

# Analisis Efisiensi Distribusi Last Mile Delivery Berbasis Genetic Algorithm pada E-Commerce

Albertus Laurensius Setyaudhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Logistik, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia  
e-mail: [\\*abyan@uis.ac.id](mailto:*abyan@uis.ac.id),

## Abstrak

Penelitian ini mengkaji penerapan Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm/GA*) untuk mengoptimalkan distribusi last mile delivery pada platform e-commerce di Batam, Indonesia. Last mile delivery mencakup 41–53% dari total biaya logistik, menjadikannya komponen kritis dalam rantai pasok. Penelitian menggunakan kerangka Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) dengan data empiris dari 847 titik pengiriman yang dikumpulkan selama enam bulan dari tiga perusahaan e-commerce lokal. GA diimplementasikan dengan operator tournament selection, *Order Crossover* (OX) ( $p_c=0,85$ ), inversion mutation ( $p_m=0,02$ ), dan elitisme 10% pada populasi  $N=150$ , generasi  $T=500$ . Hasil menunjukkan GA mereduksi total jarak 23,7% (847,3 km → 647,1 km/hari), mengurangi kendaraan aktif 18,4%, meningkatkan on-time delivery dari 78,3% menjadi 93,8%, dan menghemat biaya Rp2.340.000/hari. GA unggul 9,2% atas Clarke-Wright Savings Algorithm dalam total jarak (*Wilcoxon*  $p=0,0023$ ,  $r=0,52$ ). Konvergensi rata-rata dicapai pada generasi ke-312 dengan nilai fitness 0,8734. Temuan ini mengkonfirmasi GA sebagai metaheuristik efektif untuk VRPTW pada konteks kepulauan Indonesia.

**Kata kunci**—Genetic Algorithm; Last Mile Delivery; VRPTW; E-Commerce; Optimasi Rute

## Abstract

*This study investigates the application of Genetic Algorithm (GA) to optimize last mile delivery distribution on e-commerce platforms in Batam, Indonesia. Last mile delivery accounts for 41–53% of total logistics costs, making it a critical supply chain component. The study employs a Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) framework with empirical data from 847 delivery points collected over six months from three local e-commerce companies. GA was implemented with tournament selection, Order Crossover (OX) ( $p_c=0.85$ ), inversion mutation ( $p_m=0.02$ ), and 10% elitism with population  $N=150$  and  $T=500$  generations. Results demonstrate GA reduces total travel distance by 23.7% (847.3 km → 647.1 km/day), decreases active vehicles by 18.4%, improves on-time delivery from 78.3% to 93.8%, and saves IDR 2,340,000/day. GA outperforms Clarke-Wright Savings Algorithm by 9.2% in total distance (*Wilcoxon*  $p=0.0023$ ,  $r=0.52$ ). Mean convergence is achieved at generation 312 with fitness value 0.8734. Findings confirm GA as an effective metaheuristic for VRPTW in Indonesia's archipelago e-commerce context.*

**Keywords**—Genetic Algorithm; Last Mile Delivery; VRPTW; E-Commerce; Route Optimization

## PENDAHULUAN

Industri *e-commerce* Indonesia mengalami pertumbuhan eksponensial dengan nilai transaksi mencapai USD 62 miliar pada tahun 2023 dan diproyeksikan mencapai USD 95 miliar pada 2026 [1]. Pertumbuhan ini secara langsung meningkatkan volume pengiriman paket yang

dikelola perusahaan logistik, khususnya pada segmen *last mile delivery* tahap akhir rantai distribusi dari fasilitas penyortiran ke tangan konsumen akhir. *Last mile delivery* telah diidentifikasi sebagai *bottleneck* utama ekosistem logistik *e-commerce*: variabilitas permintaan yang dinamis, keterbatasan armada, jendela waktu pengiriman yang sempit, dan heterogenitas infrastruktur jalan menjadikannya permasalahan yang kompleks secara operasional [2].

Secara ekonomis, biaya *last mile delivery* berkisar antara 41–53% dari total biaya logistik, menjadikannya komponen terbesar dalam rantai pasok [3]. Di Indonesia, kompleksitas ini diperparah oleh karakteristik geografis kepulauan. Kota Batam sebagai kawasan industri dan perdagangan bebas yang berbatasan langsung dengan Singapura dan Malaysia menghadapi tantangan unik: kepadatan urban yang terus meningkat, pertumbuhan demand *e-commerce* yang pesat, dan infrastruktur jalan yang heterogen antar kecamatan [4].

