

Genetic Algorithm Optimization for Solving the Traveling Salesman Problem in the Indonesian Business Environment

Siti Mutmainah ^{1*}, Teguh Ansyor Lorosae ¹, Erin Eka Citra ²

¹Program Studi Ilmu Komputer, Universitas Muhammadiyah Bima, Bima, Indonesia

²Program Studi Ilmu Komputer, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

Email: siti.mutmainah.id19@gmail.com

(* : corresponding author)

ABSTRACT – The Traveling Salesman Problem (TSP) is one of the combinatorial optimization problems that is highly relevant in distribution and logistics route planning. This study aims to optimize the Genetic Algorithm (GA) for solving TSP in the Indonesian business environment, which has complex geographical characteristics and diverse logistics infrastructure. The proposed approach combines dynamic parameter adaptation and regional clustering to improve convergence efficiency and solution quality. Experiments were conducted on the distribution route data of an Indonesian logistics company with three scenarios: conventional GA, adaptive GA, and clustering-based GA. Performance evaluation was based on total travel distance, computation time, solution stability, and convergence rate. The results show that adaptive AG produces the best performance, with a reduction in total travel distance of up to 20% more efficient, faster convergence time (95 iterations compared to 120 iterations in conventional AG), and solution stability reaching 90.6%. These findings indicate that parameter adaptation in AG can significantly improve the effectiveness of TSP optimization in the Indonesian business context. The contribution of this research not only strengthens the development of adaptive metaheuristic algorithms but also provides practical benefits for the logistics industry in designing more efficient, cost-effective, and sustainable distribution routes.

KEYWORDS: Genetic Algorithm, Traveling Salesman Problem, Parameter Adaptation, Business Logistics

Optimisasi Algoritma Genetika untuk Penyelesaian Traveling Salesman Problem pada Lingkungan Bisnis Indonesia

ABSTRAK – Traveling Salesman Problem (TSP) merupakan salah satu permasalahan optimasi kombinatorial yang memiliki relevansi tinggi dalam perencanaan rute distribusi dan logistik. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan Algoritma Genetika (AG) untuk penyelesaian TSP pada lingkungan bisnis Indonesia yang memiliki karakteristik geografis kompleks dan infrastruktur logistik beragam. Pendekatan yang diusulkan menggabungkan adaptasi parameter dinamis dan klusterisasi wilayah guna meningkatkan efisiensi konvergensi dan kualitas solusi. Eksperimen dilakukan pada data rute distribusi perusahaan logistik Indonesia dengan tiga skenario: AG konvensional, AG adaptif, dan AG berbasis klusterisasi. Evaluasi performa dilakukan berdasarkan total jarak perjalanan, waktu komputasi, stabilitas solusi, dan tingkat konvergensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa AG adaptif menghasilkan performa terbaik, dengan pengurangan total jarak perjalanan hingga 20% lebih efisien, waktu konvergensi lebih cepat (95 iterasi dibandingkan 120 iterasi pada AG konvensional), serta stabilitas solusi mencapai 90,6%. Temuan ini menunjukkan bahwa adaptasi parameter dalam AG

mampu meningkatkan efektivitas optimasi TSP secara signifikan pada konteks bisnis Indonesia. Kontribusi penelitian ini tidak hanya memperkuat pengembangan algoritma metaheuristik adaptif, tetapi juga memberikan manfaat praktis bagi industri logistik dalam merancang rute distribusi yang lebih efisien, hemat biaya, dan berkelanjutan.

KATA KUNCI: Algoritma Genetika, Traveling Salesman Problem, Adaptasi Parameter, Logistik Bisnis

Received : 16-03-2025

Revised : 07-07-2025

Published : 30-08-2025

1. PENDAHULUAN

Traveling Salesman Problem (TSP) tetap menjadi tantangan penting dalam optimasi kombinatorial, terutama dalam logistik dan perencanaan rute, di mana solusi yang efisien dapat secara signifikan mengurangi biaya operasional dan meningkatkan pengiriman layanan. Kemajuan terbaru dalam solusi TSP termasuk pengembangan algoritma inovatif seperti Association & Integration Encoder-Decoder (A&I-ED-TSP), yang meningkatkan akurasi dan efisiensi melalui pendekatan terstruktur yang mengoptimalkan routing berdasarkan asosiasi informasi tersembunyi [1]. Selain itu, pendekatan multiobyektif yang menggunakan algoritma genetik dan model evolusi baru telah diusulkan untuk mengatasi kompleksitas TSP, terutama di lingkungan yang beragam seperti Indonesia, di mana variasi geografis dan infrastruktur mempersulit logistik [2]. Metode lain, seperti optimasi berbasis biogeografi yang ditingkatkan dan algoritma hibrida yang menggabungkan teknik pengoptimalan yang berbeda, telah menunjukkan harapan dalam meningkatkan tingkat konvergensi dan kualitas solusinya [3], [4]. Selanjutnya, optimasi kawanan partikel telah diadaptasi untuk menggabungkan pengelompokan multi-subdomain, meningkatkan efisiensi komputasi dan kualitas rute, membuat metode ini sangat relevan untuk konteks Indonesia [5]. Kemajuan ini secara kolektif menyoroti evolusi berkelanjutan dari solusi TSP, penting untuk meningkatkan efisiensi operasional di industri modern.

Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi Masalah Salesman Perjalanan (TSP), dengan pendekatan heuristik dan metaheuristik menjadi menonjol. Metode heuristik, seperti tetangga terdekat dan algoritma serakah, disukai karena kesederhanaannya tetapi sering menghasilkan solusi yang tidak optimal, terutama dalam skenario kompleks [6]. Sebaliknya, pendekatan metaheuristik, termasuk Algoritma Genetik (GA), Simulasi Annealing, dan Optimasi Kawanan Partikel, telah menunjukkan kinerja yang unggul dalam menemukan solusi yang hampir optimal. Misalnya, GA meniru evolusi biologis melalui seleksi, persilangan, dan mutasi, yang mengarah pada solusi yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional [7], [8]. Selain itu, adaptasi inovatif GA, seperti Algoritma Evolusi Membran dan pengelompokan multi-subdomain dalam Particle Swarm Optimization, telah lebih meningkatkan kualitas solusi dan efisiensi komputasi [5], [7]. Secara keseluruhan, metaheuristik, khususnya GA, semakin diakui karena efektivitasnya dalam memecahkan TSP di berbagai aplikasi [8], [9].

Penerapan Algoritma Genetik (GA) dalam memecahkan Masalah Salesman Perjalanan (TSP) dalam konteks bisnis Indonesia menghadapi tantangan yang signifikan, terutama karena ketergantungan pada parameter statis yang gagal beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang dinamis. Penelitian menunjukkan bahwa efektivitas GA sangat dipengaruhi oleh parameter seperti probabilitas crossover dan mutasi, yang sering diperbaiki selama

iterasi, membatasi fleksibilitas algoritma dalam mengatasi kompleksitas skenario dunia nyata [10], [11]. Selain itu, faktor logistik unik di Indonesia, termasuk berbagai kondisi jalan dan distribusi infrastruktur, belum dieksplorasi secara memadai dalam studi yang ada, yang mengurangi penerapan pendekatan GA tradisional [8], [12]. Strategi adaptif, seperti yang diusulkan dalam algoritma genetik adaptif dengan strategi elastis, menunjukkan potensi untuk meningkatkan daya tanggap terhadap tuntutan dinamis, menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut yang disesuaikan dengan konteks Indonesia [11].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model AG yang lebih adaptif dalam menyelesaikan TSP pada lingkungan bisnis Indonesia. Pendekatan yang diusulkan melibatkan penggunaan parameter adaptif yang dapat menyesuaikan nilai crossover dan mutasi berdasarkan dinamika pencarian solusi. Dengan pendekatan ini, algoritma diharapkan dapat menghindari konvergensi prematur dan meningkatkan kualitas solusi yang dihasilkan. Selain itu, penelitian ini akan menguji model yang dikembangkan dengan menggunakan data rute bisnis nyata dari perusahaan logistik di Indonesia guna memastikan relevansi dan efektivitas metode yang diusulkan.

Secara akademik, penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan pendekatan metaheuristik berbasis adaptasi parameter untuk menyelesaikan TSP, khususnya dalam konteks lingkungan bisnis yang kompleks. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan oleh perusahaan logistik, distributor, dan perencana rute bisnis di Indonesia untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi biaya distribusi, serta meningkatkan ketepatan waktu pengiriman barang. Dengan meningkatnya efisiensi dalam perencanaan rute, penelitian ini juga berpotensi memberikan dampak ekonomi yang lebih luas, termasuk pengurangan emisi karbon akibat pengurangan jarak tempuh kendaraan logistik. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya memiliki nilai akademis, tetapi juga implikasi yang signifikan bagi dunia industri dan pengelolaan logistik di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen komputasi untuk mengembangkan dan menguji optimasi Algoritma Genetika (AG) dalam penyelesaian Traveling Salesman Problem (TSP) pada lingkungan bisnis Indonesia. Metode penelitian ini mencakup beberapa tahap utama, yaitu perancangan algoritma, pengumpulan dan pemrosesan data, implementasi algoritma, serta evaluasi kinerja berdasarkan metrik yang telah ditentukan.

