

SKRIPSI

PENERAPAN ALGORITMA SEMUT PADA *TRAVELING SALESMAN PROBLEM* (TSP) UNTUK OPTIMASI JALUR PENGANGKUTAN SAMPAH DI KOTA YOGYAKARTA



DERRIDA ATSMAROTUL ILMI

NIM. 22106010040

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI MATEMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

2026

PENERAPAN ALGORITMA SEMUT PADA *TRAVELING SALESMAN PROBLEM* (TSP) UNTUK OPTIMASI JALUR PENGANGKUTAN SAMPAH DI KOTA YOGYAKARTA

Skripsi

Untuk memenuhi sebagian persyaratan

Mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Matematika



Diajukan oleh

DERRIDA ATSMAROTUL ILMI

22106010040

Kepada

PROGRAM STUDI MATEMATIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2026

i



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi / Tugas Akhir

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu 'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Derrida Atsmarotul Iلمي
NIM : 22106010040
Judul Skripsi : Penerapan Algoritma Semut pada *Traveling Salesman Problem (TSP)*
untuk Optimasi Jalur Pengangkutan Sampah di Kota Yogyakarta

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Matematika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Program Studi Matematika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqasyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu 'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 12 Februari 2026

Pembimbing

Prof. Dr. Muhammad Wakhid

Mustofa, S.Si., M.Si.

NIP. 198004022005011003



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-480/Un.02/DST/PP.00.9/03/2026

Tugas Akhir dengan judul : Penerapan Algoritma Semut pada Traveling Salesman Problem untuk Optimasi Jalur Pengangkutan Sampah di Kota Yogyakarta

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : DERRIDA ATSMAROTUL ILMI
Nomor Induk Mahasiswa : 22106010040
Telah diujikan pada : Jumat, 27 Februari 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Prof. Dr. Muhammad Wakhid Musthofa, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 69a7ecab69473



Penguji I

Muchammad Abrori, S.Si., M.Kom
SIGNED

Valid ID: 69a6542f99452



Penguji II

Malahayati, S.Si., M.Sc
SIGNED

Valid ID: 69a7e4bac8cff



Yogyakarta, 27 Februari 2026

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 69a8f4908c6e2

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Derrida Atsmarotul Ilmi

NIM 22106010040

Program Studi : Matematika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Dengan ini menyatakan bahwa isi skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar sarjana di suatu Perguruan Tinggi dan sesungguhnya skripsi ini merupakan hasil pekerjaan penulis sendiri sepanjang pengetahuan penulis, bukan duplikasi atau saduran dari karya orang lain kecuali bagian tertentu yang penulis ambil sebagai bahan acuan. Apabila terbukti pernyataan ini tidak benar, sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis.

Yogyakarta, 12 Februari 2026



Derrida Atsmarotul Ilmi

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

MOTTO

“Allah akan mengangkat derajat orang-orang yang beriman dan berilmu”

(QS Al Mujadilah:11)

PERSEMBAHAN

Dengan memanjatkan puji syukur kepada Allah SWT, karya ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Eko Makruf, S.Ag. dan Ibu Nurul Lihayati, S.Ag., yang senantiasa menjadi sumber kekuatan dan keteguhan dalam setiap langkah kehidupan penulis.

Terima kasih atas doa yang tak pernah putus, kasih sayang yang tulus, bimbingan yang sabar, dan pengorbanan yang tiada tara. Kehadiran dan dukungan Bapak dan Ibu, selalu memberikan semangat dan keyakinan bagi penulis, untuk menempuh setiap tantangan hingga menyelesaikan pendidikan ini.

Semoga karya sederhana ini menjadi wujud rasa syukur, bakti, dan penghargaan yang mendalam kepada kedua orang tua tercinta, yang selalu menjadi inspirasi dan teladan bagi penulis.



PRAKATA

Alhamdulillah *rabbil'alamiin*, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Penerapan Algoritma Semut pada *Traveling Salesman Problem* untuk Optimasi Jalur Pengangkutan Sampah di Kota Yogyakarta” skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Matematika pada Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta. Sholawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan seluruh umatnya hingga akhir zaman.

Penulis menyadari bahwa proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, arahan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Khurul Wardati, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga.
2. Dr. Epha Diana Supandi, S.Si., M.Sc., selaku Ketua Program Studi Matematika.
3. Prof. Dr. Muhammad Wakhid Mustofa, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing yang dengan sabar telah membimbing, mengarahkan, dan memotivasi penulis dalam penyusunan skripsi ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Noor Saif Muhammad Mussafi, S.Si., M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Penasehat Akademik yang memberikan bimbingan, nasihat, dan motivasi kepada penulis selama menjalani masa studi.
5. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Program Studi Matematika yang telah membekali penulis dengan ilmu pengetahuan, pengalaman, dan keteladanan selama masa perkuliahan. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah diberikan.

6. Kedua orang tua penulis, Bapak Eko Makruf, S.Ag. dan Ibu Nurul Lihayati, S.Ag., atas doa, kasih sayang, serta dukungan lahir dan batin yang tidak pernah putus. Adik penulis Zada Khoirul Fikri yang selalu memberikan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan studi.
7. Keluarga penulis, Mbah ti, Mbah zu, Bule, Om, Budhe, Pak Dhe, Mas Rega, Mas Zaul, Mas Anam, Mbak Yaya, Dek Rozak, Dek Aan, Mas Althof, Mas Akhtar, Dek Abiyan, yang senantiasa mendoakan kelancaran studi.
8. Teman-teman terdekat penulis Diva, Anggit, Sinta, Nafisa, Tarisha, Nisrina, dan Ayu. Serta seluruh mahasiswa Matematika angkatan 2022 yang telah menjadi teman berbagi suka dan duka, kasih sayang, dan dukungan yang diberikan sampai saat ini.
9. Serta semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis memohon maaf atas segala kekurangan dan sangat mengharapkan kritik serta saran yang membangun demi kebaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan, bagi penulis maupun pembaca.