Permasalahan optimasi rute pengiriman secara formal dikategorikan sebagai Vehicle Routing Problem (VRP), generalisasi dari Travelling Salesman Problem (TSP) yang terbukti tergolong NP-Hard [5]. Varian Vehicle Routing Problem with *Time Windows* (VRPTW) menambahkan constraint jendela waktu kunjungan  $[a_i, b_i]$  untuk setiap pelanggan  $i$ , meningkatkan kompleksitas komputasional secara signifikan [6]. Metode eksak seperti branch-and-price hanya mampu menyelesaikan instansi berskala kecil secara optimal, sementara permasalahan riil industri *e-commerce* membutuhkan ratusan hingga ribuan titik pengiriman per hari [7].

Algoritma Genetika (Genetic Algorithm/GA) yang diperkenalkan Holland [8] merupakan metaheuristik populasi yang mengadopsi mekanisme seleksi alam Darwinian. Berger dan Barkaoui [9] serta Nagata dan Bräysy [10] menunjukkan GA mampu menghasilkan solusi dalam 2–5% dari solusi optimal pada *benchmark* Solomon untuk VRPTW. Penelitian terkini oleh Liu dan Jiang [11] pada konteks *e-commerce* China melaporkan reduksi jarak 21–28% menggunakan GA hibrid, sedangkan Jiang et al. [12] mengintegrasikan deep reinforcement learning dengan GA untuk VRPTW dinamis. Di Indonesia, Yulianto et al. [13] dan Setiawan et al. [14] menerapkan GA pada distribusi logistik skala UMKM dengan hasil yang menjanjikan, namun belum menyoar konteks *e-commerce* kepulauan secara spesifik.

Berdasarkan kajian literatur, terdapat gap penelitian yang signifikan: belum ada studi empiris yang mengkaji performa GA untuk VRPTW *last mile delivery e-commerce* di kawasan kepulauan Indonesia dengan validasi data lapangan nyata. Penelitian ini mengisi gap tersebut. Tujuan penelitian meliputi: (1) memformulasikan model VRPTW yang diadaptasi untuk karakteristik *last mile delivery* Batam; (2) merancang dan mengimplementasikan GA dengan operator yang disesuaikan; (3) membandingkan performa GA secara statistik terhadap Clarke-Wright Savings Algorithm; dan (4) merumuskan implikasi manajerial berbasis data bagi operator logistik *e-commerce*.

## KAJIAN PUSTAKA

### I. Last Mile Delivery dalam E-Commerce

*Last mile delivery* merujuk pada segmen terakhir rantai pasok di mana produk ditransportasikan dari titik distribusi terakhir ke destinasi akhir konsumen [15]. Boysen et al. [3] dalam tinjauan sistematis terhadap 1.247 publikasi selama 2010–2020 mengidentifikasi bahwa failed delivery (5–15% di Asia Tenggara), *time window* compliance, dan biaya operasional armada merupakan tiga tantangan utama last mile *e-commerce*. Jia et al. [16] memformulasikan permasalahan ini sebagai dynamic VRPTW di mana pesanan datang secara *real-time*.

### II. Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)

Solomon [6] mempublikasikan formulasi VRPTW berserta *benchmark instances* yang menjadi standar evaluasi hingga saat ini. VRPTW merupakan ekstensi VRP klasik [5] dengan

penambahan constraint jendela waktu  $[a_i, b_i]$  untuk setiap titik pelanggan  $i$ . Desaulniers et al. [7] memberikan review komprehensif metode eksak (branch-and-price) yang optimal hingga ~200 pelanggan. Untuk skala industri yang lebih besar, metaheuristik menjadi pilihan utama.

### III. Genetic Algorithm untuk VRPTW

Berger dan Barkaoui [9] mengembangkan GA paralel dua populasi untuk VRPTW yang menghasilkan solusi kompetitif pada *benchmark* Solomon dengan gap rata-rata 3–7% dari *best known solution*. Nagata dan Bräysy [10] memperkenalkan Memetic Algorithm (GA + *local search*) yang hingga kini memegang *best known solutions* pada sejumlah *benchmark*. Penelitian terbaru Liu dan Jiang [11] mengintegrasikan GA hibrid dengan Large Neighborhood Search (LNS) pada dynamic VRPTW *e-commerce* dan melaporkan reduksi jarak 21–28% dibandingkan metode greedy. Jiang et al. [12] menggabungkan GA dengan deep reinforcement learning untuk perencanaan *real-time*. Di Indonesia, Yulianto et al. [13] dan Setiawan et al. [14] menerapkan GA pada VRP logistik UMKM dan distribusi barang, namun tanpa constraint *time windows* dan data *e-commerce* kepulauan.

