

Optimasi Rute Pengangkutan Sampah di Buay Madang Timur Menggunakan Graf Siklus dan Metode Sektoral

Siti Fatikhatul Mardiyah^{1*}, Amanah Yulianti¹, Annisa Nur Azizah¹

¹ Universitas Nurul Huda

*E-mail: fatihatulbmt@gmail.com

Abstrak

Penentuan rute distribusi di wilayah Buay Madang Timur saat ini masih mengandalkan intuisi pengemudi, sehingga sering memicu pemborosan jarak, waktu, dan konsumsi bahan bakar. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan rute distribusi tersebut guna meminimalkan total jarak tempuh menggunakan pendekatan Teori Graf (*Graph Theory*). Dalam pemodelan ini, lokasi tujuan direpresentasikan sebagai simpul (*vertex*) dan jaringan jalan sebagai sisi (*edge*) dengan bobot berupa jarak. Melalui metode ini, dilakukan pencarian rute terpendek (*shortest route*) dari depot menuju seluruh titik lokasi. Hasil penelitian ini memberikan usulan rute baru yang lebih efisien, serta menampilkan persentase penurunan total jarak dan waktu tempuh dibandingkan dengan rute aktual di lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan pemodelan graf siklus searah jarum jam (*clockwise circuit*) berbasis metode sektor ini mampu mengoptimalkan rute secara signifikan, dengan tingkat efisiensi jarak tempuh mencapai 48,89% jika dibandingkan dengan rute konvensional existing."

Kata kunci: Teori Graf, Rute Terpendek, Distribusi, Optimasi, Buay Madang Timur

Abstract

Distribution routing in the Buay Madang Timur region currently relies on drivers' intuition, often leading to wasted distance, time, and fuel consumption. This study aims to optimize these distribution routes to minimize the total travel distance using a Graph Theory approach. In this modeling, destination locations are represented as vertices and the road network as edges with weights based on distance. Through this method, the shortest route from the depot to all locations is determined. The results provide a more efficient proposed route and demonstrate the percentage reduction in total distance and travel time compared to the actual routes in the field. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan pemodelan graf siklus searah jarum jam (clockwise circuit) berbasis metode sektor ini mampu mengoptimalkan rute secara signifikan, dengan tingkat efisiensi jarak tempuh mencapai 48,89% jika dibandingkan dengan rute konvensional existing."

Keywords: *Graph Theory, Shortest Route, Distribution, Optimization, Buay Madang Timur*

PENDAHULUAN

Penelitian mengenai manajemen limbah domestik telah banyak dikembangkan, di mana analisis karakteristik dan volume timbulan sampah mengacu pada standar nasional [4]. Dalam menentukan efisiensi jalur, pemodelan jaringan transportasi berbasis teori graf terbukti efektif dalam meminimalkan biaya operasional [8], sementara integrasi data spasial digital digunakan untuk memetakan koordinat objek secara akurat [12]."

Permasalahan penentuan rute armada dikenal luas sebagai bagian dari Vehicle Routing Problem (VRP). Tujuan utama dari varian VRP ini adalah meminimalkan jarak tempuh dan total waktu perjalanan [1], serta mengoptimalkan jumlah armada hingga fungsi biaya transportasi secara keseluruhan [3], [16]. Berbagai penelitian terdahulu telah banyak mengkaji optimasi rute logistik ini dengan beragam metode operasional riset. Sebagai contoh, penelitian pada jaringan pengangkutan sampah di Kota Lamongan berhasil mengoptimalkan rute armada menggunakan metode Saving Matrix demi meminimalkan keterjarakan rute serta menekan konsumsi bahan bakar operasional [5]. Selain itu,

studi kasus pada sektor ekspedisi komersial yang mengelola mobilisasi kendaraan angkut antar-agen dipetakan berdasarkan karakteristik VRP wilayah [9], seperti yang terjadi pada jaringan agensi komersial di kota-kota besar [11]. Untuk memecahkan komputasi lintasan terbaik pada jaringan agen komersial tersebut, metode metaheuristik seperti Ant Colony Optimization (ACO) kerap diimplementasikan sebagai teknik probabilitas pencarian rute terpendek yang efisien [2], [6], [14]. Meskipun metode *Saving Matrix* maupun *Ant Colony Optimization* efektif untuk wilayah perkotaan yang padat, model matematis yang berfokus pada struktur jaringan jalan tetap krusial untuk wilayah berkembang seperti Buay Madang Timur. Saat ini, wilayah tersebut menghadapi kompleksitas distribusi akibat area geografis yang luas, banyaknya titik pelayanan, and keterbatasan armada [13]. Di lapangan, perencanaan jalur distribusi masih mengandalkan intuisi dan pengalaman pengemudi tanpa adanya rute baku yang pasti. Akibatnya, armada sering menempuh jarak yang terlalu jauh, yang memicu pemborosan waktu, penurunan efisiensi kerja, serta pembengkakan biaya bahan bakar [7], [10]. Jika tidak ditangani secara sistematis, kendala logistik ini akan terus menurunkan kualitas pelayanan dan memperbesar beban finansial operasional.

