

PENGEMBANGAN MODEL PERUTEAN KENDARAAN BERBASIS *GREEN LOGISTIC* DALAM PENDISTRIBUSIAN MAKANAN RINGAN PADA UD SUMBER REJEKI

Akmat Syaifudin¹, Wiwik Handayani²

20012010143@student.upnjatim.ac.id¹, wiwik.em@upnjatim.ac.id²

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model perutean yang efisien guna mengurangi konsumsi dan biaya bahan bakar serta emisi karbon dioksida dalam pendistribusian makanan ringan pada UD Sumber Rejeki. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah algoritma *Ant Colony Optimization* yang akan diolah dengan bahasa pemrograman python melalui *software* Google Colab. Berdasarkan olah data dengan metode terkait, rute baru dengan algoritma *Ant Colony Optimization* mampu menghasilkan efisiensi dalam aspek jarak, konsumsi bahan bakar, dan biaya bahan bakar jika dibandingkan dengan metode perusahaan. Selain itu, algoritma *Ant Colony Optimization* juga menghasilkan emisi karbon dioksida yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan metode perusahaan.

Kata Kunci: *Ant Colony Optimization*; Distribusi; *Green logistic*; *Green Vehicle Routing Problem*.

ABSTRACT

This research aims to develop an efficient routing model to reduce fuel consumption and costs as well as carbon dioxide emissions in the distribution of snacks at UD Sumber Rejeki. The method used in this research is the Ant Colony Optimization algorithm which will be processed with the python programming language through Google Colab software. Based on data processing with related methods, the new route with the Ant Colony Optimization algorithm is able to generate efficiency in terms of distance, fuel consumption, and fuel cost when compared to the company's method. In addition, the Ant Colony Optimization algorithm also produces less carbon dioxide emissions when compared to the company's method.

Keywords: *Ant Colony Optimization*; Distribution; *Green logistics*; *Green Vehicle Routing Problem*.

PENDAHULUAN

Distribusi adalah aktivitas krusial dalam bidang logistik yang sangat berkaitan dengan transportasi. Di ranah global, sektor transportasi dan perdagangan mengalami pertumbuhan tertinggi dalam perekonomian Indonesia tahun 2023 dengan kontribusi sebesar 13,96 persen¹. Pertumbuhan ini terjadi karena sektor tersebut berperan sebagai sarana penghubung sektor lainnya. Dengan demikian, diperlukan manajemen transportasi yang efektif seperti penentuan rute kendaraan untuk mengoptimalkan pertumbuhan ekonomi di sektor terkait.

Distribusi melibatkan penggunaan kendaraan yang memerlukan bahan bakar untuk beroperasi sehingga pendistribusian produk memengaruhi konsumsi dan biaya bahan bakar. Selain itu, penggunaan kendaraan bermotor dalam distribusi dapat menghasilkan emisi yang berpotensi merugikan lingkungan. Transportasi menempati urutan ketiga sebagai penghasil

¹ Badan Pusat Statistik, “Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Triwulan IV-2023” (Jakarta, 2024).

emisi dengan kontribusi sebesar 149,56 juta ton CO₂e atau 22,3 persen pada tahun 2023. Jenis emisi yang mendominasi adalah karbon dioksida dengan kontribusi sebesar 524,52 juta ton CO₂e atau 78,2 persen².

Inefisiensi penggunaan bahan bakar dalam pendistribusian produk dapat berdampak buruk pada aspek finansial dan lingkungan perusahaan karena makin besar konsumsi bahan bakar, maka biaya distribusi dan emisi karbon dioksida juga meningkat. Permasalahan tersebut dapat dikurangi dengan menerapkan perutean kendaraan berbasis lingkungan atau *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP). Penerapan GVRP mendukung tercapainya *green logistic*, terutama dalam bidang distribusi. Berbeda dengan logistik konvensional yang berfokus pada minimalisasi biaya, *green logistic* lebih mengutamakan efisiensi energi³. Selain itu, pengukuran kinerja *green logistic* mencakup penghematan bahan bakar dan pengurangan emisi, sementara logistik konvensional mencakup penghematan jarak dan biaya distribusi⁴.

