

Optimasi Algoritma Cheapest Insertion Heuristic dengan Algoritma Tabu Search dalam Pencarian Rute Terpendek

Silviyatus Yulianti, Mohammad Nafie Jauhari*, and Achmad Nashichuddin

Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, Indonesia

Abstract

The shortest route finding problem is a significant topic in graph theory and combinatorial optimization, with wide applications in logistics, transportation, and scheduling. This research aims to improve the quality of the solution and time efficiency in solving the Traveling Salesman Problem (TSP) by optimizing the Cheapest Insertion Heuristic (CIH) algorithm using the application of the Tabu Search algorithm. The CIH algorithm constructs an initial solution by inserting points based on minimum weight. At the same time, the Tabu Search algorithm is applied to enhance the solution by avoiding local optima using a tabu list mechanism. The research data, consisting of the distances between parking retribution collection points by the Malang City Transportation Agency in Sukun Sub-district, were obtained from Google Maps. The algorithm performance evaluation is done by comparing the total mileage before and after optimization, and statistically analyzed using the Wilcoxon signed-rank test because the data does not follow a normal distribution. The results showed that optimizing the CIH algorithm using the Tabu Search algorithm significantly resulted in routes with shorter travel distances than using the CIH algorithm alone. This finding proves that optimizing the CIH algorithm with Tabu Search increases the effectiveness of finding the shortest route.

Keywords: Cheapest Insertion Heuristic Algorithm, Route Optimization, Tabu Search Algorithm, Traveling Salesman Problem.

Copyright © 2025 by Authors, Published by JRMM Group. This is an open access article under the CC BY-SA License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)

1 Pendahuluan

Pencarian rute terpendek merupakan salah satu permasalahan penting dalam teori graf serta optimasi kombinatorial. Permasalahan ini bertujuan untuk menentukan lintasan dengan total jarak minimum dalam graf berbobot yang menghubungkan titik awal ke titik tujuan [1]. Aplikasi dari pencarian rute terpendek sangat luas, mencakup bidang logistik, transportasi, hingga sistem penjadwalan, karena berkontribusi langsung terhadap efisiensi operasional [2].

Dalam bidang logistik, optimasi rute dapat mempercepat distribusi dan mengurangi konsumsi bahan bakar, sehingga berdampak langsung terhadap kepuasan pelanggan [3]. Sementara itu, pada sektor transportasi, penerapan algoritma rute optimal dapat membantu mengurangi tingkat kemacetan dan emisi karbon, mendukung upaya keberlanjutan lingkungan [4]. Di sisi lain, dalam sistem penjadwalan, pendekatan optimasi mampu meningkatkan produktivitas melalui alokasi sumber daya yang lebih tepat [5].

*Corresponding author. E-mail: nafie.jauhari@uin-malang.ac.id

Salah satu permasalahan optimasi rute yang terkenal adalah *Traveling Salesman Problem* (TSP). TSP mengharuskan pencarian rute terpendek yang melewati seluruh titik tepat satu kali dan kembali ke titik asal [6]. Karena sifatnya yang kompleks dan termasuk dalam kategori *NP-Hard*, penyelesaian TSP secara eksak menjadi tidak efisien apabila jumlah titik yang terlibat semakin besar [7]. Oleh karena itu, pendekatan heuristik sering digunakan sebagai solusi alternatif untuk memperoleh hasil mendekati optimal dalam waktu komputasi yang terbatas [8].

Salah satu algoritma heuristik yang banyak diterapkan dalam penyelesaian TSP adalah algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* (CIH) [9]. Algoritma CIH bekerja dengan membangun tur awal dari dua titik, kemudian menyisipkan titik lain secara bertahap berdasarkan nilai penyisipan terkecil. Keunggulan algoritma CIH terletak pada efisiensinya dalam membentuk rute yang terstruktur, meskipun solusi yang dihasilkan dapat bervariasi tergantung pada pemilihan titik awal [10]. Dalam praktiknya, CIH dapat menghasilkan variasi jarak tempuh yang cukup signifikan, terutama ketika jumlah titik meningkat [11].

