



Optimasi *Vehicle Routing Problem* (VRP) Terhadap Rute Pengangkutan Sampah di Kota Medan Dengan Algoritma *Ant Colony Optimization*

Tri Kinanti¹, Rima Aprilia²

¹ Mahasiswa Matematika, FST, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan

² Matematika, FST, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan

kinanti0703213067@uinsu.ac.id

Abstract

The growing population in Medan City has resulted in a significant increase in waste volume, creating the need for an efficient transportation system from Temporary Disposal Sites (TPS) to the Final Disposal Site (TPA). This study aims to apply the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm to improve the efficiency of waste collection routes in the Medan Marelán District. ACO is a metaheuristic algorithm inspired by the foraging behavior of ants, where pheromone trails guide route selection. In this research, TPS and TPA locations were divided into six zones. Each zone was analyzed to determine the most efficient route based on the shortest travel distance. The research methodology consists of two main phases: route construction and pheromone updating. Data analysis was conducted manually for the first zone and through computational simulations using Python for the remaining five zones. The results show that ACO effectively produced optimal waste transportation routes in all areas. The shortest routes obtained were: Zone 1 at 17.05 km, Zone 2 at 25.25 km, Zone 3 at 16.995 km, Zone 4 at 8 km, Zone 5 at 14.83 km, and Zone 6 at 11.5 km. These findings confirm that the ACO algorithm is effective in addressing the Vehicle Routing Problem (VRP) in the context of waste transportation and offers a promising approach for enhancing urban waste management systems.

Keywords: Ant Colony Optimization; Optimal Route; Medan Marelán

Abstrak

Meningkatnya jumlah penduduk di Kota Medan menyebabkan lonjakan volume sampah yang cukup besar, sehingga dibutuhkan sistem transportasi sampah yang efisien dari Tempat Pembuangan Sementara (TPS) menuju Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Studi ini bertujuan mengaplikasikan algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk meningkatkan efisiensi rute pengangkutan sampah di wilayah Kecamatan Medan Marelán. Algoritma metaheuristik ACO bekerja dengan mencontoh perilaku semut dalam mencari jalur optimal, menggunakan jejak feromon sebagai acuan pemilihan jalur. Dalam penelitian ini, data lokasi TPS dan TPA di Kecamatan Medan Marelán dibagi menjadi enam wilayah. Setiap wilayah dianalisis untuk menemukan rute optimal berdasarkan jarak tempuh terpendek. Penelitian ini menggunakan pendekatan algoritma ACO yang terdiri dari dua tahap utama, yaitu konstruksi rute dan pembaruan feromon. Analisis data dilakukan secara manual pada wilayah pertama dan menggunakan simulasi komputasi dengan bantuan Python untuk lima wilayah lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ACO mampu menghasilkan rute pengangkutan yang efisien di seluruh wilayah. Rute optimal dihasilkan dengan jarak tempuh masing-masing: Wilayah 1 sejauh 17,05 km, Wilayah 2 sejauh 25,25 km, Wilayah 3 sepanjang 16,995 km, Wilayah 4 sejauh 8 km, Wilayah 5 sejauh 14,83 km, dan Wilayah 6 sejauh 11,5 km. Berdasarkan hasil tersebut,

dapat disimpulkan bahwa algoritma ACO efektif dalam menyelesaikan permasalahan *Vehicle Routing Problem* (VRP) pada konteks pengangkutan sampah. Metode ini mampu memberikan solusi rute yang lebih efisien dan dapat diterapkan untuk meningkatkan kinerja pengelolaan sampah di wilayah perkotaan.

Kata Kunci: *Ant Colony Optimization*; Rute Optimal; Medan Marelان

1. PENDAHULUAN

Kenaikan jumlah penduduk sering kali diikuti oleh munculnya permasalahan baru, termasuk meningkatnya jumlah sampah yang dihasilkan (Prayoga, 2020). Permasalahan sampah menjadi isu penting yang dihadapi oleh hampir seluruh daerah, termasuk Kota Medan. Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang pengelolaan sampah pada Bab 1 pasal 1 ayat 1, sampah didefinisikan sebagai sisa kegiatan manusia sehari-hari atau hasil proses alam yang berbentuk padat. Sampah merupakan hasil tak terhindarkan dari setiap aktivitas manusia. Maka dari itu, seluruh elemen, baik warga maupun pemerintah, harus turut serta dalam pengelolaan sampah yang efektif dan efisien (Fauziah & Suparmi, 2022).

Lahan yang terbatas untuk tempat pembuangan akhir turut memengaruhi pelaksanaan teknis pengelolaan sampah, terutama dalam hal pelayanan pembuangan (Arda et al., 2020). Dalam sistem pengelolaan sampah, transportasi berperan dalam mengangkut sampah dari tempat pembuangan sementara ke TPA. Permasalahan yang sering timbul dalam proses ini adalah menentukan rute pengangkutan yang paling efisien (Lasut et al., 2019).

Distribusi merupakan suatu permasalahan yang melibatkan beberapa elemen kunci, seperti perencanaan rute kendaraan, jenis sarana transportasi yang digunakan, dan penyusunan strategi transportasi yang efisien (Daulay & Cipta, 2023). Distribusi sampah yang tersusun secara teratur merupakan bagian dari upaya optimalisasi pengelolaan sampah. Tantangan dalam distribusi ini mencakup beberapa aspek penting seperti pemilihan rute kendaraan, jenis armada, serta efisiensi biaya pengangkutan (Nasution, 2020). Penentuan rute pengangkutan sampah menjadi salah satu tantangan dalam proses distribusinya. Rute yang dipilih akan berdampak langsung pada panjang keseluruhan perjalanan kendaraan.

Pada tahun 1959, Dantzig dan Ramser memperkenalkan VRP yang awalnya dikenal sebagai *truck dispatching problem*, yang digunakan sebagai penerapan pemrograman matematika untuk menangani distribusi bahan bakar di stasiun pengisian (Tan & Yeh, 2021). VRP diselesaikan dengan menetapkan rute-rute kendaraan yang dimulai dan diakhiri di depot, guna memastikan seluruh permintaan pelanggan terpenuhi, persoalan operasional diatasi, serta biaya pengiriman secara keseluruhan ditekan serendah mungkin (Fitriastutik, 2020). Rute terbaik dalam menyelesaikan VRP adalah yang

melayani seluruh permintaan pelanggan secara optimal, dengan setiap pelanggan hanya didatangi satu kali (Afgani, 2023).