Yogyakarta, 12 Februari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
SURAT PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	iv
MOTTO	v
PERSEMBAHAN.....	vi
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
INTISARI	xv
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Metode Penelitian.....	4
1.6 Manfaat Penelitian.....	7
1.7 Tinjauan Pustaka	7
1.8 Sistematika Penulisan.....	11
BAB II	13
2.1 Teori Graf	13
2.2 Representasi Graf (Matriks Ketetanggaan)	23
2.3 Jalur Terpendek pada Graf Berbobot	24
2.4 Optimasi Jalur Terpendek	27
2.5 <i>Traveling Salesman Problem (TSP)</i>	30
2.6 <i>Algoritma Greedy</i>	31
2.7 <i>MATLAB (Matrix Laboratory)</i>	33
2.8 <i>Ant Colony Optimization (ACO)</i>	33

2.9	<i>Ant Colony System (ACS)</i>	35
2.9.1	Aturan Transisi Keadaan (<i>State Transition Rule</i>)	36
2.9.2	Pembaruan Feromon Global (<i>Global Updating Rule</i>)	39
2.9.3	Pembaruan Feromon Lokal (<i>Local Updating Rule</i>).....	40
2.10	Algoritma <i>Ant Colony System (ACS)</i>	41
BAB III	.....	49
3.1	Penerapan Algoritma Koloni Semut (ACS) pada masalah TSP.....	49
3.1.1	Penyelesaian dengan cara manual	51
3.1.2	Penyelesaian menggunakan MATLAB	69
3.2	Analisis Hasil	72
BAB IV	.....	73
4.1	Profil Dinas Lingkungan Hidup (DLH)	73
4.2	Penyelesaian jalur terpendek menggunakan algoritma semut (ACS) pada TSP	74
4.2.1	Simulasi ACS pada TSP tanpa mempertimbangkan kapasitas kendaraan, dengan optimasi waktu tempuh minimum.	76
4.2.2	Simulasi ACS pada TSP tanpa mempertimbangkan kapasitas kendaraan, dengan optimasi jarak tempuh minimum	95
4.2.3	Simulasi ACS pada TSP dengan optimasi jarak tempuh dan kapasitas kendaraan (pembagian rute manual)	100
4.2.4	Simulasi ACS pada TSP dengan optimasi jarak tempuh dan kapasitas kendaraan (pembagian rute otomatis)	101
4.3	Analisis Perbandingan Simulasi	105
BAB V	.....	107
5.1	Kesimpulan.....	107
5.2	Saran	108
DAFTAR PUSTAKA	.....	109
LAMPIRAN	.....	112
	Lampiran-1 Codingan simulasi BAB 3	112
	Lampiran-2 Perhitungan manual simulasi 1 (berdasarkan waktu).....	116
	Lampiran-3 Codingan simulasi BAB 4	203
	1. Codingan pemodelan TSP tanpa mempertimbangkan kapasitas kendaraan, dengan optimasi waktu tempuh minimum.	203

2. Codingan pemodelan TSP tanpa mempertimbangkan kapasitas kendaraan, dengan optimasi jarak tempuh minimum.	206
3. Codingan pemodelan TSP dengan optimasi jarak tempuh dan kapasitas kendaraan (pembagian rute otomatis).....	210
CURRICULUM VITAE.....	215



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Metode Penelitian.....	6
Gambar 2.1 Graf $G(V, E)$	14
Gambar 2.2 Graf G.....	15
Gambar 2.3 Graf H.....	16
Gambar 2.4 Graf E.....	17
Gambar 2.5 Graf F.....	18
Gambar 2.6 Graf tak berarah.....	19
Gambar 2.7 Graf berarah.....	19
Gambar 2.8 Graf terhubung H.....	20
Gambar 2.9 Graf tak terhubung I.....	20
Gambar 2.10 Graf lengkap.....	21
Gambar 2.11 Graf M.....	22
Gambar 2.12 Graf berarah berbobot.....	22
Gambar 2.13 Graf K.....	24
Gambar 2.14 Graf N.....	26
Gambar 2.15 Sistem kerja semut.....	34
Gambar 3.0.16 Algoritma ACS.....	41
Gambar 2.17 Algoritma ACS.....	41
Gambar 3.1 Jarak antar titik.....	50
Gambar 3.2 Simulasi ACO TSP menggunakan MATLAB 1.....	70
Gambar 3.3 Simulasi ACO TSP menggunakan MATLAB 2.....	71
Gambar 4.1 Graf titik depo DLH.....	76
Gambar 4.2 Iterasi 1 simulasi 1.....	92
Gambar 4.3 Iterasi 2 simulasi 1.....	93
Gambar 4.4 Iterasi 3 simulasi 1.....	93
Gambar 4.5 Iterasi 4 simulasi 1.....	94
Gambar 4.6 Iterasi 5 simulasi 1.....	94
Gambar 4.7 Iterasi 36 simulasi 2.....	97
Gambar 4.8 Iterasi 37 simulasi 2.....	98
Gambar 4.9 Iterasi 38 simulasi 2.....	98
Gambar 4.10 Iterasi 39 simulasi 2.....	99
Gambar 4.11 Rute optimal iterasi 40 simulasi 4.....	102
Gambar 4.12 Rute optimal iterasi 41 simulasi 41.....	103
Gambar 4.13 Rute optimal iterasi 42 simulasi 4.....	103
Gambar 4.14 Rute optimal iterasi 100 simulasi 4.....	104

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perbedaan dengan penelitian sebelumnya.....	10
Tabel 3.1 Jarak antar titik.....	51
Tabel 3.2 Visibilitas jarak	53
Tabel 3.3 Probabilitas semut ke-1 dari titik A	55
Tabel 3.4 Probabilitas semut ke-2 dari titik B	57
Tabel 3.5 Probabilitas semut ke-3 dari titik C	58
Tabel 3.6 Probabilitas semut ke-4 dari titik D	59
Tabel 3.7 Rute pertama semut.....	60
Tabel 3.8 Probabilitas semut ke-1 dari titik B Langkah 2.....	61
Tabel 3.9 Probabilitas semut ke-2 dari titik D Langkah 2	63
Tabel 3.10 Probabilitas semut ke-3 dari titik D Langkah 2	64
Tabel 3.11 Probabilitas semut ke-4 dari titik A Langkah 2	65
Tabel 3.12 Rute kedua semut	66
Tabel 3.13 Rute ketiga semut.....	67
Tabel 3.14 Rute keempat semut.....	67
Tabel 4.1 Titik lokasi UPS dan depo	75
Tabel 4.2 Waktu untuk setiap titik	77
Tabel 4.3 Parameter simulasi	77
Tabel 4.4 Visibilitas waktu	79
Tabel 4.5 Probabilitas kumulatif dari titik A	83
Tabel 4.6 Rute pertama semut.....	84
Tabel 4.7 Probabilitas kumulatif dari titik J.....	87
Tabel 4.8 Rute kedua semut	90
Tabel 4.9 Jarak untuk setiap titik	96
Tabel 4.10 Parameter simulasi	96
Tabel 4.11 Parameter simulasi	101
Tabel 4.12 Total jarak setiap simulasi	105
Tabel 4.13 Perbandingan waktu setiap simulasi	106

