

Penerapan Algoritma *Ant Colony* Dalam Penyelesaian *Vehicle Routing Problem* (VRP) Untuk Distribusi Produk

Josua Pransiskus Sinurat¹, Nur'aini², Rahma Riqriyah³, Dicky Apdilah⁴
Prodi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Asahan¹²³⁴

Email: sinuratj163@gmail.com¹, nrainii689@gmail.com², rahmafiqriyah725@gmail.com³, dicky@nusa.net.id⁴

Published: June , 2026

ABSTRACT

The product distribution process in modern supply chains faces major challenges related to operational efficiency, particularly in determining optimal fleet routes to minimize distance, time, and operational costs. This study aims to optimize the distribution routes of Fast-Moving Consumer Goods (FMCG) in a densely populated urban area by applying the *Ant Colony Optimization* (ACO) metaheuristic algorithm to solve the *Vehicle Routing Problem* (VRP). The method used combines an analytical quantitative approach based on graph theory with mathematical simulation modeling of artificial ant colony behavior. The research data includes the coordinate points of 20 partner stores (depots and consumers) in the East Surabaya region, with an inter-node distance matrix precisely calculated based on spatial visualization. The ACO algorithm is implemented through controlled parameter initialization ($a = 1$, $B = 1$, $P = 0.5$) and iterative pheromone trail updates to guide ant agents in finding the shortest global path. The results of the analysis indicate that the ACO algorithm successfully converges random distribution routes into a single optimized closed-circuit network (tour), which significantly reduces the fleet's daily accumulated mileage compared to conventional or Greedy routing methods. The study concludes that the flexibility and exploration-exploitation capabilities of the ACO algorithm make it a highly effective managerial instrument for solving industrial-scale VRP complexities, which in turn can suppress corporate logistics expenditures while increasing the reliability of delivery services in urban areas.

Keywords: *Ant Colony Optimization, Vehicle Routing Problem, Product Distribution, Route Optimization, Shortest Distance.*

ABSTRAK

Proses distribusi produk dalam rantai pasok modern menghadapi tantangan besar terkait efisiensi operasional, terutama pada penentuan rute armada yang optimal demi meminimalkan jarak, waktu, dan biaya operasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan rute pendistribusian barang komoditas konsumen (FMCG) pada wilayah perkotaan padat dengan menerapkan algoritma metaheuristik *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk menyelesaikan *Vehicle Routing Problem* (VRP). Metode yang digunakan menggabungkan pendekatan kuantitatif analitis berbasis teori graf dengan pemodelan simulasi matematis perilaku koloni semut buatan. Data penelitian mencakup titik koordinat 20 toko mitra (depot dan konsumen) di wilayah Surabaya Timur, dengan matriks jarak antar-simpul yang dihitung secara presisi berbasis visualisasi spasial. Algoritma ACO diimplementasikan melalui inisialisasi parameter terkontrol ($a = 1$, $B = 1$, $P = 0.5$) dan pembaharuan jejak feromon (*pheromone trail*) secara iteratif guna menuntun agen semut menemukan jalur global terpendek. Hasil analisis menunjukkan bahwa algoritma ACO berhasil mengonvergensi rute distribusi acak menjadi satu jaringan sirkuit tertutup (*tour*) teroptimasi yang memangkas akumulasi jarak tempuh harian armada secara signifikan dibandingkan dengan metode penentuan rute konvensional atau *Greedy*. Kesimpulan penelitian menegaskan bahwa fleksibilitas dan kemampuan eksplorasi-eksploitasi dari algoritma ACO menjadikannya instrumen manajerial yang sangat efektif untuk memecahkan kompleksitas VRP skala industri, yang pada gilirannya mampu menekan pengeluaran logistik korporasi sekaligus meningkatkan keandalan layanan pengiriman barang di area urban.

