

OPTIMASI RUTE PENGANGKUTAN SAMPAH KOTA KENDARI MENGUNAKAN HIBRIDA ALGORITMA GENETIKA

Muh. Nur Iksan, Adha Mashur Sajiah, Subardin

Jurusan Teknik Informatika, Fakultas, Teknik Universitas Halu Oleo,
Jl. H.E.A. Mokodompit, Kota Kendari, 93232, Sulawesi Tenggara, Indonesia
iksanpml131@gmail.com

ABSTRAK

Pesatnya pertumbuhan di Kota Kendari telah mengakibatkan lonjakan volume sampah yang signifikan sehingga menuntut efisiensi dalam distribusi armada pengangkutan sampah. Penelitian ini membahas optimasi rute pengangkutan sampah di Kota Kendari menggunakan Hibrida Algoritma Genetika (GA) dan *Simulated Annealing* (SA) dengan tujuan menghasilkan rute optimal yang akan dilalui oleh setiap armada dalam mengangkut sampah dari berbagai Tempat Penampungan Sementara (TPS) menuju Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Dengan memodelkan permasalahan sebagai *Vehicle Routing Problem* (VRP), Hibrida GA-SA diterapkan untuk menghasilkan rute optimal dengan mempertimbangkan jarak tempuh dan kapasitas armada berdasarkan data yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Kendari. Hasil optimasi rute menunjukkan penurunan jumlah armada dari 60 menjadi 45 unit, serta pengurangan total jarak tempuh dari 915,6 km menjadi 701,8 km. Berdasarkan hasil tersebut, maka Hibrida GA-SA dalam optimasi rute pengangkutan sampah memberikan solusi yang lebih adaptif dan efektif, serta dapat diimplementasikan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam sistem manajemen sampah perkotaan.

Kata kunci : *Vehicle Routing Problem, Algoritma Genetika, Simulated Annealing*

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan pesatnya pertumbuhan dan perkembangan suatu daerah, terjadi peningkatan kepadatan penduduk serta intensitas aktivitas masyarakat yang berdampak langsung terhadap peningkatan volume timbunan sampah yang dihasilkan setiap harinya. Kondisi tersebut juga terjadi di Kota Kendari, di mana pada rentang waktu tahun 2017 hingga tahun 2021 ditemukan bahwa jumlah produksi sampah meningkat hampir tiga kali lipat atau sekitar 300% [1]. Peningkatan ini menimbulkan kekhawatiran terhadap kebersihan dan kesehatan lingkungan, khususnya apabila tidak diimbangi dengan sistem pengelolaan sampah yang efektif dan berkelanjutan.

Pemerintah Kota Kendari telah mengatur mekanisme pengelolaan sampah melalui Peraturan Daerah Kota Kendari Nomor 4 Tahun 2015 tentang Pengelolaan Sampah, yang mencakup kegiatan mulai dari pengumpulan sampah di Tempat Penampungan Sementara (TPS) hingga pengangkutan ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Dalam implementasinya, Pemerintah Kota Kendari telah menyediakan sarana pengangkutan berupa armada pengangkut sampah untuk mendukung pelaksanaan kegiatan tersebut [2]. Namun, seiring meningkatnya volume sampah yang harus ditangani, efektivitas pengelolaan menjadi menurun karena terbatasnya kapasitas armada dan belum optimalnya rute pengangkutan yang digunakan. Kondisi ini mengakibatkan sebagian sampah tidak terangkut tepat waktu, sehingga menimbulkan penumpukan di beberapa TPS dan berdampak negatif terhadap kualitas lingkungan perkotaan.

Permasalahan utama yang dihadapi adalah belum optimalnya sistem pengangkutan sampah, baik dari segi rute perjalanan maupun kapasitas kendaraan.

Secara umum, sistem pengangkutan sampah saat ini adalah armada pengangkut beroperasi dari depot, kemudian menuju beberapa TPS dan selanjutnya menuju TPA dengan tetap memperhatikan kapasitas masing-masing kendaraan [3]. Namun, armada pengangkut sering kali menempuh jarak yang lebih jauh daripada yang seharusnya atau melampaui kapasitas angkut kendaraan, yang pada akhirnya menimbulkan inefisiensi waktu, bahan bakar, dan biaya operasional. Permasalahan ini dapat dimodelkan sebagai *Vehicle Routing Problem* (VRP), yaitu permasalahan rute kendaraan dengan tujuan pemecahan masalah yaitu untuk meminimalkan total jarak tempuh, waktu perjalanan, atau biaya, dengan tetap memperhatikan batasan operasional seperti kapasitas kendaraan [4].