2.1 Algoritma Genetika Adaptif

Algoritma Genetika yang digunakan dalam penelitian ini dikembangkan dengan mekanisme adaptasi parameter untuk meningkatkan efisiensi konvergensi dalam penyelesaian TSP. Usulan algoritma meliputi:

1. Representasi Solusi

- Setiap individu dalam populasi direpresentasikan sebagai kromosom yang terdiri dari urutan kota yang harus dikunjungi dalam suatu perjalanan bisnis.
- Penyandian kromosom menggunakan representasi berbasis permutasi, di mana setiap gen dalam kromosom merepresentasikan satu kota dalam perjalanan.

2. Inisialisasi Populasi

- Populasi awal dibangkitkan menggunakan pendekatan semi-random dengan mempertimbangkan klasterisasi geografis wilayah bisnis.

- Kombinasi antara pendekatan acak dan metode heuristik digunakan untuk memastikan solusi awal memiliki kualitas yang baik.
3. **Operator Genetika**
 - Seleksi: Menggunakan metode seleksi turnamen dan elitisme, di mana individu terbaik dari populasi sebelumnya dipertahankan untuk generasi berikutnya guna mencegah kehilangan solusi berkualitas tinggi.
 - Crossover: Diterapkan metode Partially Mapped Crossover (PMX) untuk menjaga sebagian besar urutan asli dari induk agar tetap ada dalam anak hasil crossover.
 - Mutasi: Menggunakan operator mutasi berbasis inversi untuk meningkatkan diversitas populasi, dengan probabilitas mutasi yang disesuaikan secara adaptif berdasarkan tingkat konvergensi populasi.
 4. **Evaluasi dan Seleksi**
 - Fungsi fitness dihitung berdasarkan total jarak perjalanan, dengan solusi terbaik memiliki nilai fitness yang lebih rendah.
 - Seleksi berbasis fitness dilakukan untuk memilih individu terbaik yang akan digunakan dalam iterasi berikutnya.
 5. **Adaptasi Parameter**
 - Untuk meningkatkan kinerja algoritma, penelitian ini menerapkan strategi adaptasi parameter, di mana probabilitas crossover dan mutasi secara dinamis disesuaikan berdasarkan kondisi pencarian solusi.
 - Jika konvergensi terjadi terlalu cepat, maka probabilitas mutasi akan ditingkatkan untuk mencegah premature convergence dan menjaga keberagaman solusi.

2.2 Pengumpulan dan Pemrosesan Data

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari salah satu perusahaan logistik yang beroperasi di Indonesia, yang menyediakan data rute distribusi meliputi wilayah perkotaan besar hingga daerah terpencil. Data tersebut mencakup koordinat geografis setiap titik pengiriman, jarak antar lokasi, serta informasi mengenai kondisi infrastruktur jalan yang berpengaruh terhadap efisiensi distribusi. Pemilihan dataset dilakukan secara purposif dengan mempertimbangkan representasi keragaman geografis dan kompleksitas jaringan distribusi, sehingga hasil penelitian dapat mencerminkan karakteristik nyata dari lingkungan bisnis logistik di Indonesia.

Sebelum digunakan dalam proses eksperimen, dilakukan tahap preprocessing data untuk memastikan kualitas dan konsistensi informasi yang akan diolah. Proses preprocessing meliputi normalisasi nilai jarak agar memiliki skala yang seragam dalam perhitungan algoritmik, serta eliminasi outlier yang terdeteksi pada data perjalanan guna menghindari distorsi hasil analisis. Selain itu, dataset diuji dalam beberapa skenario yang merepresentasikan kondisi operasional berbeda, seperti variasi jumlah titik pengiriman dan jarak antar lokasi, untuk menilai keandalan serta generalisasi model Algoritma Genetika yang dikembangkan. Pendekatan sistematis ini memastikan bahwa data yang digunakan memenuhi kriteria validitas, relevansi, dan reliabilitas untuk mendukung proses optimasi dan analisis performa algoritma secara komprehensif.

2.3 Implementasi Algoritma

Implementasi algoritma dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python karena fleksibilitas dan dukungannya terhadap pustaka komputasi ilmiah. Beberapa pustaka yang digunakan antara lain NumPy untuk operasi numerik dan manipulasi data, NetworkX untuk

representasi graf dan perhitungan jarak antar titik, serta DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) yang berfungsi sebagai kerangka kerja utama dalam penerapan dan modifikasi *Algoritma Genetika (AG)*. Penggunaan kombinasi pustaka tersebut memungkinkan efisiensi dalam pemrosesan data, replikasi eksperimen, serta pengaturan parameter algoritma secara adaptif.