Untuk mengatasi keterbatasan CIH dalam menemukan solusi yang benar-benar optimal, pendekatan metaheuristik seperti Tabu Search digunakan algoritma *Tabu Search* digunakan. Algoritma ini mengeksplorasi solusi tetangga dan memanfaatkan daftar tabu untuk menghindari eksplorasi solusi yang telah dikunjungi sebelumnya [12]. Selain itu, *Tabu Search* memiliki mekanisme intensifikasi yang mengeksplorasi wilayah solusi terbaik secara lebih dalam serta mekanisme diversifikasi yang memperluas pencarian ke area yang belum dijelajahi [13].

Beberapa penelitian terdahulu membuktikan bahwa kombinasi antara algoritma heuristik dan metaheuristik mampu menghasilkan solusi yang lebih baik. Misalnya, kombinasi algoritma genetika dengan *Tabu Search* dapat memperpendek jarak tempuh secara signifikan dibandingkan penggunaan algoritma tunggal [14]. Selain itu, solusi awal dari algoritma *Nearest Neighbor* yang dioptimalkan dengan *Tabu Search* juga mampu mengurangi jarak tempuh hanya dalam satu iterasi [15].

Beberapa penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas kombinasi algoritma heuristik dan metaheuristik dalam penyelesaian TSP. Namun, belum ditemukan studi yang secara khusus mengimplementasikan optimasi algoritma CIH menggunakan algoritma Tabu Search pada konteks pengambilan retribusi parkir di Kota Malang.

Kebaruan dari penelitian ini adalah penerapan kombinasi algoritma CIH dan Tabu Search secara langsung pada data riil titik pengambilan retribusi parkir, serta analisis statistik terhadap efektivitas optimasi yang dilakukan. Penelitian ini juga memberikan kontribusi dalam pengembangan solusi rute optimal pada konteks pelayanan publik daerah.

Berdasarkan tinjauan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menggabungkan algoritma CIH sebagai pembentuk solusi awal dan algoritma *Tabu Search* sebagai pengoptimal. Penelitian difokuskan pada penentuan rute optimal pengambilan retribusi parkir oleh Dinas Perhubungan Kota Malang di Kecamatan Sukun. Optimasi algoritma CIH menggunakan algoritma *Tabu Search* diharapkan dapat meningkatkan kualitas solusi dalam menyelesaikan permasalahan pencarian rute terpendek.

2 Metode Penelitian

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental, yang bertujuan untuk mengevaluasi dan menguji pengaruh optimasi algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* (CIH) menggunakan algoritma *Tabu Search* dalam penyelesaian masalah *Traveling Salesman Problem* (TSP). Penelitian dilakukan dengan merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis hasil dari dua pendekatan algoritmik: CIH secara tunggal dan CIH yang dioptimasi menggunakan *Tabu Search*.

2.2 Data dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa jarak antar titik lokasi pengambilan retribusi parkir di Kecamatan Sukun, Kota Malang. Data diperoleh melalui koordinat titik lokasi dari Dinas Perhubungan Kota Malang dan dikonversi menjadi matriks jarak menggunakan layanan *Google Maps*. Setiap titik mewakili suatu lokasi jalan tempat pengambilan retribusi dilakukan.

