

Optimasi Rute Travelling Salesman Problem pada 49 Kota di Inggris menggunakan Memetic Genetic Algorithm

Catherine Stevani^{*1}, Fitri Maya Puspita², Sisca Octarina³

^{1,2,3} Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
Jalan Palembang-Prabumulih, KM 32 Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan, Indonesia (30662)
catherinestevanii@gmail.com

Abstrak. Penentuan rute perjalanan yang efisien menjadi tantangan penting dalam berbagai sistem logistik, terutama ketika jumlah lokasi yang harus dikunjungi semakin besar. Traveling Salesman Problem telah lama digunakan sebagai model dasar untuk permasalahan tersebut, namun sifatnya yang berskala NP-hard membuat metode eksak kurang efektif pada dataset berukuran menengah hingga besar. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan Genetic Algorithm yang dipadukan dengan teknik local search 2-opt untuk meningkatkan kualitas solusi. Dataset yang digunakan terdiri dari 49 kota di Inggris, dengan jarak antar kota dihitung menggunakan Euclidean Distance. Dua konfigurasi diuji, yaitu Genetic Algorithm Normal dengan local search menyeluruh dan Genetic Algorithm Cepat dengan mekanisme perbaikan minimal. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa Genetic Algorithm Normal mampu menghasilkan rute yang lebih optimal dengan jarak terpendek sekitar 305,004, meskipun waktu komputasinya lebih lama dibandingkan Genetic Algorithm Cepat. Sementara itu, Genetic Algorithm Cepat memberikan hasil yang kurang optimal yaitu sekitar 312,630, namun dengan waktu pemrosesan jauh lebih singkat. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi local search dalam Genetic Algorithm memberikan peningkatan signifikan pada kualitas rute, dan pemilihan konfigurasi bergantung pada kebutuhan—apakah mengutamakan kualitas solusi atau efisiensi waktu komputasi.

Kata Kunci : Algoritma Genetika, Travelling Salesman Problem, Local Search 2-opt

Abstract. Determining efficient travel routes is a significant challenge in various logistics systems, especially when the number of locations to be visited increases. The Travelling Salesman Problem has long been used as a basic model for this problem, but its NP-hard nature makes exact methods less effective on medium to large datasets. This study explores the use of Genetic Algorithm combined with the 2-opt local search technique to improve solution quality. The dataset used consists of 49 cities in the United Kingdom, with distances between cities calculated using Euclidean Distance. Two configurations were tested, namely Normal Genetic Algorithm with comprehensive local search and Fast Genetic Algorithm with a minimal improvement mechanism. The experimental results show that Normal Genetic Algorithm is capable of producing a more optimal route with the shortest distance of around 305,004, although the computation time is longer than Fast Genetic Algorithm. Meanwhile, Fast Genetic Algorithm provides a less optimal result of around 312,630, but with a much shorter processing time. These findings confirm that the integration of local search in Genetic Algorithm provides a significant improvement in route quality, and the choice of configuration depends on the requirements—whether to prioritise solution quality or computational time efficiency.

Keyword : Genetic Algorithm, Travelling Salesman Problem, Local Search 2-opt

PENDAHULUAN

Efisiensi rute perjalanan merupakan isu krusial dalam sistem logistik, transportasi, serta perencanaan pelayanan publik. Terutama pada wilayah dengan sebaran yang luas dan memiliki banyak titik lokasi yang harus dikunjungi. Pemilihan rute yang tidak optimal akan menyebabkan kerugian signifikan di berbagai bidang, mulai dari peningkatan biaya operasional, waktu tempuh, hingga peningkatan emisi karbon [1]. Kondisi tersebut mempertegas pentingnya optimasi dalam perencanaan rute agar proses mobilitas dan distribusi dapat berjalan lebih efisien dan hemat energi.

Berbagai pendekatan matematis dan komputasional dikembangkan untuk menjawab tantangan tersebut, salah satunya *Travelling Salesman Problem* (TSP). Pada dasarnya, pokok permasalahan TSP adalah rute mana yang harus diambil *salesman* untuk mengunjungi beberapa kota yang diketahui



jaraknya dan hanya boleh dilalui sekali dengan rute terpendek [2]. TSP termasuk kategori *NP-hard*, sehingga tingkat kerumitannya akan naik secara drastis seiring bertambahnya lokasi tujuan sehingga metode eksak tidak efisien pada skala menengah hingga besar, sehingga para peneliti dan praktisi banyak beralih pada penggunaan metode heuristik dan metaheuristik yang lebih adaptif.