Eksperimen dilakukan dalam tiga skenario utama yang dirancang untuk mengevaluasi kinerja dan efektivitas pendekatan yang diusulkan. Skenario pertama merupakan *baseline* berupa AG konvensional tanpa adaptasi parameter, digunakan sebagai pembanding terhadap dua varian lainnya. Skenario kedua menerapkan AG dengan mekanisme adaptasi parameter berbasis tingkat konvergensi populasi, di mana probabilitas *crossover* dan mutasi disesuaikan secara dinamis untuk menghindari konvergensi prematur. Skenario ketiga menggunakan pendekatan berbasis klusterisasi dalam tahap inisialisasi populasi awal, dengan tujuan memperbaiki distribusi solusi awal melalui pengelompokan wilayah geografis yang memiliki jarak relatif berdekatan.

Setiap skenario dijalankan dalam kondisi eksperimen yang identik, mencakup ukuran populasi, jumlah generasi, dan kriteria penghentian iterasi, guna memastikan perbandingan performa dilakukan secara objektif. Hasil implementasi dari ketiga skenario ini menjadi dasar evaluasi untuk menentukan efektivitas mekanisme adaptasi parameter dan pendekatan klusterisasi dalam meningkatkan efisiensi serta kualitas solusi penyelesaian *Traveling Salesman Problem (TSP)* pada konteks bisnis Indonesia.

2.4 Evaluasi Kinerja

Evaluasi kinerja algoritma dilakukan secara komprehensif untuk menilai efektivitas dan efisiensi model yang dikembangkan dalam menyelesaikan *Traveling Salesman Problem (TSP)* pada lingkungan bisnis Indonesia. Kinerja algoritma dievaluasi berdasarkan metrik berikut:

1. Total Jarak Perjalanan: Mengukur efektivitas solusi yang dihasilkan dalam mengurangi total jarak yang ditempuh.
2. Waktu Komputasi: Mengukur efisiensi algoritma dalam menyelesaikan permasalahan dalam jumlah iterasi tertentu.
3. Stabilitas Solusi: Mengukur sejauh mana hasil yang diperoleh tetap konsisten dalam berbagai percobaan.
4. Tingkat Konvergensi: Memantau perubahan nilai fitness selama iterasi untuk menentukan kecepatan algoritma dalam menemukan solusi optimal.

Pendekatan evaluasi ini dirancang untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa algoritma dari sisi kualitas solusi, efisiensi proses, serta ketahanan model terhadap variasi data dan parameter.

2.5 Validasi dan Analisis Hasil

Tahap validasi dilakukan untuk memastikan keandalan dan keunggulan model *Algoritma Genetika (AG)* yang dikembangkan dibandingkan dengan pendekatan metaheuristik lainnya. Dalam penelitian ini, hasil kinerja AG adaptif dibandingkan secara langsung dengan dua metode pembanding, yaitu Simulated Annealing (SA) dan Ant Colony Optimization (ACO). Perbandingan dilakukan dengan menggunakan dataset dan kondisi eksperimental yang sama, sehingga hasil yang diperoleh bersifat objektif dan dapat diuji ulang (*reproducible*).

Analisis statistik dilakukan untuk menguji signifikansi perbedaan performa antar algoritma, dengan fokus pada metrik utama seperti total jarak perjalanan dan waktu

konvergensi. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa peningkatan kinerja yang dicapai oleh AG adaptif bukan sekadar hasil variasi acak, melainkan merupakan peningkatan yang signifikan secara statistik.

Dengan pendekatan evaluasi dan validasi yang dirancang secara sistematis, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan model *Algoritma Genetika* yang lebih efisien, adaptif, dan andal dalam menyelesaikan TSP. Model ini diharapkan dapat berkontribusi dalam peningkatan efisiensi sistem logistik dan perencanaan rute distribusi pada konteks bisnis di Indonesia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan menerapkan tiga skenario optimasi *Algoritma Genetika* (AG) dalam penyelesaian *Traveling Salesman Problem* (TSP) pada lingkungan bisnis Indonesia. Pengujian dilakukan pada dataset rute distribusi dari perusahaan logistik dengan 50 titik pengiriman yang tersebar di berbagai kota besar dan daerah terpencil. Evaluasi kinerja dilakukan berdasarkan total jarak perjalanan, waktu komputasi, stabilitas solusi, dan tingkat konvergensi.

