

**EFISIENSI RUTE DISTRIBUSI LPG BERBASIS *GREEN VEHICLE*
ROUTING PROBLEM MENGGUNAKAN METODE *NON-*
*DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM II***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Daffa Alexander
No. Mahasiswa : 22522389

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026**

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 21 – 07 - 2026



Daffa Alexander

Daffa Alexander

SURAT BUKTI PENELITIAN



**FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI**

Gedung KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext. 4110, 4100
F. (0274) 895007
E. fti@uii.ac.id
W. fti.uii.ac.id

Nomor : 15/penelitian TA/Sek.Prodi.S1/20/TI/II/2024
Lampiran : -
Hal : Permohonan ijin penelitian tugas akhir

Kepada Yth.
Bapak/Ibu Pimpinan
PT.MITA JAYA PRATAMA
JL. JANGKANG KOROLUN KM.1 NO.88
CAWAN PUCANGAN, WIDODOMARTANI NGEMPLAK
Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

Assalamu 'alaikum wr. wb

Berkaitan dengan kegiatan penelitian mahasiswa Prodi Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia yaitu

No	Nama Mahasiswa	NIM	Penelitian
1.	Daffa Alexander	22522389	Optimasi Green Vehicle Routing Problem Distribusi LPG Menggunakan Metode Multi-Objective Genetic Algorithm

Maka bersama ini kami memohon kepada Bapak/Ibu untuk memberikan ijin kepada Mahasiswa tersebut untuk melakukan penelitian di instansi yang Bapak/Ibu pimpin.

Demikianlah surat permohonan ini kami sampaikan, atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu 'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 17 Sya'ban 1447 H.H
06 Februari 2026 M

Sek. Prodi S1 Teknik Industri

Annisa Uswatun Khasanah, S.T., M.Sc.



LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING
EFISIENSI RUTE DISTRIBUSI LPG BERBASIS *GREEN VEHICLE*
ROUTING PROBLEM* MENGGUNAKAN METODE *NON-
DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM II

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Daffa Alexander

No. Mahasiswa : 22522389



Yogyakarta, 21-07-2026

Dosen Pembimbing

(Dr. Qurtubi, S.T.,M.T)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI
EFISIENSI RUTE DISTRIBUSI LPG BERBASIS *GREEN VEHICLE*
ROUTING PROBLEM* MENGGUNAKAN *METODE NON-
DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM II

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Daffa Alexander
 No. Mahasiswa : 22522389

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk
 memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia
 Yogyakarta, 30 - Juli – 2026

Tim Penguji

Dr. Qurtubi, S.T.,M.T.

Ketua

Dr. Dwi Adi Purnama, S.T

Anggota I

Ir. Muchamad Sugarindra, S.T., M.T.I.,
 IPM

Anggota II





Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia



Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM

NIK. 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Segala puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, kasih sayang, kesehatan, kemudahan, serta kekuatan yang diberikan sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi ini saya persembahkan sepenuh hati untuk almarhum papa tercinta yang kasih sayangnya senantiasa abadi dalam setiap doa, mama tercinta yang tak pernah lelah menjadi penopang lewat doa-doa tulusnya, serta abang dan keluarga besar atas segala dukungannya. Rasa terima kasih dan hormat yang mendalam juga saya haturkan kepada dosen pembimbing, seluruh civitas akademika, dan teman-teman seperjuangan yang telah membersamai perjalanan ini dengan bimbingan, ilmu, serta kebersamaan yang berharga. Besar harapan saya agar penelitian ini dapat memberikan sumbangsih nyata bagi perkembangan keilmuan teknik industri, khususnya dalam memperkaya kajian manajemen logistik yang ramah lingkungan

.

MOTTO

"Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."

(QS. Al-Insyirah: 5–6)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(QS. Al-Baqarah: 286)

"It always seems impossible until it's done."

(Nelson Mandela)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, rezeki dan kemudahan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “**Efisiensi Rute Distribusi Lpg Berbasis Green Vehicle Routing Problem Menggunakan Metode Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II.**” Sebagai syarat untuk menyelesaikan perkuliahan di Program Studi Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih nyata bagi perkembangan keilmuan teknik industri, khususnya dalam memperkaya kajian manajemen logistik yang ramah lingkungan

Dalam perjalanan panjang dan tidak mudah selama penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini tidak akan pernah terwujud tanpa adanya bimbingan, arahan, doa, serta uluran tangan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Sri Kusumadewi, S.Si., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia,
2. Bapak Dr. Drs. Imam Djati Widodo, M.Eng.Sc., selaku Ketua Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Ketua Prodi Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia
4. Bapak Dr. Qurtubi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing tugas akhir. Terima kasih atas kebaikan hati, kesabaran, waktu, serta bimbingan yang sungguh luar biasa.
5. Keluarga tercinta yang menjadi fondasi, pendorong, dan sumber kekuatan terbesar dalam hidup penulis: Almarhum Papa tersayang Zoni Alexander, yang raga dan senyumnya tak lagi dapat penulis peluk, terima kasih atas segala warisan nilai dan kasih sayang abadi yang senantiasa menuntun langkah ini; skripsi ini adalah ikhtiar untuk membuat Papa bangga di keabadian. Mama tercinta Otrina, sosok wanita paling tangguh yang tak pernah lelah memeluk penulis lewat doa-doa tulus di sepertiga malam; terima kasih atas peluh, ketulusan, dan air mata kasih yang menjadi alasan penulis mampu bertahan hingga titik ini. Serta Abang tercinta Rayhan Alexander, terima kasih atas segala dukungan, perhatian, dan kebersamaan yang senantiasa menguatkan perjalanan ini

6. Andini Dwi Cahya, terima kasih telah hadir sebagai sosok yang selalu ada di saat-saat tersulit, memberikan ketenangan, mendengarkan setiap keluh kesah, serta tak pernah lelah memberikan dorongan semangat di sepanjang proses perjalanan ini.
7. Teman-teman kontrakan tercinta (Azka, Beben, Faiz, Galih, Kaka, dan Ryan), terima kasih atas kebersamaan, bantuan, tawa, dan hari-hari penuh cerita yang telah diukir bersama. Suasana hangat dan rumah kedua yang kalian ciptakan menjadi penawar lelah terbaik di tengah rumitnya pengerjaan skripsi ini.
8. Teman-teman kuliah (Tamasya), terima kasih atas kebersamaan, dinamika perkuliahan, tawa, dan setiap momen berharga yang telah dilalui bersama dari awal bangku kuliah hingga masa-masa akhir perjuangan ini. Terima kasih telah membuat perjalanan akademis ini menjadi jauh lebih berwarna dan tak terlupakan

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, semoga karya ilmiah ini dapat memberikan manfaat serta sumbangsih nyata bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Industri.

Yogyakarta, 21 Juli 2025



Daffa Alexander
22522389

ABSTRAK

Pendistribusian LPG 3 kg memerlukan perencanaan rute kendaraan yang efisien untuk meminimalkan jarak tempuh operasional sekaligus menekan dampak emisi karbon terhadap lingkungan. Penelitian ini menerapkan algoritma *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) untuk mengoptimalkan rute distribusi armada dari depot SPBE ke pangkalan. Berbeda dengan pendekatan objektif tunggal, metode ini memisahkan evaluasi dua fungsi tujuan, yaitu pemangkasan jarak tempuh dan penekanan emisi karbon, secara independen untuk memperluas ruang pencarian dan menjaga keragaman genetik solusi tanpa mengasumsikan adanya pertentangan antarobjektif. Berdasarkan hasil uji komputasi, penerapan NSGA-II berhasil menata ulang urutan kunjungan pangkalan sehingga menghasilkan efisiensi yang signifikan. Total jarak tempuh armada berhasil dihemat sebesar 35,70%, yaitu berkurang dari 332,841 km menjadi 214,016 km. Seiring dengan penurunan jarak, total konsumsi bahan bakar turun sebesar 36,01%, yaitu dari 64,407 liter menjadi 41,213 liter. Selain itu, akumulasi emisi karbon yang dihasilkan berhasil ditekan sebesar 43,28%, yaitu dari 194,734 kg CO₂ menjadi 110,451 kg CO₂. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa pemisahan dua fungsi tujuan pada algoritma NSGA-II mampu mencegah konvergensi prematur dan menghasilkan solusi rute distribusi yang efisien serta ramah lingkungan.

Kata Kunci: Distribusi, Efisiensi, Gas LPG, *Green Vehicle Routing Problem*, *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
MOTTO	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK	x
DAFTAR ISI.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Kajian Literatur	6
2.2 Landasan Teori.....	11
2.2.1 Distribusi.....	11
2.2.2 <i>Vehicle Routing Problem</i>	12
2.2.3 <i>Green Vehicle Routing Problem</i>	15
2.2.4 <i>Multi-Objective Optimization</i>	20
2.2.5 <i>Non-Sorted Genetic Algrotihm II (NSGA II)</i>	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Objek Penelitian	28
3.2 Alat Penelitian.....	28
3.3 Jenis Data.....	28
3.4 Metode Pengumpulan Data.....	29
3.5 Alur Penelitian	29
BAB IV PENGUMPULAN DATA DAN PENGOLAHAN DATA.....	33
4.1 Pengumpulan Data	33
4.1.1 Profil Perusahaan.....	33
4.1.2 Data kendaraan	34

4.1.3 Data titik lokasi	34
4.1.4 Data permintaan pangkalan.....	35
4.1.5 Data pendukung.....	35
4.1.6 Matriks jarak	36
4.1.7 Rute awalan.....	36
4.2 Pengolahan Data.....	43
4.2.1 Pengembangan model konseptual	43
4.2.2 Pengembangan program dan model matematis.....	44
4.2.3 Implementasi algoritma NSGA-II	46
4.2.4 Visualisasi Hasil Optimasi Algoritma	52
4.2.5 Verifikasi dan validasi rute distribusi	54
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	55
5.1 Analisis dan Pemilihan Solusi <i>Pareto Front</i>	55
5.2 Analisis Rute Hasil Optimasi	58
5.3 Analisis Penurunan Jarak Distribusi.....	65
5.4 Analisis Biaya Bahan Bakar	67
5.5 Analisis Penurunan Emisi Karbon	68
BAB VI PENUTUP.....	70
6.1 Kesimpulan	70
6.2 Saran	71

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Liquefied Petroleum Gas (LPG) merupakan bahan bakar gas hasil pemurnian minyak bumi dan gas alam yang banyak digunakan rumah tangga di Indonesia sebagai energi utama untuk memasak. Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa pada tahun 2024, sebanyak 89,71% rumah tangga di Indonesia menggunakan gas atau LPG sebagai bahan bakar utama, di mana mayoritas absolut dari persentase tersebut didominasi oleh penggunaan LPG bersubsidi ukuran 3 kg. Tingginya angka tersebut menggambarkan ketergantungan masyarakat yang sangat masif terhadap komoditas ini dalam pemenuhan kebutuhan energi sehari-hari yang menggambarkan ketergantungan yang sangat tinggi terhadap komoditas ini dalam pemenuhan kebutuhan energi sehari-hari. Tingginya tingkat penggunaan LPG tersebut menandakan bahwa volume LPG yang harus disalurkan dari pelaku distribusi ke konsumen rumah tangga berlangsung dalam jumlah besar dan secara rutin, sehingga memerlukan sistem distribusi yang efisien agar penyaluran dapat berjalan lancar dan berkelanjutan.

Distribusi LPG merupakan kegiatan pengangkutan barang yang dilakukan secara rutin dan melibatkan banyak pengiriman ke berbagai lokasi. Pola permintaan LPG yang berlangsung terus-menerus dan tersebar di berbagai wilayah menuntut pengaturan rute distribusi yang efisien agar jarak tempuh, waktu perjalanan, dan konsumsi bahan bakar dapat ditekan tanpa menurunkan kualitas pelayanan kepada pelanggan. Dalam praktiknya, penentuan rute pengiriman LPG dari depot ke pelanggan masih sering dilakukan secara konvensional, yaitu berbasis pengalaman atau kebiasaan, sehingga berpotensi menghasilkan rute yang belum optimal dari segi biaya maupun emisi. (Santoso et al., 2024)

PT. XYZ merupakan agen distributor resmi LPG dari Pertamina yang bertugas menyalurkan LPG kepada pangkalan-pangkalan yang berada dalam wilayah tanggung jawabnya di Kabupaten Sleman. Pola penyaluran yang berlaku menjadikan perusahaan sebagai penghubung utama antara depot dan pangkalan. Kondisi di lapangan menunjukkan bahwa proses distribusi di PT. XYZ memiliki tingkat kompleksitas tinggi karena armada tidak hanya bertugas mengirimkan tabung gas isi, melainkan juga harus menarik kembali tabung gas kosong dari pangkalan pada saat yang bersamaan. Penentuan rute secara konvensional dapat berujung pada pemborosan bahan bakar dan peningkatan emisi gas buang. Jika inefisiensi rute ini dibiarkan tanpa adanya optimasi, perusahaan

akan mengalami peningkatan jarak tempuh harian yang berdampak langsung pada membengkaknya konsumsi BBM, melambungnya biaya operasional, serta memperbesar emisi karbon yang dihasilkan oleh armada distribusi.

Pemilihan Kabupaten Sleman sebagai lokasi penelitian didasarkan pada urgensi kebutuhan logistik serta kompleksitas wilayahnya yang sangat tinggi. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), Sleman merupakan kabupaten dengan jumlah populasi terbanyak di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), yaitu mencapai lebih dari 1,12 juta jiwa atau berkontribusi sekitar 30% dari total penduduk provinsi. Terlebih lagi, wilayah Sleman memiliki tingkat kepadatan aktivitas ekonomi yang ekstrem didorong oleh tingginya jumlah UMKM mahasiswa yang berkuliah di Sleman. Tingginya kepadatan demografi ini berbanding lurus dengan melonjaknya volume permintaan harian LPG yang harus dipenuhi secara rutin. Oleh karena itu, karakteristik wilayah Sleman yang padat ini memerlukan sistem pengaturan rute distribusi yang optimal guna menjaga kelancaran pasokan energi ke Masyarakat dan menghemat biaya operasional perusahaan

Permasalahan penentuan rute distribusi LPG pada level agen seperti PT. XYZ dapat diformulasikan secara matematis sebagai *Vehicle Routing Problem* (VRP), khususnya *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP). VRP merupakan masalah optimasi logistik untuk menentukan rute kendaraan yang paling efisien dari satu depot untuk melayani banyak pelanggan, dengan tujuan meminimalkan biaya total, sambil mempertimbangkan batasan-batasan yang ada (Hajar & Fauzi, 2022). Sedangkan GVRP merupakan pengembangan VRP yang menambahkan tujuan lain, yaitu minimisasi emisi karbon untuk mendukung keberlanjutan lingkungan (Hidayat & Mulyono, 2025). Dalam konteks penelitian ini, distribusi LPG ke pangkalan-pangkalan di Kabupaten Sleman secara alami sesuai dengan struktur VRP, yaitu satu depot sebagai titik awal, banyak pangkalan sebagai pelanggan dengan permintaan masing-masing, serta armada kendaraan berkapasitas terbatas yang harus melayani seluruh permintaan dalam periode operasional. Pendekatan GVRP memungkinkan optimasi sekaligus antara efisiensi jarak dan pengurangan dampak lingkungan dari aktivitas distribusi LPG

Pendekatan GVRP terbukti mampu mengoptimalkan efisiensi rute distribusi sekaligus menekan dampak lingkungan. Hal ini sejalan dengan penelitian Indrianti et al., (2025) yang telah menerapkan optimasi rute LPG dengan sistem *Simultaneous Pickup and Delivery* (SPD) menggunakan *Genetic Algorithm* (GA). Meskipun demikian, pendekatan

tersebut masih menyisakan celah penelitian atau *methodological research gap*. (Miles, 2017). Yakni masih bersifat *single-objective* di mana evaluasi perhitungan jarak dan emisi digabung menjadi satu. Di sisi lain, pada domain algoritma, penelitian Dutta membuktikan bahwa algoritma NSGA-II efektif untuk memisahkan evaluasi jarak dan emisi secara independent. Namun celah pada penelitian algoritma tersebut ialah belum adanya penyelesaian yang diaplikasikan pada sistem *pickup and delivery*

Untuk menjembatani perpotongan celah dari kedua domain tersebut, penelitian ini menerapkan algoritma NSGA-II secara spesifik pada permasalahan GVRP-SPD LPG 3 kg guna menghasilkan rute *pareto optimal*. Algoritma NSGA-II dipilih karena mampu menangani masalah *multi-objective*. Algoritma ini mampu mengevaluasi target jarak tempuh dan emisi karbon secara independen, sehingga pada akhirnya dapat menghasilkan beberapa pilihan rute alternatif (*Pareto optimal*) yang menyeimbangkan antara efisiensi operasional dan kelestarian lingkungan.

Berdasarkan fenomena operasional dan celah metodologi tersebut, penelitian ini sangat relevan untuk dilakukan guna memberikan solusi atas permasalahan rute distribusi di PT. XYZ. Perusahaan membutuhkan dasar keputusan logistik yang presisi dan sistematis untuk melengkapi pendekatan *trial-and-error* yang selama ini digunakan. Melalui penyelesaian masalah GVRP-SPD menggunakan algoritma NSGA-II, penelitian ini diharapkan mampu memberikan pedoman kuantitatif yang terukur dalam menekan jarak tempuh sekaligus mengurangi emisi gas buang armada. Hasil penelitian ini bertujuan untuk meminimalkan inefisiensi rute harian agen, serta mendukung kelancaran distribusi LPG bersubsidi yang lebih sejalan dengan prinsip kelestarian lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana algoritma NSGA-II menyelesaikan permasalahan GVRP-SPD guna menghasilkan pilihan rute distribusi yang *Pareto optimal*?
2. Bagaimana mengoptimalkan rute distribusi LPG 3 kg di PT. XYZ untuk meminimasi jarak tempuh dan emisi karbon dengan batasan yang ditetapkan

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang akan dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menerapkan algoritma NSGA-II untuk memberikan solusi alternatif dalam menyelesaikan permasalahan GVRP-SPD.
2. Menentukan rute distribusi LPG 3 kg yang optimal di PT. XYZ guna meminimasi jarak tempuh dan emisi karbon dengan mempertimbangkan batasan yang ada

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pihak-pihak terkait. Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagi perusahaan, penelitian ini memberikan usulan alternatif rute distribusi tabung LPG 3 kg yang lebih efisien dari segi jarak tempuh dan emisi karbon yang lebih rendah. Penurunan total jarak tempuh ini secara tidak langsung akan membantu perusahaan untuk menghemat konsumsi BBM armada, sekaligus mendukung program logistik ramah lingkungan (*green logistics*). Selain itu, himpunan solusi rute *Pareto optimal* yang dihasilkan dapat dijadikan landasan ilmiah bagi manajemen PT. XYZ untuk mengambil keputusan penjadwalan distribusi yang lebih terukur
2. Bagi mahasiswa, penelitian ini menjadi sarana untuk mengimplementasikan keilmuan optimasi secara nyata, khususnya dalam merumuskan model matematika *Green Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery* (GVRP-SPD). Selain itu, penelitian ini juga meningkatkan kemampuan analitis teknis peneliti dalam merancang dan menerapkan algoritma NSGA-II untuk memecahkan masalah kompleks berbasis data riil dari industri.

1.5 Batasan Penelitian

Agar ruang lingkup penelitian tetap terfokus dan permasalahan yang dibahas lebih mudah dipahami, maka ditetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya membahas distribusi LPG 3 kg dari satu depot Perusahaan ke pangkalan-pangkalan yang berada dalam wilayah distribusi, yaitu Kabupaten Sleman, dan tidak mencakup depot lain atau wilayah di luar area tersebut.
2. Permintaan LPG setiap pangkalan dianggap sudah pasti dan diketahui sebelumnya untuk satu periode perencanaan sehingga tidak membahas ketidakpastian permintaan.
3. Kendaraan homogen dengan kapasitas angkut tetap, tidak memperhitungkan variasi tipe atau kondisi kendaraan.

4. Semua tabung LPG penuh memiliki berat yang sama, dan semua tabung LPG kosong juga memiliki berat yang sama, sehingga variasi sisa isi gas pada tabung kosong tidak diperhitungkan dalam perhitungan konsumsi bahan bakar dan emisi.
5. Model hanya mempertimbangkan tujuan minimasi biaya operasional dan emisi karbon
6. Perhitungan emisi karbon didasarkan pada faktor emisi standar per liter BBM atau per kilometer, tanpa memperhitungkan variasi kondisi jalan, kemacetan secara dinamis, atau gaya berkendara.
7. Algoritma yang digunakan dibatasi pada pendekatan NSGA II dengan konfigurasi parameter tertentu, tanpa membandingkan secara mendalam dengan algoritma optimasi lain
8. Hasil penelitian ini hanya sampai pada tahap usulan atau rekomendasi rute distribusi optimal, tidak sampai pada penerapan langsung di lapangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Kajian literatur merupakan kegiatan mengumpulkan berbagai hasil penelitian dari buku, jurnal, dan sumber tertulis lainnya, kemudian mencari pokok-pokok isinya dari konsep yang umum hingga yang lebih spesifik. Penelitian terdahulu berperan sebagai acuan dan bahan pembanding yang membantu peneliti dalam merumuskan, memfokuskan, serta mengarahkan penelitian yang sedang dilakukan.