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis sistem pengangkutan sampah yang saat ini diterapkan di Kota Kendari serta merancang model optimasi rute pengangkutan. Penelitian ini juga bertujuan untuk menghasilkan solusi rute yang efisien dengan mempertimbangkan faktor jarak, waktu, dan kapasitas kendaraan, sehingga dapat meningkatkan efektivitas armada pengangkutan sampah serta mendukung pengelolaan sampah yang berkelanjutan di Kota Kendari.

Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, salah satu pendekatan yang relevan dan efektif adalah penerapan metode hibrida antara Algoritma Genetika (GA) dan *Simulated Annealing* (SA). Algoritma Genetika memiliki kemampuan dalam melakukan pencarian global (*global search*) melalui proses evolusi populasi solusi, sedangkan *Simulated Annealing* mampu melakukan perbaikan solusi lokal (*local refinement*) dengan mekanisme probabilistik

sehingga dapat menghindari terjebaknya algoritma pada sebuah solusi lokal. Kombinasi keduanya, atau yang dikenal sebagai metode Hibrida GA-SA, mampu meningkatkan efektivitas proses optimasi dengan memperluas jangkauan pencarian solusi serta meningkatkan kualitas hasil akhir [5].

Melalui penerapan metode tersebut, diharapkan dapat diperoleh solusi rute pengangkutan sampah yang lebih efisien dengan jarak tempuh yang lebih rendah dan pemanfaatan kapasitas kendaraan yang lebih optimal [6]. Penerapan metode ini diharapkan tidak hanya dapat mengurangi waktu dan biaya operasional, tetapi juga meningkatkan kinerja pelayanan kebersihan yang dikelola oleh Pemerintah Kota Kendari.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya di antaranya adalah yang dilakukan oleh Pakusadewa dkk. Penelitian ini menghasilkan rekomendasi rute pengangkutan sampah optimal dengan Hibrida GA-SA dari sejumlah TPS dalam lingkup Kota Denpasar [5]. Penelitian lain yang dilakukan oleh Sajid, Jafar, dan Sharma dengan pengujian optimasi rute menggunakan Hibrida GA-SA pada 86 contoh kasus pengujian menunjukkan bahwa solusi dengan Hibrida GA-SA memiliki tingkat kesamaan 30% dari solusi terbaik yang telah disiapkan, juga menawarkan solusi lain yang lebih baik pada satu contoh kasus [7]. Selanjutnya penelitian Firmansyah, Novianingsih dan Serviana menunjukkan bahwa masalah perutean pada distribusi salah satu perusahaan di Kota Bandung dapat diselesaikan dengan Hibrida GA-SA [8]. Yu dkk. dalam penelitiannya menghasilkan bahwa Hibrida GA-SA dapat diimplementasikan pada masalah perutean dalam pengelolaan sampah kota [6]. Liu, Qin dan Liu dalam penelitiannya menghasilkan bahwa penyelesaian VRP dengan Hibrida GA-SA mampu menghasilkan jarak tempuh yang lebih sedikit hingga lebih dari 10% dibandingkan diselesaikan dengan GA, SA, dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) [9].

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut ditemukan bahwa Hibrida GA-SA dapat diaplikasikan dalam optimasi VRP, utamanya dalam kasus rute pengangkutan sampah dan menghasilkan solusi yang lebih optimal dibandingkan GA atau SA yang dijalankan terpisah.