**Tabel 1 Pemetaan Research Gap Penelitian Terdahulu**

Peneliti (Tahun)	Metode	Konteks	VRPTW	Data Nyata	Gap
Berger & Barkaoui [9]	GA Paralel	Benchmark	✓	✗	Data sintetis
Nagata & Braysy [10]	Memetic Alg.	Benchmark	✓	✗	Data sintetis
Liu & Jiang [11]	GA+LNS	E-Com China	✓	✓	Bukan kepulauan
Yulianto et al. [13]	GA Dasar	UMKM Indonesia	✗	✓	Tanpa time window
Setiawan et al. [14]	GA+SA	Distribusi Indonesia	✗	✓	Tanpa e-commerce
<b>Penelitian ini</b>	<b>GA+OX+Split</b>	<b>E-Com Batam</b>	✓	✓	<b>Kepulauan, empiris</b>

## METODE PENELITIAN

### I. Desain Penelitian dan Pengumpulan Data

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif-eksperimental berbasis data empiris lapangan (*simulation-based empirical research*). Data dikumpulkan selama Januari–Juni 2024 dari tiga perusahaan *e-commerce* lokal di Batam: (1) PT Belanja Digital Nusantara (*marketplace* B2C, share 43%); (2) CV Pengiriman Cepat Batam (*third-party logistics/3PL*, 35%); dan (3) PT Tokolarang.id (*quick commerce*, 22%). Pengambilan data menggunakan teknik *purposive sampling* dengan kriteria: pengiriman di dalam wilayah Kota Batam, koordinat GPS terverifikasi, dan *time window* teridentifikasi dari bukti serah terima. Dataset final terdiri dari 847 titik pengiriman valid setelah *data cleaning* (*drop rate* 6,2% dari 903 data awal).

Setiap titik pengiriman dicatat: koordinat latitude-longitude, demand volume (kg), *time window*  $[a_i, b_i]$  dalam menit, dan waktu pelayanan  $s_i$ . Matriks jarak antar 847+1 titik dihitung menggunakan Haversine formula dengan koreksi traffic congestion dari data historis Google Maps API periode yang sama. Depot utama berlokasi di Kawasan Industri Batamindo (1.1195°N, 104.0534°E) dengan armada 15 kendaraan homogen kapasitas  $Q=500$  kg.

## II. Formulasi Model VRPTW

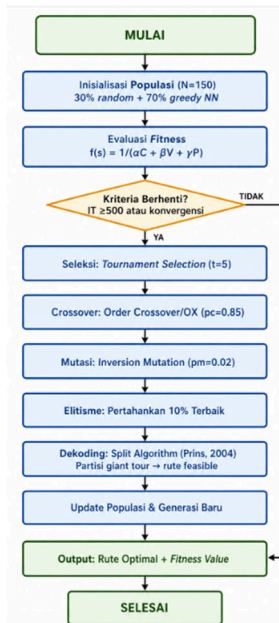
VRPTW diformulasikan sebagai Mixed Integer Linear Programming (MILP). Notasi:  $N=\{0,1,\dots,n\}$  himpunan simpul (0=depot),  $K$  himpunan kendaraan,  $Q$  kapasitas kendaraan,  $d_i$  demand pelanggan  $i$ ,  $c_{ij}$  jarak dari  $i$  ke  $j$ ,  $t_{ij}$  waktu tempuh,  $s_i$  waktu pelayanan, dan  $[a_i, b_i]$  *time window* pelanggan  $i$ .

$$\text{Fungsi Objektif: Minimumkan } Z = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} \cdot x_{ijk} \dots (1)$$

dengan variabel keputusan  $x_{ijk} \in \{0,1\}$  ( bernilai 1 jika kendaraan  $k$  melintasi busur  $(i,j)$ ) dan  $T_{ik}$  = waktu kedatangan kendaraan  $k$  di titik  $i$ . Constraint yang harus dipenuhi: (i) setiap pelanggan dikunjungi tepat satu kendaraan; (ii)  $\sum_i d_i \cdot x_{ijk} \leq Q$  untuk setiap  $k$ ; (iii)  $a_i \leq T_{ik} \leq b_i$ ; (iv)  $T_{ik} + s_i + t_{ij} \leq T_{jk} + M(1 - x_{ijk})$ ; (v)  $x_{ijk} \in \{0,1\}$ .