2.3 Langkah-Langkah Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan yang saling berkesinambungan sebagai berikut:

1. Memodelkan masalah dalam graf berarah

Permasalahan pencarian rute pengambilan retribusi parkir dimodelkan sebagai graf berarah berbobot yang dinotasikan sebagai $D = (V, E)$. Dalam hal ini, himpunan titik (*vertices*) yang merepresentasikan lokasi pengambilan retribusi parkir oleh Dinas Perhubungan Kota Malang di Kecamatan Sukun dinotasikan sebagai $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_{n-1}\}$. Sedangkan $E \subseteq V \times V$ merupakan himpunan busur (*edges*) yang menyatakan pasangan berurutan (v_i, v_j) dari titik asal ke titik tujuan. Setiap busur memiliki bobot berupa jarak antar titik, yang dinyatakan melalui fungsi $d : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ dengan $d(v_i, v_j)$ menunjukkan jarak antara titik v_i dan v_j .

2. Menerapkan algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* (CIH)

Setelah graf terbentuk, algoritma CIH diterapkan untuk membentuk solusi awal. Algoritma ini dimulai dengan dua titik awal, yaitu v_i yang ditetapkan sebagai kantor Dinas Perhubungan Kota Malang dan v_j yang dipilih secara bergantian dari titik lainnya. Kedua titik ini membentuk subtur awal berbentuk siklus (*cycle*). Titik-titik lain kemudian disisipkan satu per satu ke dalam tur berdasarkan nilai sisipan terkecil, yaitu posisi penyisipan yang memberikan penambahan jarak paling minimal. Proses ini dilakukan secara iteratif hingga seluruh titik dalam graf telah dimasukkan ke dalam rute.

3. Mengoptimasi hasil CIH menggunakan algoritma *Tabu Search*

Solusi awal dari algoritma CIH kemudian digunakan sebagai input awal dalam algoritma *Tabu Search*. Optimasi dilakukan melalui pertukaran posisi dua titik dalam rute dengan tujuan untuk meminimalkan total jarak tempuh. Proses ini dilakukan selama tiga iterasi dengan daftar tabu (*tabu list*) yang berfungsi untuk mencatat pasangan titik yang telah dipertukarkan agar tidak diulang dalam iterasi berikutnya. Mekanisme ini bertujuan agar algoritma dapat menghindari eksplorasi ulang terhadap solusi lokal yang kurang optimal.

4. Menganalisis pengaruh penerapan algoritma *Tabu Search*

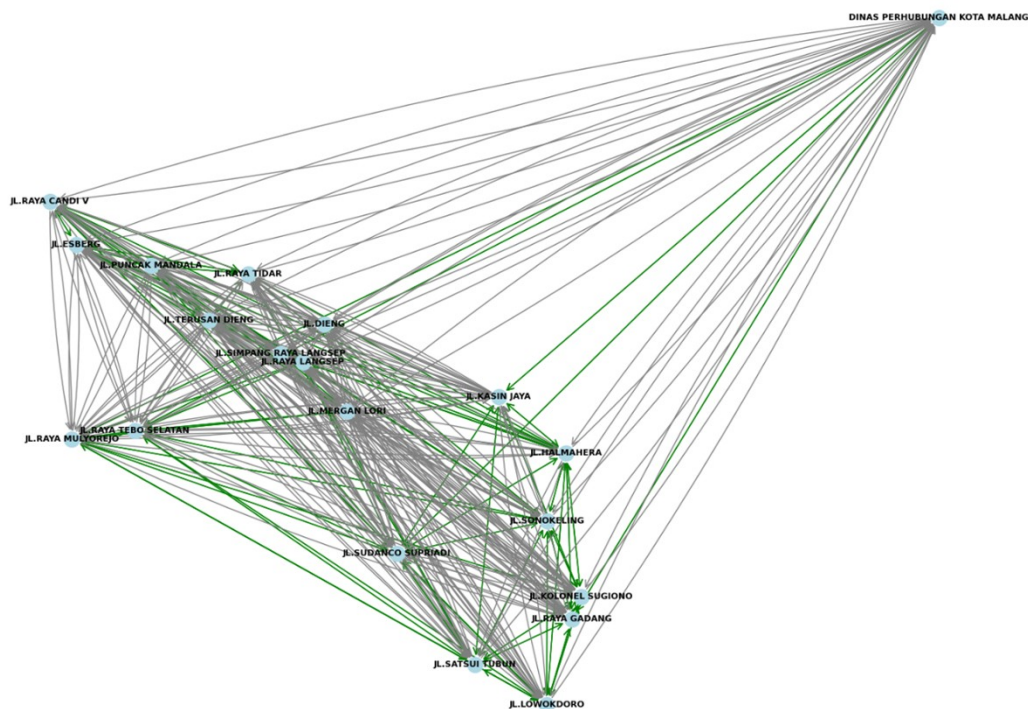
Tahap terakhir adalah melakukan analisis terhadap perbedaan kualitas solusi sebelum dan sesudah optimasi. Perbedaan dihitung berdasarkan selisih total jarak rute hasil CIH dan hasil optimasi dengan *Tabu Search*. Selanjutnya, dilakukan uji normalitas menggunakan uji Shapiro-Wilk untuk menentukan distribusi data selisih tersebut. Jika data tidak berdistribusi normal, maka digunakan uji Wilcoxon signed-rank test sebagai metode non-parametrik. Uji ini bertujuan untuk mengukur signifikansi peningkatan performa algoritma setelah dilakukan optimasi.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Memodelkan Masalah dalam Graf Berarah