Kebutuhan terhadap metode optimasi yang mampu memberikan solusi mendekati optimal dalam waktu komputasi yang terbatas semakin mendesak, terutama pada aplikasi nyata seperti perencanaan distribusi barang, penentuan rute layanan publik, manajemen armada transportasi, serta penyusunan *itinerary* perjalanan. Pada konteks tersebut, metaheuristik seperti *Genetic Algorithm* (GA) menjadi salah satu metode yang paling populer karena fleksibel dan mampu menjelajahi ruang solusi yang besar [3].

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa GA Normal sering mengalami stagnasi akibat kurangnya mekanisme eksploitasi lokal yang efektif [4]. Hal ini menyebabkan kualitas solusi berhenti membaik meskipun iterasi terus bertambah. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan hybrid kemudian dikembangkan melalui penggabungan GA dengan teknik *local search*, yang dikenal sebagai *Memetic Genetic Algorithm* (MGA) [5]. MGA memanfaatkan kemampuan eksplorasi GA dan memperkuatnya dengan prosedur perbaikan lokal seperti *2-opt*, sehingga proses pencarian solusi menjadi lebih seimbang antara eksplorasi dan eksploitasi.

Berbagai penelitian terdahulu mendemonstrasikan keunggulan *memetic algorithm* (MA) dibandingkan GA klasik dalam penyelesaian TSP atau variasinya. Ovidiu dan Laura Cosma serta Pop (2024) mengusulkan MA baru dengan prosedur '*chromosome enhancement*' dan *local search* intensif yang terbukti sangat kompetitif pada *generalized TSP* dibandingkan metode GA Normal [6]. Sementara itu, Borna dan Hashemi (2014) mengembangkan GA *hybrid* yang mencakup strategi optimasi lokal tambahan, yaitu reversal segmen dan mutasi ekstra, dan menunjukkan bahwa jaring solusinya secara signifikan lebih baik daripada GA Normal dalam *benchmark TSP* [7]. Di sisi lain, El Krari & Ahiod (2019) memperkenalkan MA berbasis *Breakout Local Search* yang menyeimbangkan eksplorasi dan eksploitasi secara efektif, menghasilkan solusi berkualitas dengan waktu komputasi yang lebih rendah pada instance GTSP [8]. Semua studi tersebut menekankan bahwa tambahan *local search* dalam kerangka populasi (seperti MA) dapat memperbaiki rute secara nyata dibandingkan dengan GA Normal.

Terdapat sejumlah perbedaan substansial antara penelitian-penelitian sebelumnya dan penelitian ini. Sebagian besar penelitian di atas berfokus pada penggunaan *dataset benchmark* standar atau varian *Generalized TSP*, sedangkan penelitian ini memanfaatkan data 49 kota di Inggris sebagai representasi kasus nyata dengan karakteristik geografis yang beragam. Selain itu, penelitian ini tidak hanya menerapkan *Memetic Algorithm* dengan *local search* *2-opt*, tetapi juga menyertakan dua konfigurasi berbeda, yaitu GA dengan *local search* *2-opt* menyeluruh dan GA Cepat berbasis *local search* *2-opt first-improvement*. Perbandingan kedua pendekatan tersebut memberikan ruang untuk menganalisis keseimbangan antara kualitas solusi dan efisiensi komputasi. Implementasi algoritma juga dirancang dalam alur kerja yang mudah direplikasi, mencakup pemrosesan otomatis data, visualisasi rute, serta eksekusi multi-run, sehingga hasilnya dapat dimanfaatkan dalam konteks praktis pengambilan keputusan logistik. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memperluas wawasan mengenai pemanfaatan MA dalam studi-studi aplikatif dan mendukung pengembangan metode optimasi rute yang lebih efektif.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan komputasional berbasis optimisasi metaheuristik untuk menemukan rute terbaik pada permasalahan *Traveling Salesman Problem* (TSP). Proses penelitian berfokus pada implementasi *Genetic Algorithm* (GA) yang dipadukan dengan teknik *local search 2-opt* sebagai mekanisme eksploitasi. Studi dilakukan secara eksperimental dengan



melakukan eksekusi berulang, pengamatan perilaku konvergensi, serta evaluasi kualitas solusi.

