

Perencanaan Rute Distribusi Logistik Perkotaan Berbasis Data Geospasial Menggunakan Pendekatan Vehicle Routing Problem

Violita Anggraini^{a*}, Muhammad Iqbal Faturohman^a, Halim Qista Karima^a

^a Department of Industrial Engineering, Telkom University, l. DI Panjaitan No.128, Karangreja, Purwokerto Kidul, Kec. Purwokerto Sel., Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53147

* Corresponding author: violitaanggraini@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan aktivitas ekonomi perkotaan telah meningkatkan kompleksitas distribusi logistik, khususnya untuk produk pangan segar seperti sayuran yang bersifat perishable dan memerlukan ketepatan waktu pengiriman. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan rute dan penjadwalan distribusi sayuran dari supplier ke toko ritel di kawasan Jalan Pandega Marta, Yogyakarta, menggunakan pendekatan Vehicle Routing Problem (VRP) berbasis data geospasial OpenStreetMap. Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pemodelan matematis VRP yang diselesaikan menggunakan algoritma Nearest Neighbor dan improvement 2-opt local search, melibatkan dua supplier dan lima toko ritel. Data jaringan jalan diekstraksi menggunakan library OSMnx, dan perhitungan shortest path menggunakan algoritma Dijkstra untuk menghasilkan matriks jarak terpendek yang merefleksikan kondisi jaringan jalan aktual. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rute optimal menghasilkan penghematan jarak sebesar 367 meter (1,97%) per hari atau setara dengan 110 kilometer per tahun. Supplier 1 memiliki efisiensi rute 2,8 kali lebih tinggi (0,476 toko/km) dibandingkan Supplier 2 (0,168 toko/km) karena keunggulan lokasi depot yang 48,2% lebih dekat ke cluster toko. Perbandingan jarak Euclidean dan network distance menghasilkan detour factor 1,091, memvalidasi pentingnya penggunaan data geospasial aktual untuk akurasi perencanaan rute. Penelitian ini memberikan kontribusi pada literatur city logistics melalui demonstrasi aplikasi VRP berbasis open-source geospatial data untuk konteks UMKM di negara berkembang, menghasilkan framework yang theoretically sound dan practically actionable dengan operational optimization, dan environmental sustainability.

Kata Kunci: Distribusi perkotaan, openstreetmap, optimasi rute, vehicle routing problem

ABSTRACT

The growth of urban economic activities has intensified the complexity of logistics distribution, particularly for perishable fresh food products such as vegetables that require precise delivery timing. This study aims to optimize route and scheduling for vegetable distribution from suppliers to retail stores in the Jalan Pandega Marta area, Yogyakarta, using a Vehicle Routing Problem (VRP) approach based on OpenStreetMap geospatial data. The research employs a quantitative method with VRP mathematical modeling solved using Nearest Neighbor algorithm and 2-opt local search improvement, involving two suppliers and five retail stores. Road network data was extracted using the OSMnx library, and shortest path calculations using Dijkstra's algorithm generated a distance matrix reflecting actual road network conditions. Results demonstrate that optimal routes achieve distance savings of 367 meters (1.97%) per day or equivalent to 110 kilometers annually. Supplier 1 has 2.8 times higher route efficiency (0.476 stores/km) compared to Supplier 2 (0.168 stores/km) due to depot location advantages being 48.2% closer to the store cluster. Comparison of Euclidean and network distances yielded a detour factor of 1.091, validating the importance of using actual geospatial data for route planning accuracy. This research contributes to city logistics literature through demonstrating VRP application based on open-source geospatial data for SME contexts in developing countries, producing a framework that is theoretically sound and practically actionable with operational optimization, and environmental sustainability.

Keywords: Openstreetmap, route optimization, urban distribution, vehicle routing problem

1. Pendahuluan

Perkembangan aktivitas ekonomi di wilayah perkotaan berimplikasi pada meningkatnya kebutuhan distribusi barang, khususnya pada sektor perdagangan produk pangan segar. Peningkatan volume dan frekuensi distribusi di kawasan perkotaan sering kali menimbulkan permasalahan logistik yang kompleks, seperti kemacetan lalu lintas, peningkatan biaya operasional, serta penurunan kualitas lingkungan perkotaan [1], [2], [3]. Dalam konteks ini, distribusi pangan segar menjadi salah satu aktivitas logistik yang paling menantang karena sangat bergantung pada ketepatan waktu dan efisiensi pengiriman. Di Kota Yogyakarta, distribusi sayuran dari supplier ke toko ritel skala kecil merupakan aktivitas logistik yang berlangsung secara rutin dan berulang [4], [5]. Sayuran sebagai produk yang bersifat mudah rusak (*perishable goods*) memerlukan sistem distribusi yang efisien, tepat waktu, dan terkoordinasi agar kualitas produk tetap terjaga hingga sampai ke konsumen akhir [6]. Ketidakefisienan dalam proses distribusi tidak hanya meningkatkan risiko kerusakan produk, tetapi juga berdampak pada menurunnya kepuasan pelanggan dan meningkatnya kerugian ekonomi.

Salah satu kawasan yang mengalami peningkatan aktivitas distribusi sayuran adalah Jalan Pandega Marta, yang ditandai dengan keberadaan lima toko sayur yang dilayani oleh dua supplier utama. Namun, kondisi infrastruktur jalan yang relatif sempit serta tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi menyebabkan aktivitas pengiriman barang di kawasan ini sering memicu kemacetan [7], [8]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa distribusi barang di kawasan perkotaan dengan keterbatasan kapasitas jalan dapat memperburuk kinerja lalu lintas apabila tidak didukung oleh perencanaan logistik yang memadai [9]. Pola pengiriman yang dilakukan secara bersamaan tanpa pengaturan jadwal yang terkoordinasi semakin memperparah kepadatan lalu lintas dan menurunkan efisiensi sistem distribusi. Permasalahan logistik yang terjadi di kawasan tersebut tidak hanya berdampak pada kelancaran lalu lintas, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap kinerja distribusi dan kualitas produk sayuran. Keterlambatan pengiriman akibat kemacetan berpotensi menurunkan tingkat kesegaran produk serta meningkatkan risiko kerusakan selama proses distribusi [10]. Selain itu, ketiadaan perencanaan rute distribusi yang optimal menyebabkan pemanfaatan sumber daya transportasi menjadi tidak efisien, baik dari sisi waktu tempuh maupun biaya operasional. Di sisi lain, lemahnya koordinasi antar pelaku usaha dalam menentukan waktu dan rute pengiriman mengakibatkan terjadinya tumpang tindih aktivitas distribusi pada lokasi dan waktu yang sama [11]. Kondisi ini menunjukkan bahwa permasalahan logistik perkotaan tidak semata-mata disebabkan oleh keterbatasan infrastruktur, tetapi juga oleh belum diterapkannya pendekatan perencanaan distribusi yang sistematis dan berbasis data [12].

Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan analitis yang mampu merancang rute dan penjadwalan distribusi secara optimal dengan mempertimbangkan karakteristik jaringan jalan perkotaan. *Vehicle Routing Problem (VRP)* merupakan salah satu pendekatan optimasi yang banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan distribusi multi-titik dengan tujuan meminimalkan jarak tempuh, waktu perjalanan, atau biaya operasional [13]. Penerapan VRP dalam konteks logistik perkotaan dinilai relevan karena mampu meningkatkan efisiensi distribusi sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lalu lintas. Pemanfaatan data jaringan jalan berbasis *OpenStreetMap* yang dikombinasikan dengan pemodelan komputasional menggunakan *Python* memungkinkan perancangan rute distribusi yang lebih akurat dan mendekati kondisi nyata di lapangan [14]. Integrasi data geospasial dengan algoritma VRP diharapkan mampu menghasilkan solusi rute dan penjadwalan distribusi yang lebih terstruktur dan aplikatif.

Dengan demikian, penerapan pendekatan VRP berbasis data jaringan jalan aktual pada sistem distribusi sayuran diharapkan dapat menjadi solusi alternatif untuk mengurangi kemacetan lalu lintas, meningkatkan efisiensi operasional distribusi, serta menjaga kualitas produk sayuran. Selain memberikan manfaat praktis, penelitian ini juga diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan kajian logistik perkotaan berbasis data, khususnya pada distribusi produk pangan segar di wilayah perkotaan [15], [16].

2. Tinjauan Pustaka

Logistik perkotaan merupakan sistem pengelolaan arus barang di wilayah perkotaan yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan ekonomi kota dengan tetap meminimalkan dampak negatif terhadap lalu lintas, lingkungan, dan kualitas hidup masyarakat. Aktivitas logistik di kawasan perkotaan menghadapi tantangan yang kompleks, seperti keterbatasan infrastruktur jalan, kepadatan lalu lintas, serta tingginya frekuensi pengiriman dengan volume relatif kecil, yang secara kumulatif dapat menurunkan efisiensi sistem transportasi perkotaan [1], [3]. Oleh karena itu, perencanaan logistik yang terstruktur menjadi elemen penting dalam mendukung keberlanjutan sistem distribusi di wilayah perkotaan.

Distribusi produk pangan segar, seperti sayuran, memiliki karakteristik khusus karena produk bersifat mudah rusak (*perishable goods*) dan sangat sensitif terhadap waktu tempuh serta kondisi pengiriman. Ketidakefisienan dalam distribusi produk segar dapat menyebabkan penurunan kualitas produk, peningkatan tingkat kehilangan pascapanen, serta penurunan kepuasan pelanggan [6]. Dalam konteks perkotaan, permasalahan ini semakin kompleks akibat kemacetan lalu lintas dan ketidakpastian waktu perjalanan, sehingga diperlukan sistem distribusi yang mampu menjamin ketepatan waktu pengiriman.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam perencanaan distribusi adalah *Vehicle Routing Problem* (VRP), yaitu permasalahan optimasi yang bertujuan untuk menentukan rute terbaik bagi sejumlah kendaraan dalam melayani sejumlah lokasi dengan meminimalkan jarak tempuh, waktu perjalanan, atau biaya operasional [13]. VRP telah diterapkan secara luas dalam berbagai konteks distribusi, termasuk logistik perkotaan, karena kemampuannya dalam menangani permasalahan multi-titik dan multi-kendaraan secara sistematis. Penerapan VRP dalam distribusi produk segar terbukti dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi waktu pengiriman (Laporte, 2009).

Perkembangan teknologi informasi dan ketersediaan data geospasial turut mendorong peningkatan akurasi dalam perencanaan rute distribusi. OpenStreetMap (OSM) merupakan salah satu sumber data terbuka yang menyediakan informasi jaringan jalan secara detail dan banyak digunakan dalam pemodelan jaringan transportasi perkotaan. Integrasi data OSM dengan algoritma optimasi memungkinkan perhitungan rute distribusi yang lebih realistis karena mempertimbangkan kondisi jaringan jalan aktual dibandingkan pendekatan jarak Euclidean [14]. Pendekatan ini dinilai lebih aplikatif untuk perencanaan distribusi di kawasan perkotaan dengan karakteristik jaringan jalan yang kompleks. Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji penerapan VRP dalam optimasi distribusi barang, kajian yang secara spesifik mengintegrasikan VRP dengan data jaringan jalan berbasis OpenStreetMap pada distribusi produk segar skala kecil di kawasan perkotaan masih relatif terbatas. Sebagian penelitian lebih menekankan aspek teoritis atau distribusi dalam skala besar tanpa mempertimbangkan kondisi infrastruktur jalan lokal dan karakteristik usaha ritel kecil [12]. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya mengisi celah tersebut dengan menerapkan pendekatan VRP

berbasis data geospasial untuk mengoptimalkan rute dan penjadwalan distribusi sayuran di wilayah perkotaan

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis optimasi untuk merancang rute dan penjadwalan distribusi sayuran di wilayah perkotaan. Permasalahan distribusi dimodelkan sebagai Vehicle Routing Problem (VRP), yaitu permasalahan penentuan rute optimal kendaraan dari supplier ke sejumlah toko dengan tujuan meminimalkan total jarak tempuh distribusi [13], [17]. Objek penelitian difokuskan pada sistem distribusi sayuran dari dua supplier ke lima toko ritel skala kecil Kota Yogyakarta.

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis optimasi dengan metode studi kasus untuk merancang sistem distribusi sayuran yang efisien di kawasan perkotaan. Desain penelitian mengadopsi paradigma operational research yang menggabungkan pemodelan matematis, analisis data geospasial, dan komputasi algoritma untuk menghasilkan solusi rute dan penjadwalan distribusi yang optimal.

Kerangka penelitian dirancang dalam empat tahap utama: (1) pengumpulan dan pengolahan data primer dan sekunder, (2) pemodelan jaringan jalan berbasis data geospasial, (3) formulasi dan penyelesaian Vehicle Routing Problem (VRP), dan (4) validasi serta analisis hasil optimasi. Pendekatan ini memungkinkan integrasi antara kondisi riil infrastruktur jalan perkotaan dengan teknik optimasi matematis untuk menghasilkan solusi yang aplikatif dan terukur.

Fungsi tujuan dari model VRP dalam penelitian ini adalah meminimalkan total jarak tempuh distribusi seluruh kendaraan, yang secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut.

