



Penerapan hibridisasi algoritma sequential insertion heuristic dan algoritma simulated annealing pada penentuan rute kendaraan pengangkut sampah di Kota Yogyakarta

Application of hybridization of sequential insertion heuristic algorithm and simulated annealing algorithm and its application in determining the route of garbage transport vehicles in the City of Yogyakarta

Rania Nova Dechandra, Prodi Matematika FMIPA UNY
Himmawati Puji Lestari*, Prodi Matematika FMIPA UNY
*e-mail: himmawati@uny.ac.id

Abstrak

Tujuan penelitian terapan ini adalah untuk mengetahui rute truk pengangkut sampah di Sektor Malioboro, Kota Yogyakarta dengan menerapkan hibridisasi Algoritma Sequential Insertion Heuristic dan Algoritma Simulated Annealing. Pada Sektor Malioboro terdapat 14 TPS serta 4 truk pengangkut sampah yang disediakan oleh DLH Kota Yogyakarta. Data yang digunakan bersumber dari DLH Kota Yogyakarta dan google maps. Analisis data dilakukan dengan analisis deskriptif serta analisis menggunakan Algoritma Sequential Insertion Heuristic dan Algoritma Simulated Annealing. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ada tiga rute yang dihasilkan yaitu 0-2-12-8-9-14-Z-3-4-Z-0, 0-6-7-1-Z-10-13-Z-0, dan 0-5-11-Z-0 dengan 0 menyatakan DLH Kota Yogyakarta, 1 sampai 14 menyatakan TPS di Sektor Malioboro, dan Z menyatakan TPA Piyungan. Rute tersebut mempunyai waktu penyelesaian total selama 645 menit dan jarak total kendaraan sebesar 159,6 km. Waktu penyelesaian total dan jarak total tersebut lebih cepat 217 menit dan 59,85 km dari rute yang disediakan oleh DLH Kota Yogyakarta. Selain itu, rute tersebut juga mampu memaksimalkan 100% volume truk sampah pada 3 trip sedangkan pada rute lama hanya 2 trip.

Kata kunci: sampah, WCVRPTW, Sektor Malioboro, Sequential Insertion Heuristic, Simulated Annealing.

Abstract

The purpose of this applied research is to determine the route of garbage trucks in the Malioboro Sector, Yogyakarta City by applying the hybridization of Sequential Insertion Heuristic Algorithm and Simulated Annealing Algorithm. In the Malioboro Sector there are 14 TPS and 4 garbage trucks provided by DLH Yogyakarta City. The data used is sourced from DLH Yogyakarta City and google maps. Data analysis was carried out by descriptive analysis and analysis using the Sequential Insertion Heuristic Algorithm and Simulated Annealing Algorithm. The results showed that there were three routes, namely 0-2-12-8-9-14-Z-3-4-Z-0, 0-6-7-1-Z-10-13-Z-0, and 0-5-11-Z-0 with 0 representing DLH Yogyakarta City, 1 to 14 stating TPS in the Malioboro Sector, and Z representing TPA Piyungan. The route has a total completion time of 645 minutes and a total vehicle distance of 159.6 km. The total completion time and the total distance are 217 minutes and 59.85 km faster than the route provided by DLH Yogyakarta City. In addition, this route is also able to maximize 100% of the volume of garbage trucks on 3 trips while on the old route only 2 trips

Keywords: waste, WCVRPTW, Malioboro Sector, Sequential Insertion Heuristic, Simulated Annealing

PENDAHULUAN

Sampah merupakan suatu hal yang tidak dapat dilepaskan dari kehidupan manusia. Menurut Undang-Undang No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, sampah merupakan sisa kegiatan sehari-hari manusia atau proses alam yang berbentuk padat atau semipadat berupa zat organik atau anorganik bersifat dapat terurai atau tidak dapat terurai yang dianggap sudah tidak berguna lagi dan dibuang ke lingkungan. Berdasarkan data yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Yogyakarta, terjadi peningkatan volume sampah dari Kota Yogyakarta yang dibuang ke TPA Piyungan yaitu rata-rata mencapai 340 ton per hari pada awal tahun 2022.

Permasalahan mengenai tata cara pengelolaan sampah tersebut merupakan tanggung jawab Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Yogyakarta yang diwujudkan ke dalam proses pengangkutan sampah. Untuk memudahkan proses pengangkutan sampah, DLH Kota Yogyakarta membagi tempat pengumpul sampah tersebut ke dalam 5 sektor yaitu: Sektor Kotagede, Sektor Malioboro, Sektor Ngasem-Gading, Sektor Gunung Ketur, dan Sektor Krasak. DLH Kota Yogyakarta juga telah menyediakan rute pengangkutan sampah. Namun, rute yang disediakan tersebut belum mempertimbangkan apakah rute tersebut sudah optimal atau belum dari segi waktu dan jarak serta kurang mengefisiensikan pemakaian volume truk sampah. Hal itu karena pada penentuan rute pengangkutan sampah oleh DLH Kota Yogyakarta tersebut hanya berdasarkan perkiraan saja yang berakibat pada rute pengangkutan sampah yang semakin panjang sehingga menyebabkan perjalanan kendaraan pengangkut sampah menjadi lebih lama.