Untuk mengatasi celah permasalahan tersebut, diperlukan adanya perancangan atau perbaikan yang sistematis pada sektor distribusi melalui penentuan rute terpendek (*shortest route distribution*). Pendekatan matematis yang dinilai sangat relevan untuk merepresentasikan masalah perutean jaringan jalan raya ini adalah Teori Graf (*Graph Theory*). Melalui pemodelan graf, setiap titik pelayanan atau lokasi kunjungan di wilayah Buay Madang Timur akan diabstraksikan sebagai simpul (*vertex*), sedangkan jalur atau jalan raya yang menghubungkan antar-lokasi akan digambarkan sebagai sisi (*arc* atau *edge*) yang memiliki bobot riil berupa keterjarakan fisik [15]. Salah satu pemodelan rute graf yang terbukti efektif dikembangkan di wilayah Ogan Komering Ulu (OKU) Timur adalah penentuan rute lintasan dengan pendekatan jarak optimal [17]. Implementasi Teori Graf ini memungkinkan dilakukannya pencarian kombinasi jalur alternatif secara eksak dan terukur guna menghasilkan lintasan perjalanan yang paling minimum.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan rute terbaik dalam pendistribusian dan pelayanan di wilayah Buay Madang Timur menggunakan Teori Graf agar dapat meminimalkan jarak serta total waktu pengiriman. Batasan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada pemodelan jaringan jalan di wilayah Buay Madang Timur, dengan posisi depot awal yang telah ditentukan, serta kondisi permintaan pada tiap titik pelayanan dianggap stabil [3].

METODE PENELITIAN

Optimasi pengangkutan sampah di Kecamatan Buay Madang Timur ini dimulai dengan estimasi volume timbunan sampah harian dan observasi lapangan, terutama yang berkaitan dengan kondisi *existing* dan identifikasi permasalahan pengangkutan sampah yang dihadapi, mulai dari depo pusat menuju ke TPS dan kembali lagi ke depo pusat. Semua depo pusat dan lokasi TPS didata detailnya dengan menggunakan aplikasi spasial digital Google Maps. Demikian pula dengan rute pengangkutan sampahnya. Termasuk dalam observasi ini adalah rute pengangkutan, pengumpulan dokumentasi kondisi fisik bak pengumpul, serta pencatatan jarak tempuh aktual yang dibutuhkan untuk mengangkut semua sampah yang terkumpulkan di seluruh koridor wilayah pelayanan menuju Depo Pusat Kantor Camat BK 4.

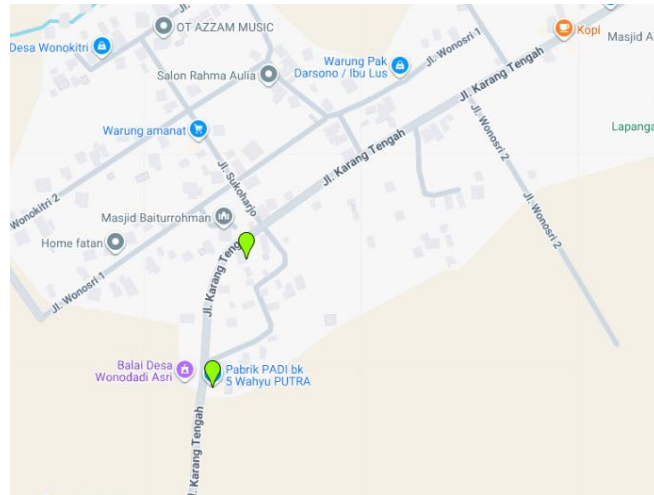
Masalah perutean jaringan ini diselesaikan menggunakan pendekatan Teori Graf (*Graph Theory*) untuk mendapatkan jalur distribusi yang paling efisien. Metode ini dipilih karena lintasan tunggal *existing* tidak efisien dan wilayah pelayanan yang luas, sehingga pemodelan sikit searah jarum jam (*clockwise circuit*) dan metode sektoral dianggap paling baik untuk diterapkan.

a) Sampling Timbunan Sampah

Sampling dilakukan sesuai standar SNI 19-3964-1994 pada koridor pelayanan utama Kecamatan Buay Madang Timur. Pendataan ini bertujuan mengetahui pola volume dan berat timbunan sampah harian, yang nantinya disesuaikan dengan kapasitas tampung maksimum armada truk yang tersedia.

b) Pemodelan Teori Graf

Pembentukan rute usulan disesuaikan dengan keadaan nyata di lapangan. Langkahnya dimulai dengan mengubah lokasi Depo Pusat Kantor Camat BK 4 dan seluruh titik Tempat Pembuangan Sementara (TPS) menjadi elemen simpul (*vertex*), serta jalan sebagai sisi (*edge*) berbobot jarak.