Untuk menyelesaikan permasalahan rute kendaraan, dapat diterapkan pendekatan berbasis *heuristik* dan *metaheuristik*. Contoh dari metode *metaheuristik* meliputi *simulated annealing*, *tabu search*, *iterated local search*, *genetic algorithm*, dan *Ant Colony Optimization* (ACO) (Sasmito et al., 2024). Moyson dan Manderick merupakan pihak yang memperkenalkan algoritma semut, yang kemudian mengalami pengembangan signifikan oleh Marco Dorigo (Udjulawa & Oktarina, 2022). *Ant Colony Optimization* telah banyak digunakan dalam membuktikan kompleksitas permasalahan kombinatorial. Pergerakan setiap semut dipengaruhi oleh intensitas feromon yang terdapat pada jalur (Wang et al., 2020).

Ant colony biasanya digunakan dalam menyelesaikan masalah optimasi diskrit dan permasalahan yang terdiri dari banyak variabel dan sifatnya kompleks (Hazizah et al., 2023). ACO atau *Ant Colony Optimization* adalah algoritma yang meniru mekanisme pencarian makanan oleh koloni semut melalui penyebaran feromon sebagai petunjuk jalur (Sianturi et al., 2021). Dalam (Zhao et al., 2016) algoritma *Ant Colony Optimization* menunjukkan peningkatan performa melalui penerapan mekanisme baru yang dikembangkan dari konsep yang sebelumnya tidak terdapat dalam algoritma *Ant System* (AS) asli (Ary, 2022). Meskipun ACO telah digunakan dalam berbagai studi VRP dan TSP, penelitian yang menyoroti pengangkutan sampah di Medan, khususnya Medan Marelan, masih terbatas. Sebagian besar fokus penelitian sebelumnya lebih pada distribusi barang komersial tanpa mempertimbangkan kondisi lokal. Penggunaan pembagian wilayah (zonasi) dalam pemodelan rute memungkinkan fokus optimasi yang lebih adaptif terhadap karakteristik geografis dan distribusi TPS yang beragam. Selain itu, integrasi antara perhitungan algoritmik secara manual dan simulasi menggunakan Python menjadikan pendekatan ini lebih komprehensif, sekaligus menawarkan validasi dua arah antara hasil teoritis dan hasil komputasional. Pendekatan tersebut belum banyak diterapkan dalam studi sejenis yang menangani *Vehicle Routing Problem* (VRP) di sektor pengelolaan sampah.

Feromon merupakan senyawa kimia yang diproduksi oleh kelenjar endokrin, dan bekerja dengan menyebar ke luar tubuh untuk memberikan pengaruh terhadap individu lain dalam spesies yang sama (Muliawan, 2022). Permasalahan rute pengangkutan sampah di kawasan perkotaan seperti Medan Marelan tidak hanya berdampak pada efisiensi operasional, tetapi juga terhadap kualitas lingkungan dan pelayanan publik. Rute yang tidak optimal dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar, waktu tempuh yang lebih lama, serta akumulasi sampah yang tidak tertangani tepat waktu. Hal ini berpotensi menimbulkan keluhan masyarakat serta mengganggu kebersihan dan kesehatan lingkungan secara menyeluruh. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah

untuk memperoleh rute optimal pada pengangkutan sampah dari TPS menuju ke TPA di kota Medan khususnya di kecamatan Medan Marelan menggunakan algoritma *Ant Colony Optimization*. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu membantu instansi terkait di Kota Medan khususnya Kecamatan Medan Marelan dalam meningkatkan efisiensi rute optimal pengangkutan sampah.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk mengoptimalkan sistem rute pengangkutan sampah di Kecamatan Medan Marelan, Kota Medan. Data yang digunakan mencakup TPS dan TPA serta jarak antar titik, yang kemudian direpresentasikan dalam bentuk graf, di mana titik-titik lokasi digambarkan sebagai simpul (node) dan jarak antar lokasi sebagai sisi (edge). Algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) digunakan sebagai metode optimasi dalam menentukan rute terbaik. sampah. ACO adalah teknik optimasi kombinatorial yang terinspirasi dari perilaku beberapa spesies semut (Neroni, 2021).

2.1 *Ant Colony Optimization* (ACO)

ACO dibagi menjadi dua fase utama yaitu konstruksi rute semut dan pembaruan feromon. Pada tahap pertama yaitu langkah konstruksi, yaitu seekor semut ke- k yang berada pada node i memilih untuk menuju ke node j dengan menerapkan aturan transisi. Pada fase ini terdapat dua nilai utama dalam proses transisi selama semut menyelesaikan tour nya, yaitu $n_{i,j}$ dan $\tau_{i,j} \cdot n_{i,j}$ merupakan nilai visibilitas yang dihitung dengan inverse suatu jarak i dari ke j . Sedangkan $\tau_{i,j}$ merupakan jumlah feromon pada sisi dari simpul i ke simpul j (Rachmawati & Yosmar, 2025; Gao, 2020).

Probabilitas kunjungan semut ke- k dari simpul i ke simpul j dinotasikan dengan $P_{i,j}^{(k)}$ yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$P_{i,j}^{(k)} = \left\{ \frac{(\tau_{i,j})^\alpha (\eta_{i,j})^\beta}{\sum_{j \in M_i^{(k)}} (\tau_{i,j})^\alpha (\eta_{i,j})^\beta} \right.$$

Dengan:

$\tau_{i,j}$: jumlah feromon pada sisi

$\eta_{i,j}$: $\frac{1}{d_{ij}}$ merupakan *visibility* (dimana d_{ij} , merupakan jarak dari simpul i menuju simpul j)

$M_i^{(k)}$: himpunan yang berisi simpul-simpul yang telah dikunjungi oleh semut ke- k yang sedang berada pada simpul i

α : parameter pengendali intensitas jejak feromon ($\alpha > 0$)

β : parameter pengendali jarak ($\beta > 0$)

Setelah proses perhitungan probabilitas untuk kunjungan berikutnya dilakukan, langkah lanjutan adalah menghitung probabilitas kumulatifnya (q_k), dimana $q_0 = p_{00}$, sedangkan $q_k = q_{k-1} + p_{ij}$ untuk $k=1,2,3,\dots,n$. kemudian bangkitkan bilangan acak (r) antara 0 dan 1. Simpul akan terpilih jika $q_{k-1} < r < q_k$.

