

Optimalisasi Rute Distribusi Galon Air Menggunakan Algoritma Hybrid Dan Clarke And Wright Dengan Alat Bantu Program Delphi

Maretha Arrosika Syah

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia
maretha.arrosika.2203126@students.um.ac.id

Sapti Wahyuningsih*

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia
sapti.wahyuningsih.fmipa@um.ac.id

Abstrak

Optimalisasi rute distribusi galon air masih menjadi masalah utama yang dihadapi oleh Depo Agen Tirtanadi Malang yang menentukan rute secara manual. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah tersebut dengan menggunakan pendekatan *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)* untuk meminimalkan jarak tempuh dan total waktu yang dibutuhkan, dengan menggunakan algoritma *Hybrid, Iterated Local Search - Random Variable Neighborhood Descent (ILS-RVND)* dan *Clarke and Wright Savings (CWS)*, yang diimplementasikan pada alat bantu program Delphi. Penelitian dilakukan pada 15 titik pelanggan (direduksi dari 60 titik) dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan (maksimum 456 kg) dan jendela waktu selama 420 menit (05.00-12.00 WIB), menghasilkan 4 rute optimal dengan total jarak tempuh 16,67 km dan total waktu operasional sebanyak 106 menit. Dibandingkan dengan rute manual (sekitar 180 menit) yang digunakan oleh Depo, rute hasil penelitian ini menghasilkan penghematan waktu sekitar 41,11%. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa hasil penerapan algoritma ILS-RVND dan CWS dengan alat bantu program Delphi terbukti efektif dalam mengatasi permasalahan rute distribusi di Depo.

Kata Kunci: algoritma, model, CVRPTW, clerk and wright, optimalisasi.

Abstract

Optimizing water gallon distribution routes remains a major challenge for the Depo Agen Tirtanadi Malang, which currently plans routes manually. This research aims to address this issue by applying the *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)* approach to minimize travel distance and total required time. The study utilizes the *Hybrid Iterated Local Search - Random Variable Neighborhood Descent (ILS-RVND)* and *Clarke and Wright Savings (CWS)* algorithms, implemented using the Delphi programming tool. The research was conducted for 15 customer points (reduced from 60 points) considering vehicle capacity (maximum 456 kg) and a time window of 420 minutes (05.00-12.00 WIB). The model generated 4 optimal routes with a total travel distance of 16.67 km and a total operational time of 106 minutes. Compared to the manual route used by the Depo (approximately 180 minutes), the proposed routes achieve a time saving of about 41.11%. Therefore, it can be concluded that the implementation of the ILS-RVND and CWS algorithms with the Delphi program is proven effective in solving the distribution routing problem at the Depo.

Keywords: algorithm, model, CVRPTW, Clarke and Wright, optimization.

PENDAHULUAN

Manusia sering dihadapkan dengan berbagai macam permasalahan yang menuntut Solusi efektif dan efisien. Dalam upaya menemukan solusi tersebut, manusia tidak hanya mengandalkan intuisi atau pengalaman empiris, tetapi juga berpaling pada struktur dan logika yang disediakan oleh ilmu pengetahuan, salah satunya adalah matematika. Dari sekian banyak cabang matematika, teori graf menjadi salah satu cabang yang sering dipakai untuk menyelesaikan permasalahan di berbagai macam bidang, mulai dari jaringan komputer, biologi, sosial, hingga yang

paling krusial dalam dunia logistik dan manajemen rantai pasok: masalah penentuan rute distribusi.

Tantangan utama dalam distribusi penentuan rute, atau yang dikenal sebagai *Vehicle Routing Problem (VRP)*. Namun, VRP saja tidak dapat menggambarkan kondisi lapangan secara nyata. Terdapat banyak batasan (*constraints*) yang perlu diperhatikan seperti, kapasitas kendaraan (Q), jam operasional pelanggan $[a_i, b_i]$, dan sebagainya. Kombinasi dari kedua kendala tersebutlah yang melahirkan salah satu cabang dari VRP (Guan et al., 2025; Muñoz-Villamizar et al., 2024), yaitu *Capacitated*

Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW).

