awal perancangan adalah menyusun matriks jarak berdasarkan pengukuran jarak nyata melalui pemetaan digital (Google Maps). Kode indeks lokasi ditetapkan sebagai berikut: 0 = PT XYZ (Gudang), 1 = JAEIL, 2 = SL, 3 = USRA, 4 = CGS, dan 6 = SMI. Matriks jarak simetris antar-lokasi disajikan pada Tabel 5

Tabel 5. Matriks Jarak Plant 1

Kode	Lokasi / Supplier	0	1	2	3
0	PT XYZ (Gudang)	0	23	24	26
1	JAEIL	23	0	3,3	4,8
2	SL	24	3,3	0	2,1
3	USRA	26	4,8	2,1	0

Tabel 6. Matriks Jarak Plant 1 (CGS–SMI)

Kode	Lokasi / Supplier	0	4	6
0	PT XYZ (Gudang)	0	25	24
4	CGS	25	0	4,8
6	SMI	24	4,8	0

Selanjutnya, besarnya nilai penghematan jarak yang diperoleh jika dua titik *supplier* x dan y digabungkan ke dalam satu rute perjalanan dihitung menggunakan Persamaan (6):

$$S(x, y) = d(D, x) + d(D, y) - d(x, y) \quad (10)$$

kalkulasi penghematan penggabungan *Supplier* 1 (JAEIL) dan *Supplier* 2 (SL):

$$S(1,2) = d(0,1) + d(0,2) - d(1,2) = 23,0 + 24,0 - 3,3 = 43,7 \text{ km} \quad (11)$$

Hasil kalkulasi seluruh nilai *savings* dirangkum ke dalam matriks penghematan jarak pada Tabel 7.

Tabel 7. Matriks Penghematan Jarak (*Saving Matrix*) dan Permintaan Plant 1 (Harian)

Supplier (x\y)	1	2	3	Permintaan (Palet)
1 (JAEIL)	-	-	-	21
2 (SL)	43,7	-	-	3
3 (USRA)	44,2	47,9	-	10

Tabel 8. Matriks Penghematan Jarak (*Saving Matrix*) dan Permintaan Plant 1 (Mingguan)

Supplier (x\y)	4	6	Permintaan (Palet)
4 (CGS)	-	-	8
6 (SMI)	44,2	-	21

Formulasi Pembentukan Rute Usulan dan Alokasi Armada

Pengelompokan *supplier* ke dalam rute pengiriman baru dilakukan dengan mengurutkan pasangan lokasi berdasarkan nilai *saving* tertinggi, serta mempertimbangkan batasan kapasitas maksimal muatan kendaraan (*capacity constraint*). Hasil pengelompokan menghasilkan 3 rute usulan utama, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9. Hasil Pengelompokan Rute Usulan berbasis *Milk Run VRP* dan Alokasi Armada

Rute	Rangkaian Kunjungan Supplier (Kode)	Total Permintaan (Palet)	Jenis Armada
Rute 1	2,3	13	CDD
Rute 2	1	21	Wing Box

Tabel 10. Hasil Pengelompokan Rute Usulan berbasis *Milk Run VRP* dan Alokasi Armada Mingguan

Rute	Rangkaian Kunjungan Supplier (Kode)	Total Permintaan (Palet)	Jenis Armada
Rute 1	6	21	Wing Box
Rute 2	4	8	CDD

Penentuan Urutan Rute

Setelah pengelompokan *supplier* terbentuk, urutan kunjungan (*sequencing*) ditentukan menggunakan dua pendekatan yaitu Algoritma *Nearest Insert* (NI) dan Algoritma *Nearest Neighbor* (NN). Algoritma *Nearest Insert* (NI) Membentuk rute dengan menentukan node dasar dengan jarak *round-trip* terpendek dari Gudang (G), kemudian secara bertahap menyisipkan titik penjemputan terdekat ke dalam *sub-tour* hingga seluruh *supplier* terlayani. Algoritma *Nearest Insert* (NI) dan *Nearest Neighbor* (NN) Membentuk rute secara sekuensial berdasarkan prinsip tetangga terdekat, dimulai dari Gudang (G) menuju *supplier* terdekat yang belum dikunjungi, dan berakhir kembali di Gudang.