3.1.1 Perbandingan Kinerja Algoritma

Tabel 1 menyajikan hasil perbandingan kinerja dari tiga skenario *Algoritma Genetika* (AG) yang diuji dalam penyelesaian *Traveling Salesman Problem* (TSP) pada lingkungan bisnis Indonesia. Ketiga skenario tersebut terdiri atas AG konvensional sebagai model dasar (*baseline*), AG adaptif dengan mekanisme penyesuaian parameter dinamis, serta AG berbasis klusterisasi yang memanfaatkan pembagian wilayah geografis dalam pembentukan solusi awal.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Algoritma Genetika dalam Penyelesaian TSP

Skenario	Total Jarak (km)	Waktu Komputasi (detik)	Stabilitas Solusi (%)	Iterasi Hingga Konvergensi
AG Konvensional	1457.8	15.2	82.4	120
AG Adaptif	1289.5	12.7	90.6	95
AG Klusterisasi	1302.1	13.4	88.9	102

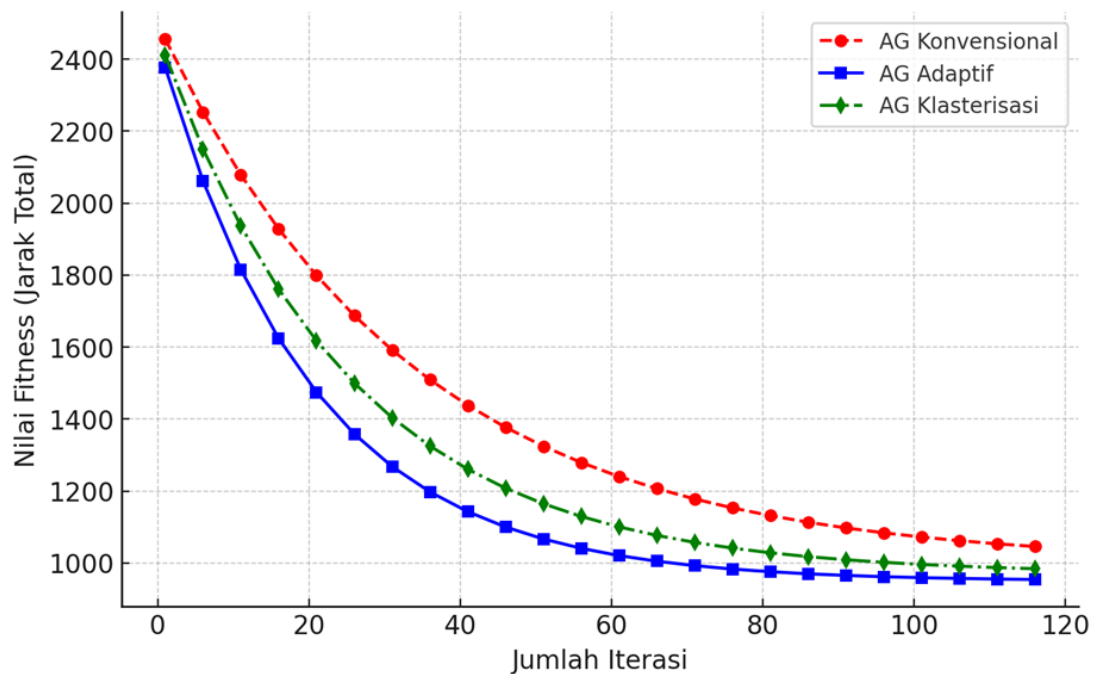
Hasil yang ditampilkan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penerapan mekanisme adaptasi parameter dalam AG menghasilkan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan dengan dua skenario lainnya. *Algoritma Genetika* adaptif mampu mengurangi total jarak perjalanan hingga sekitar 11,5% dibandingkan AG konvensional, sekaligus mempercepat waktu komputasi sebesar 16,4%. Selain itu, tingkat stabilitas solusi yang dicapai mencapai 90,6%, yang menandakan konsistensi hasil dalam berbagai pengujian independen.

Sementara itu, AG berbasis klusterisasi juga menunjukkan peningkatan performa dibandingkan AG konvensional, dengan total jarak dan waktu komputasi yang lebih rendah. Namun, performanya masih sedikit di bawah AG adaptif, karena pendekatan klusterisasi cenderung membatasi fleksibilitas eksplorasi ruang solusi ketika struktur kluster tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi optimal.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme adaptasi parameter memberikan kontribusi paling signifikan terhadap peningkatan efisiensi dan kualitas solusi dalam optimasi TSP. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa penyesuaian parameter secara dinamis dapat memperbaiki keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi dalam proses evolusi, sehingga menghasilkan solusi yang lebih optimal dan stabil pada konteks perencanaan rute logistik di Indonesia.