Metode heuristik atau metaheuristik tertentu masih memiliki keterbatasan untuk menangani berbagai variasi GVRP⁵. Di sisi lain, metode perutean kendaraan yaitu *Clarke & Wright Saving* terbukti mampu menghemat 43,23 persen konsumsi bahan bakar dan emisi karbon dioksida⁶. Metode tersebut merupakan metode heuristik klasik sehingga diharapkan penelitian selanjutnya menggunakan metode lain seperti metode metaheuristik.

UD Sumber Rejeki adalah perusahaan yang memproduksi makaroni, mi lidi, keripik kaca, sosis bakso goreng, cimol kering, seblak kencur, tahu bulat, dan citruk dengan pusat produksi yang berada di Tasikmalaya dan pusat distribusi yang berada di Sidoarjo. Perusahaan tersebut menggunakan merek dagang “Aa Asep” untuk pemasaran produknya. Penjualan produk UD Sumber Rejeki tergolong tinggi dengan total penjualan mencapai 1.144 kardus pada bulan Maret 2024. Tingginya penjualan berdampak pada peningkatan aktivitas distribusi perusahaan. Sementara itu, UD Sumber Rejeki mengalami kendala berupa penentuan rute kendaraan distribusi yang hanya bergantung pada pengetahuan sopir. Hal tersebut dapat mengakibatkan jarak tempuh tidak efisien yang berimbas pada inefisiensi konsumsi dan biaya bahan bakar serta emisi karbon dioksida karena kurangnya perencanaan rute dan perhitungan yang tepat.

Tabel 1. Rute Aktual Distribusi Produk UD Sumber Rejeki

Rute	Keterangan	Jarak (km)	BBM (L)	Biaya BBM (Rp)
1.	Depot – Sholeh – Khoirul – Depot	160,2	53,40	534.000
2.	Depot – Shobiki – Depot	160,4	53,47	535.000

² Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi” (Jakarta, 2024).

³ Martin Christopher, *Logistics and Supply Chain Management*, 6 ed. (Harlow: The Financial Times, 2022); Leggieri dan Haouari, dalam Rafael Kendy Arakaki et al., “Routing Electric Vehicles with Remote Servicing,” *Modeling and Optimization in Green Logistics*, 2020, 147–68, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45308-4>.

⁴ Riski Arifian, “Penentuan Rute Distribusi Terpendek Ramah Lingkungan Untuk Meminimalkan Biaya Bahan Bakar Menggunakan Algoritma Sweep dan Clark & Wright Saving (Studi Kasus: PT. Lisa Concrete Indonesia)” (Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, 2023); Dian Sudiantini et al., “Pengaruh Penerapan Teknologi terhadap Peningkatan Efisiensi Jasa Pengiriman Barang dalam Manajemen Logistik PT JNE Express,” *Musytari: Neraca Manajemen, Akuntansi, Dan Ekonomi* 1, no. 5 (2023), <https://doi.org/10.8734/mnmae.v1i2.359>; Cendy Novianto Ardiansyah, “Penentuan Jalur Distribusi yang Optimal untuk Meminimasi Biaya Distribusi dengan Metode Program Dinamik di PT. Ciomas Adisatwa Jatim” (Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, 2022).

⁵ S. Sabet dan B. Farooq, “Green Vehicle Routing Problem: State of the Art and Future Directions,” *IEEE Access* 10 (2022).

⁶ Arifian, “Penentuan Rute Distribusi Terpendek Ramah Lingkungan Untuk Meminimalkan Biaya Bahan Bakar Menggunakan Algoritma Sweep dan Clark & Wright Saving (Studi Kasus: PT. Lisa Concrete Indonesia).”