Permasalahan pengambilan retribusi parkir oleh Dinas Perhubungan Kota Malang dimodelkan sebagai graf berarah berbobot, di mana setiap titik mewakili lokasi titik parkir yang berada di bawah naungan Dinas Perhubungan Kota Malang. Setiap titik dihubungkan oleh busur yang

menunjukkan rute potensial untuk pengambilan retribusi parkir. Pemodelan graf ini memfasilitasi visualisasi serta pemahaman yang lebih jelas mengenai struktur dan hubungan antar titik-titik parkir yang ada.



Gambar 1. Model Masalah dalam Graf Berarah

Graf berarah yang ditampilkan dalam Gambar 1 merepresentasikan hubungan antar titik parkir serta rute yang dapat dilalui dalam pengambilan retribusi parkir di Kecamatan Sukun. Pemodelan ini membantu visualisasi jaringan titik parkir sehingga analisis dan perencanaan rute menjadi lebih sistematis dan efisien. Setiap titik parkir terhubung melalui rute tertentu dengan bobot yang menunjukkan jarak antar lokasi, yang dinyatakan dalam satuan kilometer berdasarkan arah perjalanan. Hal ini memungkinkan perencanaan rute yang optimal untuk proses pengambilan retribusi parkir.

3.2 Menerapkan Algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* (CIH)

Algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* (CIH) diterapkan untuk membentuk solusi awal pencarian rute. CIH bekerja dengan menyusun *subtour* dari dua titik, kemudian menyisipkan titik lainnya berdasarkan nilai sisipan terkecil secara iteratif. Dalam penelitian ini, titik awal v_i ditetapkan sebagai Kantor Dinas Perhubungan Kota Malang. Selanjutnya, titik kedua v_j dipilih dari lokasi lainnya secara bergantian, membentuk kombinasi awal yang menghasilkan variasi subtur.

Setiap kombinasi v_i dan v_j menghasilkan rute yang berbeda dengan total jarak tempuh yang dihitung. Rute terbaik akan ditentukan berdasarkan total jarak minimum dari seluruh kombinasi. Hasil penghitungan jarak rute dari masing-masing pasangan awal dapat dilihat pada Tabel 1.

Dari tabel 1 terlihat bahwa jarak tempuh bervariasi, menunjukkan sensitivitas solusi terhadap pemilihan titik awal. Rute dengan total jarak minimum sebesar 41,9 km menunjukkan efisiensi tertinggi pada tahap awal sebelum optimasi.

