

**PENGEMBANGAN MODEL *GREEN CAPACITATED VEHICLE ROUTING*
PROBLEM (GCVRP) PADA OPTIMASI DISTRIBUSI DENGAN MENGGUNAKAN
METODE *MIXED INTEGER LINEAR PROGRAM* (MILP)**

(Studi Kasus : PDAM Tirta Binangun Kulon Progo)

Diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga

Untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.)



Disusun oleh :

Nama : Dias Dzaky K

NIM : 19106060015

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2023

LEMBAR PENGESAHAN



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-1366/Un.02/DST/PP.00.9/06/2023

Tugas Akhir dengan judul : Pengembangan Model Green Capacitated Vehicle Routing Problem (GCVRP) pada Optimasi Distribusi dengan Menggunakan Metode Mixed Integer Linear Program (MILP) (Studi Kasus : PDAM Tirta Binangun Kulon Progo)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : DIAS DZAKY KUMARANANDA
Nomor Induk Mahasiswa : 19106060015
Telah diujikan pada : Kamis, 25 Mei 2023
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Ir. Dwi Agustina Kurniawati, S.T.,M.Eng.,Ph.D, IPM, ASEAN
Eng
SIGNED

Valid ID: 647d946181756



Penguji I

Dr. Ir. Yandra Rahadian Perdana, ST., MT
SIGNED

Valid ID: 646fe0869b398



Penguji II

Herninanjati Paramawardhani, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 64703a93d9d3d



Yogyakarta, 25 Mei 2023.
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 647da28ad8265

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Surat Persetujuan Skripsi/Tugas Akhir

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga

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 : Dias Dzaky Kumarananda

NIM : 19106060015

Judul Skripsi : Pengembangan Model *Green Capacitated Vehicle Routing Problem* (GCVRP) pada Optimasi Distribusi dengan Menggunakan Metode *Mixed Integer Linear Program* (MILP) (Studi Kasus PDAM Tirta Binangun Kulon Progo)

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

Dengan ini kami mengharapkan agar skripsi/tugas akhir saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqosyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr wb

Yogyakarta, 11 Mei 2023

Dosen Pembimbing Skripsi,



Ir. Dwi Agustina Kurniawati, S.T.

M.Eng., Ph.D, IPM, ASEAN Eng

NIP. 19790806 200604 2 001

SURAT KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dias Dzaky Kumarananda

NIM : 19106060015

Program Studi : Teknik Industri

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya bahwa skripsi saya yang berjudul: "Pengembangan Model *Green Capacitated Vehicle Routing Problem* (GCVRP) pada Optimasi Distribusi dengan Menggunakan Metode *Mixed Integer Linear Program* (MILP) (Studi Kasus : PDAM Tirta Binangun Kulon Progo)" adalah hasil karya pribadi yang tidak mengandung plagiarisme dan berisi materi yang dipublikasikan atau ditulis orang lain, kecuali bagian-bagian tertentu yang penulis ambil sebagian dengan tata cara yang dibenarkan secara ilmiah.

Jika terbukti pernyataan ini tidak benar, maka penulis siap mempertanggungjawabkan sesuai hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 21 Mei 2023
Yang menyatakan,

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA



Dias Dzaky Kumarananda
NIM 19106060015

MOTTO

“Menunda memang terasa ringan, tetapi dirimu di masa depan akan menanggung beban yang lebih berat.”



HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirobbil'aalamiin, segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi ini yang berjudul Pengembangan Model *Green Capacitated Vehicle Routing Problem* (GCVRP) pada Optimasi Distribusi dengan Menggunakan Metode *Mixed Integer Linear Program* (MILP) (Studi Kasus PDAM Tirta Binangun Kulon Progo)

Tujuan dari penyusunan skripsi ini adalah untuk memperluas pengetahuan dan pemahaman pembaca mengenai analisis berbagai permasalahan yang sering dihadapi oleh perusahaan dalam meningkatkan efektivitas rute distribusinya. Skripsi ini juga dibuat untuk memenuhi persyaratan dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) di Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis menghadapi berbagai kesulitan dan tantangan. Namun, berkat bantuan dan dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan hasil yang maksimal. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan seluruh anggota keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tidak pernah berhenti dalam proses pengerjaan skripsi ini.
2. Ibu Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si. sebagai Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga beserta seluruh jajaran staf yang telah memberikan dukungan dan bantuan yang luar biasa dalam menyelesaikan berbagai permasalahan dan kebutuhan di lingkungan kampus. Tanpa bantuan mereka, saya tidak akan dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar.