2.1. Optimasi Rute

Optimasi dapat diartikan sebagai tindakan pengoptimalan, dimana pengoptimalan dapat diartikan sebagai proses, cara, perbuatan menjadikan sesuatu sebagai yang paling baik atau paling tinggi. Oleh karena itu, optimasi dapat diartikan pula sebagai tindakan pemanfaatan sumber daya yang terbatas, dalam hal ini optimasi dilakukan untuk memecahkan masalah komputasi dengan mencari solusi terbaik dari beberapa solusi dalam daerah yang mungkin (*feasible region*) dengan mematuhi sejumlah batasan

(*constraints*) [10]. Dalam hal rute, optimasi rute dapat berarti proses atau cara dalam menentukan rute terbaik yang mengurangi jarak dan waktu tempuh serta biaya [11]. Optimasi rute dilakukan untuk memperoleh solusi rute terbaik, rute dengan pemanfaatan sumber daya paling minimum dan dengan efisiensi dan efektivitas paling maksimum.

2.2. Vehicle Routing Problem (VRP)

Vehicle Routing Problem (VRP) merupakan suatu model optimasi yang menentukan penggunaan rute kendaraan secara efisien dalam mengunjungi sejumlah lokasi pelanggan [12]. VRP bertujuan untuk menemukan solusi optimal dalam penentuan rute kendaraan yang mengirimkan produk dari depot ke pelanggan.

Dalam masalah rute pengangkutan sampah, VRP dapat digunakan sebagai pemecahan masalah, di mana setiap armada pengangkutan sampah akan melalui sebuah dalam mengunjungi beberapa pelanggan, atau dalam hal ini ialah Tempat Penampungan Sementara (TPS), yang selanjutnya akan diangkut seluruh sampah akan diangkut menuju Tempat Pemrosesan Akhir (TPA).

2.3. Algoritma Genetika (GA)

Algoritma Genetika (GA) adalah metode komputasi berbasis evolusi yang terinspirasi dari prinsip seleksi alam dan mekanisme genetika dalam organisme biologis, sebagaimana dijelaskan dalam teori evolusi oleh Charles Darwin [13]. Dengan pendekatan evolusi, algoritma ini dapat memecahkan masalah matematis yang kompleks sehingga sering digunakan dalam teknik optimasi. Dalam menyelesaikan masalah, GA akan melalui beberapa tahap yaitu:

- Inisialisasi Awal:** Bertujuan untuk menghasilkan sejumlah kromosom sesuai dengan jumlah populasi yang telah ditetapkan. Masing-masing kromosom merepresentasikan alternatif solusi terhadap masalah dengan jumlah gen dalam setiap kromosom yang dapat bervariasi. Dalam pendekatan ini digunakan representasi permutasi, di mana setiap gen berupa bilangan bulat yang menunjukkan indeks simpul dari lokasi tertentu [5].
- Evaluasi *Fitness*:** Nilai *fitness* merupakan indikator yang digunakan untuk menilai kualitas suatu solusi, di mana kromosom dengan nilai *fitness* yang lebih tinggi memiliki kemungkinan lebih besar untuk dipertahankan dalam populasi [14]. Adapun fungsi *fitness* dalam evaluasi solusi pada penelitian ini dirumuskan dipengaruhi oleh besaran jarak tempuh dan penalti, di mana semakin besar jarak tempuh dan semakin besar penalti maka nilai *fitness* akan semakin kecil dan menunjukkan solusi ini kurang optimal. Sedangkan penentuan besaran penalti pada nilai *fitness* suatu solusi dilakukan dengan memeriksa kesesuaian rute terhadap mekanisme pengangkutan sampah yaitu kapasitas

armada tidak boleh terlampaui serta jarak antar titik dalam satu rute tidak terlalu jauh. Pada penelitian ini, jarak maksimum antar titik ditetapkan sebesar lima kilometer.

