

Optimasi Penjadwalan Pengangkutan Sampah Secara Adaptif Menggunakan Algoritma Tabu Search

Suprian Ahmad*, Muhammad Ikhsan

Sains dan Teknologi, Ilmu Komputer, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia

Email: ^{1,*}suprianahmad1106@gmail.com, ²mhd.ikhsan@uinsu.ac.id

Email Penulis Korespondensi: suprianahmad1106@gmail.com

Submitted: 06/02/2025; Accepted: 22/02/2025; Published: 28/02/2025

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penjadwalan pengangkutan sampah secara adaptif menggunakan algoritma *Tabu Search*. Pengelolaan sampah yang tidak efisien dapat menyebabkan peningkatan biaya operasional dan penumpukan sampah, sehingga diperlukan pendekatan optimasi yang adaptif. Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini mencakup observasi langsung, wawancara dengan pihak terkait, serta studi pustaka untuk memperoleh data yang relevan. Data yang dikumpulkan meliputi jadwal awal pengangkutan sampah, daftar desa di tiga kecamatan, serta jarak tempuh armada pengangkut sampah. Implementasi algoritma *Tabu Search* dilakukan dengan parameter *tabu_tenure* = 5 dan *max_iterations* = 100. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma ini berhasil mengoptimalkan rute pengangkutan sampah, dengan total biaya optimal sebesar 35,1 di Kecamatan Natal, 17,5 di Kecamatan Panyabungan Kota, dan 11,5 di Kecamatan Kotanopan. Proses optimasi ini meningkatkan efisiensi operasional pengangkutan sampah dengan pengurangan biaya dan waktu tempuh. Selain itu, algoritma *Tabu Search* mampu mengatasi permasalahan rute yang kompleks dengan menemukan solusi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa algoritma *Tabu Search* dapat menjadi solusi adaptif dalam pengelolaan sampah yang lebih efektif dan efisien di Mandailing Natal, serta berpotensi diterapkan di daerah lain dengan kondisi serupa.

Kata Kunci: Optimasi Penjadwalan; Pengangkutan Sampah; Algoritma *Tabu Search*; Mandailing Natal

Abstract—This research aims to optimize waste transportation scheduling adaptively using the Tabu Search algorithm. Inefficient waste management can lead to increased operational costs and accumulation of waste, so an adaptive optimization approach is needed. Data collection techniques in this research include direct observation, interviews with related parties, and literature study to obtain relevant data. The data collected includes the initial schedule for transporting waste, a list of villages in the three sub-districts, and the distance traveled by the waste transport fleet. The implementation of the Tabu Search algorithm was carried out with the parameters *tabu_tenure* = 5 and *max_iterations* = 100. The research results showed that this algorithm was successful in optimizing the waste transportation route, with a total optimal cost of 35.1 in Natal District, 17.5 in Panyabungan Kota District, and 11.5 in Kotanopan District. This optimization process increases the operational efficiency of waste transportation by reducing costs and travel time. In addition, the Tabu Search algorithm is able to overcome complex route problems by finding better solutions than conventional methods. Thus, this research proves that the Tabu Search algorithm can be an adaptive solution for more effective and efficient waste management in Mandailing Natal, and has the potential to be applied in other areas with similar conditions.

Keywords: Scheduling Optimization; Garbage Transportation; Tabu Search Algorithm; Mandailing Natal

1. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah di Mandailing Natal, Indonesia, telah menjadi isu yang semakin mendesak seiring dengan pertumbuhan populasi yang pesat dan urbanisasi yang cepat. Saat ini, pemerintah daerah telah memiliki jadwal pengangkutan sampah yang diterapkan di berbagai wilayah. Namun, jadwal tersebut belum mampu memenuhi kebutuhan secara optimal, terutama karena tidak sesuai dengan pola produksi sampah yang fluktuatif, ketidakmerataan cakupan wilayah pengangkutan, serta kurangnya integrasi data untuk memantau pelaksanaannya secara *real-time*. Data dari Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa jumlah penduduk Mandailing Natal pada tahun 2022 mencapai 478.062 jiwa dengan kepadatan penduduk 72 jiwa per km². Peningkatan jumlah penduduk ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan *volume* sampah, yang melonjak dari 280 ton per hari pada tahun sebelumnya menjadi 350 ton per hari pada tahun 2022. Kendala ini diperburuk oleh koordinasi antarwilayah yang tidak efektif, sehingga pengangkutan sampah sering kali terlambat atau tidak merata, menyebabkan penumpukan di beberapa lokasi strategis dan pinggir. Selain keterbatasan armada dan tenaga kerja, infrastruktur pengelolaan sampah yang terbatas, seperti jaringan jalan yang tidak merata di berbagai wilayah Mandailing Natal, semakin memperparah tantangan yang dihadapi. Masalah ini paling terlihat di daerah-daerah dengan kepadatan penduduk tinggi, di mana pengangkutan sampah sering kali tertunda akibat keterbatasan kapasitas armada. Hal ini menyebabkan sampah menumpuk di beberapa lokasi, yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Jadwal pengangkutan yang ada saat ini belum mampu menyesuaikan diri dengan dinamika volume sampah yang berfluktuasi akibat faktor musiman, kegiatan sosial, dan pola konsumsi masyarakat.

Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan pendekatan yang adaptif dan terarah. Fluktuasi *volume* sampah yang dipengaruhi oleh faktor musiman, kegiatan sosial, dan pola konsumsi merupakan salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam merancang solusi pengangkutan sampah yang efektif. Selain itu, dengan pertumbuhan perkotaan yang cepat di beberapa wilayah, perbedaan dalam kebutuhan pengangkutan sampah antara area perkotaan dan pedesaan menjadi semakin signifikan [1]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih

adaptif dan berbasis teknologi untuk mengatasi tantangan ini. Salah satu solusi yang dapat diimplementasikan adalah optimasi jadwal pengangkutan sampah menggunakan algoritma *Tabu Search*, yang dirancang untuk menyesuaikan jadwal pengangkutan dengan ketersediaan armada, *volume* sampah, dan karakteristik wilayah. Dengan pendekatan ini, diharapkan pengangkutan sampah di Mandailing Natal dapat dilakukan secara lebih efisien, baik di area perkotaan maupun pedesaan, sehingga dapat memenuhi kebutuhan masyarakat dan mendukung pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

Dari beberapa algoritma yang digunakan dalam Optimasi penjadwalan seperti algoritma Genetika, algoritma *Simulated Annealing*, algoritma *Particle Swarm Optimization*, algoritma *Tabu Search* dan algoritma lainnya [2] [3]. Penulis memilih algoritma *Tabu Search* dalam penelitian optimasi penjadwalan pengangkutan sampah karena kemampuannya dalam mengatasi optimum lokal dengan memanfaatkan daftar tabu untuk menghindari langkah-langkah yang telah dieksekusi sebelumnya, fleksibilitasnya yang memungkinkan adaptasi dengan berbagai macam masalah optimasi, efisiensi komputasional yang baik yang sesuai dengan kebutuhan waktu yang terbatas dalam menyelesaikan masalah, kemampuannya untuk menangani masalah besar dengan efektif [4], serta kehandalannya yang teruji dan terbukti dalam berbagai aplikasi dunia nyata maupun literatur penelitian [5]. Dengan memanfaatkan teknologi dan inovasi, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi terhadap efisiensi operasional, keberlanjutan lingkungan, dan peningkatan kualitas layanan pengelolaan sampah di Mandailing Natal.

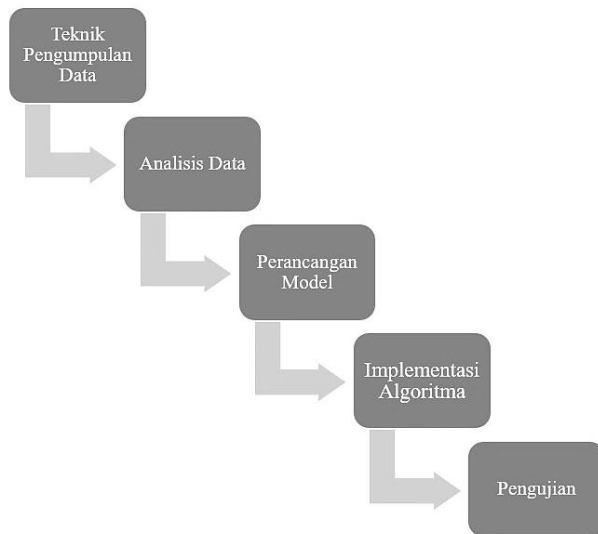
Tabu Search merupakan metode optimasi heuristik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kombinatorial dengan mencari solusi terbaik dalam ruang pencarian yang kompleks [6] [7]. Dalam konteks permasalahan optimasi penjadwalan pengangkutan sampah di Mandailing Natal secara adaptif, algoritma *Tabu Search* dapat diimplementasikan sebagai pendekatan yang efektif. Algoritma ini bekerja dengan menghindari solusi yang telah dievaluasi sebelumnya (disebut sebagai tabu) untuk mencegah stagnasi pada solusi lokal dan menjelajahi ruang pencarian dengan cara yang lebih efisien. Dengan menerapkan *Tabu Search*, pengoptimalkan penjadwalan pengangkutan sampah dapat dilakukan secara adaptif, memungkinkan sistem untuk merespons perubahan dinamis dalam kebutuhan pengangkutan sampah di Mandailing Natal.