3. Bapak Dr. Eng. Ir. Cahyono Sigit Pramudyo, S.T., M.T, IPM. selaku Ketua Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta atas bantuan dan dukungannya dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Ibu Tutik Farihah, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik (DPA) yang telah memberikan bimbingan, nasihat, dan arahan yang sangat berharga selama perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir ini.
5. Ibu Ir. Dwi Agustina Kurniawati, S.T.,M.Eng.,Ph.D, IPM, ASEAN Eng. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan arahan, nasihat, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
6. Semua tenaga pengajar dan staf di Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta telah memberikan dukungan, pengajaran, bimbingan, dan pelayanan selama studi dan dalam proses penyusunan skripsi ini.
7. Semua pejabat, pegawai, dan karyawan di PDAM Tirta Binangun yang telah memberikan bantuan selama penelitian di PDAM Tirta Binangun kepada penulis.
8. NIM 04 yang selalu memberikan motivasi dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Keluarga besar Teknik Industri 2019 (In.Somnia) yang selalu memberikan dukungan.
10. Seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan tersebut dan memberikan berkah yang berlimpah pada semua orang yang telah membantu, aamiin

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'aalamiin, segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi ini yang berjudul Pengembangan Model *Green Capacitated Vehicle Routing Problem* (GCVRP) pada Optimasi Distribusi dengan Menggunakan Metode *Mixed Integer Linear Program* (MILP) (Studi Kasus PDAM Tirta Binangun Kulon Progo)

Tujuan dari penyusunan skripsi ini adalah untuk memperluas pengetahuan dan pemahaman pembaca mengenai analisis berbagai permasalahan yang sering dihadapi oleh perusahaan dalam meningkatkan efektivitas rute distribusinya. Skripsi ini juga dibuat untuk memenuhi persyaratan dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) di Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Penulis mengalami berbagai kesulitan dan tantangan selama proses penyusunan skripsi ini. Namun, berkat bantuan dan dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan hasil yang maksimal. Semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini. Dalam rangka perbaikan selanjutnya, dengan rendah hati diharapkan adanya saran dan kritik yang bersifat membangun dari semua pihak.

Yogyakarta, 21 Mei 2023

Penulis,



Dias Dzaky K

NIM.19106060015

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	i
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI.....	ii
SURAT KEASLIAN SKRIPSI	iii
MOTTO	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
ABSTRAK	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Logistik.....	10
2.2.2 <i>Vehicle Routing Problem</i> (VRP)	10
2.2.3 <i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i> (CVRP).....	12
2.2.4 <i>Green Capacitated Vehicle Routing Problem</i> (GCVRP)	13
2.2.5 <i>Mixed Integer Linear Program</i> (MILP)	22
2.2.6 <i>Google Maps API (Application Programming Interface)</i>	23
2.2.7 <i>Microsoft Excel</i>	23
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Objek Penelitian.....	25