Pada penelitian ini, pencarian rute kendaraan pengangkut sampah difokuskan pada Sektor Malioboro yang meliputi wilayah Kecamatan Tegalrejo, Kecamatan Pakualaman, Kecamatan Gondomanan, dan Kecamatan Danurejan bagian barat. Pada Sektor Malioboro, DLH Kota Yogyakarta menyediakan 4 truk untuk 14 TPS. Sektor Malioboro dipilih sebagai objek penelitian karena sektor ini merupakan kawasan tempat wisata. Sektor Malioboro setiap harinya menghasilkan sampah sehingga diperlukan pengangkutan sampah setiap harinya untuk menjaga kebersihan di kawasan tersebut. Karena merupakan kawasan tempat wisata, kondisi lalu lintas pada sektor ini cenderung lebih padat sehingga rawan mengalami kemacetan apalagi rute yang ada belum mampu untuk menentukan rute kendaraan yang optimal. Oleh karena itu, diperlukan rute kendaraan pengangkut sampah yang dapat mempersingkat waktu pengangkutan sampah.

Permasalahan mengenai pencarian rute pengangkutan sampah tersebut termasuk ke dalam *Vehicle Routing Problem* (VRP) karena kendaraan pengangkut sampah memulai perjalanan dari depot dan berakhir di depot. Menurut Toth dan Vigo (2002), VRP mempunyai tujuan di antaranya adalah meminimisasi biaya, meminimisasi jumlah kendaraan, menyeimbangkan rute perjalanan dan volume kendaraan, dan meminimisasi denda yang diakibatkan oleh keterlambatan dalam pengangkutan sampah. Salah satu jenis VRP yang digunakan untuk memecahkan masalah pengangkutan sampah adalah *Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows* (WCVRPTW). Dalam penelitian ini, *time windows* merupakan batasan waktu yang ada dalam proses pengangkutan sampah. Waktu yang menjadi batasan adalah waktu kerja selama 5 jam atau 300 menit kemudian dikurangi waktu istirahat selama 30 menit dan waktu perjalanan dari TPA Piyungan ke DLH Kota Yogyakarta selama 30 menit sehingga waktu pengangkutan sampah dari TPS ke TPS menuju TPA Piyungan yang tersisa adalah 4 jam atau 240 menit. Pengangkutan sampah akan dihentikan apabila waktu yang digunakan untuk pengangkutan dari TPS ke TPS menuju TPA memenuhi waktu kerja yang disediakan (Sutrisno, et al., 2016). Oleh karena itu, dalam pencarian rute tersebut diperlukan suatu metode yang dapat meminimumkan waktu pengangkutan sampah.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah WCVRPTW adalah metode heuristik. Metode heuristik adalah salah satu cara untuk mencapai nilai optimum suatu permasalahan dengan lebih cepat dan akurat daripada solusi eksak. Beberapa contoh

metode heuristik antara lain *Sequential Insertion Heurictic* (SIH) dan *Multiroute Impirovement Heuristic*. Selain itu, masalah WCVRPTW juga dapat diselesaikan dengan metode metaheuristik. Metode metaheuristik merupakan pengembangan dari metode heuristik. Beberapa contoh metode metaheuristik adalah *Simulated Annealing* (SA) dan *Genetic Alghorithm* (GA).

Penelitian ini menggunakan hibridisasi metode heuristik dan metode metaheuristik melalui proses penggabungan Algoritma SIH dan Algoritma SA. Algoritma SIH merupakan algoritma yang berprinsip pada penyisipan pelanggan di antara depot dengan kendala tertentu hingga diperoleh hasil yang maksimal. Algoritma SIH dipilih untuk menentukan solusi awal karena dari empat solusi awal metode heuristik yaitu *Savings Heuristic*, *Nearest-Neighbor Heuristic*, *Sequential Insertion Heuristic*, dan *Sweep Heuristic*; *Sequential Insertion Heuristic* (SIH) terbukti sangat optimal, baik dari segi kualitas solusi maupun waktu komputasi yang dibutuhkan untuk menemukan solusi tersebut (Solomon, 1987). Adapun Algoritma SA dipilih untuk memperbaiki solusi awal karena memiliki waktu komputasi yang lebih cepat dan tidak mudah terjebak pada nilai *local optimum* karena menggunakan probabilitas Boltzmann sehingga solusi optimal dapat diperoleh (Muhaddad, 2014). Algoritma *Simulated Annealing* terinspirasi dari proses pendinginan cairan logam dan aplikasi metode tersebut pada masalah optimasi dilakukan pertama kali oleh Kirkpatrick et al. pada tahun 1983.

Penelitian mengenai pencarian rute kendaraan pengangkut sampah menggunakan metode heuristik maupun metaheuristik sebenarnya sudah banyak dilakukan. Pakusadewa, et al. (2018) menerapkan hibridisasi Algoritma Genetika dan Algoritma *Simulated Annealing* untuk mengoptimasi rute pengangkutan sampah yang menghasilkan rekomendasi rute optimal pengangkutan sampah dari beberapa TPS. Arinalhaq (2013) menentukan rute kendaraan pengangkutan sampah di Kota Bandung dengan menggunakan Algoritma *Nearest Neighbor* kemudian dibandingkan dengan Algoritma *Sequential Insertion*.

Penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya tersebut mayoritas hanya berfokus pada pencarian rute dengan jarak terpendek sehingga kurang tepat untuk diterapkan pada pencarian rute di Sektor Malioboro, Kota Yogyakarta karena kondisi jalan raya di Sektor Malioboro yang rawan terjadi kemacetan sehingga meskipun memiliki jarak yang pendek namun waktu perjalanan bisa lebih lama. Oleh karena itu, pada penelitian ini penentuan rute kendaraan pengangkut sampah bertujuan untuk mencari rute dengan waktu terpendek. Dengan adanya penelitian mengenai penentuan jalur kendaraan pengangkut sampah di Kota Yogyakarta khususnya pada Sektor Malioboro tersebut, rute pengangkutan sampah hasil Algoritma *Simulated Annealing* diharapkan dapat mempersingkat waktu perjalanan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui rute hasil penyelesaian menggunakan hibridisasi Algoritma *Sequential Insertion Heuristic* dan Algoritma *Simulated Annealing* pada permasalahan penentuan rute truk pengangkut sampah di Sektor Malioboro, Kota Yogyakarta.

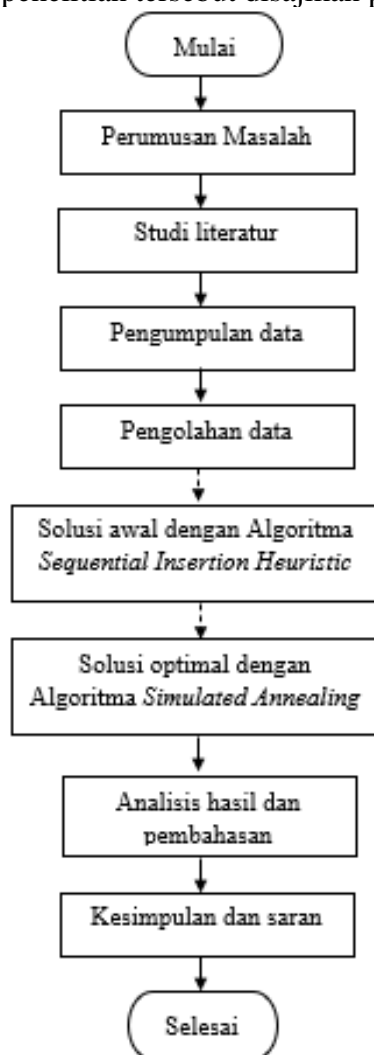
METODE PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian terapan ini sebagian besar berasal dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Yogyakarta yang berupa data tertulis maupun lisan dan data yang berasal dari pengamatan langsung dengan bantuan *google maps*. Data tersebut diperoleh pada bulan Maret-Juni, 2022. Berikut ini adalah rincian data yang diperlukan.

1. Data TPS
2. Data Rute Kendaraan
3. Data Waktu dan Jarak Perjalanan
4. Data Waktu Pelayanan (*Loading*) di TPS
Waktu *loading* di setiap TPS adalah 5 menit/m³.
5. Data Waktu Pembuangan Sampah (*Unloading*) di TPA
Waktu *unloading* muatan kendaraan di TPA adalah 2 menit/m³.

6. *Data Time Windows*

Adapun langkah-langkah penelitian tersebut disajikan pada diagram alir sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Langkah-langkah Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan rute optimal pengangkutan sampah di Sektor Malioboro, Kota Yogyakarta hasil hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA. Namun sebelum mendapatkan hasil tersebut, terlebih dahulu dibahas mengenai model matematika yang digunakan, langkah-langkah hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA, dan penerapannya pada permasalahan pengangkutan sampah.

Hasil

Hasil penelitian ini berupa model matematika WCVRPTW, langkah-langkah hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA, serta hasil perhitungan yang disajikan ke dalam Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4. Berikut ini adalah pembahasannya.

Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows (WCVRPTW)

Permasalahan penentuan rute kendaraan pengangkut sampah tersebut dapat dimodelkan ke dalam model matematika WCVRPTW sebagai berikut.

Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan dari model matematika WCVRPTW adalah meminimumkan waktu penyelesaian total (CT_{tot}) sebagai berikut.

$$\text{Min } Z = \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} \sum_{k \in K} x_{ij}^k \quad (1)$$

Kendala

Kendala merupakan batasan permasalahan yang digunakan dalam menentukan model matematika. Berikut ini adalah kendala yang dibutuhkan.