Penelitian oleh (Hayati & Laluma, 2022) yang berjudul "Penerapan Algoritma Genetika untuk Optimasi Penjadwalan Pengangkutan Sampah di Kota Bandung" [8]. Dalam penelitian ini menggunakan metode Algoritma Genetika. Metode Algoritma Genetika digunakan untuk Penjadwalan Pengangkutan Sampah di Kota Bandung. Sistem penjadwalan yang dikembangkan mampu memastikan seluruh sampah dapat terangkut secara optimal, sehingga meningkatkan efisiensi proses pengangkutan. Ada juga yang telah diteliti oleh (Turohmi et al., 2019.) yang berjudul "Optimalisasi Penjadwalan Pengangkutan Sampah Menggunakan Algoritma Genetika" [9]. Dalam penelitian ini menggunakan metode Algoritma Genetika. Metode Algoritma Genetika digunakan untuk Optimalisasi Penjadwalan Pengangkutan Sampah. Penelitian ini mampu menghasilkan sebuah sistem optimalisasi penjadwalan pengangkutan sampah dengan menggunakan algoritma genetika, pada iterasi ke 3000 menghasilkan rata-rata nilai fungsi kecocokan sebesar 0.14833 dengan rata-rata 2 pelanggaran dalam waktu 3.26 jam. Persamaan dan pembaharuan pada penelitian yang akan penulis buat dengan penelitian sebelumnya Penelitian sebelumnya telah menggunakan Algoritma Genetika untuk optimalisasi penjadwalan pengangkutan sampah, menghasilkan sistem yang efisien dalam memastikan seluruh sampah terangkut dan meminimalkan pelanggaran jadwal. Adapun pembaruannya, penelitian ini akan mengadaptasi metode *Tabu Search* untuk mengoptimalkan penjadwalan pengangkutan sampah di Mandailing Natal. Pendekatan ini diharapkan mampu menghadirkan solusi adaptif yang lebih efisien dengan fokus pada pengurangan waktu pengangkutan dan peningkatan kinerja sistem secara keseluruhan, melampaui hasil algoritma sebelumnya.

2. METODOLOGI PENELITIAN

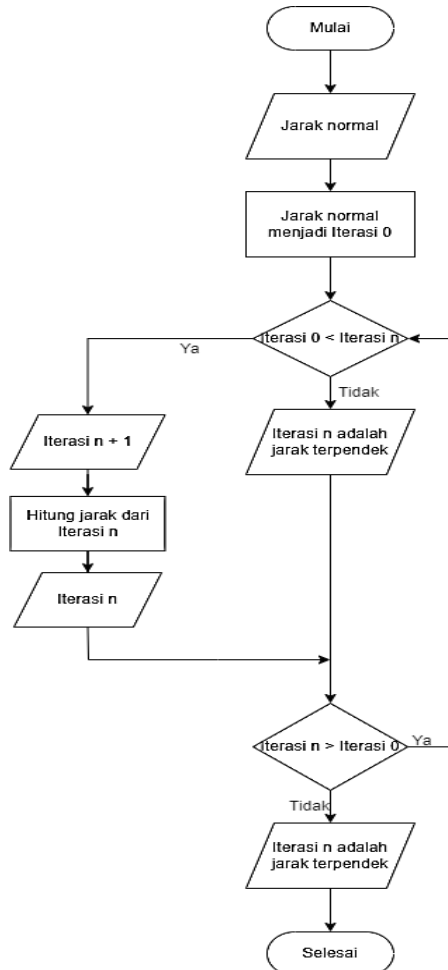
2.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian adalah struktur konseptual yang memberikan arah, mengidentifikasi variabel, dan mengorganisasikan elemen-elemen penting penelitian untuk memastikan alur yang sistematis dan terarah [10]. Dalam penelitian ini, kerangka penelitian mencakup tahapan utama, yaitu teknik pengumpulan data untuk memperoleh informasi yang relevan, analisis data untuk mengolah dan memahami informasi tersebut, perancangan model sebagai langkah awal pengembangan solusi, implementasi algoritma untuk merealisasikan model, dan pengujian untuk memastikan keakuratan serta efektivitas hasil yang dicapai [11].



Gambar 1. Kerangka Penelitian

2.2 Flowchart Algoritma Tabu Search



Gambar 2. Flowchart Algoritma Tabu Search

Gambar 2. adalah *flowchart* algoritma *Tabu Search*. *Flowchart* dimulai dengan menginput jarak normal, kemudian jarak normal menjadi Iterasi 0. Jika Iterasi 0 lebih besar Iterasi n, jika ya maka Iterasi n +1, kemudian hitung jarak Iterasi n, dan jika tidak maka Iterasi n adalah jarak terpendek. Jika Iterasi n > dari Iterasi 0, jika ya maka akan melakukan perulangan sampai Iterasi n tidak lebih besar dari Iterasi 0, dan jika tidak iterasi n adalah jarak terpendek kemudian *flowchart* selesai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Data

Untuk penelitian "Optimasi Penjadwalan Pengangkutan Sampah di Mandailing Natal Secara Adaptif Menggunakan Algoritma *Tabu Search*," data yang digunakan diperoleh dari observasi langsung dan wawancara dengan pihak terkait di 3 kecamatan yang memerlukan pengelolaan sampah. Data yang dikumpulkan meliputi jadwal awal pengangkutan sampah untuk setiap kecamatan, daftar desa yang ada di dalamnya, serta jarak tempuh yang harus dilalui oleh armada pengangkut sampah. Data ini penting untuk menganalisis efisiensi dan penyesuaian jadwal pengangkutan agar lebih optimal, dengan mempertimbangkan faktor rute dan jarak.

Proses penerapan algoritma *Tabu Search* dalam penelitian ini dimulai dengan penyusunan solusi awal, yaitu penjadwalan pengangkutan sampah untuk setiap kecamatan berdasarkan data yang ada. Algoritma ini bekerja dengan mencari solusi optimal secara iteratif, dengan cara mengganti solusi yang ada dengan solusi baru yang lebih baik, dan menggunakan pendekatan tabu untuk menghindari terjebak nya algoritma pada solusi lokal yang tidak optimal [12], [13]. Dalam setiap iterasi, evaluasi dilakukan berdasarkan kriteria efisiensi waktu dan biaya pengangkutan yang dipengaruhi oleh jarak antar desa dan kecamatan.