3.3 Optimasi Algoritma CIH Menggunakan Algoritma *Tabu Search*

Solusi awal dari CIH kemudian ditingkatkan kualitasnya melalui optimasi dengan algoritma *Tabu Search*. Optimasi dilakukan dengan menukar posisi dua titik dalam rute, mengevaluasi

Tabel 1. Total Jarak Tempuh Rute yang Dihasilkan Algoritma CIH

No	Titik Pertama	Titik Kedua	Total Jarak Tempuh Rute (km)
1	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Dieng	42,2
2	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Esberg	42,6
3	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Halmahera	44,2
4	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Kasin Jaya	44,2
5	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Kolonel Sugiono	43,8
6	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Lowokdoro	43,8
7	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Mergan Lori	43,1
8	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Puncak Mandala	42,6
9	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Raya Candi V	41,9
10	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Raya Gadang	43,8
11	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Raya Langsep	42,95
12	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Raya Mulyorejo	44,05
13	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Raya Tebo Selatan	44,05
14	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Raya Tidar	42,6
15	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Satsui Tubun	43,8
16	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Simpang Raya Langsep	42,95
17	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Sonokeling	42,45
18	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Sudanco Supriadi	44,25
19	Dinas Perhubungan Kota Malang	Jl. Terusan Dieng	45,5

solusi yang dihasilkan, dan mempertimbangkan daftar tabu agar tidak kembali ke konfigurasi yang sudah pernah dieksplorasi. Pendekatan ini bertujuan untuk keluar dari solusi lokal yang suboptimal.

Optimasi dilakukan dalam tiga iterasi pada masing-masing rute awal. Hasil dari optimasi ini menunjukkan adanya penurunan jarak pada sebagian besar rute. Tabel 2 menyajikan beberapa contoh hasil optimasi yang diperoleh menggunakan algoritma *Tabu Search*.

Tabel 2. Rute dan Total Jarak Tempuh dari Optimasi

No	Rute	Total Jarak Tempuh (km)
1	$(v_0, v_4, v_3, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_9, v_2, v_8, v_{14}, v_0)$	41,2
2	$(v_0, v_4, v_3, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	40,9
3	$(v_0, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_3, v_{16}, v_{19}, v_9, v_2, v_8, v_{14}, v_1, v_{11}, v_{13}, v_{12}, v_7, v_4, v_0)$	43,5
4	$(v_0, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_3, v_{16}, v_{19}, v_9, v_2, v_8, v_{14}, v_1, v_{11}, v_{13}, v_{12}, v_7, v_4, v_0)$	43,5
5	$(v_0, v_4, v_3, v_{16}, v_{19}, v_8, v_2, v_9, v_{14}, v_1, v_{11}, v_7, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{17}, v_5, v_6, v_{15}, v_{10}, v_0)$	43,8
6	$(v_0, v_4, v_3, v_{16}, v_{19}, v_8, v_2, v_9, v_{14}, v_1, v_{11}, v_7, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{17}, v_5, v_6, v_{15}, v_{10}, v_0)$	43,8
7	$(v_0, v_9, v_2, v_8, v_{14}, v_{19}, v_1, v_{11}, v_{16}, v_3, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_4, v_0)$	42,15
8	$(v_0, v_4, v_3, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	40,9
9	$(v_0, v_4, v_3, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	40,9
10	$(v_0, v_4, v_3, v_{16}, v_{19}, v_9, v_2, v_8, v_{14}, v_1, v_{11}, v_7, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{17}, v_5, v_6, v_{15}, v_{10}, v_0)$	43,8
11	$(v_0, v_3, v_4, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	41,2
12	$(v_0, v_3, v_4, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{15}, v_6, v_{10}, v_5, v_{17}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	42,3
13	$(v_0, v_3, v_4, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{15}, v_6, v_{10}, v_5, v_{17}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	42,3
14	$(v_0, v_4, v_3, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	40,9
15	$(v_0, v_4, v_3, v_{16}, v_{19}, v_9, v_2, v_8, v_{14}, v_1, v_{11}, v_7, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{17}, v_5, v_{15}, v_6, v_{10}, v_0)$	43,8
16	$(v_0, v_3, v_4, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_{16}, v_1, v_{19}, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_0)$	41,2
17	$(v_0, v_{17}, v_5, v_{10}, v_6, v_{15}, v_{18}, v_{12}, v_{13}, v_7, v_{11}, v_1, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_{19}, v_{16}, v_3, v_4, v_0)$	41,75
18	$(v_0, v_3, v_4, v_7, v_{16}, v_{19}, v_9, v_2, v_8, v_{14}, v_1, v_{11}, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{15}, v_6, v_{10}, v_5, v_{17}, v_0)$	43,4
19	$(v_0, v_{14}, v_8, v_2, v_9, v_{19}, v_1, v_{11}, v_{16}, v_7, v_{13}, v_{12}, v_{18}, v_{17}, v_{10}, v_{15}, v_6, v_5, v_3, v_4, v_0)$	43,45