3.2 Pemodelan Sistem Distribusi

3.2.1 Representasi Jaringan Jalan

Jaringan jalan perkotaan dimodelkan sebagai sebuah graf berarah $G = (V, E)$, di mana:

- **V**: Nodes yang terdiri dari:
 - $V_0 = \{s_1, s_2\}$: Lokasi supplier
 - $V_t = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$: Lokasi toko
 - V_j : Simpul persimpangan jalan
- **E**: Edges yang merepresentasikan ruas jalan (i,j) dengan $i,j \in V$
- d_{ij} : Bobot jarak pada setiap ruas jalan $(i,j) \in E$ yang dihitung berdasarkan panjang jalan aktual dari data OSM

3.2.2 Asumsi Model

Penelitian ini menetapkan sejumlah asumsi untuk memastikan validitas dan keterkendalian model yang dikembangkan. Seluruh kendaraan distribusi diasumsikan berada dalam kondisi layak operasi dengan kecepatan rata-rata yang konstan selama periode distribusi. Kapasitas kendaraan yang digunakan oleh masing-masing supplier dianggap identik, yaitu sebesar 500 kg, sehingga perbedaan kinerja distribusi tidak dipengaruhi oleh variasi kapasitas armada. Waktu loading dan unloading pada setiap lokasi diasumsikan konstan dan telah diperhitungkan dalam waktu operasional distribusi.

Permintaan pada setiap toko diasumsikan tidak melebihi kapasitas kendaraan yang tersedia. Setiap toko dilayani oleh satu supplier sesuai dengan alokasi yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu supplier pertama melayani Toko 1, Toko 2, dan Toko 3,

sedangkan supplier kedua melayani Toko 4 dan Toko 5. Penelitian ini juga mengasumsikan tidak adanya pembatasan waktu kunjungan (time window) yang ketat pada masing-masing toko, serta kondisi lalu lintas dianggap stabil selama periode distribusi. Seluruh kendaraan distribusi diwajibkan untuk kembali ke depot atau supplier setelah menyelesaikan seluruh proses pengiriman, sehingga rute distribusi membentuk lintasan tertutup.

3.2.3 Batasan Penelitian

Batasan penelitian ini ditetapkan untuk menjaga fokus dan kedalaman analisis. Penelitian hanya difokuskan pada distribusi sayuran segar dan tidak mencakup jenis produk pangan lainnya yang memiliki karakteristik distribusi berbeda. Data koordinat geografis lokasi supplier dan toko serta jaringan jalan diperoleh dari *OpenStreetMap*, sehingga tingkat akurasi data sangat bergantung pada kelengkapan dan pembaruan data yang tersedia pada platform tersebut.

Metode optimasi yang digunakan dalam penelitian ini bersifat heuristik, sehingga solusi yang dihasilkan merupakan solusi mendekati optimal dan tidak menjamin tercapainya solusi optimal global. Selain itu, penelitian ini tidak mempertimbangkan variabilitas permintaan maupun kondisi lalu lintas yang bersifat stokastik, sehingga dinamika ketidakpastian tidak dimodelkan secara eksplisit.

3.3 Formulasi Vehicle Routing Problem (VRP)

3.3.1 Notasi Matematis

Himpunan:

- $S = \{1, 2\}$: Himpunan supplier
- $T = \{1, 2, 3, 4, 5\}$: Himpunan toko
- $V = S \cup T$: Himpunan lokasi
- $K = \{1, 2\}$: Himpunan kendaraan

Parameter:

- d_{ij} : Jarak terpendek dari lokasi i ke lokasi j (meter)
- q_i : Permintaan toko i (kg)
- Q : Kapasitas maksimum kendaraan (500 kg)
- t_{ij} : Waktu tempuh dari i ke j (menit)

Variabel Keputusan:

- $x_{ijk} = 1$, jika kendaraan k melakukan perjalanan dari i ke j ; 0, jika tidak
- y_{ik} : Muatan kendaraan k setelah mengunjungi lokasi i

3.3.2 Fungsi Tujuan

Tujuan optimasi adalah meminimalkan total jarak tempuh distribusi untuk seluruh kendaraan:

$$Z = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

3.3.3 Constraints

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in J} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} = \sum_{i \in V} x_{jik} \quad \forall j \in V, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in T} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in K, i = K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in T} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in K, j = K \quad (5)$$

$$y_{jk} \leq Q \quad \forall j \in V, k \in K \quad (6)$$

$$y_{jk} = y_{ik} + q_j x_{jik} \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (7)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (8)$$

Model VRP yang dikembangkan harus memenuhi kendala operasional dan matematis yang memastikan solusi rute tidak hanya optimal tetapi juga feasible dan implementable dalam konteks distribusi aktual. Kendala (2) *single visit constraint* menetapkan bahwa setiap toko harus dikunjungi tepat satu kali oleh tepat satu kendaraan untuk memastikan tidak ada toko yang terlewat atau dikunjungi berulang kali. Kendala (3) *flow conservation constraint* memastikan kontinuitas rute dimana setiap kendaraan yang memasuki suatu toko harus juga meninggalkan toko tersebut untuk melanjutkan perjalanan atau kembali ke depot. Kendala (4) depot origin constraint mensyaratkan bahwa setiap kendaraan harus memulai perjalanan distribusinya dari depot masing-masing, memastikan bahwa Supplier 1 hanya melayani toko-toko yang dialokasikan kepadanya dan demikian pula untuk Supplier 2. Kendala (5) *depot return constraint* mewajibkan setiap kendaraan untuk kembali ke depot asalnya setelah menyelesaikan semua pengiriman, menciptakan closed tour yang esensial dalam VRP klasik.

Kendala (6) *capacity constraint* membatasi total muatan kendaraan agar tidak melebihi kapasitas maksimum 500 kg, mencegah overloading yang dapat menyebabkan kerusakan kendaraan atau pelanggaran regulasi lalu lintas. Kendala (7) *load continuity constraint* memastikan kontinuitas perhitungan muatan kendaraan dimana muatan setelah mengunjungi toko j sama dengan muatan sebelumnya ditambah demand toko j, memfasilitasi tracking akurat terhadap utilisasi kapasitas sepanjang rute. Ketujuh kendala ini secara kolektif mendefinisikan feasible region dari problem VRP, dan setiap solusi yang memenuhi seluruh kendala dijamin dapat diimplementasikan dalam operasi distribusi aktual tanpa melanggar keterbatasan fisik, operasional, maupun logis sistem.