Hasil pembentukan urutan rute dan perbandingan jarak tempuh antara metode *Nearest Insert* dan *Nearest Neighbor* untuk tujuan Plant 1 dirangkum pada Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan Urutan Rute dan Jarak Tempuh Plant 1 (*Nearest Insert* vs. *Nearest Neighbor*)

Kelompok Rute	Metode Algoritma	Urutan Kunjungan Rute Usulan	Total Jarak Tempuh (km)
Rute 1	<i>Nearest Insert</i> (NI)	Gudang (G) >SL (2) >USRA (3) >Gudang (G)	52,1
	<i>Nearest Neighbor</i> (NN)	Gudang (G) >SL (2) >USRA (3) >Gudang (G)	52,1
Rute 2	<i>Nearest Insert</i> (NI)	Gudang (G) >JAEIL (1) >Gudang (G)	46
	<i>Nearest Neighbor</i> (NN)	Gudang (G) >JAEIL (1) >Gudang (G)	46

Berdasarkan hasil kalkulasi pada Tabel 11, terlihat bahwa pada Rute 1 (SL dan USRA), kedua algoritma *Nearest Insert* dan *Nearest Neighbor* menghasilkan urutan kunjungan yang identik dengan total jarak tempuh 52,1 km, jauh lebih efisien dibandingkan skema pengiriman eksisting secara terpisah (52,0 km + 50,0 km = 102,0 km). Pada Rute 2, kedua algoritma juga menghasilkan urutan yang sama (46,0 km) karena merupakan pengiriman langsung (*direct trip*) khusus *supplier* JAEIL (1) akibat keterbatasan kapasitas armada (21 palet), sehingga jaraknya tetap sama dengan kondisi eksisting.

Tabel 12. Perbandingan Urutan Rute dan Jarak Tempuh Plant 1 (*Nearest Insert* vs. *Nearest Neighbor*) mingguan

Kelompok Rute	Metode Algoritma	Urutan Kunjungan Rute Usulan	Total Jarak Tempuh (km)
Rute 1	<i>Nearest Insert</i> (NI)	Gudang (G) > SMI (6) > Gudang (G)	48
	<i>Nearest Neighbor</i> (NN)	Gudang (G) > SMI (6) > Gudang (G)	48
Rute 2	<i>Nearest Insert</i> (NI)	Gudang (G) > CGS (4) > Gudang (G)	50
	<i>Nearest Neighbor</i> (NN)	Gudang (G) > CGS (4) > Gudang (G)	50

Untuk kelompok pengiriman mingguan pada Tabel 12, Rute 1 (SMI) menghasilkan jarak tempuh 48,0 km per siklus, jauh lebih efisien dibandingkan skema eksisting yang mengharuskan 3 kali perjalanan terpisah per minggu ($3 \times 48,0 \text{ km} = 144,0 \text{ km}$), karena seluruh permintaan (21 palet) dapat dikonsolidasikan dalam satu perjalanan menggunakan armada Wing Box. Rute 2 (CGS) tetap berupa pengiriman langsung (50,0 km) karena frekuensinya sudah 1×/minggu pada kondisi eksisting, sehingga tidak terdapat perubahan jarak tempuh pada rute ini.

Perancangan Rute Usulan Distribusi ke Plant 2

Selanjutnya, perancangan rute usulan untuk titik tujuan Plant 2 dilakukan dengan tahapan metodologis yang sama. Indeks kode lokasi untuk kluster Plant 2 didefinisikan sebagai berikut: 0 = PT XYZ / Plant 2 (G'), 1 = JAEIL, 2 = SL, 3 = USRA, 4 = CGS, dan 5 = DPP.

Matriks jarak simetris serta matriks penghematan jarak dan jumlah permintaan (*demand*) untuk Plant 2 dirangkum pada Tabel 13.

Tabel 13. Matriks Jarak Plant 2

Supplier	0	1	2	3	4	5
0	0					
1	26	0				
2	27	3,3	0			
3	29	4,8	2,1	0		
4	28	5	4	6,1	0	
5	27	8,6	9,3	11	9,9	0

Selanjutnya, besarnya nilai penghematan jarak dihitung menggunakan persamaan *Saving Matrix*. Hasil kalkulasi beserta jumlah permintaan *supplier* dirangkum pada Tabel 14.

Tabel 14. *Saving Matrix* & Permintaan Plant 2

Supplier (x\y)	1	2	3	4	5	Permintaan (Palet)
1 (JAEIL)	-	-	-	-	-	22
2 (SL)	49,7	-	-	-	-	2
3 (USRA)	50,2	53,9	-	-	-	1
4 (CGS)	49	51	50,9	-	-	1
5 (DPP)	44,4	44,7	45	45,1	-	7

Berdasarkan prioritas nilai saving tertinggi dan batasan kapasitas muatan kendaraan, terbentuk 2 rute usulan utama untuk wilayah Plant 2 yang disajikan pada Tabel 15.