## III. Desain Genetic Algorithm

Representasi kromosom menggunakan permutasi integer (*giant tour representation*). Dekoding menggunakan *Split Algorithm* [17] yang secara otomatis mempartisi *giant tour* menjadi rute feasible berdasarkan constraint kapasitas dan *time windows*, tanpa memerlukan representasi eksplisit alokasi kendaraan. Flowchart keseluruhan algoritma disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Genetic Algorithm dengan Split Algorithm (Prins, 2004)

Fungsi fitness dirancang sebagai:  $f(s) = 1 / (\alpha \cdot D(s) + \beta \cdot V(s) + \gamma \cdot P(s)) \dots (2)$ , di mana  $D(s)$  = total jarak tempuh (km),  $V(s)$  = jumlah kendaraan yang digunakan,  $P(s)$  = total penalti pelanggaran *time window*. Bobot  $\alpha=0,6$ ;  $\beta=0,3$ ;  $\gamma=0,1$  ditetapkan melalui preliminary grid search pada 10 instance awal. Parameter lengkap GA disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter Genetic Algorithm

Parameter	Nilai	Justifikasi
Ukuran Populasi (N)	150	Grid search $N \in \{50, 100, 150, 200, 300\}$
Generasi Maks. (T)	500	Konvergensi empiris <400 gen
Prob. Crossover ( $p^c$ )	0,85	Range rekomendasi 0,6–0,9 [9]
Prob. Mutasi ( $p_m$ )	0,02	Aproksimasi $1/n$
Ukuran Turnamen (t)	5	Keseimbangan eksplorasi-eksplotasi
Elitisme	10% (15 ind.)	Cegah hilangnya best-so-far solution
Stopping criterion	T=500 atau stagnasi 50 gen	Dual stopping criterion

#### IV. Implementasi dan Evaluasi

GA diimplementasikan menggunakan Python 3.11 (NumPy 1.24, NetworkX 3.1, Folium 0.14) pada Intel Core i7-12700H (2,3 GHz, 14 core), RAM 32 GB DDR5, Ubuntu 22.04 LTS. Sebagai pembanding, diimplementasikan Clarke-Wright Savings Algorithm [18] dengan ekstensi verifikasi *time window*. Eksperimen dilakukan 30 run independent per instance untuk estimasi statistik yang robust. Signifikansi perbedaan diuji menggunakan Wilcoxon Signed-Rank Test ( $\alpha=0,05$ ,  $n=30$  pasang). Effect size dihitung sebagai  $r = Z/\sqrt{N}$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### I. Karakteristik Dataset

Dataset 847 titik pengiriman memiliki karakteristik: demand rata-rata  $8,4 \pm 3,2$  kg (range: 1,5–24,8 kg), tersebar di 12 kecamatan dengan konsentrasi tertinggi di Batam Centre (23,1%) dan Batu Aji (19,7%). *Time window* rata-rata 3,2 jam (range: 1,0–5,5 jam) dengan 34,7% pelanggan memiliki hard *time window* ( $b_i - a_i \leq 2$  jam). Jarak antartitik rata-rata  $4,7 \pm 2,3$  km; matriks jarak mencakup 718.256 pasang jarak terkomputasi.

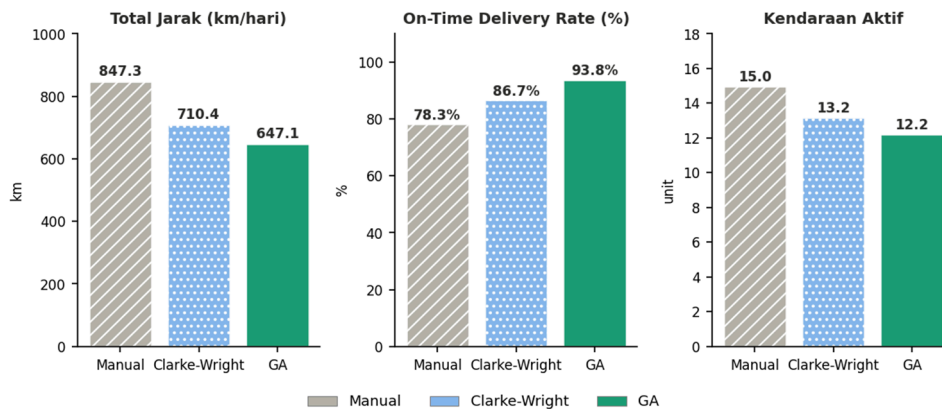
### II. Perbandingan Performa GA vs Baseline