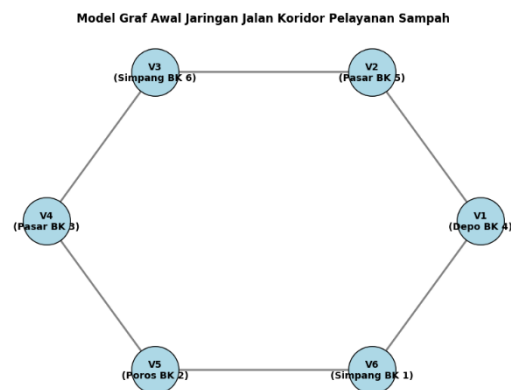
Gambar 1. Peta Sebaran Lokasi Depo dan TPS Sampah di Kecamatan Buay Madang Timur

Peta Sebaran Lokasi Depo dan TPS di Kecamatan Buay Madang Timur di atas menunjukkan Visualisasi data spasial pada sebaran fasilitas pelayanan sampah di Kecamatan Buay Madang Timur yang mengikuti jalur jalan poros utama lintas Blok Komerling (BK). Operasional armada berpusat di Depo Utama Kantor Camat BK 4, dengan wilayah pelayanan yang terbagi ke dua arah, yaitu Sektor Utara (BK 5 dan BK 6) serta Sektor Selatan (BK 3, BK 2, dan BK 1). Pola sebaran yang memanjang menyebabkan rute pengangkutan konvensional menjadi tidak efisien akibat jarak tempuh yang terlalu panjang dalam sekali jalan.

c) Formulasi Matematis Model Graf

Representasi jaringan jalan utama pelayanan sampah di Kecamatan Buay Madang Timur ke dalam Teori Graf diformulasikan secara matematis melalui pasangan himpunan $G = (V, E)$ di mana:

1. V merupakan himpunan tidak kosong dari simpul-simpul (*vertices*) yang merepresentasikan titik stasioner di lapangan, didefinisikan sebagai $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$. Dalam hal ini, v_1 adalah Depo Pusat Kantor Camat BK 4, sedangkan v_2 hingga v_6 adalah titik-titik TPS Blok Komerling [1], [3].
2. E merupakan himpunan sisi (*edges*) yang merepresentasikan segmen jaringan jalan utama yang menghubungkan antar-TPS, didefinisikan sebagai $E = \{v_i, v_j\} | v_i, v_j \in V$ [15].
3. W merupakan matriks bobot (*weight*) yang menyatakan jarak tempuh aktual (dalam satuan kilometer) antar simpul v_i dan v_j , sehingga setiap sisi memiliki nilai bobot positif $w(v_i, v_j) > 0$ [2], [14]. Pendekatan pengukuran jarak lintasan transportasi pada wilayah Ogan Komerling Ulu (OKU) Timur ini terbukti dapat dimodelkan secara matematis untuk mencari rute alternatif yang optimal [17].



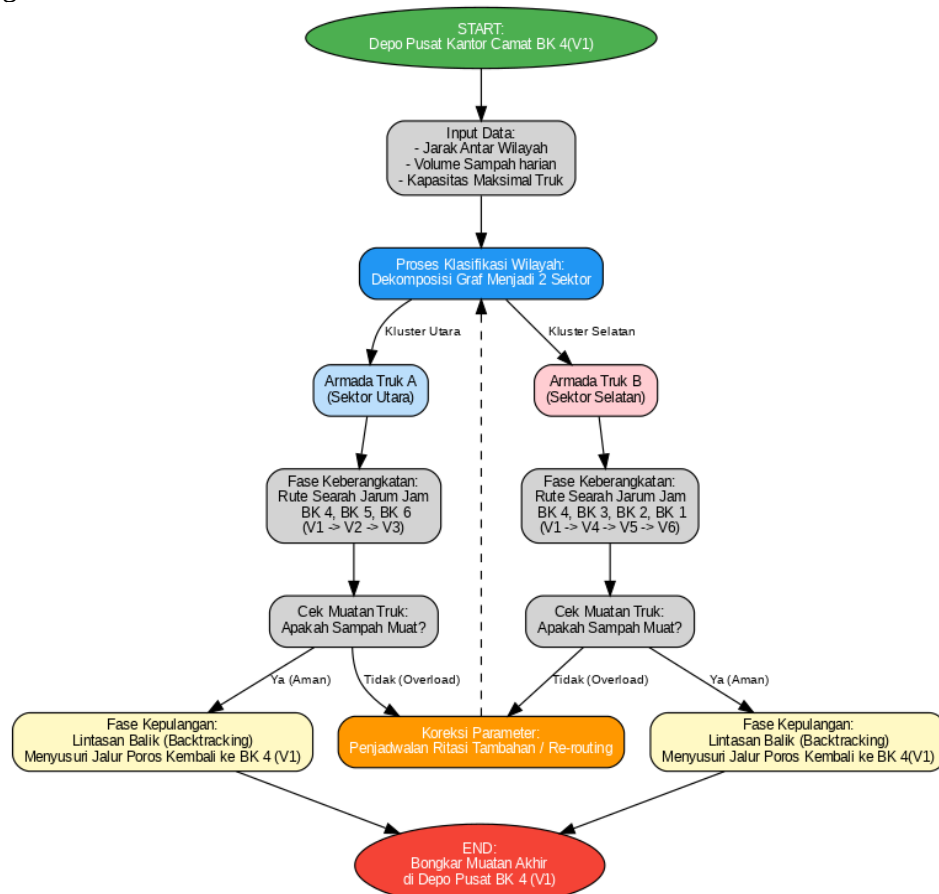
Gambar 2. Pemodelan Graf Awal Jaringan Jalan Koridor Sampah