Selama proses optimasi, algoritma *Tabu Search* akan melakukan pencarian secara adaptif, menyesuaikan dengan dinamika dan perubahan yang terjadi di lapangan, seperti perubahan jumlah sampah, perubahan rute, atau jadwal yang lebih efisien. Hasil dari optimasi ini diharapkan dapat menghasilkan jadwal pengangkutan yang lebih efisien dan mengurangi biaya operasional, serta meningkatkan kualitas layanan pengelolaan sampah di Mandailing Natal.

3.2 Representasi Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari observasi langsung dan wawancara dengan pihak terkait di tiga kecamatan di Mandailing Natal yang memerlukan pengelolaan sampah. Jumlah data yang dikumpulkan meliputi jadwal pengangkutan sampah awal dari setiap kecamatan, daftar desa yang ada di masing-masing kecamatan, serta jarak tempuh antar desa di kecamatan. Total data yang dikumpulkan mencakup informasi terkait rute dan jarak yang diperlukan untuk pengangkutan sampah. Proses *Tabu Search* akan diterapkan untuk mengoptimalkan jadwal pengangkutan dengan mencari solusi terbaik berdasarkan efisiensi waktu dan biaya, serta menghindari terjebak nya pada solusi lokal yang tidak optimal [14]. Adapun data yang digunakan ialah sebagai berikut:

Tabel 1. Jarak Antar Rute Kecamatan di Mandailing Natal

Lokasi	Rute	Jarak (km)
Kecamatan Kotanopan	Depot - Batahan	1.2
	Depot - Huta Baringin	1.8
	Depot - Huta Padang	2.3
	Depot - Huta Pungkut	2.7
	Depot - Huta Puli	3.1
	Depot - Botung	3.6
	Depot - Huta Dangka	4.2

	Gunung Tua - Huta Muara	0.5
Kecamatan Natal	Pasar I Natal - Pasar II Natal	8
	Pasar I Natal - Pasar III Natal	9.7
	Pasar I Natal - Pasar V Natal	5.9
	Pasar I Natal - Balimbing	9
	Pasar I Natal - Bintuas	1.8
	Pasar I Natal - Bonda Kase	2.1

	Bonda Kase - Rukun Jaya	9.1
Kecamatan Panyabungan Kota	Depot - Adian Jior	3
	Depot - Aek Banir	4
	Depot - Perbangunan	5
	Depot - Darussalam	5.5
	Depot - Gunung Barani	6
	Depot - Gunung Manaon	6.5
	Depot - Panyabungan	7
	Depot - Kampung Padang	7.5

Lumban Pasir - Siobon	0.5	

Tabel 1. Jarak Antar Rute Kecamatan di Mandailing Natal akan diubah menjadi matriks jarak yang digunakan dalam perhitungan algoritma *Tabu Search*. Data jarak antar kecamatan, seperti Depot, Batahan, Huta Baringin, dan lainnya, akan diorganisir dalam bentuk matriks untuk digunakan sebagai *input* dalam proses optimasi rute. Matriks ini akan membantu algoritma *Tabu Search* dalam mencari solusi optimal untuk penjadwalan pengangkutan sampah dengan mempertimbangkan jarak antar titik kecamatan [15]. Adapun tabel matriks tiap kecamatan di Mandailing Natal ialah sebagai Tabel 1. Jarak Antar Rute Kecamatan di Mandailing Natal akan diubah menjadi matriks jarak yang digunakan dalam perhitungan algoritma *Tabu Search*. Data jarak antar kecamatan, seperti Depot, Batahan, Huta Baringin, dan lainnya, akan diorganisir dalam bentuk matriks untuk digunakan sebagai *input* dalam proses optimasi rute. Matriks ini akan membantu algoritma *Tabu Search* dalam mencari solusi optimal untuk penjadwalan pengangkutan sampah dengan mempertimbangkan jarak antar titik kecamatan [16].

3.3 Implementasi *Tabu Search*

Implementasi algoritma *Tabu Search* dalam penelitian ini dimulai dengan membangun solusi awal, yaitu penjadwalan pengangkutan sampah berdasarkan data yang tersedia, termasuk jadwal awal, rute antar desa, dan jarak tempuh. Algoritma ini kemudian melakukan pencarian *iteratif* untuk memperbaiki solusi dengan mengganti elemen-elemen dalam jadwal pengangkutan, seperti urutan rute atau waktu pengangkutan, guna mengurangi biaya dan waktu tempuh [17]. Dalam setiap iterasi, *Tabu Search* akan mengevaluasi solusi baru berdasarkan kriteria yang telah ditentukan, seperti efisiensi waktu dan biaya operasional, serta menggunakan strategi tabu untuk mencegah algoritma kembali ke solusi yang telah dieksplorasi sebelumnya. Proses ini berlanjut hingga ditemukan solusi optimal atau solusi yang cukup baik untuk pengelolaan sampah yang lebih efisien [18].