Depo Agen Galon Air Minum Tirtanadi Malang tidak terlepas dari permasalahan distribusi tersebut. Sebagai penyedia air galon, yang merupakan salah satu kebutuhan pokok yang banyak dicari. Agen sering dihadapkan dengan permasalahan fluktuasi permintaan pelanggan yang tersebar di berbagai lokasi dengan jendela waktu (*time windows*) pengiriman yang bervariasi. Namun, penentuan rute distribusi yang digunakan masih dilakukan secara manual dan akan sangat berpotensi menyebabkan ketidakefisienan berupa jarak tempuh yang tidak optimal, pemborosan bahan bakar, hingga keterlambatan pengiriman yang berdampak pada kepuasan pelanggan (Fadila et al., 2022; Khallaf et al., 2025). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan matematis seperti CVRPTW untuk menyelesaikan permasalahan tersebut.

Hingga saat ini, berbagai macam penelitian terdahulu telah dilakukan untuk memecahkan masalah VRP dan variannya. Salah satu contohnya adalah Algoritma *Clarke and Wright Savings (CWS)* (Zhang et al., 2022). CWS bekerja berdasarkan konsep *savings* (penghematan), di mana algoritma secara iteratif menggabungkan dua rute terpisah (0-i-0 dan 0-j-0) menjadi satu rute gabungan (0-i-j-0) jika penggabungan tersebut menghasilkan nilai penghematan positif ($S_{ij} > 0$) dan memenuhi kendala kapasitas (Kasanah et al., 2022). Kasanah et al., (2022) juga telah membuktikan efektivitas algoritma ini dalam menyelesaikan permasalahan CVRP melalui penelitiannya pada distribusi unggas, di mana algoritma ini mampu menghasilkan rute yang meminimalkan total jarak dan biaya secara signifikan dibandingkan rute aktual perusahaan. Guerriero & Saccomanno, (2024) juga memperkuat bahwa CWS merupakan pendekatan *greedy* yang efisien untuk membangun rute dengan menggabungkan *node* (titik) pelanggan secara iteratif guna meminimalkan biaya transportasi.

Namun, CWS memiliki kelemahan, yaitu mudah terjebak dalam optimum lokal (*local optima*), terutama pada saat kendala waktu (*time windows*) dimasukkan. Dalam varian CVRPTW, pelanggaran terhadap jendela waktu pelayanan tidak hanya menambah biaya penalti tetapi juga membuat solusi menjadi tidak layak (*infeasible*) (Fadila et al., 2022). Untuk mengatasinya, banyak penelitian yang menggunakan algoritma perbaikan atau *Hybrid*, yang menggabungkan algoritma *heuristik* konstruktif dengan *metaheuristik* menjadi suatu solusi yang efektif. Salah satu metode yang digunakan untuk memecahkan masalah optimasi kompleks adalah *Iterated Local Search (ILS)* yang dikombinasikan dengan *Random Variable Neighborhood Descent (RVND)*. Prinsip dasar ILS adalah melakukan pencarian lokal berulang pada sebuah solusi, diikuti dengan mekanisme perturbasi untuk

keluar dari solusi optimum lokal (En-nahli et al., 2016), dan RVND merupakan varian dari *Variable Neighborhood Descent (VND)* yang menggunakan urutan acak dari berbagai struktur lingkungan (*neighborhood structures*) selama proses pencarian lokal (Fadila et al., 2022).

Penggunaan algoritma ini pada masalah CVRPTW ditunjukkan dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Wu et al., (2024). Dimana mereka menggunakan ILS untuk masalah rute majemuk (*multi-trip*) dengan hasil yang sangat baik. Integrasi algoritma CWS sebagai pembentuk solusi awal dan ILS-RVND sebagai pengoptimal rute memberikan keseimbangan antara kecepatan komputasi dan kualitas solusi. Pendekatan modern juga mulai mengintegrasikan algoritma dengan alat bantu komputasi canggih. Salah satu contohnya adalah pada penelitian yang dilakukan oleh Zhou et al. (2025), dimana penggunaan *solver* optimasi (seperti Gurobi) dalam kerangka kerja CVRPTW untuk pengiriman *last-mile*, terbukti meningkatkan efisiensi dan kepuasan pelanggan melalui presisi perhitungan yang lebih baik. Selain itu, integrasi teknologi pemetaan seperti Google Maps API juga disarankan oleh Muñoz-Villamizara et al. (2024) untuk mendapatkan data jarak dan waktu tempuh yang lebih akurat dalam pemodelan matematika *real-time*.