Tabel 15. Pengelompokan Rute Usulan Armada Plant 2

Rute	Rangkaian Supplier (Kode)	Total Permintaan (Palet)	Jenis Armada
Rute 1	2, 3, 4, 5	11	CDD/CDE
Rute 2	1	22	Wing Box

Penentuan Urutan Rute Plant 2

Hasil pembentukan urutan kunjungan rute usulan serta perbandingan jarak tempuh antara Algoritma *Nearest Insert* (NI) dan Algoritma *Nearest Neighbor* (NN) untuk tujuan Plant 2 dirangkum pada Tabel 16.

Tabel 26. Perbandingan Urutan Rute dan Jarak Tempuh Plant 2 (*Nearest Insert* vs. *Nearest Neighbor*)

Kelompok Rute	Metode Algoritma	Urutan Kunjungan Rute Usulan	Total Jarak Tempuh (km)
Rute 1	<i>Nearest Insert</i> (NI)	Gudang (G') > SL (2) > USRA (3) > CGS (4) > DPP (5) > Gudang (G')	72,1
	<i>Nearest Neighbor</i> (NN)	Gudang (G') > SL (2) > USRA (3) > CGS (4) > DPP (5) > Gudang (G')	72,1

Rute 2	<i>Nearest Insert</i> (NI)	Gudang (G') > JAEIL (1) > Gudang (G')	52
	<i>Nearest Neighbor</i> (NN)	Gudang (G') > JAEIL (1) > Gudang (G')	52

Berdasarkan Tabel di atas, penerapan kedua algoritma pada Rute 1 menghasilkan urutan lintasan yang konsisten dengan total jarak 72,1 km. Skema penggabungan *Milk Run* ini berhasil memangkas jarak secara signifikan jika dibandingkan dengan skema pengiriman eksisting terpisah ($54 + 58 + 56 + 54 = 222,0$ km). Pada Rute 2, Algoritma *Nearest Neighbor* mencatatkan rute jarak sama dengan *Nearest Insert* yaitu (52,0 km).

Perancangan Route

Untuk mengoptimalkan muatan kendaraan yang belum mencapai batas maksimum (*idle capacity*), integrasi metode *Milk Run* berbasis VRP menghasilkan 6 rute usulan akhir untuk seluruh operasional pengiriman harian PT XYZ. Rekapitulasi rute usulan akhir disajikan pada Tabel 17.

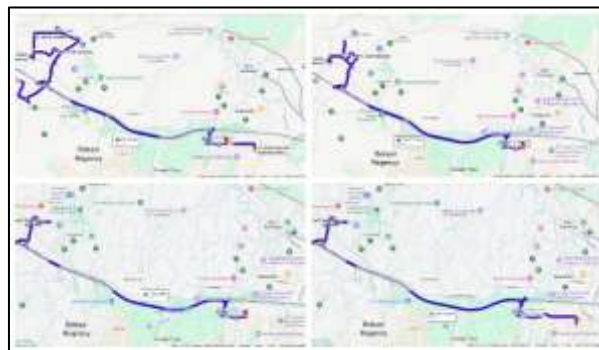
Tabel 17. Rekapitulasi Rute Usulan Akhir Hasil Optimasi *Milk Run VRP*

Kode Rute	Kategori / Wilayah	Rangkaian Lintasan Kunjungan Usulan	Jenis Armada	Total Muatan (Palet)	Jarak Tempuh (km)
Rute 1	PLANT 1	G,2,3,G	CDD	13	52,1
Rute 2		G,1,G	WB	21	46
Rute 1	PLANT 2	G',2,3,4,5,G'	CDD	11	72,1
Rute 2		G',1,G'	WB	22	52
Rute 1	PLANT 1	G,6,G	WB	21	48
Rute 2	(Weekly)	G,4,G	CDD	8	50

Berdasarkan Tabel di atas, penerapan rute usulan terintegrasi mampu memangkas kebutuhan jarak tempuh harian armada secara drastis dari 422,0 km/hari pada kondisi *baseline* eksisting menjadi 222,2 km/hari, atau memberikan penghematan jarak harian sebesar 199,8 km/hari (47,35%).

Visualisasi Peta Rute Usulan

Visualisasi peta lintasan untuk keempat rute usulan hasil optimasi disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta lintasan rute usulan *Milk Run VRP*

Analisis Operasional, Jarak, dan Biaya Rute Usulan

Asumsi biaya tetap per trip ini diterapkan untuk mengestimasi dampak finansial dari penghematan armada. Berdasarkan asumsi tersebut, penurunan total biaya transportasi sebesar 29,62% (dari Rp294.111.744,00 menjadi Rp207.000.000,00 per bulan) didapatkan secara langsung dari hasil konsolidasi rute yang berhasil memotong frekuensi keberangkatan armada dari 184 trip menjadi 92 trip per bulan.