Manajemen logistik modern pada sektor komoditas energi menuntut keseimbangan antara efisiensi rute dan batasan operasional yang ketat. Sejalan dengan hal tersebut, Penelitian yang dilakukan oleh Indrianti et al., (2025) mengembangkan model GVRP untuk mengoptimalkan distribusi LPG 3 kg, dengan mempertimbangkan berbagai batasan logistik kompleks seperti *time windows*, armada kendaraan heterogen, *multi-trip*, serta pengambilan dan pengiriman secara simultan (*simultaneous pickup and delivery*). Model ini mengintegrasikan biaya emisi karbon melalui skema pajak karbon ke dalam fungsi tujuannya guna menyeimbangkan efisiensi ekonomi dan keberlanjutan lingkungan. Dengan menggunakan metode *genetic algorithm* (GA), penelitian ini berhasil menemukan rute optimal yang mampu menurunkan total biaya operasional dibandingkan dengan rute aktual, meskipun terdapat sedikit kenaikan emisi karbon yang dinilai masih dalam batas wajar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model ini sangat praktis dalam menangani tantangan distribusi sekaligus mendukung target pengurangan emisi gas rumah kaca.

Selaras dengan upaya optimasi pada komoditas yang sama, penelitian yang dilakukan oleh Oktaviani et al., (2025) berfokus pada optimasi rute distribusi gas LPG 3 kg dengan menerapkan model *Cluster Generalized Vehicle Routing Problem* (CGVRP). Studi ini membandingkan efektivitas algoritma Dijkstra dan algoritma genetika untuk meminimalkan jarak tempuh distribusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma genetika memberikan solusi yang lebih unggul, yaitu menghemat biaya operasional perusahaan dibandingkan dengan metode sebelumnya. Penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan algoritma genetika sangat efektif dalam menghasilkan rute distribusi LPG yang lebih efisien dan ekonomis.

Keunggulan algoritma genetika dalam menyelesaikan masalah rute tersebut kemudian dikembangkan lebih lanjut ke arah optimasi multi-objektif yang lebih kompleks. Penelitian yang dilakukan oleh Li et al., (2025) meneliti salah satu cara dalam penyelesaian *Multi-Objective Green Vehicle Routing Problem with Time Windows* (GVRPTW) dengan memperkenalkan algoritma *Improved Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III* (INSGA-III). Studi ini memodelkan permasalahan distribusi dengan tiga fungsi tujuan utama, yaitu meminimalkan total biaya operasional, menekan emisi karbon, dan memaksimalkan tingkat kepuasan pelanggan melalui ketepatan waktu pengiriman. Inovasi utama dalam penelitian ini terletak pada penggunaan operator genetika yang telah ditingkatkan dan mekanisme pemilihan solusi yang lebih cerdas untuk menjaga keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi rute. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa algoritma INSGA-III mampu menghasilkan solusi *Pareto front* yang lebih optimal dan stabil dibandingkan dengan versi standar.

Selaras dengan pengembangan algoritma evolusioner tersebut, penelitian yang dilakukan oleh Cheng et al., (2024) mengkaji optimasi rute distribusi logistik rendah karbon melalui pengembangan algoritma *Improved Nearest Neighbor Construction-Genetic Algorithm* (INNC-GA). Fokus utama studi ini adalah meminimalkan total biaya logistik yang mengintegrasikan biaya tetap, biaya transportasi, dan biaya emisi karbon sebagai variabel penentu. Kebaruan metodologi yang ditawarkan terletak pada penggunaan metode *Improved Nearest Neighbor Construction* (INNC) dalam pembentukan populasi awal untuk mengatasi kelemahan kecepatan penemuan rute pada algoritma genetika standar. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan model ini berhasil menekan biaya emisi karbon serta mengurangi total biaya operasional secara keseluruhan. Temuan ini memberikan bukti empiris bahwa penguatan pada tahap inisialisasi algoritma dapat menghasilkan rute yang lebih efisien sekaligus mendukung pencapaian target emisi yang lebih rendah.

Selain melalui modifikasi mekanisme seleksi, peningkatan performa algoritma juga dilakukan melalui pendekatan hibrida. Penelitian yang dilakukan oleh Li et al., (2025) berfokus pada penyelesaian *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP) dengan mempertimbangkan keseimbangan antara total biaya logistik dan kepuasan pelanggan. Studi ini mengembangkan *Hybrid Genetic Algorithm* yang mengintegrasikan keunggulan algoritma genetika dengan *Tabu Search* untuk mengoptimalkan rute berdasarkan konsumsi bahan bakar dan emisi karbon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode

hibrida tersebut mampu memberikan solusi yang lebih baik dibandingkan algoritma tunggal, yaitu berhasil meminimalkan biaya operasional sekaligus memaksimalkan ketepatan waktu pengiriman.

Berbagai batasan tersebut mendorong pengembangan algoritma alternatif yang mampu mengakomodasi sistem distribusi yang lebih dinamis. Penerapan MOGA dalam GVRP juga dilakukan oleh Zhao et al., (2024) yang menyelesaikan masalah *Heterogeneous Green City Vehicle Routing Problem* (HGCVRP) menggunakan *Adaptive Multi-Objective Genetic Algorithm* (AMOGA). Penelitian ini memodelkan rute untuk armada kendaraan yang beragam dengan tujuan meminimalkan total biaya operasional, termasuk konsumsi bahan bakar dan denda pelanggaran *time window*. Hasil studi membuktikan bahwa pendekatan algoritma genetika dengan mekanisme adaptif mampu menghasilkan solusi *Pareto optimal* yang menyeimbangkan efisiensi ekonomi dan pengurangan dampak lingkungan secara lebih baik dibandingkan dengan algoritma standar.

Kebutuhan akan solusi yang seimbang ini menjadi semakin dibutuhkan ketika menghadapi batasan waktu yang fleksibel. Penelitian yang dilakukan oleh Gülmez et al., (2024) berfokus pada optimasi rute pengiriman ramah lingkungan melalui penerapan konsep *flexible time windows*. Dengan menggunakan algoritma evolusi multi-objektif, studi ini menganalisis bagaimana kelonggaran waktu pengiriman yang diberikan oleh pelanggan dapat dimanfaatkan untuk menyusun rute yang lebih efisien. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa fleksibilitas waktu memungkinkan sistem untuk menemukan rute yang lebih hemat bahan bakar, sehingga berhasil menurunkan emisi karbon dan biaya operasional secara bersamaan tanpa menurunkan kualitas layanan secara drastis.

Penelitian Zhou et al., (2025) mengembangkan model *Multi-Objective Green Vehicle Routing Problem with Time Window constraints in Time-Varying conditions* (MOGVRPTW-TV) yang mempertimbangkan fluktuasi kecepatan kendaraan secara *real-time* untuk meminimalkan emisi karbon dan biaya logistik dengan menggunakan algoritma *Coevolution Dynamic Select Constrained Multiobjective Optimization* (CDSMO). Hal ini didukung pula oleh penelitian Wang et al., (2025) yang juga memperhitungkan pengaruh kecepatan kendaraan dinamis terhadap efisiensi bahan bakar menggunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS). Hasil dari kedua studi ini membuktikan bahwa penyesuaian rute berdasarkan kondisi waktu tempuh nyata

mampu menghasilkan solusi yang lebih efisien dan efektif dalam mengurangi emisi karbon.

Kondisi kecepatan yang tidak menentu tersebut seringkali membawa unsur ketidakpastian yang memerlukan pendekatan matematis khusus. Penelitian yang dilakukan oleh Nawej et al., (2026) mengkaji optimasi GVRP dengan memasukkan unsur ketidakpastian melalui teori *fuzzy*. Berbeda dengan model standar, studi ini menggunakan pendekatan *Fuzzy-CMEM (Comprehensive Modal Emission Model)* untuk menghitung konsumsi bahan bakar, di mana kecepatan kendaraan dianggap sebagai variabel yang dinamis dan tidak pasti. Dengan menerapkan MOGA, studi ini berupaya menyeimbangkan antara efisiensi biaya operasional dan pengurangan emisi karbon. Hasilnya menunjukkan bahwa model ini jauh lebih akurat dalam memprediksi penggunaan bahan bakar di kondisi lapangan yang fluktuatif, sehingga mampu menghasilkan rute distribusi yang lebih realistis dan berkelanjutan.

Menanggapi dinamika lingkungan yang tidak pasti, integrasi teknologi eksternal seperti sistem informasi geografis menjadi sangat relevan. Penelitian yang dilakukan oleh Prima et al., (2025) mengkaji strategi pengurangan emisi karbon pada transportasi logistik melalui optimasi rute armada truk. Dengan menggunakan pendekatan VRP yang terintegrasi dengan *Geographic Information System (GIS)*, studi ini menganalisis variabel seperti jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, hingga elevasi rute. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perencanaan rute yang tepat tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi operasional logistik, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan dalam meminimalkan emisi gas buang kendaraan secara terukur.

Ketidakpastian tersebut bisa melibatkan pihak luar dalam manajemen armada. Guna melengkapi perspektif mengenai kondisi lingkungan yang dinamis, Dutta et al., (2021) mengembangkan model GVRP untuk mengatasi ketidakpastian data distribusi. Melalui pendekatan *Hybrid NSGA-II*, penelitian ini berfokus pada upaya menyeimbangkan efisiensi biaya, waktu, dan emisi karbon dengan memanfaatkan kombinasi armada internal serta pihak ketiga. Hal ini memperkuat temuan bahwa modifikasi pada algoritma genetika sangat efektif dalam menyelesaikan permasalahan logistik yang kompleks.

Sejalan dengan upaya efisiensi biaya energi melalui optimasi muatan tersebut, penelitian berskala nasional yang dilakukan oleh Salsabilla et al., (2024) mengkaji optimalitas rute pada sistem distribusi dengan lebih dari satu perjalanan menggunakan

armada kendaraan listrik heterogen. Studi ini mengeksplorasi penggunaan armada yang memiliki karakteristik kapasitas muat dan kapasitas baterai yang berbeda-beda. Permasalahan ini diformulasikan dalam bentuk pemrograman linear bilangan bulat campuran yang bertujuan untuk mencari rute optimum dengan biaya operasional terkecil. Lebih lanjut, penelitian ini secara krusial melibatkan stasiun penggantian baterai sebagai infrastruktur pendukung dalam rute pengiriman. Hasil simulasi dalam studi ini menegaskan bahwa tingkat kapasitas baterai dari masing-masing armada serta keberadaan stasiun penggantian baterai tersebut sangat menentukan keputusan rute yang terpilih.

Penelitian yang dilakukan oleh Mawengkang et al., (2025) mengkaji model optimasi rute dengan fokus pada batasan jendela waktu yang beragam Berbeda dengan model tradisional yang menganggap jadwal layanan seragam, studi ini mengakui adanya perbedaan batasan waktu dan kapasitas kendaraan yang sering ditemui dalam skenario logistik dunia nyata. Dengan memformulasikan masalah ke dalam model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), penelitian ini mengintegrasikan variabel kapasitas muatan, jarak tempuh, dan jendela waktu secara simultan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pendekatan ini sangat efektif dalam menangani kompleksitas distribusi serta memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam menyusun rute yang efisien namun tetap patuh pada batasan operasional yang ketat.

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian

Penulis	Karakteristik VRP					Metode
	Capacitated	Time Window	Heterogenous Vehicle	Multi Trip	Pickup and Delivery	
(Indrianti et al., 2025)	√	√	√	√	√	Genetic Algorithm
(Oktaviani et al., 2025)	√					Genetic Algorithm & Dijkstra's Algorithm
(Li et al., 2025)	√	√				NSGA-III
(Cheng 2025)	√	√				Multi-Objective Evolutionary Algorithm
(Li & Shen 2025)	√	√				Genetic Algorithm & Taboo Search
(Zhao et al. 2025)	√		√			AMOGA

Penulis	Karakteristik VRP					Metode
	Capacitated	Time Window	Heterogenous Vehicle	Multi Trip	Pickup and Delivery	
(Gülmez et al., 2024)	√	√				NSGA II
(Zhou et al., 2025)	√	√				CDSMO
(Wang et al., 2025)	√	√				ALNS
(Nawej et al., 2026)	√					Fuzzy-CMEM
(Rupaka et al., 2025)	√					VRP-GIS
(Dutta, et al., 2022)	√		√			Genetic Algorithm & Nearest Neighbor
(Salsabilla et al., 2024)	√		√	√		MILP
(Mawengkang et al., 2025)	√	√	√			MILP
Penelitian Usulan	√	√			√	NSGA II

2.2 Landasan Teori

Landasan teori merupakan fondasi utama dalam suatu penelitian yang menghimpun berbagai konsep, gagasan, serta definisi fundamental yang relevan dengan topik bahasan. Berikut merupakan teori yang relevan dalam penelitian *green vehicle routing problem* menggunakan *multi-objective genetic algorithm*.

2.2.1 Distribusi

Distribusi merupakan bagian penting dari sistem logistik yang berada di bawah lingkup manajemen rantai pasok. Menurut Chopra & Meindl, (2013) distribusi didefinisikan sebagai serangkaian langkah untuk memindahkan dan menyimpan produk, mulai dari tahap pemasok hingga ke tangan pelanggan. Proses ini melibatkan perpindahan fisik bahan baku maupun barang jadi. Kegiatan distribusi secara operasional dapat dijalankan menggunakan transportasi sebagai sarana fisik yang memindahkan produk sekaligus memengaruhi keseimbangan antara responsivitas dan efisiensi. Efektivitasnya tidak hanya diukur dari kecepatan, tetapi juga dari perencanaan rute yang mempertimbangkan beban kendaraan untuk menekan biaya serta emisi. Dengan demikian, sinergi antara strategi distribusi dan transportasi menjadi faktor kunci bagi biaya logistik dan penilaian pelanggan terhadap layanan yang ditawarkan.

Kegiatan logistik dan saluran distribusi dianggap berhasil apabila mampu menjamin pergerakan produk dari produsen ke konsumen secara efisien dan tepat waktu. Distribusi yang baik harus memiliki rute atau rangkaian perantara yang terencana dengan matang guna memudahkan pelanggan dalam mendapatkan produk serta menjembatani jarak antara penyedia barang dan penggunaannya. Selain itu, efektivitas logistik ditandai dengan kemampuan perusahaan dalam meminimalkan biaya distribusi tanpa mengurangi kualitas layanan. (Arif & Sismar, 2024)

Menurut Nasution, (2008) terdapat enam elemen fundamental dalam kegiatan pengangkutan dalam konteks transportasi. Unsur-unsur tersebut meliputi:

1. Muatan yang diangkut
2. Alat pengangkut
3. Jalur yang akan dilalui
4. Terminal awal
5. Terminal akhir
6. Sumber daya manusia dan organisasi

2.2.2 *Vehicle Routing Problem*

Vehicle Routing Problem (VRP) merupakan generalisasi dari *Traveling Salesman Problem* (TSP). Jika TSP berfokus pada pencarian rute optimal untuk satu agen, VRP memperluas permasalahan tersebut dengan melibatkan penggunaan armada kendaraan jamak (*multiple vehicles*) yang memiliki batasan kapasitas untuk melayani serangkaian pelanggan. VRP merupakan metode penentuan rute armada dengan tujuan utama meminimalkan total jarak tempuh dan biaya operasional. Dengan tercapainya jarak yang minimal, sistem distribusi tidak hanya dapat menekan beban biaya operasional secara signifikan, tetapi juga mampu mengoptimalkan durasi pengiriman barang hingga ke tangan pelanggan secara tepat waktu. (Toth & Vigo, 2002)

Untuk memberikan gambaran yang lebih terukur, Masalah ini dimodelkan sebagai sebuah graf lengkap $G = (V, A)$ dimana $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ berperan sebagai himpunan simpul dan A merupakan himpunan busur yang menghubungkan antarsimpul tersebut. Dalam struktur graf ini, simpul 0 didefinisikan secara khusus sebagai depot yang menjadi titik awal serta akhir perjalanan armada, sedangkan simpul $j = 1, \dots, n$ mewakili lokasi pelanggan atau pangkalan yang memiliki volume permintaan tertentu (d_j) yang bersifat tidak negatif. Setiap pergerakan armada dari simpul i ke simpul j dinyatakan melalui busur $(i, j) \in A$ yang memiliki bobot biaya perjalanan c_{ij} , di mana biaya tersebut

mempresentasikan variabel jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, maupun durasi waktu perjalanan. Melalui representasi matematis ini, inti dari permasalahan VRP adalah upaya pencarian urutan simpul atau rute optimal yang mampu meminimalkan akumulasi biaya perjalanan ($\sum c_{ij}$) guna memenuhi seluruh kebutuhan pelanggan secara efisien.

Kompleksitas operasional di lapangan sering kali menghadirkan kendala yang tidak dapat diselesaikan oleh model standar. Menurut Injac & Drašković (2024), batasan nyata tersebut melahirkan beberapa varian utama VRP, antara lain:

1. *Capacitated VRP* (CVRP): Menetapkan batasan kapasitas muatan kendaraan agar total permintaan dalam satu rute tidak melebihi daya angkut armada.
2. *VRP with Time Windows* (VRPTW): Mewajibkan pelayanan pelanggan dilakukan dalam rentang waktu atau jam operasional spesifik yang telah disepakati.
3. *VRP with Backhauls* (VRPB): Mengharuskan penyelesaian seluruh pengiriman dari depot sebelum diperbolehkan melakukan pengambilan.
4. *VRP with Pick-Ups and Deliveries* (VRPPD): Memungkinkan aktivitas pengiriman dan pengambilan barang dilakukan secara bergantian atau bersamaan di sepanjang rute.
5. *Periodic VRP* (PVRP): Merencanakan rute distribusi untuk jangka waktu tertentu.
6. *Stochastic VRP* (SVRP): Mengakomodasi elemen ketidakpastian di mana variabel seperti permintaan atau waktu tempuh bersifat probabilistik.
7. *Split Delivery VRP* (SDVRP): Mengizinkan pemenuhan permintaan satu pelanggan dilakukan secara terpisah oleh lebih dari satu kendaraan.
8. *Multiple Depot VRP* (MDVRP): Melibatkan penggunaan lebih dari satu depot sebagai titik pangkal operasional armada dalam melayani pelanggan.

Secara teoritis, seluruh varian VRP dikategorikan sebagai masalah *Nondeterministic Polynomial-time Hard* (NP-Hard). Kategori ini menandakan bahwa tingkat kesulitan dan jumlah kombinasi rute yang mungkin akan melonjak secara eksponensial seiring bertambahnya jumlah pangkalan yang harus dilayani. Penyelesaian VRP menggunakan metode eksak memang mampu memberikan solusi optimal mutlak, namun metode ini hanya efektif untuk permasalahan skala kecil. Kompleksitas ini semakin meningkat pada penelitian ini karena menerapkan skema *Simultaneous Pickup and Delivery* (SPD). Karakteristik SPD membuat fluktuasi muatan armada bersifat dinamis di sepanjang rute, sehingga batasan kapasitas kendaraan harus diperiksa secara ketat pada setiap simpul perjalanan. Kondisi dinamis tersebut membuat struktur

matematis model menjadi sangat rumit, sehingga penggunaan metode eksak membutuhkan waktu komputasi yang sangat lama dan tidak praktis untuk operasional dunia nyata. Oleh karena itu, pendekatan metaheuristik menjadi pilihan utama karena mampu mengeksplorasi ruang pencarian secara cerdas untuk menghasilkan solusi yang mendekati optimal dalam waktu komputasi yang jauh lebih cepat dan efisien.

2.2.2.1 Matriks jarak

Matriks jarak adalah table persegi ($n \times n$) yang menyimpan data jarak antarlokasi distribusi. Indeks bariks (i) dan kolom (j) merepresentasikan depot agen dan pangkalan LPG 3 kg, sedangkan isi selnya adalah jarak asli antartitik tersebut.

Dalam model GVRP, matriks ini digunakan oleh algoritma sebagai data input dasar untuk menghitung total jarak tempuh rute sekaligus fluktuasi konsumsi emisi karbon (CO_2) berdasarkan perubahan muatan truk.

Meskipun penarikan data jaringan jalan riil dapat dilakukan melalui *Application Programming Interface* (API) pemetaan digital seperti Google Maps atau OpenStreetMap, penggunaan formula Haversine dipilih atas pertimbangan keterbatasan aksesibilitas kuota API rute jalan raya secara presisi untuk seluruh kombinasi pangkalan, serta pentingnya menjaga konsistensi data komputasi. Dengan memanfaatkan formula Haversine, penelitian ini memperoleh standar acuan jarak yang bersifat deterministik, objektif, dan terbebas dari fluktuasi pembaruan data pihak ketiga, sehingga proses evaluasi rute oleh algoritma dapat berjalan secara stabil dan terukur. Formula Haversine dinyatakan sebagai berikut:

$$d = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{lat_2 - lat_1}{2} \right) + \cos(lat_1) \cos(lat_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{lon_2 - lon_1}{2} \right)} \right) \quad (1)$$

Keterangan

Tabel 2. 2 Notasi dan deskripsi

Notasi	Deskripsi
d	Jarak (km)
R	Radius bumi (6371,8 km)
lat_1	Latitude lokasi awalan
lat_2	Latitude lokasi tujuan

lon_1	<i>Longitude</i> lokasi awalan
lon_2	<i>Longitude</i> lokasi tujuan

2.2.3 Green Vehicle Routing Problem

Hadirnya *Green Logistics* sebagai agenda utama dalam manajemen rantai pasok modern telah membawa perubahan besar pada strategi distribusi barang. Menurut Indrianti et al., (2025), tujuan manajemen distribusi saat ini telah mengalami sedikit perubahan, tidak lagi hanya berfokus pada aspek ekonomi semata, tetapi juga memikirkan isu-isu tentang lingkungan.