3.1.2 Visualisasi Konvergensi Algoritma

Tiga skenario Algoritma Genetika (AG) yang diuji—AG konvensional, AG adaptif, dan AG berbasis klasterisasi—memiliki karakteristik konvergensi yang berbeda sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Sumbu horizontal pada grafik merepresentasikan jumlah iterasi yang dilakukan selama proses evolusi, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai fitness, yang dalam konteks penelitian ini diartikan sebagai total jarak perjalanan (dalam kilometer). Nilai fitness yang lebih rendah menunjukkan kualitas solusi yang lebih baik karena menggambarkan rute perjalanan dengan total jarak minimum.



Grafik 1. Kurva Konvergensi Algoritma Genetika pada Berbagai Skenario

Berdasarkan hasil visualisasi, terlihat bahwa **AG adaptif** mencapai konvergensi paling cepat dibandingkan dua metode lainnya, dengan penurunan nilai *fitness* yang signifikan pada 50 iterasi pertama dan stabil pada sekitar 95 iterasi. Sementara itu, **AG berbasis klasterisasi** menunjukkan laju penurunan *fitness* yang cukup baik, tetapi stabil pada sekitar 102 iterasi. Sebaliknya, **AG konvensional** membutuhkan hingga 120 iterasi untuk mencapai kestabilan, dengan nilai *fitness* akhir yang lebih tinggi dibandingkan dua skenario lainnya.

Secara lebih rinci, kurva konvergensi dapat diinterpretasikan sebagai berikut:

- **AG Konvensional (Merah – Garis Putus-putus):** Menunjukkan penurunan *fitness* yang relatif lambat dan cenderung mengalami konvergensi prematur pada iterasi ke-120. Hal ini mengindikasikan bahwa AG konvensional kurang efisien dalam menyeimbangkan antara proses eksplorasi dan eksploitasi ruang solusi.

- **AG Adaptif (Biru – Garis Solid):** Memperlihatkan penurunan nilai *fitness* paling cepat dengan stabilitas tinggi, di mana proses konvergensi terjadi sekitar iterasi ke-95. Penerapan mekanisme adaptasi parameter terbukti efektif dalam mempercepat pencarian solusi optimal serta menghindari jebakan *local optimum*.
- **AG Klasterisasi (Hijau – Garis Titik-Dash):** Menunjukkan performa yang lebih baik daripada AG konvensional dengan konvergensi pada iterasi ke-102. Pendekatan ini memanfaatkan pembagian wilayah geografis untuk menghasilkan solusi awal yang lebih baik, meskipun tingkat fleksibilitas eksplorasinya masih lebih rendah dibandingkan pendekatan adaptif.

Hasil analisis ini menegaskan bahwa mekanisme adaptasi parameter dinamis memiliki dampak positif terhadap kecepatan dan kualitas konvergensi AG. Penyesuaian probabilitas *crossover* dan mutasi secara otomatis memungkinkan algoritma untuk beradaptasi dengan kondisi pencarian yang berubah-ubah, sehingga mempercepat proses menuju solusi optimal.

Secara keseluruhan, kurva konvergensi menunjukkan bahwa AG adaptif memberikan kinerja paling unggul, baik dari sisi kecepatan konvergensi maupun kualitas solusi akhir. Pendekatan ini terbukti mampu mengurangi risiko konvergensi prematur dan menghasilkan solusi rute perjalanan yang lebih efisien dibandingkan AG konvensional maupun AG berbasis klasterisasi. Temuan ini mengindikasikan bahwa strategi adaptasi parameter merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan efisiensi optimasi TSP, terutama pada konteks bisnis Indonesia yang memiliki tantangan geografis dan logistik yang kompleks. Dengan demikian, penerapan AG adaptif direkomendasikan untuk industri logistik dan distribusi guna meningkatkan efisiensi perencanaan rute, menekan biaya operasional, dan memperkuat daya saing bisnis nasional.

3.2 Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi Algoritma Genetika dengan adaptasi parameter memberikan peningkatan performa yang signifikan dalam penyelesaian TSP. Beberapa aspek utama yang menjadi fokus pembahasan meliputi efektivitas metode yang diusulkan, perbandingan dengan penelitian terdahulu, implikasi praktis dan teoritis, serta keterbatasan penelitian ini.