Selanjutnya setelah merancang rute distribusi berbasis *Milk Run VRP*, dilakukan kalkulasi terhadap parameter performa operasional usulan yang mencakup total jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, dan biaya operasional transportasi. Seluruh rute usulan dialokasikan menggunakan armada tipe Wing Box dan CDD dengan standar efisiensi bahan bakar rata-rata 3,5 dan 7 km/liter dan biaya operasional sebesar Rp3.000.000 dan Rp1.500.000 per perjalanan (*trip*). Rekapitulasi harian dan bulanan hasil rancangan rute usulan disajikan pada Tabel 18.

Tabel 18. Rekapitulasi Parameter Operasional, Jarak, dan Biaya Transportasi Rute Usulan

Kode Rute	Wilayah & Lintasan Kunjungan Usulan	Efisiensi BBM (km/liter)	Jarak / Hari (km)	Jarak / Bulan (km)	Biaya / Hari (Rp)	Biaya / Bulan (Rp)
Rute 1	G,2,3,G	7	52,1	1094,1	1.500.000	31500000
Rute 2	G,1,G	3,5	46	966,0	3.000.000	63000000
Rute 1	G',2,3,4,5,G'	7	72,1	1514,1	1.500.000	31500000

Rute 2	G',1,G'	3,5	52	1092,0	3.000.000	63000000
Rute 1	G,6,G	3,5	48	192,0	3.000.000	12000000
(Weekly)						
Rute 2	G,4,G	7	50	200,0	1.500.000	6000000
(Weekly)						
Total				5058,2	13.500.000	207.000.000
Usulan						

Estimasi Emisi Gas Buang (CO₂) Rute Usulan

Perhitungan emisi gas buang karbon dioksida (CO₂) pada rute usulan dihitung menggunakan Persamaan (4) dengan mengacu pada standar faktor emisi *Diesel Fuel* (Solar) sebesar 2,68 kg CO₂/liter. Rincian jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, dan akumulasi emisi CO₂ bulanan pada rute usulan disajikan pada Tabel 19.

Tabel 19. Rekapitulasi Jarak, Konsumsi Bahan Bakar, dan Emisi CO₂ Bulanan Rute Usulan

Kode Rute	Jenis Armada	Trip / Bulan	Jarak / Bulan (km)	Konsumsi BBM (liter/bulan)	Emisi CO ₂ (kg CO ₂ /bulan)
Rute 1	CDD	21	1094,10	156,30	418,88
Rute 2	WB	21	966,00	276,00	739,68
Rute 1	CDD	21	1514,10	216,30	579,68
Rute 2	WB	21	1092,00	312,00	836,16
Rute 1 (Weekly)	WB	4	192,00	54,86	147,02
Rute 2 (Weekly)	CDD	4	200,00	28,57	76,57
Total Usulan		92	5058,20	1044,03	2798,00

Berdasarkan Tabel di atas, penerapan metode *Milk Run* berbasis VRP berhasil menurunkan konsumsi bahan bakar operasional secara signifikan menjadi 1044,03 liter/bulan, yang berimplikasi langsung pada penurunan akumulasi emisi karbon menjadi 2798,00 kg CO₂/bulan. Analisis Komparatif Performa Distribusi (Kondisi Eksisting vs. Usulan) Untuk mengukur efektivitas hasil perancangan rute usulan, dilakukan analisis komparatif antara kondisi *baseline* (eksisting) dengan kondisi usulan (*Milk Run VRP*)

Analisis Utilisasi Kapasitas Kendaraan (*Capacity Utilization*)

Untuk membuktikan efektivitas sistem *Milk Run*, dilakukan evaluasi terhadap tingkat utilisasi kapasitas muatan kendaraan (*capacity utilization*) sebelum dan sesudah optimasi. Parameter standar kapasitas maksimal untuk setiap jenis armada yang digunakan perusahaan adalah sebagai berikut: armada Wing Box (22 palet), CDD/CDE (13 palet), Pickup KASAI (10 palet), dan Gran Max (2 palet).

Pada kondisi awal (*Single Delivery*), pengiriman dilakukan secara parsial yang menyebabkan tingginya inefisiensi ruang muat (ruang kosong pada armada), terutama pada *supplier* dengan permintaan kecil. Rincian utilisasi kapasitas eksisting dapat dilihat pada Tabel 20.