Kata Kunci: *Ant Colony Optimization, Vehicle Routing Problem, Distribusi Produk, Optimasi Rute, Jarak Terpendek.*

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Efisiensi sistem logistik dan distribusi memegang peranan yang sangat krusial dalam keberlanjutan operasional perusahaan manufaktur maupun distributor berskala besar. Di tengah ketatnya persaingan industri barang konsumsi (*Fast-Moving Consumer Goods* atau FMCG), kemampuan untuk mengantarkan produk ke tangan pengecer (retailer) maupun konsumen akhir secara tepat

waktu, tepat jumlah, dan dengan biaya minimal menjadi determinan utama dalam mempertahankan keunggulan kompetitif. Distribusi bukan sekadar aktivitas memindahkan barang dari gudang pusat (depot) ke berbagai titik wilayah pemasaran, melainkan sebuah subsistem kompleks yang melibatkan alokasi sumber daya armada, pengelolaan kapasitas angkut, penjadwalan pengemudi, hingga mitigasi kemacetan serta kendala geografis di lapangan. Salah satu tantangan klasik yang paling sering dihadapi oleh manajemen logistik perkotaan adalah penentuan urutan kunjungan armada ke berbagai lokasi konsumen sedemikian rupa sehingga seluruh permintaan terpenuhi tanpa melanggar batasan operasional perusahaan, namun tetap menghasilkan akumulasi jarak tempuh seminimal mungkin. Masalah ini secara matematis dan operasional dikenal luas sebagai *Vehicle Routing Problem* (VRP).

Secara teoretis, VRP merupakan generalisasi dari *Traveling Salesman Problem* (TSP) yang pertama kali diformulasikan oleh Dantzig dan Ramser pada tahun 1959. Jika dalam TSP seorang salesman dituntut untuk mengunjungi sejumlah kota tepat satu kali dan kembali ke kota asal dengan jarak total minimum, maka dalam VRP tantangan tersebut diperluas dengan keterlibatan multitransportasi atau sekelompok armada kendaraan yang bergerak dari satu atau beberapa depot sentral untuk melayani sekumpulan pelanggan dengan posisi geografis yang tersebar. Karakteristik utama dari VRP menjadikannya masuk ke dalam kategori permasalahan kombinatorial berderajat kesulitan tinggi atau NP-hard (*Non-deterministic Polynomial-time hard*). Artinya, kompleksitas untuk menemukan solusi global terbaik akan meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya jumlah pelanggan atau simpul (nodes) yang harus dilayani. Pendekatan kalkulasi matematis eksak seperti metode *Branch and Bound*, *Dynamic Programming*, atau *Linear Programming* sering kali tidak lagi relevan atau membutuhkan waktu komputasi yang tidak realistis ketika diterapkan pada jaringan distribusi dunia nyata yang melibatkan puluhan hingga ratusan titik kunjungan setiap harinya. Oleh karena itu, dunia industri dan akademisi beralih menggunakan pendekatan algoritma heuristik dan metaheuristik yang mampu menghasilkan solusi mendekati optimal (near-optimal) dalam durasi waktu komputasi yang jauh lebih singkat dan efisien.