1. Semua truk k harus meninggalkan DLH Kota Yogyakarta

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

2. Semua truk harus kembali ke DLH Kota Yogyakarta

$$\sum_{i \in V} x_{i0}^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

3. Semua TPS harus dilayani oleh tepat satu kali

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in V_c \quad (4)$$

4. Aliran masuk dan keluar harus sama untuk semua TPS kecuali untuk DLH Kota Yogyakarta

$$\sum_{i \in V} x_{ij}^k = \sum_{i \in V} x_{ji}^k, \quad \forall j \in V_c \cup V_f, \quad k \in K \quad (5)$$

5. *Time Windows*

$$a_i \leq w_i^k \leq b_i, \quad \forall i \in V, \quad k \in K \quad (6)$$

6. Waktu pelayanan

$$w_i^k + s_i + t_{ij} \leq w_j^k + (1 - x_{ij}^k)M \quad \forall (i,j) \in E, \quad k \in K \quad (7)$$

7. Truk harus dalam keadaan kosong saat memulai rute perjalanan dan pada akhir rute ketika truk kembali ke DLH Kota Yogyakarta

$$\sum_{i \in (0,0')} d_i^k = 0, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

8. Akumulasi permintaan untuk semua TPS kecuali di TPA Piyungan

$$d_i^k + Q \leq d_j^k + (1 - x_{ij}^k)M, \quad \forall i \in V \setminus V_f, j \in V, k \in K \quad (9)$$

9. Volume truk

$$d_i^k \leq 6m^3, \quad \forall i \in V, \quad k \in K \quad (10)$$

10. Menentukan *non-negativity*

$$d_i^k \geq 0, \quad \forall i \in V, \quad k \in K \quad (11)$$

11. Menentukan variabel *binary*

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in E, \quad k \in K \quad (12)$$

12. Menentukan waktu penyelesaian atau *Completion Time (CT)*

Completion Time (CT) merupakan waktu penyelesaian satu rute dikurangi dengan waktu istirahat 30 menit dan waktu perjalanan dari TPA Piyungan ke DLH Kota Yogyakarta selama 30 menit.

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{t \in T} t_{ij} x_{ij}^k + \sum_{t \in T} s_i - 60, \quad \forall k \in K \quad (13)$$

13. Waktu penyelesaian rute memenuhi *time windows* yang disediakan

$$CT \leq 240 \quad (14)$$

Dengan:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{jika dan hanya jika } \textit{dump truck } k \text{ melakukan perjalanan dari } i \text{ ke } j \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$$

Keterangan:

$V = V^d \cup V^f \cup V^c = \{0, 1, 2, 3, \dots, 14, Z\}$ = himpunan semua simpul dengan 0 menyatakan DLH Kota Yogyakarta, 1 sampai 14 menyatakan TPS di Sektor Malioboro, dan Z menyatakan TPA Piyungan.

$V^d = \{0\}$ = DLH Kota Yogyakarta (depot)

$V^f = \{Z\}$ = TPA Piyungan

$V^c = \{1, 2, 3, \dots, 14\}$ = himpunan TPS di Sektor Malioboro

$E = \{(i, j) \mid i, j \in V, i \neq j\}$ = himpunan *arc*

$K = \{1, 2, 3, 4\}$ = himpunan truk

Q_{maks} = volume maksimal truk

c_{ij} = waktu penyelesaian total antar tempat i ke tempat j

t_{ij} = waktu tempuh dari tempat i ke tempat j

d_i^k = volume sampah di TPS i yang diangkut menggunakan truk k

Q = total volume sampah terangkut

w_i^k = waktu untuk memulai pelayanan di TPS i menggunakan truk k

s_i = waktu pelayanan (*loading dan unloading*) di TPS i dengan waktu *loading* 5 menit/m³ dan waktu *unloading* 2 menit/m³

Selanjutnya, untuk memudahkan penulisan masing-masing tempat di Sektor Malioboro yang terdiri dari 14 TPS, DLH Kota Yogyakarta, dan TPA Piyungan diberikan notasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Notasi Tempat di Sektor Malioboro beserta Volume Sampah Terangkut

Notasi	Nama	Volume sampah terangkut (m ³)
0	DLH Kota Yogyakarta	-
1	TPS Bener	3
2	TPS Brimob	1
3	TPS Puro Pakualaman	3
4	TPS Budi Makmur	3
5	TPS Benteng Vredeburg	3
6	TPS Gondolayu	1,5
7	TPS Kampung Kricak Kidul	1
8	TPS Poltabes	1
9	TPS Korem	1
10	TPS Serangan	2,5
11	TPS Pasar Senen	3
12	TPS DPRD DIY	0,5
13	TPS Taman Budaya	3
14	TPS Taman Pintar	0,5
Z	TPA Piyungan	-

Hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA

Hibridisasi merupakan proses penggabungan Algoritma SIH dan Algoritma SA. Proses hibridisasi ini secara garis besar terdiri dari dua langkah yaitu penentuan solusi awal dengan Algoritma SIH dan proses perbaikan solusi awal dengan Algoritma SA agar diperoleh solusi optimal.

Solusi Awal Penentuan Rute Pengangkutan Sampah dengan Algoritma SIH

Berikut ini adalah langkah-langkah penentuan rute pengangkutan sampah dengan Algoritma SIH yang diadaptasi dari Octora, et al. (2014).