- c. Seleksi: Bertujuan untuk memilih solusi terbaik dari populasi berdasarkan nilai *fitness*, sehingga kromosom dengan kualitas lebih baik memiliki peluang lebih besar untuk dipertahankan dan diturunkan ke generasi berikutnya [14]. Proses seleksi dalam penelitian ini menggunakan metode *Tournament Selection* dengan strategi *elitism*, di mana *Tournament Selection* akan memilih beberapa kromosom secara acak lalu membandingkan nilai *fitness*-nya, di mana kromosom terbaik dipilih sebagai induk. Sementara itu, *elitism* akan memastikan kromosom dengan *fitness* terbaik tetap dipertahankan ke generasi berikutnya. Sehingga kombinasi keduanya akan menjaga kualitas populasi dan mempercepat konvergensi menuju solusi optimal.
- d. *Crossover*: Operator GA yang berfungsi menggabungkan dua kromosom induk untuk menghasilkan kromosom anak. Operator ini bekerja dengan membentuk *offspring* melalui pertukaran sebagian gen dari kedua induk [13]. Metode *crossover* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Nearest-Neighbor Crossover* (NNX). NNX adalah metode *crossover* yang berfokus pada pelestarian hubungan kedekatan antar simpul (*node*) dari kromosom induk [7]. Prinsip dasarnya adalah solusi yang baik terbentuk dari pasangan simpul yang saling berdekatan (*nearest neighbors*) dan tidak melewati batas kapasitas muatan kendaraan, sehingga dalam proses pembentukan kromosom anak, NNX akan memprioritaskan pewarisan simpul berikutnya yang memiliki jarak terdekat dan tidak melebihi batas muatan.
- e. Mutasi: Bertujuan menghasilkan individu baru melalui perubahan susunan kromosom pada satu individu [13]. Perubahan ini dilakukan dengan cara menukar posisi antara beberapa gen, sehingga dapat meningkatkan keragaman populasi dan mencegah konvergensi prematur. Metode mutasi dalam penelitian ini menggunakan empat metode mutasi, yaitu *Swap*, *Inversion*, *2-opt**, dan *Exchange Operator*. *Swap* dilakukan dengan menukar posisi dua gen dalam kromosom, sementara *Inversion* membalik urutan gen pada sub-urutan tertentu. *2-opt** digunakan untuk menghasilkan alternatif jalur dengan membalik lintasan antara dua titik, sedangkan *Exchange* memindahkan gen ke posisi lain dalam kromosom [7].

2.4. Simulated Annealing (SA)

Simulated Annealing (SA) merupakan algoritma optimasi yang didasarkan pada prinsip proses pendinginan logam dalam bidang metalurgi. Prinsip dari algoritma ini meniru mekanisme penurunan suhu

secara bertahap untuk mencapai struktur kristal yang stabil dan optimal yang kemudian diadaptasi menjadi algoritma untuk mencari solusi terbaik dalam suatu permasalahan [5].

Adapun SA bekerja dengan tahap-tahap sebagai berikut [15]:

- a. Membuat populasi awal.
- b. Menentukan nilai temperatur yang berfungsi sebagai parameter pengendali algoritma.
- c. Pencarian solusi tetangga (*neighborhood search*) dalam SA dilakukan dengan melakukan perubahan kecil pada struktur solusi saat ini, sehingga terbentuk solusi tetangga yang masih layak tetapi memiliki potensi perbaikan
- d. Menerima solusi menggunakan solusi tetangga dengan nilai probabilitas Boltzman
- e. Menurunkan temperatur secara bertahap hingga mencapai batas yang telah ditentukan, lalu menggunakan solusi yang diperoleh sebagai titik awal pada iterasi berikutnya.
- f. Mengulangi proses tersebut hingga memenuhi batas iterasi.

2.5. Hibrida Algoritma Genetika dan Simulated Annealing (GA-SA)



Gambar 1. Alur Proses Hibrida GA-SA

Hibrida Algoritma Genetika dan *Simulated Annealing* (GA-SA) merupakan kombinasi penerapan antara Algoritma Genetika (GA) dan *Simulated Annealing* (SA). Tujuan dari penggabungan ini adalah memaksimalkan keunggulan optimasi yang dimiliki masing-masing algoritma sehingga dapat meningkatkan efektivitas pencarian solusi optimal pada permasalahan optimasi yang kompleks. Dengan

pendekatan hibrida, kelemahan pada salah satu algoritma dapat dilengkapi oleh yang lain, sehingga memungkinkan diperolehnya solusi optimum secara global [16]. Tahapan proses ini dapat dilihat pada Gambar 1 [14].