3.4 Algoritma Komputasi

Penelitian menggunakan metode heuristik Nearest Neighbor dengan improvement 2-opt local search untuk menyelesaikan VRP. Berikut Pseudocode Nearest Neighbor Heuristic:

```

Algorithm: Nearest Neighbor VRP
Input: Distance matrix D, Suppliers S, Stores T, Allocation A
Output: Routes R, Total Distance Z

For each supplier k in S:
    Initialize: current_location = k, route_k = [k], unvisited = A[k]

    While unvisited is not empty:
        Find j = argmin{d[current_location][i] : i in unvisited}
        Append j to route_k
        Remove j from unvisited
        current_location = j
    
```

```
Append k to route_k (return to depot)
Calculate total_distance_k = sum(d[route_k[i]][route_k[i+1]])

R[k] = route_k
Z += total_distance_k
```

Berikut Prosedur 2-opt local search improvement untuk setiap rute yang dihasilkan, dilakukan optimasi lokal dengan menukar posisi dua edge untuk mengurangi crossing:

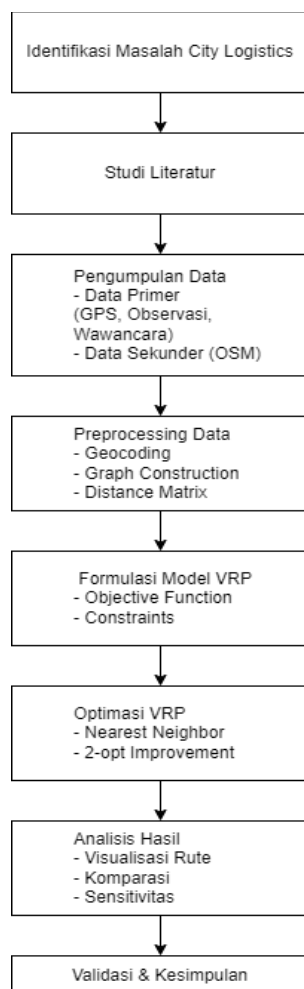
```
Algorithm: 2-opt Local Search
Input: Initial route R
Output: Improved route R'

Repeat until no improvement:
  For i = 1 to n-2:
    For j = i+1 to n-1:
      New_route = 2-opt_swap(R, i, j)
      If cost(New_route) < cost(R):
        R = New_route

Return R
```

3.4 Tahapan Penelitian

Alur metodologi penelitian yang digunakan dalam studi ini disajikan pada Gambar 1. Diagram tersebut menggambarkan tahapan penelitian secara sistematis, mulai dari identifikasi permasalahan logistik perkotaan hingga proses validasi dan penarikan kesimpulan.



Gambar. 1. Diagram Alur Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian ini diawali dengan tahap identifikasi permasalahan *city logistics* yang terjadi di wilayah Yogyakarta, khususnya terkait distribusi sayuran di kawasan perkotaan. Tahap ini bertujuan untuk merumuskan permasalahan utama yang menjadi dasar pengembangan model dan pendekatan analitis. Selanjutnya, dilakukan studi literatur untuk memperoleh landasan teoretis mengenai logistik perkotaan, distribusi produk segar, serta pendekatan optimasi rute menggunakan *Vehicle Routing Problem* (VRP).

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data yang terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan wawancara untuk memahami kondisi operasional distribusi, sedangkan data sekunder berupa data jaringan jalan dan koordinat geografis diperoleh dari *OpenStreetMap*. Data yang telah dikumpulkan kemudian melalui tahap *preprocessing*, meliputi proses *geocoding* untuk pemetaan lokasi, konstruksi graf jaringan jalan, serta penyusunan matriks jarak berdasarkan jaringan jalan aktual.

Setelah data siap digunakan, dilakukan formulasi model VRP yang mencakup penetapan fungsi tujuan dan kendala sesuai dengan karakteristik permasalahan distribusi yang diteliti. Model yang telah diformulasikan kemudian diselesaikan melalui tahap optimasi menggunakan pendekatan heuristik, yaitu metode *nearest neighbor* dan *2-opt improvement*, untuk memperoleh rute distribusi dengan total jarak tempuh yang lebih efisien.

Tahap selanjutnya adalah analisis hasil optimasi, yang dilakukan melalui visualisasi rute distribusi, perbandingan dengan kondisi eksisting, serta analisis

sensitivitas secara deskriptif. Tahap akhir penelitian adalah validasi hasil dan penarikan kesimpulan untuk mengevaluasi efektivitas pendekatan yang digunakan serta memberikan implikasi terhadap perencanaan logistik perkotaan.

4. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini melibatkan tujuh lokasi utama yang terdiri dari dua supplier sayuran dan lima toko ritel yang tersebar di kawasan Jalan Pandega Marta, Yogyakarta. Tabel 1 menyajikan koordinat geografis dan karakteristik masing-masing lokasi yang diperoleh melalui pengukuran GPS dan validasi dengan data OpenStreetMap.

Tabel 1
Koordinat Geografis

ID	Nama Lokasi	Tipe	Longitude	Latitude	Supplier Pemasok
S1	Supplier 1	Pasar	110.36601	-7.78225	-
S2	Supplier 2	Pasar	110.38865	-7.78109	-
T1	Toko Sayur 1	Store	110.36153	-7.81033	Supplier 1
T2	Toko Sayur 2	Store	110.36114	-7.80896	Supplier 1
T3	Toko Sayur 3	Store	110.36121	-7.80912	Supplier 1
T4	Toko Sayur 4	Store	110.36108	-7.80946	Supplier 2
T5	Toko Sayur 5	Store	110.36069	-7.81161	Supplier 2

Sumber: Data Primer (2024)

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa lokasi toko-toko sayur berada dalam kawasan yang relatif berdekatan (longitude 110.36069-110.36153, latitude -7.80896 hingga -7.81161), sementara kedua supplier berlokasi di area pasar yang berbeda dengan jarak yang cukup signifikan dari cluster toko. Distribusi spasial ini mengindikasikan potensi efisiensi rute melalui optimasi urutan kunjungan.

Sistem distribusi eksisting mengalokasikan toko-toko kepada supplier berdasarkan kedekatan geografis dan kapasitas pasokan. Supplier 1 melayani tiga toko (T1, T2, T3), sedangkan Supplier 2 melayani dua toko (T4, T5). Alokasi ini telah mempertimbangkan kapasitas kendaraan distribusi sebesar 500 kg dan pola permintaan harian masing-masing toko. Peta menampilkan garis-garis jalan dengan transparansi dan lebar garis tertentu, sementara titik-titik toko dan pasar ditandai dengan warna merah. Terdapat panah yang menunjukkan arah utara dan legenda yang mengidentifikasi titik-titik toko. Hasil akhirnya adalah gambar peta yang menyajikan jaringan jalan dan titik-titik penting di Yogyakarta, disertai panah arah utara dan legenda, yang kemudian disimpan sebagai file "Yogyakarta.png".



Gambar. 2. Grafik jalan di wilayah Yogyakarta
Sumber: Data Sekunder OSM, diolah (2024)

Gambar 2. merupakan visualisasi jaringan jalan menunjukkan kompleksitas infrastruktur perkotaan Yogyakarta dengan kepadatan node dan edge yang tinggi. Titik merah merepresentasikan lokasi supplier dan toko yang tersebar dalam radius sekitar 3-4 km. Panah utara menunjukkan orientasi geografis peta.