Pada data di bawah ini, data matriks yang digunakan untuk perhitungan *Tabu Search* adalah data yang terkait dengan penjadwalan pengangkutan sampah di kecamatan Kotanopan, Mandailing Natal. Pembuatan data set ini berdasarkan rute dan jarak tempuh antar desa yang telah dihitung sebelumnya, yang kemudian disusun dalam bentuk matriks tabu [19]. Setiap rute mewakili jalur pengangkutan sampah yang harus dilalui oleh armada, dengan memperhitungkan jarak dan waktu tempuh antar desa dalam satu kecamatan. Matriks tabu ini akan digunakan dalam proses *Tabu Search* untuk mencari solusi optimal dalam penjadwalan pengangkutan sampah, dengan tujuan untuk mengurangi biaya dan waktu yang dibutuhkan dalam proses tersebut.

Sebelum melakukan pencarian tabu, langkah awal yang harus dilakukan adalah menentukan jalur awal atau solusi awal yang akan digunakan sebagai titik awal eksplorasi. Solusi ini dapat diperoleh secara acak atau berdasarkan *heuristik* tertentu untuk memastikan pencarian dapat berjalan secara optimal. Langkah selanjutnya, setiap iterasi akan mempertimbangkan dua alternatif jalur dengan melakukan pertukaran dua titik, kemudian memilih jalur terbaik dari alternatif yang tersedia, dan akhirnya menambahkan pergerakan (*swap*) tersebut ke dalam tabu list untuk menghindari solusi yang sudah dieksplorasi sebelumnya [20].

Jalur Awal: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Muara → Huta Padang → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 17.6

1. Iterasi 1:

Tabu List:

Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Muara → Huta Padang → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 17.6

Tetangga (Jalur alternatif berikutnya):

a. Alternatif 1:

Jalur: Depot → Huta Baringin → Batahan → Huta Muara → Huta Padang → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: $1.8+0.6+4.7+3.5+0.5+0.5+1.0+1.0+1.5+3.6=18.7$

b. Alternatif 2:

Jalur: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: $1.2+0.6+0.5+3.5+3.0+0.5+1.0+1.0+1.5+3.6=16.4$

Jalur terbaik: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 16.4

2. Iterasi 2:

Tabu List:

Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Muara → Huta Padang → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 17.6

Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 16.4

Tetangga (Jalur alternatif berikutnya):

a. Alternatif 1:

Jalur: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Dangka → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: $1.2+0.6+0.5+3.5+3.0+1.5+1.0+2.0+1.5+3.6=18.4$

b. Alternatif 2:

Jalur: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Botung → Gunung Tua → Depot

Panjang jalur: $1.2+0.6+0.5+3.5+3.0+0.5+1.0+0.5+1.5+5.3=17.6$

Jalur terbaik: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Dangka → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 17.6

3. Iterasi 3:

Tabu List:

Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Muara → Huta Padang → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 15.7

Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 15.6

Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Dangka → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot

Tetangga (Jalur alternatif berikutnya):

a. Alternatif 1:

Jalur: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Dangka → Huta Pungkut → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: $1.2+0.6+0.5+3.5+1.5+1.5+0.5+2.0+1.5+3.6=16.9$

b. Alternatif 2:

Jalur: Depot → Botung → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Batahan → Depot

Panjang jalur: $3.6+2.0+0.5+3.5+3.0+0.5+1.0+1.0+4.1+1.2 = 20.4$

Jalur terbaik: Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Dangka → Huta Pungkut → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot

Panjang jalur: 16.9

Setelah melakukan perhitungan beberapa iterasi dari iterasi 1-6 didapat beberapa tabu list jalur terbaik tiap iterasi. Adapun hasil jalur terbaik atau tabu list tiap iterasi dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. Hasil Tabu List

Iterasi	Rute Terbaik	Panjang Jalur
Iterasi 1	Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Botung → Depot	16.4
Iterasi 2	Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Dangka → Huta Pungkut → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot	17.6
Iterasi 3	Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Muara → Huta Dangka → Huta Pungkut → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot	16.9
Iterasi 4	Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Pungkut → Huta Muara → Huta Dangka → Huta Puli → Gunung Tua → Botung → Depot	15.4
Iterasi 5	Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Puli → Huta Pungkut → Huta Dangka → Huta Muara → Gunung Tua → Botung → Depot	12.4
Iterasi 6	Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Puli → Huta Pungkut → Gunung Tua → Huta Muara → Huta Dangka → Botung → Depot	12.9

Berdasarkan hasil akhir yang di dapat maka rute minimum yang terpendek berada pada iterasi 5 dengan rute terbaik yaitu, “Depot → Batahan → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Puli → Huta Pungkut → Huta Dangka → Huta Muara → Gunung Tua → Botung → Depot” dan panjang jalur = 12.4 km.

3.3 Penerapan

Setelah serangkaian implementasi Algoritma *Tabu Search* dilakukan, tahap berikutnya adalah tahap penerapan. Tahap ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana model yang telah dibangun dapat mengoptimalkan penjadwalan pengangkutan sampah secara adaptif dan efisien. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan *Jupyter Notebook* sebagai *platform* untuk mengimplementasikan Algoritma *Tabu Search* dalam menyusun jadwal

pengangkutan yang optimal. Penerapan ini melibatkan penggunaan model yang telah diuji pada berbagai skenario untuk menilai kinerjanya berdasarkan efisiensi rute, jarak tempuh, serta kemampuan dalam menyesuaikan perubahan kondisi operasional.