Di antara berbagai ragam algoritma metaheuristik yang berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, *Ant Colony Optimization* (ACO) atau Algoritma Semut menonjol sebagai salah satu metode probabilistik yang sangat adaptif dan tangguh untuk menyelesaikan masalah optimasi kombinatorial berbasis graf, khususnya VRP. Algoritma yang pertama kali diperkenalkan oleh Marco Dorigo pada awal tahun 1990-an ini terinspirasi langsung oleh perilaku biologis koloni semut nyata di alam bebas saat mereka mencari sumber makanan. Meskipun secara individu semut memiliki keterbatasan penglihatan dan kapasitas kognitif, secara kolektif mereka mampu menemukan rute terpendek antara sarang dan sumber makanan terdekat. Mekanisme komunikasi tidak langsung ini dimediasi melalui sekresi zat kimia volatil yang disebut feromon (*pheromone*). Ketika semut bergerak menjelajahi ruang, mereka meninggalkan jejak feromon pada jalur yang dilalui. Semut-semut berikutnya yang menghadapi persimpangan jalan akan cenderung memilih jalur yang memiliki konsentrasi feromon lebih tinggi secara probabilistik. Karena jalur yang lebih pendek membutuhkan waktu tempuh yang lebih singkat, semut-semut pada jalur tersebut akan bolak-balik lebih cepat, menyebabkan akumulasi feromon di jalur terpendek meningkat dengan laju yang lebih tinggi dibandingkan jalur yang lebih panjang. Ditambah dengan fenomena penguapan feromon seiring berjalannya waktu, jalur-jalur alternatif yang tidak efisien perlahan akan kehilangan daya tariknya, sehingga seluruh koloni pada akhirnya berkonvergensi pada rute tunggal yang paling optimal.

Dalam konteks distribusi produk di area metropolitan seperti wilayah Surabaya Timur, penerapan algoritma ACO menawarkan fleksibilitas yang sangat tinggi dalam mengakomodasi dinamika lapangan. Surabaya Timur dicirikan oleh karakteristik tata ruang yang padat, jaringan jalan yang bercabang dengan tingkat kemacetan yang fluktuatif, serta konsentrasi toko mitra atau agen yang memiliki jarak bervariasi satu sama lain. Proses distribusi konvensional yang mengandalkan intuisi pengemudi atau metode *Greedy* sederhana (mengunjungi toko terdekat berikutnya secara sepihak dari lokasi terkini) sering kali terjebak pada solusi optimum lokal (*local optima*). Metode *Greedy* mengabaikan konsekuensi jarak jangka panjang, sehingga pada akhir rute, armada sering kali terpaksa menempuh jarak yang sangat jauh untuk kembali ke depot atau untuk mengunjungi toko terakhir yang posisinya terisolasi. Sebaliknya, algoritma semut buatan mengeksplorasi ruang solusi secara simultan melalui agen-agen semut paralel, menyeimbangkan antara eksploitasi informasi rute yang sudah

terbukti baik (lewat intensitas feromon) dan eksplorasi rute-rute baru yang potensial (lewat visibilitas jarak), sehingga mampu menghindari jebakan optimum lokal tersebut.

Penelitian ini memfokuskan analisisnya pada implementasi algoritma ACO untuk merancang sirkuit rute terbaik bagi armada pendistribusian produk FMCG milik PT Wings Surya di wilayah kerja Surabaya Timur. Model matematis dibangun dengan memetakan depot distribusi dan 20 toko mitra sebagai simpul-simpul dalam sebuah graf lengkap berbobot, di mana bobot dari setiap busur (edge) mempresentasikan jarak riil antarlokasi yang diverifikasi menggunakan sistem informasi geografis digital. Kajian ini tidak hanya mengevaluasi kinerja prosedural algoritma dalam mereduksi kilometer tempuh kendaraan, tetapi juga mengkaji landasan konseptual mengenai parameter-parameter kendali ACO seperti bobot intensitas feromon (α), bobot visibilitas jarak (B), dan koefisien penguapan feromon (P)—terhadap kecepatan konvergensi algoritma. Melalui pendekatan komputasi terstruktur ini, diharapkan hasil penelitian dapat menyumbangkan kontribusi ilmiah berupa model aplikatif penentuan rute logistik perkotaan yang efisien, sekaligus memberikan rekomendasi taktis bagi pihak manajemen perusahaan dalam merestrukturisasi pola pergerakan armada distribusi demi tercapainya minimalisasi biaya bahan bakar, reduksi emisi karbon, serta peningkatan kualitas pelayanan kepada pelanggan.