Transformasi ini melahirkan varian model yang dikenal sebagai *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP). Sebagaimana dijelaskan oleh Lin et al., (2014), VRP konvensional secara tradisional hanya memprioritaskan minimalisasi biaya operasional yang mencakup jarak tempuh, waktu, dan biaya. Berbeda halnya dengan pendekatan tersebut, GVRP hadir sebagai respons terhadap urgensi keberlanjutan global dengan memperluas fungsi tujuan distribusi. Model ini mengintegrasikan parameter lingkungan ke dalam keputusan penentuan rute sehingga fokus utamanya tidak hanya pada efisiensi rute terpendek, melainkan juga mencakup upaya pengurangan emisi karbon (CO_2).

Namun, dalam GVRP, terdapat potensi *trade-off* antara minimisasi biaya operasional total dan emisi karbon dari pembakaran BBM kendaraan. Meskipun rute yang lebih efisien pada umumnya dapat menurunkan kedua tujuan tersebut secara bersamaan melalui pengurangan jarak tempuh dan pemanfaatan kapasitas kendaraan yang lebih baik, Wu et al., (2018) menunjukkan bahwa besarnya *trade-off* sangat dipengaruhi oleh model dan parameter emisi yang digunakan, sehingga hubungan antara biaya dan emisi tidak selalu identik. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan antara solusi rute minim jarak dan minim emisi relatif kecil pada parameter standar. *Trade-off* antara kedua tujuan ini baru akan terlihat nyata dan signifikan apabila terdapat kesenjangan yang besar antara tingkat emisi kendaraan saat kosong dan saat bermuatan penuh.

2.2.3.1 Model Matematis GVRP

Dalam penelitian ini, optimasi rute distribusi tabung LPG 3 kg diselesaikan menggunakan algoritma NSGA-II yang berbasis optimasi multi-objektif. Oleh karena itu, penyusunan fungsi tujuan tidak digabungkan menggunakan metode pembobotan (*weighted sum*), melainkan dipisahkan menjadi dua fungsi yang berdiri sendiri agar algoritma dapat

mengevaluasi titik keseimbangan (*trade-off*) yang menghasilkan solusi *Pareto optimal*. Maka, kedua fungsi tujuan dalam penelitian ini diformulasikan sebagai berikut:

- Fungsi objektif :

$$\min Z = [f_1, f_2] \quad (2)$$

$$f_1 = \min \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} D_{ij} \cdot X_{ij}^v \quad (3)$$

$$f_2 = \min \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} e_{ij}^v \cdot X_{ij}^v \quad (4)$$

Dimana:

$$e_{ij}^v = \rho \cdot D_{ij} \cdot (W_{truck_empty} + W_i^v) \quad (5)$$

- Fungsi batasan

1. Setiap pangkalan dikunjungi sekali oleh satu kendaraan

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N, i \neq j} X_{ij}^v = 1 \quad \forall j \in C \quad (6)$$

2. Pendistribusian dimulai dari depot pengisian dan kembali ke depot pengisian yang sama.

$$\sum_{j=1} X_{0jv} = 1, \quad \forall v = 1, 2, 3 \dots, V \quad (7)$$

$$\sum_{i=1} X_{1jv} = 1, \quad \forall v = 1, 2, 3 \dots, V \quad (8)$$

3. Kendaraan tidak boleh berhenti di tempat yang sama (*self-loop elimination*)

$$X_{ii}^v = 0, \quad \forall i \in N, \forall v \in V \quad (9)$$

4. Kendaraan yang masuk ke *node* harus keluar dari *node* tersebut juga.

$$\sum_{i \in N, i \neq j} X_{ij}^v - \sum_{k \in N, k \neq j} X_{jk}^v = 0, \quad \forall j \in C, \forall v \in V \quad (10)$$

5. Beban awal kendaraan berdasarkan total permintaan pengiriman (*delivery*)

$$W_0^v = \sum_{i \in N} \sum_{j \in C} (d_j \cdot w_{full}) X_{ij}^v, \quad \forall v \in V \quad (11)$$

6. Setiap kali kendaraan mengunjungi pangkalan, beban dihitung ulang setelah proses bongkar dan/atau muat selesai.

$$W_j^v \neq W_i^v - (d_j \cdot w_{full}) + (p_j \cdot w_{empty}) - M(1 - X_{ij}^v) \quad (12)$$

7. Batasan akumulasi beban akhir kendaraan

$$W_E^v = \sum_{i \in N} \sum_{j \in C} (p_j \cdot w_{empty}) \cdot X_{ij}^v, \quad \forall v \in V \quad (13)$$

8. Beban total yang dibawa tidak boleh melebihi batas kapasitas kendaraan

$$W_j^v \leq Q, \quad \forall i \in N, \forall v \in V \quad (14)$$

9. X_{ij}^v : hanya bisa 0 (tidak dilintasi) atau 1 (dilintasi)

$$X_{ij}^v \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in N, \forall v \in V \quad (15)$$

- Keterangan notasi, parameter, dan variabel Keputusan

Model optimasi distribusi tabung gas ini melibatkan berbagai komponen fisik dan logika operasional yang kompleks. Guna memudahkan identifikasi setiap elemen di dalam fungsi tujuan maupun fungsi batasan, seluruh notasi, parameter, dan variabel keputusan dirangkum secara sistematis dalam tabel di bawah ini:

Tabel 2. 3 Notasi dan deskripsi model

Notasi	Deskripsi
Himpunan dan indeks	
N	Himpunan seluruh titik/lokasi
C	Himpunan pelanggan ($C = \{1,2,\dots,n\}$)

Notasi	Deskripsi
V	Himpunan kendaraan yang tersedia ($v = \{1, 2, \dots, V\}$)
i, j	Indeks untuk titik lokasi asal (i) dan tujuan (j)
v	Indeks untuk unit kendaraan
Parameter	
D_{ij}	Jarak tempuh antara titik i dan titik j (km).
d_j	Jumlah tabung gas berisi yang dikirim ke pelanggan
p_j	Jumlah tabung gas kosong yang diambil dari pelanggan
W_{full}	Berat standar satu buah tabung gas penuh (kg)
W_{empty}	Berat standar satu buah tabung gas kosong (kg)
$W_{truck_{empty}}$	Berat kosong kendaraan tanpa muatan
W_i^v	Total berat muatan di atas kendaraan v saat berada di titik i .
W_E^v	Total berat muatan sisa (tabung kosong) saat kendaraan v kembali ke depot.
W_0^v	Beban awal kendaraan saat meninggalkan depot
Q^v	Kapasitas angkut maksimum kendaraan
ρ	Koefisien emisi gas buang kendaraan.
e_{ij}^v	Nilai emisi yang dihasilkan pada perjalanan i ke j oleh kendaraan v
Variabel keputusan	
X_{ij}^v	Variabel keputusan biner, di mana $X_{ij}^v = 1$ jika kendaraan v melintasi jalur dari lokasi i ke lokasi j , $X_{ij}^v = 0$ jika tidak

2.2.3.2 Model Emisi Karbon Berbasis Beban

Dalam menentukan rute distribusi, besarnya emisi karbon yang dikeluarkan oleh kendaraan tidak sepenuhnya dipengaruhi oleh jarak tempuh, tetapi juga oleh berat muatan yang dibawa. Menurut penelitian Bektaş, semakin berat muatan sebuah kendaraan, mesin akan bekerja lebih keras sehingga konsumsi bahan bakarnya menjadi lebih boros. Oleh karena itu, rute yang paling pendek belum tentu menghasilkan emisi yang paling rendah jika sepanjang perjalanan tersebut kendaraan terus membawa muatan penuh.

Untuk menyesuaikan dengan kondisi tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan *linear fuel consumption model* yang dikembangkan oleh Xiao et al., (2012).

Model ini menjelaskan bahwa terdapat hubungan yang berbanding lurus antara berat sisa muatan di kendaraan dengan tingkat konsumsi bahan bakarnya. Dengan kata lain, semakin berat muatan yang tersisa pada kendaraan, maka semakin besar pula bahan bakar yang dihabiskan dan emisi karbon yang dihasilkan selama perjalanan tersebut.

Berdasarkan teori tersebut, perhitungan konsumsi bahan bakar dinamis yang menyesuaikan dengan berat muatan dapat dituliskan sebagai berikut:

Pertama, untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari setiap satuan berat muatan terhadap peningkatan konsumsi bahan bakar kendaraan, digunakan rumus koefisien peningkatan konsumsi bahan bakar (α) sebagai berikut

$$\alpha = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_1 \quad (16)$$

Selanjutnya, nilai koefisien $\rho(Q_1)$ tersebut dimasukkan ke dalam rumus berikut untuk menghitung tingkat konsumsi bahan bakar dinamis atau *Fuel Consumption Rate* (FCR) kendaraan dari node i ke node j (ρ_{ij}) sesuai dengan fluktuasi beban muatan yang dibawa:

$$\rho_{ij} = \rho_0 + \alpha w_{ij} \quad (17)$$

Selanjutnya, untuk mengetahui total volume bahan bakar dalam satuan liter yang dihabiskan oleh kendaraan selama bergerak sepanjang segmen rute dari node i ke node j (FC_{ij}), dilakukan perkalian antara jarak tempuh dengan nilai FCR dinamis melalui persamaan berikut:

$$FC_{ij} = D_{ij} \times \rho_{ij} \quad (18)$$

Terakhir, untuk mengonversi total konsumsi bahan bakar tersebut menjadi dampak lingkungan, digunakan rumus (19) guna menghitung akumulasi berat emisi karbon dioksida (CE_{ij}) yang dilepaskan ke atmosfer sepanjang segmen rute dari node i ke node j

$$CE_{ij} = D_{ij} \times \rho_{ij} \times 2,68 \quad (19)$$

Dengan deskripsi pada Tabel 2.4

Tabel 2. 4 Notasi dan deskripsi perhitungan FCR

Notasi	Deskripsi
α	Koefisien peningkatan konsumsi bahan bakar berdasarkan muatan

ρ_0	Konsumsi bahan bakar saat kosong (liter/km)
ρ^*	Konsumsi bahan bakar saat penuh (liter/km)
Q	Kapasitas angkut maksimal kendaraan (kg)
Q_1	Berat sisa muatan di suatu ruas jalan (kg)
ρ_{ij}	<i>Fuel consumption rate</i> (FCR) dinamis kendaraan dari node i ke node j (liter/km);
w_{ij}	Jumlah muatan yang dibawa oleh kendaraan dari node i ke node j (kg)
FC_{ij}	Total konsumsi bahan bakar yang dihabiskan sepanjang rute dari node i ke node j (liter)
D_{ij}	Jarak perjalanan dari node i ke node j (km)
CE_{ij}	Total emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari perjalanan dari node i ke node j (kg CO_2)

2.2.4 Multi-Objective Optimization

Multi-Objective Optimization merupakan metode pengambilan keputusan untuk mengelola berbagai tujuan penelitian yang saling berkaitan guna mendapatkan solusi terbaik bagi seluruh kriteria yang ada. Dalam praktiknya, berbagai tujuan yang ditetapkan dapat berada dalam kondisi yang saling bertentangan maupun searah. (Cerde-Flores et al., 2022). Ketika kriteria yang diamati bersifat searah atau tidak berbenturan, pendekatan ini tetap dapat diterapkan untuk memisahkan evaluasi dari masing-masing kriteria secara independen. Deb et al., (2002)

Mengingat sifat pertentangan tersebut, penyelesaian masalah optimasi ini tidak menghasilkan satu solusi tunggal yang mutlak, melainkan mengacu pada konsep pareto-optimal. Deb et al., (2002) mengemukakan bahwa sebuah solusi dikategorikan sebagai *Pareto-optimal* apabila tidak ditemukan solusi alternatif lain yang mampu memberikan hasil lebih baik pada seluruh tujuan secara bersamaan. Konsep ini memungkinkan evaluasi solusi dilakukan secara simultan, baik pada kondisi yang membutuhkan titik kompromi maupun pada kondisi di mana peningkatan satu kriteria berbanding lurus dengan kriteria lainnya.

Himpunan dari solusi-solusi optimal tersebut direpresentasikan secara visual dalam bentuk *Pareto Front*. Dalam penelitian ini, penerapan pendekatan multi-objektif tidak berfokus pada pencarian titik kompromi akibat pertentangan antar-kriteria, melainkan

dimanfaatkan untuk memisahkan evaluasi fungsi jarak tempuh dan emisi karbon. Melalui pemisahan ini, algoritma dapat memperluas ruang pencarian dan menjaga keragaman solusi dalam menentukan rute kendaraan yang efisien tanpa mengharuskan adanya pertentangan (*trade-off*) antar-objektif

Dalam mengimplementasikan pendekatan *Multi-Objective Optimization*, terdapat berbagai metode dan algoritma yang dapat digunakan dengan karakteristik serta keunggulannya masing-masing. Untuk memberikan gambaran serta landasan dalam pemilihan algoritma pada penelitian ini, perbandingan antara beberapa metode *Multi-Objective Optimization* disajikan pada Tabel 2.5

Tabel 2. 5 Perbandingan Algoritma *Multi-Objective Optimization*

Metode / Algoritma	Keunggulan	Kelemahan
NSGA-II	1. Proses pencarian cepat dan stabil dengan <i>elitism</i> 2. Sangat cocok untuk optimasi yang bersifat permutasi diskrit	Kinerjanya menurun jika jumlah fungsi tujuan lebih dari 5 (<i>many-objective</i>).
MO-PSO	1. Kecepatan konvergensi awal sangat tinggi 2. Pengaturan rumus awal relatif sederhana	Rentan mengalami <i>premature convergence</i>
MO-ACO	Sangat alami untuk masalah peta/grafik rute karena menggunakan logika jejak <i>pheromone</i> semut.	Proses komputasi tergolong lambat dan membutuhkan pembaruan matrik <i>pheromone</i> yang intensif.
MOEA	Sangat kuat jika jumlah tujuan optimasi banyak.	Sangat sensitif terhadap penentuan bobot (<i>weight vector</i>).
SPEA2	1. Distribusi solusinya sangat rapi dan presisi 2. Memiliki <i>archive</i> eksternal untuk menjaga solusi terbaik.	Membutuhkan memori komputer lebih besar dan waktu komputasi lebih lambat

2.2.5 *Non-Sorted Genetic Algorithm II (NSGA II)*

Salah satu metode algoritma evolusi yang sangat populer digunakan adalah NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*). Algoritma ini merupakan versi penyempurnaan dari pendahulunya, yaitu NSGA versi pertama. Sebelumnya, NSGA versi pertama banyak dikritik karena memiliki beberapa kelemahan pokok, seperti perhitungan komputasi yang berat, tidak adanya sistem untuk mempertahankan solusi terbaik, serta mengharuskan pengguna mengatur parameter tambahan (*sharing parameter*) secara manual untuk menjaga variasi solusi.

Menurut kajian literatur yang dilakukan oleh Verma et al., (2021), untuk mengatasi berbagai kekurangan algoritma pendahulunya, NSGA-II dikembangkan dengan membawa empat keunggulan utama, yaitu

1. Sistem *Elitism* : NSGA-II memiliki mekanisme untuk mengamankan solusi. Artinya, solusi-solusi terbaik yang sudah berhasil ditemukan pada generasi sebelumnya dipastikan tidak akan hilang, melainkan selalu dibawa dan diikutsertakan ke proses generasi selanjutnya.
2. Tanpa *parameter sharing*: Algoritma ini sudah bekerja secara mandiri sehingga tidak lagi membutuhkan pengaturan parameter tambahan secara manual hanya untuk menjaga keberagaman solusi.
3. Penerapan *crowding distance*: Untuk memastikan variasi rute atau solusi tetap beragam, algoritma ini menggunakan penghitungan jarak kerumunan (*crowding distance*). Konsepnya adalah menilai seberapa padat solusi yang berdekatan. Solusi yang berada di area yang lebih sepi (memiliki nilai *crowding distance* besar) akan lebih diprioritaskan untuk dipilih, sehingga hasil akhirnya nanti tidak monoton atau menumpuk pada satu titik saja.
4. Proses komputasi yang cepat dan efisien: NSGA-II dirancang dengan alur yang jauh lebih efisien. Algoritma ini memiliki batas kompleksitas maksimal $O(MN^2)$, mana M merupakan jumlah fungsi tujuan dan N adalah jumlah populasi. Hal ini membuatnya mampu memproses pencarian solusi jauh lebih cepat dibandingkan dengan algoritma pendahulunya.

Menurut rumusan Deb et al., (2002) terdapat 9 tahapan utama yang harus dilakukan dalam menerapkan algoritma NSGA-II.

1. Inisialisasi populasi awal

Langkah pertama yang dilakukan adalah membangkitkan populasi awal (P_t) secara acak sebanyak N individu, di mana N adalah ukuran populasi (*population size*) yang telah ditetapkan sebelumnya. Di dalam program, setiap individu atau kandidat solusi direpresentasikan dalam bentuk kromosom menggunakan pengkodean angka (*integer/permutation coding*), di mana setiap angka (*gen*) mewakili nomor urut lokasi pangkalan LPG yang harus dikunjungi oleh armada pengiriman. Sebagai gambaran, jika agen harus melayani 7 pangkalan, maka contoh kromosom acak yang dihasilkan dapat berupa *array* seperti [3, 1, 7, 5, 2, 6, 4], di mana susunan angka tersebut secara langsung merepresentasikan urutan rute perjalanan truk yang berangkat dari agen menuju pangkalan 3, dilanjutkan ke pangkalan 1, lalu ke pangkalan 7, dan seterusnya.

2. Evaluasi populasi

Tahap selanjutnya adalah mengevaluasi setiap individu atau rute di dalam populasi awal dengan menghitung nilai *fitness*. Nilai ini menjadi tolak ukur untuk melihat seberapa optimal sebuah rute dalam mencapai target penelitian. Pada studi kasus distribusi LPG 3 kg ini, terdapat dua fungsi tujuan utama yang ingin diminimalkan secara bersamaan, yaitu total jarak tempuh armada dan total emisi karbon yang dipengaruhi oleh berat muatan tabung. Dengan demikian, evaluasi ini akan menilai setiap rute murni berdasarkan kemampuannya dalam menghasilkan jarak terpendek sekaligus emisi yang paling rendah.

3. *Fast Non-dominated Sorting*

Tahap *fast non-dominated sorting* bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan berbagai kandidat solusi ke dalam beberapa tingkatan (*front*) yang berbeda. Metode ini dirancang agar memiliki beban komputasi yang jauh lebih efisien dibandingkan dengan algoritma pengurutan biasa. Adapun langkah-langkah sistematis dalam prosedur ini adalah sebagai berikut:

- a. Proses inisialisasi dilakukan dengan menghitung nilai np (seberapa banyak sebuah solusi dikalahkan oleh solusi lain) dan menentukan himpunan Sp (kumpulan solusi yang berhasil dikalahkan) untuk setiap kandidat solusi p . Selain itu, disiapkan juga sebuah himpunan kosong Q sebagai tempat penampungan sementara.

- b. Selanjutnya, algoritma akan mencari solusi-solusi terbaik yang memiliki nilai np sama dengan nol, yang berarti tidak ada solusi lain yang mengalahkannya. Solusi unggul ini kemudian langsung dimasukkan ke dalam kelompok peringkat tertinggi atau *front* pertama.
- c. Langkah berikutnya adalah memperbarui status solusi yang tersisa. Untuk setiap solusi yang berada di *front* pertama, algoritma akan mengecek himpunan Sp -nya. Nilai dominasi dari setiap solusi yang ada di himpunan tersebut (nq) akan dikurangi satu. Jika setelah dikurangi nilainya menjadi nol, solusi tersebut dipindahkan ke himpunan Q .
- d. Proses pencarian dan pembaruan ini terus diulangi dengan menjadikan himpunan Q sebagai *front* berikutnya, sampai seluruh solusi dalam populasi berhasil dikelompokkan ke dalam *front* masing-masing.

Output dari keseluruhan tahap ini adalah populasi yang telah terurut rapi ke dalam beberapa *front*. Setiap *front* berisi individu-individu dengan kualitas yang setara, di mana individu pada *front* yang lebih tinggi dinilai lebih superior dibandingkan dengan individu pada *front* yang lebih rendah.

Dalam penelitian ini, prosedur pengurutan tersebut digunakan untuk mengevaluasi berbagai kombinasi rute armada. Kandidat rute yang mampu menghasilkan total jarak tempuh tersingkat sekaligus emisi karbon terendah dinilai tidak dapat dikalahkan oleh kombinasi rute lainnya. Kondisi ini membuat kandidat rute tersebut memiliki nilai dominasi nol dan secara otomatis menempati *front* pertama sebagai pilihan solusi yang paling optimal.