Tabel 20. Utilisasi Kapasitas Kendaraan Kondisi Eksisting (*Single Delivery*)

Kategori / Supplier	Tujuan	Permintaan (Palet)	Jenis Armada	Kapasitas Maks Armada	Utilisasi Kapasitas (%)
Pengiriman Harian					
JAEL	Plant 1	21	Wing Box	22	95,45%
JAEL	Plant 2	22	Wing Box	22	100,00%
SL	Plant 1	3	CDD/CDE	13	23,08%
SL	Plant 2	2	CDD/CDE	13	15,38%
USRA	Plant 1	10	Pickup (KASAI)	10	100,00%
USRA	Plant 2	1	Gran Max	2	50,00%
CGS	Plant 2	1	Gran Max	2	50,00%
DPP	Plant 2	7	CDD/CDE	13	53,85%
Pengiriman Mingguan					
CGS	Plant 1	8	CDD/CDE	13	61,54%
SMI (3x Seminggu)	Plant 1	7	CDD/CDE	13	53,85%

Berdasarkan tabel di atas, terlihat jelas masalah inefisiensi mendasar perusahaan. Kendaraan seperti CDD yang dikirim ke SL (Plant 1 & 2) hanya terutilisasi sebesar 23,08% dan 15,38%. Setelah dilakukan integrasi jadwal dan konsolidasi rute melalui metode *Milk Run* berbasis CVRP, muatan dari *supplier-supplier* yang sebelumnya terpisah digabungkan ke dalam satu armada hingga batas maksimalnya terpenuhi. Hasil utilisasi pada rute usulan disajikan pada Tabel 21.

Tabel 21. Utilisasi Kapasitas Kendaraan Hasil Rute Usulan (*Milk Run*)

Kode Rute Usulan	Rangkaian Lintasan	Permintaan Terkonsolidasi i	Jenis Armada	Kapasitas Maks Armada	Utilisasi Kapasitas (%)
Rute 1 Plant 1	G > SL (3) > USRA (10) > G	13	CDD/CDE	13	100,00%
Rute 2 Plant 1	G > JAEIL (21) > G	21	Wing Box	22	95,45%
Rute 1 Plant 2	G' > SL (2) > USRA (1) > CGS (1) > DPP (7) > G'	11	CDD/CDE	13	84,62%
Rute 2 Plant 2	G' > JAEIL (22) > G'	22	Wing Box	22	100,00%
Rute 1 (Mingguan)	G > SMI (21) > G	21	Wing Box	22	95,45%
Rute 2 (Mingguan)	G > CGS (8) > G	8	CDD/CDE	13	61,54%

Berdasarkan perbandingan kedua tabel tersebut, persentase utilisasi armada meningkat secara tajam dan eksplisit. Untuk SMI (7 palet 3x seminggu) dikonsolidasikan menjadi 1x pengiriman (21 palet) per siklus menggunakan armada lebih besar (Wing Box). Serta penggabungan muatan SL (3 palet) dan USRA (10 palet) pada Rute 1 Plant 1 berhasil memaksimalkan ruang muat armada CDD menjadi 100% utuh, sekaligus meniadakan keharusan pengoperasian unit Pickup dan unit CDD yang terpisah. Eliminasi perjalanan dengan utilisasi rendah (*undercapacity*) inilah yang secara matematis menyebabkan turunnya jumlah armada yang dikerahkan dari 184 menjadi 92 unit truk per bulan.

Perbandingan komprehensif terhadap seluruh indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators*) logistik disajikan pada Tabel 22.

Tabel 22. Analisis Komparatif Indikator Kinerja Logistik Eksisting dan Usulan *Milk Run VRP*

Indikator Pengukuran	Kondisi Eksisting	Hasil Rute Usulan	Selisih Penghematan	Persentase Efisiensi (%)
Jumlah Frekuensi Armada (Truk/Bulan)	184,00	92,00	92,00	50,00%
Total Jarak Tempuh (km/bulan)	9638,00	5058,20	4579,80	47,52%
Konsumsi Bahan Bakar (liter/bulan)	1721,86	1044,03	677,83	39,37%
Volume Emisi Gas Buang (kg CO ₂ /bulan)	4529,11	2798,00	1731,11	38,22%
Total Biaya Operasional (Rp/bulan)	294.111.744,00	207.000.000,00	87.111.744,00	29,62%

Berdasarkan hasil analisis komparatif pada Tabel 22, penerapan perancangan rute usulan *Milk Run* berbasis VRP diproyeksikan memberikan dampak positif pada tiga aspek utama, berdasarkan hasil perhitungan rute usulan:

Efisiensi Jarak dan Armada Penggabungan titik penjemputan *supplier* (*load consolidation*) berhasil memangkas frekuensi perjalanan truk sebesar 50,00% (berkurang 92 keberangkatan/bulan) dan mengurangi total jarak tempuh bulanan sebesar 47,52% (hemat 4.579,80 km/bulan). Penghematan Biaya Logistik (*Cost Reduction*) Konsolidasi rute berdampak langsung pada penurunan total biaya operasional transportasi sebesar 29,62%, memberikan penghematan finansial bagi PT XYZ sebesar Rp87.111.744 per bulan. Dampak Ramah Lingkungan (*Green Logistics*) Pengurangan jarak tempuh dan optimasi armada mampu menekan konsumsi BBM sebesar 39,37% (hemat 677,83 liter/bulan), yang secara langsung mereduksi emisi karbon dioksida sebesar 38,22% (berkurang 1.731,11 kg CO₂/bulan). Hal ini membuktikan bahwa strategi *Milk Run* tidak hanya efisien secara ekonomi, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis.

Simpulan

Perancangan rute distribusi *Milk Run* berbasis *Vehicle Routing Problem* (VRP) mengombinasikan Algoritma *Nearest Insert* dan *Nearest Neighbor* berhasil mengonsolidasikan pengiriman *supplier* lintas Plant 1 dan Plant 2 ke dalam skema perjalanan multi-drop yang terstruktur. Penerapan rute usulan ini diproyeksikan meningkatkan efisiensi operasional PT XYZ secara signifikan berdasarkan hasil perancangan dan perhitungan, dengan catatan bahwa pengukuran aktual memerlukan tahap *pilot implementation*, ditunjukkan oleh penurunan frekuensi penggunaan armada sebesar 50,00% (dari 184 menjadi 92 trip/bulan), memangkas total akumulasi jarak tempuh sebesar 47,52% (dari 9.638,00 km menjadi 5.058,20 km per bulan), serta efisiensi biaya operasional transportasi sebesar 29,62% yang memberikan penghematan anggaran bagi perusahaan sebesar Rp87.111.744,00 per bulan. Konsolidasi muatan pada rute usulan ini berhasil memaksimalkan tingkat utilisasi kapasitas kendaraan sehingga dapat mengeliminasi perjalanan parsial dan truk tanpa muatan (*empty trip*). Dampak positif penurunan jarak tempuh tersebut berbanding lurus dengan efisiensi energi berupa penurunan konsumsi bahan bakar solar sebesar 39,37% (hemat 677,83 liter/bulan). Efisiensi energi ini berdampak langsung pada perbaikan kualitas lingkungan melalui potensi reduksi emisi CO₂ sebesar 38,22% (berkurang 1.731,11 kg CO₂/bulan), membuktikan bahwa strategi *Milk Run VRP* efektif menciptakan sistem logistik yang efisien secara finansial sekaligus ramah lingkungan.

Untuk manajemen PT XYZ disarankan untuk mengimplementasikan rancangan rute usulan *Milk Run* ini ke dalam operasional distribusi harian guna mengoptimalkan biaya logistik dan menekan jejak karbon perusahaan. Implementasi ini perlu didukung dengan peningkatan koordinasi penjadwalan antara perusahaan dan pihak *supplier* agar proses penjemputan barang berlangsung tepat waktu sesuai dengan alokasi kapasitas kendaraan. Bagi peneliti selanjutnya, pengembangan model disarankan untuk memperluas variabel kendala (constraints) seperti batasan jendela waktu pengiriman (*Time window*) dan dinamika kepadatan lalu lintas jalan raya. Peneliti lanjutan juga dapat mengombinasikan pendekatan *Milk Run VRP* dengan algoritma metaheuristik seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Ant Colony Optimization* (ACO) guna menyelesaikan permasalahan optimasi rute yang lebih kompleks. Selain itu, peneliti lanjutan juga disarankan untuk mengembangkan model menggunakan pendekatan *Multi-Objective Green VRP* agar *trade-off* antara biaya operasional dan minimasi emisi lingkungan dapat terintegrasi secara langsung di dalam fungsi tujuan optimasi.