3.2	Metode Pengumpulan Data.....	25
3.2.1	Data yang dibutuhkan.....	25
3.2.2	Teknik Pengumpulan Data	26
3.3	Validitas/Reliabilitas.....	26
3.4	Variabel Penelitian.....	27
3.5	Model Analisis.....	27
3.6	Diagram Alir Penelitian	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		31
4.1	Gambaran Umum Perusahaan	31
4.1.1	Sejarah	31
4.1.2	Visi Misi	32
4.1.3	Struktur Organisasi.....	32
4.1.4	Proses Produksi	33
4.2	Pengumpulan Data.....	35
4.2.1	Data Kendaraan	35
4.2.2	Data Produk	35
4.2.3	Data Permintaan	36
4.2.4	Data Rute <i>Existing</i>	41
4.3	Hasil Analisis.....	43
4.3.1	Perhitungan Emisi Gas CO2 Rute <i>Existing</i>	43
4.3.2	Pengembangan Model <i>Green Capacitated Vehicle Routing Problem</i>	46
4.3.3	Pembuatan Kode CPLEX.....	50
4.3.4	Implementasi Model.....	56
4.4	Pembahasan	61
4.5	Implikasi Manajerial	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		67
5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	67
DAFTAR PUSTAKA.....		69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu.....	8
Tabel 4. 1 Data Kendaraan	35
Tabel 4. 2 Data Produk	35
Tabel 4. 3 Data Rute Existing.....	41
Tabel 4. 4 Contoh perhitungan emisi gas CO2.....	44
Tabel 4. 5 Perhitungan Emisi Gas CO2 Rute Existing.....	45
Tabel 4. 6 Hasil Pengolahan Data	62
Tabel 4. 7 Perbandingan emisi gas CO2	64
Tabel 4. 8 Perbandingan Jarak Tempuh	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian	29
Gambar 4. 1 Struktur Organisasi	33
Gambar 4. 2 Proses Produksi.....	33
Gambar 4. 3 Data Permintaan Tanggal 13 Februari 2023	36
Gambar 4. 4 Data Permintaan Tanggal 14 Februari 2023	36
Gambar 4. 5 Data Permintaan Tanggal 15 Februari 2023	37
Gambar 4. 6 Data Permintaan Tanggal 16 Februari 2023	37
Gambar 4. 7 Data Permintaan Tanggal 17 Februari 2023	38
Gambar 4. 8 Data Permintaan Tanggal 20 Februari 2023	38
Gambar 4. 9 Data Permintaan Tanggal 21 Februari 2023	39
Gambar 4. 10 Data Permintaan Tanggal 22 Februari 2023	39
Gambar 4. 11 Data Permintaan Tanggal 23 Februari 2023	40
Gambar 4. 12 Data Permintaan Tanggal 24 Februari 2023	40
Gambar 4. 13 Data Permintaan Tanggal 27 Februari 2023	41
Gambar 4. 14 Data Permintaan Tanggal 28 Februari 2023	41
Gambar 4. 15 Input Data	57
Gambar 4. 16 Input Data	57
Gambar 4. 17 Matriks Jarak	57
Gambar 4. 18 Output file.txt.....	58
Gambar 4. 19 Output Excel	58
Gambar 4. 20 Output Google Maps Trip 1.....	59
Gambar 4. 21 Output Google Maps Trip 2.....	59
Gambar 4. 22 Output Google Maps Trip 3.....	60
Gambar 4. 23 Output Google Maps Trip 4.....	60
Gambar 4. 24 Output Google Maps Trip 5.....	61

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Permintaan.....	L-1
Lampiran 2. Matriks Jarak.....	L-7
Lampiran 3. Lembar Wawancara	L-19
Lampiran 4. Dokumentasi	L-20
Lampiran 5. Petunjuk Penggunaan.....	L-21



ABSTRAK

Di Indonesia, sektor transportasi merupakan penyumbang emisi gas karbon dioksida (CO₂) terbesar kedua, yakni 24,64% dari total emisi pada tahun 2019. Salah satu upaya untuk mencapai target dalam menekan emisi di sektor transportasi adalah dengan memilih rute pengiriman yang tepat. Penelitian ini mengembangkan model matematika *Mixed Integer Linear Program* (MILP) pada permasalahan rute dengan tujuan meminimalkan emisi gas CO₂ dengan pertimbangan kapasitas kendaraan yang biasa disebut *Green Capacitated Vehicle Routing Problem* (GCVRP). Model yang dikembangkan menggunakan matriks emisi yang mempertimbangkan perbedaan beban pada setiap angkutan dan menyadari bahwa kendaraan dengan beban yang lebih berat cenderung menghasilkan emisi faktor yang lebih besar daripada kendaraan dengan beban yang lebih ringan. *Software* yang digunakan dalam pengolahan data yaitu CPLEX dengan integrasi Excel sebagai *input* dan *output* data. Model juga memanfaatkan bantuan *Application Programming Interface* (API) *Google Maps* untuk perhitungan jarak secara otomatis. *Output* program memiliki tampilan yang *user-friendly* sehingga mudah dibaca pengguna bahkan dapat menampilkan *link google maps* rute yang diusulkan. Penelitian ini menggunakan data uji pada rute distribusi Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Binangun Kulon Progo selama 12 hari pada tanggal 13-28 Februari 2023. Hasilnya menunjukkan penghematan emisi CO₂ kendaraan sebesar 25,471% dan jarak tempuh sebesar 24,929%. Dengan menggunakan model matematika MILP yang mempertimbangkan faktor-faktor seperti kapasitas kendaraan dan perbedaan beban pada setiap kendaraan, serta memanfaatkan teknologi API *Google Maps*, program ini mampu menghasilkan penghematan emisi CO₂ yang signifikan dan jarak tempuh yang lebih efisien.