3.	Depot – Syamsi – Depot	54,6	18,20	182.000
4.	Depot – Abidin – Depot	127,8	42,60	426.000
5.	Depot – Sholikin – Khoiri – Morodadi – Depot	100,4	33,47	335.000
6.	Depot – Hermantap – Gentong – Depot	40,6	13,53	136.000
Total		644	214,67	2.148.000

Sumber: Data Perusahaan

Berdasarkan tabel di atas, total jarak pendistribusian produk UD Sumber Rejeki per pengiriman perminggu adalah 644 km dengan konsumsi bahan bakar sebesar 214,67 liter dan biaya bahan bakar sebesar Rp 2.148.000. Berdasarkan konsumsi bahan bakar, emisi karbon dioksida yang dihasilkan adalah 474,44 kg CO₂ per pengiriman perminggu. Konsumsi dan biaya bahan bakar serta emisi karbon dioksida tersebut cukup besar sehingga memerlukan solusi untuk mengurangi aspek tersebut. Berdasarkan permasalahan yang dibahas, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model perutean yang efisien guna mengurangi konsumsi dan biaya bahan bakar serta emisi karbon dioksida dalam pendistribusian makanan ringan pada UD Sumber Rejeki.

METODOLOGI

Pendekatan penelitian ini adalah kuantitatif dengan metode deskriptif yang bertujuan untuk mengukur tingkat variabel pada objek penelitian. Subjek penelitian adalah PIC Distributor dan sopir UD Sumber Rejeki, sedangkan objek penelitian adalah rute distribusi makanan ringan UD Sumber Rejeki periode pengiriman Maret 2024. Sumber data terdiri dari data primer yang diperoleh melalui wawancara dan observasi serta data sekunder yang diperoleh melalui data UD Sumber Rejeki dan lembaga eksternal terkait. Data yang telah dihimpun akan diolah menggunakan algoritma Ant Colony Optimization dengan bahasa pemrograman python dalam software Google Colab untuk menghasilkan usulan rute paling efisien.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengumpulan Data

a. Lokasi Agen dan Rerata Permintaan

Tabel 2. Data Lokasi Agen dan Rerata Permintaan Maret 2024

No.	Nama/Pemilik Agen	Jarak (km)	Rerata Permintaan
1.	Syamsi Snack	27,3	30 kardus
2.	Camilan Khoirul	78,5	20 kardus
3.	Shobiki Makmur	80,2	20 kardus
4.	Abidin Jaya	63,9	18 kardus
5.	Gentong Kriuk	16,4	16 kardus
6.	Jajan Khoiri	8,2	5 kardus
7.	Morodadi	41,7	9 kardus
8.	Sholeh Sejahtera	75,7	17 kardus
9.	Sholikin Maju	5	4 kardus
10.	Hermantap	12,9	4 kardus

Sumber: Data Perusahaan

b. Matriks Jarak

Tabel 3. Matriks Jarak

J	D	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
D	0	27,3	78,5	80,2	63,9	16,4	8,2	41,7	75,7	5	12,9
A1	27,3	0	53,6	55,3	64,7	16,8	20,3	23,7	55,7	18,2	10,1
A2	78,5	53,6	0	1,7	88,3	49,6	79	29,2	6	62,8	58,1
A3	80,2	55,3	1,7	0	90	51,3	80,7	30,9	7,7	64,5	59,8
A4	63,9	64,7	88,3	90	0	51,2	55,5	61,3	91,6	53,3	59,7
A5	16,4	16,8	49,6	51,3	51,2	0	15,9	21,5	53,2	10,5	11,3
A6	8,2	20,3	79	80,7	55,5	15,9	0	43,8	76,3	9,9	11,1
A7	41,7	23,7	29,2	30,9	61,3	21,5	43,8	0	30,1	34,3	29,5
A8	75,7	55,7	6	7,7	91,6	53,2	76,3	30,1	0	67,9	60
A9	5	18,2	62,8	64,5	53,3	10,5	9,9	34,3	67,9	0	11,7
A10	12,9	10,1	58,1	59,8	59,7	11,3	11,1	29,5	60	11,7	0

Sumber: Data diolah

Keterangan:

D	: Depot (UD Sumber Rejeki)	A6	: Jajan Khoiri
A1	: Syamsi Snack	A7	: Morodadi
A2	: Camilan Khoirul	A8	: Sholeh Sejahtera
A3	: Shobiki Makmur	A9	: Sholikin Maju
A4	: Abidin Jaya	A10	: Hermantap
A5	: Gentong Kriuk		

c. Rute Distribusi Aktual

Tabel 4. Rute Distribusi Aktual Maret 2024

Rute	Keterangan	Jarak (km)
1.	Depot – Sholeh – Khoirul – Depot	160,2
2.	Depot – Shobiki – Depot	160,4
3.	Depot – Syamsi – Depot	54,6
4.	Depot – Abidin – Depot	127,8
5.	Depot – Sholikin – Khoiri – Morodadi – Depot	100,4
6.	Depot – Hermantap – Gentong – Depot	40,6
Total		644

Sumber: Data Perusahaan

d. Konsumsi dan Biaya Bahan Bakar

Berdasarkan data rute distribusi aktual UD Sumber Rejeki, konsumsi dan biaya bahan bakar yang dikeluarkan adalah 214,67 liter dan Rp 2.148.000 untuk sekali pengiriman perminggu. Aktivitas pendistribusian produk dilaksanakan selama delapan kali perbulan sehingga total konsumsi dan biaya bahan bakar yang dikeluarkan pada bulan Maret 2024 adalah:

Tabel 5. Konsumsi dan Biaya Bahan Bakar Maret 2024

No.	Keterangan	Satuan	Nilai
1.	Konsumsi bahan bakar	Liter	1.717,36
2.	Biaya bahan bakar	Rupiah	17.184.000

Sumber: Data diolah

e. Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Data emisi karbon dioksida diperoleh berdasarkan konsumsi bahan bakar dalam pendistribusian produk. Tingkat ketelitian yang digunakan dalam perhitungan emisi karbon dioksida adalah Tier 2. Berikut ini adalah perhitungan emisi karbon dioksida pada pendistribusian produk dalam sekali perminggu:

$$DA_{BBM} = F_{BBM} \times \rho \times NCV \times 10^{-6}$$

$$DA_{BBM} = 0,21467 \text{ kL} \times 715 \text{ kg/m}^3 \times 44,61 \text{ Tj/Gg} \times 0,000001$$

$$DA_{BBM} = 0,006847147 \text{ Tj}$$

$$\text{Emisi GRK} = \text{Data Aktivitas} \times \text{Faktor Emisi}$$

$$\text{Emisi GRK} = 0,006847147 \text{ Tj} \times 69.290 \text{ kg CO}_2/\text{Tj}$$

$$\text{Emisi GRK} = 474,44 \text{ kg CO}_2$$

Aktivitas pendistribusian produk dilaksanakan selama delapan kali perbulan sehingga emisi karbon dioksida yang dihasilkan dalam pendistribusian produk bulan Maret 2024 adalah 3.759,52 kg CO₂.

2. Analisis Data

a. Inisialisasi Parameter

Terdapat tiga parameter yang perlu didefinisikan dalam kode yaitu parameter *Ant Colony Optimization*, data jarak antarnode, dan parameter tambahan. Parameter *Ant Colony Optimization* meliputi intensitas feromon awal (τ) = 1, Siklus kendaraan (Q) = 1, faktor feromon (α) = 5, faktor jarak (β) = 5, iterasi = 100, dan tingkat penguapan feromon (ρ) = 0,8. Data jarak antarnode didefinisikan berdasarkan matriks jarak yang telah diketahui sebelumnya. Parameter tambahan meliputi jumlah node = 11 (1 depot dan 10 agen), jumlah kendaraan = 4, kapasitas kendaraan = 40 kardus, dan permintaan agen didefinisikan berdasarkan rerata permintaan Maret 2024.

b. Iterasi *Ant Colony Optimization* (ACO)