Langkah 1

Menginisialisasikan data waktu perjalanan, data waktu pelayanan (*loading* dan *unloading*), data volume sampah di TPS, volume maksimal truk ($Q = 6m^3$), dan data jarak tempuh.

Langkah 2

Menentukan rute pertama ($r = 1$) dan *trip* pertama ($t = 1$).

Langkah 3

Menetapkan volume sampah pada truk yaitu ($Q = 0$) atau dalam keadaan kosong.

Langkah 4

Mengecek apakah ada TPS yang belum terpilih. Jika masih ada TPS yang belum terpilih, maka dilanjutkan ke langkah 5. Jika semua TPS telah terpilih, maka dilanjutkan ke langkah 10.

Langkah 5

Menghitung waktu penyelesaian (CT) berdasarkan persamaan (13) dan memilih TPS dengan total waktu penyelesaian (CT) terkecil.

Langkah 6

Mengecek apakah $CT \leq 240$. Jika memenuhi $CT \leq 240$, dilanjutkan dengan menghitung volume sampah di truk sekarang dengan persamaan $Q = Q + d_i^k$ kemudian lanjut ke langkah 7. Jika $CT > 240$, maka batalkan penyisipan TPS dan bentuk rute baru ($r = r + 1, t = 1$) kemudian lanjut ke langkah 3.

Langkah 7

Mengecek apakah volume sampah yang terangkut Q memenuhi kendala. Jika jumlah volume sampah yang terangkut $Q < 6 m^3$ maka TPS disisipkan ke dalam *trip* dan lanjut ke langkah 8, jika jumlah volume sampah yang terangkut $Q = 6 m^3$ maka TPS disisipkan ke dalam *trip* sehingga *trip* terbentuk disertai dengan menjabarkan CT , jarak yang ditempuh, dan volume sampah terangkut kemudian lanjut ke langkah 9, dan jika jumlah volume sampah yang terangkut $Q > 6 m^3$ maka penyisipan TPS dibatalkan dan lanjut ke langkah 9.

Langkah 8

Menjabarkan *trip* yang terbentuk disertai dengan memberi keterangan CT , jarak yang ditempuh, dan volume sampah terangkut kemudian lanjut ke langkah 4.

Langkah 9

Membentuk *trip* baru $t = t + 1$ kemudian lanjut ke langkah 3.

Langkah 10

Perhitungan Algoritma SIH telah selesai dan didapatkan solusi awal.

Solusi Optimal Penentuan Rute Pengangkutan Sampah dengan Algoritma SA

Setelah solusi awal penentuan rute pengangkutan sampah menggunakan Algoritma SIH telah diperoleh, selanjutnya adalah proses penentuan solusi optimal rute pengangkutan sampah menggunakan Algoritma SA melalui proses iterasi. Proses iterasi dilakukan untuk memperbaiki solusi awal yang terdiri dari langkah-langkah yang diadopsi dari Priwarnela (2012), Redi & Redioka (2019), Yu, et al. (2019) sebagai berikut.

- 1) Menentukan solusi awal σ
Solusi awal σ diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan Algoritma SIH
- 2) Menentukan suhu awal T_0 , suhu akhir T_f , *cooling rate* a , dan jumlah iterasi I_i
- 3) Menentukan suhu awal T_0 sebagai pengontrol apakah solusi baru diterima atau tidak diterima
- 4) Membangkitkan bilangan random $p = random(0,1)$
- 5) Membentuk solusi sublingkungan σ'
Pembentukan solusi sublingkungan σ' menggunakan prosedur *neighborhood* berdasarkan bilangan random yang dibangkitkan. Ada tiga prosedur *neighborhood* standar yaitu:

- a) Jika $0 < p \leq 1/3$, maka melalui prosedur *swap*
 - b) Jika $1/3 < p \leq 2/3$, maka melalui prosedur *insert*
 - c) Jika $2/3 < p < 1$, maka melalui prosedur *reverse*
- 6) Mengecek apakah solusi sublingkungan terbentuk
- a) Jika sublingkungan terbentuk, selanjutnya menghitung nilai fungsi evaluasi sublingkungan $e(\sigma'_i)$ berdasarkan persamaan:

$$e(\sigma'_i) = \langle |\sigma'_i|, - \sum_{r \in \sigma'_i} |r|^2, \sum_{r \in \sigma'_i} t(r) \rangle \quad (15)$$

Keterangan:

- $|\sigma'_i|$: jumlah rute pada solusi σ'_i
- $|r|$: jumlah TPS di setiap rute pada solusi σ'_i
- $t(r)$: biaya perjalanan dari himpunan rute pada solusi yang dapat diketahui dari jumlah waktu penyelesaian total (CT_{tot}) seluruh kendaraan yang melalui himpunan rute tersebut

Kemudian mengurutkan solusi nilai fungsi evaluasi yang terkecil, $\{e(\sigma'_i) \leq \dots \leq e(\sigma'_s)\}$, dengan s adalah banyaknya solusi dalam sublingkungan.