Pemodelan Graf Awal Jaringan Jalan Utama Pelayanan Sampah, Berdasarkan Gambar 2, peta spasial wilayah pelayanan telah ditransformasikan ke dalam bentuk model graf awal sebelum dilakukan optimasi. Lingkaran atau simpul V_1 mewakili Depo Pusat Kantor Camat BK 4 sebagai titik awal dan akhir pergerakan, sedangkan simpul V_2 sampai V_6 mewakili titik Tempat Pembuangan Sementara (TPS) di setiap wilayah Blok Komerling (BK). Garis tanpa panah yang menghubungkan antar-simpul mencerminkan seluruh jaringan jalan utama *existing* yang membentuk satu siklus lintasan tunggal terputus. Model graf awal inilah yang menjadi dasar untuk mengukur total jarak tempuh konvensional sebelum dilakukan pembagian sektor rute yang baru.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Permasalahan pengelolaan sampah di Kecamatan Buay Madang Timur, erat kaitannya dengan ketidakseimbangan volume sampah harian yang tidak sesuai dengan kapasitas operasional armada pengangkut. Berdasarkan data awal, wilayah pelayanan utama yang mencakup enam koridor Blok Komerling (BK) yaitu wilayah pemukiman dan komersial di sekitar Pasar Sukoharjo (BK 5), Simpang Kedu (BK 6), Pasar Kurungan Nyawa (BK 3), Poros Karang Tengah (BK 2), dan Simpang Sri Katon (BK 1) memiliki total populasi sebaran sebesar 18.450 jiwa. Berdasarkan estimasi standar SNI 19-3964-1994 dengan koefisien timbulan sampah kecamatan sebesar 2,0 liter/orang/hari, total volume sampah harian yang dihasilkan di koridor ini mencapai $36,9 \text{ m}^3$ /hari atau setara dengan berat total 7,38 ton/hari.

Timbunan Sampah yang cukup besar dan hanya dikelola menggunakan sistem rute konvensional berbentuk lintasan tunggal (*single-route system*). Pemerintah daerah menyiapkan dua unit armada berupa *dump truck* dengan kapasitas bak masing-masing sebesar $6,0 \text{ m}^3$ dan batas tonase maksimum 4.000 kg. Pada sistem eksisting, satu buah armada dipaksa menyisir seluruh simpul secara berurutan dari ujung selatan hingga ujung utara. keterbatasan kapasitas volume bak truk yang hanya $6,0 \text{ m}^3$ tidak mampu mengurangi total timbulan wilayah yang mencapai $36,9 \text{ m}^3$ dalam sekali jalan, sehingga diperlukan frekuensi ritasi yang tinggi dan memicu keterlambatan pengangkutan di simpul-simpul terujung.



Gambar 3. Diagram Alur Simulasi Rute Sektoral

Gambar di atas mengilustrasikan diagram alur terstruktur dari simulasi pergerakan armada pengangkutan sampah di Kecamatan Buay Madang Timur. Pemrosesan data dan keputusan operasional dalam model ini dikelompokkan ke dalam beberapa tahapan kendali utama meliputi:"

1. Inisialisasi dan Input Data: Tahap awal simulasi dimulai dari Depo Pusat yang berlokasi di Kantor Camat BK 4 (V_1). Sistem mengintegrasikan seluruh parameter input data sekunder yang meliputi bobot jarak antar wilayah, estimasi volume timbunan sampah harian di setiap titik pengumpulan, serta batas kapasitas maksimal truk pengangkut yang digunakan.
2. Dekomposisi Sektoral (Klasifikasi Wilayah): Untuk menghindari tumpang tindih rute tunggal yang tidak efisien, graf jaringan pelayanan didekomposisi atau dipecah menjadi dua kluster independen, yaitu Armada Truk A untuk Sektor Utara dan Armada Truk B untuk Sektor Selatan. Proses segmentasi rute ini krusial untuk mengisolasi beban muatan harian agar sirkuit logistik berjalan lebih teratur.
3. Fase Keberangkatan (*Clockwise Circuit*): Setiap armada bergerak secara simultan menyusuri koridor wilayah masing-masing dengan menerapkan aturan rute searah jarum jam (*clockwise direction*). Armada Sektor Utara melayani sirkuit koridor BK 4, BK 5, dan BK 6 untuk mengosongkan muatan dari $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3$ sedangkan Armada Sektor Selatan melayani lintasan sirkuit $V_1 \rightarrow V_4 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6$.
4. Pengujian Kendala Kapasitas (*Fitness Evaluation*): Pada setiap sirkuit pelayanan, dilakukan pengecekan muatan armada (*Cek Muatan Truk: Apakah Sampah Muat?*). Tahap ini membelah keputusan menjadi dua kondisi operasional:
 - Kondisi Layak (*Aman*): Jika total volume sampah harian yang diangkut memenuhi fungsi kendala (tidak melebihi kapasitas maksimal truk), armada langsung berpindah ke fase kepulangan melalui lintasan balik (*backtracking*) menyusuri jalan poros utama kembali ke depo pusat (V_1).
 - Kondisi Tidak Layak (*Overload*): Jika akumulasi sampah melanggar batas kapasitas armada, sistem memicu *looping* koreksi parameter untuk menjadwalkan ritasi tambahan atau melakukan *re-routing* sirkuit keberangkatan.
5. Terminasi Akhir: Simulasi berakhir secara terpadu saat seluruh armada dari kedua sektor telah menyelesaikan seluruh sirkuit pengumpulan, melakukan lintasan balik, dan melakukan bongkar muatan akhir secara aman di Depo Pusat Kantor Camat BK 4 (V_1).