Untuk tahap kedua, pembaruan feromon merupakan hal penting untuk mencapai solusi optimal. Algoritma ACO menggunakan dua jenis aturan *update* feromon yaitu *update* feromon lokal dan *update* feromon global. Pembaruan feromon lokal dilakukan setiap kali semut melintas busur (i, j) . Jumlah feromon akan berubah berdasarkan:

$$\tau_{i,j} \leftarrow (1-\rho)\tau_{i,j} + \rho\tau_0$$

Dengan:

$\tau_{i,j}$: jumlah feromon pada sisi (i, j)

ρ : tingkat penguapan feromon ($0 < \rho < 1$)

τ_0 : nilai feromon awal untuk semua sisi (i, j)

Pembaruan feromon global selanjutnya dilakukan sesuai dengan:

$$\tau_{i,j} \leftarrow (1-\rho)\tau_{i,j} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^{(k)}$$

Dengan:

$\Delta\tau_{i,j}^{(k)}$: jumlah feromon yang disimpan pada sisi (i, j) oleh semut ke- k

Pembaruan feromon secara global bertujuan untuk memperkuat intensitas feromon pada lintasan terbaik yang telah ditemukan. Feromon yang disimpan oleh busur (i, j) ditunjukkan sebagai berikut:

$$\Delta_{i,j}^{(k)} = \left\{ \frac{Q}{L_k}, \right.$$

Dengan:

Q : konstanta positif

L_k : Panjang jalur terpendek yang ditempuh oleh semut ke- k

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Deskripsi Data

Studi ini berfokus di Kecamatan Medan Marelan, yang beralamat di Jalan Kapten Rahmad Buddin No. 190, Terjun, Kota Medan, Sumatera Utara 20256. Dalam kegiatan pengangkutan sampah dari TPS ke TPA, wilayah Medan Marelan dikelompokkan menjadi beberapa wilayah. Dengan rute pada wilayah 1 meliputi v_0 (TPA) ke v_1 (Jl. Marelan Raya) ke v_2 (Jl. Baut) ke v_3 (Jl. Pasar 1 Tengah) ke v_4 (Komplek Suzuya Plaza)

ke v_5 (Komplek Marelان 88) ke v_6 (Komplek Deli Indah) ke v_7 (Komplek Maryland) ke v_8 (Komplek Sejati) ke v_9 (Rs Esmun) dan kembali ke v_0 (TPA).

Tabel 1. Jarak Tempuh Wilayah 1

	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9
v_0	0	2,0	5,9	5,1	6,1	2,8	4,0	6,0	5,3	4,8
v_1	2,0	0	1,6	2,1	0,35	3,9	2,0	0,65	0,9	0,65
v_2	5,9	1,6	0	1,8	1,4	4,4	4,2	1,5	1,5	1,1
v_3	5,1	2,1	1,8	0	2,5	3,6	2,8	2,8	2,0	1,5
v_4	6,1	0,35	1,4	2,5	0	4,6	4,4	0,7	0,75	1,3
v_5	2,8	3,9	4,4	3,6	4,6	0	1,7	4,6	3,8	3,3
v_6	4,0	2,0	4,2	2,8	4,4	1,7	0	4,4	3,7	3,2
v_7	6,0	0,65	1,5	2,8	0,7	4,6	4,4	0	0,7	1,3
v_8	5,3	0,9	1,5	2,0	0,75	3,8	3,7	0,7	0	0,6
v_9	4,8	0,65	1,1	1,5	1,3	3,3	3,2	1,3	0,6	0

Rute pada wilayah 2 meliputi v_0 (TPA) ke v_{10} (Jl. Kapten rahmad Buddin) ke v_{11} (Titi Kuning) v_{12} (Jl. Jala) ke v_{13} (Gang Pinang) ke v_{14} (Jl. Pringgān) ke v_{15} (Jl. Penghulu Lama) ke v_{16} (Jl. Nippon) ke v_{17} (Young Panah Hijau) ke v_{18} (Paluh Nibung) dan kembali ke v_0 (TPA).

Tabel 2. Jarak Tempuh Wilayah 2

	v_0	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{16}	v_{17}	v_{18}
v_0	0	2,0	2,8	4,4	4,1	1,7	2,1	3,4	5,7	4,0
v_{10}	2,0	0	3,4	3,9	3,8	2,5	2,9	4,0	6,3	6,2
v_{11}	2,8	3,4	0	3,9	2,6	1,2	1,7	1,5	2,9	5,2
v_{12}	4,4	3,9	3,9	0	2,1	3,6	4,0	4,5	6,7	4,2
v_{13}	4,1	3,8	2,6	2,1	0	3,3	3,7	4,1	6,0	3,8
v_{14}	1,7	2,5	1,2	3,6	3,3	0	0,55	1,7	4,0	3,2
v_{15}	2,1	2,9	1,7	4,0	3,7	0,55	0	1,7	4,0	3,0
v_{16}	3,4	4,0	1,5	4,5	4,1	1,7	1,7	0	4,3	2,2
v_{17}	5,7	6,3	2,9	6,7	6,0	4,0	4,0	4,3	0	2,0
v_{18}	4,0	6,2	5,2	4,1	3,8	3,2	3,0	2,2	2,2	0

Rute pada wilayah 3 meliputi v_0 (TPA) ke v_{19} (Jl. Kapten rahmad Buddin) ke v_{20} (Komplek Minimalis) ke v_{21} (Abdul Sani Muthalib) ke v_{22} (Tut Wuri) ke v_{23} (Terjun Indah) ke v_{24} (Citra Anugrah Permai) ke v_{25} (Marelان 5) ke v_{26} (Marelان 9) dan kembali ke v_0 (TPA).

