ANTHOR
Education and Learning Journal
https://anthor.org/index.php/anthor
Email. anthor.Jurnal@gmail.com
E-ISSN: 2963 –198X P-ISSN: 2963–2498 | Halaman: 2025 - 2033 | Volume 5 Nomor 5 Tahun 2026

Vehicle Routing Problem: Algoritma Eksak, Algoritma Aproksimasi, dan Metode Optimasi Lainnya

Informasi Naskah

Tamara Latifah Jasmine[1]
Dicky Candra Ardiansyah[2]
Hikmah Sekarningtyas[3]
Rohmad Kafidzin[4]
Iwan Prasetyo[5]

Manajemen Logistik, Politeknik Rukun Abdi Luhur, Indonesia

tamaralatifahjasmine@gmail.ac.id

Abstrak

Vehicle Routing Problem (VRP) merupakan permasalahan optimasi kombinatorial yang berfokus pada penentuan rute optimal bagi sejumlah kendaraan untuk melayani sekumpulan titik tujuan dengan mempertimbangkan berbagai kendala operasional. Berbagai pengembangan model VRP telah dilakukan untuk mengakomodasi karakteristik permasalahan yang semakin kompleks, seperti keterbatasan kapasitas kendaraan, batasan waktu pelayanan, serta jumlah dan lokasi depot. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi dan mengkaji berbagai model serta metode optimasi yang digunakan dalam penyelesaian VRP melalui tinjauan literatur sistematis. Metode penyelesaian VRP secara umum dikelompokkan menjadi algoritma eksak dan algoritma aproksimasi. Algoritma eksak, seperti *Integer Linear Programming* (ILP) dan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), mampu menghasilkan solusi optimal, tetapi memiliki keterbatasan komputasi pada permasalahan berskala besar. Sementara itu, algoritma aproksimasi, khususnya metode heuristik dan metaheuristik seperti Genetic Algorithm (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Simulated Annealing* (SA), dan *Tabu Search* (TS), banyak digunakan untuk memperoleh solusi mendekati optimal secara lebih efisien. Selain itu, pendekatan hibrida yang mengombinasikan beberapa algoritma juga dikembangkan untuk meningkatkan kualitas solusi. Hasil kajian menunjukkan bahwa pemilihan metode penyelesaian VRP perlu disesuaikan dengan karakteristik, kompleksitas, dan tujuan optimasi permasalahan. Pengembangan metode selanjutnya perlu diarahkan pada peningkatan efisiensi komputasi serta kemampuan menghasilkan solusi optimal atau mendekati optimal untuk berbagai variasi permasalahan VRP.

Kata Kunci:
Vehicle Routing Problem, Metode Optimasi, Tinjauan Literatur Sistematis.

Abstract

Vehicle Routing Problem (VRP) is a combinatorial optimization problem that focuses on determining optimal routes for a fleet of vehicles to serve multiple destinations while considering various operational constraints. Several VRP variants have been developed to accommodate increasingly complex problems, including vehicle capacity limitations, time windows, and the number and location of depots. This study aims to identify and examine various VRP models and optimization methods through a systematic literature. VRP solution methods are generally classified into exact and approximate algorithms. Exact algorithms, such as Integer Linear Programming (ILP) and Mixed Integer Linear Programming (MILP), can provide optimal solutions but face computational limitations when dealing with large-scale problems. Meanwhile, approximate algorithms, particularly heuristic and metaheuristic methods such as Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), Simulated Annealing (SA), and Tabu Search (TS), are widely applied to obtain near-optimal solutions more efficiently. In addition, hybrid approaches that combine multiple algorithms have been developed to improve solution quality. The findings indicate that selecting an appropriate VRP solution method depends on the characteristics, complexity, and optimization objectives of the problem. Future research should focus on improving computational efficiency and developing methods capable of generating optimal or near-optimal solutions for various VRP variants.

Keyword:
Vehicle Routing Problem, Optimization Methods, Systematic Literature Review.

Information Production:
© 2026 *by the authors of this article. This work is licensed under an Attribution-ShareAlike* 4.0 *International* (CC BY-SA 4.0)

PENDAHULUAN

Vehicle Routing Problem (VRP) merupakan permasalahan optimasi yang bertujuan menentukan rute perjalanan optimal bagi sejumlah kendaraan dalam melayani pelanggan dengan meminimalkan total jarak atau biaya transportasi (Asghari & Al e-hashem, 2021). Konsep VRP pertama kali diperkenalkan melalui *Truck Dispatching Problem* oleh Dantzig dan Ramser (1959), yang pengembangannya berkaitan erat dengan *Traveling Salesman Problem* (TSP). Beberapa pengembangannya meliputi *Capacitated Vehicle Routing*

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

Problem (CVRP) yang mempertimbangkan kapasitas kendaraan, (Jasmine dkk., 2025), *Medical Waste Collection Vehicle Routing Problem* (HWCVRP) untuk pengangkutan limbah medis (Xu dkk., 2025), serta *Location Routing Problem* (LRP) yang mengintegrasikan penentuan lokasi fasilitas dan rute pengangkutan (Ghannadpour dkk., 2021).