Data yang digunakan pada penelitian ini didapat dari *website* Kaggle, yaitu dari *dataset* bernama ‘Travelling Salesman Problem: 49 UK Cities.’ (<https://www.kaggle.com/datasets/patricklford/travelling-salesman-problem>). *Dataset* tersebut berisi nama-nama kota di Inggris, populasi, serta titik koordinatnya yang direpresentasikan dalam sistem kartesian dua dimensi. Kemudian, jarak antar kota akan dihitung menggunakan Euclidean Distance seperti yang dituliskan pada Persamaan (1) [9]:

$$d(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

Koordinat kota i dinyatakan sebagai (x_i, y_i) , koordinat kota j dinyatakan dengan (x_j, y_j) , dan $d(i, j)$ adalah jarak antara kota i dan j . Jarak antar kota ini kemudian disusun menjadi matriks simetris berukuran 49×49 yang akan digunakan sebagai dasar optimasi rute. Sementara, jika diketahui bahwa R adalah rute perjalanan, n adalah jumlah kota, maka total jarak rute atau $D(R)$ adalah Persamaan (2).

$$D(R) = \sum_{k=1}^{n-1} d(r_k, r_{k+1}) + d(r_n, r_1) \quad (2)$$

Setiap kandidat solusi diinisialisasikan sebagai rute kunjungan seluruh kota tanpa pengulangan, yaitu permutasi dari banyak kota yang harus dikunjungi. Maka dari itu, banyak kemungkinan solusi pada penelitian ini adalah $n!$ atau $49!$ sehingga pendekatan *brute-force* tidak efektif untuk digunakan. Atas dasar ini, peneliti menggunakan pendekatan komputasional dengan metode GA untuk mencari rute yang optimal dengan lebih efisien [10].

Proses GA dimulai dengan pemilihan populasi awal yang berisi rute acak, kemudian akan dipilih individu terbaik (elit). Teknik seleksi yang digunakan adalah *tournament selection*, yaitu teknik menyeleksi di mana tiap individu ‘bertanding’ untuk menemukan individu dengan *fitness value* terbaik, individu ini kemudian akan menjadi induk untuk generasi selanjutnya. *Fitness value* pada penelitian ini dihitung berdasarkan kualitas rute, yaitu semakin kecil jaraknya maka akan semakin bagus *fitness value*. Adapun *fitness value* dalam penelitian ini dapat dilihat pada Persamaan (3).

$$F(R) = \frac{1}{D(R)} \quad (3)$$

Operator kawin silang yang digunakan pada penelitian ini adalah *ordered crossover (OX)*, yaitu skema *crossover* yang dirancang untuk mempertahankan urutan relatif kota sehingga struktur dasar rute tidak rusak ketika dua individu dikombinasikan. Pendekatan ini penting karena urutan kunjungan kota merupakan elemen utama yang menentukan kualitas solusi pada permasalahan TSP. Selain itu, proses mutasi dilakukan menggunakan *swap mutation*, yaitu teknik yang menukar posisi dua kota dalam suatu rute. Mutasi ini berfungsi menambah variasi genetik dalam populasi tanpa menimbulkan perubahan drastis yang dapat merusak pola rute yang sudah terbentuk. Untuk memastikan kualitas solusi terus meningkat dari generasi ke generasi, penelitian ini juga menerapkan *elitism*, yaitu mekanisme mempertahankan sejumlah individu terbaik sehingga tidak hilang akibat proses evolusi. Individu elit yang dipertahankan tersebut kemudian memperoleh perlakuan tambahan berupa *local improvement* menggunakan algoritma *2-opt*, yang bekerja dengan menghilangkan pola lintasan silang dan memperbaiki struktur rute secara lokal. Kombinasi strategi *crossover*, mutasi, *elitism*, serta perbaikan lokal ini dirancang untuk menciptakan keseimbangan antara eksplorasi ruang solusi yang luas dan eksploitasi intensif terhadap kandidat solusi yang menjanjikan.