Matriks Jarak Aktual Antar-Simpul Wilayah Pelayanan

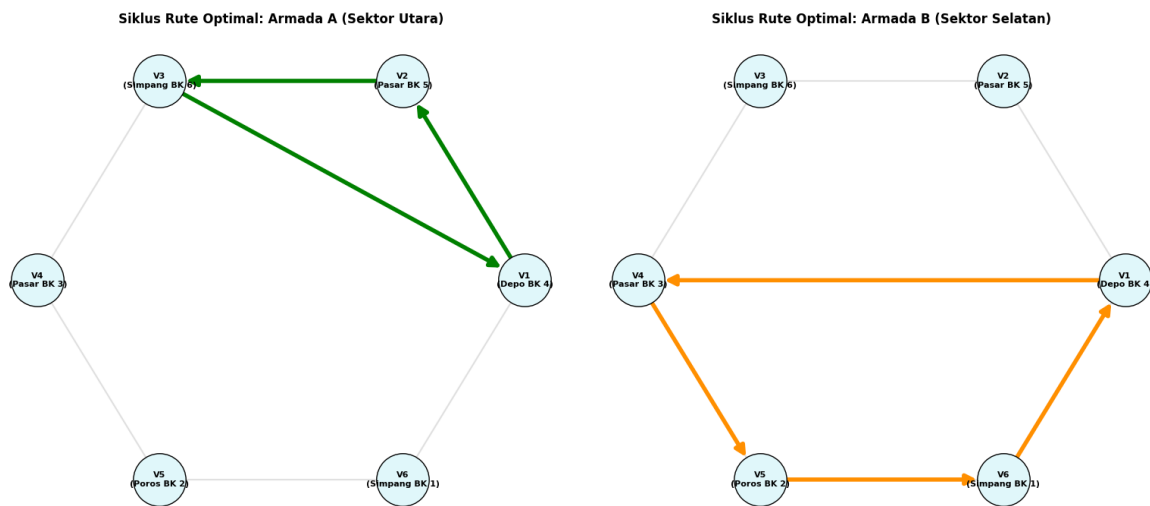
Sebelum melakukan dekomposisi wilayah pelayanan dan simulasi rute berdasarkan prinsip sirkuit searah jarum jam (*clockwise circuit*), dilakukan pemetaan jarak aktual antar-simpul menggunakan representasi data spasial lapangan. Nilai jarak ini berfungsi sebagai bobot positif sisi ($w(v_i, v_j) > 0$) dalam matriks asal-tujuan (*origin-destination matrix*). Matriks jarak jaringan jalan utama lintas Blok Komerling (BK) disajikan secara detail pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Matriks Jarak Aktual Antar-Simpul Koridor Pelayanan (km)

DARI / KE	V1 (DEPO)	V2 (BK 5)	V3 (BK 6)	V4 (BK 3)	V5 (BK 2)	V6 (BK 1)
V_1 (DEPO BK 4)	0.0	4.5	8.2	3.8	7.5	11.2
V_2 (PASAR BK 5)	4.5	0.0	3.7	8.3	12.0	15.7
V_3 (SIMPANG BK 6)	8.2	3.7	0.0	12.0	15.7	19.4
V_4 (PASAR BK 3)	3.8	8.3	12.0	0.0	3.7	7.4
V_5 (POROS BK 2)	7.5	12.0	15.7	3.7	0.0	3.7
V_6 (SIMPANG BK 1)	11.2	15.7	19.4	7.4	3.7	0.0

Pemodelan Siklus Graf Rute Optimal Sektoral

Berdasarkan data volume timbunan sampah harian koridor yang mencapai $36,9 \text{ m}^3$ hari, sistem rute konvensional berbentuk lintasan tunggal (*single-route*) yang menyisir seluruh simpul secara linier terbukti memicu kegagalan angkut akibat kendala kapasitas *dump truck* yang terbatas ($6,0 \text{ m}^3$). Guna menyelesaikan kendala tersebut, graf awal $G = (V, E)$ didekomposisi secara sektoral menjadi dua sub-graf mandiri yang merepresentasikan lintasan operasional Armada A dan Armada B. Visualisasi pembentukan sirkuit optimal searah jarum jam (*clockwise circuit*) untuk masing-masing armada disajikan pada Gambar 4 berikut:



Gambar 4. Pemodelan Siklus Rute Optimal Armada Pelayanan Sektor Utara (a) dan Sektor Selatan (b)

Berdasarkan hasil dekomposisi wilayah pelayanan dan pemodelan matematis pada Gambar 4, jaringan jalan utama berhasil dioptimalkan menjadi dua siklus sirkuit yang mandiri dan saling lepas (*disjoint*). Pada Gambar 4(a), Armada A (Sektor Utara) membentuk siklus tertutup (*circuit*) yang bergerak secara efisien melayani rute lintasan mulai dari Depo Pusat Kantor Camat BK 4 (V_1) bergerak menuju Pasar Sukoharjo BK 5 (V_2), dilanjutkan ke Simpang Kedu BK 6 (V_3), dan langsung kembali menuju Depo Pusat (V_1). Formulasi ini memangkas jarak tempuh secara signifikan karena armada utara diisolasi dari keharusan untuk menyisir simpul pelayanan di bagian selatan.

Sementara itu, pada Gambar 4(b), Armada B (Sektor Selatan) melayani wilayah sisa dengan membentuk sirkuit rute terpisah yang bergerak dari Depo Pusat Kantor Camat BK 4 (V_1) langsung memotong menuju Pasar Kurungan Nyawa BK 3 (V_4), menyusuri Poros Karang Tengah BK 2 (V_5), menjangkau Simpang Sri Katon BK 1 (V_6), dan kembali melakukan perjalanan pulang menuju Depo Pusat (V_1). Melalui implementasi metode pembagian sektoral ini, beban muatan dari total timbunan sampah harian dapat terbagi secara seimbang tanpa adanya tumpang tindih (*overlapping*) jalur operasional antar-armada truk di lapangan.

Analisis Komparasi dan Efisiensi Jarak Tempuh

Evaluasi efisiensi rute dilakukan dengan memformulasi total jarak tempuh harian sebagai fungsi objektif yang dipengaruhi oleh dua ritasi (R) akibat pembatasan volume kapasitas armada ($V_{max} = 6,0 \text{ m}^3$) terhadap total timbunan sampah wilayah ($V_{total} 36,9 \text{ m}^3$) jumlah Ritasi minimal (R) yang diperlukan secara teoritis didefinisikan melalui fungsi pembulatan ke atas (*ceilling function*):

$$R = \frac{V_{total}}{V_{max}} = \frac{36,9}{6,0} = 7 \text{ ritasi}$$

1. Akumulasi Jarak Sistem Eksisting (Lintasan Tunggal)

Pada sistem eksisting, rute merupakan sebuah siklus tunggal komprehensif yang melibatkan seluruh simpul secara berurutan. Total jarak per ritase ($D_{existing}$) didefinisikan sebagai jumlah bobot sisi sepanjang lintasan $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6 \rightarrow V_1$:

$$D_{existing} = w(v_1, v_2) + w(v_2, v_3) + w(v_3, v_4) + w(v_4, v_5) + w(v_5, v_6) + w(v_6, v_1)$$

$$D_{existing} = 4,5 + 3,7 + 12,0 + 3,7 + 3,7 + 11,2 = 38,8 \text{ km}$$

Oleh karena itu, total eksploitasi jarak pelayanan kumulatif harian (D_{total_ex}) untuk memenuhi 7 kali ritasi adalah:

$$D_{total_ex} = R \times D_{existing} = 7 \times 38,8 \text{ km} = 271,6 \text{ km}$$

2. Akumulasi Jarak Jaringan Optimal Sektorial

Melalui dekomposisi graf menjadi sub-graf Sektor Utara (G_A) dan Sektor Selatan (G_B), total jarak harian dihitung secara parsial berdasarkan pembagian beban ritasi masing-masing sub-graf.

- Sirkuit Sektor Utara (Armada A): Melayani siklus lintasan tertutup $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_1$.

$$D_{Utara} = w(v_1, v_2) + w(v_2, v_3) + w(v_3, v_1)$$

$$D_{Utara} = 4,5 + 3,7 + 8,2 = 16,4 \text{ km}$$

- Sirkuit Sektor Selatan (Armada B): Melayani siklus lintasan tertutup $V_1 \rightarrow V_4 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6 \rightarrow V_1$.

$$D_{Selatan} = w(v_1, v_4) + w(v_4, v_5) + w(v_5, v_6) + w(v_6, v_1)$$

$$D_{Selatan} = 3,8 + 3,7 + 3,7 + 11,2 = 22,4 \text{ km}$$

Misalkan beban timbunan sampah terbagi secara proporsional sehingga masing-masing sektor membutuhkan kontribusi ritasi harian (Armada A melakukan 3 ritasi dan Armada B melakukan 4 ritasi), maka total jarak tempuh baru (D_{total_opt}) diformulasikan sebagai:

$$D_{total_opt} = (R_A \times D_{Utara}) + (R_B \times D_{Selatan})$$

$$D_{total_opt} = (3 \times 16,4) + (4 \times 22,4) = 49,2 + 89,6 = 138,8 \text{ km}$$