Tabel 3. Jarak Tempuh Wilayah 3

	v_0	v_{19}	v_{20}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{26}
v_0	0	2,1	2,3	3,4	2,5	3,5	3,7	4,0	6,1
v_{19}	2,1	0	2,9	1,9	0,35	1,3	1,6	2,4	4,1
v_{20}	2,3	2,9	0	4,3	3,3	4,4	4,6	3,8	5,1

	v_0	v_{19}	v_{20}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{26}
v_{21}	3,4	1,9	4,3	0	2,0	0,45	0,55	1,5	2,2
v_{22}	2,5	0,35	3,3	2,0	0	1,6	1,8	2,3	4,2
v_{23}	3,5	1,3	4,4	0,45	1,6	0	0,195	2,3	2,7
v_{24}	3,7	1,6	4,6	0,55	1,8	0,195	0	2,3	2,7
v_{25}	4,0	2,4	3,8	1,5	2,3	2,3	2,3	0	3,1
v_{26}	6,1	4,1	5,1	2,2	4,2	4,2	2,7	3,1	0

Rute pada wilayah 4 meliputi v_0 (TPA) ke v_{27} (Jl. Marelan Raya depan BNI) ke v_{28} (lampu merah jl. Rahmad biddun) ke v_{29} (Jl. Titi Pahlawan depan RM Uncle Mutho) ke v_{30} (lampu merah pasar 5) dan kembali ke v_0 (TPA).

Tabel 4. Jarak Tempuh Wilayah 4

	v_0	v_{27}	v_{28}	v_{29}	v_{30}
v_0	0	3,5	1,1	2,1	2,0
v_{27}	3,5	0	2,4	2,3	1,6
v_{28}	1,1	2,4	0	1,8	1,0
v_{29}	2,1	2,3	1,8	0	0,8
v_{30}	2,0	1,6	1,0	0,8	0,0

Rute pada wilayah 5 meliputi v_0 (TPA) ke v_{31} (Jl. Marelan Raya) ke v_{32} (Kampus UISU) ke v_{33} (Jl. Datuk Rubiah) ke v_{34} (Jl. M. Basir) ke v_{35} (Komplek Indah Pasar 3) ke v_{36} (Komplek PLN Pasar 5) dan kembali ke v_0 (TPA).

Tabel 5. Jarak Tempuh Wilayah 5

	v_0	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}	v_{36}
v_0	0	3,8	4,7	5,3	3,2	4,0	3,0
v_{31}	3,8	0	0,95	2,9	2,7	0,23	1,6
v_{32}	4,7	0,95	0	3,5	3,7	1,2	4,3
v_{33}	5,3	2,9	3,5	0	2,1	3,1	4,8
v_{34}	3,2	2,7	3,7	2,1	0	3,0	2,8
v_{35}	4,0	0,23	1,2	3,1	3,0	0	3,6
v_{36}	3,0	1,6	4,3	4,8	2,8	3,6	0

Rute pada wilayah 6 meliputi v_0 (TPA) ke v_{37} (Lampu Merah Pasar 5) ke v_{38} (Jl. Platina Raya) ke v_{39} (Simpang Komplek Bank) ke v_{40} (Toko Samsung) dan kembali ke v_0 (TPA).

Tabel 6. Jarak Tempuh Wilayah 6

	v_0	v_{37}	v_{38}	v_{39}	v_{40}
v_0	0	2,1	5,1	5,5	3,3
v_{37}	2,1	0	3,1	3,5	1,5
v_{38}	5,1	3,1	0	1,0	1,6
v_{39}	5,5	3,5	1,0	0,0	3,5
v_{40}	3,3	1,5	1,6	3,5	0

3.2 Inisialisasi Nilai Parameter

Proses perhitungan dalam menyelesaikan suatu masalah menggunakan algoritma *ant colony optimization* adalah dengan mengatur nilai parameternya. Nilai parameter yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dari penentuan rute optimal dalam pengangkutan sampah menggunakan algoritma ACO dalam penelitian ini adalah $M=6$, $\alpha=1$, $\beta=1$, $\rho=0,05$, $\tau_{ij}=0,1$, $Q=1$, dan $NC=1$.

3.3 Inisialisasi Nilai Parameter

Proses penentuan rute optimal pengangkutan sampah menggunakan algoritma *ant colony optimization* dimulai dengan beberapa tahapan. Pada proses perhitungan diawali dengan penerapan ACO secara analisi teori, kemudian diselesaikan dengan menggunakan bantuan *google collab* dengan bahasa pemrograman *python*.

Wilayah 1

Menghitung matriks visibilitas antar lokasi dengan menggunakan $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$. Hasil perhitungan matriks visibilitas dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Matriks Visibilitas

	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9
v_0	0	0,5	0,169	0,196	0,163	0,357	0,25	0,166	0,188	0,208
v_1	0,5	0	0,625	0,476	2,857	0,256	0,5	1,5	1,111	1,538
v_2	0,169	0,625	0	0,555	0,714	0,227	0,238	0,6	0,666	0,909
v_3	0,196	0,476	0,555	0	0,4	0,277	0,357	0,357	0,5	0,666
v_4	0,163	2,85	0,714	0,4	0	0,217	0,227	1,428	1,333	0,769
v_5	0,357	0,256	0,227	0,277	0,217	0	0,588	0,217	0,263	0,303
v_6	0,25	0,5	0,238	0,357	0,227	0,588	0	0,227	0,270	0,312
v_7	0,166	1,538	0,666	0,357	1,428	0,217	0,227	0	1,428	0,769
v_8	0,188	1,111	0,666	0,5	1,333	0,263	0,270	1,428	0	1,666
v_9	0,208	1,538	0,909	0,666	0,769	0,303	0,3125	0,769	1,666	0

Perhitungan jarak antar titik dengan menggunakan algoritma *Ant Colony*. Pada tahap ini, dilakukan penyusunan rute perjalanan semut dimulai dari titik sebagai titik awal v_0 sebagai titik asal, sementara titik-titik lainnya dianggap sebagai tujuan. Selanjutnya, semut-semut bergerak secara acak dengan tetap memperhatikan jalur yang belum pernah dilewati sebelumnya. Proses perjalanan ini berlangsung hingga seluruh titik telah dikunjungi dan membentuk satu lintasan lengkap. Perhitungan probabilitas dilakukan untuk satu kali iterasi dengan jumlah semut 6.