Kata kunci: Transportasi Hijau, GCVRP, Matriks Emisi, MILP, API Google Maps



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

ABSTRACT

In Indonesia, the transportation sector is the second largest contributor to carbon dioxide (CO₂) emissions, accounting for 24.64% of total emissions in 2019. One effort to achieve emission reduction targets in the transportation sector is by selecting the appropriate shipping routes. This study developed a mathematical model called Mixed Integer Linear Program (MILP) for the routing problem with the aim of minimizing CO₂ gas emissions, while considering vehicle capacity, which is commonly known as the Green Capacitated Vehicle Routing Problem (GCVRP). The developed model uses an emission matrix that considers the difference in load for each transport and acknowledges that heavier vehicles tend to produce higher emission factors than lighter vehicles. The software used for data processing is CPLEX with Excel integration as input and output data. The model also utilizes the assistance of the Google Maps Application Programming Interface (API) in automatically calculating distances. The program output has a user-friendly display that is easy for users to read and can even display a Google Maps link to the proposed route. This study used test data on the distribution route of Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Binangun Kulon Progo for 12 days from February 13-28, 2023. The results showed a significant reduction in CO₂ emissions by 25.471% and a distance savings of 24.929% for the vehicles. By using the MILP mathematical model that considers factors such as vehicle capacity and load differences for each vehicle, as well as utilizing Google Maps API technology, this program is able to generate significant CO₂ emission reductions and more efficient distances traveled.

Keyword: Green Transportation, GCVRP, Emission Matrix, MILP, Google Maps API



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Saat ini, telah dilakukan program yang gencar untuk menekan pencemaran lingkungan, yaitu *Net Zero Emissions* (NZE), terutama dalam mengurangi emisi gas CO₂. Pada tahun 2019, emisi CO₂ di Indonesia mencapai 638.452 gigagram (Gg). Sektor transportasi merupakan penyumbang emisi gas CO₂ terbesar kedua yaitu 24,64%, setelah sektor produsen energi yaitu 43,83% (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2020). Dalam lingkup Asia-Pasifik, Indonesia merupakan peringkat ketiga penyumbang terbesar gas CO₂ setelah China dan Jepang. Sedangkan dalam lingkup dunia, Indonesia menempati peringkat kedelapan penyumbang terbesar dengan sumbangan sebesar 1,7% dari total gas CO₂ yang dihasilkan oleh seluruh negara di muka bumi (*Climate Watch Data: Climate Watch, 2022*). Emisi gas CO₂ dapat menyebabkan penipisan lapisan ozon, yang akan berdampak global warming dan juga perubahan iklim (Yoro & Daramola, 2020). Salah satu upaya untuk mencapai target dalam menekan emisi di sektor transportasi adalah dengan memilih rute pengiriman yang tepat.

PDAM Tirta Binangun merupakan perusahaan yang memproduksi air mineral dengan merk Airku yang memiliki 5 jenis produk antara lain cup 120 ml, cup 240 ml, botol 330 ml, botol 600 ml, dan galon 19 liter. Kelima jenis produk tersebut dimuat dalam satu kendaraan. Berdasarkan observasi secara langsung di PDAM Tirta Binangun, dalam melayani permintaan konsumen belum ada mekanisme yang dilakukan secara teratur. Kondisi ini menimbulkan kekhawatiran bahwa pengiriman tidak sesuai permintaan pelanggan. Selain itu, dikhawatirkan jalur pengiriman yang seharusnya dapat ditempuh lebih pendek justru lebih panjang. Masalah ini menunjukkan bahwa rute pengiriman air

minum belum optimal. Kurangnya perencanaan yang efisien dalam menentukan jalur pengiriman air dapat mengakibatkan pengiriman yang tidak efektif dan membuang-buang waktu serta sumber daya.