Algoritma *local improvement 2-opt* bekerja dengan menukar dua sisi rute (dua segmen) dan



memilih konfigurasi yang meminimalisir jarak total. Selisih jarak pada segmen lama dan baru dapat dihitung seperti pada Persamaan (4).

$$\Delta = [d(a, b) + d(c, d)] - [d(a, c) + d(b, d)] \quad (4)$$

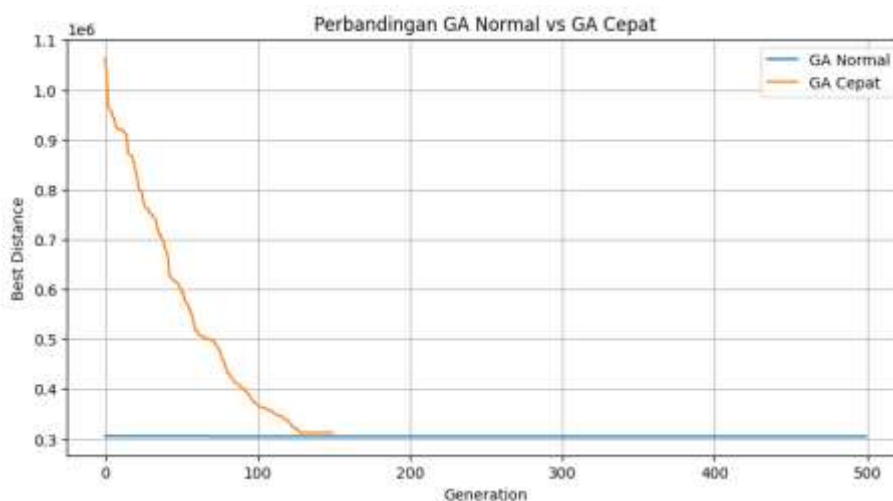
Δ adalah selisih jarak rute awal dan rute setelah pertukaran, sehingga pertukaran hanya akan dilakukan apabila $\Delta > 0$. Pendekatan ini dikenal efektif dalam mengurangi *local tour inefficiencies* dan meningkatkan kualitas solusi yang dihasilkan GA [11]. Melalui kombinasi eksplorasi GA dan eksploitasi 2-opt, penelitian ini bertujuan memperoleh solusi rute dengan kualitas tinggi dalam waktu komputasi yang wajar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemrosesan data melibatkan 49 kota yang terdapat dalam dataset ‘*Travelling Salesman Problem: 49 UK Cities.*’. Data ini kemudian dikonversi menjadi matriks jarak, yang menjadi input utama untuk algoritma *Genetic Algorithm* (GA) yang telah dimodifikasi. Proses komputasi dilakukan dengan parameter populasi sebesar 80 individu dan 300 generasi, dengan mutasi sebesar 0,02. Teknik *local search 2-opt* diterapkan secara selektif hanya pada individu elit di setiap generasi. Pendekatan ini memungkinkan proses eksploitasi solusi dilakukan secara efektif tanpa memberikan beban komputasi tambahan yang berlebihan pada seluruh populasi.

Pendekatan tersebut menghasilkan proses optimasi yang lebih seimbang antara eksplorasi dan eksploitasi. Individu terbaik pada setiap generasi tidak hanya dipertahankan melalui mekanisme *elitism*, tetapi juga diperbaiki secara sistematis menggunakan *local search 2-opt*, sehingga kualitas rute terus meningkat dari waktu ke waktu. Proses perbaikan lokal ini memungkinkan algoritma mengidentifikasi dan menghilangkan pola lintasan yang tidak efisien, seperti jalur yang saling berpotongan atau pergerakan zig-zag yang tidak perlu, sehingga rute akhir yang dihasilkan memiliki struktur yang lebih ringkas dan logis secara geografis. Dengan cara ini, pola rute menjadi lebih konsisten secara spasial dan mengikuti alur perjalanan yang lebih alami dari satu wilayah ke wilayah lainnya. Hasil tersebut menegaskan bahwa desain algoritma yang diterapkan dalam penelitian ini tidak hanya mampu menjelajahi ruang solusi secara luas, tetapi juga mampu memperhalus solusi yang sudah menjanjikan melalui mekanisme eksploitasi yang terarah. Hal ini memperkuat efektivitas pendekatan hybrid ini dalam menghasilkan solusi yang stabil, berkualitas tinggi, dan lebih unggul dibandingkan teknik GA Normal tanpa *local search*.