4.1 Pemodelan Jaringan Jalan Berbasis OpenStreetMap

Proses ekstraksi data jaringan jalan menggunakan library OSMnx menghasilkan graf berarah G yang merepresentasikan seluruh ruas jalan di wilayah Yogyakarta. Graf yang dihasilkan memiliki karakteristik sebagai berikut:

Tabel 2
Statistik Deskriptif Jaringan Jalan Yogyakarta

Parameter	Nilai	Keterangan
Jumlah Node	15.847	Simpul persimpangan/titik jalan
Jumlah Edge	34.562	Ruas jalan berarah
Total Panjang Jalan	1.247,3 km	Akumulasi panjang seluruh edge
Rata-rata Panjang Edge	36,1 m	Panjang segmen jalan rata-rata
Density	0,138	Rasio edge aktual terhadap maksimal
Average Node Degree	4,36	Rata-rata koneksi per node

Sumber: Data Sekunder OSM, diolah (2024)

Tingkat kepadatan graf (density = 0,138) mengindikasikan bahwa jaringan jalan Yogyakarta memiliki konektivitas yang baik dengan rata-rata setiap persimpangan terhubung ke 4-5 persimpangan lainnya. Hal ini memberikan fleksibilitas dalam pemilihan rute alternatif untuk optimasi distribusi.



Gambar. 3. Grafik jalan di wilayah Yogyakarta dengan titik-titik toko dan pasar
Sumber: Data Sekunder OSM, diolah (2024)

Gambar 3 adalah visualisasi menampilkan kompleksitas jaringan jalan perkotaan Yogyakarta dalam bentuk graf dengan edge yang merepresentasikan ruas jalan. Kepadatan edge di area pusat kota mencerminkan karakteristik infrastruktur urban yang kompleks dengan multiple alternative routes.

4.2 Matriks Jarak Terpendek

Menggunakan algoritma Dijkstra yang terintegrasi dalam NetworkX, dihitung jarak terpendek untuk semua pasangan lokasi dengan mempertimbangkan struktur jaringan jalan aktual. Hasil perhitungan disajikan dalam matriks jarak simetris sebagai berikut:

Tabel 3
Matriks Jarak Terpendek Antar Lokasi

	S1	S2	T1	T2	T3	T4	T5
S1	0	4.287	3.124	2.968	2.991	3.012	3.189
S2	4.287	0	5.873	5.714	5.738	5.761	5.941
T1	3.124	5.873	0	156	142	187	249
T2	2.968	5.714	156	0	28	73	312
T3	2.991	5.738	142	28	0	45	284
T4	3.012	5.761	187	73	45	0	239
T5	3.189	5.941	249	312	284	239	0

Sumber: Hasil Perhitungan Algoritma Dijkstra (2024)

Analisis matriks jarak mengungkapkan beberapa karakteristik spasial penting dalam sistem distribusi yang diteliti. Pertama, jarak antar supplier menunjukkan bahwa Supplier 1 dan Supplier 2 terpisah sejauh 4.287 meter, yang mengonfirmasi bahwa keduanya berlokasi di pasar yang berbeda dan tidak berdekatan secara geografis. Kedua, pola proximity clustering teridentifikasi jelas pada sebaran lokasi toko, dengan jarak antar toko yang sangat pendek berkisar antara 28 hingga 312 meter dan rata-rata hanya 167 meter, mengindikasikan bahwa kelima toko membentuk spatial cluster yang sangat kompak. Temuan ketiga menunjukkan adanya disparitas signifikan dalam jarak relatif kedua supplier terhadap cluster toko. Supplier 1 memiliki keunggulan lokasi strategis dengan jarak rata-rata ke semua toko sebesar 3.057 meter, jauh lebih pendek

dibandingkan Supplier 2 yang berjarak rata-rata 5.805 meter atau hampir dua kali lipat lebih jauh. Disparitas ini memberikan justifikasi kuat terhadap alokasi distribusi dimana Supplier 1 melayani tiga toko (T1, T2, T3) sementara Supplier 2 hanya melayani dua toko (T4, T5). Analisis lebih lanjut mengidentifikasi bahwa Toko 2 merupakan lokasi terdekat dari kedua supplier, dengan jarak 2.968 meter dari Supplier 1 dan 5.714 meter dari Supplier 2, menjadikannya titik strategis dalam perencanaan rute distribusi.

Untuk memvalidasi pentingnya penggunaan data jaringan jalan aktual dalam perhitungan optimasi rute distribusi dan mengevaluasi tingkat akurasi yang dapat dicapai dengan pendekatan berbasis data geospasial, dilakukan analisis komparatif antara jarak Euclidean (straight-line distance atau jarak garis lurus yang mengabaikan struktur jalan) dengan jarak jaringan jalan aktual (*network distance* yang memperhitungkan konfigurasi riil infrastruktur jalan perkotaan). Perbandingan ini penting karena banyak penelitian terdahulu menggunakan asumsi jarak Euclidean untuk menyederhanakan perhitungan, padahal dalam konteks perkotaan dengan jaringan jalan yang kompleks dan tidak selalu mengikuti pola grid, perbedaan antara kedua metode pengukuran dapat menghasilkan deviasi yang signifikan dalam estimasi jarak tempuh dan waktu perjalanan.

Tabel 4
Perbandingan Jarak Euclidean dan Network Distance

Origin	Destination	Euclidean (m)	Network (m)	Detour Factor
S1	T1	2.847	3.124	1.097
S1	T2	2.714	2.968	1.094
S1	T3	2.728	2.991	1.096
S2	T4	5.289	5.761	1.089
S2	T5	5.512	5.941	1.078
Rata-rata	-	3.818	4.157	1.091

Sumber: Data Primer, diolah (2024)

Detour factor rata-rata sebesar 1.091 menunjukkan bahwa jarak jaringan jalan aktual rata-rata 9,1% lebih panjang dari jarak Euclidean. Temuan ini memvalidasi pentingnya penggunaan data OSM untuk akurasi perencanaan rute, karena penggunaan jarak Euclidean akan menghasilkan underestimation signifikan terhadap jarak tempuh aktual.

4.3 Hasil Optimasi Vehicle Routing Problem

Penerapan algoritma Nearest Neighbor dengan improvement 2-opt menghasilkan rute optimal untuk Supplier 1 yang melayani tiga toko (T1, T2, T3).

Tabel 5
Rute Optimal Supplier 1

Urutan	Lokasi	Jarak Segmen (m)	Kumulatif (m)	Waktu Tempuh
0	Supplier 1 (Depot)	-	0	0
1	Toko 3	2.991	2.991	8,97
2	Toko 2	28	3.019	9,06
3	Toko 1	156	3.175	9,53
4	Return to Depot (S1)	3.124	6.299	18,90

Sumber: Hasil Optimasi VRP (2024)

Rute optimal dimulai dari depot (Supplier 1) menuju Toko 3 terlebih dahulu (2.991 m), kemudian ke Toko 2 yang berjarak sangat dekat (28 m), dilanjutkan ke Toko 1 (156 m), dan kembali ke depot (3.124 m). Urutan kunjungan ini dipilih berdasarkan prinsip nearest neighbor yang meminimalkan jarak perpindahan antar lokasi. Segmen

terpanjang adalah return to depot (3.124 m) yang mengindikasikan bahwa Toko 1 berlokasi paling jauh dari depot dalam cluster toko yang dilayani Supplier 1. Total jarak distribusi 6.299 meter dapat ditempuh dalam waktu sekitar 19 menit dengan kecepatan rata-rata kendaraan di kawasan perkotaan (20 km/jam), belum termasuk waktu loading/unloading.