4. *Crowding Distance Assignment*

Tahap perhitungan *crowding distance* bertujuan untuk mengukur tingkat kepadatan area di sekitar suatu solusi pada ruang objektif berdasarkan hasil nilai *fitness*-nya. Sebuah individu atau solusi yang memiliki nilai *crowding distance* besar menunjukkan bahwa ia berada di area yang lebih renggang. Kondisi ini sangat penting untuk dipertahankan guna menjaga tingkat keberagaman solusi di dalam populasi agar algoritma tidak terjebak pada hasil yang seragam. Proses perhitungan jarak kepadatan ini dilakukan satu per satu untuk seluruh individu yang menempati tingkat *front* yang sama.

Dalam penerapannya pada penelitian rute distribusi LPG ini, perhitungan *crowding distance* berfungsi untuk memastikan agar kandidat rute armada yang dihasilkan tetap bervariasi. Algoritma tidak akan terus-menerus memusatkan pencarian pada satu tipe rute saja, tetapi juga memberikan ruang bagi alternatif rute lain yang memiliki keunggulan berbeda dalam menyeimbangkan jarak tempuh dan emisi karbon.

5. *Crowded Tournament Selection*

Tahap bertujuan untuk memilih dua solusi induk dari populasi yang ada. Pemilihan ini dilakukan dengan cara membandingkan dua solusi secara langsung. Penilaian didasarkan pada dua kriteria, yaitu peringkat *front* dan nilai *crowding distance*. Solusi yang berada pada peringkat *front* yang lebih tinggi akan langsung dipilih. Namun, jika kedua solusi ternyata berada pada peringkat yang sama, maka solusi dengan nilai *crowding distance* yang lebih besarlah yang akan dimenangkan. Proses ini bertujuan untuk memastikan solusi yang berkualitas dan beragam mendapat peluang lebih besar untuk diproses ke tahap selanjutnya. Hasil akhir dari tahap ini adalah terpilihnya dua solusi induk untuk proses *crossover*.

Pada penelitian rute distribusi LPG ini, proses seleksi bekerja dengan membandingkan dua kandidat rute armada secara langsung. Rute yang terbukti lebih optimal dalam menghasilkan total jarak tempuh dan emisi karbon terendah akan terpilih. Jika terdapat dua rute yang kualitas efisiensinya seimbang, maka rute yang memiliki pola lintasan lebih bervariasi yang akan dipilih. Rute-rute yang memenangkan tahap ini selanjutnya akan digunakan sebagai dasar pembentukan jadwal rute baru.

6. *Crossover dan Mutasi*

Tahap *crossover* dan mutasi dilakukan pada solusi hasil seleksi untuk membentuk populasi baru. Proses *crossover* bekerja dengan menggabungkan informasi dari dua solusi awal menjadi satu solusi baru. Metode yang sering digunakan dalam NSGA-II antara lain *Simulated Binary Crossover* atau *Differential Evolution*. Selanjutnya, proses mutasi akan mengubah sebagian nilai di dalam solusi secara acak untuk memunculkan variasi baru. Metode yang umum digunakan adalah mutasi Gaussian.

Pada penelitian ini, *crossover* berfungsi menyatukan dua susunan rute pengiriman terpilih menjadi satu kombinasi rute baru. Setelah itu, mutasi akan mengacak letak urutan kunjungan pangkalan pada jalur tersebut.

7. Penggabungan Populasi

Tahap penggabungan populasi bertujuan untuk menyatukan populasi awal dengan populasi baru hasil proses *crossover* dan mutasi. Penyatuan ini akan menghasilkan sebuah populasi gabungan yang berukuran lebih besar. Populasi gabungan tersebut secara otomatis menampung seluruh solusi dari generasi sebelumnya beserta seluruh variasi solusi baru yang telah berhasil dibentuk.

Pada pencarian rute distribusi agen LPG ini, tahap penggabungan akan mengumpulkan jadwal rute armada sebelumnya dengan rute armada baru hasil modifikasi. Kumpulan rute gabungan ini memastikan bahwa sistem tidak kehilangan rute lama yang sudah baik, sekaligus memberikan ruang untuk mengevaluasi rute-rute baru yang mungkin memiliki total jarak tempuh dan emisi karbon yang lebih optimal.

8. Seleksi Individu untuk Generasi Berikutnya

Tahap seleksi ini bertujuan untuk menyaring sejumlah individu terbaik dari populasi gabungan guna membentuk populasi untuk generasi selanjutnya. Pemilihan ini secara ketat memprioritaskan solusi-solusi yang unggul secara kualitas sekaligus mewakili area penyebaran yang beragam. Proses pemilihannya dilakukan dengan aturan sebagai berikut:

- a. Jika jumlah individu pada peringkat *front* teratas sudah memenuhi atau melebihi batas kuota yang dibutuhkan, maka algoritma hanya akan memilih individu dengan nilai *crowding distance* tertinggi dari kelompok tersebut.
- b. Jika jumlah individu pada *front* teratas kurang dari kuota, maka seluruh individu di kelompok tersebut akan langsung dimasukkan ke generasi baru. Sisa kuota kemudian akan dipenuhi dengan mengambil individu dari peringkat *front* di bawahnya, dengan tetap memprioritaskan nilai *crowding distance* tertinggi. Proses ini terus diulang hingga batas jumlah populasi generasi baru terpenuhi.

Pada penelitian ini, tahap seleksi berfungsi menyaring gabungan rute armada lama dan baru. Rute yang paling efisien dalam meminimalkan jarak tempuh dan emisi karbon akan dipertahankan. Jika tingkat efisiensinya seimbang, rute dengan variasi lintasan paling beragam akan diprioritaskan agar hasil pencarian tidak monoton.

9. Iterasi dan Kriteria Penghentian

Tahap ini merupakan pengulangan utama dari seluruh algoritma yang akan terus berjalan hingga mencapai batas kriteria penghentian tertentu. Proses iterasi dimulai dengan membentuk populasi gabungan R_t yang berukuran $2N$, hasil dari penyatuan populasi awal P_t dan populasi baru Q_t . Populasi gabungan ini kemudian diurutkan kembali berdasarkan tingkat nondominasi untuk membagi solusi ke dalam beberapa tingkatan *front*. Kelompok *front* pertama (F_1) yang berisi solusi terbaik akan diprioritaskan untuk masuk ke dalam populasi generasi berikutnya (P_{t+1}). Jika jumlah solusi di F_1 masih kurang dari target ukuran populasi N , maka sisa kuota akan diisi secara berurutan oleh solusi dari F_2 , F_3 dan seterusnya. Apabila pada *front* terakhir jumlahnya berlebih untuk memenuhi sisa kuota N penyeleksian akhir akan ditentukan berdasarkan nilai *crowding distance*.

Pada penelitian rute distribusi LPG ini, proses iterasi bertujuan untuk terus memperbaiki kualitas jadwal armada dari satu generasi ke generasi berikutnya. Pencarian kombinasi rute dengan jarak tempuh dan emisi karbon paling minimum ini akan terus diulang oleh sistem hingga mencapai batas maksimal pengulangan komputasi yang telah ditentukan sebelumnya.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Penelitian ini berfokus pada penerapan algoritma *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) untuk menyelesaikan *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP). Persoalan ini merupakan salah satu masalah logistik yang cukup kompleks karena menuntut keseimbangan antara efisiensi operasional dan kelestarian lingkungan. Objek dalam penelitian ini adalah salah satu agen resmi distribusi gas LPG 3 kg yang beroperasi di sebagian wilayah Kabupaten Sleman. Nama perusahaan sengaja dirahasiakan untuk menjaga privasi serta mematuhi etika kerahasiaan data instansi. Data dari agen tersebut akan digunakan untuk melihat bagaimana rute pengiriman tabung gas ke berbagai pangkalan dapat dioptimalkan menggunakan pendekatan algoritma genetika. Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk merancang jadwal dan rute armada pengiriman yang paling efisien, dengan fokus mencari titik keseimbangan terbaik antara upaya meminimalkan total jarak tempuh sekaligus menekan jumlah emisi karbon yang dihasilkan oleh kendaraan angkut.

3.2 Alat Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa perangkat lunak (*software*) untuk mendukung tahap pengumpulan hingga pengolahan data. Bahasa pemrograman Python digunakan sebagai alat komputasi utama untuk merancang dan mengeksekusi algoritma NSGA-II. Selain itu, aplikasi *Google My Maps* digunakan pada tahap pengumpulan data geospasial untuk menentukan titik koordinat lokasi agen dan pangkalan LPG, serta Microsoft Excel untuk mengukur matriks jarak antar lokasi dan perhitungan emisi karbon.

3.3 Jenis Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Data Primer

Data primer diperoleh secara langsung melalui kegiatan wawancara di lapangan dengan pihak pengelola agen distribusi gas LPG. Data utama yang dikumpulkan mencakup jumlah permintaan (*demand*) dari masing-masing pangkalan, spesifikasi armada kendaraan yang digunakan, kapasitas muatan kendaraan armada, lokasi pangkalan, dan rute saat ini.

2. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh secara tidak langsung dari studi literatur. Data literatur pendukung yang dibutuhkan adalah literatur ilmiah tentang koefisien emisi bahan bakar yang digunakan untuk mendapatkan referensi parameter matematis yang dibutuhkan saat menjalankan program algoritma.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Dalam mengumpulkan data yang dibutuhkan, penelitian ini menggunakan beberapa metode sebagai berikut:

a. Wawancara

Melakukan tanya jawab secara langsung dengan pihak agen distribusi LPG untuk mendapatkan data operasional pengiriman. Data yang ditanyakan meliputi jumlah permintaan pangkalan, jam operasional layanan (*time windows*), dan kapasitas muatan kendaraan.

b. Pengambilan data peta

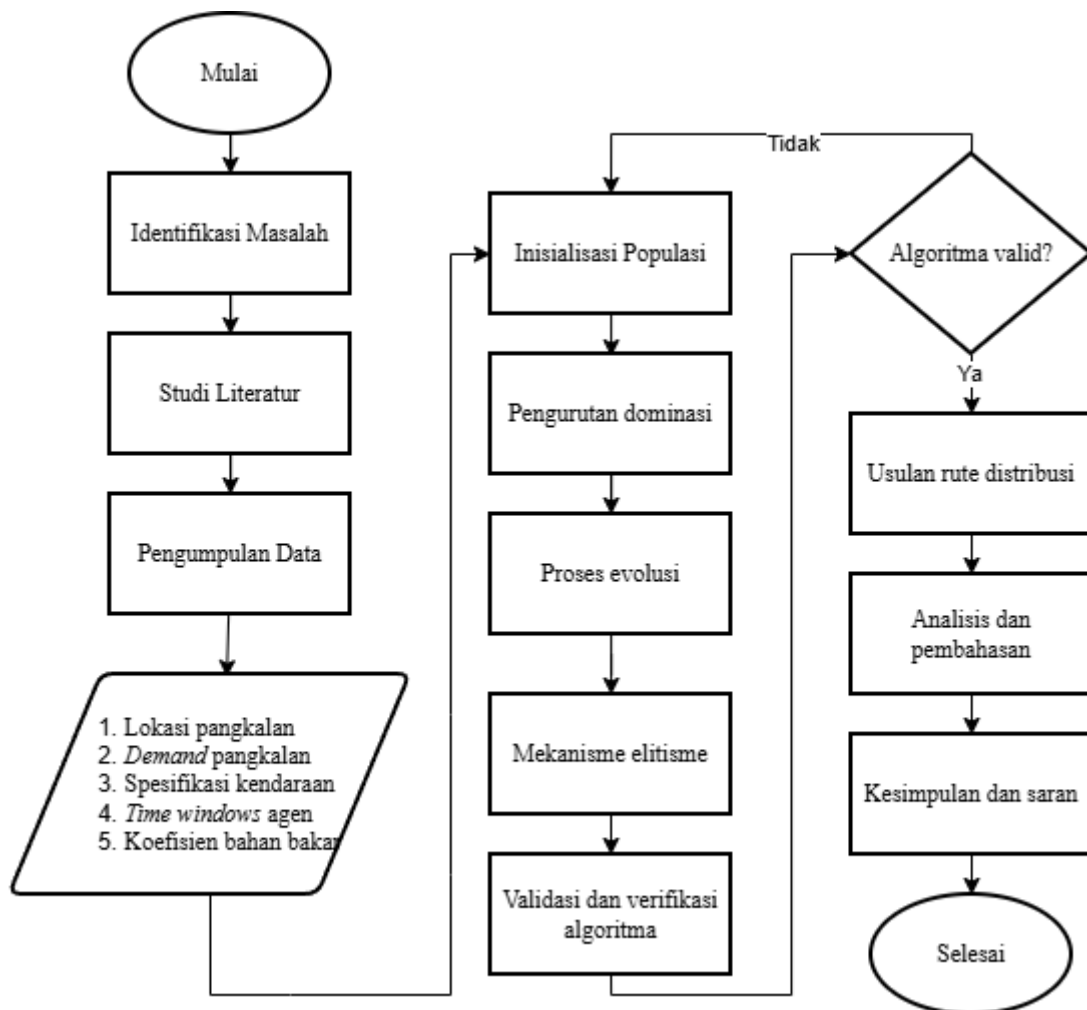
Mengumpulkan titik koordinat agen dan seluruh pangkalan menggunakan Google Maps. Langkah ini juga dilakukan untuk mencari data jarak dan perkiraan waktu tempuh antar lokasi

c. Studi pustaka

Mempelajari buku, jurnal, dan penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas tentang optimasi GVRP dan algoritma NSGA-II untuk mendukung perhitungan dalam penelitian.

3.5 Alur Penelitian

Penyusunan alur penelitian diperlukan agar proses pemecahan masalah dalam penelitian dapat berjalan dengan lebih mudah dan terstruktur secara sistematis. Berikut merupakan alur dari penelitian ini :



Gambar 3. 1 Alur penelitian

1. Identifikasi masalah

Tahapan ini merupakan langkah awal untuk memahami kondisi distribusi LPG pada agen. Pemahaman diperoleh melalui diskusi awal dengan pihak manajemen mengenai pola pengiriman yang saat ini dijalankan. Fokus utama identifikasi masalah adalah pada aspek efisiensi jarak tempuh dan besarnya emisi karbon yang dihasilkan selama proses distribusi. Hasil dari tahap ini digunakan untuk menentukan tujuan optimasi yang akan dicapai dalam penelitian.

2. Studi literatur

Peneliti melakukan studi pustaka untuk memperoleh landasan teori yang relevan dengan permasalahan penelitian. Referensi yang digunakan mencakup jurnal ilmiah, buku teks, dan hasil penelitian sebelumnya mengenai GVRP, emisi gas buang, serta penggunaan algoritma NSGA-II. Tahap ini berfungsi sebagai dasar dalam penyusunan model matematika dan langkah-langkah algoritma.

3. Pengumpulan data

Data dikumpulkan untuk mendukung kebutuhan analisis dan pengolahan dalam algoritma. Karena tidak dilakukan observasi lapangan, data diperoleh melalui wawancara dengan pihak logistik serta pengambilan dokumen internal perusahaan. Data dikelompokkan menjadi dua kategori:

- a. Data Primer : Meliputi lokasi pangkalan, *demand* masing-masing pangkalan, dan spesifikasi kendaraan
- b. Data Sekunder : Meliputi koefisien bahan bakar dan emisi yang diperoleh dari literatur ilmiah

4. Pengembangan algoritma NSGA-II

Setelah seluruh data terkumpul, tahap selanjutnya adalah mengembangkan algoritma NSGA-II untuk menyelesaikan permasalahan rute distribusi. Proses ini dimulai dengan membangun model matematis multi-objektif yang memformulasikan dua tujuan yang saling bertolak belakang, yaitu meminimalkan jarak tempuh operasional sekaligus menekan total konsumsi energi. Model ini disusun dengan mempertimbangkan berbagai batasan operasional armada dan kapasitas muatan di lapangan. Melalui proses uji coba secara berkala, model tersebut terus disempurnakan hingga benar-benar representatif dan siap digunakan untuk pengolahan data.

5. Verifikasi algoritma

Sebelum diterapkan pada data aktual, algoritma NSGA-II dan model matematis yang telah dibuat harus melalui tahap verifikasi menggunakan data buatan. Verifikasi bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh alur komputasi, mulai dari evaluasi fungsi tujuan, proses *crossover* dan mutasi, hingga pemenuhan batasan operasional, dapat berjalan lancar tanpa adanya kesalahan pemrograman (*error*). Setelah tahap verifikasi ini berhasil

dan program terbukti berjalan sesuai dengan logika yang dirancang, algoritma dinyatakan layak untuk digunakan pada pengolahan data penelitian.

6. Usulan rute distribusi

Berdasarkan hasil pengolahan data, disusun usulan rancangan rute distribusi baru. Rancangan ini berisi urutan kunjungan armada ke pangkalan-pangkalan LPG yang telah dioptimasi. Usulan rute ini dimaksudkan untuk memberikan alternatif jalur yang lebih pendek dan memiliki emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan rute yang digunakan sebelumnya oleh agen.

7. Analisis dan pembahasan

Hasil usulan rute dianalisis dengan membandingkannya dengan data rute awal. Perbandingan dilakukan pada total jarak tempuh dan perkiraan emisi karbon yang dihasilkan. Analisis ini bertujuan untuk membuktikan tingkat efektivitas penggunaan algoritma NSGA-II dalam menyelesaikan masalah distribusi yang dihadapi agen.

8. Kesimpulan dan saran

Tahap terakhir adalah menarik kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan. Kesimpulan mencakup jawaban atas tujuan penelitian mengenai rute optimal yang dihasilkan. Selain itu, peneliti memberikan saran kepada pihak agen terkait potensi penerapan rute tersebut serta pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB IV

PENGUMPULAN DATA DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan melakukan wawancara dari pihak perusahaan. Berikut merupakan data yang berhasil dikumpulkan

4.1.1 Profil Perusahaan

PT. XYZ merupakan perusahaan swasta yang bergerak di sektor distribusi energi dan berperan sebagai agen resmi penyalur *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) 3 kg bersubsidi di wilayah Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Sebagai mitra strategis PT Pertamina Patra Niaga, PT. XYZ memiliki tanggung jawab untuk menjaga stabilitas pasokan energi bagi masyarakat melalui jaringan pangkalan yang tersebar di wilayah operasionalnya.

Operasional distribusi dimulai dari SPPBE sebagai titik hulu pengambilan tabung isi sekaligus depot awal keberangkatan armada. Seluruh aktivitas bongkar muat tabung di pangkalan dilakukan terlebih dahulu sebelum truk kembali ke SPPBE sebagai titik akhir kepulangan untuk menurunkan tabung kosong. Alur perjalanan yang terpusat pada SPPBE ini menjadi objek observasi utama dalam mengukur efisiensi rute serta besaran emisi karbon yang dihasilkan selama siklus distribusi berlangsung.

Karakteristik utama dari proses distribusi LPG 3 kg di PT. XYZ adalah penerapan sistem *Simultaneous Pickup and Delivery* (SPD). Dalam sistem ini, armada kendaraan tidak hanya melakukan pengiriman tabung berisi (*full tank*) ke pangkalan, tetapi juga secara bersamaan melakukan pengambilan tabung kosong (*empty tank*) dalam jumlah yang setara. Mekanisme ini menyebabkan berat muatan kendaraan bersifat dinamis disetiap titik kunjungan. Dinamika beban muatan inilah yang menjadi variabel kritis dalam pemodelan emisi karbon, di mana konsumsi energi kendaraan sangat dipengaruhi oleh total massa kendaraan dan jarak tempuh antar pangkalan.

Meskipun proses optimasi urutan kunjungan dilakukan secara independen pada kelompok pangkalan yang telah dialokasikan untuk setiap armada, seperti pengoptimalan urutan simpul 1 hingga 12 pada Truk 1 yang secara matematis menyerupai *Traveling Salesperson Problem*, secara konseptual dan sistemik penelitian ini tetap merupakan lingkup permasalahan VRP, khususnya *Capacitated VRP*. Pendekatan ini mengadopsi skema *Cluster-First, Route-Second*, di mana alokasi pangkalan dispesifikasikan terlebih

dahulu untuk setiap rute melalui *fixed route assignment*, kemudian dilanjutkan dengan penentuan rute optimal pada masing-masing kelompok kendaraan. Karakteristik *Vehicle Routing Problem* tetap melekat secara utuh karena model ini melibatkan armada majemuk sebanyak empat unit kendaraan yang beroperasi dari satu titik depot utama, terikat oleh batasan kapasitas muatan maksimum kendaraan, serta ditujukan untuk mencapai efisiensi total pada seluruh sistem logistik perusahaan.