Berdasarkan data yang disajikan dalam Tabel 2, algoritma *Tabu Search* terbukti mampu menghasilkan rute dengan total jarak tempuh yang lebih rendah dibandingkan dengan algoritma CIH. Penurunan jarak tempuh ini menunjukkan efektivitas mekanisme eksplorasi solusi yang lebih luas, memungkinkan pencarian ruang solusi secara lebih optimal.

3.4 Menguji pengaruh dari penerapan algoritma *Tabu Search* terhadap kualitas solusi yang dihasilkan oleh algoritma CIH

Pengujian dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penerapan algoritma *Tabu Search* terhadap kualitas solusi yang diperoleh dari algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* (CIH) dalam menyelesaikan permasalahan pencarian rute terpendek. Dalam konteks ini, kualitas solusi

diukur berdasarkan total jarak tempuh dari rute yang dihasilkan.

Langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung selisih total jarak tempuh antara rute hasil algoritma CIH dan rute hasil optimasi menggunakan *Tabu Search*. Selisih ini menjadi dasar untuk analisis statistik guna menentukan signifikansi perbedaan antara kedua metode.

Untuk memastikan validitas pengujian, terlebih dahulu dilakukan uji normalitas terhadap data selisih menggunakan metode *Shapiro-Wilk*. Hasil uji menunjukkan bahwa data tidak berdistribusi normal, dengan nilai $p\text{-value} < 0,05$. Berdasarkan hal tersebut, dipilih metode non-parametrik, yaitu uji *Wilcoxon signed-rank test*, yang sesuai untuk membandingkan dua kelompok data berpasangan yang tidak mengikuti distribusi normal.

Hasil pengujian menggunakan *Wilcoxon signed-rank test* menunjukkan nilai statistik $W = 0$, sementara nilai dari tabel kritis (W_{tabel}) adalah 25. Karena $W < W_{\text{tabel}}$, maka dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara total jarak sebelum dan sesudah optimasi.

Kesimpulan dari pengujian ini adalah bahwa penerapan algoritma *Tabu Search* secara signifikan meningkatkan kualitas solusi yang dihasilkan oleh algoritma CIH. Optimasi ini berhasil menghasilkan rute dengan total jarak tempuh yang lebih pendek dan efisien. Dengan demikian, kombinasi kedua algoritma ini terbukti efektif dalam menyelesaikan masalah pencarian rute terpendek, khususnya dalam konteks pengambilan retribusi parkir oleh Dinas Perhubungan Kota Malang.

4 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* (CIH) mampu membentuk solusi awal dalam permasalahan pencarian rute terpendek. Proses penyisipan titik berdasarkan penambahan jarak minimum menghasilkan rute yang efisien, namun kualitas solusi sangat dipengaruhi oleh kombinasi titik awal yang digunakan. Total jarak tempuh dari rute yang dihasilkan bervariasi, dengan kisaran antara 41,9 km hingga 45,5 km.