Proses optimasi rute dengan Hibrida GA-SA pada Gambar 1 diawali dengan konversi data menjadi kromosom menggunakan integer *encoding*. Kemudian dilakukan langkah-langkah seperti berikut:

1. Inisialisasi populasi dilakukan secara acak.
2. Tahap evaluasi dan seleksi dilakukan menghitung nilai *fitness* sebagai indikator kualitas solusi
3. *Crossover* diterapkan pada kromosom-kromosom yang bertahan menggabungkan segmen gen dari dua individu induk untuk menghasilkan kromosom anak.
4. Mutasi dilakukan pada kromosom hasil *crossover* dengan mengubah gen secara acak untuk menjaga keragaman populasi.
5. Pengecekan terminasi GA dengan memeriksa jika jumlah generasi telah mencapai batas maksimum, maka kromosom terbaik dilanjutkan ke tahap SA. Jika belum, proses GA diulang kembali.
6. SA dimulai dengan memodifikasi solusi (kromosom) terbaik secara acak, lalu memilih solusi berdasarkan probabilitas yang mempertimbangkan perbedaan *fitness* serta suhu (*temperature*) saat ini.
7. Perbarui suhu dilakukan sesuai laju pendinginan (*cooling rate*).
8. Pengecekan terminasi SA dengan memeriksa jika suhu telah mencapai batas penghentian, maka proses dihentikan; jika belum, dilakukan modifikasi dan evaluasi solusi kembali.
9. Solusi akhir ditampilkan sebagai rute optimum setelah kondisi penghentian terpenuhi.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan melalui pencarian dan analisis sumber terhadap berbagai informasi yang telah dipublikasikan, seperti jurnal, buku, artikel, dan sumber daya lainnya terkait dengan topik penelitian. Studi literatur akan membantu dalam memahami landasan teori, konsep-konsep terkini, dan temuan-temuan terdahulu yang terkait dengan optimasi rute, VRP, GA, dan SA.

3.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan secara langsung dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Kendari melalui wawancara dengan Kepala Seksi Angkutan Dinas Lingkungan Hidup Kota Kendari. Tujuan dari pengumpulan data adalah untuk memperoleh data rute pengangkutan sampah, dan pemahaman mengenai data tersebut dalam alur dari pelaksanaan teknis pengelolaan sampah di Kota Kendari.

3.3. Implementasi Hibrida Algoritma Genetika dan *Simulated Annealing* (GA-SA)

Implementasi Hibrida Algoritma Genetika dan *Simulated Annealing* (GA-SA) adalah proses penerapan kode dan logika program untuk melakukan optimasi rute. Implementasi ini dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman JavaScript melalui *runtime environment* Node.js yang bertujuan untuk melakukan optimasi rute pada kasus perutean armada pengangkut sampah di Kota Kendari.

3.4. Perbandingan antara GA, SA dan Hibrida GA-SA

Setelah implementasi, dilakukan perbandingan terhadap performa Hibrida GA-SA dengan GA dan SA tunggal dengan menggunakan beberapa metrik evaluasi, sehingga analisis ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana metode hibrida GA-SA mampu memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan penggunaan GA atau SA secara tunggal.

3.5. Perbandingan Rute Hasil Optimasi dengan Rute Saat Ini

Hasil optimasi yang diperoleh dari metode hibrida GA-SA dibandingkan dengan rute aktual yang digunakan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kota Kendari. Dari hasil analisis perbandingan ini diharapkan dapat disimpulkan bahwa metode hibrida GA-SA memberikan rute yang lebih efisien dan efektif dalam mendukung sistem pengangkutan sampah di Kota Kendari.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengumpulan Data

Data yang diperoleh untuk penelitian ini bersama pihak Dinas Lingkungan Hidup Kota Kendari adalah data pengangkutan sampah berupa rute yang mencakup 60 armada pengangkutan sampah dengan lokasi TPA dan seluruh TPS yang dikunjungi dimasukkan ke dalam data rute, di mana terdapat satu titik TPA dan 112 titik TPS, di mana setiap armada dengan kapasitas muatan sebesar tiga ton akan melakukan perjalanan sesuai rute untuk mengangkut muatan hingga memenuhi kapasitasnya. Mekanisme pengangkutan dilakukan dengan pola perjalanan dari TPA menuju beberapa TPS, lalu kembali ke TPA.