Perbandingan performa antara GA Normal dan GA Cepat yang divisualisasikan dalam grafik konvergensi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perbandingan GA Normal vs GA Cepat

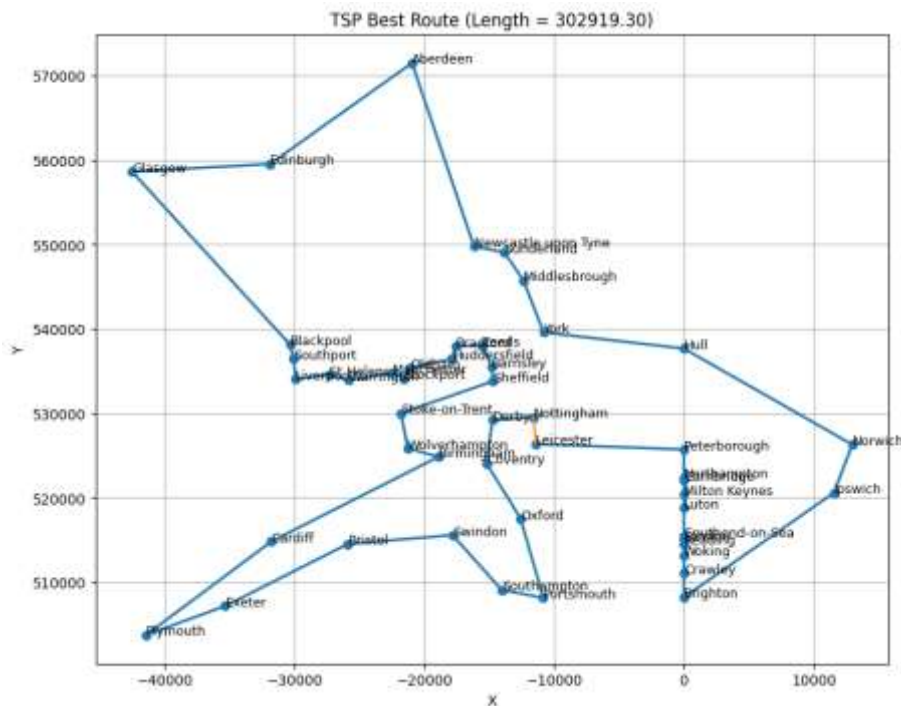


Dari grafik tersebut terlihat bahwa GA Cepat mampu menurunkan nilai jarak secara signifikan pada fase awal evolusi. Penurunan yang tajam ini menunjukkan bahwa varian tersebut memiliki kemampuan eksplorasi yang tinggi pada generasi-generasi pertama, sehingga dapat dengan cepat menemukan solusi yang lebih baik dibandingkan kondisi awal. Namun, setelah mencapai titik tertentu, perbaikannya mulai melambat dan kemudian cenderung stagnan pada kisaran jarak sekitar 312.000. Pola stagnasi ini mengindikasikan bahwa GA Cepat memiliki kelemahan dalam aspek eksploitasi, sehingga lebih rentan terjebak pada solusi sub-optimal dan sulit keluar dari daerah pencarian yang kurang menguntungkan.

Sebaliknya, GA Normal menunjukkan pola konvergensi yang lebih stabil dan berkelanjutan. Meskipun laju penurunan nilai jaraknya tidak seagresif GA Cepat di awal, algoritma ini mampu menjaga peningkatan performa secara konsisten hingga mencapai nilai optimum yang lebih rendah, yaitu sekitar 305.004. Rute terbaik yang ditemukan juga menunjukkan urutan kunjungan yang tersusun secara logis, yaitu: ['Leeds', 'York', 'Barnsley', 'Sheffield', 'Derby', 'Nottingham', 'Leicester', 'Coventry', 'Birmingham', 'Wolverhampton', 'Stoke-on-Trent', 'Cardiff', 'Plymouth', 'Exeter', 'Bristol', 'Swindon', 'Oxford', 'Southampton', 'Portsmouth', 'Brighton', 'Crawley', 'Woking', 'Reading', 'London', 'Southend-on-Sea', 'Luton', 'Milton Keynes', 'Cambridge', 'Northampton', 'Ipswich', 'Norwich', 'Peterborough', 'Hull', 'Middlesbrough', 'Sunderland', 'Newcastle upon Tyne', 'Aberdeen', 'Edinburgh', 'Glasgow', 'Blackpool', 'Southport', 'Liverpool', 'St Helens', 'Warrington', 'Manchester', 'Stockport', 'Oldham', 'Huddersfield', 'Bradford']. Urutan ini semakin memperjelas bahwa GA Normal memiliki mekanisme eksploitasi yang lebih efektif berkat dukungan local search 2-opt yang diterapkan secara selektif pada individu elit.