4.1.2 Data kendaraan

PT. XYZ mengoperasikan armada kendaraan yang disesuaikan dengan volume distribusi dan karakteristik wilayah operasional di Kabupaten Sleman. Dalam penelitian ini, armada yang digunakan untuk melayani distribusi LPG 3 kg berjumlah 4 unit truk yang beroperasi untuk menjangkau cakupan sebanyak 51 titik lokasi yakni 1 depot dan 50 pangkalan. Spesifikasi armada yang digunakan dalam objek penelitian ini akan dijabarkan pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Spesifikasi Kendaraan

Jenis Kendaraan	Kapasitas	Merk	Jumlah
Truk <i>Colt Diesel Double</i>	550 tabung	Hino Dutro	4

4.1.3 Data titik lokasi

Data lokasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi koordinat SPPBE sebagai depot dan titik pangkalan distribusi. Rincian data tersebut akan dijabarkan pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Data Lokasi

No. Index	Nama Node	Latitude	Longitude
0	Main Hub	-7.75631	110.49001
1	Pangkalan 1	-7.7555	110.45636
2	Pangkalan 2	-7.73895	110.46026
3	Pangkalan 3	-7.7349	110.44057
4	Pangkalan 4	-7.74485	110.41374
5	Pangkalan 5	-7.74423	110.42059
6	Pangkalan 6	-7.73272	110.40235
7	Pangkalan 7	-7.7449	110.38599
8	Pangkalan 8	-7.76414	110.42569

9	Pangkalan 9	-7.77627	110.47942
10	Pangkalan 10	-7.78456	110.46376
...	...	...	...
51	Pangkalan 51	-7.70216	110.45115

4.1.4 Data permintaan pangkalan

Dalam penyusunan rute distribusi ini, permintaan (*demand*) dari setiap pangkalan yang berupa jumlah tabung LPG menjadi batasan (*constraint*) utama. Jumlah permintaan tersebut harus dipertimbangkan dalam pemodelan agar total muatan tidak melebihi kapasitas maksimal armada truk, yaitu 560 tabung. Tabel 4.3 adalah data permintaan tabung pada 51 pangkalan di Kabupaten Sleman

Tabel 4. 3 Data Permintaan Pengkalan

No. Index	Nama Node	<i>Delivery Demand</i>
0	Main Hub	-
1	Pangkalan 1	50
2	Pangkalan 2	30
3	Pangkalan 3	20
4	Pangkalan 4	45
5	Pangkalan 5	50
6	Pangkalan 6	50
7	Pangkalan 7	50
8	Pangkalan 8	50
9	Pangkalan 9	60
10	Pangkalan 10	50
...	...	...
51	Pangkalan 51	30

4.1.5 Data pendukung

Perhitungan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional dalam penentuan rute distribusi memerlukan beberapa parameter data pendukung. Data pendukung pada Tabel 4.4 digunakan untuk mencatat rasio konsumsi bahan bakar kendaraan pada kondisi penuh dan kosong, serta harga satuan Biosolar per liter.

Tabel 4. 4 Data Pendukung

Parameter	Nilai
Konsumsi BBM (Penuh)	1 : 5 (Liter : km)
Konsumsi BBM (Kosong)	1 : 6 (Liter : km)
Harga Biosolar	Rp. 6800,00 / Liter

4.1.6 Matriks jarak

Penentuan rute distribusi LPG 3 Kg pada wilayah cakupan PT. XYZ memerlukan pembuatan matriks jarak. Matriks ini digunakan untuk mencatat seluruh jarak dari depot ke pangkalan, maupun jarak antarpangkalan. Nilai jarak tersebut diperoleh dengan menghitung jarak lurus (*Euclidean*) berdasarkan titik koordinat (*Latitude* dan *Longitude*) yang dihitung menggunakan Persamaan (1)

Tabel 4. 5 Matriks jarak

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	n	50
0	0	3,708	3,804	5,945	8,499	7,766	10,008	11,531	7,140	2,507	4,270	...	7,388
1	3,708	0	1,895	2,881	4,844	4,137	6,470	7,843	3,512	3,430	3,327	...	5,964
2	3,804	1,895	0	2,216	5,167	4,410	6,418	8,210	4,728	4,656	5,086	...	4,212
3	5,945	2,881	2,216	0	3,156	2,434	4,218	6,116	3,641	6,284	6,084	...	3,823
4	8,499	4,844	5,167	3,156	0	0,758	1,842	3,058	2,517	8,036	7,062	...	6,287
5	7,766	4,137	4,410	2,434	0,758	0	2,383	3,813	2,284	7,396	6,537	...	5,764
6	10,008	6,470	6,418	4,218	1,842	2,383	0	2,255	4,338	9,775	8,889	...	6,361
7	11,531	7,843	8,210	6,116	3,058	3,813	2,255	0	4,869	10,869	9,637	...	8,610
8	7,140	3,512	4,728	3,641	2,517	2,284	4,338	4,869	0	6,071	4,769	...	7,441
9	2,507	3,430	4,656	6,284	8,036	7,396	9,775	10,869	6,071	0	1,956	...	8,810
10	4,270	3,327	5,086	6,084	7,062	6,537	8,889	9,637	4,769	1,956	0	...	9,267
n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
50	7,388	5,964	4,212	3,823	6,287	5,764	6,361	8,610	7,441	8,810	9,267	...	0

Matriks jarak pada Tabel 4. 5 ini nantinya berfungsi sebagai data dasar yang dimasukkan kedalam program Python. Melalui data tersebut, program dapat menghitung total panjang perjalanan dan mencari kombinasi rute yang paling dekat dan efisien.

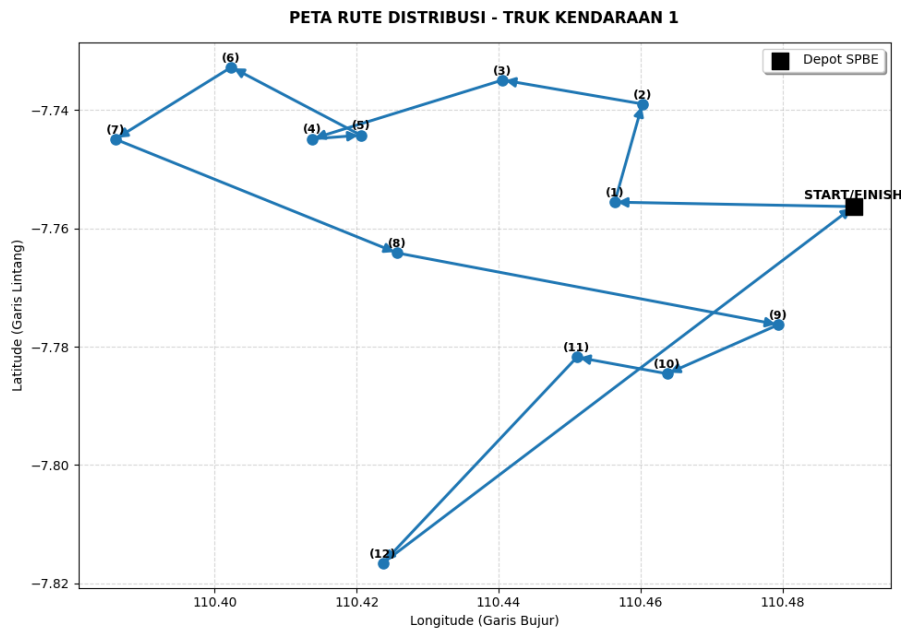
4.1.7 Rute awalan

Dalam menentukan rute distribusi LPG 3 kg, PT XYZ menetapkan kebijakan berdasarkan metode subjektif atau intuisi sopir di lapangan. Berdasarkan pengumpulan data, analisis rute dalam penelitian ini dibatasi pada wilayah cakupan pelayanan SPBE Narada di

Kabupaten Sleman. Proses pendistribusian tersebut memanfaatkan 4 unit kendaraan untuk menjangkau seluruh titik pangkalan yang terdaftar.

A. Rute kendaraan 1

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 1 selama melakukan distribusi barang dari *Main Hub* (Depot) ke pangkalan:



Gambar 4. 1 Rute Awalan Kendaraan 1

Pada visualisasi rute distribusi untuk kendaraan 1 pada Gambar 4.1, terlihat bahwa alur perjalanan kendaraan masih sangat berantakan karena hanya mengikuti urutan nomor pangkalan dari node 1 hingga 12. Akibat sistem urutan yang kaku ini, rute yang dihasilkan memiliki banyak garis yang saling tumpang tindih atau bersilangan. Misalnya, jalur saat truk pulang dari node 12 menuju depot SPBE justru memotong jalur keberangkatan di tengah peta. Selain itu, truk juga terpaksa melakukan lompatan perjalanan yang sangat jauh, seperti dari node 8 menuju node 9, padahal secara jarak ada node lain yang letaknya jauh lebih berdekatan. Hal ini membuat rute menjadi boros karena truk berputar-putar di area yang sama. Rincian parameter perjalanan truk 1 dijabarkan dalam Tabel 4.6

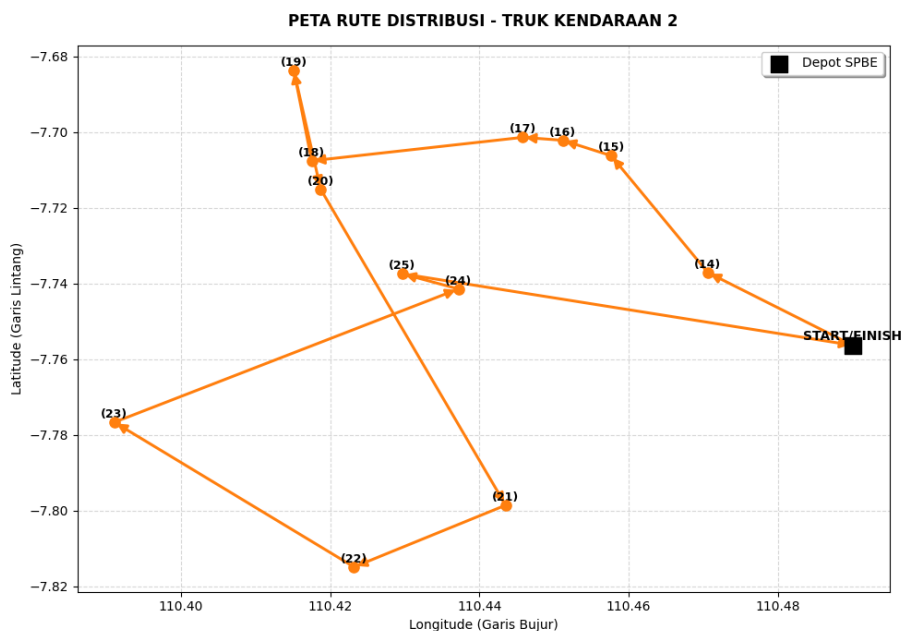
Tabel 4. 6 Rincian Parameter Perjalanan Kendaraan 1

Tujuan	Jarak (Km)	Demand (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0-1	3,708	50	4250	1,960	0,738
1-2	1,895	30	4160	0,988	0,376

Tujuan	Jarak (Km)	Demand (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
2-3	2,216	20	4100	1,149	0,439
3-4	3,156	45	3965	1,615	0,622
4-5	0,758	50	3815	0,382	0,149
5-6	2,383	50	3665	1,194	0,465
6-7	2,255	50	3515	1,113	0,437
7-8	4,869	50	3365	2,382	0,939
8-9	6,071	60	3185	2,930	1,164
9-10	1,956	50	3035	0,930	0,373
10-11	1,435	45	2900	0,675	0,272
11-12	4,904	50	2750	2,471	0,926
12-0	9,914		2750	2,234	1,871
Total	45,52			22, 015	8,770

B. Rute kendaraan 2

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 2 selama melakukan distribusi barang dari *Main Hub* (Depot) ke pangkalan:



Gambar 4. 2 Rute Awal Kendaraan 2

Kondisi rute yang tidak efisien juga terlihat jelas pada visualisasi kendaraan 2 pada Gambar 4.2 yang ditandai dengan garis berwarna oranye. Rute ini bergerak secara

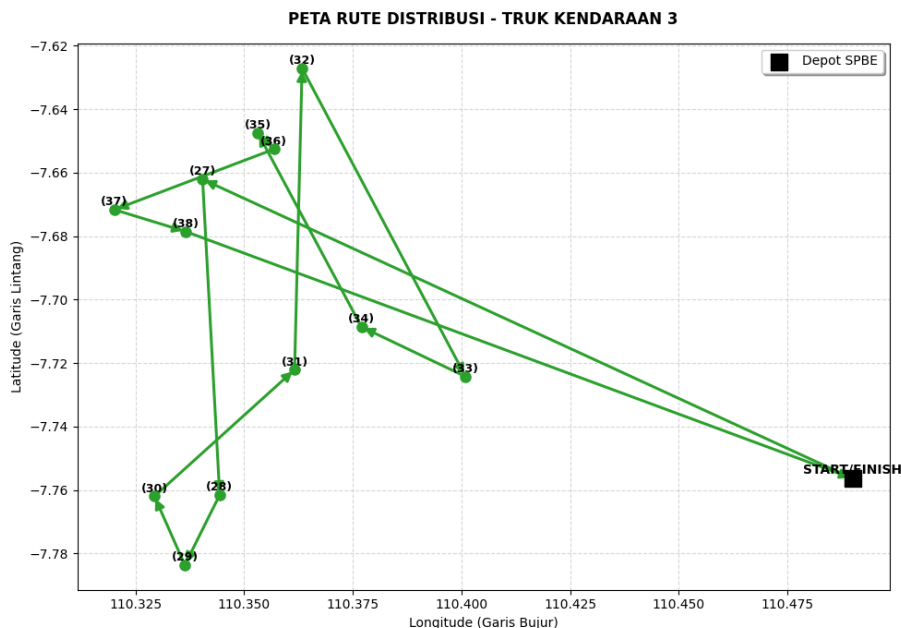
berurutan mulai dari node 13 hingga 25. Ketidakefisienan pergerakan sangat terasa ketika truk berada di area atas peta, tepatnya di node 19, lalu tiba-tiba harus turun sangat jauh ke bawah menuju node 20. Masalah pergerakan ini semakin bertambah ketika truk hendak pulang dari node tujuan terakhirnya. Jalur kepulangan dari node 25 menuju depot SPBE membentang sangat panjang melintasi peta dan memotong garis-garis rute yang sebelumnya sudah dilewati. Rincian parameter perjalanan kendaraan 2 dijabarkan pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Rincian Parameter Perjalanan Kendaraan 2

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0-13	4,636	50	4250	2,451	0,922
13 - 14	7,172	40	4130	3,750	1,421
14-15	3,716	50	3980	1,916	0,733
15-16	0,847	50	3830	0,430	0,166
16-17	0,595	50	3680	0,298	0,116
17-18	3,195	40	3560	1,582	0,621
18-19	2,674	25	3485	1,314	0,518
19-20	3,516	30	3395	1,712	0,679
20-21	9,678	50	3245	4,643	1,859
21-22	2,882	50	3095	1,361	0,551
22-23	5,533	40	2975	2,581	1,053
23-24	6,415	25	2900	2,970	1,217
24-25	0,940	50	2750	0,428	0,177
25-0	6,973		2750	3,177	1,316
Total	58,772			28,614	11,350

C. Rute kendaraan 3

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 3 selama melakukan distribusi barang dari *Main Hub* (Depot) ke pangkalan:



Gambar 4. 3 Rute Awal Kendaraan 3

Selanjutnya, pada Gambar 4.3 untuk Truk 3 yang berwarna hijau, kerumitan jalurnya terlihat semakin parah. Truk ini melayani daftar pangkalan dari node 27 sampai 38. Pola pergerakannya tidak beraturan dan membentuk garis zig-zag yang saling menabrak satu sama lain. Salah satu contoh ketidakefisienan yang paling mencolok adalah pergerakan dari node 32 menuju *node* 33 yang letaknya sangat berjauhan, sehingga menciptakan garis panjang yang membelah jalur lain di tengah peta. Perjalanan kembali ke depot dari node 38 juga sangat tidak efektif karena truk harus melewati area yang sebenarnya sudah didatangi di awal perjalanan. Rincian paramter perjalanan kendaraan 3 dijabarkan pada Tabel 4.8

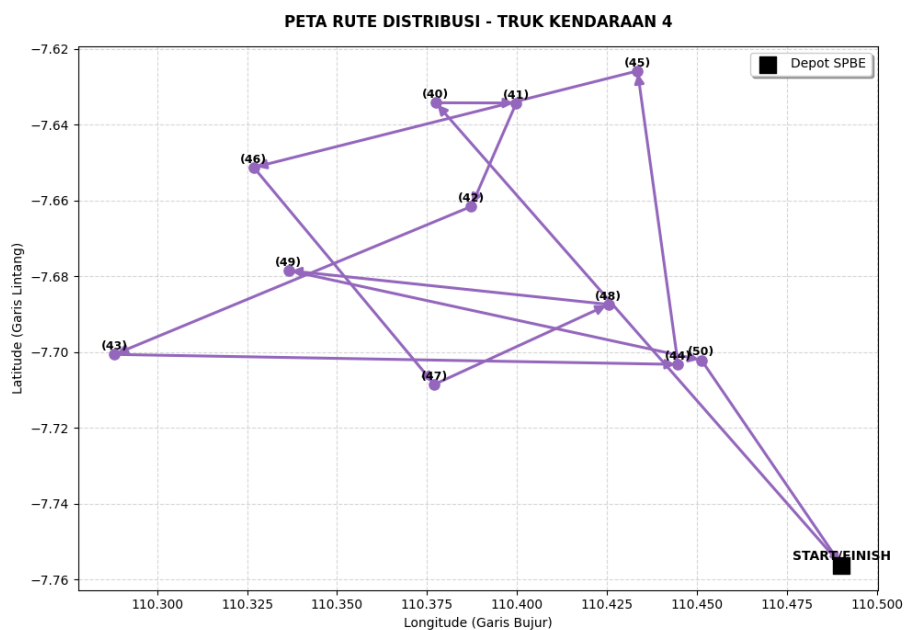
Tabel 4. 8 Rincian Parameter Perjalanan Kendaraan 3

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0-26	7,812	50	4250	4,130	1,554
26-27	12,406	30	4160	6,505	2,461
27-28	11,068	35	4055	5,746	2,188
28-29	2,608	25	3980	1,345	0,514
29-30	2,526	25	3905	1,293	0,497
30-31	5,686	50	3755	2,869	1,112
31-32	10,563	25	3680	5,291	2,061

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
32-33	11,57	30	3590	5,745	2,250
33-34	3,162	50	3440	1,547	0,612
34-35	7,288	75	3215	3,486	1,399
35-36	0,705	50	3065	0,332	0,135
36-37	4,566	75	2840	2,100	0,865
37-38	1,964	30	2750	0,895	0,371
38-0	18,991	0	2750	8,652	3,585
Total	100,915			49,935	19,602

D. Rute kendaraan 4

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 4 selama melakukan distribusi barang dari *Main Hub* (Depot) ke pangkalan:



Gambar 4. 4 Rute Awal Kendaraan 4

Terakhir, visualisasi rute Truk 4 pada Gambar 4.4 dengan garis berwarna ungu menunjukkan tingkat tumpang tindih jalur yang paling tinggi dibandingkan armada lainnya. Truk ini bertugas mengunjungi pangkalan dari node 40 hingga 50. Karena pergerakan murni hanya berdasarkan urutan indeks awal tanpa mempertimbangkan jarak geografis aslinya, kendaraan berulang kali bergerak bolak-balik melintasi area yang sama. Terdapat perpindahan jarak yang sangat jauh dari node 42 di area tengah peta, langsung

menuju ke sisi paling kiri peta di node 43. Banyaknya garis yang saling menumpuk dan berpotongan pada seluruh peta ini menjadi bukti bahwa rute awal tidak efisien dari segi waktu maupun konsumsi bahan bakar, sehingga tahapan optimasi rute sangat diperlukan sebelum diterapkan di lapangan. Rincian parameter perjalanan kendaraan 4 dijabarkan pada Tabel 4.9

Tabel 4. 9 Rincian Parameter Perjalanan Kendaraan 4

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0-39	21,768	50	4250	11,509	4,331
39-40	5,926	50	4100	3,090	1,173
40-41	2,465	65	3905	1,262	0,485
41-42	3,335	30	3815	1,692	0,654
42-43	11,745	40	3695	5,892	2,293
43-44	17,242	50	3545	8,523	3,348
44-45	8,702	65	3350	4,219	1,678
45-46	12,077	60	3170	5,749	2,314
46-47	8,43	30	3080	3,976	1,610
47-48	5,823	40	2960	2,713	1,107
48-49	9,836	40	2840	4,524	1,863
49-50	12,897	30	2750	5,876	2,434
50-51	7,388	0	2750	3,366	1,394
51-0	21,768		4250	11,509	24,684
Total	127,634			62,391	4,331

Secara keseluruhan, visualisasi rute awal dari keempat armada truk menunjukkan pola perjalanan yang tidak efisien karena hanya berpatokan pada urutan indeks node secara statis. Pengabaian letak geografis ini secara konsisten menghasilkan jalur yang saling tumpang tindih, berpotongan, serta memicu perpindahan jarak jauh yang tidak efisien antar node pada setiap kendaraan. Akibatnya, pergerakan armada menjadi berulang di area yang sama, yang secara langsung menyebabkan pembengkakan total jarak tempuh, peningkatan konsumsi bahan bakar, dan peningkatan emisi karbon. Oleh karena itu,

penerapan metode optimasi penting untuk menyusun ulang urutan kunjungan setiap truk agar rute distribusi menjadi lebih efisien.

4.2 Pengolahan Data

Tahap pengolahan data pada penelitian ini ialah penguraian langkah-langkah untuk menyelesaikan permasalahan optimasi rute armada distribusi. Seluruh data terkait operasional penyaluran gas LPG 3 kg akan diproses untuk menemukan keseimbangan antara efisiensi jarak tempuh dan minimalisasi emisi karbon. Hasil akhir dari perhitungan ini akan berupa kumpulan opsi rute terbaik yang disebut Pareto front.