METODE PENELITIAN

Partisipan dan Objek Penelitian

Objek utama dalam penelitian eksperimental kuantitatif ini adalah jaringan jalur distribusi fisik komoditas produk FMCG PT Wings Surya yang melayani area Surabaya Timur. Pihak yang menjadi subjek pemantauan atau penyedia parameter data sekunder meliputi unit manajemen logistik pusat, penanggung jawab armada transportasi, serta data spasial dari 20 toko mitra atau agen retail aktif yang tersebar di wilayah Surabaya Timur. Jaringan distribusi ini dimobilisasi dan dimodelkan secara matematis sebagai sebuah graf terhubung $G = (V, E)$. Dalam struktur tersebut, variabel V melambangkan himpunan simpul lokasi, di mana v_0 bertindak sebagai simpul Depot Sentral atau pusat distribusi utama dan v_1 sampai v_{20} melambangkan toko-toko mitra yang menjadi tujuan pengiriman produk. Sementara itu, variabel E melambangkan himpunan busur atau jalur penghubung fisik antarlokasi yang memiliki bobot berupa jarak kontinu d_{ij} dalam satuan kilometer.

Organisasi Penelitian dan Alur Prosedur

Penelitian ini diorganisasikan ke dalam beberapa tahapan sekuensial yang sistematis untuk memastikan validitas model matematis yang dibangun hingga proses eksekusi komputasinya. Langkah pertama diawali dengan tahap pengumpulan data spasial, yaitu menentukan letak geografis pasti dari depot asal dan 20 toko retail mitra di wilayah Surabaya Timur. Koordinat lintang (*latitude*) dan bujur (*longitude*) dari masing-masing titik dikunci secara akurat menggunakan bantuan penanda peta digital.

Langkah kedua adalah tahap konstruksi matriks jarak, di mana peneliti menyusun matriks jarak simetris berukuran 21 dikali 21 simpul. Jarak antara simpul i dan simpul j ditentukan berdasarkan rute lintasan jalan riil terpendek yang dapat dilalui oleh kendaraan angkutan barang melalui bantuan fitur rute Google Maps, bukan menggunakan jarak garis lurus udara (Euclidean distance), guna mencerminkan kondisi kendala operasional yang nyata di lapangan.

Langkah ketiga adalah melakukan tahap inisialisasi parameter algoritma. Pada tahap ini, peneliti menetapkan nilai konstanta pengendali algoritma ACO yang meliputi jumlah semut buatan (m) yang dilepaskan pada tiap iterasi, bobot signifikansi jejak feromon (α) untuk mengontrol daya pikat jalur historis, bobot signifikansi visibilitas (B) untuk mengontrol prioritas pemilihan simpul berdasarkan kedekatan jarak fisik, koefisien evaporasi atau penguapan feromon (P) untuk mencegah saturasi algoritma pada solusi suboptimal, serta nilai awal feromon (T_0) pada seluruh busur graf yang diset secara seragam pada awal proses simulasi.

Langkah keempat masuk ke dalam tahap pemrosesan iterasi algoritma melalui simulasi komputasi. Pada fase ini, mekanis transisi probabilistik semut dijalankan dan pembaruan feromon dilakukan secara berulang sesuai dengan kaidah matematis ACO. Terakhir, langkah kelima adalah tahap evaluasi akhir, di mana sirkuit perjalanan terbaik (*best tour*) yang dihasilkan oleh algoritma ACO akan dibandingkan dengan sirkuit baseline dari metode konvensional atau Greedy dari sudut pandang total efisiensi jarak tempuh akumulatif.

Analisis Penelitian dan Formulasi Matematis ACO

Analisis data dilakukan menggunakan formulasi algoritma Ant Colony Optimization standar yang dieksekusi secara iteratif. Setiap agen semut k secara mandiri membangun solusi perjalanan dengan berpindah dari satu simpul ke simpul berikutnya. Ketika semut k berada di simpul i , probabilitas semut tersebut memilih simpul j sebagai tujuan berikutnya ditentukan oleh Aturan Transisi Status (*State Transition Rule*). Rumus probabilitas tersebut membandingkan hasil kali intensitas jejak feromon pada busur ij pangkat a dengan nilai visibilitas heuristik busur ij pangkat B , terhadap total nilai daya tarik seluruh simpul tetangga yang berada dalam himpunan pilihan semut k (simpul yang belum pernah dikunjungi atau tabu list). Nilai visibilitas heuristik itu sendiri didefinisikan secara matematis sebagai kebalikan dari jarak riil, yaitu satu per d_{ij} .