Tabel 8. Rute Perjalanan Semut Wilayah 1 dan penambahan Jumlah Feromonnya

Semut	Rute	Panjang Rute (L_k)	$\frac{Q}{L_k}$
1	$v_0 - v_5 - v_6 - v_8 - v_4 - v_1 - v_9 - v_7 - v_2 - v_3 - v_0$	19,65	0,0509

Semut	Rute	Panjang Rute (L_k)	$\frac{Q}{L_k}$
2	$v_0 - v_1 - v_4 - v_5 - v_3 - v_8 - v_7 - v_9 - v_2 - v_6 - v_0$	23,15	0,0432
3	$v_0 - v_1 - v_7 - v_8 - v_9 - v_2 - v_3 - v_5 - v_6 - v_4 - v_0$	22,65	0,0442
4	$v_0 - v_6 - v_4 - v_1 - v_9 - v_8 - v_5 - v_3 - v_2 - v_7 - v_0$	26,70	0,375
5	$v_0 - v_3 - v_9 - v_4 - v_1 - v_7 - v_8 - v_6 - v_5 - v_2 - v_0$	25,30	0,0395
6	$v_0 - v_1 - v_4 - v_9 - v_2 - v_8 - v_7 - v_3 - v_6 - v_5 - v_0$	17,05	0,0586

Berdasarkan Tabel 3.8 didapatkan rute terbaik yaitu rute yang dilalui oleh semut ke 6 dengan jarak 17,05 km dengan rute $v_0 - v_1 - v_4 - v_9 - v_2 - v_8 - v_7 - v_3 - v_6 - v_5 - v_0$.

Menghitung evaporasi feromon

$$\begin{aligned}\tau_{ij}^{baru} &= (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} \\ &= (1 - 0,05) \cdot 0,1 \\ &= 0,095\end{aligned}$$

Jadi, semua nilai feromon yang tidak dilalui akan menjadi 0,095.

Menghitung perubahan feromon pada edge (0, 1) yang dilalui oleh semut ke-2, ke-3, dan ke-6.

Sehingga nilai untuk τ_{01} adalah:

$$\begin{aligned}\tau_{01} &= \tau_{ij}^{baru} + \Delta\tau_{01} \\ &= 0,095 + 0,0432 + 0,0442 + 0,0586 \\ &= 0,241\end{aligned}$$

Jadi nilai baru feromon untuk edge 0, 1 adalah 0,241. Proses perhitungan dilakukan untuk semua edge dengan hasil perhitungan yang disajikan dalam Tabel 9.

Tabel 9. *Update Feromon Global Pada Wilayah 1 Kecamatan Medan Marelan*

	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9
v_0	0,095	0,241	0,095	0,1345	0,095	0,1459	0,1325	0,095	0,095	0,095
v_1	0,095	0,095	0,095	0,095	0,1968	0,095	0,095	0,1787	0,095	0,1833
v_2	0,1345	0,095	0,095	0,19	0,095	0,095	0,1382	0,1325	0,1537	0,095
v_3	0,1459	0,095	0,1325	0,095	0,095	0,1392	0,1537	0,095	0,1382	0,1345
v_4	0,1392	0,2229	0,095	0,095	0,095	0,1382	0,095	0,095	0,095	0,1537
v_5	0,1537	0,095	0,1345	0,1756	0,095	0,095	0,19	0,095	0,095	0,095
v_6	0,1382	0,095	0,095	0,095	0,1766	0,1932	0,095	0,095	0,1459	0,095
v_7	0,1325	0,095	0,1459	0,1537	0,095	0,095	0,095	0,095	0,1787	0,1382
v_8	0,095	0,095	0,095	0,095	0,1459	0,1325	0,1345	0,1968	0,095	0,1392
v_9	0,095	0,095	0,241	0,095	0,1345	0,095	0,095	0,1459	0,1325	0,095

Selanjutnya untuk wilayah 2 sampai wilayah 6 dihitung dengan menggunakan bantuan pemrograman.

Wilayah 2

Untuk nilai matriks visibilitas pada wilayah 2 dengan menggunakan pemrograman *Python* dapat dilihat pada Gambar 1.

```

=== Matriks Visibilitas ( $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ) ===
      0      1      2      3      4      5      6      7      8      9
0  0.000  0.500  0.357  0.227  0.244  0.588  0.476  0.294  0.175  0.250
1  0.500  0.000  0.294  0.256  0.263  0.400  0.345  0.250  0.159  0.161
2  0.357  0.294  0.000  0.256  0.385  0.833  0.588  0.667  0.345  0.192
3  0.227  0.256  0.256  0.000  0.476  0.278  0.250  0.222  0.149  0.238
4  0.244  0.263  0.385  0.476  0.000  0.303  0.270  0.244  0.167  0.263
5  0.588  0.400  0.833  0.278  0.303  0.000  1.818  0.588  0.250  0.312
6  0.476  0.345  0.588  0.250  0.270  1.818  0.000  0.588  0.250  0.333
7  0.294  0.250  0.667  0.222  0.244  0.588  0.588  0.000  0.233  0.455
8  0.175  0.159  0.345  0.149  0.167  0.250  0.250  0.233  0.000  0.500
9  0.250  0.161  0.192  0.238  0.263  0.312  0.333  0.455  0.500  0.000

```

Gambar 1. Matriks Visibilitas Wilayah 2

Dengan melibatkan 6 semut, maka akan dihasilkan 6 jalur berbeda dalam satu kali proses iterasi. Selanjutnya seluruh jalur tersebut dievaluasi guna menemukan jalur dengan jarak tempuh paling efisien. Dapat dilihat rute dan jarak tempuh pada Gambar 2.

```

Rute dan Jarak Tiap Semut (Iterasi 1) ==
1: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(7), np.int64(2), np.int64(6), np.int64(5), np.int64(3), np.int64(4), np.int64(8), np.int64(9), 0], Jarak = 27.45
2: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(1), np.int64(6), np.int64(5), np.int64(4), np.int64(3), np.int64(8), np.int64(9), 0], Jarak = 28.95
3: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(6), np.int64(8), np.int64(9), np.int64(2), np.int64(7), np.int64(4), np.int64(5), np.int64(3), 0], Jarak = 35.0
4: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(6), np.int64(5), np.int64(2), np.int64(7), np.int64(9), np.int64(8), np.int64(3), np.int64(4), 0], Jarak = 25.25
5: Rute = [0, np.int64(9), np.int64(8), np.int64(6), np.int64(7), np.int64(5), np.int64(4), np.int64(3), np.int64(1), np.int64(2), 0], Jarak = 28.9
6: Rute = [0, np.int64(6), np.int64(1), np.int64(2), np.int64(4), np.int64(7), np.int64(3), np.int64(9), np.int64(8), 0], Jarak = 31.05

```

Gambar 2. Rute dan Jarak Tempuh Wilayah 2

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa rute terbaik yang diperoleh melalui pemrograman *Python* yaitu rute yang dilalui oleh semut ke 4 dengan jarak 25,25 km dengan rute $v_0 - v_{10} - v_{15} - v_{14} - v_{11} - v_{16} - v_{18} - v_{17} - v_{12} - v_{13} - v_0$.