Secara umum, VRP menggunakan satu depo sebagai titik awal dan akhir perjalanan kendaraan. Model ini bertujuan menghasilkan kombinasi rute dengan biaya minimum, memastikan setiap pelanggan dikunjungi tepat satu kali, serta menjaga agar kapasitas kendaraan tidak terlampaui (Tiwari & Sharma, 2023). Seiring perkembangan penelitian, berbagai variasi model dan metode penyelesaian VRP terus dikembangkan untuk mengakomodasi kompleksitas permasalahan transportasi dan pengangkutan sampah. Berbagai jenis model VRP tersebut dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis-jenis VRP

No.	Jenis VRP	Keterangan
1	*Capacitaced VRP* (CVRP)	Setiap armada memiliki kapasitas tertentu
2	*VRP with time windows* (VRPTW)	Setiap pelanggan dilayani dalam rentang waktu yang telah ditentukan
3	*Multi-depot VRP* (MDVRP)	Pengiriman kepada konsumen dilakukan dengan menggunakan beberapa depo
4	*Multi-echelon VRP*	Hubungan aliran produk antara pelanggan dan depo difasilitasi oleh depo perantara yang disebut satelit dalam VRP dua tingkat
5	*Location Routing and Production Routing Problem* (LRPR)	Mempertimbangkan secara bersamaan lokasi dan jumlah fasilitas, seperti depo dan stasiun daur ulang, kapasitas fasilitas, serta rencana rute antara fasilitas dan titik permintaan
6	*Vehicle Routing Problem with pick up and delivery* (VRPPD)	Konsumen dapat mengembalikan barang ke depo
7	*Split Delivery VRP* (SDVRP)	Pelanggan dilayani menggunakan armada dengan kapasitas atau karakteristik yang berbeda
8	*Green VRP*	Mempertimbangkan optimasi konsumsi energi transportasi
9	*Periodic VRP* (PVRP)	Pengiriman dilakukan dalam periode waktu tertentu
10	*Location Inventory Routing Problem and Inventory Routing Problem* (LIRP)	Menambahkan keputusan desain jaringan, seperti jumlah dan lokasi fasilitas baru yang akan dibuka dalam proses penentuan rute kendaraan
11	*VRP with Heterogenous Fleet*	Kapasitas kendaraan dapat berbeda antara satu kendaraan dan kendaraan lainnya; jumlah dan jenis kendaraan telah diketahui
12	*Stochastic VRP* (SVRP)	Memiliki unsur acak, seperti ketidakpastian permintaan pelanggan dan waktu perjalanan
13	*Dynamic VRP* (DVRP)	Pelanggan baru dapat ditambahkan ke dalam perencanaan rute
14	*Multi-objective VRP* (MOVRP)	Mempertimbangkan lebih dari satu fungsi tujuan

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR), yaitu pendekatan kajian sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi literatur berdasarkan topik serta kriteria pencarian yang telah ditentukan (Liu dkk., 2023). Proses seleksi literatur dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut: (a) Menentukan ruang lingkup, permasalahan, dan tujuan penelitian. (b) Melakukan penelusuran literatur melalui Scopus dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci terkait *Vehicle Routing Problem, Heuristics for VRP, Metaheuristics for VRP, Hybrid Methods for VRP*, pada rentang waktu 2020 – 2025. (c) Melakukan seleksi berdasarkan jenis dan indeks publikasi, dengan mengecualikan skripsi, tesis dan disertasi. (d) Melakukan penyaringan artikel berdasarkan judul, abstrak, dan kesesuaian substansi penelitian dengan fokus kajian, yaitu penerapan model *Vehicle Routing Problem* (VRP) dan metode optimasi yang digunakan dalam penyelesaiannya. Artikel yang tidak membahas model VRP, tidak relevan dengan metode penyelesaian VRP, atau merupakan publikasi duplikat dikeluarkan dari proses seleksi. (e) Menghasilkan 27 artikel terpilih yang selanjutnya dianalisis secara sistematis dan dibahas berdasarkan metode optimasi yang digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

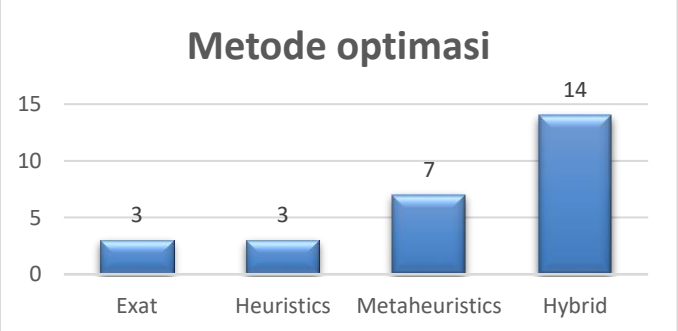
Berdasarkan hasil kajian literatur yang dilakukan, penelitian mengenai *Vehicle Routing Problem* (VRP) menunjukkan perkembangan yang beragam, baik dari segi objek penerapan, variasi model VRP, maupun metode optimasi yang digunakan. Untuk mengidentifikasi karakteristik penelitian terdahulu, artikel yang telah ditelaah diklasifikasikan berdasarkan penulis dan tahun publikasi, objek penelitian, jenis model VRP, serta pendekatan optimasi yang diterapkan. Hasil klasifikasi terhadap artikel yang ditelaah disajikan pada Tabel 2 berikut:

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

Tabel 2. Kajian Literatur

No	Penulis	Tahun	Object	Jenis VRP	Metode			
					Exact	Heuristics	Meta-heu	Hybrid
1	Qiao dkk	2020	Pengangkutan limbah padat perkotaan	CVRP	v			
2	Ghannadpour dkk	2020	Distribusi logistik	VRPTW				v
3	Theurich dkk	2021	Penjadwalan perbaikan rel kereta	VRPTW	v			
4	Yu dkk	2022	Pengangkutan limbah padat perkotaan	LRP				v
5	Stodola & Nohel	2022	Distribusi logistik	MDVRP			v	
6	Lo dkk	2022	Distribusi logistik	CVRP			v	
7	Dereci & Karabekmez	2022	Pengangkutan limbah padat perkotaan	CVRP				v
8	Liu dkk	2022	Rute pengisian baterai kendaraan listrik	VRPTW				v
9	Tiwari & Sharma	2023	Distribusi e-commerce	CVRP			v	
10	Novelan dkk	2023	Distribusi kurir	CVRP		v		
11	Friaz dkk	2023	Distribusi logistik	EMVRP				v
12	Cengiz	2023	Distribusi logistik kemanusiaan	VRP		v		
13	Simamora dkk	2023	Distribusi buah salak	VRP		v		
14	Sajid dkk	2023	Distribusi logistik	CVRP				v
15	Kashyap dkk	2023	Distribusi logistik	VRPTW			v	
16	Huang dkk	2023	Distribusi logistik	VRPB				v
17	Ahmed & Yousefikhoshbakht	2023	Distribusi logistik	VRPTW				v
18	Yu dkk	2024	Distribusi omnichannel	VRP			v	
19	Maroof dkk	2024	Distribusi logistik	VRPTW				v
20	Iksan dkk	2024	Rute pelayaran	VRP				v
21	Wang dkk	2025	Pengumpulan limbah dekorasi	VRP			v	
22	Xu dkk	2025	Pengumpulan limbah kesehatan	CVRP			v	
23	Jasmine dkk	2025	Pengumpulan limbah kayu	CVRP				v
24	Djebbar & Amina	2025	Distribusi logistik	CVRP				v
25	Povoa dkk	2025	Distribusi logistik	MCVRP				v
26	Reis	2025	Distribusi logistik	VRPTW				v
27	Pratiwi dkk	2026	Distribusi logistik	VRP	v			

Berdasarkan Tabel 1, penerapan Vehicle Routing Problem (VRP) mencakup berbagai objek penelitian, mulai dari distribusi logistik dan e-commerce, distribusi kurir, distribusi produk pertanian, hingga pengangkutan limbah dan pelayanan transportasi khusus. Keragaman objek tersebut menunjukkan bahwa VRP memiliki fleksibilitas dalam menyelesaikan permasalahan penentuan rute pada berbagai sektor dengan karakteristik operasional yang berbeda. Dari sisi model, *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) dan *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) merupakan dua variasi yang banyak ditemukan dalam artikel yang dikaji. CVRP berfokus pada pembatasan kapasitas kendaraan, sedangkan VRPTW mempertimbangkan batasan waktu pelayanan dalam penentuan rute. Selain kedua model tersebut, ditemukan pula pengembangan model *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), *Location Routing Problem* (LRP), *Vehicle Routing Problem with Balancing* (VRPB), serta variasi VRP lainnya.



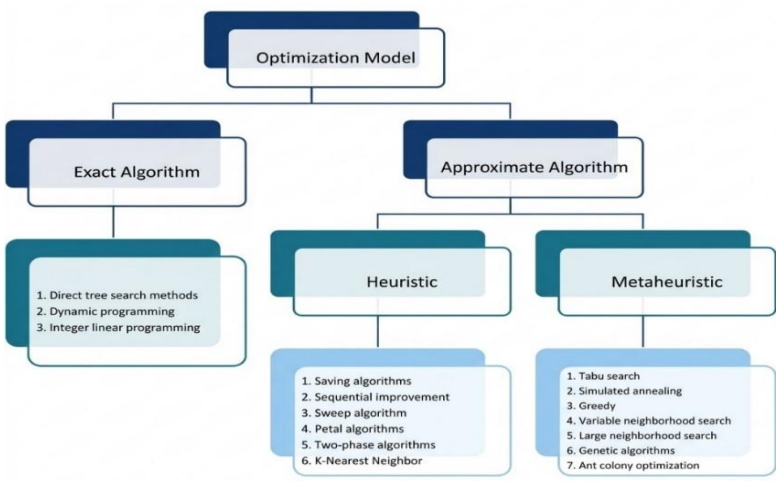
Gambar 2. Jumlah artikel berdasarkan metode

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

Ditinjau dari metode optimasi pada gambar 2 di atas, dari 27 artikel yang disajikan, pendekatan hibrida memiliki jumlah penggunaan terbanyak, yaitu 14 artikel (44,4%), diikuti oleh metaheuristik sebanyak 7 artikel (33,3%). Sementara itu, algoritma eksak dan heuristik masing-masing ditemukan pada 3 artikel (11,1%). Distribusi tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi beberapa pendekatan algoritmik menjadi salah satu arah pengembangan dalam penyelesaian VRP.