Kode fungsi `calculate_route_cost` digunakan untuk menghitung total biaya perjalanan berdasarkan rute yang diberikan dan matriks jarak. Fungsi ini menerima dua argumen: `route`, yang berisi urutan titik yang dilalui dalam perjalanan, dan `distance_matrix`, yang merupakan matriks dua dimensi yang menyimpan jarak antar titik. Fungsi pertama-tama menginisialisasi variabel `cost` dengan nilai 0.0, lalu melakukan iterasi pada setiap pasangan titik berturut-turut dalam rute (dari titik ke-1 sampai titik terakhir) untuk menambahkan jarak antar titik yang ada pada matriks jarak ke dalam variabel `cost`. Setelah itu, jarak dari titik terakhir kembali ke titik awal juga ditambahkan untuk melengkapi perjalanan *siklik*. Hasil akhirnya adalah total biaya perjalanan yang dihitung berdasarkan jarak antar titik-titik dalam rute.

Kode fungsi `generate_neighbors` digunakan untuk menghasilkan tetangga dari rute saat ini dalam konteks optimasi algoritma pencarian solusi, seperti pada metode *Tabu Search* atau algoritma pencarian lainnya. Fungsi ini menerima satu argumen yaitu `current_route`, yang merupakan daftar urutan titik yang menggambarkan rute yang sedang dianalisis. Fungsi ini kemudian membuat daftar kosong *neighbors* untuk menyimpan tetangga yang dihasilkan. Dua buah indeks `i` dan `j` digunakan untuk melakukan pertukaran posisi dua titik dalam rute yang ada, dengan cara menukar elemen pada posisi `i` dan `j` pada `current_route` dan menyimpan hasilnya dalam daftar tetangga. Proses ini dilakukan untuk semua pasangan titik dalam rute, kecuali titik pertama dan terakhir, untuk menghasilkan seluruh tetangga yang mungkin. Hasil akhirnya adalah daftar *neighbors* yang berisi rute-rute baru yang dihasilkan dari pertukaran titik-titik dalam rute yang diberikan.

Kode fungsi `tabu_search` mengimplementasikan algoritma pencarian Tabu untuk mencari solusi optimal dalam masalah perjalanan atau rute dengan menggunakan matriks jarak antar titik. Fungsi ini menerima empat argumen: `distance_matrix` (matriks jarak antar titik), `start_node` (titik awal perjalanan), `tabu_tenure` (panjang durasi tabu), dan `max_iterations` (jumlah iterasi maksimum). Pertama, variabel `nodes` diinisialisasi sebagai daftar titik-titik dari matriks jarak, dan `current_route` dibuat sebagai urutan acak dari titik-titik tersebut. Titik awal dipastikan berada di posisi pertama dalam rute. Kemudian, solusi terbaik (`best_route`) diinisialisasi sebagai rute saat ini, dan biaya perjalanan (`best_cost`) dihitung menggunakan fungsi `calculate_route_cost`. Daftar `tabu_list` juga diinisialisasi untuk menyimpan langkah-langkah yang sedang tabu. Dalam setiap iterasi (hingga mencapai batas maksimum), fungsi ini menghasilkan tetangga dari rute saat ini menggunakan fungsi `generate_neighbors`, namun bagian dari pencarian solusi lebih lanjut belum lengkap dalam kode ini. Tujuan utama dari algoritma Tabu adalah untuk menghindari solusi yang sudah pernah dijelajahi sebelumnya dengan mencatat langkah-langkah tabu.

Kode di atas melanjutkan implementasi algoritma pencarian Tabu dengan mengevaluasi tetangga dari rute saat ini. Pertama, untuk setiap tetangga yang dihasilkan sebelumnya, dihitung biaya perjalanan menggunakan fungsi `calculate_route_cost`, dan hasilnya disusun dalam daftar `neighbor_costs`, yang kemudian diurutkan berdasarkan biaya. Selanjutnya, algoritma memilih tetangga terbaik yang belum ada dalam daftar tabu, yaitu yang memiliki biaya terendah dan belum pernah dikunjungi. Rute saat ini (`current_route`) diperbarui menjadi tetangga yang terpilih, dan biaya perjalanan (`current_cost`) juga diperbarui. Jika tetangga terpilih belum ada dalam daftar tabu, maka tetangga tersebut ditambahkan ke dalam `tabu_list`, dan jika panjangnya melebihi durasi tabu (`tabu_tenure`), elemen pertama dalam daftar tabu dihapus. Jika solusi yang diperoleh memiliki biaya yang lebih rendah daripada solusi terbaik yang sudah ditemukan, maka solusi terbaik (`best_route` dan `best_cost`) diperbarui. Proses ini diulang hingga iterasi maksimum tercapai, dan akhirnya algoritma mengembalikan rute terbaik yang ditemukan beserta biayanya.