DAFTAR SIMBOL

d	: Parameter jarak
τ	: Parameter intensitas feromon
s	: Titik tujuan yang akan dipilih semut k
η	: Nilai heuristik (jarak/waktu) = $\frac{1}{d(r,s)}$
r	: Titik asal, posisi semut k
u	: Salah satu titik di $J_k(r)$
$J_k(r)$	: Himpunan titik-titik yang belum dikunjungi oleh semut dari titik r
$\tau(r, s)$	: Intensitas feromon pada jalur dari r ke s
$\eta(r, s)$	: Nilai heuristik pada jalur dari r ke s
$\tau(r, u)$	: Intensitas feromon pada jalur dari r ke u
$\eta(r, u)$	: Nilai heuristik pada jalur dari r ke u
α	: Parameter untuk mengatur seberapa besar pengaruh feromon
β	: Parameter untuk mengatur seberapa besar pengaruh heuristik
q	: Parameter besar eksploitasi dan eksplorasi
N	: Jumlah titik yg akan dikunjungi semut
$N - tabu\ k$	: Himpunan titik yang dapat dikunjungi semut k (N tanpa <i>tabu list</i>)
$\tau(r, s)_{t+1}$	: Jumlah feromon baru pada iterasi ke $t + 1$ ($t \in \mathbb{N}_0$)
$\tau(r, s)_t$	: Jumlah feromon lama pada iterasi ke t ($t \in \mathbb{N}_0$)
$\Delta\tau(r, s)$	: Jumlah feromon tambahan pada sisi (r, s) saat pembaruan global
n	: Jumlah titik pada jalur
L_{nn}	: Panjang lintasan terdekat yang diperoleh pada algoritma <i>Greedy</i>
L_k	: Total panjang lintasan yang ditempuh dalam perjalanan
c	: Urutan titik yang dinyatakan sebagai $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N, c_1\}$
L_{gb}	: Panjang rute terbaik secara global atau total jarak minimum
S_{gb}	: Rute terbaik secara global (<i>global best tour</i>)

INTISARI

PENERAPAN ALGORITMA SEMUT PADA *TRAVELING SALESMAN PROBLEM* (TSP) UNTUK OPTIMASI JALUR PENGANGKUTAN SAMPAH DI KOTA YOGYAKARTA

Oleh
DERRIDA ATSMAROTUL ILMI
22106010040

Algoritma semut *Ant Colony System* (ACS) merupakan metode yang meniru perilaku koloni semut dalam menentukan rute terpendek. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan masalah *Traveling Salesman Problem* (TSP), yaitu permasalahan menentukan rute dengan mengunjungi setiap titik tepat satu kali dan kembali ke titik awal. Pada skripsi ini, ACS diterapkan untuk menentukan rute pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta, dengan tujuan meminimalkan total waktu tempuh perjalanan. Permasalahan dimodelkan sebagai TSP pada graf berbobot yang terdiri dari 14 titik, yaitu 1 Unit Pengumpulan Sampah (UPS) dan 13 depo sampah. Sedangkan jarak antar lokasi dinyatakan sebagai bobot sisi. Penerapan algoritma dilakukan dalam empat simulasi. Dari keempat simulasi tersebut, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa simulasi tanpa mempertimbangkan kapasitas truk menghasilkan rute terpendek dengan total jarak 43,4 km dengan waktu tempuh 130 menit. Sedangkan, simulasi yang mempertimbangkan kapasitas truk menghasilkan rute yang terbagi menjadi beberapa perjalanan, dengan total jarak 142,9 km dengan waktu tempuh 429 menit. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma ACS dapat digunakan sebagai salah satu pendekatan dalam perencanaan rute pengangkutan sampah, khususnya di wilayah Kota Yogyakarta.

Kata Kunci: *Ant Colony System* (ACS), *Traveling Salesman Problem* (TSP), Rute Optimal, Pengangkutan Sampah

ABSTRACT**APPLICATION OF THE ANT COLONY ALGORITHM TO THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM (TSP) FOR OPTIMIZING WASTE COLLECTION ROUTES IN YOGYAKARTA CITY**

by

DERRIDA ATSMAROTUL ILMU

22106010040

The Ant Colony System (ACS) algorithm is a method that mimics the behavior of ant colonies in determining the shortest route. This method is used to solve the Traveling Salesman Problem (TSP), which involves finding a route that visits each point exactly once and returns to the starting point. In this study, ACS was applied to determine waste collection routes in Yogyakarta, aiming to minimize the total travel time. The problem was modeled as a TSP on a weighted graph consisting of 14 points, namely 1 Waste Collection Unit (UPS) and 13 waste depots, with the distances between locations represented as edge weights. The algorithm was implemented in four simulations. From these four simulations, the results showed that the simulation without considering truck capacity produced the shortest route, with a total distance of 43.4 km and a travel time of 130 minutes. In contrast, the simulation considering truck capacity resulted in routes divided into multiple trips, with a total distance of 142.9 km and a travel time of 429 minutes. These results indicate that the ACS algorithm can be used as an effective approach for planning waste collection routes, particularly in the Yogyakarta area.