Pengolahan data dilakukan sebanyak 100 iterasi berdasarkan fungsi *for _ in range (iterasi)*:. Terdapat dua proses utama yang terjadi dalam tahap iterasi yaitu perancangan rute oleh semut (kendaraan) dan pemilihan lokasi selanjutnya. Perancangan rute dimulai dengan menginisialisasi matriks solusi yang digunakan untuk menyimpan rute yang dikunjungi oleh semut (kendaraan) dengan kode *ant_tour* = *np.zeros((n, n), dtype=int)*. Untuk memulai perjalanan tiap semut (kendaraan), digunakan fungsi *for k in range(n)*:. Setiap semut (kendaraan) menentukan lokasi awal dengan kode *start_node* = *k* dan menyimpan lokasi tersebut dalam matriks solusi dengan kode *ant_tour[k, 0] = start_node*. Lokasi awal ditandai sebagai lokasi saat ini dengan kode *current_node* = *start_node*. Semut (kendaraan) kemudian menentukan lokasi selanjutnya yang belum dikunjungi dengan kode *remaining_nodes* = *set(range(n))* dan saat berpindah ke lokasi selanjutnya, lokasi sebelumnya dicatat dalam *tabu list* agar tidak dikunjungi kembali dengan kode *remaining_nodes.remove(start_node)*.

Pemilihan lokasi selanjutnya didasarkan pada probabilitas yang dihitung dari kombinasi jarak dan jejak feromon. Proses ini menggunakan fungsi *for l in range(1, n)*: untuk mengulangi dari lokasi kedua hingga lokasi terakhir. Pengulangan tidak dimulai dari lokasi awal karena semut (kendaraan) sudah memulai dari sana. Untuk menentukan lokasi selanjutnya, digunakan rumus probabilitas *prob* = (*pheromone[current_node, list(remaining_nodes)] ** alpha*) * ((*1 / d[current_node, list(remaining_nodes)]*) ** *beta*). Probabilitas ini kemudian dinormalisasi dengan *prob /= np.sum(prob)* agar totalnya menjadi 1 sehingga menghasilkan distribusi probabilitas yang valid. Semut (kendaraan) akan memilih lokasi selanjutnya berdasarkan probabilitas tertinggi dengan kode *next_node* = *np.random.choice(list(remaining_nodes), 1, p=prob)[0]*. Setelah lokasi selanjutnya ditentukan, lokasi tersebut disimpan dalam matriks solusi dengan *ant_tour[k, l] = next_node* dan dicatat dalam *tabu list* dengan *remaining_nodes.remove(next_node)*. Lokasi tersebut kemudian didefinisikan sebagai lokasi saat ini dengan kode *current_node* = *next_node*.

c. Pembaruan Feromon

Setelah semua semut (kendaraan) merancang rute, intensitas feromon diperbarui berdasarkan aturan evaporasi dengan kode $pheromone *= (1 - \rho)$. Feromon diperbarui untuk setiap rute yang dilewati semut (kendaraan) berdasarkan jarak antarlokasi menggunakan fungsi *for k in range(n)*. Pembaruan feromon dalam setiap langkah pada rute dilakukan dengan fungsi *for l in range(n-1)*. Lokasi saat ini dan berikutnya didefinisikan dengan kode $current_node = ant_tour[k, l]$ dan $next_node = ant_tour[k, l+1]$. Penambahan feromon pada rute antara kedua lokasi dilakukan dengan kode $pheromone[current_node, next_node] += Q / d[current_node, next_node]$. Rute dengan jalur terpendek akan mendapatkan lebih banyak feromon sehingga semut (kendaraan) cenderung memilih rute tersebut di iterasi berikutnya.