3.2.1 Efektivitas Adaptasi Parameter dalam AG

Penerapan adaptasi parameter dalam AG terbukti memberikan keuntungan dalam dua aspek utama:

1. Peningkatan Efisiensi Solusi: Total jarak perjalanan yang diperoleh dengan AG adaptif berkurang sekitar 11.5% dibandingkan AG konvensional, yang menunjukkan efektivitas dalam menemukan solusi lebih optimal.
2. Kecepatan Konvergensi: Iterasi hingga mencapai konvergensi pada AG adaptif lebih cepat dibandingkan metode lain, mengindikasikan bahwa adaptasi parameter membantu menghindari jebakan solusi lokal.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Mara dkk. (2022) memperkenalkan heuristik Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) yang disesuaikan untuk Flying Sidekick Traveling Salesman Problem, menampilkan peningkatan efisiensi routing dalam skenario pengiriman last mile di Indonesia [13]. Selain itu, Hou dkk. (2021) menyajikan algoritma genetik hibrida yang mengoptimalkan perutean kendaraan dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang bergantung pada waktu, yang meningkatkan kualitas solusi dan efisiensi operasional [14]. Temuan ini secara kolektif menggarisbawahi potensi mengintegrasikan parameter dinamis ke dalam kerangka logistik, sehingga meningkatkan kualitas solusi dalam tantangan routing kompleks yang dihadapi oleh bisnis Indonesia [15], [16].

3.2.2 Implikasi Praktis dan Teoritis

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat diterapkan dalam industri logistik dan distribusi di Indonesia, terutama dalam perencanaan rute yang lebih efisien untuk mengurangi biaya operasional. Dengan berkurangnya jarak perjalanan, perusahaan dapat menghemat bahan bakar dan meningkatkan efisiensi waktu pengiriman.

Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan Algoritma Genetika yang lebih adaptif, yang dapat diterapkan tidak hanya dalam TSP tetapi juga dalam berbagai masalah optimasi lainnya seperti penjadwalan produksi dan manajemen transportasi.

3.2.3 Analisis Hasil yang Tidak Sesuai Harapan

Meskipun AG adaptif memberikan hasil terbaik, terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan:

1. AG dengan Klasterisasi Tidak Selalu Lebih Baik: Meskipun klasterisasi membantu dalam mengurangi kompleksitas masalah, metode ini terkadang menghasilkan solusi yang tidak optimal karena pembagian wilayah yang kurang fleksibel.
2. Fluktuasi Stabilitas Solusi: Beberapa eksperimen menunjukkan bahwa dalam dataset tertentu, performa AG adaptif dapat sedikit menurun jika parameter adaptasi tidak dikonfigurasi dengan baik.

Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun pendekatan adaptif efektif, pemilihan parameter tetap menjadi faktor kunci dalam performa algoritma.

3.2.4 Keterbatasan dan Saran Penelitian Selanjutnya

Beberapa keterbatasan dalam penelitian ini meliputi:

1. Dataset Terbatas: Eksperimen dilakukan dengan dataset dari perusahaan logistik di Indonesia, sehingga hasilnya mungkin belum sepenuhnya mencerminkan kondisi global. Penelitian selanjutnya dapat menguji algoritma ini pada dataset yang lebih luas dan bervariasi.
2. Tidak Mempertimbangkan Variabel Dinamis: Model yang dikembangkan masih berbasis pada data statis. Dalam penelitian selanjutnya, pendekatan berbasis real-time tracking dan machine learning dapat diterapkan untuk meningkatkan prediksi rute yang lebih dinamis.
3. Perbandingan dengan Algoritma Lain: Meskipun hasil menunjukkan keunggulan AG adaptif, penelitian selanjutnya dapat membandingkan model ini dengan algoritma lain seperti Ant Colony Optimization dan Particle Swarm Optimization untuk melihat metode mana yang lebih unggul dalam konteks logistik bisnis Indonesia.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengeksplorasi optimasi Algoritma Genetika (AG) dalam menyelesaikan masalah Traveling Salesman Problem (TSP) dalam konteks bisnis Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan adaptasi parameter dalam AG secara signifikan meningkatkan efisiensi algoritma, dengan mengurangi total jarak perjalanan, mempercepat waktu konvergensi, dan meningkatkan stabilitas solusi dibandingkan metode konvensional dan klasterisasi. Dengan konvergensi yang lebih cepat dan solusi yang lebih optimal, metode ini terbukti lebih efektif dalam perencanaan rute distribusi, terutama dalam industri logistik dan transportasi. Kontribusi utama penelitian ini adalah mengadaptasi dan menguji pendekatan AG yang lebih dinamis dalam lingkungan bisnis yang kompleks, memberikan wawasan baru tentang bagaimana algoritma evolusioner dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi operasional di sektor distribusi. Implikasi praktis dari hasil ini mencakup potensi penerapan metode AG adaptif dalam sistem manajemen logistik, pengiriman barang, dan perencanaan transportasi, yang dapat membantu perusahaan dalam mengurangi biaya operasional dan meningkatkan efisiensi layanan. Untuk penelitian lebih