Daftar Pustaka

- [1] U. S. E. P. Agency, “‘Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions,’ US EPA,” no. May. 2026. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>
- [2] J. Yang, Z. You, W. Li, Y. Zhao, and Z. Ji, “Research on vehicle routing problem of automobile part Milk-Run with time windows constrained,” *E3S Web Conf.*, vol. 512, p. 03018, Apr. 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202451203018.
- [3] R. Yang, “Research on Vehicle Routing Problem in Auto Parts Inbound Logistics Based on Milk Run Mode,” *Front. Business, Econ. Manag.*, vol. 9, no. 2, pp. 262–268, Jun. 2023, doi: 10.54097/fbem.v9i2.9296.
- [4] C. Quan, Q. He, X. Ye, and X. Cheng, “Optimization of the Milk-run route for inbound logistics of auto parts under low-carbon economy,” *J. Algorithm. Comput. Technol.*, vol. 15, Jan. 2021, doi: 10.1177/17483026211065387.
- [5] E. Saputra, “Determination of Performance Indicators For Cooking Oil Logistic Using Fuzzy-Delphi Method,” *Siber J. Transp. Logist.*, vol. 1, no. 1, pp. 13–23, Apr. 2023, doi: 10.38035/sjtl.v1i1.38.
- [6] S. Nagy-Bota and L. Moldovan, “Key Differences and Common Aspects of Logistics and Supply Chain Management,” *Acta Marisiensis. Ser. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 42–46, Jun. 2022, doi: 10.2478/amset-2022-0008.
- [7] D. Dwi Rita Nova and N. Widiastuti, “Pembentukan Karakter Mandiri Anak Melalui Kegiatan Naik Transportasi Umum,” *Comm-Edu (Community Educ. Journal)*, vol. 2, no. 2, p. 113, May 2019, doi: 10.22460/comm-edu.v2i2.2515.
- [8] N. P. Decy Arwini and I. M. Juniastira, “Peran Transportasi Dalam Dunia Industri,” *J. Ilm. Vastuwidya*, vol. 6, no. 1, pp. 70–77, Feb. 2023, doi: 10.47532/jiv.v6i1.794.
- [9] A. B. Marpaung, E. Oey, and R. Nurcahyo, “Mendesain Ulang Strategi Milk Run (Studi Kasus Pada Transportasi Logistik Rantai Dingin),” *INOBISS J. Inov. Bisnis dan Manaj. Indones.*, vol. 5, no. 1, pp. 13–24, Dec. 2021, doi: 10.31842/jurnalinobis.v5i1.208.
- [10] R. Soesilo, A. Valentine, and S. Sulisty, “Praktik Rantai Pasok Berkelanjutan: Penerapan Milk Run di Industri Plastik,” *J. Manaj. Transp. Logistik*, vol. 11, no. 3, p. 217, Nov. 2024, doi: 10.54324/j.mtl.v11i3.1464.
- [11] R. S. Alvariedz, E. T. Berman, and W. Larutama, “Penerapan Milk Run System Berbasis Lean Logistics untuk Efisiensi Distribusi dengan Metode VRP,” *J. Tek. Ind. Terintegrasi*, vol. 8, no. 3, pp. 3696–3706, Jul. 2025, doi: 10.31004/jutin.v8i3.47482.
- [12] E. Fatma, W. Kartika, and A. Nur Madyanti, “Penentuan Rute Pengangkut Limbah Medis Optimal Menggunakan Vehicle Routing Problem with Time Window pada Kasus Multi Depot,” *J. Manaj. dan Organ.*, vol. 13, no. 4, pp. 324–335, Dec. 2022, doi: 10.29244/jmo.v13i4.38587.
- [13] R. S. Utami, R. Arifin, R. D. Lufika, R. Dio, and H. V. S. Manihuruk, “Penerapan Algoritma Evolutionary dan Nearest Neighbor untuk Optimasi Rute Distribusi,” *Go-Integratif J. Tek. Sist. dan Ind.*, vol. 5, no. 02, pp. 84–93, Nov. 2024, doi: 10.35261/gijtsi.v5i02.12518.
- [14] Y. S. Firmansyah, K. Novianingsih, and H. S. Husain, “Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem dengan Menggunakan Gabungan Algoritma Genetika dan Simulated Annealing,” *J. EurekaMatika*, vol. 9, no. 2, pp. 107–116, Dec. 2021, doi: 10.17509/jem.v9i2.40080.
- [15] I. Simanungkalit, S. Sawaluddin, P. Gultom, and P. K. Nasution, “Analysis of The Use of Sweep Algorithms to Solve Capacitated Vehicle Routing Problems,” *FARABI J. Mat. dan Pendidik. Mat.*, vol. 5, no. 2, pp. 161–166, Nov. 2022, doi: 10.47662/farabi.v5i2.416.
- [16] W. Y. Oeitama, W. Y. Oeitama, F. F. Sitandi, and S. Mas’ud, “Optimasi Rute Pendistribusian Barang Menggunakan Kombinasi Algoritma Branch and Bound dan Cheapest Insertion Heuristic,” *Sq. J. Math. Math. Educ.*, vol. 6, no. 2, pp. 89–104, Oct. 2024, doi: 10.21580/square.2024.6.2.22992.