Meskipun telah banyak peneliti yang membahas VRP, terdapat celah penelitian (*research gap*) di mana sebagian besar studi berfokus pada pengembangan algoritma *metaheuristic* yang kompleks seperti *Genetic Algorithm* (Maroof et al., 2024) atau *Ant Colony System* (Dubillard et al., 2023) yang sulit diimplementasikan secara mandiri oleh pelaku usaha skala menengah ke bawah. Masih sedikit penelitian yang mengkaji penerapan algoritma seperti CWS (sebagai konstruksi rute awal), yang dikombinasikan langsung dengan ILS-RVND (sebagai validasi rute) dan kemudian diimplementasikan menggunakan alat bantu program Delphi spesifik untuk studi kasus distribusi air minum galon.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penerapan model CVRPTW sangat tepat digunakan pada sistem distribusi di Depo Galon Air Tirtanadi Malang. Dengan memperhitungkan aspek kapasitas kendaraan dan waktu pelayanan pelanggan, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis optimalisasi rute distribusi di Depo Agen Galon Air Minum Tirtanadi Malang menggunakan algoritma CWS dan memvalidasi efisiensinya menggunakan algoritma ILS-RVND dengan alat bantu program Delphi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan strategi pengiriman yang meminimalkan total jarak tempuh dan biaya operasional dengan tetap mematuhi kapasitas kendaraan dan batasan waktu pelanggan.

KAJIAN TEORI

GRAF

Teori graf mencakup berbagai konsep seperti graf tak-berarah dan berarah, jalur (*path*), siklus (*cycle*), pohon (*tree*), derajat simpul, dan subgraph (*"Applications of Graph Theory"* 1 Rohini Gore, 2 Tejal Gore, 3 Namrata Rokade, 4 Yogesh Mandlik, n.d.). Masalah distribusi yang digunakan dalam penelitian ini digambarkan sebagai graf berarah $G = (V, E)$, di mana $V = \{0, 1, \dots, n\}$ merupakan himpunan simpul (*vertex*) dan E adalah himpunan sisi (*edges*). Simpul 0 mempresentasikan Depo, sedangkan 1 hingga n mempresentasikan tujuan distribusi (pelanggan). Setiap sisi $(i, j) \in A$ mempresentasikan jarak atau biaya dari simpul ke simpul. Tujuan utama dalam pemodelan ini adalah mencari lintasan terpendek yang mengunjungi setiap simpul pelanggan tepat satu kali dan kembali ke depo.

CVRPTW

CVRPTW merupakan salah satu cabang dari VRP yang bertujuan untuk meminimalkan total jarak tempuh, waktu perjalanan, atau bahkan biaya operasional, sambil tetap memenuhi batasan kapasitas dan waktu (Cardoso et al., 2015; Fadila et al., 2022; Guan et al., 2025; Kasanah et al., 2022). Penelitian terbaru oleh Khallaf et al., (2025) mengusulkan pendekatan hybrid yang menggabungkan Deep Q-Network (DQN), DBSCAN clustering, dan Fractional Knapsack untuk masalah rute pengangkutan limbah medis yang juga dimodelkan dengan CVRPTW. Metode ini terbukti meningkatkan utilisasi kapasitas kendaraan hingga 96,47%, mengurangi jumlah kendaraan yang diperlukan, dan menurunkan jumlah perjalanan hingga 25%.

ALGORITMA CLARKE AND WRIGHT SAVINGS

Algoritma CWS merupakan salah satu pendekatan heuristik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan ini karena kesederhanaan dan kecepatan perhitungannya (Aina & Marbun, 2023; Guerriero & Saccomanno, 2024; Kusuma et al., 2020). Prinsip dasar dari algoritma ini terletak pada penghematan jaraknya (*savings*). Langkah pertama dalam algoritma ini adalah pembentukan solusi awal (0-i-j-0), kemudian dilanjutkan dengan menghitung biaya/jarak dari pasangan yang sudah dibuat, selanjutnya adalah

dengan menghitung nilai *saving* untuk setiap pasangan (i, j) .

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$$

Dengan 0 = depot, c_{ab} = jarak/biaya antara a dan b. Pasangan dengan nilai *saving* (S_{ij}) terbesar akan digabungkan selama tidak melebihi total kapasitas kendaraan dan waktu pelayanan (*time windows*) (Marpaung et al., 2022; Moudya et al., 2023).