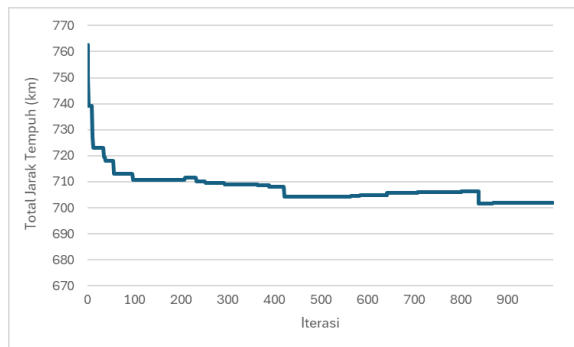
4.2. Implementasi Hibrida GA-SA

Optimasi rute dilakukan dengan Hibrida GA-SA berdasarkan parameter yang telah disiapkan dan dijalankan sebanyak 1000 iterasi.

Tabel 1. Parameter Hibrida GA-SA

Parameter	Nilai
Jumlah generasi	50
Ukuran populasi	10
Probabilitas <i>crossover</i>	1
Probabilitas mutasi	0,8
Temperatur awal	100
Batas temperatur	0
<i>Cooling rate</i>	0,5

Tabel 1 menunjukkan parameter-parameter yang digunakan metode Hibrida GA-SA. Pemilihan nilai parameter ini bertujuan untuk memperoleh keseimbangan antara kecepatan konvergensi dan kemampuan algoritma dalam menjelajahi ruang solusi secara optimal. Secara keseluruhan, kombinasi parameter tersebut telah disesuaikan berdasarkan hasil percobaan awal (eksperimen *tuning* parameter) untuk memperoleh keseimbangan antara kualitas hasil optimasi dan efisiensi waktu komputasi.

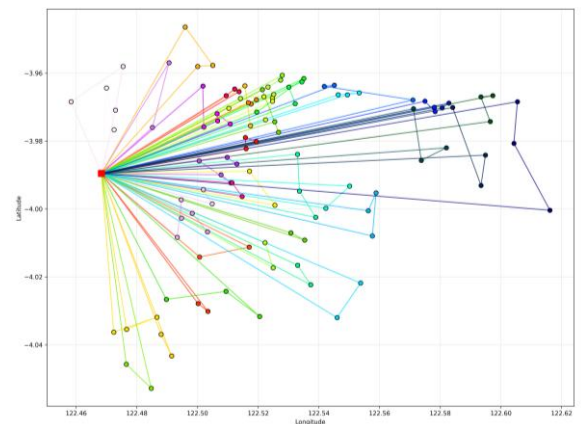


Gambar 2. Grafik Total Jarak Tempuh pada Proses Optimasi Route

Selama proses iterasi yang ditunjukkan pada Gambar 3, total jarak tempuh pada iterasi awal masih tinggi, yaitu 762 km, karena populasi awal rute bersifat acak dan belum teroptimasi. Seiring berjalannya iterasi, total jarak secara bertahap menurun, menandakan algoritma berhasil mengeksplorasi dan mengeksploitasi solusi yang lebih efisien. Setelah iterasi mencapai sekitar 400–500, total jarak mulai stabil di kisaran 700–705 km. Hingga pada akhir iterasi, proses optimasi menghasilkan rute dengan total jarak tempuh yang berkurang hingga 701,8 km.

Setelah proses optimasi selesai diperoleh rute optimum yang mencakup 45 armada kendaraan yang

divisualisasikan pada Gambar 4, di mana rute tersebut menunjang setiap kendaraan untuk menempuh rute dengan jarak tempuh terpendek sekaligus memastikan bahwa muatan tidak melebihi kapasitas maksimal armada, yakni 3 ton per kendaraan.



Gambar 3. Visualisasi Rute Optimum

4.3. Perbandingan antara GA, SA dan Hibrida GA-SA

Perbandingan algoritma dilakukan antara Algoritma Genetika, *Simulated Annealing*, dan hibrida Algoritma Genetika dan *Simulated Annealing*. Tujuan pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa hibrida Algoritma Genetika dan *Simulated Annealing* dapat melakukan optimasi rute dengan jarak tempuh dan muatan seminim mungkin. Skema yang akan dilakukan adalah dengan membandingkan jumlah armada yang dibutuhkan, rata-rata jarak tempuh armada, dan rata-rata muatan armada, serta kualitas berupa nilai *fitness* serta waktu komputasi dari rute optimum yang dihasilkan oleh ketiga algoritma tersebut. Setelah menjalankan ketiga algoritma diperoleh hasil sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian Optimasi Rute dengan Algoritma Genetika