Keywords: Ant Colony System (ACS), Traveling Salesman Problem (TSP), Optimal Route, Waste Transportation.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan sehari-hari, manusia selalu terlibat dalam berbagai aktivitas untuk keperluan pribadi, ekonomi, maupun pelayanan publik. Setiap aktivitas tersebut membutuhkan waktu, tenaga, dan biaya, sehingga efisiensi menjadi hal yang penting agar sumber daya dapat dimanfaatkan secara optimal. Prinsip efisiensi tidak hanya berlaku pada kegiatan transportasi, tetapi juga pada berbagai sistem layanan. Salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi adalah dengan menentukan jalur yang tepat pada kegiatan operasional, karena semakin pendek jarak tempuh, maka semakin hemat bahan bakar dan waktu yang digunakan (Pratiwi, 2022).

Salah satu kegiatan yang sangat bergantung pada efisiensi jalur adalah pengangkutan sampah. Di kota padat seperti Yogyakarta, kendaraan pengangkut sampah harus menempuh banyak titik depo sampah dengan jalur yang belum optimal. Kondisi ini menyebabkan waktu tempuh lebih lama, peningkatan konsumsi bahan bakar, serta keterlambatan pengangkutan yang berdampak pada menurunnya kebersihan kota. Saat ini, Kota Yogyakarta tengah berada dalam kondisi darurat sampah, sehingga Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Yogyakarta melakukan pengosongan depo dan meningkatkan operasi Unit Pengelolaan Sampah (UPS) selama 24 jam (Anam, 2025). Rajwan (2025) menyatakan bahwa kapasitas pengelolaan sampah saat ini mencapai 200 ton per hari. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN, 2025), volume sampah di Kota Yogyakarta pada tahun 2025 mencapai 109.733 ton per tahun. Angka ini menunjukkan pentingnya pengelolaan sampah secara efisien agar tidak menimbulkan penumpukan di depo.

Permasalahan jalur pengangkutan sampah dapat dimodelkan menggunakan teori graf, yakni cabang matematika yang mempelajari hubungan

antar titik dan garis. Setiap depo sampah direpresentasikan sebagai simpul (*vertex*), dan jarak antar depo menjadi sisi berbobot (*edge*). Tujuan dari model ini adalah menentukan lintasan yang mengunjungi semua titik tepat satu kali dan kembali ke titik awal dengan total jarak minimum. Permasalahan tersebut dikenal sebagai *Traveling Salesman Problem (TSP)*, yang banyak diterapkan untuk mencari jalur optimal dalam berbagai aktivitas distribusi dan transportasi, termasuk pada sistem pengangkutan sampah di perkotaan.

Salah satu metode untuk menyelesaikan TSP adalah algoritma semut atau *Ant Colony Optimization (ACO)*, yaitu algoritma metaheuristik (metode pencarian untuk menemukan solusi mendekati optimal pada masalah kompleks) yang terinspirasi dari perilaku koloni semut dalam mencari makanan (Dorigo & Gambardella, 1997). Dalam kehidupan nyata, semut mampu menemukan jalur melalui komunikasi dengan jejak *pheromone*. Semakin sering suatu jalur dilalui semut, maka semakin banyak jejak *pheromone* yang tertinggal dan menarik semut lain untuk mengikutinya. Prinsip ini diadaptasi dalam algoritma semut untuk menemukan solusi optimal secara adaptif dan efisien, termasuk dalam menentukan jalur pengangkutan sampah di perkotaan.

Berbagai penelitian menunjukkan efektivitas algoritma semut dalam permasalahan penyelesaian rute pengangkutan sampah. Ismail et al., (2021) dari UGM menerapkan algoritma semut untuk menentukan jalur optimal pengumpulan sampah di lingkungan pemukiman padat, dengan mempertimbangkan hambatan seperti jalan buntu dan rute berputar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma semut mampu meningkatkan efisiensi jalur pengangkutan sampah pada kawasan perumahan. Selanjutnya, Lestari et al., (2013) dari UNY menerapkan ACO dalam perancangan sistem distribusi pengangkutan sampah di wilayah Yogyakarta. Penelitian ini menitikberatkan pada pencapaian rute operasional yang lebih efisien guna meminimalkan waktu tempuh, biaya, dan konsumsi bahan bakar. Namun, sebagian penelitian tersebut masih berfokus pada penerapan ACO secara umum, sehingga penerapan metode yang lebih spesifik seperti *Ant Colony System (ACS)* pada sistem pengangkutan sampah dengan kondisi jalur terbaru dan bobot jarak berdasarkan data aktual di Kota Yogyakarta masih jarang dilakukan.

Proses pengangkutan sampah menjadi komponen krusial dalam pengelolaan persampahan karena melibatkan sejumlah titik pengambilan yang tersebar dan memerlukan penentuan rute optimal agar waktu tempuh dan biaya operasional dapat diminimalkan. Dengan kondisi geografis Kota Yogyakarta yang padat, jaringan jalan yang sempit di beberapa wilayah, dan jumlah depo yang tersebar luas, proses pengangkutan sering mengalami keterlambatan. Permasalahan ini membutuhkan metode optimasi yang mampu meningkatkan efisiensi sistem pengangkutan sampah. Oleh karena itu, penerapan metode optimasi berbasis algoritma seperti ACS diharapkan mampu membantu menentukan jalur pengangkutan yang lebih efisien, meminimalkan waktu, serta meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah di Kota Yogyakarta.

Berdasarkan uraian tersebut, skripsi ini berfokus pada penerapan algoritma semut ACS untuk menyelesaikan permasalahan TSP dalam konteks pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta. Tujuan skripsi ini adalah memperoleh jalur mendekati optimal dan efisien bagi kendaraan pengangkut sampah agar proses pengumpulan dapat berlangsung lebih cepat, hemat, dan mendukung kebersihan kota secara berkelanjutan. Selain itu, hasil dari skripsi ini dapat menjadi referensi bagi instansi terkait dalam meningkatkan sistem manajemen jalur pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta. Pada tahap implementasi, skripsi ini menggunakan perangkat lunak MATLAB sebagai alat bantu pemodelan dan simulasi algoritma. MATLAB dipilih karena memiliki kemampuan komputasi numerik yang baik, mendukung pengolahan matriks, serta mampu menangani perhitungan iteratif secara efisien sehingga sesuai untuk penerapan dan pengujian algoritma ACS pada permasalahan optimasi rute.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam skripsi ini sebagai berikut:

1. Bagaimana prinsip kerja algoritma semut dengan metode *Ant Colony System* (ACS)?

2. Bagaimana algoritma semut metode ACS digunakan untuk menentukan jalur optimal pada masalah *Traveling Salesman Problem (TSP)*?
3. Bagaimana penerapan algoritma semut metode ACS pada masalah TSP dalam penentuan jalur pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka tujuan dari skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Menjelaskan prinsip kerja algoritma semut metode *Ant Colony System (ACS)*.
2. Mengetahui dan menerapkan tahapan membangun algoritma semut ACS untuk menentukan jalur optimal pada masalah *Traveling Salesman Problem (TSP)*.
3. Menerapkan algoritma semut ACS pada masalah TSP dalam penentuan jalur pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta.