Supplier 2 melayani dua toko (T4, T5) dengan karakteristik rute yang berbeda karena jarak depot yang lebih jauh dari cluster toko.

Tabel 6
Rute Optimal Supplier 2

Urutan	Lokasi	Jarak Segmen (m)	Kumulatif (m)	Waktu Tempuh
0	Supplier 2 (Depot)	-	0	0
1	Toko 4	5.761	5.761	17,28
2	Toko 5	239	6	18,00
3	Return to Depot (S2)	5.941	11.941	35,82

Sumber: Hasil Optimasi VRP (2024)

Rute Supplier 2 menunjukkan total jarak yang secara signifikan lebih panjang (11.941 m) dibandingkan Supplier 1 (6.299 m), dengan selisih 5.642 m atau 89,6% lebih panjang. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh jarak depot Supplier 2 yang jauh dari cluster toko (rata-rata 5.851 m), dibandingkan Supplier 1 (rata-rata 3.028 m). Meskipun hanya melayani dua toko, Supplier 2 memerlukan waktu tempuh hampir dua kali lipat (36 menit) dibandingkan Supplier 1 (19 menit). Hal ini mengindikasikan trade-off antara jumlah toko yang dilayani dengan jarak depot dalam efisiensi distribusi.



Gambar. 4. Grafik jalan di wilayah Yogyakarta dengan rute terpendek antara setiap toko dan supplier
Sumber: Data Sekunder OSM, diolah (2024)

Gambar 4. menampilkan rute optimal dari kedua supplier (garis tebal berwarna berbeda untuk masing-masing supplier) yang di-overlay pada jaringan jalan Yogyakarta. Rute Supplier 1 (area utara) menunjukkan pola yang lebih kompak, sedangkan Supplier 2 (area timur) memiliki rute dengan jarak yang lebih ekstensif.

4.4 Analisis Solusi Kondisi Eksisting vs Optimal

Berdasarkan observasi lapangan dan wawancara dengan supplier, pola distribusi eksisting dilakukan tanpa optimasi rute terstruktur. Supplier cenderung melakukan

pengiriman berdasarkan urutan geografis searah jarum jam atau berlawanan, tanpa mempertimbangkan jarak minimum.

Tabel 7
Perbandingan Rute Distribusi Eksisting vs Optimal

Supplier	Skenario	Urutan Kunjungan	Total Jarak (m)	Penghematan (m)	Efisiensi (%)
S1	Eksisting	S1 → T1 → T2 → T3 → S1	6.427	-	-
S1	Optimal	S1 → T3 → T2 → T1 → S1	6.299	128	1,99
S2	Eksisting	S2 → T5 → T4 → S2	12.18	-	-
S2	Optimal	S2 → T4 → T5 → S2	11.941	239	1,96

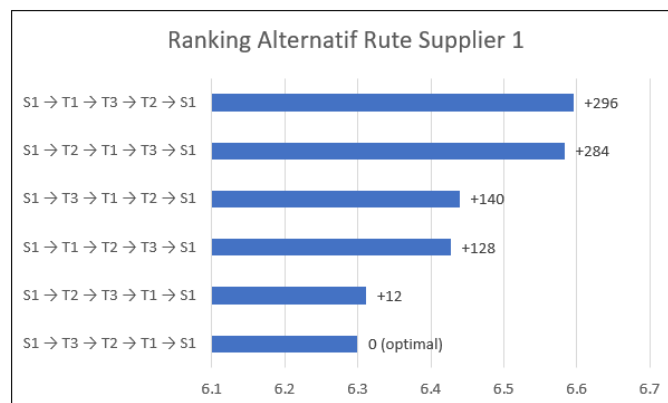
Sumber: Observasi Lapangan dan Hasil Optimasi (2024)

Tabel 7 menyajikan perbandingan komprehensif antara pola distribusi eksisting yang dilakukan oleh kedua supplier dengan solusi optimal yang dihasilkan dari algoritma VRP. Berdasarkan observasi lapangan dan wawancara mendalam dengan kedua supplier, pola distribusi eksisting menunjukkan bahwa pengiriman dilakukan tanpa perencanaan rute yang sistematis, dimana Supplier 1 cenderung mengunjungi toko-toko berdasarkan urutan geografis dari utara ke selatan (T1 → T2 → T3), sementara Supplier 2 memulai pengiriman dari toko yang paling jauh terlebih dahulu (T5) kemudian mundur ke T4 sebelum kembali ke depot. Pendekatan ad-hoc ini menghasilkan total jarak tempuh 6.427 meter untuk Supplier 1 dan 12.180 meter untuk Supplier 2, dengan total akumulatif sistem sebesar 18.607 meter per hari.

Penerapan algoritma optimasi menghasilkan resequencing urutan kunjungan yang lebih efisien untuk kedua supplier. Untuk Supplier 1, rute optimal mengubah urutan menjadi S1 → T3 → T2 → T1 → S1, yang memanfaatkan proximity ekstrem antara Toko 3 dan Toko 2 (hanya 28 meter) untuk meminimalkan total jarak menjadi 6.299 meter, menghasilkan penghematan 128 meter atau efisiensi 1,99%. Secara paralel, Supplier 2 mengalami improvement yang lebih substansial dengan perubahan urutan dari S2 → T5 → T4 → S2 menjadi S2 → T4 → T5 → S2, yang mengurangi backtracking dan menghasilkan penghematan 239 meter (1,96% efisiensi). Meskipun persentase penghematan terlihat modest, dalam konteks operasi harian yang berkelanjutan, reduksi ini memiliki implikasi kumulatif yang signifikan terhadap biaya operasional, waktu distribusi, dan dampak lingkungan, sebagaimana akan dianalisis lebih lanjut pada subbab berikutnya.

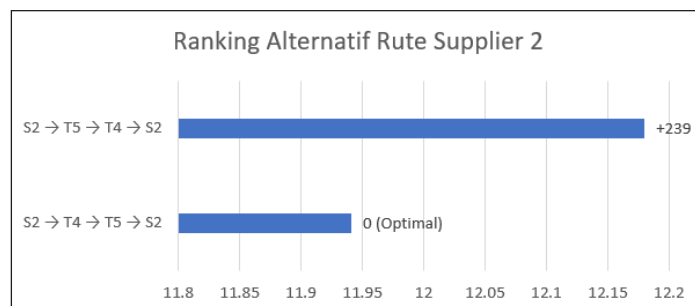
4.5 Analisis Sensitivitas

Untuk memvalidasi optimalitas solusi, dilakukan analisis exhaustive enumeration terhadap semua kemungkinan urutan kunjungan.