Proses optimasi dilakukan secara spesifik pada rute masing-masing armada, di mana alokasi kelompok pangkalan untuk setiap truk telah ditetapkan sebelumnya (*fixed cluster*). Dengan demikian, pencarian rute terbaik oleh algoritma NSGA-II berfokus pada optimasi permutasi dan pengacakan urutan kunjungan pangkalan di dalam cakupan kelompok truk masing-masing, tanpa mengubah pembagian pangkalan antar-armada.

Untuk mendapatkan rute optimal tersebut, tahapan pengolahan data dijelaskan secara berurutan, mulai dari pengembangan model konseptual, perumusan model matematis, hingga implementasi algoritma NSGA-II.

4.2.1 Pengembangan model konseptual

Proses pengembangan model konseptual bertujuan untuk mendefinisikan setiap langkah dan tahapan penelitian guna memastikan konsep yang dibangun sesuai dan mampu membentuk kerangka model yang merepresentasikan permasalahan di lapangan. Dalam konteks *Vehicle Routing Problem* (VRP) pada distribusi gas LPG 3 kg ini, terdapat beberapa karakteristik dan kondisi spesifik yang berlaku dalam sistem, di antaranya:

- a. Proses distribusi dilakukan hanya di Kabupaten Sleman dengan mengoperasikan 4 kendaraan dengan asumsi penggunaan batasan *homogeneous fleet*. Kendaraan yang digunakan memiliki karakteristik dan jenis yang sama dengan batasan kapasitas sebanyak 550 tabung gas LPG 3 kg
- b. Titik keberangkatan dimulai dari depot, yaitu SPPBE Narada kemudian diantarkan ke beberapa pangkalan, lalu akan kembali lagi ke SPPBE Narada. Di setiap pangkalan yang dikunjungi, akan terjaid aktivitas penukaran tabung gas penuh dan kosong dimana jumlah tabung gas isi yang diturunkan selalu sama dengan jumlah tabung kosong yang diangkut kembali
- c. Berat muatan di dalam kendaraan bersifat dinamis pada setiap titik perjalanan dikarenakan adanya selisih berat antara tabung isi dengan berat 8 kg dan tabung

kosong dengan berat 5 kg. Kendaraan akan mengalami penyusutan beban bersih sebesar 3 kg per tabung di setiap pangkalan yang selesai dilayani. Fluktuasi bobot kendaraan ini berkorelasi langsung terhadap konsumsi bahan bakar dan volume emisi karbon yang dihasilkan di sepanjang rute

- d. Pembagian rute untuk setiap kendaraan ditentukan berdasarkan pencarian keseimbangan antara dua fungsi objektif yaitu meminimalkan total jarak tempuh dan meminimalkan total emisi karbon. rute dengan jarak terpendek belum tentu menghasilkan emisi terendah, karena emisi sangat dipengaruhi oleh berapa lama kendaraan harus membawa beban berat di sepanjang rute tersebut. Hasil akhirnya akan berupa kurva *Pareto Front* sebagai opsi keputusan bagi manajemen.

4.2.2 Pengembangan program dan model matematis

Berdasarkan model konseptual, tahap selanjutnya adalah mendefinisikan kebutuhan perhitungan dengan menyusun model matematis. Penelitian ini masuk ke dalam *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery* (VRP-SPD), yang menghitung emisi karbon dengan pertimbangan beban muatan yang dibawa. Model matematis yang dibangun didasarkan pada permasalahan nyata dalam operasional distribusi gas LPG 3 kg yang kemudian dikembangkan untuk merumuskan fungsi objektif dari batasan-batasan dalam proses pencarian solusi optimal. Berikut merupakan tahapan pengembangan program dan model matematis

4.2.2.1 Inisialisasi sistem

Penelitian ini melakukan perhitungan dengan bantuan beberapa pustaka (*library*) untuk optimisasi dan visualisasi hasil akhir. Adapun *library* yang digunakan pada penelitian ini beserta fungsinya akan dijabarkan sebagai berikut:

1) *Pandas*

Library pandas berguna untuk mengelola data dalam bentuk tabel, sehingga memudahkan program mengimpor data asli

2) *Matplotlib*

Library matplotlib berfungsi sebagai alat visualisasi di akhir program untuk mengubah angka hasil optimasi menjadi grafik kurva *pareto front* dan peta alur truk rekomendasi

3) *Random*

Library random berperan untuk mengacak pembentukan rute populasi awal serta menggerakkan proses persilangan (*crossover*) dan mutase kromosom

4) *Numpy*

Library numpy berfungsi untuk mengolah data numerik secara lebih efisien terutama dalam perhitungan matriks jarak antar-pangkalan

5) *Copy*

Library copy berfungsi untuk mengamankan atau mempertahankan rute terbaik pada mekanisme *elitisim* agar tidak rusak saat proses mutasi

Langkah selanjutnya dalam penyusunan kode pemrograman GVRP-SPD adalah pendefinisian parameter utama, yang meliputi jumlah pangkalan, ketersediaan armada, kecepatan rata-rata kendaraan, batasan kapasitas muatan dan parameter lainnya. Berikut merupakan set indeks dan parameter yang digunakan pada penelitian ini,

N (Total Pangkalan)	: 50
V (Jumlah Kendaraan)	: 4
W_{full} (Berat 1 Tabung Gas Penuh)	: 8 Kg
W_{empty} (Berat 1 Tabung gas Kosong)	: 5 Kg
Q (Kapasitas Muatan)	: 550 Tabung / 4400 kg
P (Koefisien Emisi)	: 2,68 Kg/CO ₂
Waktu Pelayanan per Pangkalan	: 20 menit
Kecepatan kendaraan	: 20 Km/jam
Rasio penggunaan BBM dengan muatan	: 1:5 Liter/Km
Rasio penggunaan BBM tanpa muatan	: 1:6 Liter/Km

Berikut merupakan penjelasan *pseudocode* tahapan inisialisasi sistem

Tabel 4. 10 *Pseudocode* Inisialisasi Sistem

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre>import pandas as pd import numpy as np import matplotlib.pyplot as plt import random random.seed(42) np.random.seed(42)</pre>	Memanggil pustaka dasar program (Pandas, NumPy, Matplotlib, Random) dan menetapkan <i>random seed</i> (42) agar hasil pengacakan algoritma selalu konsisten saat diuji ulang

```

demand_data = [
    0,
    50, 30, 20, 45, 50, 50, 50, 50, 60, 50, 45, 50,
    50, 40, 50, 50, 50, 40, 25, 30, 50, 50, 40, 25, 50,
    50, 30, 35, 25, 25, 50, 25, 30, 50, 75, 50, 75, 30,
    50, 50, 65, 30, 40, 50, 65, 60, 30, 40, 40, 30,
]
df['Demand'] = demand_data

rute_truk = {
    1: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12],
    2: [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25],
    3: [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38],
    4: [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50]
}

```

Mengimpor data titik koordinat pangkalan dari *file excel* dan menyisipkan daftar jumlah permintaan (*demand*) tabung gas ke dalam sistem.

Mendefinisikan pembagian rute pangkalan awal untuk keempat kendaraan

4.2.3 Implementasi algoritma NSGA-II

Penerapan algoritma NSGA-II dilakukan untuk mengoptimalkan rute distribusi LPG 3 kg dengan mempertimbangkan emisi karbon yang dikeluarkan selama perjalanan. Tahapan dari implementasi algoritma akan dijabarkan sebagai berikut

4.2.3.1 Inisialisasi populasi awal

Tahap pertama dalam NSGA-II adalah membangkitkan populasi awal secara acak sebesar N Individu (rute). Pada penelitian ini, N ditetapkan sebanyak 50 individu, di mana individu pertama adalah rute eksisting dan sisanya dibangkitkan secara acak

Tabel 4. 11 Inisialisasi Populasi Awal

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre> ukuran_populasi = 50 max_generasi = 100 for truk_id, pangkalan in rute_truk.items(): populasi = [pangkalan.copy()] while len(populasi) < ukuran_populasi: populasi.append(random.sample(pangkalan, len(pangkalan))) </pre>	Menentukan batas parameter algoritma dan membangkitkan 50 rute acak untuk setiap truk sebagai titik awal evolusi

Melalui proses inisialisasi tersebut, sejumlah solusi awal yang representatif akan dibentuk dalam wujud individu atau kromosom berdasarkan ukuran populasi yang telah ditentukan. Dalam konteks penelitian ini, satu individu menggambarkan susunan acak dari urutan pangkalan yang menjadi rute awal distribusi armada truk. Guna menganalisis pengaruh nilai parameter terhadap performa optimal algoritma NSGA-II, ukuran populasi awal (*population size*) diuji melalui beberapa variasi skenario. Rincian mengenai kombinasi ukuran populasi dan jumlah generasi yang digunakan dalam penelitian ini disajikan secara lengkap pada Tabel 4.12

Tabel 4. 12 Skenario Pengujian Sensitivitas

No. Skenario	Ukuran Populasi	Jumah Generasi
--------------	-----------------	----------------

1	20	50
2	30	70
3	50	100
4	70	150

4.2.3.2 Evaluasi populasi

Langkah kedua dalam implementasi NSGA-II adalah melakukan evaluasi solusi terhadap rute-rute yang telah dibangkitkan. Evaluasi ini dilakukan dengan mengukur performa setiap rute berdasarkan dua parameter utama, yaitu total jarak tempuh geografis dan estimasi emisi karbon kendaraan. Hasil dari evaluasi solusi ini nantinya akan digunakan sebagai indikator untuk menyaring rute mana saja yang paling efisien dan ramah lingkungan

Tabel 4. 13 Evaluasi Populasi

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre>def hitung_jarak(lat1, lon1, lat2, lon2): lat1, lon1, lat2, lon2 = map(np.radians, [lat1, lon1, lat2, lon2]) return 2 * 6371 * np.arcsin(np.sqrt(np.sin((lat2-lat1)/2)**2 + np.cos(lat1) * np.cos(lat2) * np.sin((lon2-lon1)/2)**2))</pre>	menghitung jarak lurus melengkung antara dua titik di permukaan bumi berdasarkan koordinat garis lintang (<i>latitude</i>) dan garis bujur (<i>longitude</i>).
<pre>def evaluasi_rute(kromosom): total_jarak = 0 total_emisi = 0 sisa_muatan = 4400 # 550 tabung * 8 kg rute = [0] + kromosom + [0] for i in range(len(rute) - 1): asal, tujuan = rute[i], rute[i+1] lat1, lon1 = df.loc[df['No Index'] == asal, ['Latitude', 'Longitude']].values[0] lat2, lon2 = df.loc[df['No Index'] == tujuan, ['Latitude', 'Longitude']].values[0] jarak = hitung_jarak(lat1, lon1, lat2, lon2) total_jarak += jarak</pre>	Menyusun struktur perjalanan truk agar selalu dimulai dari depot, mengunjungi pangkalan sesuai urutan kromosom, dan wajib kembali lagi ke depot
<pre>konsumsi_bbm = 0.17 + ((0.2 - 0.17) / 4400 * sisa_muatan) total_emisi += jarak * konsumsi_bbm * 2.68 if tujuan != 0: demand = df.loc[df['No Index'] == tujuan, 'Demand'].values[0] sisa_muatan = sisa_muatan - (demand * 8) + (demand * 5) return total_jarak, total_emisi</pre>	Menghitung tingkat konsumsi BBM berdasarkan beban yang diantar dan diangkut secara dinamis sesuai dengan Persamaan (16)

Sebagai hasil dari tahapan evaluasi awal ini, setiap rute konvensional yang menjadi *baseline* dinilai secara numerik berdasarkan koordinat geografis dan fluktuasi berat muatannya. Karena baru memasuki tahap evaluasi terhadap populasi awal dan belum melalui siklus reproduksi dari crossover, mutasi, maupun seleksi ketat algoritma NSGA-II, nilai performa yang dihasilkan masih bersifat standar dan belum optimal. Berikut

adalah urutan rute distribusi konvensional awal yang dievaluasi untuk masing-masing armada truk:

- Rute kendaraan 1: [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 0]
- Rute kendaraan 2: [0, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 0]
- Rute kendaraan 3: [0, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 0]
- Rute kendaraan 4: [0, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 0]

4.2.3.3 Fast non-dominated sorting

Setelah nilai fungsi objektif dari masing-masing rute didapatkan, tahap berikutnya dalam algoritma NSGA-II adalah pengurutan *Fast Non-Dominated Sort*. Tahapan ini bertujuan untuk mengelompokkan seluruh solusi rute alternatif ke dalam tingkatan hierarki yang disebut *Pareto Front* berdasarkan aturan dominasi. Solusi-solusi terbaik yang sama sekali tidak didominasi oleh solusi lain akan menempati peringkat tertinggi (*Front 1*), yang nantinya menjadi dasar utama dalam penentuan rute optimal.

Tabel 4. 14 Pseudocode Fast non-Dominated Sorting

pseudocode	fungsi
<pre>def cek_dominasi(p, q): return (p[0] <= q[0] and p[1] <= q[1]) and (p[0] < q[0] or p[1] < q[1])</pre>	Mengeksekusi aturan seleksi multi-objektif untuk menentukan apakah rute p lebih unggul daripada rute q
<pre>def fast_non_dominated_sort(fitness): fronts = [[]] S = {i: [] for i in range(len(fitness))} n = {i: 0 for i in range(len(fitness))} for i in range(len(fitness)): for j in range(len(fitness)): if cek_dominasi(fitness[i], fitness[j]): S[i].append(j) elif cek_dominasi(fitness[j], fitness[i]): n[i] += 1 if n[i] == 0: fronts[0].append(i)</pre>	Membandingkan seluruh rute secara berpasangan, menghitung skor kekalahan dominasi (n), lalu memisahkan rute-rute terbaik ke dalam kelompok kasta <i>Front 1</i> .

4.2.3.4 Crowding distance

Langkah selanjutnya adalah perhitungan *Crowding Distance* untuk mengukur tingkat kepadatan solusi di sekitar wilayah kurva Pareto yang berguna untuk menjaga keragaman rekomendasi, sehingga algoritma akan lebih memprioritaskan solusi yang berada di area yang jarang ditempati rute lain demi menghindari penumpukan rute sejenis.

Tabel 4. 15 *Pseudocode Crowding Distance*

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre>def crowding_distance(front, fitness): jarak = {i: 0 for i in front} if len(front) <= 2: return {i: float('inf') for i in front} for m in range(2): # Evaluasi 2 objektif (Jarak & Emisi) front_urut = sorted(front, key=lambda x: fitness[x][m]) jarak[front_urut[0]] = jarak[front_urut[-1]] = float('inf') f_min, f_max = fitness[front_urut[0]][m], fitness[front_urut[-1]][m] if f_max == f_min: continue for i in range(1, len(front_urut) - 1): jarak[front_urut[i]] += (fitness[front_urut[i+1]][m] - fitness[front_urut[i-1]][m]) / (f_max - f_min) return jarak</pre>	Mengukur seberapa rapat atau renggangnya posisi antarsolusi rute pada grafik kompromi Pareto. Solusi ujung ekstrim dikunci nilainya menjadi tak terhingga (inf) agar variasi batas rute terhemat tidak terbuang

4.2.3.5 Tournament selection

Tahap *tournament selection* akan menyaring dan memilih pasangan rute induk yang memiliki performa terbaik berdasarkan kombinasi tingkatan *front* serta nilai kepadatan terjauh. Rute-rute yang berhasil lolos seleksi ini kemudian akan diproses lebih lanjut untuk menciptakan sekumpulan jalur alternatif yang baru.

Tabel 4. 16 *Peudocode Tournament Selection*

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre>induk1, induk2 = random.sample(populasi, 2)</pre>	Menjalankan seleksi turnamen alamiah dengan membandingkan dua kandidat rute secara acak. Kandidat dengan kasta <i>Front</i> terkecil otomatis dipilih. Jika kastanya seri, pemenangnya diambil dari yang memiliki kepadatan (<i>crowding distance</i>) terbesar agar sebaran solusi tetap beragam.

4.2.3.6 Crossover dan mutasi

Pada tahapan ini, sepasang solusi rute terpilih akan dikombinasikan melalui metode *crossover* untuk menghasilkan variasi rute baru dari rute acuan sebelumnya. Setelah kombinasi tersebut terbentuk, sistem akan menerapkan proses mutasi dengan cara menukar urutan pangkalan secara acak untuk melahirkan rute baru

Tabel 4. 17 *Pseudocode Crossover dan Mutasi*

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre>keturunan = [] while len(keturunan) < ukuran_populasi: induk1, induk2 = random.sample(populasi, 2) anak = crossover(induk1, induk2) if random.random() < 0.7: # Mutasi Swap idx1, idx2 = random.sample(range(len(anak)), 2) anak[idx1], anak[idx2] = anak[idx2], anak[idx1] keturunan.append(anak)</pre>	Menggabungkan dua induk pilihan turnamen untuk menurunkan gen urutan rute terbaik, serta menyisipkan mutasi penukaran posisi pangkalan simpul (<i>swap mutation</i>) dengan peluang 20% guna memicu alternatif rute baru secara acak.

4.2.3.7 Mekanisme penggabungan dan elitisme

Memasuki tahapan elitisme, kelompok rute dari iterasi sebelumnya dan kelompok rute hasil modifikasi terbaru akan disatukan ke dalam satu himpunan besar untuk dievaluasi ulang. Hanya rute-rute dengan kualitas terbaik dari segi efisiensi jarak serta nilai emisi karbon terendah saja yang dipertahankan untuk melaju ke siklus komputasi berikutnya.

Tabel 4. 18 *Pseudocode Mekanisme dan Penggabungan*

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre>populasi_gabungan = populasi + keturunan fitness_gabungan = [evaluasi_rute(indv) for indv in populasi_gabungan] fronts = fast_non_dominated_sort(fitness_gabungan) populasi_baru = []</pre>	Menggabungkan rute induk dan rute anak menjadi satu kelompok besar agar rute-rute terbaik tidak hilang (, lalu menilai kembali peringkat kasta kinerjanya secara serentak.

4.2.3.8 Kriteria penghentian iterasi

Tahap terakhir seluruh rangkaian proses optimasi di atas akan dieksekusi secara berulang hingga mencapai batas jumlah perulangan maksimal yang ditentukan. Begitu iterasi sudah dilakukan sebanyak batas maksimal, program otomatis berhenti lalu menyajikan hasil akhir berupa kombinasi rute paling ideal yang menempati barisan *Pareto Front* pertama

Tabel 4. 19 *Pseudocode* Penghentian Iterasi

<i>pseudocode</i>	fungsi
<pre> populasi_baru = [] for front in fronts: if len(populasi_baru) + len(front) <= ukuran_populasi: populasi_baru.extend([populasi_gabungan[i] for i in front]) else: jarak_crowd = crowding_distance(front, fitness_gabungan) front_urut = sorted(front, key=lambda x: jarak_crowd[x], reverse=True) sisa_slot = ukuran_populasi - len(populasi_baru) populasi_baru.extend([populasi_gabungan[i] for i in front_urut[:sisa_slot]]) break populasi = populasi_baru </pre>	Menyaring populasi gabungan dari 100 lalu dipersingkat kembali ke kuota 50 rute utama. Jika kapasitas hampir penuh, sistem menyeleksi sisa slot dengan mengurutkan rute dari yang kawasannya paling renggang
<pre> for gen in range(max_generasi): </pre>	Mengendalikan sistem agar berputar melakukan evolusi rute secara otomatis hingga menyentuh batas generasi ke-100

4.2.4 Uji Komparasi Kinerja Algoritma

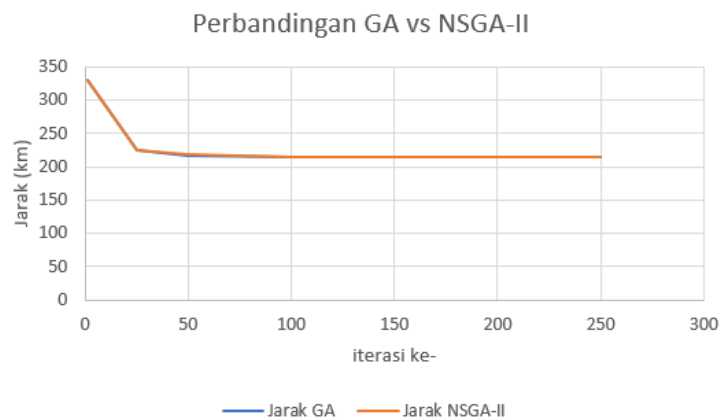
Sebagai bagian dari tahapan pengolahan data, penelitian ini melakukan pengujian komputasi untuk membandingkan kinerja algoritma *Genetic Algorithm* (GA) standar (*single-objective*) dengan algoritma NSGA-II yang memisahkan objektif antara jarak dan emisi.

Agar komparasi bersifat valid, pengujian untuk kedua algoritma dieksekusi menggunakan parameter dasar komputasi yang identik. Konfigurasi parameter yang digunakan adalah ukuran populasi sebanyak 50 individu, batas maksimal iterasi sebanyak 250 generasi, dan probabilitas mutasi sebesar 20%.