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan tujuan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka batasan masalah dalam skripsi ini sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian difokuskan pada wilayah kerja Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Yogyakarta.
2. Data jarak dan waktu antar titik diambil dari *Google Maps* pada 02/12/2015 pukul 10.19.
3. Jumlah titik lokasi yang digunakan dalam simulasi dibatasi sesuai data yang tersedia di DLH.
4. Penentuan rute optimal berdasarkan jarak dan waktu tempuh, sedangkan faktor waktu muat, kapasitas kendaraan, dan tingkat kemacetan diabaikan.

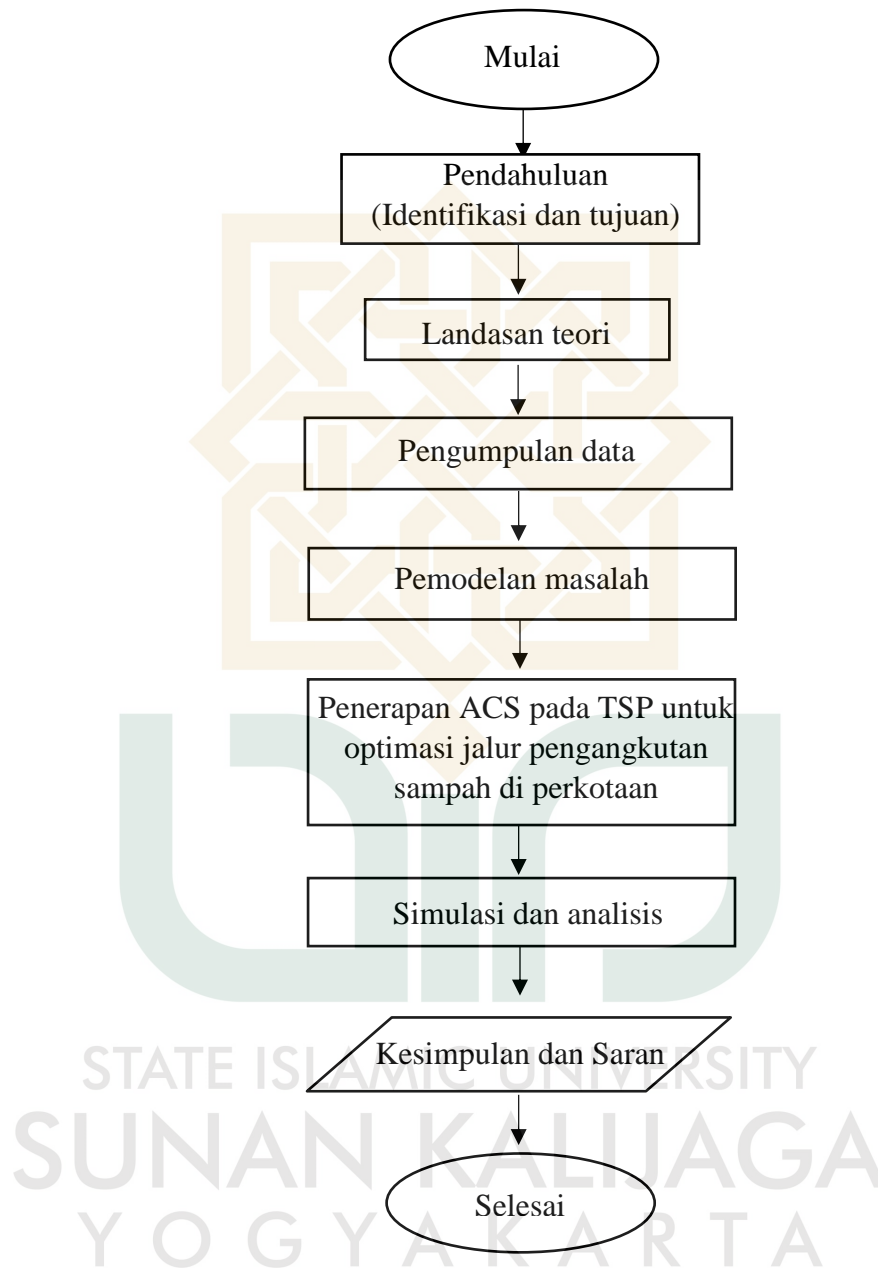
1.5 Metode Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam skripsi ini yaitu penelitian lapangan dengan metode observasi dan wawancara langsung di lokasi pengelolaan sampah, termasuk depo pengangkutan dan kantor Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Yogyakarta. Data yang digunakan dalam skripsi ini sebagian besar berupa data primer yang diperoleh langsung melalui pengamatan, wawancara, dan dokumentasi

proses operasional pengangkutan sampah. Selain itu, skripsi ini juga memanfaatkan data sekunder dari sumber resmi seperti Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) untuk memberikan gambaran umum mengenai volume sampah di Kota Yogyakarta. Skripsi ini bersifat terapan karena menerapkan konsep algoritma semut pada kasus pengangkutan sampah secara nyata berdasarkan data lapangan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar yang lebih akurat untuk optimasi rute pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta.