Pola konvergensi tersebut sejalan dengan karakter umum algoritma evolusioner, di mana eksplorasi yang terlalu agresif tetapi tidak diimbangi dengan eksploitasi yang kuat seringkali mengakibatkan algoritma melewatkan peluang untuk menemukan solusi global. Dalam konteks ini, keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi pada GA Normal terbukti lebih baik, sehingga memberikan hasil yang lebih optimal.

Hasil rute terbaik yang dihasilkan GA Normal divisualisasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rute Terbaik TSP 49 Kota Inggris



Visualisasi tersebut memperlihatkan struktur rute yang efisien dengan urutan kunjungan kota yang mengikuti pola geografis secara logis. Rute yang dihasilkan menunjukkan pengelompokan kunjungan yang rapi, dimulai dari wilayah utara Inggris, kemudian bergerak secara bertahap menuju bagian tengah dan akhirnya menuju wilayah selatan. Alur perjalanan yang tersusun secara bertingkat ini tidak hanya mencerminkan efektivitas mekanisme eksploitasi dalam algoritma, tetapi juga menunjukkan bahwa proses optimasi berhasil menyelaraskan urutan kunjungan dengan kontinuitas geografis yang masuk akal. Penyusunan pola seperti ini menandakan bahwa GA Normal yang diperkaya dengan local search *2-opt* mampu menyederhanakan struktur rute dari kondisi awal yang acak menjadi lintasan yang lebih teratur. Selain itu, penerapan *2-opt* terbukti efektif dalam menghilangkan lintasan silang atau pola perjalanan yang berputar, yang umumnya menjadi salah satu ciri dari solusi TSP yang kurang optimal. Dengan demikian, visualisasi rute ini menjadi bukti kuat bahwa kombinasi GA dan *2-opt* menghasilkan solusi yang lebih bersih, efisien, dan mendekati pola rute ideal dalam konteks optimasi perjalanan.

Untuk melengkapi analisis performa, perbandingan kuantitatif antara kedua metode ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Perbandingan kk

Metode	Jarak Terbaik	Waktu Komputasi	Kesimpulan
Full-Quality GA	305,004,2851294648	47 detik	Rute yang dihasilkan lebih optimal.
Fast GA	312,630,1464317388	5 detik	Proses pengolahan data lebih cepat.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa GA Normal mampu menghasilkan jarak terbaik sebesar 305.004,28, sementara GA Cepat memberikan hasil yang sedikit lebih tinggi yaitu 312.630,14. Perbedaan ini menggambarkan trade-off yang jelas antara kualitas solusi dan kecepatan komputasi. GA Cepat memang mampu menyelesaikan proses optimasi hanya dalam 5 detik, jauh lebih cepat dibandingkan GA Normal yang membutuhkan sekitar 47 detik. Namun, peningkatan kecepatan tersebut mengorbankan ketelitian mekanisme eksploitasi, sehingga rute yang dihasilkan tidak seoptimal yang diperoleh dari GA Normal. Oleh karena itu, GA Cepat lebih tepat digunakan pada kondisi yang menuntut keputusan cepat atau ketika waktu komputasi sangat terbatas, sedangkan GA Normal lebih cocok untuk skenario yang mengutamakan kualitas hasil dan ketepatan rute.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa modifikasi GA melalui penerapan elitism dan local search *2-opt* selektif memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kualitas solusi tanpa menghasilkan beban komputasi tambahan yang berlebihan. Dengan menggabungkan kemampuan eksplorasi GA dalam menjelajahi ruang solusi secara luas dengan mekanisme eksploitasi *2-opt* yang memperbaiki rute secara lokal, GA Normal menunjukkan performa yang lebih stabil dan konsisten pada dataset 49 kota ini. Pendekatan ini berhasil mencapai keseimbangan optimal antara kecepatan dan kualitas rute, sehingga dapat dijadikan fondasi yang kuat bagi pengembangan metode optimasi rute yang lebih adaptif, terutama untuk aplikasi nyata dalam logistik dan perencanaan perjalanan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *Genetic Algorithm* yang dipadukan dengan *local search 2-opt* mampu meningkatkan kualitas solusi pada permasalahan *Traveling Salesman Problem* dengan 49 kota di Inggris. GA Normal yang dilengkapi mekanisme perbaikan lokal secara selektif menghasilkan rute terbaik dengan jarak sekitar 305,004, lebih optimal dibandingkan GA Cepat yang hanya mencapai sekitar 312,630. Meskipun GA Cepat menawarkan waktu komputasi