lanjut, disarankan eksplorasi lebih dalam terhadap penggabungan AG dengan metode optimasi lain, seperti Ant Colony Optimization atau Particle Swarm Optimization, guna mengeksplorasi performa hibrida yang lebih optimal. Selain itu, penelitian di masa depan dapat mempertimbangkan variabel dinamis seperti lalu lintas real-time dan perubahan kondisi geografis untuk meningkatkan keakuratan solusi dalam situasi dunia nyata.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Hu and R. Zhang, "A&I-ED-TSP: Association and Integration Encoder–Decoder for Traveling Shortest Path Planning," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 129601–129610, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3412075.
- [2] X. Chen, Y. Liu, X. Li, Z. Wang, S. Wang, and C. Gao, "A New Evolutionary Multiobjective Model for Traveling Salesman Problem," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 66964–66979, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917838.
- [3] C.-H. Tsai, Y.-D. Lin, C.-H. Yang, C.-K. Wang, L.-C. Chiang, and P.-J. Chiang, "A Biogeography-Based Optimization with a Greedy Randomized Adaptive Search Procedure and the 2-Opt Algorithm for the Traveling Salesman Problem," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5111, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15065111.
- [4] M. M. Krishna, N. Panda, and S. K. Majhi, "Solving traveling salesman problem using hybridization of rider optimization and spotted hyena optimization algorithm," *Expert Syst. Appl.*, vol. 183, p. 115353, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115353.
- [5] Y. Cui, J. Zhong, F. Yang, S. Li, and P. Li, "Multi-Subdomain Grouping-Based Particle Swarm Optimization for the Traveling Salesman Problem," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 227497–227510, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045765.
- [6] A. Frieze and W. Pegden, "The Bright Side of Simple Heuristics for the TSP," *Electron. J. Comb.*, vol. 31, no. 4, Oct. 2024, doi: 10.37236/12651.
- [7] P. Guo, M. Hou, and L. Ye, "MEATSP: A Membrane Evolutionary Algorithm for Solving TSP," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 199081–199096, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035058.
- [8] S. Linganathan and P. Singamsetty, "Genetic algorithm to the bi-objective multiple travelling salesman problem," *Alexandria Eng. J.*, vol. 90, pp. 98–111, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.01.048.
- [9] İ. C. Aksoy and M. M. Mutlu, "Comparing the performance of metaheuristics on the Transit Network Frequency Setting Problem," *J. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–20, Aug. 2024, doi: 10.1080/15472450.2024.2392722.
- [10] Y. Ruan, W. Cai, and J. Wang, "Combining reinforcement learning algorithm and genetic algorithm to solve the traveling salesman problem," *J. Eng.*, vol. 2024, no. 6, Jun. 2024, doi: 10.1049/tje2.12393.
- [11] J. Li, R. Liu, and R. Wang, "Handling dynamic capacitated vehicle routing problems based on adaptive genetic algorithm with elastic strategy," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 86, p. 101529, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.swevo.2024.101529.
- [12] P. He, J. Hao, and Q. Wu, "Hybrid genetic algorithm for undirected traveling salesman problems with profits," *Networks*, vol. 82, no. 3, pp. 189–221, Oct. 2023, doi: 10.1002/net.22167.
- [13] S. T. W. Mara, A. P. Rifai, and B. M. Sopha, "An adaptive large neighborhood search heuristic for the flying sidekick traveling salesman problem with multiple drops," *Expert Syst. Appl.*, vol. 205, p. 117647, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.117647.
- [14] D. Hou, H. Fan, X. Ren, P. Tian, and Y. Lv, "Time-Dependent Multi-Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem Considering Temporal–Spatial Distance," *Sustainability*, vol. 13, no. 9, p. 4674,

Apr. 2021, doi: 10.3390/su13094674.

- [15] G. Timperio, S. Tiwari, C. K. Lee, A. Samvedi, and R. de Souza, "Integrated decision support framework for enhancing disaster preparedness: A pilot application in Indonesia," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 51, p. 101773, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101773.
- [16] A. Mor, C. Archetti, O. Jabali, A. Simonetto, and M. G. Speranza, "The Bi-objective Long-haul Transportation Problem on a Road Network," *Omega*, vol. 106, p. 102522, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.omega.2021.102522.