Langkah-langkah skripsi ini digambarkan dengan diagram alur (*flowchart*) sebagai berikut:



Gambar 1.1 Metode Penelitian

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari skripsi ini dibagi menjadi dua manfaat, yaitu manfaat teoritis dan praktis sebagai berikut:

a. Manfaat Teoritis

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan wawasan akademik mengenai penerapan teori graf dan algoritma *Ant Colony System (ACS)*, dalam menyelesaikan *Traveling Salesman Problem (TSP)* pada masalah optimasi kombinatorial.
2. Menjadi rujukan bagi penelitian selanjutnya yang ingin mengembangkan metode optimasi rute, khususnya konteks transportasi, logistik, maupun sistem distribusi di wilayah perkotaan.

b. Manfaat Praktis

1. Memberikan pengalaman langsung pada penulis dalam mengolah data dan menyusun rute optimal pengangkutan sampah pada TSP menggunakan algoritma ACS.
2. Bagi Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Yogyakarta, dapat memberikan rekomendasi rute pengangkutan yang lebih efisien untuk mengurangi jarak tempuh, waktu operasional, dan konsumsi bahan bakar truk pengangkut sampah.
3. Bagi masyarakat, dapat membantu mempercepat proses pengangkutan sampah sehingga lingkungan sekitar lebih bersih dan sehat.

1.7 Tinjauan Pustaka

Pustaka utama dalam skripsi ini adalah jurnal oleh Marco Dorigo dan Luca Gambardella (1997) yang diterbitkan oleh *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*. Jurnal ini menjadi dasar teoritis utama karena menjelaskan secara rinci mekanisme algoritma semut dalam menyelesaikan TSP. Model ini memperkenalkan pendekatan pembaharuan feromon, aturan pemilihan jalur probabilistik, dan mekanisme pembelajaran kooperatif antar semut. Penjelasan tersebut menjadi landasan bagi pengembangan algoritma optimasi berbasis koloni semut, termasuk pengembangan ACS yang digunakan dalam skripsi ini.

Pustaka lain yang digunakan sebagai tinjauan pustaka adalah penelitian oleh Desi Febriani Putri et al., (2025). Penelitian tersebut membahas penerapan algoritma semut ACS untuk menentukan rute terpendek tempat-tempat populer di Kota Samarinda yang dimodelkan sebagai *Traveling Salesman Problem* (TSP). Hasilnya menunjukkan bahwa ACS mampu menemukan rute mendekati optimal serta terbukti efektif dalam menyelesaikan masalah optimasi rute.

Penelitian oleh Khoswara et al., (2023) menjelaskan penerapan metode ACO dalam menyelesaikan masalah distribusi yang dimodelkan sebagai *Traveling Salesman Problem* (TSP). Penelitian tersebut menguraikan prinsip kerja ACO melalui mekanisme feromon, visibilitas, serta proses iterasi untuk memperoleh rute terpendek. Hasilnya menunjukkan bahwa ACO mampu menghasilkan rute optimal sehingga dapat meminimalkan jarak tempuh, biaya, dan waktu distribusi.

Ismail et al., (2021), dari Universitas Gadjah Mada menerapkan ACO untuk menentukan jalur optimal proses pengumpulan sampah pada lingkungan pemukiman padat, dengan mempertimbangkan hambatan seperti jalan buntu dan rute berputar dalam proses penentuan jalur. Hasil skripsi menunjukkan bahwa algoritma semut dapat membantu meningkatkan efisiensi rute pengangkutan sampah pada kompleks perumahan.

Lestari et al., (2013) dari Universitas Negeri Yogyakarta melakukan penelitian dengan menerapkan ACO untuk merancang sistem distribusi pengangkutan sampah di wilayah Yogyakarta. Fokus penelitian terletak pada efisiensi rute distribusi yang lebih optimal dan mengurangi waktu tempuh kendaraan pengangkut sampah. Selain itu, skripsi ini memperhatikan pengaturan rute biaya operasional dan konsumsi bahan bakar agar dapat diminimalkan.

Sementara itu, skripsi Derrida Atsmarotul Ilmi (2026) ini menggunakan metode algoritma semut *Ant Colony System* (ACS) untuk menyelesaikan permasalahan *Traveling Salesman Problem* (TSP) dalam konteks pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta. Studi kasus ini berfokus pada penentuan jalur mendekati optimal kendaraan pengangkut sampah yang melintasi beberapa depo secara efisien. Data lokasi depo diperoleh dari sumber resmi dan disimulasikan menggunakan model graf berbobot yang merepresentasikan jarak antar titik. Skripsi

ini menggunakan data terbaru yang diambil langsung dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Yogyakarta, sehingga kondisi jalur menggambarkan situasi terkini di lapangan dan menjadi pembeda dari penelitian sebelumnya. Pemilihan jalur dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi waktu dan jarak tempuh, karena kondisi jalan di wilayah perkotaan yang padat dan bervariasi.

Dari berbagai pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa algoritma semut telah banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan jalur terpendek dan jalur distribusi termasuk pada konteks pengangkutan sampah. Namun, penerapannya di wilayah Kota Yogyakarta dengan kondisi jalur terbaru dan bobot jarak berdasarkan data aktual masih jarang dilakukan. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian dalam mengoptimalkan rute pengangkutan sampah yang memperhitungkan perubahan kondisi lapangan secara langsung. Oleh karena itu, skripsi ini berfokus untuk mengoptimalkan rute pengangkutan sampah menggunakan algoritma semut berbasis representasi graf berbobot.