Metode Optimasi

Optimasi merupakan salah satu cara untuk mewujudkan pengumpulan dan pengangkutan sampah yang berkelanjutan. Permasalahan ini banyak diselesaikan menggunakan *Vehicle Routing Problem* (VRP) dengan tujuan memperoleh rute yang efektif dan optimal (Sar & Gadhimi, 2023). Dalam penyelesaian VRP, terdapat dua jenis pendekatan optimasi, yaitu algoritma eksak (*exact algorithm*) dan algoritma aproksimasi (*approximate algorithm*). Pendekatan eksak dilakukan dengan menghitung setiap kemungkinan solusi hingga diperoleh jawaban terbaik atau optimal. Sementara itu, pendekatan aproksimasi merupakan model optimasi yang menghasilkan nilai mendekati optimal (Liu dkk., 2023; Ogundoyin & Kamil, 2021). Jenis-jenis model optimasi ditunjukkan pada Gambar 1 (Sar & Gadhimi, 2023).



Gambar 1. Model-model Optimasi

Exact Algorithm

Algoritma Eksak (*Exact Algorithm*) merupakan metode penyelesaian masalah optimasi yang dirancang untuk memperoleh solusi optimal secara matematis dengan mempertimbangkan seluruh kemungkinan solusi atau melalui prosedur pencarian yang sistematis. Metode ini menjamin bahwa solusi yang dihasilkan merupakan solusi terbaik berdasarkan fungsi tujuan dan kendala yang telah ditetapkan. Beberapa metode yang termasuk dalam algoritma eksak antara lain *Branch and Bound, Branch and Cut, Dynamic Programming*, dan *Mixed Integer Linear Programming* (Sar & Gadhimi, 2023). Meskipun mampu menghasilkan solusi optimal, algoritma eksak umumnya membutuhkan waktu komputasi yang relatif tinggi, terutama ketika digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi dengan skala besar dan kompleks (Gruler dkk., 2020).

Metode *Branch and Bound* (BB) merupakan algoritma eksak yang bekerja dengan menelusuri ruang solusi secara sistematis melalui proses pencabangan (*branching*) dan pembatasan (*bounding*) untuk memperoleh solusi optimal. Kinerja metode ini dapat ditingkatkan dengan mengombinasikannya dengan teknik *cutting planes* sehingga menghasilkan algoritma Branch and Cut, atau dengan metode column generation yang dikenal sebagai algoritma *Branch and Price* (BAP) (Theurich dkk. 2021).

Selain itu, terdapat pendekatan lain seperti *Integer Linear Programming* (ILP) dan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) yang memformulasikan permasalahan dalam bentuk model optimasi matematis. penelitian Qiao dkk (2020) bertujuan memodelkan optimasi pengumpulan sampah padat perkotaan di Tiongkok. Fungsi tujuannya adalah meminimalkan tiga aspek keberlanjutan, yaitu biaya transportasi pada aspek ekonomi, biaya emisi yang dihasilkan pada aspek lingkungan, serta biaya penalti akibat pembagian beban kerja yang tidak adil pada aspek sosial, dengan menggunakan MILP sebagai berikut:

$$\text{Min F} = c_v \sum_{h=1}^{H} \sum_{i=0}^{N+S} \sum_{j=0}^{N+S} x_{ijh} + (c_f + c_e\lambda) \sum_{h=1}^{H} \sum_{i=0}^{N+S} \sum_{j=0}^{N+S} \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{S} (\eta_0 + \frac{\eta - \eta_0}{Q} Q_{ijh})\, d_{ij} x_{ijh} z_{mhi}^{r} + \text{p} \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{S} f_m^r$$

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

Keterangan:
Biaya Tetap Kendaraan

$C_1 = c_v \sum_{h=1}^{H} \sum_{i=0}^{N+S} \sum_{j=0}^{N+S} x_{ijh}$

Biaya Konsumsi Bahan Bakar

$F_{fuel} = \sum_{h=1}^{H} \sum_{i=0}^{N+S} \sum_{j=0}^{N+S} \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{S} (\eta_0 + \frac{\eta - \eta_0}{Q} Q_{ijh})\, d_{ij} x_{ijh} z_{mhi}^{r}$

$C_2 = c_f F_{fuel}$

Biaya Emisi Karbon

$E_{co2} = \lambda F_{fuel}$

$C_3 = c_e \lambda$

Biaya Penalti

$C_4 = \mathrm{p} \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{S} f_m^r$

Notasi (1) merupakan model matematis MILP secara keseluruhan, sedangkan notasi (2) – (7) merupakan turunan dari setiap komponen biaya yang dihitung.

Approximate Algorithm

Algoritma aproksimasi (*approximate algorithm*) merupakan metode penyelesaian masalah optimasi yang menghasilkan solusi mendekati optimal dengan waktu komputasi yang relatif lebih efisien dibandingkan algoritma eksak. Pendekatan ini umumnya digunakan untuk menyelesaikan permasalahan berskala besar dan kompleks ketika pencarian solusi optimal secara matematis membutuhkan waktu dan sumber daya komputasi yang tinggi (Garside dkk., 2024; Liu dkk., 2023). Dalam penerapannya, algoritma aproksimasi dapat dikembangkan melalui dua pendekatan utama, yaitu algoritma heuristik dan metaheuristik.