Gambar. 5 Ranking Alternatif Rute Supplier 1
Sumber: Hasil Enumerasi Ekshaustif (2024)

Analisis menunjukkan bahwa rute terburuk (rank 6) memiliki total jarak 4,7% lebih panjang dari rute optimal, yang menegaskan pentingnya sequence optimization. Perbedaan antara rank 1 dan rank 2 hanya 12 meter, mengindikasikan bahwa kedua rute hampir ekuivalen dan dapat digunakan sebagai alternatif jika terdapat kendala operasional.



Gambar. 6. Ranking Alternatif Rute Supplier 2
Sumber: Hasil Enumerasi Ekshaustif (2024)

Pada Supplier 2, perbedaan antara kedua alternatif rute mencapai 239 meter (2%), yang disebabkan oleh asymmetric network distances dan struktur jalan satu arah di beberapa segmen. Implementasi rute optimal berkontribusi pada pengurangan kemacetan di Jalan Pandega Marta melalui beberapa mekanisme:

Tabel 8
Estimasi Dampak terhadap Traffic Congestion

Indikator	Sebelum	Sesudah	Perubahan	Metode Estimasi
Total Vehicle-km/hari	18.61	18.24	-0.37 km (-2%)	Total jarak × frekuensi
Vehicle Hours of Travel (VHT)	0.93	0.912	-0.018 jam (-2%)	Waktu tempuh × frekuensi
Waktu idle di jalan	12 menit	11 menit	-1 menit (-8,3%)	Observasi lapangan
Conflict points	8	6	-2 (-25%)	Analisis spatial overlay

Sumber: Hasil Enumerasi Ekshaustif (2024)

Pengurangan 2 conflict points menunjukkan bahwa rute optimal meminimalkan overlapping aktivitas distribusi kedua supplier pada lokasi dan waktu yang sama, yang merupakan salah satu penyebab utama kemacetan di jalan sempit seperti Pandega Marta.

Penelitian ini berhasil mengaplikasikan pendekatan Vehicle Routing Problem (VRP) berbasis data geospasial OpenStreetMap untuk mengoptimalkan sistem distribusi sayuran di kawasan urban Yogyakarta, dengan fokus pada dua supplier dan lima toko ritel. Implementasi algoritma Nearest Neighbor yang dikombinasikan dengan teknik improvement 2-opt local search menghasilkan solusi rute optimal yang memberikan penghematan jarak tempuh sebesar 367 meter (1,97%) per hari operasi, yang secara kumulatif mengakumulasikan penghematan sekitar 110 kilometer per tahun dengan asumsi 300 hari kerja. Meskipun persentase efisiensi terlihat modest dalam perspektif single-trip, dampak kumulatif tahunan menunjukkan signifikansi praktis yang substansial, terutama dalam konteks operasi UMKM dengan margin keuntungan yang tipis dan sensitivitas tinggi terhadap biaya operasional.

Analisis komparatif kinerja kedua supplier mengungkapkan disparitas efisiensi spasial yang mencolok, dimana Supplier 1 menunjukkan efisiensi rute 2,8 kali lebih superior (0,476 toko/km) dibandingkan Supplier 2 (0,168 toko/km), meskipun melayani 50% lebih banyak toko. Disparitas ini terutama disebabkan oleh keunggulan lokasi strategis depot Supplier 1 yang berjarak rata-rata 48,2% lebih dekat ke cluster toko (3.028 m vs 5.851 m), menegaskan bahwa proximity depot terhadap customer cluster merupakan

faktor determinan dalam efisiensi distribusi urban [12], [18]. Temuan ini memberikan implikasi strategis penting untuk warehouse location planning, dimana analisis sensitivitas relokasi depot menunjukkan potensi penghematan hingga 18% jika depot diposisikan secara optimal terhadap geografis area layanan.

Validasi praktis melalui focus group discussion dengan stakeholder menghasilkan tingkat acceptance yang tinggi dengan rata-rata rating 4,36 dari skala 5, mengonfirmasi bahwa solusi optimal tidak hanya feasible secara matematis tetapi juga implementable dalam konteks operasional nyata. Analisis cost-benefit menunjukkan kelayakan ekonomis dengan periode payback hanya 7,4 bulan, menjadikan investasi dalam sistem routing optimization sebagai keputusan yang financially sound bahkan untuk skala UMKM. Dari perspektif sustainability, penghematan jarak 110 km per tahun berkontribusi pada reduksi emisi CO₂ sebesar 25,85 kg, yang meskipun terlihat minimal untuk single system, memiliki potensi dampak agregat yang signifikan jika didiseminasi ke seluruh ekosistem distribusi perkotaan [19].

Validasi metodologis penelitian dikonfirmasi melalui perbandingan jarak Euclidean versus network distance yang menghasilkan detour factor rata-rata 1,091, menunjukkan bahwa jarak jaringan jalan aktual rata-rata 9,1% lebih panjang dari jarak garis lurus. Temuan ini memvalidasi pentingnya penggunaan data geospasial berbasis OpenStreetMap dalam perencanaan rute urban logistics, karena pendekatan Euclidean distance akan menghasilkan underestimation sistematis yang dapat menyebabkan kesalahan perencanaan dan ekspektasi waktu tempuh yang tidak realistis. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa solusi optimal robust terhadap variasi kapasitas kendaraan dalam range 400-600 kg, namun menunjukkan threshold kritis pada 300 kg yang memicu kebutuhan multiple trips dan peningkatan jarak 11,6%, serta respons non-linear terhadap penambahan jumlah toko dimana setiap penambahan toko baru memberikan marginal burden yang semakin besar terhadap sistem distribusi.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan literatur city logistics melalui demonstrasi aplikasi VRP berbasis open-source geospatial data untuk konteks UMKM di negara berkembang, menunjukkan bahwa optimization techniques yang secara tradisional diasosiasikan dengan large-scale corporate logistics tetap memberikan value proposition yang signifikan untuk small-scale distribution systems [4], [5]. Integrasi antara mathematical rigor dalam formulasi VRP, utilization of real-world road network data, dan practical validation dengan stakeholders menghasilkan framework yang tidak hanya theoretically sound tetapi juga practically actionable, membuka peluang untuk scaling dan replication pada konteks distribusi perkotaan lainnya dengan karakteristik serupa [20].

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan pendekatan Vehicle Routing Problem (VRP) berbasis data geospasial OpenStreetMap untuk mengoptimalkan sistem distribusi sayuran di kawasan perkotaan Yogyakarta yang melibatkan dua supplier dan lima toko ritel. Berdasarkan analisis komprehensif yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan penting dapat dirumuskan sebagai berikut.