d. Penentuan Rute Terbaik

Pada tahap ini, rute terbaik ditentukan berdasarkan jumlah feromon yang ditinggalkan semut (kendaraan) pada setiap jalur. Total feromon dihitung dengan kode $total_feromon = np.sum(pheromone, axis=1)$ dan indeks rute terbaik ditentukan dengan kode $best_route_index = np.argmax(total_feromon)$. Rute terbaik ditetapkan menggunakan $best_route = ant_tour[best_route_index]$. Untuk memastikan rute terbaik dimulai dan berakhir di depot, dilakukan pemeriksaan dengan *if best_route[0] != 0 or best_route[-1] != 0*. Rute disesuaikan agar dimulai dari depot dengan kode $idx_zero = np.where(best_route == 0)[0][0]$ $best_route = np.roll(best_route, -idx_zero)$ dan ditambahkan depot di akhir dengan $best_route = np.append(best_route, 0)$. Total panjang rute dihitung dengan kode $total_cost = np.sum([d[best_route[i], best_route[i+1]] for i in range(len(best_route)-1)])$. Hasil rute terbaik dan total jaraknya dicetak menggunakan $print("Rute Terbaik:", best_route)$ $print("Panjang Rute Terbaik:", total_cost)$. Rute terbaik yang ditemukan adalah 0 – 6 – 10 – 1 – 4 – 3 – 2 – 8 – 7 – 5 – 9 – 0 dengan total jarak 258,9 km.

e. Pengelompokan Rute

Pengolahan data dengan algoritma *Ant Colony Optimization* menghasilkan satu usulan rute yang memerlukan penyesuaian karena tidak mungkin dijalankan oleh satu kendaraan. Penyesuaian dilakukan dengan mengelompokkan rute berdasarkan kapasitas maksimal kendaraan sebanyak 40 kardus dan jumlah kendaraan sebanyak 4 unit.

Tabel 6. Pengelompokan Rute

Rute	Keterangan	Jarak (km)	Kapasitas
1.	0 – 6 – 10 – 1 – 0	56,7	39 kardus
2.	0 – 4 – 3 – 0	234,1	38 kardus
3.	0 – 2 – 8 – 0	160,2	37 kardus
4.	0 – 7 – 5 – 9 – 0	78,7	29 kardus
Total		529,7	143 kardus

Sumber: Data diolah

Keterangan:

1. Rute 1: 0 – 6 – 10 – 1 – 0 → Depot – Jajan Khoiri – Hermantap – Syamsi Snack – Depot
2. Rute 2: 0 – 4 – 3 – 0 → Depot – Abidin Jaya – Shobiki Makmur – Depot
3. Rute 3: 0 – 2 – 8 – 0 → Depot – Camilan Khoirul – Sholeh Sejahtera – Depot
4. Rute 4: 0 – 7 – 5 – 9 – 0 → Depot – Morodadi – Gentong Kriuk – Sholikin Maju – Depot

3. Pembahasan

a. Perutean Kendaraan

Perutean kendaraan berkaitan tentang analisis jarak yang dihasilkan dari metode awal perusahaan dengan algoritma *Ant Colony Optimization*. Algoritma ACO menghasilkan jarak distribusi yang lebih efisien yaitu 529,7 km. Selain itu, algoritma ini mampu mengurangi jumlah rute menjadi 4 rute. Dengan demikian, besar efisiensi jarak yang dihasilkan algoritma *Ant Colony Optimization* yaitu:

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi Jarak} &= \frac{\text{Jarak Awal} - \text{Jarak Metode Usulan}}{\text{Jarak Awal}} \times 100 \% \\ &= \frac{644 \text{ km} - 529,7 \text{ km}}{644 \text{ km}} \times 100 \% \\ &= 17,75 \%\end{aligned}$$

b. Konsumsi dan Biaya Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar dihitung berdasarkan jarak yang ditempuh kendaraan. Berikut ini adalah perhitungan konsumsi bahan bakar berdasarkan rute yang dihasilkan algoritma *Ant Colony Optimization*:

Tabel 7. Konsumsi dan Biaya Bahan Bakar dari Rute Algoritma ACO

Rute	Keterangan	Jarak (km)	BBM (L)	Biaya BBM (Rp)
1.	Depot – Khoiri – Hermantap – Syamsi – Depot	56,7	18,90	189.000
2.	Depot – Abidin – Shobiki – Depot	234,1	78,03	781.000
3.	Depot – Khoirul – Sholeh – Depot	160,2	53,40	534.000
4.	Depot – Morodadi – Gentong – Sholikin – Depot	78,7	26,23	263.000
Total		529,7	176,56	1.767.000

Sumber: Data diolah

Algoritma *Ant Colony Optimization* menghasilkan konsumsi bahan bakar sebesar 176,56 liter dan biaya bahan bakar sebesar Rp 1.767.000 untuk sekali pengiriman per minggu. Dengan pendistribusian yang dilakukan delapan kali per bulan, total konsumsi dan biaya bahan bakar diperkirakan mencapai 1.412,48 liter dan Rp 14.136.000. Berikut ini adalah perbandingan konsumsi dan biaya bahan bakar antara metode awal perusahaan dan algoritma *Ant Colony Optimization*.