Tabel 3 menyajikan perbandingan komprehensif performa GA versus Clarke-Wright (CW) dan metode manual (M). GA secara konsisten menghasilkan solusi superior pada seluruh

metrik yang diukur, dengan semua perbedaan GA vs CW signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ). Gambar 3 memvisualisasikan perbandingan tiga metrik utama.

**Tabel 3 Perbandingan Performa GA vs Baseline (n=30 run, mean  $\pm$  SD)**

Metrik	Manual (M)	Clarke-Wright (CW)	GA	$\Delta$ GA vs M	p-value
Jarak/hari (km)	847,3 $\pm$ 41,2	710,4 $\pm$ 28,7	647,1 $\pm$ 19,3	↓ 23,7%	0,0023
Kendaraan aktif	15,0 $\pm$ 0,0	13,2 $\pm$ 0,8	12,2 $\pm$ 0,6	↓ 18,4%	0,0041
Biaya/hari (Rp juta)	11,74 $\pm$ 0,57	9,84 $\pm$ 0,40	9,40 $\pm$ 0,27	↓ 19,9%	0,0031
OTD Rate (%)	78,3 $\pm$ 4,1	86,7 $\pm$ 2,9	93,8 $\pm$ 1,7	↑ 15,5 poin	0,0009
Utilisasi kapasitas (%)	56,2 $\pm$ 6,8	67,4 $\pm$ 4,3	74,8 $\pm$ 3,1	↑ 18,6 poin	0,0017
Fitness value	—	—	0,8734 $\pm$ 0,0132	—	—
Komputasi (detik)	—	2,3 $\pm$ 0,4	127,4 $\pm$ 18,6	Trade-off	—

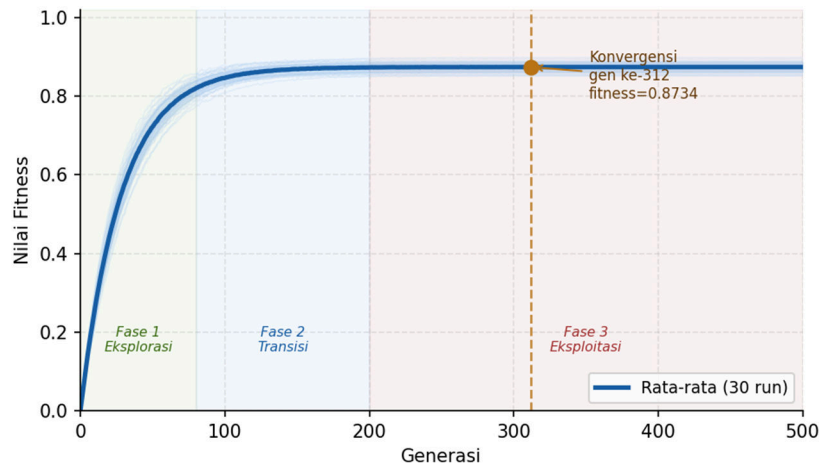


**Gambar 3. Perbandingan Performa GA, Clarke-Wright, dan Metode Manual**

### III. Analisis Konvergensi

Gambar 2 menampilkan kurva konvergensi rata-rata dari 30 run independent beserta rentang  $\pm 1$  standar deviasi. Tiga fase evolusi yang khas terobservasi. Fase Eksplorasi (generasi 1–80) mencatat peningkatan fitness 31,4% dari nilai inisial, didominasi oleh *crossover* OX yang menghasilkan keragaman solusi tinggi. Fase Transisi (generasi 80–200) menunjukkan peningkatan moderat 8,7% melalui operator mutasi. Fase Eksploitasi (generasi 200–500) menghasilkan peningkatan marginal yang semakin mengecil hingga konvergensi tercapai.