Pergerakan nilai jarak tempuh terbaik dari kedua algoritma selama 250 generasi direkam dan divisualisasikan melalui grafik konvergensi pada Gambar 4.5. Grafik konvergensi ini berfungsi sebagai gambaran proses pencarian solusi, di mana nilai jarak tempuh pada awalnya mengalami penurunan drastis, lalu melandai, dan akhirnya stabil pada iterasi-iterasi akhir. Rekapitulasi perbandingan hasil jarak dari kedua algoritma pada titik-titik generasi tertentu juga disajikan pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Hasil Komputasi Algoritma Berdasarkan Titik Iterasi

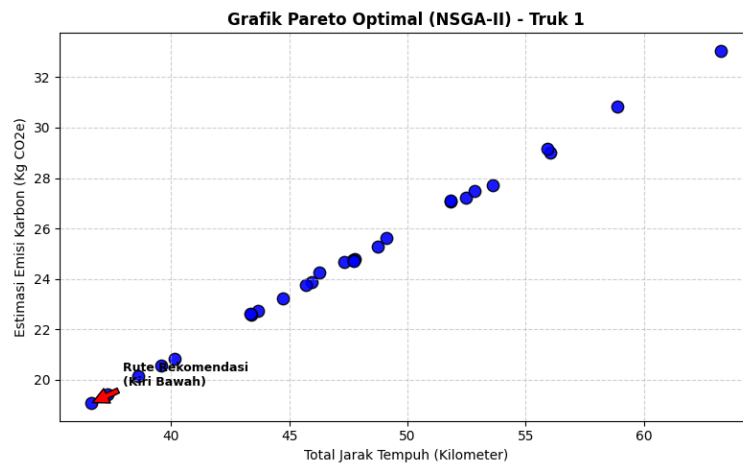
Iterasi ke-	GA (<i>Single Objective</i>)	NSGA-II (<i>Multi-Objective</i>)
1	330,11	330,11
25	224,66	225,58
50	216,31	218,37
100	215,13	215,13
150	215,13	215,13
200	215,13	214,03
250	215,13	214,03



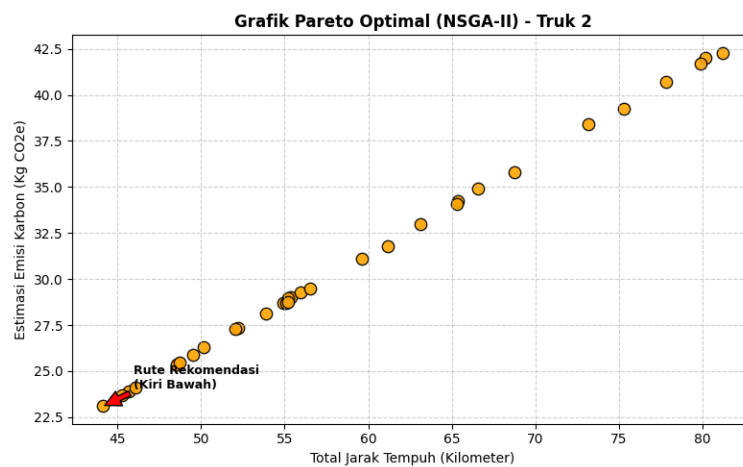
Gambar 4. 5 Grafik Konvergensi Perbandingan Kinerja Algoritma GA dan NSGA-II

4.2.5 Visualisasi Hasil Efisiensi Algoritma

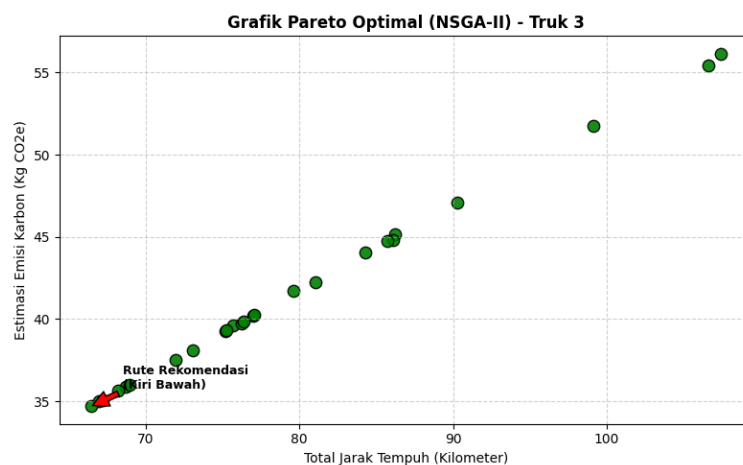
Setelah seluruh tahapan perhitungan dan optimasi rute selesai diproses oleh algoritma, langkah terakhir dalam optimasi menggunakan algoritma NSGA-II ini adalah tahap visualisasi hasil. Tahap ini berfungsi untuk mengubah data output numerik berupa koordinat rute menjadi Pareto Front. Melalui visualisasi ini, pola rute distribusi yang terbentuk dapat dianalisis dan diinterpretasikan dengan lebih mudah oleh pembaca. Adapun hasil visualisasi Pareto Front untuk masing-masing armada distribusi disajikan secara berurutan pada Gambar 4.5 sampai dengan Gambar 4.,8



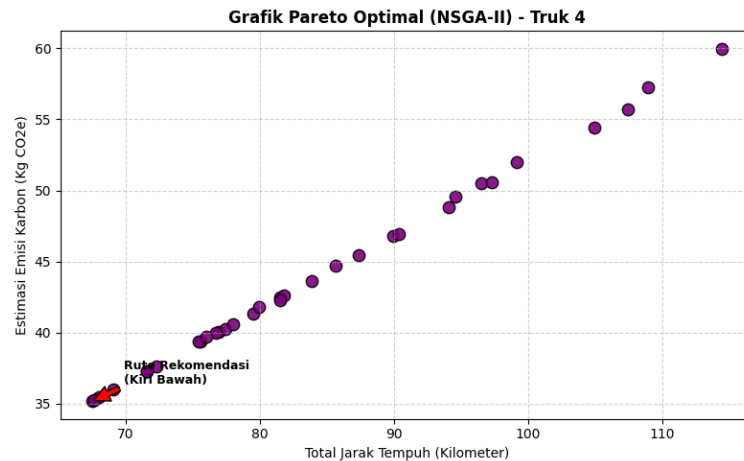
Gambar 4. 6 Grafik Pareto Optimal Kendaraan 1



Gambar 4. 7 Grafik Pareto Optimal Kendaraan 2



Gambar 4. 8 Grafik Pareto Optimal Kendaraan 3



Gambar 4. 9 Grafik Pareto Optimal Kendaraan 4

4.2.6 Verifikasi Rute Distribusi

Tahap verifikasi bertujuan memastikan model matematis dan logika algoritma diterjemahkan dengan tepat ke dalam program. Pengujian mencakup ketepatan perhitungan jarak menggunakan formula *Haversine*, kalkulasi sisa muatan secara dinamis, serta estimasi konsumsi BBM dan emisi karbon berdasarkan model emisi berdasarkan beban. Pengecekan juga dilakukan pada operasi utama algoritma NSGA-II (seperti seleksi, *crossover*, mutasi, dan *non-dominated sorting*). Hasil verifikasi mengonfirmasi bahwa program telah mengeksekusi seluruh parameter dan batasan operasional sudah sesuai dengan rancangan awal, sehingga model dinyatakan terverifikasi

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis dan Pemilihan Solusi *Pareto Front*

Pada awal penelitian, dihipotesiskan bahwa akan terjadi kondisi *trade-off* di mana rute yang lebih jauh dapat memiliki emisi karbon lebih rendah apabila armada mendahulukan penurunan muatan terberat di pangkalan awal. Secara teoritis, potensi pertentangan ini muncul pada kondisi ekstrem ketika pangkalan dengan tingkat permintaan terbesar berada di lokasi yang sangat jauh dari depot. Menempuh perjalanan jauh dengan kondisi kendaraan bermuatan penuh akan menghasilkan emisi gas buang yang sangat tinggi, sehingga susunan urutan kunjungan pangkalan dalam satu rute maupun pertukaran pangkalan antar-rute dapat memicu fluktuasi beban muatan kendaraan.

Meskipun potensi tersebut ada secara teori, hasil empiris pada skenario penelitian ini membuktikan bahwa pemangkasan jarak tempuh fisik kendaraan tetap menjadi variabel yang paling dominan dalam menentukan besaran emisi karbon. Hal ini menegaskan bahwa penelitian ini sama sekali tidak membuat kedua fungsi objektif berada dalam kondisi yang saling berlawanan atau bertentangan. Efisiensi jarak tempuh dan penekanan emisi karbon berjalan secara searah, di mana penurunan jarak tempuh otomatis menghasilkan penurunan emisi gas buang secara linier.

Oleh karena itu, pemisahan fungsi tujuan menggunakan algoritma NSGA-II dalam penelitian ini tidak ditujukan untuk mencari titik kompromi akibat adanya konflik antar-parameter, melainkan dimanfaatkan sebagai mekanisme untuk memperluas ruang pencarian dan menjaga keragaman genetik solusi. Keputusan rute usulan terbaik kemudian secara konsisten ditetapkan pada titik sudut paling kiri bawah sebagai solusi paling optimal yang berhasil meminimalkan total jarak tempuh sekaligus emisi karbon secara bersamaan untuk setiap armada distribusi.

Berdasarkan kriteria pemilihan titik tersebut, berikut disajikan analisis spesifik sebaran solusi optimal *Pareto Front* dan titik rekomendasi terpilih untuk setiap armada distribusi:

- Analisis Pareto Front Truk 1

Grafik *scatter plot* pada Gambar 4.5 memperlihatkan sebaran titik solusi *Pareto Front* berwarna biru untuk rute Truk 1 hasil pengolahan algoritma NSGA-II. Sebaran titik dari area tengah hingga kanan atas menggambarkan variasi alternatif rute yang berhasil

dieksplorasi. Titik-titik di area atas mencerminkan adanya konflik efisiensi pada susunan rute, di mana urutan kunjungan pangkalan yang tidak presisi memicu pembengkakan jarak tempuh hingga lebih dari 63 km dan peningkatan emisi karbon hingga melebihi 32 kg CO_2e .

Untuk mengatasi inefisiensi pada rute-rute di area atas tersebut, dipilih titik solusi yang berada di posisi sudut paling kiri bawah sebagai *compromise solution*. Titik rekomendasi ini memberikan kombinasi nilai terendah dan paling optimal untuk armada Truk 1, yaitu total jarak tempuh sebesar 37,029 km dan estimasi emisi karbon sebesar 18,236 kg CO_2e .

- Analisis Pareto Front Truk 2

Visualisasi *scatter plot* pada Gambar 4.6 menampilkan sebaran titik solusi *Pareto Front* berwarna oranye untuk armada Truk 2. Pola titik yang membentang diagonal memperlihatkan bahwa peningkatan jarak perjalanan secara konsisten berdampak pada kenaikan akumulasi emisi gas buang. Titik-titik di area atas menunjukkan rute yang mengalami pemborosan, di mana jarak tempuh membengkak hingga melebihi 81 km dan emisi karbon melonjak mencapai lebih dari 42 kg CO_2e .

Sesuai dengan kriteria pemilihan keputusan, titik pada sudut paling kiri bawah yang ditunjuk panah merah ditetapkan sebagai rute usulan terbaik untuk Truk 2. Titik ini merupakan *compromise solution* yang paling efisien karena mencatatkan nilai minimum pada kedua fungsi tujuan, yaitu total jarak tempuh sebesar 44,145 km dan estimasi emisi karbon sebesar 23,006 kg CO_2e .

- Analisis Pareto Front Truk 3

Pada Gambar 4.7 untuk Truk 3, sebaran titik-titik hijau merepresentasikan himpunan solusi non-dominasi yang berhasil digenerasi oleh algoritma NSGA-II. Sebaran titik yang memanjang ke area atas menggambarkan kondisi konflik operasional pada pembentukan rute. Pada posisi-posisi area atas tersebut, urutan *dropping* muatan yang kurang optimal menyebabkan penambahan jarak tempuh hingga lebih dari 107 km dan tingkat emisi karbon melebihi 55 kg CO_2e .

Berdasarkan pertimbangan efisiensi operasional, titik di sudut paling kiri bawah diambil sebagai keputusan akhir rute usulan Truk 3. Solusi terpilih ini berhasil menekan jarak dan emisi ke tingkat paling minimum secara bersamaan, yaitu menghasilkan total jarak tempuh sebesar 66,44 km dan estimasi emisi karbon sebesar 34,565 kg CO_2e .

- Analisis Pareto Front Truk 4

Grafik *scatter plot* Truk 8 pada Gambar 4.X memperlihatkan himpunan titik solusi *Pareto Front* yang ditandai dengan warna ungu. Pola sebaran titik dari area bawah hingga atas menegaskan bahwa penambahan jarak fisik jalan sangat mendominasi besaran emisi yang dihasilkan. Pada titik-titik area atas, lintasan rute yang kurang efisien memicu pemborosan jarak hingga 114 km dan peningkatan emisi karbon hingga mencapai 60 kg CO_2e .

Titik rekomendasi yang berada di sudut paling kiri bawah ditetapkan sebagai *compromise solution* untuk armada Truk 4. Titik ini dipilih karena memberikan efisiensi paling maksimal pada kedua parameter, yaitu dengan nilai total jarak tempuh sebesar 66,4 km dan estimasi emisi karbon sebesar 34,64 kg CO_2

5.2 Analisis Perbandingan Kinerja Algoritma

Berdasarkan Tabel 4.20 dan Gambar 4.5 , penelitian ini terlebih dahulu menerapkan algoritma *Genetic Algorithm* (GA) objektif tunggal yang memfokuskan pencarian pada satu tujuan, yaitu meminimalkan jarak tempuh. Selanjutnya, hasil tersebut dibandingkan dengan algoritma *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) yang memisahkan evaluasi fungsi jarak tempuh dan emisi karbon secara independen. Mengingat variabel emisi karbon merupakan faktor pengali yang berbanding lurus atau linier dengan jarak tempuh, pemisahan fungsi objektif pada NSGA-II dalam penelitian ini bukan bertujuan untuk mencari titik kompromi, melainkan berfungsi sebagai mekanisme untuk memperluas ruang pencarian dan menjaga keragaman genetik.

Pengujian dilakukan dengan parameter komputasi yang identik, yakni dengan menggunakan jumlah populasi dan maksimal generasi yang sama. Berdasarkan hasil komputasi, ditemukan fenomena yang secara jelas membuktikan keunggulan NSGA-II. Pada pertengahan proses evolusi, tepatnya di iterasi ke-50, GA mencatatkan hasil jarak tempuh sebesar 216,31 km. Angka ini terlihat lebih unggul dibandingkan NSGA-II yang mencatatkan jarak 218,37 km. Hal ini terjadi karena tekanan seleksi pada algoritma GA sangat tinggi di awal komputasi, sehingga memaksa algoritma untuk segera mengerucut pada rute terdekat yang ditemukan.

Namun, kecepatan konvergensi tersebut justru menjadi titik lemah algoritma GA. Algoritma mengalami konvergensi prematur dan terjebak pada titik optimal lokal, sehingga pada akhir iterasi, hasil optimasinya terhenti dan tidak dapat lebih baik dari 215,13 km.

Sebaliknya, NSGA-II yang pada iterasi ke-50 tertinggal, terbukti sedang melakukan eksplorasi ruang pencarian secara luas berkat mekanisme *crowding distance* yang mencegah pembuangan kromosom-kromosom unik. Pemisahan fungsi objektif ini membuat NSGA-II terhindar dari jebakan optimal lokal. Alhasil, pada iterasi akhir komputasi, NSGA-II berhasil menembus batasan tersebut dan menemukan kombinasi rute optimal global sedikit lebih baik, yakni sejauh 214,04 km.

Hasil ini membuktikan secara empiris bahwa memisahkan fungsi tujuan menggunakan NSGA-II, meskipun variabel operasionalnya bersifat linier, sangat krusial dalam mengakomodasi skema distribusi muatan secara simultan pada penelitian ini. Pemisahan objektif tersebut berhasil mencegah matinya variasi rute di tengah proses komputasi, sehingga NSGA-II secara mutlak mampu memberikan solusi rute yang lebih efisien dan optimal bagi operasional perusahaan dibandingkan algoritma GA standar.

5.3 Analisis Rute Hasil Optimasi

Setelah melalui proses pemodelan, pengujian, dan eksperimen menggunakan algoritma *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) terhadap permasalahan distribusi logistik, diperoleh solusi terbaik berupa empat rute distribusi optimal yang dilayani oleh empat unit armada truk. Setiap kendaraan dirancang untuk mendistribusikan tabung gas dari depot ke 50 titik pangkalan dengan memastikan tidak melampaui batasan kapasitas muatan maksimum kendaraan, yakni sebanyak 550 tabung per truk, sekaligus meminimalkan total jarak tempuh dan emisi karbon yang dihasilkan.

A. Kendaraan 1

Penerapan algoritma NSGA-II mampu menghasilkan pembentukan rute kendaraan yang optimal dengan memastikan pemenuhan batas kapasitas muatan di dalam armada truk. Melalui perancangan rute tersebut, kendaraan mampu mendistribusikan seluruh permintaan ke setiap pangkalan secara efektif dan kembali ke titik depot sesuai dengan target operasional. Meskipun jarak geografis antar *node* relatif bervariasi, susunan kunjungan yang dihasilkan tetap mendukung efisiensi perjalanan armada. Jarak yang cukup signifikan pada beberapa simpul pelanggan berhasil diantisipasi melalui penentuan urutan rute yang logis, yang mengindikasikan bahwa proses optimasi telah mempertimbangkan kompromi (*trade-off*) antarparameter secara seimbang. Lebih lanjut, analisis rute ini didasarkan pada pergerakan kendaraan dari satu titik pangkalan ke titik

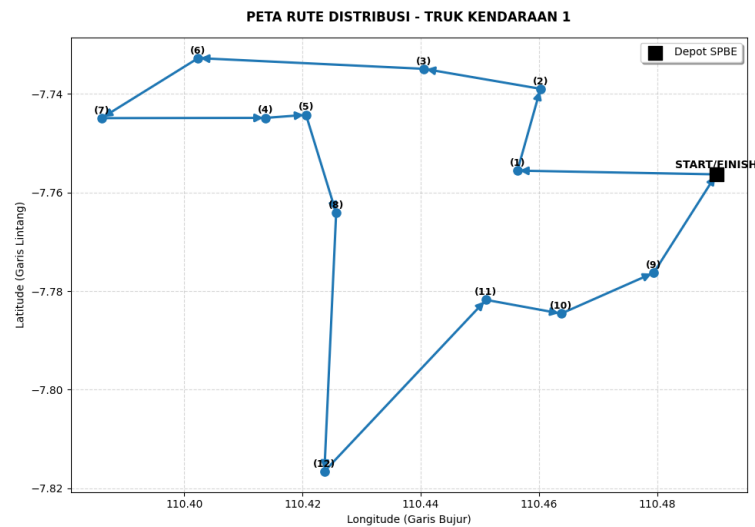
pangkalan berikutnya dengan memperhatikan sisa muatan yang diangkut. Rincian rute kendaraan 1 akan dijelaskan pada Tabel 5.1

Tabel 5. 1 Detail Rute Kendaraan 1

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0 - 1	3,708	50	4250	1,960	0,731
1 - 2	1,895	30	4160	0,994	0,371
2 - 3	2,216	20	4100	1,155	0,431
3 - 6	4,218	50	3950	2,168	0,809
6 - 7	2,255	50	3800	1,143	0,426
7 - 4	3,058	45	3665	1,530	0,571
4 - 5	0,758	50	3515	0,374	0,139
5 - 8	2,284	50	3365	1,109	0,414
8 - 12	5,835	50	3215	2,791	1,041
12 - 11	4,904	45	3080	2,313	0,863
11 - 10	1,435	50	2930	0,666	0,249
10 - 9	1,956	60	2750	0,891	0,333
9 - 0	2,507	0	2750	1,142	0,426
Total	37,029	550		18,236	6,805

Hasil optimasi pada rute kendaraan 1 menunjukkan bahwa total jarak tempuh mengalami penurunan sebesar 18,65% atau dari 45,52 km menjadi 37,03 km. Efisiensi jarak operasional ini memberikan dampak positif secara langsung terhadap lingkungan. Melalui pendekatan perhitungan emisi dinamis yang mempertimbangkan fluktuasi beban muatan pada setiap ruas jalan, tingkat emisi karbon berhasil ditekan hingga 22,42%, yaitu dari 23,505 kg CO₂ menjadi 18,236 kg CO₂ . Hasil ini membuktikan bahwa kerangka model usulan dapat mengakomodasi dua tujuan secara bersamaan, yaitu menekan tempuh

sekali­gus men­du­kung ke­ber­lan­ju­tan ling­kungan. Vi­su­ali­sa­si rute usulan untuk ken­da­raan 1 akan di­can­tu­mkan pa­da Gam­bar 5.1



Gambar 5. 1 Rute usulan kendaraan 1

B. Kendaraan 2

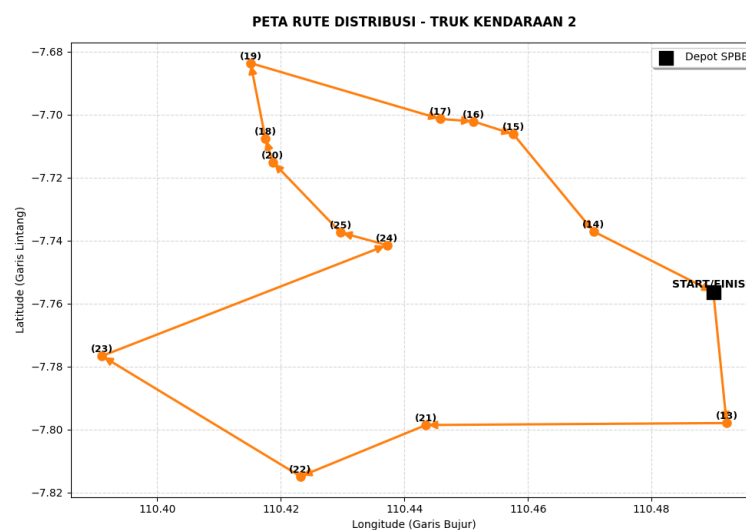
Pada operasional kendaraan 2, algoritma berhasil memformulasikan rute distribusi optimal dengan total muatan yang tetap berada di bawah batas kapasitas 550 tabung. Urutan kunjungan ke setiap pangkalan dirancang untuk meminimalkan total jarak tempuh, sekalipun terdapat variasi jarak geografis antartitik. Efisiensi jarak ini berdampak langsung pada reduksi emisi karbon, yang dihitung secara dinamis mengikuti fluktuasi berat muatan di sepanjang perjalanan. Pola rute ini menegaskan kemampuan model dalam menyelaraskan target minimalisasi jarak dan pengurangan dampak lingkungan pada kendaraan 2.