- b) Jika sublingkungan tidak terbentuk, maka lanjut ke langkah 9 dan seterusnya secara terurut
- 7) Menghitung nilai fungsi evaluasi solusi saat ini $e(\sigma)$ berdasarkan persamaan (15). Kemudian, bandingkan hasilnya dengan solusi sublingkungan yang memiliki nilai fungsi evaluasi sublingkungan terkecil,. Kemudian cek apakah nilai $e(\sigma') < e(\sigma)$
- a) Jika $e(\sigma') < e(\sigma)$, maka solusi sublingkungan diterima sebagai solusi baru dan lanjut ke langkah 9
 - b) Jika $e(\sigma') > e(\sigma)$, maka tentukan bilangan random q menggunakan persamaan:

$$q = [random(0,1)^\beta \times s] \quad (16)$$

dengan β adalah parameter yang telah ditentukan dan s adalah banyaknya solusi dalam sublingkungan. Kemudian lanjut ke langkah 8.

- 8) Menghitung selisih nilai fungsi evaluasi ($\Delta\sigma$)
- Selisih nilai fungsi evaluasi ($\Delta\sigma$) adalah selisih antara nilai fungsi evaluasi sublingkungan bilangan random q , $e(\sigma'_q)$ dengan nilai fungsi evaluasi solusi saat ini $e(\sigma)$. Selisih nilai fungsi evaluasi dapat dicari dengan persamaan:

$$\Delta\sigma = e(\sigma'_q) - e(\sigma) \quad (17)$$

Keterangan :

- $e(\sigma'_q)$: nilai fungsi dari solusi lingkungan q , $e(\sigma'_q)$
- $e(\sigma)$: nilai fungsi dari solusi lingkungan σ

Kriteria keputusan:

- a) Jika $\Delta\sigma \leq 0$, maka solusi lingkungan diterima sebagai solusi baru
- b) Jika $\Delta\sigma > 0$, maka ada dua kemungkinan.
 - (1) Solusi lingkungan diterima
 - Solusi lingkungan diterima jika:

$$r = random(0,1) \leq \exp\left(-\frac{\Delta\sigma}{T}\right),$$

r adalah bilangan random (0,1) dengan T adalah suhu pada saat ini atau suhu awal yang menjadi pengontrol apakah solusi baru akan diterima atau tidak.

- (2) Solusi lingkungan tidak diterima
Solusi lingkungan tidak diterima jika :

$$r = \text{random} (0,1) > \exp \left(-\frac{\Delta\sigma}{T} \right)$$

maka solusi sekarang tidak berubah dan lanjut ke langkah 9

- 9) Lakukan pengecekan apakah iterasi sudah mencapai iterasi I_i ,
 a) Jika belum mencapai iterasi I_i , maka lakukan penyusunan ulang solusi lingkungan layak kemudian dilanjutkan ke langkah 10.
 b) Jika telah mencapai iterasi I_i , lanjut ke langkah 11.
 10) Lakukan pengecekan apakah suhu telah mencapai suhu minimum.
 a) Jika suhu belum mencapai suhu minimum, lakukan penurunan suhu T menggunakan suatu parameter *cooling rate* α dengan menggunakan persamaan $T_i = \alpha \times T_{i-1}$ dan kembali ke langkah 4 dan seterusnya secara berulang hingga mencapai suhu minimum.
 b) Jika telah mencapai suhu minimum, maka lanjut ke langkah 11.
 11) Proses dari Algoritma SA telah selesai dan didapatkan solusi akhir.

Hasil Perhitungan Hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA

Berdasarkan hasil perhitungan hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA, rute pengangkutan sampah tersebut dapat dianalisis menurut waktu. Namun, dari rute tersebut juga dapat diperoleh mengenai total jarak dan efisiensi pemakaian volume di truk sampah dengan menggunakan rute optimal tersebut. Hasil perhitungan hibridisasi Algoritma SIH-SA tersebut dapat disajikan ke dalam Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Rute Lama dan Rute Hasil Hibridisasi Algoritma SIH-SA

	Rute	Perjalanan	Waktu (menit)	Jarak (km)	Volume sampah terangkut (m ³)
Rute Lama	1	0-1-2-Z-3-4-Z-5-Z-0	332	86,5	13
	2	0-6-Z-0	113,5	30,5	1,5
	3	0-7-8-9-Z-0	147	36,45	3
	4	0-10-11-12-Z-13-14-Z-0	269,5	66	9,5
	TOTAL		862	219,45	27
Algoritma SIH-SA	1	0-2-12-8-9-14-Z-3-4-Z-0	246	58,7	10
	2	0-6-7-1-Z-10-13-Z-0	238	65,9	11
	3	0-5-11-Z-0	161	35	6
	TOTAL		645	159,6	27

Tabel 3. Analisis Rute Pengangkutan Sampah Berdasarkan CT

$CT \leq T_{maks}$		
Rute	Rute Lama	Algoritma SIH-SA
1	×	✓
2	✓	✓
3	✓	✓
4	✓	Tidak ada