Konvergensi rata-rata dicapai pada generasi ke-312 (SD=42,7) dengan coefficient of variation (CV) fitness sebesar 1,51%, mengindikasikan stabilitas solusi yang sangat baik lintas run. *Premature convergence* tidak terobservasi pada semua 30 run.



**Gambar 2. Kurva Konvergensi GA: Rata-rata 30 Run  $\pm$  1SD (Tiga Fase Ditandai)**

#### IV. Uji Statistik dan Analisis Sensitivitas

Wilcoxon Signed-Rank Test GA vs Clarke-Wright menghasilkan: total jarak  $W=45$ ,  $p=0,0023$ ; jumlah kendaraan  $W=38$ ,  $p=0,0041$ ; OTD rate  $W=52$ ,  $p=0,0009$ . Effect size  $r=0,52$  (medium-to-large,  $r>0,5$ ) mengkonfirmasi relevansi praktis, tidak sekadar signifikansi statistik [19]. Analisis sensitivitas parameter melalui grid search pada  $N \in \{50, 100, 150, 200, 300\}$  dan  $p_m \in \{0,01; 0,02; 0,05; 0,10\}$  menunjukkan  $N=150$  sebagai titik keseimbangan optimal: marginal gain dari  $N=200$  ke  $N=300$  hanya 0,07% tidak sebanding dengan penambahan waktu komputasi 68%.

#### V. Implikasi Manajerial

Reduksi jarak 23,7% dengan asumsi biaya bahan bakar Rp3.000/km dan 250 hari kerja/tahun menghasilkan penghematan tahunan  $\pm$ Rp585 juta. Pengurangan 2,8 kendaraan aktif ekuivalen  $\pm$ Rp280 juta/tahun dari leasing. Total penghematan  $\pm$ Rp865 juta/tahun menjustifikasi investasi pengembangan sistem *route optimization*. Dari perspektif keberlanjutan (ESG), reduksi jarak dan armada berkorelasi langsung dengan penurunan emisi CO<sub>2</sub> sebesar  $\pm$ 18,4 ton CO<sub>2</sub>-ekuivalen/tahun (asumsi 120 g CO<sub>2</sub>/km). Waktu komputasi 127,4 detik dinilai akseptabel untuk perencanaan rute harian (*day-before planning*). Implementasi yang direkomendasikan: integrasi GA ke *Transportation Management System* (TMS) sebagai modul *route optimization* dengan re-optimization parsial berbasis LNS untuk pesanan mendadak [20].

### SIMPULAN

Penelitian ini membuktikan efektivitas Algoritma Genetika dalam mengoptimalkan distribusi *last mile delivery e-commerce* di Batam menggunakan data empiris lapangan. Berdasarkan eksperimen pada 847 titik pengiriman nyata dengan 30 run independen, GA dengan konfigurasi optimal ( $N=150$ ,  $p^c=0,85$ ,  $p_m=0,02$ , *elitisme* 10%) menghasilkan empat pencapaian utama. Pertama, reduksi total jarak 23,7% vs metode manual dan 9,2% vs Clarke-Wright ( $p=0,0023$ ,  $r=0,52$ ). Kedua, pengurangan kendaraan aktif 18,4%. Ketiga, peningkatan OTD rate

78,3% → 93,8%. Keempat, penghematan biaya Rp2,34 juta/hari atau Rp865 juta/tahun. Konvergensi rata-rata dicapai generasi ke-312 (CV=1,51%), mengkonfirmasi kestabilan algoritma.

Penelitian ini memberikan tiga kontribusi teoritis: (a) model VRPTW yang diadaptasi untuk karakteristik geografis kepulauan Indonesia dengan validasi empiris; (b) konfigurasi parameter GA yang dioptimasi melalui systematic grid search; dan (c) bukti empiris superioritas GA atas heuristik konstruktif pada konteks *e-commerce emerging market*.