Heuristik

Approximate Algortihm yang disebut heuristik dirancang untuk memecahkan masalah tertentu. Heuristik berfokus pada pencarian solusi yang dapat diterima secara sistematis dalam jumlah iterasi yang terbatas. Heuristik menghasilkan solusi lebih cepat daripada metode eksak. Algoritma heuristik menggunakan aturan atau strategi tertentu untuk memperoleh solusi yang layak dalam waktu relatif singkat, meskipun tidak selalu menjamin solusi optimal (Sar & Gadhimi, 2023).

Penelitian oleh Wang dkk. (2025) menggunakan *Two-Phase Algorithm* untuk memperoleh rute yang lebih pendek dan meminimalkan biaya pada *dynamic time-dependent green vehicle routing problem for decoration waste collection* (DTDGVRP-DWC), yang menggabungkan strategi penyisipan dinamis dengan kerangka kerja *Variable Neighborhood Search* (VNS). Metode K-nearest neighbor digunakan untuk menentukan rute terdekat dengan kapasitas angkut barang yang sesuai pada pengiriman JNE (Novelan dkk., 2023). Sementara penelitian oleh Cengiz (2023) mengintegrasikan metode Fuzzy TOPSIS Type-2 Interval dengan algoritma *Clarke and Wright Savings* untuk mengoptimalkan rute distribusi bantuan bencana dengan mempertimbangkan jarak tempuh dan berbagai faktor risiko guna menghasilkan rute yang lebih aman dan efektif.

Metaheuristik

Metaheuristik merupakan kerangka algoritmik yang lebih umum dan fleksibel untuk mengarahkan proses pencarian solusi melalui mekanisme eksplorasi dan eksploitasi, sehingga dapat diterapkan pada berbagai permasalahan optimasi dengan penyesuaian tertentu (Zhang dkk., 2022). Beberapa metode metaheuristik yang banyak digunakan meliputi *Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization*, dan *Ant Colony Optimization*. Ketiga metode tersebut menjadi dasar pengembangan berbagai teknik optimasi modern yang mengadaptasi prinsip-prinsip biologis dan proses alami untuk menemukan solusi optimal (Barati dkk., 2025). Yu dkk. (2024) memperkenalkan Efficient Simulated Annealing (ESA) untuk memecahkan rute kendaraan pada sistem distribusi ritel *omnichannel*. Sementara itu, Stodola & Nohel (2022) menggunakan *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk memecahkan *multidepot vehicle routing problem* (MDVRP).

Sementara Meniz & Tiryaki (2025) mengusulkan kerangka *Genetic Algorithm* (GA) baru, yaitu *Selection Operator Decider Genetic Algorithm* (SODGA), yang secara dinamis menentukan operator seleksi pada setiap iterasi menggunakan metode *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) untuk meningkatkan kinerja optimasi pada permasalahan *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP). Selanjutnya, Lo (2022) mengembangkan pendekatan heuristik baru berbasis Particle Swarm Optimization (PSO), yang disebut ePSO, untuk menyelesaikan *permasalahan Vehicle Routing Problem with Cross-Docking*

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

and Carbon Emissions Reduction (VRPCD) dalam mendukung pengelolaan logistik berkelanjutan dengan mempertimbangkan pengurangan emisi karbon.

Hybrid

Permasalahan optimasi yang bersifat *NP-Hard*, khususnya dalam bidang rekayasa dan optimasi kombinatorial, mendorong pengembangan algoritma hibrida yang menggabungkan dua atau lebih metode, seperti heuristik, metaheuristik, dan *machine learning* (Frias dkk., 2023). Pendekatan ini bertujuan mengintegrasikan keunggulan masing-masing algoritma agar menghasilkan solusi yang lebih efektif dibandingkan penggunaan metode tunggal. Beberapa kombinasi yang telah dikembangkan antara lain Machine Learning dengan *Tabu Search* (TS), *Genetic Algorithm* (GA) dengan *Local Search* (LS), serta *Ant Colony Optimizatio*n (ACO) dengan *Local Search* (LS). Salah satu pengembangan lainnya adalah mengombinasikan teknik klasterisasi dengan ACO, misalnya menggunakan metode K-Means untuk membagi ruang pencarian sehingga proses optimasi dapat berjalan lebih efisien.

Dereci dan Karabekme (2022) membandingkan enam metode, yaitu *Nearest Neighbor, Savings Algorithm, Simulated Annealing, Greedy Descent, Guided Local Search,* dan *Tabu Search*. Sementara Rajak dkk. (2019) mengintegrasikan *Ant Colony Optimization* (ACO) dan *Simulated Annealing* (SA) untuk menyelesaikan permasalahan *Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups* (MDVRPSDP). ACO sendiri dikembangkan berdasarkan perilaku semut dalam menentukan jalur melalui mekanisme probabilistik dan informasi feromon (Frias dkk., 2023).