Wilayah 3

Perhitungan matriks visibilitas pada wilayah 3 menggunakan Bahasa pemrograman *Python* dapat dilihat pada Gambar 3.

```

=== Matriks Visibilitas ( $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ) ===
      0      1      2      3      4      5      6      7      8
0  0.000  0.476  0.435  0.294  0.400  0.286  0.270  0.250  0.164
1  0.476  0.000  0.345  0.526  2.857  0.769  0.625  0.417  0.244
2  0.435  0.345  0.000  0.233  0.303  0.227  0.217  0.263  0.196
3  0.294  0.526  0.233  0.000  0.500  2.222  1.818  0.667  0.455
4  0.400  2.857  0.303  0.500  0.000  0.625  0.556  0.435  0.238
5  0.286  0.769  0.227  2.222  0.625  0.000  5.128  0.435  0.370
6  0.270  0.625  0.217  1.818  0.556  5.128  0.000  0.435  0.370
7  0.250  0.417  0.263  0.667  0.435  0.435  0.435  0.000  0.323
8  0.164  0.244  0.196  0.455  0.238  0.370  0.370  0.323  0.000

```

Gambar 3. Matriks Visibilitas Wilayah 3

Diperoleh rute dan jarak tempuh optimal pada wilayah 3 dari hasil pemrograman dapat dilihat pada Gambar 4.

```

=== Rute dan Jarak Tiap Semut (Iterasi 1) ===
Semut 1: Rute = [0, np.int64(3), np.int64(5), np.int64(4), np.int64(1), np.int64(7), np.int64(6), np.int64(8), np.int64(2), 0], Jarak = 20.6
Semut 2: Rute = [0, np.int64(5), np.int64(3), np.int64(4), np.int64(1), np.int64(2), np.int64(8), np.int64(6), np.int64(7), 0], Jarak = 23.3
Semut 3: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(1), np.int64(4), np.int64(6), np.int64(5), np.int64(3), np.int64(8), np.int64(7), 0], Jarak = 17.295
Semut 4: Rute = [0, np.int64(3), np.int64(5), np.int64(6), np.int64(7), np.int64(2), np.int64(1), np.int64(4), np.int64(8), 0], Jarak = 23.095
Semut 5: Rute = [0, np.int64(6), np.int64(5), np.int64(3), np.int64(1), np.int64(4), np.int64(7), np.int64(2), np.int64(8), 0], Jarak = 23.895
Semut 6: Rute = [0, np.int64(4), np.int64(3), np.int64(5), np.int64(6), np.int64(8), np.int64(7), np.int64(2), 0], Jarak = 16.995

```

Gambar 4. Rute dan Jarak Tempuh Wilayah 3

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa rute terbaik yaitu rute yang dilalui oleh semut ke 6 dengan jarak 16,995 km dengan rute $v_0 - v_{19} - v_{22} - v_{21} - v_{23} - v_{24} - v_{26} - v_{25} - v_{20} - v_0$.

Wilayah 4

Nilai dari matriks visibilitas pada wilayah 4 yang diperoleh melalui pemrograman *Pyhton* dapat ditampilkan pada Gambar 5.

```

=== Matriks Visibilitas ( $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ) ===
      0      1      2      3      4
0  0.000  0.286  0.909  0.476  0.500
1  0.286  0.000  0.417  0.435  0.625
2  0.909  0.417  0.000  0.556  1.000
3  0.476  0.435  0.556  0.000  1.250
4  0.500  0.625  1.000  1.250  0.000

```

Gambar 5. Matriks Visibilitas Wilayah 4

Rute dengan jarak tempuh paling optimal untuk wilayah 4 yang dihasilkan dari proses pemrograman ditampilkan pada Gambar 6.

```

=== Rute dan Jarak Tiap Semut (Iterasi 1) ===
Semut 1: Rute = [0, np.int64(3), np.int64(4), np.int64(1), np.int64(2), 0], Jarak = 8.0
Semut 2: Rute = [0, np.int64(4), np.int64(2), np.int64(1), np.int64(3), 0], Jarak = 9.8
Semut 3: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(4), np.int64(3), np.int64(1), 0], Jarak = 8.7
Semut 4: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(3), np.int64(4), np.int64(1), 0], Jarak = 8.8
Semut 5: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(1), np.int64(3), np.int64(4), 0], Jarak = 8.6
Semut 6: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(4), np.int64(3), np.int64(1), 0], Jarak = 8.7

```

Gambar 6. Rute Jarak Tempuh Wilayah 4

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa rute terbaik yaitu rute yang dilalui oleh semut ke 1 dengan jarak 8 km dengan rute $v_0 - v_{29} - v_{30} - v_{27} - v_{28} - v_0$.