Kode di atas menerapkan algoritma *Tabu Search* untuk menemukan rute terpendek dalam masalah pengangkutan sampah di Mandailing Natal, menggunakan matriks jarak antar desa di kecamatan. Setiap elemen dalam matriks menyatakan jarak antara dua desa, seperti jarak antara Depot dan Batahan yang adalah 1.2 km. Algoritma dimulai dari kecamatan Depot dan berusaha menemukan rute terbaik dengan memperhatikan dua parameter penting: *tabu tenure* yang mengatur berapa lama sebuah solusi dianggap "terlarang" setelah dikunjungi (5 iterasi), serta *max iterations* yang membatasi jumlah iterasi pencarian solusi hingga 100. Fungsi `tabu_search` bertugas untuk mengeksplorasi ruang solusi dan menghindari solusi yang sudah dipertimbangkan, dengan tujuan mencari rute terpendek dari titik awal ke titik tujuan.

Berdasarkan hasil implementasi model *Tabu Search*, diperoleh rute terbaik untuk optimasi penjadwalan pengangkutan sampah di tiga wilayah berbeda dengan biaya minimum. Untuk wilayah Kecamatan Natal, rute optimal yang ditemukan adalah Pasar I Natal → Buburan → Pardamean Baru → Rukun Jaya → Pasar II Natal → Pasar III Natal → Perkebunan Patiluban → Panggautan → Bonda Kase → Kampung Sawah → Bintuas → Pasar V Natal → Balimbing → Patiluban Hilir → Patiluban Mudik dengan total biaya 35,1. Di Kecamatan Panyabungan Kota, rute optimal yang dihasilkan adalah Depot → Aek Banir → Darussalam → Gunung Barani → Gunung Manaon → Panyabungan → Kampung Padang → Lumban Pasir → Siobon → Perbangunan → Adian Jior dengan total biaya 17,5. Sementara itu, untuk wilayah Kotanopan, rute terbaik yang diperoleh adalah Depot → Huta Baringin → Huta Padang → Huta Pungkut → Huta Puli → Huta Dangka → Gunung Tua → Huta Muara → Botung → Batahan dengan biaya 11,5. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma *Tabu Search* mampu

menghasilkan rute pengangkutan yang efisien dengan biaya yang lebih optimal, sehingga dapat mendukung pengelolaan sampah yang lebih efektif di wilayah Mandailing Natal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, penulis menyimpulkan yaitu implementasi algoritma *Tabu Search* berhasil mengoptimalkan penjadwalan pengangkutan sampah di Mandailing Natal secara adaptif. Data diperoleh melalui observasi dan wawancara di tiga kecamatan, mencakup jadwal awal, daftar desa, dan jarak tempuh armada. Dengan iterasi = 6, dan jalur alternatif tiap iterasi = 2, serta verifikasi manual menggunakan tabel matriks untuk Kecamatan Kotanopan, algoritma ini mampu menentukan rute yang lebih efisien dan biaya optimal, meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah dan implementasi algoritma *Tabu Search* dengan parameter *tabu tenure* = 5 dan *max iterations* = 100 berhasil diterapkan pada model optimasi penjadwalan pengangkutan sampah di tiga kecamatan berdasarkan data yang diperoleh melalui observasi langsung dan wawancara dengan pihak terkait. Data yang digunakan mencakup jadwal awal pengangkutan, daftar desa di setiap kecamatan, serta jarak tempuh armada pengangkut sampah. Hasil optimasi menunjukkan bahwa rute terbaik di Kecamatan Natal memiliki total biaya 35,1, di Kecamatan Panyabungan Kota sebesar 17,5, dan di Kecamatan Kotanopan sebesar 11,5. Dengan hasil ini, algoritma *Tabu Search* terbukti mampu mengoptimalkan rute pengangkutan sampah dengan biaya minimum, sehingga meningkatkan efisiensi operasional serta mendukung pengelolaan sampah yang lebih efektif di wilayah Mandailing Natal.