- [17] A. K. Wiramukti, N. A. Permana, S. F. Hidayah, and A. Soimun, "Analisis Efisiensi Distribusi Barang Dengan Pendekatan Saving Matrix Dan Milk Run Di Cv XYZ," *J. Transp.*, vol. 25, no. 2, pp. 169–180, Aug. 2025, doi: 10.26593/jtrans.v25i2.9605.169-180.
- [18] J. D. F. B. Marpaung, F. T. R. Silalahi, and N. M. Manurung, "Optimalisasi Rute Distribusi Menggunakan Metode Eksak Algoritma Branch And Bound," *J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 13, no. 1, pp. 63–75, Oct. 2025, doi: 10.24912/jitiuntar.v13i1.31789.
- [19] A. I. Pratiwi, A. Nindiani, M. Sayuti, and A. Hakim, "Optimalisasi Green Logistics terhadap Rute Pendistribusian Menggunakan Metode Ant Colony dan Fuzzy Logic Di PT AMIP," *J. Res. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 95–107, Jun. 2025, doi: 10.55732/jrt.v11i1.1620.
- [20] H. Vicarlo Saragih Manihuruk, R. Dio, and D. Handayani, "Efisiensi Jarak Tempuh Distribusi Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization pada Permasalahan TSP," *J. Kalibr. Karya Lintas Ilmu Bid. Rekayasa Arsitektur, Sipil, Ind.*, vol. 8, no. 1, pp. 28–35, Mar. 2025, doi: 10.37721/kalibrasi.v8i1.1614.
- [21] U. N. Harahap, Y. S. D. Daulay, and Z. Zaharuddin, "Penentuan Rute Distribusi Menggunakan Metode Saving Matrix untuk Meminimalkan Biaya Transportasi pada UMKM Gerai Kimia di Kec. Namorambe," *J. Optim.*, vol. 10, no. 1, p. 1, Apr. 2024, doi: 10.35308/jopt.v10i1.8653.
- [22] M. N. Helmi, Y. Yogaswara, B. Andryanto, R. R. Asri, and W. Setyawan, "Pendekatan Terpadu pada Perancangan Rute Distribusi untuk Meminimasi Biaya Transportasi," *J. Media Tek. dan Sist. Ind.*, vol. 9, no. 2, pp. 152–164, Sep. 2025, doi: 10.35194/jmtsi.v9i2.5663.
- [23] F. HUMAMI, M. Julianti, and P. Rusmandani, "Analisis Emisi Gas Buang Kendaraan Komersial Berdasarkan Tipe Karakteristik Kendaraan Bermotor," *J. Permadi Perancangan, Manufaktur, Mater. dan Energi*, vol. 6, no. 01, pp. 48–59, Jan. 2024, doi: 10.52005/permadi.v6i01.141.
- [24] A. Basyari and H. Pranoto, "Review : Catalitic Converter Berbahan Tembaga (Cu) Dan Kuningan / Brass (Cuzn) Untuk Mereduksi Karbon Monoksida (Co) Dan Hidrokarbon (Hc) Emisi Gas Buang Pada Kendaraan Bermotor," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 1, Jun. 2024, doi: 10.24127/trb.v13i1.3077.
- [25] J. O. Muladi, K. Kristiansyah Dezzano, A. Febrianto, A. C. Kurniawan, N. Ruswandi, and A. A. N. P. Redi, "Optimasi Rute Kapal untuk Distribusi Spare Parts Menggunakan Vehicle Routing Problem dengan Algoritma Tabu Search," *Go-Integratif J. Tek. Sist. dan Ind.*, vol. 1, no. 01, pp. 1–10, Nov. 2020, doi: 10.35261/gijtsi.v1i01.4316.
- [26] M. C. Sugiono, "Model vehicle routing problem untuk penentuan rute distribusi unit sepeda motor dengan metode saving matrix," *J. Ind. Serv.*, vol. 7, no. 2, p. 230, Mar. 2022, doi: 10.36055/jiss.v7i2.14018.
- [27] A. Chandra and B. Setiawan, "Optimasi Jalur Distribusi dengan Metode Vehicle Routing Problem (VRP) Optimizing the Distribution Routes Using Vehicle Routing Problem (VRP) Method," vol. 05, no. 02, pp. 105–116, doi: //doi.org/10.54324/j.mtl.v5i2.233.