ALGORITMA HYBRID ILS-RVND

Algoritma ILS dikombinasikan dengan RVND (ILS-RVND) adalah metaheuristik yang sangat efektif untuk memecahkan masalah optimasi yang kompleks, termasuk varian VRP. Prinsip dasar ILS adalah melakukan pencarian lokal berulang pada sebuah solusi, diikuti dengan mekanisme perturbasi untuk keluar dari solusi optimum lokal (En-nahli et al., 2016).

Dalam implementasinya untuk CVRPTW, ILS sering dikombinasikan dengan RVND sebagai prosedur pencarian lokal. RVND merupakan varian dari VND yang menggunakan urutan acak dari berbagai struktur lingkungan (*neighborhood structures*) selama proses pencarian lokal (Fadila et al., 2022).

Berikut adalah Langkah-langkah perhitungan algoritma ILS-RVND:

- a) Inisialisasi Solusi (S_0)
 - Buat solusi awal (S_0) menggunakan heuristic konstruktif sederhana (misalnya nearest Neighbor atau Savings Algorithm)
 - Best Solution Found (S^*) $\leftarrow S_0$
 - Current Solution ($S_{current}$) $\leftarrow S_0$
- b) Pencarian Lokal Awal (RVND)
 - Terapkan RVND pada Solusi awal ($S_{current}$) untuk mendapatkan solusi lokal terbaik (S_{local})
 - (S_{local}) $\leftarrow RVND(S_{current})$
 - ($S_{current}$) $\leftarrow (S_{local})$
 - (S^*) $\leftarrow S_{local}$ (Jika S_{local} lebih baik dari S^*)
 - Sehingga S_{local} akan menjadi $S_{current}$ sekaligus S^* pada Langkah/iterasi berikutnya.
- c) Iterasi ILS (Iterated Local Search)
 - Lakukan perulangan hingga kriteria penghentian terpenuhi (batas waktu, batas iterasi, atau tidak ada perbaikan dalam X iterasi)
 1. Perturbasi (Gangguan)
 - Lakukan perubahan acak yang signifikan (perturbasi) pada ($S_{current}$) untuk

melepaskannya dari minimum lokal saat ini. Hasilnya adalah Solusi terganggu (S')

$$(S') \leftarrow \text{Perturbasi}(S_{\text{current}})$$

2. Pencarian Lokal Lanjutan (RVND)

Terapkan RVND pada Solusi terganggu (S') untuk mencari minimum lokal baru (S'')

$$(S'') \leftarrow \text{RVND}(S')$$

3. Kriteria Penerimaan (Acceptance Criterion)

Putuskan apakah (S'') akan diterima sebagai solusi saat ini (S_{current}) untuk iterasi berikutnya.

- Prinsip Greedy: Jika (S'') lebih baik dari (S_{current}), selalu diterima.
- Strategi Metropolis: Jika (S'') lebih buruk, dapat diterima dengan probabilitas tertentu untuk menjelajahi ruang solusi lebih luas (sering digunakan dalam ILS).

4. Pembaharuan Solusi terbaik

$$S^* \leftarrow S'' \text{ jika } \text{Cost}(S'') < \text{Cost}(S^*)$$

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Depo Agen Galon Air Minum Tirtanadi yang berlokasi di Jl. Kerto Raharjo No. 68A, Ketawanggede, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang. Objek penelitian mencakup aktivitas distribusi mingguan kepada 60 titik pelanggan yang tersebar di wilayah Merjosari, Sigura-gura, Tlogomas, dan Gajayana. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi dan wawancara langsung mengenai jumlah permintaan galon (*demand*) dan jendela waktu penerimaan (*time windows*) dari masing-masing pelanggan. Sedangkan data sekunder berupa titik koordinat lokasi dan matriks jarak tempuh nyata yang diekstraksi menggunakan bantuan Google Maps.

Perangkat utama yang digunakan dalam proses analisis dan komputasi adalah laptop dengan spesifikasi prosesor Intel Core i3 dan memori (RAM) 12 GB. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Microsoft Excel untuk mencatat data awal dan algoritma komputasi yang dikembangkan menggunakan Borland Delphi sebagai alat bantu

solver CVRPTW. Kendaraan yang menjadi objek simulasi distribusi adalah unit motor roda tiga (Viar) dengan kapasitas angkut maksimum (Q) sebesar 456 kg yang setara dengan 24 galon dan kecepatan rata-rata diasumsikan 40 km/jam.