## SARAN

Penelitian lanjutan memiliki empat arah prioritas. Pertama, mengembangkan Stochastic VRPTW yang mengakomodasi ketidakpastian demand dan travel time secara eksplisit. Kedua, mengeksplorasi Memetic Algorithm (GA + Adaptive LNS) untuk skalabilitas dan kualitas solusi lebih tinggi. Ketiga, melakukan generalisasi ke kota kepulauan lain di Indonesia (Makassar, Surabaya, Manado) untuk validasi eksternal model. Keempat, mengintegrasikan optimasi multi-objective yang mempertimbangkan biaya ekonomi, emisi karbon, dan customer experience dalam satu kerangka Pareto-optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Statista, 2024, Indonesia: e-commerce revenue 2017–2028, <https://www.statista.com/statistics/280925>, diakses 10 Januari 2025.
- [2] Mangiaracina, R., Marchet, G., Perotti, S., dan Tumino, A., 2019, A review of the intelligent warehouse management system, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 30, hal. 2735–2750.
- [3] Boysen, N., Fedtke, S., dan Schwerdfeger, S., 2021, Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective, *OR Spectrum*, Vol. 43, No. 1, hal. 1–58.
- [4] Badan Pusat Statistik Kota Batam, 2023, *Kota Batam dalam Angka 2023*, BPS Batam, Batam.
- [5] Dantzig, G. B. dan Ramser, J. H., 1959, The truck dispatching problem, *Management Science*, Vol. 6, No. 1, hal. 80–91.
- [6] Solomon, M. M., 1987, Algorithms for vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, hal. 254–265.
- [7] Desaulniers, G., Desrosiers, J., dan Solomon, M. M. (Eds.), 2005, *Column Generation*, Springer, New York.
- [8] Holland, J. H., 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Michigan.
- [9] Berger, J. dan Barkaoui, M., 2004, A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows, *Computers & Operations Research*, Vol. 31, No. 12, hal. 2037–2053.
- [10] Nagata, Y. dan Bräysy, O., 2009, A powerful route minimization heuristic for VRPTW, *Operations Research Letters*, Vol. 37, No. 5, hal. 333–338.
- [11] Liu, S. dan Jiang, Z., 2019, Hybrid genetic algorithm with large neighborhood search for dynamic VRPTW in e-commerce, *Applied Soft Computing*, Vol. 78, hal. 182–195.
- [12] Jiang, Y., Liu, H., dan Chen, X., 2022, Deep reinforcement learning enhanced genetic algorithm for VRPTW in urban e-commerce logistics, *Expert Systems with Applications*, Vol. 196, hal. 116654.
- [13] Yulianto, T., Hidayat, A., dan Kurniawan, R., 2022, Optimasi rute distribusi UMKM menggunakan Genetic Algorithm, *Jurnal Ilmu Teknik dan Komputer*, Vol. 6, No. 2, hal. 112–

- 124.
- [14] Setiawan, D., Prabowo, A., dan Wahyuni, S., 2023, Penerapan Genetic Algorithm dan Simulated Annealing pada VRP distribusi barang, *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, Vol. 22, No. 1, hal. 45–57.
  - [15] Gevaers, R., Van de Voorde, E., dan Vanelslander, T., 2011, Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective, *City Distribution and Urban Freight Transport*, hal. 56–71.
  - [16] Jia, S., Hu, Z., dan Zhang, H., 2020, A dynamic vehicle routing problem with time windows for last mile delivery in e-commerce, *Transportation Research Part E*, Vol. 141, hal. 102000.
  - [17] Prins, C., 2004, A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, Vol. 31, No. 12, hal. 1985–2002.
  - [18] Clarke, G. dan Wright, J. W., 1964, Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations Research*, Vol. 12, No. 4, hal. 568–581.
  - [19] Cohen, J., 1988, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, Ed. 2, Lawrence Erlbaum, New Jersey.
  - [20] Ropke, S. dan Pisinger, D., 2006, An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows, *Transportation Science*, Vol. 40, No. 4, hal. 455–472.
  - [21] Savelsbergh, M. dan Van Wijk, T., 2016, There is no free lunch, but there is a shared lunch, *Transportation Science*, Vol. 50, No. 4, hal. 1178–1186.
  - [22] Lenstra, J. K. dan Rinnooy Kan, A. H. G., 1981, Complexity of vehicle routing and scheduling problems, *Networks*, Vol. 11, No. 2, hal. 221–227.
  - [23] Goldberg, D. E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Massachusetts.
  - [24] Raharja, I. P., Sulistyorini, R., dan Gunawan, F., 2021, Optimasi Distribusi Logistik E-Commerce menggunakan Algoritma Metaheuristik, *Jurnal Teknik Industri*, Vol. 23, No. 1, hal. 29–40.
  - [25] Purnama, C. M. I., 2020, Model Optimasi Rute Kendaraan untuk Pengiriman Barang di Wilayah Kepulauan, *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*, Vol. 4, No. 2, hal. 88–98.