Sistem pengiriman di PDAM saat ini terdapat kecenderungan untuk menggunakan rute yang lebih panjang dan kurang efisien dalam perjalanan. Hal ini dapat disebabkan oleh kurangnya perencanaan yang baik dalam menentukan jalur transportasi. Rute yang tidak efisien ini mengakibatkan kendaraan menghabiskan lebih banyak waktu di jalan, sehingga meningkatkan emisi gas buang yang dikeluarkan. Polusi udara yang dihasilkan oleh kendaraan, seperti partikel-partikel berbahaya dan gas rumah kaca, berkontribusi pada penurunan kualitas udara dan memberikan dampak negatif terhadap kesehatan manusia serta lingkungan. Oleh karena itu diperlukan solusi untuk mengatasi permasalahan rute dengan meminimalkan jarak tempuh kendaraan dan juga mempertimbangkan aspek lingkungan.

Permasalahan yang terjadi merupakan *Green Capacitated Vehicle Routing Problem* (GCVRP) yang dapat diselesaikan menggunakan pendekatan algoritma baik *exact* ataupun *approximate*. Metode *approximate* adalah metode penyelesaian yang dilakukan secara iteratif, di mana langkah-langkahnya dilakukan satu per satu dengan tujuan mencapai solusi yang memenuhi batasan atau biasa disebut *feasible solution* (Laporte, 1992). Dalam metode ini, langkah-langkah solusi diambil secara berurutan dan diuji untuk mencapai peningkatan dalam mencapai solusi yang memadai. Karakteristik utama dari metode *approximate* adalah bahwa metode tersebut seringkali menghentikan proses sebelum mencapai solusi yang optimal. Sehingga solusi yang ditemukan mungkin tidak memiliki tingkat keakuratan yang sama dengan solusi optimal yang dapat dicapai melalui metode *exact*.

Sedangkan metode *exact* merupakan metode penyelesaian yang bertujuan untuk mencapai solusi yang optimal dalam memenuhi batasan yang ditetapkan. Dalam metode *exact*, semua kemungkinan solusi diperiksa secara menyeluruh dan diuji untuk memastikan bahwa solusi yang ditemukan memenuhi semua batasan yang ada. Proses ini seringkali memerlukan perhitungan yang intensif dan waktu yang lebih lama, terutama ketika jumlah variabel dan batasan sangat besar. Metode *exact* melakukan eksplorasi lengkap terhadap seluruh ruang solusi yang memungkinkan, sehingga dapat menemukan solusi yang memiliki nilai objektif terbaik sesuai dengan kriteria yang ditetapkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode *exact* memiliki keunggulan dalam menghasilkan rute yang optimal dibandingkan metode *approximate* (Uchoa *et al.*, 2017).

Algoritma MILP merupakan metode *exact* yang dapat menghasilkan penyelesaian yang optimal dari model matematika yang sudah diformulasikan. Penyelesaian masalah optimasi dengan algoritma MILP dapat dilakukan dengan bantuan *software solver*. Pada penelitian ini, *software* yang digunakan untuk menerapkan model matematika MILP adalah CPLEX. Untuk mempermudah pergantian data dan interpretasi solusi, diperlukan adanya Excel sebagai *input* dan *output* data. Selain itu, untuk mendapatkan data jarak yang *real*, diperlukan integrasi dengan *Google Maps* API.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model yang *reusable* untuk meminimalkan emisi CO₂ dengan metode MILP. Salah satu keunggulan model yang *reusable* adalah kemampuannya untuk digunakan dengan set data yang berbeda. Dengan kata lain, model ini dapat diterapkan pada berbagai situasi atau skenario yang memerlukan pengurangan emisi CO₂. Selain itu, terdapat integrasi dengan *google maps* API yang dapat memudahkan dalam pengolahan data dengan perhitungan jarak yang otomatis. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam upaya

pengurangan emisi CO₂ dan memberikan panduan yang praktis dalam pengambilan keputusan terkait pemilihan strategi pengurangan emisi yang efektif.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Model MILP manakah yang sesuai dengan permasalahan GCVRP yang memiliki tujuan meminimalkan emisi gas CO₂?
2. Rute distribusi manakah yang optimal dari pengolahan data uji PDAM Tirta Binangun dengan menggunakan model yang dikembangkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Menentukan model MILP yang sesuai dengan permasalahan GCVRP dengan tujuan meminimalkan emisi gas CO₂.
2. Menghasilkan rute distribusi yang memiliki emisi CO₂ minimal dengan menggunakan model MILP yang dikembangkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini sebagai berikut:

1. Model GCVRP yang dikembangkan dapat menjadi solusi bagi perusahaan dalam perencanaan rute di masa yang akan datang.
2. Model GCVRP yang dikembangkan dapat menjadi bahan referensi terkait permasalahan distribusi terutama permasalahan GCVRP.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan agar penelitian dapat lebih spesifik sebagai berikut:

1. Data uji menggunakan data perusahaan PDAM Tirta Binangun pada 13-28 Februari 2023.

2. Permintaan setiap pelanggan diketahui.
3. Alat transportasi yang digunakan pada model hanya satu dengan kapasitas telah diketahui.
4. Jalan yang ditempuh diasumsikan normal artinya tidak sempit dan tidak macet.
5. Matriks jarak tidak simetris artinya jarak i ke j belum tentu sama dengan j ke i .
6. Satuan emisi faktor (kg/km) tidak berhubungan dengan satuan beban yang digunakan (m^3).

1.6 Sistematika Penulisan

Terdapat tiga bab pada penelitian ini. Bab I merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang permasalahan, rumusan, tujuan, manfaat, batasan, dan sistematika penulisan. Kemudian bab 2 menjelaskan tinjauan pustaka mengenai permasalahan distribusi rute yang terdiri dari penelitian terdahulu dan landasan teori. Pada bab 3 yang berisikan tentang metode penelitian yang terdiri dari objek penelitian, metode pengumpulan data, validitas penelitian, variabel penelitian, model analisis dan diagram alir penelitian. Pada bab 4 berisi hasil dan pembahasan mengenai model matematika yang dikembangkan. Kemudian melakukan pembuatan kode CPLEX dan implementasi terhadap studi kasus PDAM Tirta Binangun. Pada bab 5 merupakan kesimpulan dari penelitian ini dan saran yang dapat diajukan untuk perusahaan maupun penelitian selanjutnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang diperoleh sebagai berikut :

1. Model MILP yang sesuai dengan permasalahan GCVRP memiliki tujuan meminimalkan emisi gas CO₂ dengan mempertimbangkan perbedaan beban pada setiap angkutan dan menyadari bahwa kendaraan dengan beban yang lebih berat cenderung menghasilkan emisi faktor yang lebih besar daripada kendaraan dengan beban yang lebih ringan. Model yang dikembangkan menggunakan tiga variabel keputusan yakni variabel x_{ijt} , f_{ijt} , dan U_{it} . Fungsi batasan merujuk pada model matematika Molina *et al.* (2014) dengan menggunakan *subtour elimination constraint* Miller *et al.* (1960).
2. Hasil dari pengolahan menggunakan data uji PDAM Tirta Binangun selama 12 hari pada tanggal 13-28 Februari 2023 dapat menghemat emisi CO₂ pada kendaraan sebesar 25,471% dan menghemat jarak tempuh sebesar 24,929 %. Hal ini menunjukkan adanya efisiensi yang signifikan pada penggunaan kendaraan dan memberikan kontribusi positif dalam mengurangi dampak lingkungan.

6.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Perusahaan disarankan menggunakan metode MILP sebagai penentuan rute pada pengiriman di masa yang akan datang.
2. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan dataset berukuran besar sehingga dapat mengetahui apakah metode MILP yang diusulkan dapat menyelesaikannya.

3. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem terkait penentuan rute berbasis *web, standalone application, atau mobile application.*



DAFTAR PUSTAKA

- Adhitama, L., & Kurniawati, D. A. (2022). Development of Ant Colony Optimization Algorithm for Green Capacitated Vehicle Routing Problem. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 21(2), 1–16. <https://doi.org/10.1142/S0219686723500154>
- Adiba, E. E., Aahmed, E. A., & Youssef, B. (2014). The green capacitated vehicle routing problem: Optimizing of emissions of greenhouse gas. *Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Logistics Operations Management, GOL 2014, June*, 161–167. <https://doi.org/10.1109/GOL.2014.6887434>
- Adiba, E. E., Messaoud, E., & Ahemd, E. A. (2016). A hybrid metaheuristic to minimize the carbon dioxide emissions and the total distance for the vehicle routing problem. *11*, 409–417. <https://doi.org/10.3923/ijscmp.2016.409.417>
- Arne, H. (2023). *Tutorial on CPLEX. 2013*, 1–15.
- Asghari, M., Mirzapour, S., & Mohammad, J. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 231). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899>
- Baldacci, R., Toth, P., & Vigo, D. (2010). Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 175(1), 213–245. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0650-0>
- Bazrafshan, R., Hashemkhani Zolfani, S., & Al-E-hashem, S. M. J. M. (2021). Comparison of the sub-tour elimination methods for the asymmetric traveling salesman problem applying the SECA method. *Axioms*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/axioms10010019>
- Climate Watch data: Climate Watch.* (2022). GHG Emission. Washington, DC: World Resources Institute. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>.
- Coyle, J., Bardi, E., & Langley, J. (2003). *The Management of Business Logistics (John J. Coyle, Edward J. Bardi etc.)* (z-lib.org) (7th ed.).
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. In *Source: Management Science* (Vol. 6, Issue 1).
- David. (2019). Peningkatan Keterampilan Penggunaan Macro VBA. *Prosiding Seminar Nasional Pengabdian Pada Masyarakat*, 29–37.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2020). Inventarisasi emisi GRK bidang energi. *Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi Tahun 2020*, 41. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-inventarisasi-emisi-gas-rumah-kaca-sektor-energi-tahun-2020.pdf>
- Kristina, S., Doddy Sianturi, R., & Husnadi, R. (2020). Penerapan Model Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) Menggunakan Google OR-Tools untuk Penentuan Rute Pengantaran Obat pada Perusahaan Pedagang Besar Farmasi (PBF).

Jurnal Telematika, 15(2), 101–106.

- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 59).
- Leydesdorff, L., & Persson, O. (2010). Mapping the geography of science: Distribution patterns and networks of relations among cities and institutes. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61(8), 1622–1634. <https://doi.org/10.1002/asi.21347>
- Miller, C. E., Zemlin, R. A., & Tucker, A. W. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 7(4), 326–329. <https://doi.org/10.1145/321043.321046>
- Molina, J. C., Eguia, I., Racero, J., & Guerrero, F. (2014). Multi-objective Vehicle Routing Problem with Cost and Emission Functions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 160(Cit), 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.137>
- Oktaviani, R., & Dewi, D. P. (2020). Analisis Motivasi Belajar Siswa SMPN 8 Cimahi Menggunakan Media Visual Basic for Application Berbasis Microsoft Excel pada Materi Pecahan. *JURING (Journal for Research in Mathematics Learning)*, 3(2), 133. <https://doi.org/10.24014/juring.v3i2.9433>
- Rattu, P. N., Pioh, N. R., & Sampe, S. (2022). Optimalisasi Kinerja Bidang Sosial Budaya Dan Pemerintahan Dalam Perencanaan Pembangunan (Studi Di Kantor Badan Perencanaan Pembangunan, Penelitian Dan Pengembangan Daerah Kabupaten Minahasa). *Jurnal Governance*, 2(1), 1–9.
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). *The handbook of logistics and distribution management : understanding the supply chain* (5th ed.). Kogan Page.
- Taracena Sanz, F., & Escobar Gómez, E. N. (2013). the Vehicle Routing Problem With Limited Vehicle Capacities. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 3(3), 260–268. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2013.3\(3\).03](https://doi.org/10.7708/ijtte.2013.3(3).03)
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *An Overview of Vehicle Routing Problems*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.ch1>
- Uchoa, E., Pecin, D., Pessoa, A., Poggi, M., Vidal, T., & Subramanian, A. (2017). New benchmark instances for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 257(3), 845–858. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.012>
- Yogaswara, Y. (2020). Penentuan Rute Dan Penjadwalan Pengangkutan Sampah di Kota Bandung Wilayah Bandung Barat dengan Menggunakan Tabu Search. *Jurnal Media Teknik Dan Sistem Industri*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.35194/jmtsi.v4i1.844>
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and

the global warming effect. In *Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>