Wilayah 5

Pada Gambar 7. ditampilkan nilai-nilai matriks visibilitas wilayah 5 yang diperoleh melalui proses komputasi dengan *Python*.

```
=== Matriks Visibilitas ( $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ) ===
```

	0	1	2	3	4	5	6
0	0.000	0.263	0.213	0.189	0.312	0.250	0.333
1	0.263	0.000	1.053	0.345	0.370	4.348	0.625
2	0.213	1.053	0.000	0.286	0.270	0.833	0.233
3	0.189	0.345	0.286	0.000	0.476	0.323	0.208
4	0.312	0.370	0.270	0.476	0.000	0.333	0.357
5	0.250	4.348	0.833	0.323	0.333	0.000	0.278
6	0.333	0.625	0.233	0.208	0.357	0.278	0.000

Gambar 7. Matriks Visibilitas Wilayah 5

Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh rute dan jarak tempuh paling optimal untuk wilayah 5, yang ditampilkan pada Gambar 8.

```
=== Rute dan Jarak Tiap Semut (Iterasi 1) ===
Semut 1: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(5), np.int64(6), np.int64(3), np.int64(2), 0], Jarak = 22.83
Semut 2: Rute = [0, np.int64(4), np.int64(3), np.int64(6), np.int64(1), np.int64(5), np.int64(2), 0], Jarak = 17.83
Semut 3: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(6), np.int64(3), np.int64(1), np.int64(5), np.int64(4), 0], Jarak = 23.13
Semut 4: Rute = [0, np.int64(5), np.int64(1), np.int64(2), np.int64(6), np.int64(4), np.int64(3), 0], Jarak = 19.68
Semut 5: Rute = [0, np.int64(6), np.int64(1), np.int64(5), np.int64(2), np.int64(3), np.int64(4), 0], Jarak = 14.83
Semut 6: Rute = [0, np.int64(6), np.int64(1), np.int64(5), np.int64(3), np.int64(4), np.int64(2), 0], Jarak = 18.43
```

Gambar 8. Rute dan Jarak Tempuh Wilayah 5

Berdasarkan gambar di atas yang diperoleh dari pemrograman *Python*, dapat diketahui bahwa rute paling optimal ditempuh oleh semut ke-5 dengan total jarak 14,83 km melalui jalur berikut $v_0 - v_{36} - v_{31} - v_{35} - v_{32} - v_{33} - v_{34} - v_0$.

Wilayah 6

Visualisasi hasil perhitungan matriks visibilitas untuk wilayah 6 menggunakan *Python* disajikan pada Gambar 9.

```
=== Matriks Visibilitas ( $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ) ===
```

	0	1	2	3	4
0	0.000	0.476	0.196	0.182	0.303
1	0.476	0.000	0.323	0.286	0.667
2	0.196	0.323	0.000	1.000	0.625
3	0.182	0.286	1.000	0.000	0.286
4	0.303	0.667	0.625	0.286	0.000

Gambar 9. Matriks Visibilitas Wilayah 6

Rute dan jarak tempuh yang paling efisien pada wilayah 6 berdasarkan hasil pemrograman *Python* disajikan pada Gambar 10.

```
=== Rute dan Jarak Tiap Semut (Iterasi 1) ===
Semut 1: Rute = [0, np.int64(2), np.int64(3), np.int64(1), np.int64(4), 0], Jarak = 14.4
Semut 2: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(4), np.int64(2), np.int64(3), 0], Jarak = 11.7
Semut 3: Rute = [0, np.int64(4), np.int64(1), np.int64(2), np.int64(3), 0], Jarak = 14.4
Semut 4: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(3), np.int64(2), np.int64(4), 0], Jarak = 11.5
Semut 5: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(3), np.int64(2), np.int64(4), 0], Jarak = 11.5
Semut 6: Rute = [0, np.int64(1), np.int64(4), np.int64(2), np.int64(3), 0], Jarak = 11.7
```

Gambar 10. Rute dan Jarak Tempuh Wilayah 6

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa rute terbaik yaitu rute yang dilalui oleh semut ke 4 dengan jarak 11,5 km dengan rute $v_0 - v_{37} - v_{39} - v_{38} - v_{40} - v_0$.

3.4 Analisis Hasil Akhir

Algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) berhasil mengidentifikasi rute pengangkutan sampah yang paling efisien secara jarak tempuh. Rekapitulasi pencarian rute optimal di Kecamatan Medan Marelan berdasarkan wilayah masing-masing disajikan dalam Tabel 10.

Tabel 10. Rute Optimal Kecamatan Medan Marelan

Wilayah	Rekomendasi Rute	Jarak Tempuh (km)
Wilayah 1	v_0 (TPA) – v_0 (Jl. Marelan Raya) – v_0 (Komplek Suzuya Plaza) – v_0 (Rs Esmun) – v_0 (Jl. Baut) – v_0 (Komplek Sejati) – v_0 (Komplek Maryland) – v_0 (Jl. Pasar 1 Tengah) – v_0 (Komplek Deli Indah) – v_0 (Komplek Marelan 88) – v_0 (TPA)	17,05
Wilayah 2	v_0 (TPA) – v_{10} (Jl. Kapten rahmad Buddin) – v_{15} (Jl. Penghulu Lama) – v_{14} (Jl. Pringgane) – v_{11} (Titi Kuning) – v_{16} (Jl. Nippon) – v_{18} (Paluh Nibung) – v_{17} (Young Panah Hijau) – v_{12} (Jl. Jala) – v_{13} (Gang Pinang) – v_0 (TPA)	25,25
Wilayah 3	v_0 (TPA) – v_{19} (Jl. Kapten rahmad Buddin) – v_{22} (Tut Wuri) – v_{21} (Abdul Sani Muthalib) – v_{23} (Terjun Indah) – v_{24} (Citra Anugrah Permai) – v_{26} (Marelan 9) – v_{25} (Marelan 5) – v_{20} (Komplek Minimalis) – v_0 (TPA)	16,995
Wilayah 4	v_0 (TPA) – v_{29} (Jl. Titi Pahlawan depan RM Uncle Mutho) – v_{30} (lampu merah pasar 5) – v_{27} (Jl. Marelan Raya depan BNI) – v_{28} (lampu merah jl. Rahmad biddun) – v_0 (TPA)	8
Wilayah 5	v_0 (TPA) – v_{36} (Komplek PLN Pasar 5) – v_{31} (Jl. Marelan Raya) – v_{35} (Komplek Indah Pasar 3) – v_{32} (Kampus UISU) – v_{33} (Jl. Datuk Rubiah) – v_{34} (Jl. M. Basir) – v_0 (TPA)	14,83
Wilayah 6	v_0 (TPA) – v_{37} (Lampu Merah Pasar 5) – v_{39} (Simpang Komplek Bank) – v_{38} (Jl. Platina Raya) – v_{40} (Toko Samsung) – v_0 (TPA)	11,5

Tabel 10. menunjukkan hasil rekomendasi rute optimal pengangkutan sampah berdasarkan implementasi ACO di Kecamatan Medan Marelan. Seluruh rute dimulai dan diakhiri dititik TPA v_0 dengan urutan titik layanan yang sesuai berdasarkan hasil optimasi jarak.