Untuk meningkatkan kualitas solusi dari algoritma CIH, dilakukan optimasi menggunakan algoritma *Tabu Search*. Optimasi dilakukan melalui pertukaran posisi titik secara iteratif dengan bantuan daftar tabu, yang bertujuan untuk menghindari eksplorasi ulang terhadap solusi lokal yang kurang optimal. Hasil optimasi menunjukkan adanya penurunan jarak tempuh yang signifikan, dengan jarak minimum mencapai 40,9 km.

Selanjutnya, efektivitas optimasi tersebut diuji secara statistik menggunakan uji *Wilcoxon signed-rank test*. Hasil uji menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan secara statistik antara total jarak sebelum dan sesudah optimasi, dengan nilai $W = 0$ dan $W_{\text{tabel}} = 25$. Temuan ini menguatkan bahwa penerapan algoritma *Tabu Search* berhasil meningkatkan performa solusi yang dihasilkan oleh algoritma CIH.

Dengan demikian, optimasi algoritma *Cheapest Insertion Heuristic* menggunakan *Tabu Search* terbukti efektif dalam menyelesaikan masalah pencarian rute terpendek. Pendekatan ini sangat relevan untuk diterapkan dalam konteks pengambilan retribusi parkir oleh Dinas Perhubungan Kota Malang. Penelitian ini juga berpotensi dikembangkan lebih lanjut untuk menyelesaikan permasalahan serupa pada bidang logistik dan transportasi dengan skala yang lebih besar.

Pernyataan Kontribusi Penulis (CRedit)

Silviyatus Yulianti berkontribusi pada tahap konseptualisasi, perancangan metodologi, pengembangan perangkat lunak, serta penulisan draf awal naskah. Mohammad Nafie Jauhari berperan dalam kurasi data, analisis formal, serta melakukan telaah dan penyuntingan naskah. Achmad Nashichuddin bertanggung jawab pada validasi hasil dan supervisi penelitian.

Deklarasi Penggunaan AI atau Teknologi Berbasis AI

Tidak ada teknologi AI generatif atau berbasis AI yang digunakan dalam penulisan naskah ini.

Deklarasi Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan yang dapat memengaruhi hasil penelitian ini.

Pendanaan dan Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dinas Perhubungan Kota Malang atas dukungan data dan informasi yang diberikan.

Ketersediaan Data

Data penelitian yang mendukung temuan artikel ini tersedia atas permintaan wajar kepada penulis korespondensi melalui email.