Selanjutnya Jasmine dkk. (2025) menggabungkan metode metaheuristik yaitu GA dengan machine learning dan metode simulasi *Discrete Event Simulation* (DES), pada proses pengumpulan dan pengangkutan limbah kayu, dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan, pada tiga skenario lalu lintas. Yu dkk. (2022) menggabungkan GA dengan SA, yang disebut GASA, untuk menyelesaikan dua variasi baru *Location Routing Problem* (LRP), yaitu *Regional Location Routing Problem* (RLRP) dan *Multi-depot Regional Location Routing Problem* (MRLRP), dalam konteks pengumpulan limbah perkotaan.

Metode Lainnya

Selain algoritma eksak dan aproksimasi, *Life Cycle Assessment* (LCA) juga digunakan oleh sejumlah peneliti dengan mempertimbangkan dampak lingkungan (Aryan dkk., 2023; Medden dkk., 2022; Taskin & Demir, 2021). LCA merupakan metode sistematis untuk menganalisis konsekuensi lingkungan dari suatu sistem, produk, atau proses sepanjang siklus hidupnya dengan mempertimbangkan karakteristik energi, material, dan emisi (Liao dkk., 2024). LCA dapat digunakan untuk menilai biaya bahan bakar, polutan, emisi gas rumah kaca, dampak terhadap air, serta biaya pada seluruh tahapan produksi dan penggunaan. Liao dkk. (2024) mengintegrasikan metode Life Cycle Assessment (LCA) dan Vehicle Routing Problem (VRP) untuk mengevaluasi emisi gas rumah kaca (GRK) serta potensi pengurangannya dalam sistem pemindahan dan pengangkutan sampah, termasuk pengolahan air lindi yang dihasilkan. Dalam evaluasi teknologi bahan bakar alternatif, diasumsikan bahwa terlepas dari jenis bahan bakarnya, energi yang dibutuhkan kendaraan pengangkut limbah untuk menempuh jarak 1 km adalah sama. Berat seluruh truk pengangkut sampah dengan bahan bakar alternatif juga diasumsikan sama dalam analisis.

$$E = E_x^* \times n_x$$

Di mana:
E merupakan gaya yang diperlukan untuk menggerakkan kendaraan pengangkut sampah (kJ/km) untuk setiap kilometer.
E_x^* merupakan kebutuhan energi bahan bakar x untuk memenuhi kehilangan energi mesin.
n_x merupakan efisiensi bahan bakar x.

Equivalent Energy Conversion Factor (EECF) yang dapat diperkirakan sebagai selisih antara energi yang dibutuhkan kendaraan untuk menempuh satu kilometer menggunakan bahan bakar y dan bahan bakar x, digunakan untuk mengubah kebutuhan energi yang telah dihitung (kJ/km).

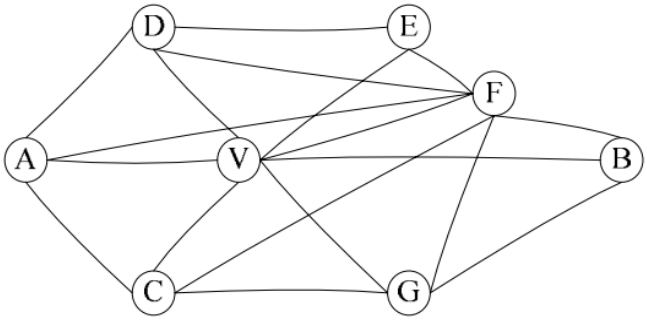
$$EECF_{x\ to\ y} = \frac{E_y^*}{E_x^*} = \frac{n_y}{n_x}$$

Di mana:
$EECF_{x\ to\ y}$ merupakan rasio energi ekuivalen dari bahan bakar x terhadap bahan bakar y.

Dengan mengasumsikan bahwa EECF merupakan fungsi dari jenis bahan bakar, bukan jenis kendaraan sebagaimana ditunjukkan pada notasi (8) dan (9), EECF diterapkan pada kendaraan pengumpul untuk menentukan konsumsi bahan bakarnya.

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

Pada metode lainnya, Norhafezah (2020) menggunakan Algoritma Dijkstra untuk menemukan rute terpendek pengumpulan dan pengangkutan sampah dari tiga kontraktor. Algoritma Dijkstra merupakan algoritma pencarian graf yang menyelesaikan permasalahan lintasan terpendek dari satu sumber pada graf dengan bobot sisi non-negatif (Gambar 3).



Gambar 3. Djikstra's Algorithm

KESIMPULAN

Kajian terhadap 27 artikel menunjukkan bahwa *Vehicle Routing Problem* (VRP) merupakan salah satu pendekatan optimasi yang banyak digunakan untuk menentukan rute optimal kendaraan dalam melayani sejumlah titik tujuan dengan mempertimbangkan berbagai kendala operasional. Pengembangan model VRP menghasilkan beberapa variasi, seperti *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW), dan *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP). Berbagai model tersebut dikembangkan untuk mengakomodasi keterbatasan kapasitas kendaraan, batasan waktu pelayanan, serta jumlah dan lokasi depot. Secara umum, penerapan VRP bertujuan meminimalkan jarak tempuh, waktu perjalanan, dan biaya operasional sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan armada.