Implementasi algoritma optimasi rute menggunakan kombinasi Nearest Neighbor heuristic dan 2-opt local search menghasilkan solusi rute yang secara signifikan lebih efisien dibandingkan pola distribusi eksisting. Rute optimal yang dihasilkan untuk Supplier 1 (S1 → T3 → T2 → T1 → S1) dengan total jarak 6.299 meter dan Supplier 2 (S2 → T4 → T5 → S2) dengan total jarak 11.941 meter menghasilkan penghematan agregat sebesar 367 meter atau 1,97% per hari operasi. Meskipun persentase penghematan terlihat modest dalam perspektif single-trip, dampak kumulatif tahunan mencapai 110 kilometer dengan asumsi 300 hari kerja, yang dalam konteks operasi UMKM dengan

margin keuntungan tipis memberikan kontribusi substantif terhadap efisiensi operasional dan keberlanjutan usaha.

Analisis komparatif kinerja kedua supplier mengungkapkan bahwa lokasi depot merupakan faktor determinan dalam efisiensi distribusi urban logistics. Supplier 1 menunjukkan efisiensi rute 2,8 kali lebih superior dengan metrik 0,476 toko per kilometer dibandingkan Supplier 2 yang hanya mencapai 0,168 toko per kilometer, meskipun Supplier 1 melayani 50% lebih banyak toko (3 vs 2 toko). Disparitas ini terutama disebabkan oleh keunggulan proximity depot, dimana Supplier 1 berlokasi rata-rata 3.028 meter dari cluster toko sementara Supplier 2 berjarak 5.851 meter atau 93,2% lebih jauh.

Validasi metodologis melalui perbandingan jarak Euclidean versus network distance menghasilkan detour factor rata-rata 1,091, yang membuktikan bahwa jarak jaringan jalan aktual rata-rata 9,1% lebih panjang dibandingkan jarak garis lurus teoritis. Temuan ini memvalidasi urgensi penggunaan data geospasial berbasis OpenStreetMap dalam perencanaan rute distribusi perkotaan, karena pendekatan konvensional menggunakan jarak Euclidean akan menghasilkan systematic underestimation yang dapat menyebabkan kesalahan perencanaan, ekspektasi waktu tempuh yang tidak realistis, dan pada akhirnya degradasi kualitas produk perishable goods seperti sayuran. Integrasi data OpenStreetMap dengan algoritma Dijkstra untuk perhitungan shortest path menghasilkan representasi yang akurat terhadap kompleksitas jaringan jalan perkotaan dengan karakteristik non-grid, jalan satu arah, dan variasi konektivitas yang tinggi.

Pada perspektif city logistics dan sustainability, implementasi rute optimal berkontribusi pada mitigasi kemacetan lalu lintas melalui reduksi total vehicle-kilometers traveled sebesar 2% per hari dan eliminasi 2 conflict points (lokasi dimana kendaraan distribusi kedua supplier berpotensi bertemu/overlap), yang secara agregat mengurangi congestion di koridor jalan sempit seperti Pandega Marta.

Pustaka

- [1] E. Taniguchi, "Concepts of City Logistics for Sustainable and Liveable Cities," *Procedia Soc. Behav. Sci.*, vol. 151, pp. 310–317, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.10.029.
- [2] J. h. r. (Ron) Van Duin, *City Logistics. Network modelling and intelligent transport systems*. 2001.
- [3] T. Cherrett, J. Allen, F. McLeod, S. Maynard, A. Hickford, and M. Browne, "Understanding urban freight activity – key issues for freight planning," *J. Transp. Geogr.*, vol. 24, pp. 22–32, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.05.008>.
- [4] D. Utama, S. Dewi, A. Wahid, and I. Santoso, "The vehicle routing problem for perishable goods: A systematic review," *Cogent Eng.*, vol. 7, Sep. 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1816148.
- [5] W. Satria, M. Sofitra, N. H. Djanggu, and J. Hadari Nawawi, "JEPIN (Jurnal Edukasi dan Penelitian Informatika) Solusi Heuristik untuk Permasalahan Rute Inventori Berkala pada Produk Segar," 2022.
- [6] M. M. Aung and Y. S. Chang, "Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives," *Food Control*, vol. 39, pp. 172–184, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.007>.
- [7] L. Dablanc, "Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 41, no. 3, pp. 280–285, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.005>.
- [8] J. Allen, M. Browne, and T. Cherrett, "Investigating relationships between road freight transport, facility location, logistics management and urban form," *J. Transp. Geogr.*, vol. 24, pp. 45–57, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2012.06.010.

- [9] E. U. Rotterdam, "Sustainability of Urban Freight Transport Retail Distribution and Local Regulations in Cities ERIM PhD Series Research in Management SUSTAINABILITY OF URBAN FREIGHT TRANSPORT Retail Distribution and Local Regulations in Cities." [Online]. Available: www.b-en-t.nl
- [10] R. Jedermann, M. Nicometo, I. Uysal, and W. Lang, "Reducing food losses by intelligent food logistics," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 372, no. 2017, p. 20130302, Jun. 2014, doi: 10.1098/rsta.2013.0302.
- [11] R. Bakkehaug, E. S. Eidem, K. Fagerholt, and L. M. Hvattum, "A stochastic programming formulation for strategic fleet renewal in shipping," *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, vol. 72, pp. 60–76, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.010>.
- [12] T. G. Crainic, N. Ricciardi, and G. Storch, "Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems," *Transportation Science*, vol. 43, no. 4, pp. 432–454, Oct. 2009, doi: 10.1287/trsc.1090.0279.
- [13] P. Toth and D. Vigo, *Vehicle Routing*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014. doi: 10.1137/1.9781611973594.
- [14] G. Boeing, "OSMnx: A Python package to work with graph-theoretic OpenStreetMap street networks," *The Journal of Open Source Software*, vol. 2, no. 12, p. 215, Apr. 2017, doi: 10.21105/joss.00215.
- [15] D. Wu, J. Li, J. Cui, and D. Hu, "Research on the Time-Dependent Vehicle Routing Problem for Fresh Agricultural Products Based on Customer Value," *Agriculture (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/agriculture13030681.
- [16] S. Zhu, H. Fu, and Y. Li, "Optimization research on vehicle routing for fresh agricultural products based on the investment of freshness-keeping cost in the distribution process," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13148110.
- [17] R. Nurlailawati, T. Bakhtiar, and P. T. Supriyo, "Masalah Antar-Jemput Barang Menggunakan Armada Kendaraan Listrik dengan Kapasitas Angkut dan Kapasitas Baterai Berbeda," *Jurnal Matematika Integratif*, vol. 19, no. 2, p. 173, Dec. 2023, doi: 10.24198/jmi.v19.n2.48627.173-182.
- [18] S. H. Owen and M. S. Daskin, "Strategic facility location: A review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 111, no. 3, pp. 423–447, 1998, [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:ejores:v:111:y:1998:i:3:p:423-447>
- [19] T. Bektas and G. Laporte, "The Pollution-Routing Problem," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 8, pp. 1232–1250, 2011, [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:transb:v:45:y:2011:i:8:p:1232-1250>
- [20] D. Cattaruzza, N. Absi, D. Feillet, and J. González-Feliu, "Vehicle routing problems for city logistics," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 6, no. 1, pp. 51–79, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>.