Daftar Pustaka

- [1] I. Kholidasari, A. P. Zein, and S. Sundari, "Penerapan Metode Shortest Route Problem Untuk Menentukan Rute Distribusi Produk Gas Lpg 3 Kg Dengan Kriteria Minimasi Biaya Transportasi Di Pt.Www," *Industrika : Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2022. DOI: [10.37090/indstrk.v6i1.585](https://doi.org/10.37090/indstrk.v6i1.585).
- [2] F. Suryani, R. K. Natadipura, and H. Tunafiah, "Optimalisasi Rute Perjalanan Sarana Angkutan Umum Terpadu Bogor-Jakarta," *Ikra-ITH Teknologi*, vol. 3, no. 2, pp. 63–75, 2019.
- [3] D. T. Wiyanti, "Algoritma Optimasi untuk Penyelesaian Travelling Salesman Problem," *Jurnal Transformatika*, vol. 11, no. 1, pp. 1–6, 2013. DOI: [10.26623/transformatika.v11i1.76](https://doi.org/10.26623/transformatika.v11i1.76).
- [4] G. Aristi, "Perbandingan Algoritma Greedy, Algoritma Cheapest Insertion Heuristics Dan Dynamic Programming Dalam Penyelesaian Travelling Salesman Problem," *Paradigma*, vol. XVI, no. 2, pp. 52–58, 2014.
- [5] Y. V. Via, M. S. Munir, and A. Muhammad, "Optimasi Penjadwalan Pegawai Rumah Sakit Menggunakan Algoritma Genetika," *Scan : Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi*, vol. 12, no. 1, pp. 81–88, 2017. DOI: [10.33005/scan.v12i1.885](https://doi.org/10.33005/scan.v12i1.885). Available online.
- [6] G. Chartrand, L. Lesniak, and P. Zhang, *Graphs and Digraphs*, Sixth, A. Boggess and K. Rosen, Eds. New York: CRC Press Taylor Francis Group, 2015, p. 624. DOI: [10.1201/b19731](https://doi.org/10.1201/b19731).
- [7] E. Yulianto and A. Setiawan, "Optimasi Rute Sales Coverage Menggunakan Algoritma Cheapest Insertion Heuristic Dan Layanan Google Maps Api," *INTERNAL (Information System Journal)*, vol. 1, no. 1, pp. 39–54, 2018. DOI: [10.32627/internal.v1i1.326](https://doi.org/10.32627/internal.v1i1.326).
- [8] R. G. Utomo, D. S. Maylawati, and C. N. Alam, "Implementasi Algoritma Cheapest Insertion Heuristic (CIH) dalam Penyelesaian Travelling Salesman Problem (TSP)," *Jurnal Online Informatika*, vol. 3, no. 1, p. 61, 2018. DOI: [10.15575/join.v3i1.218](https://doi.org/10.15575/join.v3i1.218).

- [9] K. Saleh, Helmi, and B. Prihandono, "Penentuan Rute Terpendek Dengan Menggunakan Algoritma Cheapest Insertion Heuristic (Studi Kasus: PT. Wicaksana Overseas International Tbk. Cabang Pontianak)," *Buletin Ilmiah Math. Stat. dan Terapannya (Bimaster)*, vol. 04, no. 3, pp. 295–304, 2015.
- [10] K. Kusrini and J. E. Istiyanto, "Penyelesaian Travelling Salesman Problem dengan Algoritma Cheapest Insertion Heuristic dan Basis Data," *Jurnal Informatika*, vol. 8, no. 2, pp. 109–114, 2007. DOI: [10.9744/INFORMATIKA.8.2.PP](https://doi.org/10.9744/INFORMATIKA.8.2.PP). Available online.
- [11] V. Dayanti, "Efektivitas Parameter Algoritma Cheapest Insertion Heuristic (CIH) dalam Menentukan Rute Terpendek Bus Sekolah Gratis Kota Malang," *Jurnal Riset Mahasiswa Matematika*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18860/jrmm.v4i1.28244>. Available online.
- [12] Y. Wang, Q. Wu, and F. Glover, "Effective Metaheuristic Algorithms for The Minimum Differential Dispersion Problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 258, no. 3, pp. 829–843, 2017. DOI: [10.1016/j.ejor.2016.10.035](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.035).
- [13] H. M. Sitorus, C. P. Juwono, and P. Ciputra, "Penerapan Algoritma Tabu Search pada Permasalahan Lintasan Keseimbangan Bentuk U Tipe I dengan Waktu Proses Stokastik," *Inasea*, vol. 15, no. 1, pp. 15–27, 2014.
- [14] S. E. Ramadhania and S. Rani, "Implementasi Kombinasi Algoritma Genetika dan Tabu Search untuk Penyelesaian Travelling Salesman Problem," *Automata*, vol. 2, no. 1, pp. 99–106, 2021.
- [15] A. C. Sembiring, I. S. Lumbanntoruan, and H. B. Jufri, "Optimalisasi Rute Distribusi Menggunakan Algoritma Tabu Search Dan Nearest Neighbor," *Junal Ilmiah Teknik Industri Prima*, vol. 6, no. 2, pp. 50–56, 2023.