Tabel 1.1 Perbedaan dengan penelitian sebelumnya

No.	Nama Penulis	Judul	Perbedaan
1.	Marco Dorigo dan Luca Gambardella (1997)	<i>Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem</i>	Dasar teoritis utama ACS pada masalah TSP, serta menguji optimalitas ACS dibandingkan dengan metode yang lain.
2.	Kurniawan Noor Bilal, Desi Febriani Putri, Fidia Deny Tisna Amijaya, Karina Putri, dan Dimas Radiya Sahputra (2025)	<i>Implementasi Algoritma Ant Colony Optimization untuk Menentukan Rute Terpendek Tempat Populer di Kota Samarinda</i>	Menerapkan ACS, tetapi pemilihan jalur hanya menggunakan eksplorasi.
3.	Lutfi, Moch Khoswara, Habibi Siraj Aflah H., dan Suseno (2023)	<i>Pencarian Rute Optimal Distribusi Melalui Pendekatan Metode Ant Colony Optimization (ACO) (Studi Kasus: Bakpia Pathok 25)</i>	Penelitian menggunakan ACO klasik dengan <i>software</i> MATLAB pada distribusi produk dengan jumlah lokasi terbatas (5 titik).
4.	Andhi Akhmad Ismail, Krisnaputra, dan Irfan Bahiuddin (2021)	<i>Application of Ant Colony Optimization for the Shortest Path Problem of Waste Collection Process</i>	Menerapkan ACO untuk menentukan jalur optimal pengumpulan sampah di permukiman padat dengan mempertimbangkan hambatan seperti jalan buntu dan jalur berputar.
5.	Immawati Puji Lestari dan Eminugroho Ratna Sari (2013)	<i>Penerapan Algoritma Koloni Semut untuk Optimisasi Rute Distribusi Pengangkutan Sampah di Kota Yogyakarta</i>	Menggunakan ACO klasik untuk optimisasi rute distribusi sampah di Kota Yogyakarta, fokus pada efisiensi waktu tempuh kendaraan
6.	Derrida Atsmarotul Iلمي (2026)	<i>Penerapan Algoritma Semut pada Traveling Salesman Problem untuk Optimasi Jalur Pengangkutan Sampah di Kota Yogyakarta</i>	Mengembangkan penelitian sebelumnya dengan metode ACS yang menggunakan data depo terkini, representasi graf berbobot aktual, dan fokus pada efisiensi waktu/jarak tempuh dalam konteks TSP pengangkutan sampah perkotaan.

1.8 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini terdiri dari lima bab sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab I dibahas mengenai latar belakang dan perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode dan manfaat penelitian, tinjauan pustaka dan sistematika penulisan sebagai penutup bab.

BAB II : LANDASAN TEORI

Dalam bab II dijelaskan mengenai teori-teori yang menjadi dasar dalam pembahasan algoritma, meliputi teori graf, representasi graf pada matriks ketetanggaan, jalur terpendek pada graf berbobot, optimalisasi jalur terpendek, *Traveling Salesman Problem*, Algoritma *Greedy*, MATLAB, dan *Ant Colony Optimization* (ACO), yang mencakup algoritma koloni semut *Ant Colony System* (ACS)

BAB III : PEMBAHASAN

Bab ini membahas tahapan membangun langkah jalur ACS pada permasalahan TSP dalam penerapan kasus sederhana, sebagai ilustrasi penyelesaian studi kasus.

BAB IV : STUDI KASUS

Bab ini menerapkan algoritma ACS pada permasalahan TSP dalam konteks pengoptimalan rute pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta. Pada bab ini dijelaskan tahapan penerapan algoritma, proses pemodelan graf berbobot berdasarkan data lokasi depo, serta hasil simulasi dalam menentukan jalur paling efisien dari segi waktu tempuh dan jarak perjalanan kendaraan pengangkutan sampah.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran yang diperoleh dari hasil pembahasan algoritma ACS pada TSP untuk pengoptimalan rute

pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta. Kesimpulan merangkum hasil analisis dan pencapaian tujuan penelitian, sedangkan saran disampaikan sebagai bahan pertimbangan bagi penelitian selanjutnya maupun pengembangan sistem pengelolaan sampah yang lebih efisien.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Algoritma semut *Ant Colony System* (ACS) merupakan algoritma optimasi, yang meniru perilaku koloni semut dalam mencari rute terpendek. Pada metode ini, setiap semut memulai perjalanan dari titik awal dan secara bertahap membangun solusi dengan mengunjungi satu per satu titik tujuan. Dalam setiap langkah, pemilihan titik berikutnya dilakukan berdasarkan intensitas feromon dan nilai visibilitas. Pemilihan ini menggunakan aturan transisi keadaan yang menyeimbangkan proses eksploitasi terhadap rute terbaik dan eksplorasi terhadap rute baru. Selama proses pencarian, pembaruan feromon lokal diterapkan pada setiap sisi yang dilalui semut, untuk menurunkan intensitas feromon, Setelah seluruh semut menyelesaikan perjalanan, pembaruan feromon global dilakukan pada rute terbaik, untuk meningkatkan intensitas feromon pada jalur tersebut.

Algoritma ACS diterapkan sebagai metode penyelesaian masalah *Traveling Salesman Problem* (TSP) untuk meminimalkan total waktu tempuh perjalanan. Permasalahan TSP dimodelkan dalam bentuk graf lengkap berbobot, dengan setiap lokasi direpresentasikan sebagai simpul (titik), dan jarak antar lokasi sebagai bobot sisi. Dalam proses pencarian solusi, setiap semut membentuk satu rute dengan mengunjungi seluruh titik tepat satu kali, dan kembali ke titik awal. Pemilihan lokasi berikutnya dilakukan berdasarkan intensitas feromon dan nilai visibilitas. Selanjutnya, total jarak tempuh dari setiap rute dihitung untuk menentukan solusi terbaik pada setiap iterasi. Rute dengan total jarak minimum kemudian diperkuat melalui pembaruan feromon global, sedangkan rute lainnya mengalami penguapan feromon. Proses ini berlangsung secara iteratif hingga diperoleh rute TSP yang optimal.

Penerapan algoritma ACS pada masalah TSP dalam penentuan jalur pengangkutan sampah di Kota Yogyakarta, memodelkan lokasi depo pengangkutan sampah sebagai simpul, dan jarak tempuh antar depo sebagai bobot sisi. Setiap solusi yang dibangun oleh semut, merepresentasikan satu rute pengangkutan yang mengunjungi seluruh depo tepat satu kali dan kembali ke titik awal. Algoritma ACS kemudian digunakan untuk mencari rute optimal berdasarkan kriteria optimasi yang diterapkan, yaitu jarak dan waktu tempuh. Pada kondisi tanpa mempertimbangkan kapasitas truk, hasil optimasi menunjukkan bahwa penerapan ACS menghasilkan rute terpendek dengan total jarak tempuh sebesar 43,4 km dengan waktu 130 menit. Sementara itu, pada kondisi dengan mempertimbangkan kapasitas truk, hasil simulasi menunjukkan rute terpendek dengan total jarak tempuh sebesar 142,9 km dengan waktu 429 menit. Dengan demikian, berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, algoritma ACS dapat digunakan sebagai salah satu pendekatan dalam perencanaan jalur pengangkutan sampah, khususnya di wilayah Kota Yogyakarta.