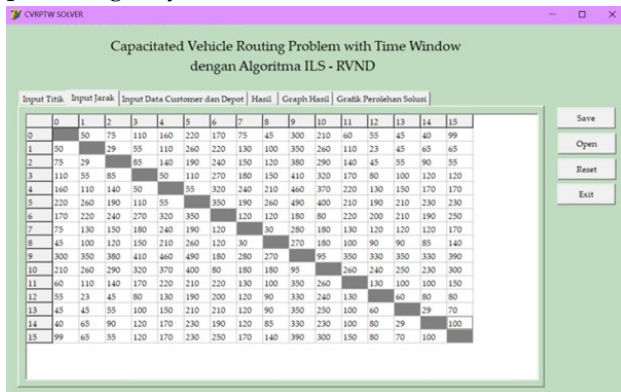
Prosedur penyelesaian masalah diawali dengan pengumpulan data koordinat pelanggan menggunakan jarak tempuh aktual (*real distance*) antar titik yang diperoleh dari Google Maps untuk meningkatkan akurasi kondisi lapangan. Data jarak dan waktu tempuh tersebut kemudian disusun menjadi matriks jarak (*distance matrix*). Tahap selanjutnya adalah pemrosesan data dengan mengelompokkan 60 pelanggan yang berdekatan menjadi 15 titik utama untuk efisiensi. Selanjutnya adalah penerapan algoritma CWS untuk membentuk rute awal. Proses ini dimulai dengan menghitung nilai penghematan (*savings*) untuk setiap pasang pelanggan, kemudian mengurutkan nilai tersebut secara *descending*. Pembentukan rute dilakukan dengan menggabungkan pelanggan berdasarkan nilai penghematan terbesar secara iteratif, dengan tetap mematuhi kendala kapasitas kendaraan ($Q \leq 24$ galon) dan batasan waktu operasional (*time windows*) toko yaitu pukul 05.00–12.00 WIB, serta waktu bongkar muat (*service time*) selama 10 menit (0,166667 jam) per pelanggan. Tahap terakhir adalah menggunakan algoritma ILS-RVND yang diimplementasikan dalam program Delphi untuk memastikan solusi yang dihasilkan adalah rute dengan total jarak dan biaya yang paling minimum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

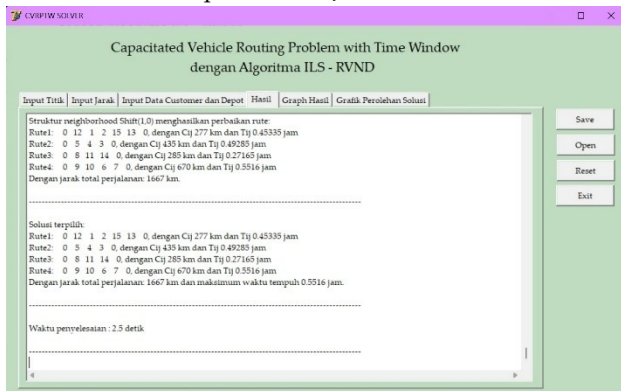
Berikut merupakan hasil dari penelitian optimalisasi rute distribusi rute distribusi galon air minum di Depo Agen Tirtanadi Malang menggunakan pendekatan CVRPTW. Dimulai dengan pemrosesan 60 data pelanggan di wilayah Merjosari, Sigura-gura, dan Tlogomas menjadi 15

pelanggan. Setiap simpul merepresentasikan klaster permintaan gabungan yang dilayani dalam satu kali pemberhentian.