4. SIMPULAN

Permasalahan penelitian rute pengangkutan sampah di Kota Medan menunjukkan bahwa algoritma ACO berhasil menemukan rute optimal untuk setiap wilayah pengangkutan sampah di Kecamatan Medan Marelan. Untuk wilayah 1 diperoleh rute

optimal kendaraan pengangkut sampah dengan jarak 17,05 km, untuk wilayah 2 diperoleh rute optimal dengan jarak 25,25 km, untuk wilayah 3 diperoleh rute optimal dengan jarak 16,995 km, untuk wilayah 4 diperoleh rute optimal dengan jarak 8 km, untuk wilayah 5 diperoleh rute optimal dengan jarak 14,83 km, untuk wilayah 6 diperoleh rute optimal dengan jarak 11,5 km. Dengan demikian, algoritma ACO dapat dijadikan alternatif solusi cerdas dalam perencanaan rute operasional pengangkutan sampah, khususnya untuk mendukung kinerja dalam pengelolaan sampah yang lebih efisien di Kecamatan Medan Marelان.

5. REKOMENDASI

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar pemerintahan daerah atau instansi terkait di Kota Medan, khususnya Kecamatan Medan Marelان, mempertimbangkan penerapan algoritma ACO secara praktis dalam sistem pengangkutan sampah untuk meningkatkan efisiensi operasional. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan agar penelitian mencakup variabel tambahan seperti waktu tempuh.

6. REFERENSI

- Afgani, N. Y. (2023). Aplikasi Algoritma Ant Colony Optimization Pada Vehicle Rounting Problem Dalam Pengoptimalan Rute Pengangkutan Sampah Di Kecamatan Sukarami Dan Ilir Barat I Kota Palembang. *AT-TAWASSUTH: Jurnal Ekonomi Islam*, VIII(I), 1–19.
- Arda, M., Andriany, D., & Manurung, Y. H. (2020). Analisis SWOT dalam Menentukan Strategi Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Kota Medan. *Prosiding Konferensi Nasional Ekonomi Manajemen Dan Akuntansi (KNEMA) Journal Homepage*, 1177, 1–12.
- Ary, M. (2022). Optimasi Vehicle Routing Problem Pada Rute Pendistribusian Menggunakan Metode Ant Colony Optimization. *Jurnal Tekno Insentif*, 16(2), 139–149. <https://doi.org/10.36787/jti.v16i2.897>
- Daulay, M. S., & Cipta, H. (2023). *Zero : Journal of Science , Mathematics , and Applied Optimization of Garbage Collection Routes Using The Clarke-Wright Saving Heuristic Method in Medan*. 7(1), 23–32.
- Fauziah, R., & Suparmi, S. (2022). Sistem Pengangkutan Sampah Di Kota Jambi. *Jambura Health and Sport Journal*, 4(2), 127–138. <https://doi.org/10.37311/jhsj.v4i2.15458>
- Fitriastutik, E. (2020). *Optimasi Pengangkutan Sampah Oleh DKRTH Surabaya: Penyusunan Vehicle Routing Problem Untuk Pengangkutan Sampah dan Kajian Pengganti Kendaraan*. 6.
- Hazizah, S., Lubis, R. S., & Cipta, H. (2023). Ant Colony Optimization Algorithm for Traveling Salesman Problem in Distributing Fertilizer. *Mathline: Jurnal Matematika Dan Pendidikan Matematika*, 8(2), 345–358. <https://doi.org/10.31943/mathline.v8i2.388>

- Lasut, A. C., Makalew, F. M., & Opit, P. F. (2019). Analisis Rute Pengangkutan Sampah Kota Manado Dengan Pendekatan Vehicle Routing Problem (Vrp). *Jurnal Ilmiah Realtech*, 15(1), 7–12. <https://doi.org/10.52159/realtech.v15i1.75>
- Muliawan, A. (2022). *Penerapan Algoritma Ant Colony Untuk Menentukan Jalur Terpendek Di Bank Sampah Malang*.
- Nasution, M. khairani. (2020). *Sampah Ke Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Berbasis Geographic Information System (Gis) Di Kota Malang*.
- Neroni, M. (2021). Ant colony optimization with warm-up. *Algorithms*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/a14100295>
- Prayoga, G. B. (2020). *Optimasi Vehicle Routing Problem (VRP) Sampah Kota Pekanbaru Zona 1 Menggunakan Penerapan Hibridisasi Metode Algoritma Nearest Neighbor dan Simulated Annealing*.
- Rachmawati, R., & Yosmar, S. (2025). Using Ant Colony Optimization to Solve a Vehicle Routing Problem : Waste Transportation Routes in Bengkulu City Case Study. *Edumatsains*, 9(2), 333–345.
- Sasmito, A., Cathrynn, J., Tanaka, M., Sampe, M. Z., & Mulya, U. P. (2024). Modified Snow Avalanches Algorithm untuk Vehicle Routing Problem. *Limits: Journal Of Mathematics and Its Aplpications*, 21(3), 429–446.
- Sianturi, R. Y. C., Rahayudi, B., & Widodo, A. W. (2021). Implementasi Algoritma Ant Colony Optimization untuk Optimasi Rute Distribusi Produk Kebutuhan Pokok dari Toko Sasana Bonafide Mojooroto . *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 5(7), 3190–3197.
- Tan, S., & Yeh, W. (2021). applied sciences The Vehicle Routing Problem : State-of-the-Art Classification and Review. *Applied Sciences*, 11.
- Udjulawa, D., & Oktarina, S. (2022). Penerapan Algoritma Ant Colony Optimization Untuk Pencarian Rute Terpendek Lokasi Wisata. *Klik - Jurnal Ilmu Komputer*, 3(1), 26–33. <https://doi.org/10.56869/klik.v3i1.326>
- Wang, M., Ma, T., Li, G., Zhai, X., & Qiao, S. (2020). Ant Colony Optimization with an Improved Pheromone Model for Solving MTSP with Capacity and Time Window Constraint. *IEEE Access*, 8, 106872–106879. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000501>
- Zhao, J., Cheng, D., & Hao, C. (2016). An Improved Ant Colony Algorithm for Solving the Path Planning Problem of the Omnidirectional Mobile Vehicle. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2016/7672839>