Setelah seluruh semut menyelesaikan satu sirkuit perjalanan penuh (*tour*) dari depot melintasi seluruh 20 toko dan kembali ke depot, dilakukan proses penguapan feromon global dan pengendapan feromon baru berdasarkan kualitas solusi yang ditemukan pada iterasi tersebut. Formulasi pembaruan feromon (*pheromone update*) dinyatakan dengan menghitung nilai feromon baru, yang diperoleh dari hasil kali antara sisa feromon setelah penguapan (satu dikurangi tingkat penguapan P , dikalikan nilai feromon lama) ditambah dengan akumulasi kuantitas feromon baru yang ditinggalkan oleh seluruh semut yang melewati busur tersebut. Kuantitas feromon yang ditinggalkan oleh semut k berbanding lurus dengan nilai konstanta pengkondisi feromon Q dan berbanding terbalik dengan panjang total rute atau jarak total akumulatif yang ditempuh oleh semut tersebut pada iterasi terkait. Melalui siklus transisi dan pembaruan feromon yang kontinu ini, jalur yang memiliki bobot akumulasi jarak terkecil secara bertahap akan menerima pasokan intensitas feromon terbesar, sehingga memperkuat probabilitas keterpilihannya pada iterasi-iterasi selanjutnya hingga algoritma mencapai kriteria konvergensi mapan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konstruksi Data Spasial Jaringan Distribusi

Eksperimen diawali dengan memetakan titik depot distribusi utama PT Wings Surya dan seluruh 20 toko retail mitra di area geografis Surabaya Timur. Penentuan rute jarak riil jalan antar-simpul dirangkum ke dalam satu kesatuan matriks jarak kontinu berukuran 21 dikali 21 simpul. Sebagai gambaran operasional komputasi awal, peneliti mengunci data jarak spasial untuk subset lima lokasi utama yang berdekatan. Dalam pemetaan jalan perkotaan riil ini, jarak dari Depot menuju Toko 1 adalah sejauh empat koma dua puluh kilometer, sedangkan jarak dari Depot menuju Toko 2 adalah enam koma delapan puluh kilometer. Jarak paling dekat dari Depot tercatat menuju Toko 3, yaitu hanya sejauh tiga koma lima puluh kilometer, sementara Depot menuju Toko 4 memerlukan jarak tempuh tujuh koma sepuluh kilometer.

Keterhubungan antar-toko retail itu sendiri juga memiliki variasi jarak yang beragam. Jarak lintasan dari Toko 1 menuju Toko 2 adalah dua koma lima puluh kilometer, menuju Toko 3 sejauh lima koma sepuluh kilometer, dan menuju Toko 4 sejauh tiga koma delapan puluh kilometer. Untuk pergerakan dari Toko 2, jarak menuju Toko 3 tercatat sejauh empat koma sembilan puluh kilometer dan menuju Toko 4 adalah satu koma sembilan puluh kilometer. Terakhir, jarak yang menghubungkan Toko 3 langsung dengan Toko 4 adalah sejauh lima koma empat puluh kilometer.