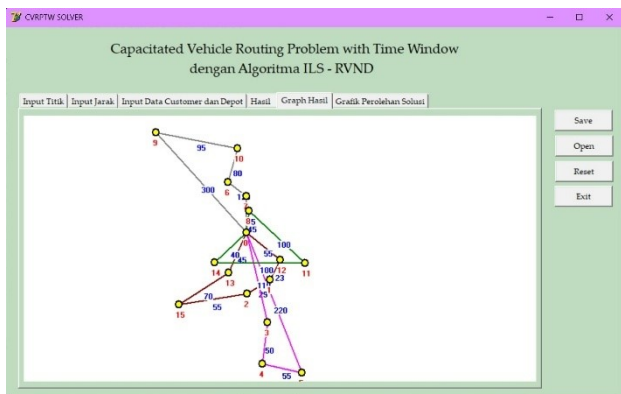
Selanjutnya membangun solusi awal menggunakan CWS, dengan menghitung matriks penghematan terbesar antar simpul (pelanggan). Selanjutnya, penyempurnaan solusi awal menggunakan algoritma ILS-RVND yang dilakukan dengan alat bantu program Delphi. Berikut adalah visualisasi memasukkan data ke dalam alat bantu program Delphi, hingga output dari hasil perhitungannya.



Gambar 1. Input Matriks Jarak Pada Alat Bantu



Gambar 2. Proses Perhitungan Rute Menggunakan Alat Bantu



Gambar 3. Hasil Perhitungan

Berdasarkan gambar di atas, hasil perhitungan algoritma ILS-RVND menggunakan alat bantu

program Delphi, telah berhasil membentuk sebanyak 4 rute optimal yang dapat memenuhi kendala kapasitas kendaraan dan juga waktu pelayanan. Berikut adalah tabel rekap terperinci rute distribusi hasil dari algoritma ILS-RVND menggunakan alat bantu program Delphi.

Tabel 1. Rekap Rute Distribusi Optimal Hasil Algoritma ILS-RVND

Rute	Urutan Titik	Total Muatan (kg)	Total Jarak (km)	Estimasi Waktu (menit)
1	0-12-1-2-15-13-0	437 kg	2,77 km	27 menit
2	0-5-4-3-0	437 kg	4,35 km	30 menit
3	0-8-11-14-0	228 kg	2,85 km	16 menit
4	0-9-10-6-7-0	437 kg	6,7 km	33 menit
Total		1539 kg	16,67 km	106 menit

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa total permintaan yang harus dilayani pada skenario yang diuji berupa 1.539 kg, yang terdistribusi ke dalam 4 rute dengan total jarak tempuh sejauh 16,67 km dan dengan total estimasi waktu operasional 106 menit. Perhitungan ini sesuai dengan perhitungan teoritis mengenai kebutuhan kendaraan minimum:

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Kendaraan} &= \frac{\text{Total Permintaan}}{\text{Kapasitas Kendaraan}} \\
 &= \frac{1539}{456} = 4 \text{ unit}
 \end{aligned}$$

Algoritma berhasil memenuhi kapasitas kendaraan secara efisien, hal ini dapat terlihat dari tiga rute (rute 1, 2, dan 4) masing-masing membawa 437 kg, yang sekitar 95% dari kapasitas kendaraan, sehingga pemborosan ruang angkut pada rute tersebut relative kecil. Sedangkan rute ke-3 hanya membawa 228 kg, yang sekitar 50% dari total kapasitas kendaraan. Hal tersebut kemungkinan bukan merupakan inefisiensi algoritma, melainkan konsekuensi pemenuhan kendala jendela waktu dan sebaran geografis. Algoritma "memutuskan" untuk memisahkan pelanggan pada Rute 3 dari rute lainnya guna mencegah pelanggaran waktu layanan atau kapasitas berlebih.

Waktu perjalanan di setiap rute juga relatif singkat, hanya berkisar antar 16 hingga 33 menit dengan total waktu operasional sebesar 106 menit. Total waktu tersebut masih jauh berada dalam batas jam waktu operasional (7 jam). Hal ini semakin

membuktikan bahwa solusi tidak hanya feasible secara kapasitas, tetapi juga secara waktu.

Tabel 2. Perbandingan Rute

Parameter Kinerja	Rute Manual	Rute Hasil Algoritma	Perubahan
Waktu	180 menit	106 menit	41,11%

Berdasarkan tabel perbandingan di atas, dapat terlihat bahwa rute distribusi mendapatkan peningkatan kinerja yang cukup signifikan. Dimana waktu penyelesaian rute menurun dari 180 menit hingga 106 menit, yang berarti terjadi pengurangan waktu sebesar 41,11%. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma ILS-RVND ini telah berhasil mengoptimalkan rute distribusi galon air minum di Depo Agen Tirtanadi Malang.