5.2 Saran

Saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mempertimbangkan variabel tambahan yang dapat memengaruhi proses distribusi, seperti kondisi kepadatan lalu lintas, sehingga model tidak hanya berbasis jarak atau waktu.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model yang lebih kompleks, seperti *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan secara lebih realistis, mengingat pada pemodelan ACS pada TSP, kapasitas kendaraan belum menjadi kendala utama.

DAFTAR PUSTAKA

- Anam, A. K. (2025, September 29). *Darurat sampah, DLH Yogyakarta kosongkan depo dan tingkatkan operasi UPS 24 jam mulai hari ini*. Disway Jogja.
- Blum, C., Roli, A., & Singh, P. (2003). Metaheuristic Algorithms for Optimization: A Brief Review. *Engineering Proceedings*, 59(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2023059238>
- Bondy, J. A., & Murty, U. S. R. (1976). *GRAPH THEORY WITH APPLICATIONS NORfH-HOLLAND New York • Amsterdam • Oxford*.
- Danies Mahendra, Y., & Burhanuddin, A. (2019). SISTEM PENENTUAN JARAK TERDEKAT DALAM PENGIRIMAN DARAH DI PMI KOTA SEMARANG DENGAN METODE ALGORITMA GREEDY. In *Jurnal Komtika-Komputasi dan Informatika* (Vol. 136, Number 2).
- de Mello Filho, L. V. F., dkk. (2025). *Application of the Ant Colony Optimization Metaheuristic in Transport Engineering: A Case Study on Vehicle Routing and Highway Service Stations*. *Modelling*, 6(3) <https://doi.org/10.3390/modelling6030062>
- Desi Febriani Putri, Kurniawan Noor Bilal, Fidia Deny Tisna Amijaya, Karina Putri, & Dimas Raditya Sahputra. (2025). Implementasi Algoritma Ant Colony Optimization untuk Menentukan Rute Terpendek Tempat Populer di Kota Samarinda. *JMT: Jurnal Matematika Dan Terapan*, 7(1), 17–25. <https://doi.org/10.21009/jmt.7.1.3>
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997a). Ant colonies for the travelling salesman problem. In *Switzerland Received* (Vol. 43).
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997b). Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 53–66. <https://doi.org/10.1109/4235.585892>
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Coloni, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(1), 29–41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). Ant colony optimization: Overview and recent advances. In *International Series in Operations Research and Management Science* (Vol. 272, pp. 311–351). Springer New York LLC. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4_10

- García, A. (2025). Greedy algorithms: a review and open problems. In *Journal of Inequalities and Applications* (Vol. 2025, Number 1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1186/s13660-025-03254-1>
- Ghimire, B., Mahmood, A., & Elleithy, K. (2023). Hybrid Parallel Ant Colony Optimization for Application to Quantum Computing to Solve Large-Scale Combinatorial Optimization Problems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/app132111817>
- Harris, J. M., Hirst, J. L., & Mossinghoff, M. J. (2008). *Combinatorics and Graph Theory, Second Edition (Undergraduate Texts in Mathematics)*. <http://www.springer.com/series/666>
- Huo, C. (n.d.). *Analysis of the Weighted Graph Shortest Path Problem: Algorithms, Applications, and Challenges*.
- Ibrahim, & Mussafi, N. S. M. (2013). *Pengantar Kombinatorika dan Teori Graf* (1st ed.). Graha Ilmu.
- Imanparast, M. (n.d.). *Challenges and strategies for tackling NP-hard problems*. Retrieved <https://www.researchgate.net/publication/387577142>
- Islam, E., Sultana, M., & Ahmed, F. (2018). A Tale of Revolution: Discovery and Development of TSP. In *International Journal of Mathematics Trends and Technology* (Vol. 57, Number 2). <http://www.ijmtjournal.org>
- Ismail, A. A., Krisnaputra, R., & Bahiuddin, I. (2021). Application of Ant Colony Optimization for the Shortest Path Problem of Waste Collection Process. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v6i3.1307>
- Joyner, D., Nguyen, M. Van, & Phillips, D. (2013). *Algorithmic Graph Theory and Sage*. <http://code.google.com/p/graphbook/>
- Juita, & Issn, -. (2017). Kajian terhadap Beberapa Metode Optimasi (Survey of Optimization Methods). In *Survey of Optimization ... | Munirah: V*.
- Khoswara, M., Siraj Aflah, H. H., & Sains dan Teknologi, F. (2023). Pencarian Rute Optimal Distribusi Melalui Pendekatan Metode Ant Colony Optimization (ACO) (Studi Kasus : Bakpia Pathok 25). *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, 2(2), 63–71.
- Lestari, H. P., Eminugroho, D., & Sari, R. (2013). Penerapan algoritma koloni semut untuk optimisasi rute distribusi pengangkutan sampah di kota Yogyakarta (The application of ant colony algorithm to optimize the

distribution route of waste collection in Yogyakarta). In *J. Sains Dasar* (Vol. 2, Number 1).

Luenberger, D. G., & Ye, Y. (2013). *Linear and nonlinear programming* (3rd ed.). Springer.

Mutakhirah, I., Indrato, & Hidayat, T. (2007). Pencarian Jalur Terpendek Menggunakan Algoritma Semut. In *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi*.

Pratiwi, H. (2022). Application Of The Dijkstra Algorithm To Determine The Shortest Route From City Center Surabaya To Historical Places. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, 4(1), 213–223. <https://doi.org/10.47233/jteksis.v4i1.407>

Sahid, S. (2005). *Panduan praktis MATLAB*. Yogyakarta State University. <https://www.researchgate.net/publication/325168655>

Shahadat, A. S. Bin, Akhand, M. A. H., & Kamal, M. A. S. (2022). Visibility Adaptation in Ant Colony Optimization for Solving Traveling Salesman Problem. *Mathematics*, 10(14). <https://doi.org/10.3390/math10142448>

Stefania Ade Jaro, K., Khopipah, & Napis. (2025). Matematika Diskrit Teori Graf Pada LRT dalam Mengatasi Kemacetan : Studi Literatur. *Daerah Khusus Jakarta*, 12530. <https://doi.org/10.62383/pentagon.v3i3.726>

Stützle, T., & Dorigo, M. (2004). *Ant Colony Optimization*. <https://www.researchgate.net/publication/36146886>