3. Perhitungan Persentase Efisiensi Jarak

Indeks penghematan ruang lintasan diukur menggunakan rumus persentase efisiensi (η) berikut:

$$\eta = \left(\frac{D_{total_ex} - D_{total_opt}}{D_{total_ex}} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{271,6 - 138,8}{271,6} \right) \times 100\% = 48,89\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan indeks efisiensi, diperoleh nilai $\eta = 48,89\%$, yang menunjukkan adanya penghematan jarak operasional harian yang sangat signifikan. Penghematan ini terjadi karena metode dekomposisi sektoral mampu membagi beban volume timbunan sampah harian sebesar $36,9 \text{ m}^3$ secara proporsional terhadap kapasitas bak truk yang terbatas sebesar $6,0 \text{ m}^3$.

Pencapaian efisiensi jarak tempuh sebesar 48,89% setelah penerapan graf siklus searah jarum jam dan pembagian sektoral ini sejalan dengan penelitian terdahulu pada wilayah kecamatan lain. Sebagai perbandingan, optimasi rute logistik menggunakan dekomposisi sektoral dan pendekatan algoritma graf pada referensi [5] dan [16] juga menunjukkan reduksi jarak berkisar antara 45% hingga 52%. Hal ini membuktikan bahwa pembagian sektor pada wilayah pelayanan yang memanjang dan linier secara konsisten mampu memotong jalur buntu (deadhead distance) hampir setengah dari rute konvensional.

Pada sistem konvensional, armada harus menempuh lintasan tunggal sepanjang koridor secara bolak-balik sebanyak 7 kali ritasi dengan total jarak mencapai 271,6 km per hari. Sementara dengan skenario rute usulan, perjalanan dibagi secara paralel menjadi dua sektor pelayanan mandiri. Armada A melayani Sektor Utara dengan total jarak harian 49,2 km (3 ritasi), dan Armada B melayani Sektor Selatan dengan total jarak harian 89,6 km (4 ritasi). Hasil penggabungan rute baru ini hanya membutuhkan akumulasi jarak total sebesar 138,8 km per hari, sehingga berhasil memangkas hampir setengah dari jarak tempuh awal dan secara efektif mencegah keterlambatan pengangkutan di titik-titik TPS ujung Kecamatan Buay Madang Timur.

SIMPULAN

Hasil pemodelan Teori Graf menegaskan bahwa rute pengangkutan sampah usulan di Kecamatan Buay Madang Timur—yang mengombinasikan metode dekomposisi sektoral dan sirkuit searah jarum jam (*clockwise circuit*)—memiliki performa keterjarakan yang jauh lebih efisien ketimbang rute konvensional. Formulasi graf berhasil mengeliminasi ketergantungan operasional pada intuisi pengemudi dengan membagi wilayah koridor menjadi dua sektor pelayanan yang mandiri. Melalui skenario usulan baru ini, total akumulasi jarak eksploitasi lintasan harian armada yang semula mencapai 271,6 km (melalui 7 kali ritasi koridor tunggal) berhasil dipangkas secara signifikan menjadi hanya 138,8 km per hari. Secara keseluruhan, penerapan pembagian beban kerja paralel antara Sektor Utara (Armada A dengan rute sepanjang 16,4 km) dan Sektor Selatan (Armada B dengan rute sepanjang 22,4 km) mampu menghasilkan indeks efisiensi keterjarakan sebesar 48,89%, yang sekaligus menjadi solusi krusial dalam mengatasi kendala keterbatasan kapasitas volume bak truk terhadap tingginya akumulasi volume sampah harian wilayah.