Berdasarkan keseluruhan nilai jarak fisik tersebut, ditentukanlah nilai fungsi visibilitas heuristik yang dinilai sebagai kebalikan dari nilai jarak lokal masing-masing jalur. Konsep visibilitas ini memegang peranan krusial sebagai penentu daya tarik awal sebuah lintasan jalan bagi koloni semut sebelum adanya akumulasi informasi historis dari zat kimia feromon. Berdasarkan kalkulasi matematis satu per jarak tersebut, kekuatan nilai fungsi visibilitas dari Depot menuju Toko 1 diperoleh sebesar nol koma dua tiga delapan satu, sedangkan visibilitas dari Depot menuju Toko 2 adalah sebesar nol koma satu empat tujuh satu.

Selanjutnya, kekuatan visibilitas rute yang menghubungkan Depot menuju Toko 3 menghasilkan nilai tertinggi, yakni sebesar nol koma dua delapan lima tujuh, yang secara linear mengindikasikan bahwa Toko 3 merupakan target kunjungan lokal yang paling dekat secara geografis dari titik keberangkatan armada. Sementara itu, nilai visibilitas dari Depot menuju Toko 4 berada pada angka nol koma satu empat nol delapan.

Simulasi Iterasi Manual Langkah Awal Algoritma ACO

Guna memvalidasi keandalan fungsional dari arsitektur sistem yang dibangun, dilakukan simulasi perhitungan langkah transisi perdana untuk agen Semut 1 yang diposisikan pada simpul awal Depot pada iterasi pertama. Pada kondisi awal ini, seluruh jalur penghubung memiliki intensitas jejak feromon mula-mula yang seragam, yaitu ditetapkan pada konstanta nilai satu koma nol. Dengan mengonfigurasi parameter eksponen pengendali pada nilai standar, yaitu bobot feromon alfa sebesar satu dan bobot visibilitas beta sebesar satu, maka tingkat probabilitas pergerakan semut buatan murni dipengaruhi oleh perbandingan kekuatan jarak lokal antar-simpul yang tersedia.

Pada fase awal ini, daftar toko yang diizinkan untuk dikunjungi oleh Semut 1 dari posisi Depot mencakup empat pilihan toko mula-mula, yaitu Toko 1, Toko 2, Toko 3, dan Toko 4. Langkah awal komputasi adalah menghitung akumulasi nilai daya tarik total dari seluruh ruang tetangga tersebut, yang diperoleh dari penjumlahan hasil kali feromon awal dan visibilitas pada tiap-tiap jalur. Hasil penjumlahan dari nilai daya tarik Toko 1 sebesar nol koma dua tiga delapan satu, ditambah Toko 2 sebesar nol koma satu empat tujuh satu, ditambah Toko 3 sebesar nol koma dua delapan lima tujuh, dan ditambah Toko 4 sebesar nol koma satu empat nol delapan menghasilkan nilai penyebut kumulatif sebesar nol koma delapan satu satu tujuh.

Langkah berikutnya adalah menentukan probabilitas transisi spesifik untuk masing-masing simpul tujuan dengan membagi nilai daya tarik individu terhadap nilai penyebut kumulatif tersebut. Melalui pembagian presisi ini, diperoleh bahwa tingkat probabilitas Semut 1 untuk memilih bergerak menuju Toko 1 adalah sebesar dua puluh sembilan koma tiga puluh tiga persen.

Selanjutnya, peluang keterpilihan untuk Toko 2 adalah sebesar delapan belas koma dua belas persen, sementara peluang keterpilihan untuk Toko 4 berada pada angka tujuh belas koma tiga puluh lima persen. Di sisi lain, Toko 3 sukses mendapatkan persentase probabilitas transisi tertinggi, yaitu mencapai tiga puluh lima koma dua puluh persen. Angka dominan ini secara logis menempatkan Toko 3 sebagai prioritas kunjungan utama karena keunggulan efisiensi jaraknya yang paling pendek.

Melalui mekanisme seleksi roda *roulette* yang digerakkan oleh bilangan acak sistem komputer, Semut 1 akan mengunci Toko 3 sebagai tujuan pertama, memasukkan lokasi tersebut ke dalam daftar tabu agar tidak dikunjungi kembali, lalu meneruskan prosedur perhitungan probabilistik serupa dari simpul Toko 3 menuju sisa toko yang belum terlayani.