Tabel 4.1 Perbandingan Efisiensi Pemakaian Volume di Truk

Rute	Trip	Rute Lama	Rute	Trip	Algoritma SIH-SA
1	I	66,67%	1	I	66,67%
	II	100%		II	100%
	III	50%		III	0%
	IV	0%	2	I	91,67%
2	I	25%		II	100%
	II	0%		III	0%
3	I	50%	3	I	100%
	II	0%		II	0%
4	I	100%			
	II	58,33%			
	III	0%			

Pembahasan

Berdasarkan Tabel 2, diperoleh rute optimal pengangkutan sampah hasil hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA yang terbagi menjadi 3 rute yaitu rute 1. 0-2-12-8-9-14-Z-3-4-Z-0, rute 2. 0-6-7-1-Z-10-13-Z-0, dan rute 3. 0-5-11-Z-0. Ketiga rute tersebut adalah rute Brimob yang melewati DLH Kota Yogyakarta – TPS Brimob – TPS DPRD – TPS Poltabes – TPS Korem – TPS Taman Pintar – TPA Piyungan – TPA Puro Pakualaman – TPS Budi Makmur – TPA Piyungan – DLH Kota Yogyakarta, rute Gondolayu yang melewati DLH Kota Yogyakarta – TPS Gondolayu – TPS Kampung Kricak Kidul – TPS Bener- TPA Piyungan – TPS Serangan – TPS Taman Budaya – TPA Piyungan – DLH Kota Yogyakarta, dan rute Benteng Vredeburg yang melewati DLH Kota Yogyakarta – TPS Benteng Vredeburg – TPS Pasar Senin – TPA Piyungan – DLH Kota Yogyakarta. Ketiga rute tersebut mempunyai jumlah waktu penyelesaian total selama 645 menit dengan jarak 159,6 km dan volume sampah yang terangkut sebesar 27 m^3 . Selanjutnya, hasil tersebut jugadapat dibahas lebih lanjut berdasarkan perbandingannya dengan rute lama dari segi waktu, jarak, dan efisiensi pemakaian volume di truk sampah sebagai berikut.

Dari Tabel 2 juga dapat diketahui bahwa penentuan rute truk sampah yang mempunyai jumlah waktu penyelesaian total tercepat adalah rute yang ditentukan menggunakan hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA. Jumlah waktu penyelesaian total rute adalah selama 645 menit sehingga lebih cepat 217 menit dari rute yang disediakan oleh DLH Kota Yogyakarta. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Siswanto, et.al. (2019) mengenai sistem *routing* proses *delivery* menggunakan *Simulated Annealing* (studi kasus: PT. X) yang mampu menghemat waktu perjalanan. Waktu tersebut juga dapat dianalisis lebih lanjut berdasarkan *CT*. Dari Tabel 3 dapat diketahui bahwa semua *CT* rute hasil hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA memenuhi kendala atau batasan waktu kerja yang disediakan (*time windows*) sedangkan pada rute lama terdapat 1 rute yang tidak memenuhi $CT \leq T_{maks}$.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rute yang dibentuk menggunakan hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA terbukti lebih optimal ditinjau dari segi waktu karena memiliki jumlah waktu penyelesaian total tercepat yaitu selama 645 menit, semua rutenya memenuhi kendala *time windows*, serta memenuhi fungsi tujuan WCVRPTW. Dengan menggunakan rute yang mampu meminimumkan waktu tempuh total tersebut, dapat diperoleh juga jarak total sekaligus efisiensi pemakaian volume truk. Hal tersebut akan dibahas lebih lanjut sebagai berikut.

Dari Tabel 2 dapat diketahui bahwa penentuan rute truk sampah yang mempunyai jarak total terpendek adalah rute yang ditentukan menggunakan hibridisasi Algoritma SIH dan

Algoritma SA. Jarak total rute yang diperoleh adalah 159,6 km sehingga lebih pendek 59,85 km dari rute yang disediakan oleh DLH Kota Yogyakarta. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa rute yang dibentuk menggunakan hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA lebih pendek ditinjau dari segi jarak total yang ditempuh oleh truk sampah. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Prayoga (2020) mengenai hibridisasi Algoritma *Nearest Neighbor* dengan *Simulated Annealing* pada penentuan rute pengangkutan sampah di Kota Pekanbaru yang mampu mengurangi jarak tempuh.

Volume sampah yang terangkut pada setiap rute tersebut juga dapat dianalisis lebih lanjut berdasarkan efisiensi pemakaian volume di truk sampah. Dari Tabel 4, dapat diketahui bahwa rute yang ditentukan menggunakan hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA terbagi menjadi 3 rute saja sehingga truk yang dibutuhkan juga hanya berjumlah 3. Hal ini dikarenakan pada rute tersebut mampu mengefisienkan pemakaian volume sampah yang dapat diangkut di truk sampah. Rute tersebut mempunyai 3 *trip* yang dapat memaksimalkan volume truk hingga 100% sedangkan pada rute lama yang berasal dari DLH Kota Yogyakarta hanya 2 *trip*. Oleh karena itu, rute pengangkutan sampah tersebut lebih baik ditinjau dari segi efisiensi pemakaian volume di truk sampah.