Algoritma	Jumlah Rute	Rata-rata Muatan (ton)	Rata-rata Jarak (km)	Waktu Komputasi (detik)
GA-SA	45	2,89	15,63	1,602
SA	48	2,67	15,22	0,105
GA	49	2,61	15,39	0,180

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa Hibrida Algoritma menawarkan solusi yang lebih baik dari segi rata-rata jarak tempuh, kapasitas muatan kendaraan, dan potensi peningkatan kualitas solusi (*fitness*) pada skenario yang lebih kompleks. Sementara *Simulated Annealing* dan Algoritma Genetika unggul dari sisi kecepatan komputasi,

menjadikannya pilihan ideal untuk skenario dengan keterbatasan waktu proses.

4.4. Perbandingan Rute Hasil Optimasi dengan Rute Saat Ini

Adapun perbandingan rute hasil optimasi dengan rute konvensional saat ini yang dilaksanakan di lapangan.

Tabel 3. Perbandingan Rute Saat Ini dan Rute Hasil Optimasi

Rute	Jumlah Armada	Total Jarak (km)	Rata-rata Jarak (km)	Rata-rata Muatan (ton)
Rute saat ini	60	915,6	15,26	2,22
Rute optimum	45	701,8	15,63	2,89

Berdasarkan hasil perbandingan pada Tabel 3, dapat ditemukan bahwa optimasi rute menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan. Optimasi rute berhasil mengurangi jumlah armada yang digunakan dari 60 unit menjadi 45 unit dan dengan total jarak tempuh dari 915,6 km menjadi 701,8 km. Kedua hal ini menunjukkan penurunan biaya operasional yang cukup besar. Di sisi lain setiap armada dapat dimanfaatkan dengan lebih maksimal, dapat terlihat pada rata-rata jarak tempuh per armada yang mengalami peningkatan dari 15,26 km menjadi 15,63 km (2,4%) dan peningkatan rata-rata muatan dari 2,22 ton menjadi 2,89 ton (30,2%).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian ditemukan bahwa implementasi Hibrida GA-SA terbukti dapat menyelesaikan permasalahan *Vehicle Routing Problem* (VRP) pada kasus pengangkutan sampah di Kota Kendari dengan menggunakan data angkutan Dinas Lingkungan Hidup Kota Kendari. Optimasi rute dengan implementasi Hibrida GA-SA terbukti mampu meningkatkan efisiensi distribusi armada secara signifikan. Rute saat ini yang mencakup 60 unit armada dengan jarak total tempuh 915,6 km berhasil dioptimasi hingga hanya mencakup 45 unit armada dengan total jarak tempuh 701,8 km, sehingga peningkatan ini juga mampu mendorong pemanfaatan armada yang lebih maksimal dari segi pemanfaatan jarak tempuh dan muatan di masing-masing armada. Pada penelitian selanjutnya, diharapkan optimasi rute dapat mengakomodir batasan permasalahan lainnya, seperti batasan waktu yang juga mencakup waktu memuat dan menurunkan sampah. Selain itu, optimasi rute juga dapat adaptif terhadap data volume sampah pada setiap TPS yang bersifat fluktuatif sepanjang waktu, dan terhadap kondisi armada di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Yaqub, F. Baso, E. S. Jafar, and Iswandi, "Fikih Lingkungan: Revitalisasi Pengelolaan Sampah di Kota Kendari," *Al Izzah: Jurnal Hasil-Hasil Penelitian*, vol. 17, no. 2, pp. 111–121, 2022.
- [2] P. H. I. Jaya, *Bunga Rampai - Dakwah dan Transformasi Sosial Pembelajaran Dari Berbagai Daerah*. DI Yogyakarta: Penerbit Samudra Biru, 2023.
- [3] F. H. Siregar and K. Pharmawati, "Analisis Kinerja Sistem Pengangkutan Sampah di TPS Sub Wilayah Kota Cibeunying, Bandung," *Infomatek*, vol. 26, no. 2, pp. 273–284, Dec. 2024, doi: 10.23969/infomatek.v26i2.19317.