yang jauh lebih singkat, kualitas rute yang dihasilkan tidak sebaik GA Normal. Dengan demikian, pemilihan konfigurasi GA perlu disesuaikan dengan kebutuhan: apakah menekankan kualitas solusi atau kecepatan pemrosesan.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan mengeksplorasi teknik metaheuristik tambahan seperti simulated annealing, tabu search, atau algoritma *swarm*, serta memadukannya dengan strategi local search lebih canggih seperti *3-opt* atau Lin-Kernighan. Selain itu, pengujian pada dataset yang lebih besar atau berbasis kondisi nyata seperti jarak jalan sebenarnya dapat memberikan wawasan yang lebih aplikatif terhadap performa algoritma.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Liu, L. Chen, and C. Huang, "Study on the Carbon Emission Spillover Effects of Transportation under Technological Advancements," *Sustainability*, vol. 14, no. 17, p. 10608, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141710608.
- [2] Rizki Putra Sinaga and Faridawaty Marpaung, "Perbandingan Algoritma Cheapest Insertion Heuristic Dan Nearest Neighbor Dalam Menyelesaikan Traveling Salesman Problem," *J. Ris. RUMPUN Mat. DAN ILMU Pengetah. ALAM*, vol. 2, no. 2, pp. 238–247, July 2023, doi: 10.55606/jurrimipa.v2i2.1614.
- [3] B. Meniz and F. Tiryaki, "Genetic Algorithm Optimization with Selection Operator Decider," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 50, no. 10, pp. 6931–6941, May 2025, doi: 10.1007/s13369-024-09068-5.
- [4] X. Wei, J. Sun, and H. Jiao, "New improved hybrid genetic algorithm for optimizing facility layout design of reconfigurable manufacturing system," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 21416, July 2025, doi: 10.1038/s41598-025-97526-x.
- [5] V. Kralev and R. Kraleva, "Combining Genetic Algorithm with Local Search Method in Solving Optimization Problems," *Electronics*, vol. 13, no. 20, p. 4126, Oct. 2024, doi: 10.3390/electronics13204126.
- [6] O. Cosma, P. C. Pop, and L. Cosma, "A novel memetic algorithm for solving the generalized traveling salesman problem," *Log. J. IGPL*, vol. 32, no. 4, pp. 576–588, July 2024, doi: 10.1093/jigpal/jzae019.
- [7] K. Borna and V. H. Hashemi, "An improved genetic algorithm with a local optimization strategy and an extra mutation level for solving traveling salesman problem," 2014, doi: 10.48550/ARXIV.1409.3078.
- [8] M. E. Krari and B. Ahiod, "A Memetic Algorithm Based on Breakout Local Search for the Generalized Travelling Salesman Problem," 2019, doi: 10.48550/ARXIV.1911.01966.
- [9] K. S. Suryowati, M. Nahak, and R. D. Bekti, "Penerapan Model Spasial Menggunakan Matriks Pembobot Queen Contiguity dan Euclidean Distance Terhadap Kasus Gizi Buruk Balita di Provinsi Nusa Tenggara Timur," *J Stat. J. Ilm. Teori Dan Apl. Stat.*, vol. 16, no. 1, pp. 298–308, July 2023, doi: 10.36456/jstat.vol16.no1.a7871.
- [10] P. Zou, J. (Roger) Jiao, and F. Zhou, "A twofold update quantum-inspired genetic algorithm for efficient combinatorial optimal decisions in engineering system design and operations," *J. Eng. Des.*, vol. 34, no. 4, pp. 271–293, Apr. 2023, doi: 10.1080/09544828.2023.2188394.
- [11] M. El Krari, B. Ahiod, and B. El Benani, "A Memetic Algorithm Based on Breakout Local Search for the Generalized Traveling Salesman Problem," *Appl. Artif. Intell.*, vol. 34, no. 7, pp. 537–549, June 2020, doi: 10.1080/08839514.2020.1730629.