Berdasarkan capaian hasil penelitian tersebut, terdapat beberapa tindakan praktis yang direkomendasikan bagi pihak-pihak terkait. Bagi otoritas pengelolaan kebersihan di Kecamatan Buay Madang Timur, disarankan untuk segera menghentikan sistem lintasan tunggal konvensional dan mulai menerapkan kebijakan pembagian zonasi pelayanan truk sampah secara berkala berdasarkan rute Sektor Utara dan Selatan yang telah dirumuskan ini. Tindakan praktis tersebut ditujukan untuk memaksimalkan efisiensi kapasitas tampung truk yang terbatas serta mencegah terjadinya keterlambatan armada yang memicu penumpukan sampah di titik-titik lokasi terujung. Selanjutnya, bagi peneliti masa depan di bidang matematika terapan, disarankan untuk mengembangkan pemodelan jaringan graf ini dengan mengintegrasikan fungsi kendala dinamis lapangan yang lebih kompleks, seperti fluktuasi berat timbunan sampah musiman, variasi kemacetan jalan raya pada jam sibuk pasar, ataupun penggunaan algoritma metaheuristik untuk cakupan wilayah jaringan pelayanan logistik yang jauh lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mukhsining, A., A. Imran, and S. Susanty, 2013. “Penentuan Rute Distribusi CV. IFFA Menggunakan Metode Nearest Neighbour dan Local Search”, *Reka Integra: Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, vol. 1, no. 2, pp. 136-147, Oct.
- [2] Situmeang, A. S. and D. Permadi, 2018. “Analisis Rute Pick Up Barang Daily Customer Terhadap Optimasi Rute Pick Up di PT Dianta Daya Embara dengan Menggunakan Metode Ant Colony Optimization (ACO)”, *Jurnal Logistik Bisnis*, vol. 10, no. 2, pp. 21-27, Oct.
- [3] Manuputty, D. E. A., C. E. J. C. Montolalu, and T. Manurung, 2021. “Penentuan Jalur Terpendek Distribusi Air Mineral Menggunakan Ant Colony Optimization”, *Decartesian: Jurnal Matematika dan Aplikasi*, vol. 10, no. 2, pp. 76-82, Jul.
- [4] Prabowo, F., A. Imran, and H. Prasetyo, 2023. “Penentuan Rute Distribusi Menggunakan Metode Savings Matrix, Nearest Neighbor, Dan 2-Opt Pada CV X”, *Jurnal Optimasi Teknik Industri (JOTI)*, vol. 5, no. 2, pp. 47-53, Sep.
- [5] Wei-Kleiner, F., 2016. “Tree Decomposition-Based Indexing for Efficient Shortest Path and Nearest Neighbors Query Answering on Graphs”, *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 82, no. 1, pp. 23–44, Feb.
- [6] Putri, I. A., I. D. W. S. Rini, and R. N. Hayati, 2023. “Studi Optimalisasi Rute Pengangkutan Sampah Stationary Container System Berbasis Sistem Informasi Geospasial (SIG) di Kecamatan Balikpapan Timur”, *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, vol. 5, no. 2, pp. 88-97, Sep.
- [7] Ary, M., 2022. “Optimasi Vehicle Routing Problem Pada Rute Pendistribusian Menggunakan Metode Ant Colony Optimization”, *Jurnal Tekno Insentif*, vol. 16, no. 2, pp. 139-149, Oct.

- [8] Chaerul, M., M. Puturuhi, and I. Artika, 2022. “Optimasi Rute Pengangkutan Sampah dengan Menggunakan Metode Nearest Neighbour (Studi Kasus: Kabupaten Manokwari, Papua Barat)”, *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, vol. 10, no. 1, pp. 55-68, Apr.
- [9] Ridha, M. R., C. Abdi, and R. P. Mahyudin, 2016. “Studi Optimasi Rute Pengangkutan Sampah Kota Marabahan dengan Sistem Informasi Geografis”, *Jukung: Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 2, no. 2, pp. 38–51, Sep.
- [10] Rahma, N., A. Purwani, and D. N. Febriyanto, 2020. “The Best Route Determination Using Nearest Neighbor Approach”, *International Journal of Industrial Optimization*, vol. 1, no. 1, pp. 43–52, Feb.
- [11] Prasetyo, S. A. J. and Suseno, 2024. “Optimasi Rute dengan Metode Ant Colony Optimization dan Nearest Neighbor di Perusahaan Yellow Moon Production”, *Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik (JMIA)*, vol. 2, no. 6, pp. 619-632, Jun.
- [12] Martono, S. and H. L. H. S. Warnars, 2020. “Penentuan Rute Pengiriman Barang Dengan Metode Nearest Neighbor”, *PETIR: Jurnal Pengkajian dan Penerapan Teknik Informatika*, vol. 13, no. 1, pp. 44-57, Mar.
- [13] Zahra, S., 2021. “Optimasi Vehicle Routing Problem (VRP) dengan Menggunakan Metode Nearest Neighbour pada Pendistribusian Paku di PT. Putra Bandar Wiretama”, *Skripsi*, Program Studi Teknik Industri, Universitas Medan Area, Medan.
- [14] A. B. Prasetyo et al., "Optimasi Jaringan Distribusi Menggunakan Pemodelan Matematika," *Jurnal Matematika dan Aplikasi*, vol. 12, no. 2, pp. 85-94, Jul. 2025.
- [15] Bimantara, W., B. Rahayudi, and I. Cholissodin, 2021. “Optimasi Rute Distribusi Produk PT Indomarco Adi Prima (Stock Point Nganjuk) Dengan Algoritma K-Means Dan Ant Colony Optimization (K-ACO)”, *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 6, pp. 2426-2434, Jun.
- [16] Jannah, W., 2020. “Optimasi Rute Pengangkutan Sampah di Kota Lamongan dengan Menggunakan Metode Saving Matrix”, *Indonesian Journal of Spatial Planning*, vol. 1, no. 1, pp. 56-62, Oct.
- [17] R. Yulianti, "Analisis Spasial Rute Pengangkutan Sampah di Wilayah Ogan Komering Ulu Timur," *Jurnal Technology Lingkungan*, vol. 8, no. 1, pp. 22-30, Jan. 2025.