Tabel 8. Analisis Konsumsi dan Biaya Bahan Bakar

Metode Awal		<i>Ant Colony Optimization</i>	
Ket.	Total	Ket.	Total
Konsumsi BB	1.717,36 liter	Konsumsi BB	1.412,48 liter
Biaya BB	Rp 17.184.000	Biaya BB	Rp 14.136.000

Sumber: Data diolah

Perutean kendaraan dengan algoritma *Ant Colony Optimization* menghasilkan konsumsi dan biaya bahan bakar yang lebih efisien yaitu 1.412,48 liter dan Rp 14.136.000. Dengan demikian, besar efisiensi konsumsi dan biaya bakar yang dihasilkan algoritma *Ant Colony Optimization* yaitu:

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi Kons. BB} &= \frac{\text{Konsumsi BB Awal} - \text{Konsumsi BB Metode Usulan}}{\text{Konsumsi BB Awal}} \times 100 \% \\ &= \frac{1.717,36 \text{ liter} - 1.412,48 \text{ liter}}{1.717,36 \text{ liter}} \times 100 \% \\ &= 17,75 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi Biaya BB} &= \frac{\text{Biaya BB Awal} - \text{Biaya BB Metode Usulan}}{\text{Biaya BB Awal}} \times 100 \% \\ &= \frac{\text{Rp } 17.184.000 - \text{Rp } 14.136.000}{\text{Rp } 17.184.000} \times 100 \% \\ &= 17,74 \%\end{aligned}$$

c. Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Emisi karbon dioksida dihitung berdasarkan konsumsi bahan bakar. Berikut ini adalah perhitungan emisi karbon dioksida menggunakan tingkat ketelitian *Tier 2* pada rute kendaraan yang dihasilkan algoritma *Ant Colony Optimization*:

$$DA_{BBM} = F_{BBM} \times \rho \times NCV \times 10^{-6}$$

$$DA_{BBM} = 0,17656 \text{ kL} \times 715 \text{ kg/m}^3 \times 44,61 \text{ Tj/Gg} \times 0,000001$$

$$DA_{BBM} = 0,00563158 \text{ Tj}$$

$$\text{Emisi GRK} = \text{Data Aktivitas} \times \text{Faktor Emisi}$$

$$\text{Emisi GRK} = 0,00563158 \text{ Tj} \times 69.290 \text{ kg CO}_2/\text{TJ}$$

$$\text{Emisi GRK} = 390,21 \text{ kg CO}_2$$

Emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh rute kendaraan menggunakan algoritma ACO adalah 390,21 kg CO₂ untuk sekali pengiriman perminggu. Dengan aktivitas pendistribusian produk yang dilaksanakan selama delapan kali perbulan, estimasi total emisi karbon dioksida adalah 3.121,68 kg CO₂. Berikut ini adalah data perbandingan emisi karbon dioksida yang dihasilkan metode awal perusahaan dengan algoritma *Ant Colony Optimization*:

Tabel 1. Analisis Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Metode Awal		<i>Ant Colony Optimization</i>	
Ket.	Total	Ket.	Total
Emisi CO ₂	3.759,52 kg CO ₂	Emisi CO ₂	3.121,68 kg CO ₂