Metode penyelesaian VRP secara umum terbagi menjadi algoritma eksak (*exact algorithms*) dan algoritma aproksimasi (*approximation algorithms*). Algoritma eksak, seperti *Branch and Bound*, *Branch and Cut, Branch and Price, Column Generation, Dynamic Programming,* dan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), mampu menghasilkan solusi optimal, tetapi memiliki keterbatasan komputasi pada permasalahan berskala besar. Sementara itu, algoritma aproksimasi yang mencakup metode heuristik dan metaheuristik, seperti *Nearest Neighbor*, *Clarke and Wright Savings*, *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Simulated Annealing* (SA), dan *Tabu Search* (TS), menawarkan proses pencarian solusi yang lebih efisien. Selain itu, pengembangan algoritma hibrida melalui kombinasi beberapa metode dilakukan untuk meningkatkan kualitas solusi dan mengurangi risiko terjebak pada optimum lokal. Perkembangan ini menunjukkan bahwa pemilihan metode optimasi perlu disesuaikan dengan karakteristik, kompleksitas, dan tujuan permasalahan. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada pengembangan model multiobjektif dan algoritma hibrida yang mampu mengakomodasi berbagai kendala operasional serta mempertimbangkan aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial secara terintegrasi.

REFERENSI

Ahmed, Z. H., & Yousefikhoshbakht, M. (2023). A hybrid algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem with time windows. *Symmetry, 15*(2), Article 486. https://doi.org/10.3390/sym15020486

Asghari, M., & Al-e, S. M. J. M. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics, 231*, Article 107899. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899

Barati, H., Rafiee, S., Zanjirani, H., Bandi, B., Haji-Hashemi, A. M., Shafiepour, S., & Goli, A. (2025). Performance evaluation of emerging meta-heuristic algorithms on vehicle routing problem. *Engineering Reports, 7*(7), Article e70198. https://doi.org/10.1002/eng2.70198

Cengiz Toklu, M. (2023). A fuzzy multi-criteria approach based on Clarke and Wright savings algorithm for vehicle routing problem in humanitarian aid distribution. *Journal of Intelligent Manufacturing, 34*(5), 2241–2261. https://doi.org/10.1007/s10845-022-01917-0

Dereci, U., & Karabekmez, M. E. (2022). The applications of multiple route optimization heuristics and meta-heuristic algorithms to solid waste transportation: A case study in Turkey. *Decision Analytics Journal, 4*, Article 100113. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100113

Djebbar, A. M., & Amina, K. (2025). A hybrid approach for solving the capacitated vehicle routing problem.

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

International Journal of Automotive Science and Technology, 9(2), 249–258. https://doi.org/10.30939/ijastech..1663305

Frías, N., Johnson, F., & Valle, C. (2023). Hybrid algorithms for energy minimizing vehicle routing problem: Integrating clusterization and ant colony optimization. *IEEE Access, 11*, 125800–125821. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3325787

Garside, A. K., Ahmad, R., & Muhtazaruddin, M. N. B. (2024). A recent review of solution approaches for green vehicle routing problem and its variants. *Operations Research Perspectives, 12*, Article 100303. https://doi.org/10.1016/j.orp.2024.100303

Ghannadpour, S. F., Zandiyeh, F., & Rahman, A. (2020). A multi-objective memetic algorithm for risk minimizing vehicle routing problem and scheduling problem. *International Journal of Transportation Engineering, 7*(4), 341–353.

Gruler, A., Pérez-Navarro, A., Calvet Liñan, L., & Juan, A. A. (2020). A simheuristic algorithm for time-dependent waste collection management with stochastic travel times. *SORT: Statistics and Operations Research Transactions, 44*(2), 285–310.

Huang, S. H., Huang, Y. H., Lee, H. C., & Tong, Y. Y. (2023). A new hybrid algorithm for solving the vehicle routing problem with route balancing. *International Journal of Industrial Engineering and Management, 14*(1), 51–62. https://doi.org/10.24867/IJIEM-2023-1-324

Iksan, N., Tufail, A., Apong, R. A., & Hidayatullah, A. F. (2024). Optimizing maritime passenger transfer in rich vehicle routing problem using a hybrid genetic algorithm. *IEEE Access, 12*, 80153–80164. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3406222

Jasmine, T. L., Putro, H. P. H., Prilandita, N., & Yudoko, G. (2025). A simulation-based metaheuristics for capacitated vehicle routing problem. *Automotive Experiences, 8*(1), 159–176. https://doi.org/10.31603/ae.13242

Kashyap, G. S., Brownlee, A. E., Phukan, O. C., Malik, K., & Wazir, S. (2023). *Roulette-wheel selection-based PSO algorithm for solving the vehicle routing problem with time windows* [Preprint]. arXiv. https://arxiv.org/abs/2306.02308

Liao, N., Lü, F., Zhang, H., & He, P. (2024). Optimizing the greenhouse gas emissions of waste transfer and transport: An integration of life cycle assessment and vehicle routing problem. *Waste Management, 189*, 314–324. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.034