- [4] E. Fatma, W. Kartika, and A. Nur Madyanti, "Penentuan Rute Pengangkut Limbah Medis Optimal Menggunakan Vehicle Routing Problem with Time Window pada Kasus Multi Depot," *Jurnal Manajemen dan Organisasi*, vol. 13, no. 4, pp. 324–335, Dec. 2022, doi: 10.29244/jmo.v13i4.38587.
- [5] P. G. Pakusadewa, C. Dewi, and R. C. Wihandika, "Penerapan Hibridisasi Algoritme Genetika dan Simulated Annealing untuk Optimasi Vehicle Routing Problem pada Kasus Pengangkutan Sampah Kota Denpasar," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 9, pp. 3215–3223, 2018.
- [6] V. F. Yu, G. Aloina, H. Susanto, M. K. Effendi, and S. W. Lin, "Regional Location Routing Problem for Waste Collection Using Hybrid Genetic Algorithm-Simulated Annealing," *Mathematics*, vol. 10, no. 12, pp. 2131–2154, Jun. 2022, doi: 10.3390/math10122131.
- [7] M. Sajid, A. Jafar, and S. Sharma, "Hybrid Genetic and Simulated Annealing Algorithm for Capacitated Vehicle Routing Problem," in *International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020, pp. 131–136, doi: 10.1109/PDGC50313.2020.9315798.
- [8] Y. S. Firmansyah, K. Novianingsih, and H. Serviana, "Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem Menggunakan Gabungan Algoritma Genetika dan Simulated Annealing," *Jurnal EurekaMatika*, vol. 9, no. 2, pp. 107–116, 2021.
- [9] Y. Liu, Z. Qin, and J. Liu, "An Improved Genetic Algorithm for the Granularity-Based Split Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup," *Mathematics*, vol. 11, no. 15, pp. 3328–3343, Aug. 2023, doi: 10.3390/math11153328.
- [10] R. N. Devita and A. P. Wibawa, "Teknik-teknik Optimasi Knapsack Problem," *Sains, Aplikasi, Komputasi dan Teknologi Informasi*, vol. 2, no. 1, p. 35, 2020.
- [11] W. Y. Oeitama, F. F. Sitandi, and S. Mas'ud, "Optimasi Rute Pendistribusian Barang Menggunakan Kombinasi Algoritma Branch and Bound dan Cheapest Insertion Heuristic," *Square: Journal of Mathematics and Mathematics Education*, vol. 6, no. 2, pp. 89–104, Oct. 2024, doi: 10.21580/square.2024.6.2.22992.
- [12] M. Arif, M. Suhaimi, Q. Nurlaila, P. Studi Teknik Industri, and S. Teknologi Dumai, "Optimasi Vehicle Routing Problem untuk Mengoptimalkan Distribusi Truk Tangki Cpo di Kota Dumai," *Profisiensi*, vol. 11, no. 2, pp. 107–114, Dec. 2023.
- [13] A. Tohari and Y. P. Astuti, "Penerapan Algoritma Genetika dalam Menentukan Rute Terpendek PT. Pos Cabang Lamongan," *Jurnal Ilmiah Matematika*, vol. 11, no. 3, pp. 458–467, 2023.
- [14] P. Suanpang, P. Jamjuntr, K. Jermsittiparsert, and P. Kaewyong, "Tourism Service Scheduling in Smart City Based on Hybrid Genetic Algorithm Simulated Annealing Algorithm," *Sustainability*,

- vol. 14, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/su142316293.
- [15] W. Sari and J. E. Suseno, "Metode Simulated Annealing untuk Optimasi Penjadwalan Perkuliahan Perguruan Tinggi," *JURNAL SISTEM INFORMASI BISNIS*, vol. 6, no. 2, pp. 133–143, Dec. 2016, doi: 10.21456/vol6iss2pp133-143.
- [16] E. R. Permana, D. M. Midyanti, and R. Hidayati, "Optimasi Pencarian Rute Terpendek Distribusi Barang menggunakan Metode Simulated Annealing (Studi Kasus: Pd Bumi Jaya Indah Kota Pontianak)," *Coding : Jurnal Komputer dan Aplikasi*, vol. 8, no. 03, pp. 9–18, 2020