Keberhasilan algoritma ILS-RVND ini dalam menyeimbangkan muatan juga akan sangat berdampak pada efisiensi biaya operasional keseluruhan. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu Fadila et al., (2022) dan Wu et al., (2024) dimana penggunaan algoritma pencarian lokal ke dalam VRP dan variannya sangat efektif untuk memperbaiki kualitas solusi pada kasus dengan kendala waktu yang ketat. Mengingat masih tersedianya sisa waktu operasional yang cukup besar, penggunaan alat bantu program Delphi ini tidak hanya menghemat waktu operasional tetapi juga membuka peluang bagi Depo Agen Tirtanadi Malang untuk menambah jumlah pelanggan atau memperluas area layanan tanpa menambah jumlah kendaraan secara signifikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Depo Agen Tirtanadi Malang atas data yang diberikan, serta kepada semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, karena telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penelitian ini.

PENUTUP

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil meminimalkan rute distribusi galon air di Depo Agen Galon Air Minum Tirtanadi Malang, dengan menggunakan algoritma CWS dan ILS-RVND (*Hybrid*) dan dibantu dengan program Delphi. Penerapan dari algoritma terkait mampu menghasilkan 4 rute optimal untuk melayani ke-60 pelanggan (yang direduksi menjadi 15 pelanggan) secara efisien. Rute distribusi yang

dihasilkan mampu mengurangi total waktu operasional hingga 41,11% dibandingkan dengan rute eksisting yang masih bersifat manual. Temuan baru yang didapatkan dari penelitian ini adalah kombinasi penggunaan algoritma CWS dan ILS-RVND terbukti sangat efektif dalam mengatasi kendala waktu dalam CVRPTW. Ditambah, kombinasi antara pemodelan matematis dengan alat bantu program Delphi membuktikan bahwa transisi dari penentuan rute berbasis intuisi menuju sistem berbasis komputasi dapat meningkatkan produktivitas.

SARAN

Bagi pihak Depo Agen Tirtanadi Malang disarankan untuk menggunakan rute distribusi yang dihasilkan dalam penelitian ini sebagai rute standar harian. Hasil penelitian ini juga masih memerlukan pembaruan masukan data secara periodik, mengingat adanya dinamika permintaan pelanggan dan kondisi lalu lintas. Sebagai pengembang ilmiah, disarankan bagi peneliti selanjutnya untuk memperluas model yang digunakan. Pengembangan dapat diarahkan pada model yang lebih kompleks, seperti *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows* (HVRPTW), apabila Depo menggunakan kendaraan dengan karakteristik dan kapasitas yang bervariasi. Perlu pula dilakukan studi komparasi kinerja dengan metaheuristik canggih lainnya, seperti *Simulated Annealing* atau *Genetic Algorithm (GA)*, untuk mengidentifikasi metode mana yang memberikan rasio kualitas solusi terbaik untuk permasalahan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aina, N., & Marbun, J. P. (2023). Penyelesaian Vehicle Routing Problem Dengan Algoritma Clarke And Wright Savings Di Perumahan Umum Bulog Medan Amplas Solution of The Vehicle Routing Problem with The Algorithm Clarke and Wright Savings in Bulog General Company Medan Amplas. *Jurnal Riset Rumpun Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam (JURRIMIPA)*, 2(1). <https://doi.org/10.55606/jurrimipa.v2i1.723>
- “Applications of Graph Theory” 1 Rohini Gore, 2 Tejal Gore, 3 Namrata Rokade, 4 Yogesh Mandlik. (n.d.). <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS>
- Cardoso, P. J. S., Schütz, G., Mazayev, A., Ey, E., & Corrêa, T. (2015). A solution for a real-time stochastic capacitated vehicle routing problem with time windows. *Procedia Computer Science*, 51(1),