Liu, Q., Xu, P., Wu, Y., & Shen, T. (2022). A hybrid genetic algorithm for the electric vehicle routing problem with time windows. *Control Theory and Technology, 20*(2), 279–286. https://doi.org/10.1007/s11768-022-00091-1

Liu, X., Chen, Y. L., Por, L. Y., & Ku, C. S. (2023). A systematic literature review of vehicle routing problems with time windows. *Sustainability, 15*(15), Article 12004. https://doi.org/10.3390/su151512004

Lo, S. C. (2022). A particle swarm optimization approach to solve the vehicle routing problem with cross-docking and carbon emissions reduction in logistics management. *Logistics, 6*(3), Article 62. https://doi.org/10.3390/logistics6030062

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

Meniz, B., & Tiryaki, F. (2025). Genetic algorithm optimization with selection operator decider. *Arabian Journal for Science and Engineering, 50*(10), 6931–6941. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09068-5

Muriyatmoko, D., Djunaidy, A., & Muklason, A. (2024). Heuristics and metaheuristics for solving capacitated vehicle routing problem: An algorithm comparison. *Procedia Computer Science, 234*, 494–501. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.03.032

Novelan, M. S., Efendi, S., Sihombing, P., & Mawengkang, H. (2023). Optimation cavacity vehicle routing problem with K-nearest neighbor in classification of goods distribution route. In *2023 International Conference of Computer Science and Information Technology (ICOSNIKOM)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICoSNIKOM60230.2023.10364439

Ogundoyin, S. O., & Kamil, I. A. (2021). A trust management system for fog computing services. *Internet of Things, 14*, Article 100382. https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100382

Póvoa, C. L. R., Roboredo, M. C., Velasco, A. S., Pessoa, A. A., & Paes, F. G. (2025). A hybrid GRASP and tabu-search heuristic and an exact method for a variant of the multi-compartment vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications, 259*, Article 125319. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125319

Pratiwi, A. B., Salmah, S., & Endrayanto, I. (2026). A two-phase branch-and-bound algorithm for solving

e-ISSN: 2963 – 198X
p-ISSN: 2963 – 2498

vehicle routing problem with maximum duration constraint. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications, 16*(3), 981–996. https://doi.org/10.36922/IJOCTA025480215

Qiao, Q., Tao, F., Wu, H., Yu, X., & Zhang, M. (2020). Optimization of a capacitated vehicle routing problem for sustainable municipal solid waste collection management using the PSO-TS algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(6), Article 2163. https://doi.org/10.3390/ijerph17062163

Reis, M. J. (2025). An adaptive hybrid metaheuristic for solving the vehicle routing problem with time windows under uncertainty. *Computers, Materials & Continua, 85*(2), 3023–3039. https://doi.org/10.32604/cmc.2025.066390

Sajid, M., Singh, J., & Rajak, R. (2023). Capacitated vehicle routing problem using algebraic particle swarm optimization with simulated annealing algorithm. In *Artificial intelligence in cyber-physical systems* (pp. 225–239). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003248750-13

Sar, K., & Ghadimi, P. (2023). A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations. *Computers & Industrial Engineering, 177*, Article 109011. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109011

Simamora, H. U. U., & Rakhmawati, F. (2023). Optimization of salak fruit distribution routes with vehicle routing problem (VRP) using Clarke and Wright savings. *Mathline: Jurnal Matematika dan Pendidikan Matematika, 8*(2), 691–704.

Stodola, P., & Nohel, J. (2022). Adaptive ant colony optimization with node clustering for the multidepot vehicle routing problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 27*(6), 1866–1880. https://doi.org/10.1109/TEVC.2022.3230042

Theurich, F., Fischer, A., & Scheithauer, G. (2021). A branch-and-bound approach for a vehicle routing problem with customer costs. *EURO Journal on Computational Optimization, 9*, Article 100003. https://doi.org/10.1016/j.ejco.2020.100003

Tiwari, K. V., & Sharma, S. K. (2023). An optimization model for vehicle routing problem in last-mile delivery. *Expert Systems with Applications, 222*, Article 119789. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119789

Wang, W., Li, Y., Yan, H., Zhao, W., Zhao, Q., & Luo, K. (2025). A two-phase algorithm for the dynamic time-dependent green vehicle routing problem in decoration waste collection. *Expert Systems with Applications, 262*, Article 125570. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125570

Xu, X., Wu, T., Wang, S., Zhang, S., Xu, Z., Yang, B., ... Shen, L. (2025). Optimization of reliable vehicle routing problem for medical waste collection with time windows in stochastic transportation networks. *Engineering Optimization, 57*(8), 2109–2139. https://doi.org/10.1080/0305215X.2024.2388626

Yu, V. F., Aloina, G., Susanto, H., Effendi, M. K., & Lin, S. W. (2022). Regional location routing problem for waste collection using hybrid genetic algorithm-simulated annealing. *Mathematics, 10*(12), Article 2131. https://doi.org/10.3390/math10122131

Yu, V. F., Lin, C. H., Maglasang, R. S., Lin, S. W., & Chen, K. F. (2024). An efficient simulated annealing algorithm for the vehicle routing problem in omnichannel distribution. *Mathematics, 12*(23), Article 3664. https://doi.org/10.3390/math12233664

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