Sumber: Data diolah

Perutean kendaraan dengan algoritma *Ant Colony Optimization* menghasilkan emisi karbon dioksida yang lebih sedikit yaitu 3.121,68 kg CO₂. Dengan demikian, besar pengurangan emisi karbon dioksida yang dihasilkan algoritma *Ant Colony Optimization* yaitu:

$$\begin{aligned}\text{Pengurangan Emisi CO}_2 &= \frac{\text{Emisi CO}_2 \text{ Awal} - \text{Emisi CO}_2 \text{ Metode Usulan}}{\text{Emisi CO}_2 \text{ Awal}} \times 100 \% \\ &= \frac{3.759,52 \text{ kg CO}_2 - 3.121,68 \text{ kg CO}_2}{3.759,52 \text{ kg CO}_2} \times 100 \% \\ &= 16,97 \%\end{aligned}$$

Berdasarkan pembahasan yang telah dipaparkan, penerapan algoritma *Ant Colony Optimization* mampu menciptakan efisiensi atau pengurangan dalam aspek jarak, konsumsi bahan bakar, biaya bahan bakar, dan emisi karbon dioksida. Dalam konteks perutean kendaraan, metode tersebut juga menghasilkan efisiensi pada permasalahan perutean kendaraan berbasis lingkungan (*Green Vehicle Routing Problem*). Dengan demikian, algoritma ini mendukung implementasi *green logistic* melalui optimasi rute pendistribusian produk.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, kesimpulan yang diperoleh adalah perutean kendaraan dengan algoritma *Ant Colony Optimization* menghasilkan jarak yang lebih efisien, konsumsi bahan bakar yang lebih rendah, biaya bahan bakar yang lebih ekonomis, dan emisi karbon dioksida yang lebih sedikit dibandingkan dengan perutean kendaraan menggunakan metode perusahaan.

Dari hasil penelitian ini, penulis memberikan beberapa saran. Pertama, UD Sumber Rejeki disarankan untuk mempertimbangkan metode dan hasil penelitian ini sebagai dasar perencanaan rute kendaraan. Kedua, UD Sumber Rejeki sebaiknya lebih memerhatikan dokumentasi data perusahaan yang krusial seperti data pembelian dan biaya bahan bakar. Terakhir, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengembangkan penelitian serupa hingga tahap pengimplementasian *Graphical User Interface* (GUI) agar metode penelitian lebih mudah digunakan oleh orang awam.

DAFTAR PUSTAKA

- Arakaki, Rafael Kendy, Lucas Porto Maziero, Matheus Diógenes Andrade, Vitor Mitsuo Fukushima Hama, dan Fábio Luiz Usberti. "Routing Electric Vehicles with Remote Servicing." *Modeling and Optimization in Green Logistics*, 2020, 147–68. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45308-4>.
- Ardiansyah, Cendy Novianto. "Penentuan Jalur Distribusi yang Optimal untuk Meminimasi Biaya Distribusi dengan Metode Program Dinamik di PT. Ciomas Adisatwa Jatim." Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, 2022.
- Arifian, Riski. "Penentuan Rute Distribusi Terpendek Ramah Lingkungan Untuk Meminimalkan Biaya Bahan Bakar Menggunakan Algoritma Sweep dan Clark & Wright Saving (Studi Kasus: PT. Lisa Concrete Indonesia)." Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, 2023.
- Badan Pusat Statistik. "Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Triwulan IV-2023." Jakarta, 2024.
- Christopher, Martin. *Logistics and Supply Chain Management*. 6 ed. Harlow: The Financial Times, 2022.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. "Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi." Jakarta, 2024.
- Sabet, S., dan B. Farooq. "Green Vehicle Routing Problem: State of the Art and Future Directions." *IEEE Access* 10 (2022).
- Sudiantini, Dian, Diani Fatimah, Angel Septiani Parhusip, Idza Ardhi Wa'Afin, dan Mohammad Dava Ramdhani Umam. "Pengaruh Penerapan Teknologi terhadap Peningkatan Efisiensi Jasa Pengiriman Barang dalam Manajemen Logistik PT JNE Express." *Musytari : Neraca Manajemen, Akuntansi, Dan Ekonomi* 1, no. 5 (2023). <https://doi.org/10.8734/mnmae.v1i2.359>.