REFERENCES

- [1] R. B. Prihatin and S, "Pengelolaan Sampah di Kota Bertipe Sedang: Studi Kasus di Kota Cirebon dan Kota Surakarta," *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*, vol. 11, no. 1, Jun. 2020, doi: 10.22212/aspirasi.v11i1.1505.
- [2] A. S. Laswi, "Perbandingan Algoritma Fitness of Spring dan Algoritma Tabu Search pada Kasus Penjadwalan Perkuliahan," *ILKOM Jurnal Ilmiah*, vol. 12, no. 1, pp. 39–46, Apr. 2020, doi: 10.33096/ilkom.v12i1.522.39-46.
- [3] T. Handayani, D. H. Fudholi, and S. Rani, "Kajian Algoritma Optimasi Penjadwalan Mata Kuliah," *PETIR*, vol. 13, no. 2, pp. 212–222, Sep. 2020, doi: 10.33322/petir.v13i2.1027.
- [4] K. R. Saleh, "Pengembangan Bisnis Startup Bidang Teknologi Layanan Perbaikan Kendaraan Menggunakan Pendekatan Metode Agile," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2023.
- [5] I. Idrus, "Inovasi Rumah Smart Berkelanjutan dengan Material Bambu: Pengembangan dan Penerapan Teknologi pada Hunian Modern," *Majjama Jurnal Pengabdian Masyarakat Konstruksi*, vol. 2, no. 2, pp. 71–86, Dec. 2024.
- [6] M. Iqbal, M. Zarlis, and H. Mawengkang, "Model Pendekatan Metaheuristik Dalam Penyelesaian optimisasi Kombinatorial," *Seminar Nasional Teknologi Komputer & Sains (SAINTEKS)*, vol. 1, pp. 92–97, Feb. 2020.
- [7] G. Icasia, R. Tyasnurita, and E. S. Purba, "Aplikasi Kombinasi Heuristik dalam Kerangka Hyper-Heuristic untuk Permasalahan Penjadwalan Ujian," *JURNAL RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, vol. 5, no. 3, pp. 664–671, 2021, doi: 10.29207/resti.v4i4.2066.
- [8] P. R. Hayati and R. H. Laluma, "Penerapan Algoritma Genetika Untuk Optimasi Penjadwalan Pengangkutan Sampah Di Kota Bandung," *Prosiding Seminar Sosial Politik, Bisnis, Akuntansi dan Teknik (SoBAT) ke-4*, vol. 4, Aug. 2022, doi: 10.32897/sobat.2022.4.0.1928.
- [9] Rully Rumaída, Fibri Rakhmawati, and Dedy Juliandri, "Penerapan Algoritma Tabu Search pada Capacitated Vehicle Routing Problem Pengangkutan Sampah di Kota Padang Sidempuan," *Algoritma : Jurnal Matematika, Ilmu pengetahuan Alam, Kebumihan dan Angkasa*, vol. 2, no. 5, pp. 215–227, Aug. 2024, doi: 10.62383/algoritma.v2i5.201.
- [10] M. Rijal Fadli, "Memahami desain metode penelitian kualitatif," *Humanika, Kajian Ilmiah Mata Kuliah Umum*, vol. 21, no. 1, pp. 33–54, 2021, doi: 10.21831/hum.v21i1.
- [11] I. A. Siregar, "Analisis Dan Interpretasi Data Kuantitatif," *ALACRITY : Journal Of Education*, vol. 2, no. 1, pp. 39–48, 2021, doi: 10.52121/alacrity.v1i2.25.
- [12] F. Indriyani and E. Irfiani, "Clustering Data Penjualan pada Toko Perlengkapan Outdoor Menggunakan Metode K-Means (Clustering Sales Data at Outdoor Equipment Stores Using K- Means Method)," *JUITA: Jurnal Informatika*, vol. 7, no. 2, pp. 109–113, 2020.
- [13] Ghifari Dwi Cahyono, "Implementasi Algoritma K-Means Pada Klasifikasi Pengeluaran Belanja Pelanggan Mall," Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, Malang, 2023.
- [14] L. Petra Refialy, H. Maitimu, and M. Soyano Pesulima, "Perbaikan Kinerja Clustering K-Means pada Data Ekonomi Nelayan dengan Perhitungan Sum of Square Error (SSE) dan Optimasi nilai K cluster," *Techno.COM*, vol. 20, no. 2, pp. 321–329, 2021.
- [15] M. T. Jatipaningrum, S. E. Azhari, and K. Suryowati, "Pengelompokan Kabupaten Dan Kota Di Provinsi Jawa Timur Berdasarkan Tingkat Kesejahteraan Dengan Metode K-Means Dan Density-Based Spatial

- Clustering Of Applications With Noise,” *Jurnal Derivat*, vol. 9, no. 1, 2022, [Online]. Available: <https://jatim.bps.go.id>
- [16] R. Kinanti, “Penerapan Metode Clustering K-Means untuk Menentukan Prioritas Penerima Bantuan Program Beras untuk Rakyat Miskin (Raskin) Studi Kasus: Kecamatan Siulak,” *Jurnal Informatika Dan Rekayasa Komputer (JAKAKOM)*, vol. 4, no. 2, 2024, doi: 10.33998/jakakom.v4i2.
- [17] Z. Nabila, A. Rahman Isnain, and Z. Abidin, “Analisis Data Mining Untuk Clustering Kasus Covid-19 Di Provinsi Lampung Dengan Algoritma K-Means,” *Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi (JTSI)*, vol. 2, no. 2, p. 100, 2021, [Online]. Available: <http://jim.teknokrat.ac.id/index.php/JTSI>
- [18] A. Nugraha, O. Nurdiawan, and G. Dwilestari, “Penerapan Data Mining Metode K-Means Clustering Untuk Analisa Penjualan Pada Toko Yana Sport,” *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, vol. 6, no. 2, pp. 849–855, 2022.
- [19] Ramadhana, Islamiyah, and A. P. A. Masa, “Penerapan Data Mining Menggunakan Metode K-Means Clustering Pada Data Ekspor Batubara,” *Adopsi Teknologi dan Sistem Informasi (ATASI)*, vol. 2, no. 1, pp. 35–42, Jun. 2023, doi: 10.30872/atasi.v2i1.595.
- [20] J. Nasir, “Penerapan Data Mining Clustering Dalam Mengelompokkan Buku Dengan Metode K-Means,” *Jurnal SIMETRIS*, vol. 11, no. 2, pp. 300–311, 2020.