Dengan demikian, berdasarkan jumlah rute dan *trip* yang terbentuk, waktu penyelesaian total, jarak total yang ditempuh oleh truk pengangkut sampah, dan efisiensi pemakaian volume truk sampah, rute pengangkutan sampah hasil hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA dinilai lebih baik dibandingkan dengan rute yang disediakan oleh DLH Kota Yogyakarta.

SIMPULAN

Penerapan hibridisasi Algoritma SIH dan Algoritma SA menghasilkan suatu rute optimal yang terbagi menjadi 3 rute yaitu rute Brimob, rute Gondolayu, dan rute Benteng Vredeburg. Rute Brimob dimulai dari DLH Kota Yogyakarta menuju TPS Brimob dan berakhir di TPA Piyungan kemudian kembali lagi ke DLH Kota Yogyakarta, rute Gondolayu dimulai dari DLH Kota Yogyakarta menuju TPS Gondolayu dan berakhir di TPA Piyungan kemudian kembali lagi ke DLH Kota Yogyakarta, dan rute Benteng Vredeburg yang dimulai dari DLH Kota Yogyakarta menuju TPS Benteng Vredeburg dan berakhir di TPA Piyungan kemudian kembali lagi ke DLH Kota Yogyakarta. Pemecahan menjadi 3 rute ini menghasilkan rute pengangkutan sampah yang optimal dan jumlah waktu penyelesaian total lebih singkat yaitu selama 645 menit. Jarak total yang dihasilkan juga lebih pendek yaitu sejauh 159,6 km dan dapat mengefisienkan pemakaian volume di truk sampah sehingga hanya menggunakan 3 truk pengangkut sampah saja. Dengan demikian, rute hasil Algoritma SA lebih efisien daripada rute lama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada FMIPA UNY, DLH Kota Yogyakarta, dan pihak-pihak yang membantu penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Arinalhaq, F., Imran, A., & Fitria, L. (2013). Penentuan Rute Kendaraan Pengangkutan Sampah dengan Menggunakan Metode Nearest Neighbour (Studi Kasus PD Kebersihan Kota. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 1(1), 22–32.
- JDIH BPK RI. (2008). *Undang-Undang No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah*.
- Muhaddad, R. A. dan B. S. (2014). Pengembangan Algoritma Simulated Annealing Untuk Penyelesaian Permasalahan Alokasi Pada Closed Loop Supply Chain (Clsc). *JURNAL TEKNIK POMITS*.
- Octora, L., Imran, A., & Susanty, S. (2014). Pembentukan Rute Distribusi Menggunakan Algoritma Clarke & Wright Savings dan Algoritma Sequential Insertion *. *Reka Integra No.02 / Vol. 02 Oktober 2014 Pembentukan Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*,

02(02), 1–11.

- Pakusadewa, P. G., Dewi, C., & Wihandika, R. C. (2018). Penerapan Hibridisasi Algoritme Genetika dan Simulated Annealing untuk Optimasi Vehicle Routing Problem pada Kasus Pengangkutan Sampah Kota Denpasar Putu. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer (J-PTIHK)*, 2(9), 3215–3223.
- Prayoga, Galih Saputra. (2020). Optimasi Vehicle Routing Problem (VRP) Sampah Kota Pekanbaru Zona 1 Menggunakan Penerapan Hibridisasi Metode Algoritma Nearest Neighbor dan Simulated Annealing. *Skripsi*. Pekanbaru: FT UIN Sultan Syarif Kasim.
- Priwarnela, R. (2012). Aplikasi Algoritma Hibrida Dua Tahap Pada Pickup And Delivery Vehicle Routing Problem With Time Windows. *Skripsi*. Jakarta: FMIPA UI.
- Redi, A. A. N. P., & Redioka, A. A. N. A. (2019). Algoritma Simulated Annealing untuk Optimasi Rute Kendaraan dan Pemindahan Lokasi Sepeda pada Sistem Public Bike Sharing. *Jurnal Sistem Dan Manajemen Industri*, 3(1), 50. <https://doi.org/10.30656/jsmi.v3i1.1473>.
- Siswanto, Budi Nur., Afferdhy Ariffien, & Ilham Jayakusuma. (2019). Sistem Routing Proses Delivery Menggunakan Simulated Annealing (Studi Kasus: PT. X). *Jurnal Teknologia* Vol. 2, No. 1, Februari 2019.
- Solomon, M. M. (1987). *Algorithms for The Vehivle Routing and Scheduling Problems With Time Window Constraints*. 35(2), 254–265.
- Sutrisno, D., Ilhami, M. A., & Febianti, E. (2016). Optimasi Rute Pengangkutan Sampah Dengan Metode Vehicle Routing Problem With Time Window Menggunakan Binary Integer Programming. *Jurnal Teknik Industri*, 4(1).
- Toth, P. and V. (2002). The Vehicle Routing Problem. In *SIAM* (Issue 1).
- Yu, V. F., Redi, A. A. N. P., Jewpanya, P., Lathifah, A., Magh, M. F. N., & Masruroh, N. A. (2019). Environmental Sustainability in Asian Logistics and Supply Chains. In *Environmental Sustainability in Asian Logistics and Supply Chains*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0451-4>.