- 2227–2236.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.501>
- Dubillard, M., Lorca, X., & Lauras, M. (2023). An Ant Colony System for the Skilled, Multi-depot VRP with Due Dates and Time Windows. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 11129–11134.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.828>
- En-nahli, L., Afifi, S., Allaoui, H., & Nouaouri, I. (2016). Local Search Analysis for a Vehicle Routing Problem with Synchronization and Time Windows Constraints in Home Health Care Services. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1210–1215.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.674>
- Fadila, U. I., Wahyuningsih, S., & Satyananda, D. (2022). *Jurnal Kajian Matematika dan Aplikasinya ALGORITMA GENERAL VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH PADA CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS DAN IMPLEMENTASINYA*.
<https://doi.org/10.17977/um055v3i1p1-7>
- Guan, Q., Xue, S., Tan, J., Jia, L., Cao, H., & Chen, B. (2025). Dynamic embedding-based deep reinforcement learning for heterogeneous capacitated VRPs with unloading time constraints. *Expert Systems with Applications*, 293.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128660>
- Guerriero, F., & Saccomanno, F. P. (2024). Accelerating the Clarke-Wright algorithm using GPUs. *Control and Cybernetics*, 53(2), 371–383.
<https://doi.org/10.2478/candc-2024-0016>
- Kasanah, Y. U., Qisthani, N. N., & Munang, A. (2022). Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet Using Heuristic Algorithm in Poultry Distribution. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 21(1), 104–112.
<https://doi.org/10.23917/jiti.v21i1.17430>
- Khallaf, N., Abdel-Raouf, O., Hadhoud, M., Dawam, M., & Kafafy, A. (2025). A deep reinforcement learning and fractional packing framework for routing and scheduling in healthcare waste supply chains. *Supply Chain Analytics*, 12.
<https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100164>
- Kusuma, A. S., Sumiati, D., Pembangunan, U., Veteran, N., Timur, J., Rungkut, J., Surabaya, M., Kunci, K., Clarke, :, Saving Heuristic, W., Distribusi, B., & Distribusi, R. (2020). PENERAPAN METODE CLARKE AND WRIGHT SAVING HEURISTIC DALAM MENENTUKAN RUTE PENDISTRIBUSIAN PRODUK DI BAGIAN DISTRIBUTOR KOPERASI ABC BOJONEGORO. In *Juminten : Jurnal Manajemen Industri dan Teknologi* (Vol. 01, Issue 04).
<http://juminten.upnjatim.ac.id/index.php/juminten>
- Maroof, A., Ayvaz, B., & Naeem, K. (2024). Logistics Optimization Using Hybrid Genetic Algorithm (HGA): A Solution to the Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). *IEEE Access*, 12, 36974–36989.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3373699>
- Marpaung, L. E., Arifin, J., & Winarno, W. (2022). Optimalisasi Rute Distribusi Menggunakan Algoritma Clarke and Wright Savings. *Jurnal Media Teknik Dan Sistem Industri*, 6(2), 76.
<https://doi.org/10.35194/jmtsi.v6i2.1784>
- Moudya, F., Rarasati, N., & Syafmen, W. (2023). OPTIMISASI RUTE PADA CVRP DALAM PENDISTRIBUSIAN GAS OKSIGEN MENGGUNAKAN ALGORITMA CLARKE AND WRIGHT SAVINGS. *FIBONACCI: Jurnal Pendidikan Matematika Dan Matematika*, 9(1), 105.
<https://doi.org/10.24853/fbc.9.1.105-118>
- Muñoz-Villamizar, A., Faulin, J., Reyes-Rubiano, L., Henriquez-Machado, R., & Solano-Charris, E. (2024). Integration of Google Maps API with mathematical modeling for solving the Real-Time VRP. *Transportation Research Procedia*, 78, 32–39.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.005>
- Nurchahyo, R., Irawan, D. A., & Kristanti, F. (2023). The Effectiveness of the Clarke & Wright Savings Algorithm in Determining Logistics Distribution Routes (case study PT.XYZ). *E3S Web of Conferences*, 426.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342601107>
- Tunnisaki, F., & Sutarman. (2023). Clarke and Wright Savings Algorithm as Solutions Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup Delivery (VRPSPD). *Journal of Physics: Conference Series*, 2421(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012045>
- Wu, Y., Du, H., & Song, H. (2024). An Iterated Local Search Heuristic for the Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows. *Mathematics*, 12(11).
<https://doi.org/10.3390/math12111712>
- Zhang, H., Ge, H., Yang, J., & Tong, Y. (2022). Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(1), 195–221.
<https://doi.org/10.1007/s11831-021-09574-x>
- Zhou, T., Venkateswaran, J., & Yuan, X. (2025). *A comparative study of hard and soft time windows in last-mile delivery optimization using mixed integer linear programming (MILP)*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 196, 104268.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104268>