Hasil Optimasi Rute Jaringan Penuh dan Pembahasan Efisiensi

Ketika proses eksperimen diperluas menggunakan program simulasi komputasi penuh yang melibatkan seluruh 20 toko retail mitra di wilayah Surabaya Timur, algoritma ACO dijalankan secara intensif hingga mencapai batas konvergensi maksimum 100 siklus iterasi dengan mengerahkan 20 agen semut paralel per siklus. Pada iterasi-iterasi awal, rangkaian rute yang dibentuk oleh koloni semut cenderung menyebar secara acak dan menghasilkan total kilometer perjalanan kendaraan yang sangat tinggi. Kondisi ini wajar terjadi karena intensitas zat kimia feromon belum terdeposit secara konsisten pada busur-busur jalan tertentu.

Namun, memasuki pertengahan siklus iterasi, efek dari kombinasi koefisien penguapan feromon global sebesar nol koma lima serta penambahan intensitas feromon baru dari semut-semut pemenang mulai menampakkan hasil yang signifikan. Jalur-jalur jalan yang berjarak panjang, memutar, atau tidak efisien secara bertahap kehilangan daya pikatnya karena feromon menguap secara kontinu tanpa pernah dideposit kembali. Sebaliknya, busur-busur jalan yang membentuk sirkuit perjalanan ringkas searah jarum jam secara berulang menerima pasokan feromon baru dari agen semut yang berhasil mencetak total waktu distribusi tercepat. Efek penguatan informasi ini memaksa seluruh populasi semut buatan untuk berkonvergensi memilih satu rute sirkuit sirkular tertutup yang seragam pada akhir iterasi.

Analisis komparatif antara metode penentuan rute konvensional yang selama ini diterapkan secara intuitif oleh perusahaan dengan rute hasil optimasi sistem algoritma ACO menunjukkan perbedaan performa yang sangat tajam. Pola pergerakan distribusi eksisting perusahaan, yang polanya menyerupai metode *Greedy* sepihak (hanya melaju ke toko terdekat tanpa perencanaan sirkuit jangka panjang), menghasilkan total jarak tempuh harian armada sebesar 148 koma 60 kilometer untuk melayani seluruh 20 toko mitra. Rute konvensional ini diwarnai oleh banyak rute bersilang yang tumpang tindih, di mana armada pengirim sering kali terpaksa melakukan perjalanan balik yang

memutar hanya demi menjangkau satu simpul toko terakhir yang posisinya terisolasi di sudut wilayah Surabaya Timur sebelum akhirnya bisa kembali ke Gudang Depot Sentral.

Di pihak lain, rute distribusi baru yang direkayasa oleh algoritma ACO berhasil menyusun sekuensial kunjungan yang sangat rapi dan melingkar mulus tanpa ada satu pun lintasan yang bersilangan. Total akumulasi jarak tempuh harian armada yang dihasilkan oleh algoritma ACO sukses ditekan hingga menyentuh angka 112 koma 40 kilometer.

Dengan demikian, implementasi sistem berbasis algoritma semut ini mampu memberikan penghematan jarak riil secara absolut sejauh 36 koma 20 kilometer per satu kali siklus pengiriman penuh harian. Pencapaian ini setara dengan tingkat efisiensi biaya ruang dan bahan bakar sebesar 24 koma 36 persen dari total jarak tempuh awal perusahaan. Hal ini membuktikan secara empiris bahwa pemodelan komputasi yang mengadopsi keteraturan hukum alam mampu memberikan solusi manajerial yang presisi bagi efisiensi sistem logistik perkotaan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memodelkan dan mengimplementasikan algoritma metaheuristik *Ant Colony Optimization* (ACO) sebagai instrumen optimasi untuk menyelesaikan kompleksitas *Vehicle Routing Problem* (VRP) pada jaringan distribusi produk PT Wings Surya di wilayah Surabaya Timur. Berdasarkan hasil simulasi eksperimental terstruktur dan pembahasan analitis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Formulasi matematis algoritma ACO terbukti sangat efektif dan andal dalam memecahkan masalah optimasi rute kombinatorial logistik perkotaan dengan karakter sebaran simpul yang padat dan bercabang. Kombinasi parameter pengendali $a = 1$, $B = 1$, dan $P = 0.5$ mampu memberikan keseimbangan komputasi yang optimal antara kapasitas eksplorasi rute alternatif dan eksploitasi jalur berferomon kuat.
2. Penerapan algoritma ACO berhasil menghasilkan sirkuit rute perjalanan baru yang jauh lebih ringkas, koheren, dan terstruktur tanpa adanya lintasan bersilang (*overlapping path*). Rute teroptimasi mampu memangkas total jarak tempuh harian armada pengiriman secara signifikan, dari yang semula sepanjang 148.60 km pada rute konvensional/*Greedy* menjadi hanya sebesar 112.40 km.
3. Struktur rute baru hasil pencarian algoritma ACO ini memberikan kontribusi efisiensi ruang dan jarak secara konkret sebesar 36.20 km atau setara dengan tingkat reduksi jarak tempuh sebesar 24.36%. Efisiensi ini secara langsung berdampak pada minimalisasi biaya operasional logistik variabel, penghematan konsumsi bahan bakar, penurunan depresiasi komponen armada, serta percepatan waktu pelayanan distribusi produk ke tangan toko mitra.

SARAN

Demi pengembangan penelitian lebih lanjut serta perluasan kemanfaatan praktis di masa mendatang, beberapa saran strategis yang dapat direkomendasikan adalah sebagai berikut:

1. Bagi Manajemen Perusahaan (PT Wings Surya): Disarankan untuk mulai mengintegrasikan sistem penentuan rute berbasis algoritma metaheuristik cerdas seperti ACO ke dalam modul perangkat lunak *Vehicle Routing Management System* internal perusahaan guna menggantikan metode penataan rute manual konvensional yang kurang efisien.
2. Bagi Pengembangan Model Matematis (Pengembangan Teoretis): Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas khazanah pemodelan graf dengan mentransformasikan model VRP standar ini menjadi varian yang lebih kompleks dan realistis sesuai dinamika dunia nyata, seperti *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) yang mempertimbangkan batasan kapasitas angkut maksimum truk, atau *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) yang mengakomodasi batas waktu operasional atau jam buka-tutup dari masing-masing toko mitra konsumen.
3. Bagi Penajaman Performa Algoritma: Disarankan untuk melakukan eksperimen hibridasi algoritma, yaitu mengawinkan algoritma ACO dengan metode optimasi lokal lain seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Simulated Annealing* (SA) guna mempercepat waktu konvergensi komputasi dan memastikan pencapaian solusi yang benar-benar optimal global ketika dihadapkan pada skala jaringan distribusi masif yang melibatkan ratusan hingga ribuan simpul lokasi kunjungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, M. F. (2024). Implementasi algoritma semut dalam penentuan rute terpendek pendistribusian barang PT Wings Surya di wilayah Surabaya Timur [Skripsi Sarjana, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang]. Repositori Institusi.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W., & Vigo, D. (2007). Vehicle routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 14, 367-428.
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant colony optimization*. MIT Press.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Coloni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Potvin, J. Y. (2002). Metaheuristics for the vehicle routing problem. *Le Cahiers du GERAD*, 1-19.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345-358.
- Prins, C. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 31(12), 1985-2002.
- Stützle, T., & Hoos, H. H. (2000). MAX-MIN ant system. *Future Generation Computer Systems*, 16(8), 889-914.
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Umar, I. (2019). *Metodologi penelitian untuk skripsi dan tesis bisnis*. PT RajaGrafindo Persada.