Tabel 5. 2 Detail Rute Kendaraan 2

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0 - 13	4,636	50	4250	2,472	0,922
13 - 21	5,361	50	4100	2,844	1,061
21 - 22	2,882	50	3950	1,521	0,568
22 - 23	5,533	40	3830	2,908	1,085
23 - 24	6,415	25	3755	3,363	1,255
24 - 25	0,94	50	3605	0,490	0,183

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
25 - 20	2,764	30	3515	1,437	0,536
20 - 18	0,843	40	3395	0,436	0,163
18 - 19	2,674	25	3320	1,380	0,515
19 - 17	3,916	50	3170	2,011	0,750
17 - 16	0,595	50	3020	0,304	0,113
16 - 15	0,847	50	2870	0,430	0,161
15 - 14	3,716	40	2750	1,880	0,701
14 - 0	3,023		2750	1,529	0,571
Total	44,145	550		23,006	8,584

Hasil optimasi pada rute kendaraan 2 menunjukkan bahwa total jarak tempuh mengalami penurunan sebesar 24,89%, yaitu dari 58,772 km menjadi 44,145 km. Efisiensi jarak operasional ini memberikan dampak positif secara langsung terhadap lingkungan. Melalui pendekatan perhitungan emisi dinamis yang mempertimbangkan fluktuasi beban muatan pada setiap ruas jalan, tingkat emisi karbon berhasil ditekan hingga 24,37%, yaitu dari 30,419 kg CO₂ menjadi 23,006 kg CO₂. Hasil ini membuktikan bahwa kerangka model usulan dapat mengakomodasi dua tujuan secara bersamaan, yaitu menekan jarak tempuh sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan. rute usulan untuk kendaraan 2 divisualisasikan pada Gambar 5.2



Gambar 5. 2 Rute usulan kendaraan 2

C. Kendaraan 3

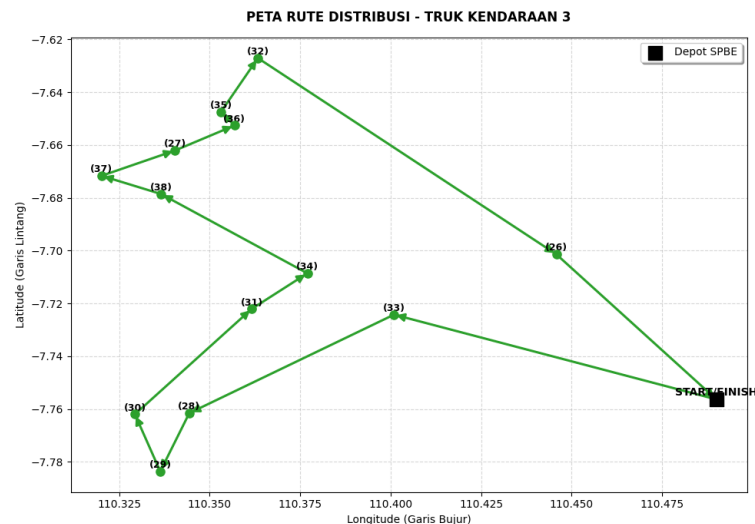
Pada operasional kendaraan 3, algoritma berhasil memformulasikan rute distribusi optimal dengan total muatan yang tetap berada di bawah batas kapasitas 550 tabung. Urutan kunjungan ke setiap pangkalan dirancang untuk meminimalkan total jarak tempuh, sekalipun terdapat variasi jarak geografis antara *node* 1 dan yang lainnya. Efisiensi jarak ini berdampak langsung pada reduksi emisi karbon, yang dihitung secara dinamis mengikuti fluktuasi berat muatan di sepanjang perjalanan. Pola rute ini menegaskan kemampuan model dalam menyelaraskan target minimalisasi jarak dan pengurangan dampak lingkungan pada kendaraan 3.

Tabel 5. 3 Detail Rute Kendaraan 3

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0 - 33	10,44	30	4310	5,579	2,082
33 - 28	7,487	35	4205	3,986	1,487
28 - 29	2,608	25	4130	1,385	0,517
29 - 30	2,526	25	4055	1,338	0,499
30 - 31	5,686	50	3905	2,996	1,118
31 - 34	2,263	50	3755	1,186	0,443
34 - 38	5,569	30	3665	2,910	1,086
38 - 37	1,964	75	3440	1,018	0,380
37 - 27	2,477	30	3350	1,280	0,478
27 - 36	2,093	50	3200	1,076	0,401
36 - 35	0,705	75	2975	0,360	0,134
35 - 32	2,528	25	2900	1,286	0,480
32 - 26	12,282	50	2750	6,213	2,318
26 - 0	7,812	0	2750	3,952	1,475
Total	66,44	550		34,565	12,897

Pada rute operasional kendaraan 3, formulasi optimasi terbukti mampu menyusutkan total jarak tempuh sebesar 34,16% yaitu dari 100,915 km menjadi 66,44 km. Pengurangan jarak ini memberikan kontribusi langsung terhadap perbaikan

parameter lingkungan. Berdasarkan pemodelan emisi dinamis yang mengintegrasikan fluktuasi berat muatan di setiap ruas jalan, volume gas buang karbon berhasil ditekan hingga 34,20%, yakni dari 52,532 kg menjadi 34,565 kg. Metode optimasi ini bisa menyelaraskan dua tujuan yaitu meminimalkan jarak operasional armada sekaligus dan mengurangi emisi karbon. rute usulan untuk kendaraan 3 divisualisasikan pada Gambar 5.3



Gambar 5. 3 Rute usulan kendaraan 3

D. Kendaraan 4

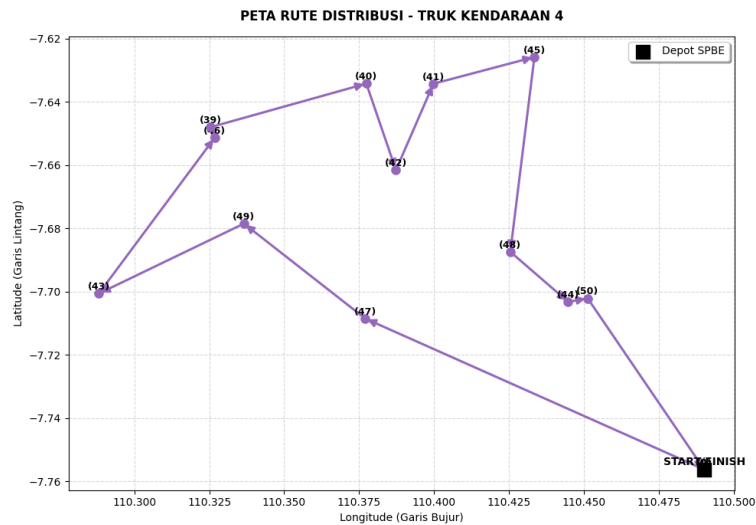
Pada operasional kendaraan 4, algoritma juga berhasil membuat rute pengiriman yang optimal dengan muatan yang tidak melebihi batas kapasitas 550 tabung. Urutan kunjungan ke setiap pangkalan diatur sedemikian rupa untuk meminimalkan jarak tempuh keseluruhan, meskipun jarak antar-titik pelanggan cukup bervariasi. Pengurangan jarak ini otomatis menurunkan emisi karbon, yang dihitung secara dinamis menyesuaikan berat muatan yang berubah-ubah di sepanjang jalan. Hasil rute ini membuktikan bahwa model yang dibuat mampu meminimalkan jarak sekaligus menjaga kelestarian lingkungan pada kendaraan 4. Rincian perjalanan kendaraan 4 akan dijabarkan pada Tabel 5.4

Tabel 5. 4 Detail Kendaraan 4

Tujuan	Jarak (Km)	Demand (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
0 – 47	13,535	30	4310	7,233	2,699
47 - 49	5,568	40	4190	2,963	1,106
49 - 43	5,869	40	4070	3,110	1,161

Tujuan	Jarak (Km)	<i>Demand</i> (tabung)	Sisa muatan (Kg)	Emisi karbon (Kg/CO ₂)	BBM (Liter)
43- 46	6,94	60	3890	3,655	1,364
46 – 39	0,396	50	3740	0,207	0,077
39 – 40	5,92	50	3590	3,085	1,151
40 - 42	3,231	30	3500	1,679	0,626
42 - 41	3,334	65	3305	1,720	0,642
41 - 45	3,827	65	3110	1,961	0,732
45 – 48	6,908	40	2990	3,525	1,315
48 - 44	2,76	50	2840	1,401	0,523
44 - 50	0,726	30	2750	0,367	0,137
50 - 0	7,388	0	2750	3,737	1,394
Total	66,402	550		34,644	12,927

Hasil optimasi rute untuk kendaraan 4 menunjukkan penurunan jarak tempuh yang paling signifikan, yaitu sebesar 47,11% atau dari 127,634 km menjadi 67,511 km. Efisiensi jarak ini secara langsung memberikan dampak baik bagi lingkungan. Melalui perhitungan emisi dinamis yang memperhatikan perubahan berat muatan di setiap jalan, jumlah emisi karbon berhasil dikurangi sebanyak 47,05%, yaitu dari 66,154 kg menjadi 35,03 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa model yang diusulkan sukses mencapai dua tujuan utama secara bersamaan, yaitu mengurangi jarak tempuh armada sekaligus mengurangi polusi lingkungan. rute usulan untuk kendaraan 4 divisualisasikan pada Gambar 5.4



Gambar 5. 4 Rute Usulan Kendaraan 4

5.4 Analisis Penurunan Jarak Distribusi

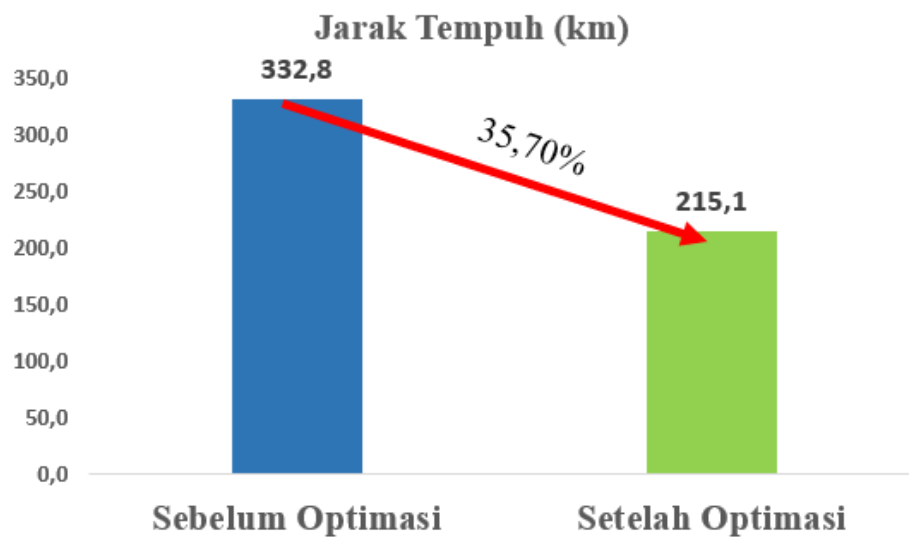
Analisis dilakukan untuk membandingkan akumulasi jarak tempuh antara rute distribusi awal sebelum optimasi rute dengan rute distribusi hasil optimasi menggunakan algoritma NSGA-II. Ringkasan penurunan parameter tersebut disajikan pada tabel berikut:

Tabel 5. 5 Ringkasan Penurunan Jarak

Rute kendaraan	Total jarak awalan (km)	Total jarak setelah optimasi (km)
1	45,52	37,029
2	58,772	44,145
3	100,915	66,44
4	127,634	66,402
Total	332,841	214,016

Berdasarkan data akumulatif pada Tabel 5.5, total jarak tempuh awal seluruh armada sebelum dilakukan optimasi adalah sebesar 332,841 km. Setelah menerapkan model optimasi menggunakan algoritma NSGA-II, total jarak tempuh keseluruhan berhasil dipersingkat menjadi 215,125 km. Hal ini menunjukkan terjadinya reduksi total jarak perjalanan sebesar 118,825 km, yang secara persentase setara dengan tingkat efisiensi sebesar 35,70% dari kondisi awal.

Pengurangan jarak tempuh distribusi dicapai melalui penataan ulang urutan kunjungan pangkalan yang jauh lebih optimal dan searah. Dengan pendekatan ini, sistem secara otomatis mampu mengeliminasi rute tumpang tindih (*overlapping*). Selain mempersingkat rute, pembagian beban muatan di dalam seluruh armada juga terdistribusi secara lebih seimbang dengan tetap mematuhi batasan kapasitas maksimal truk sebesar 550 tabung. Dampak positif dari efisiensi rute secara menyeluruh ini memberikan manfaat operasional yang sangat nyata bagi perusahaan, seperti penghematan konsumsi bahan bakar dan emisi karbon. Visualisasi penurunan jarak sebelum dan setelah optimasi akan dijabarkan pada Gambar 5.5



Gambar 5. 5 Grafik Persentase Penurunan Jarak Tempuh

Efisiensi jarak tempuh sebesar 35,70 persen yang berhasil dicapai melalui pembentukan rute baru ini secara langsung memberikan dampak positif terhadap durasi waktu operasional distribusi harian. Terpangkasnya rute perjalanan membuat total waktu tempuh armada di jalan menjadi jauh lebih singkat. Meskipun perubahan urutan kunjungan pangkalan menyebabkan terjadinya pergeseran jam kedatangan armada, perubahan waktu ini tidak memberikan dampak negatif terhadap tingkat kepuasan konsumen yakni pemilik pangkalan. Hal ini dikarenakan seluruh pangkalan langganan pada agen ini tidak menerapkan batasan jendela waktu penerimaan barang secara khusus. Selama pasokan dikirim pada hari operasional yang sama, pergeseran maupun percepatan waktu kedatangan truk distribusi sama sekali tidak mengganggu aktivitas pangkalan. Justru dengan waktu tempuh yang lebih cepat, ketersediaan stok LPG 3 kg di pangkalan

dapat dipenuhi lebih awal, sementara pihak perusahaan memperoleh fleksibilitas waktu operasional yang lebih banyak.

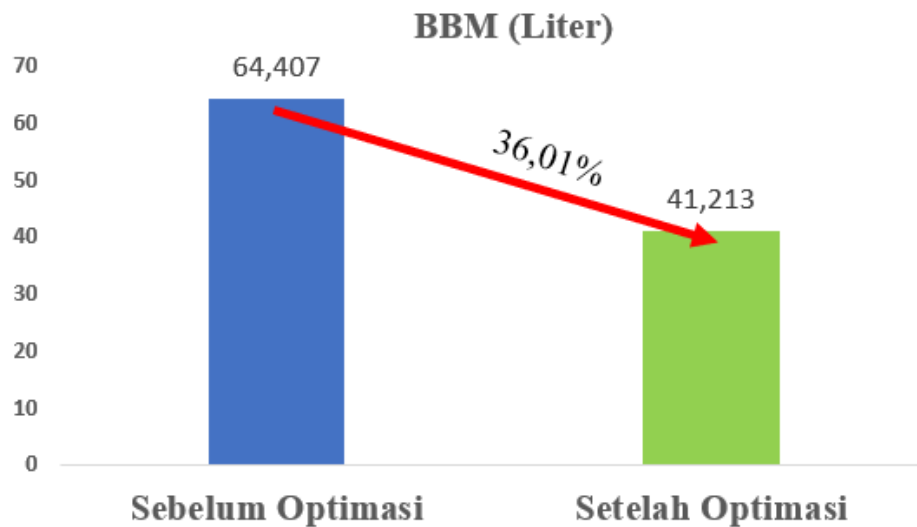
5.5 Analisis Biaya Bahan Bakar

Penurunan jarak tempuh dan pengaturan muatan yang lebih baik secara langsung berdampak pada penghematan biaya operasional armada. Analisis dilakukan untuk membandingkan akumulasi bahan bakar yang digunakan pada rute distribusi awal sebelum optimasi dengan akumulasi bahan bakar hasil optimasi menggunakan algoritma NSGA-II. Ringkasan penurunan parameter tersebut disajikan pada tabel berikut

Tabel 5. 6 Ringkasan Penurunan Penggunaan Bahan Bakar

Rute kendaraan	Total BBM sebelum optimasi (Liter)	Total BBM setelah optimasi (Liter)
1	8,77	6,805
2	11,35	8,584
3	19,602	12,897
4	24,684	12,927
Total	64,407	41,213

Berdasarkan data keseluruhan, total konsumsi bahan bakar awal sebesar 64,407 liter berkurang menjadi 41,213 liter setelah proses optimasi, yang secara persentase setara dengan penurunan sebesar 36,01%. Jika dikonversikan ke dalam satuan mata uang menggunakan parameter harga Biosolar sebesar Rp 6.800,- per liter yang dihitung berdasarkan Persamaan (18), total biaya bahan bakar awal sebesar Rp 437.968,- turun menjadi Rp 281.228,-. Perbandingan akumulasi biaya bahan bakar sebelum dan setelah proses optimasi tersebut disajikan secara visual pada Gambar 5.6. Efisiensi biaya ini diperoleh karena rute usulan berhasil meminimalkan volume solar yang digunakan selama perjalanan distribusi berlangsung. Visualisasi penurunan bahan bakar akan dijabarkan pada gambar 5.6



Gambar 5. 6 Grafik Persentase Penurunan Penggunaan Bahan Bakar

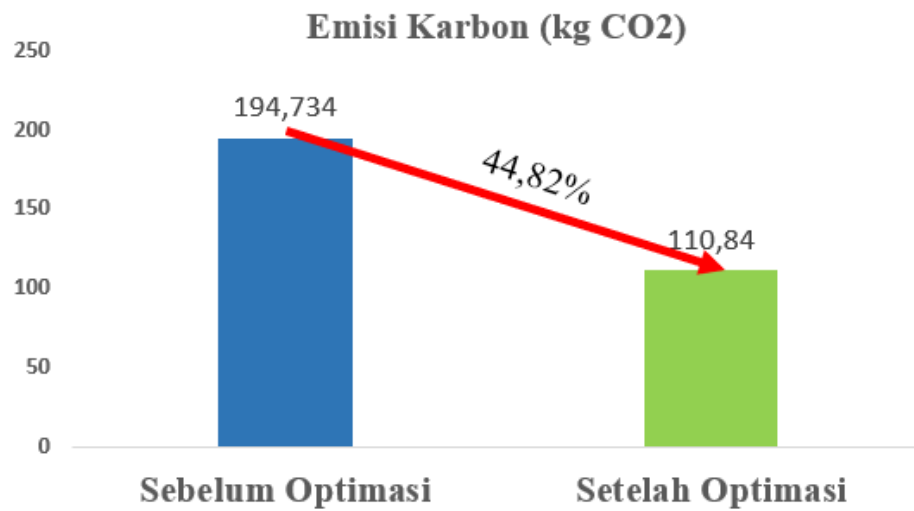
5.6 Analisis Penurunan Emisi Karbon

Analisis dilakukan untuk membandingkan akumulasi emisi karbon antara rute distribusi awal sebelum optimasi dengan akumulasi emisi karbon hasil optimasi menggunakan algoritma NSGA-II. Ringkasan penurunan parameter tersebut disajikan pada tabel berikut

Tabel 5. 7 Ringkasan Penurunan Emisi Karbon

Rute kendaraan	Emisi karbon awalan (kg CO_2)	Emisi karbon setelah optimasi (kg CO_2)
1	23,505	18,236
2	30,419	23,066
3	52,532	34,565
4	66,402	34,644
Total	194,734	110,451

Selain itu, penurunan akumulasi emisi karbon menunjukkan bahwa proses optimasi yang dilakukan dapat menekan pencemaran lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi operasional armada. Berdasarkan data keseluruhan, total emisi karbon awal sebesar 194,734 kg CO_2 berkurang menjadi 110,451 kg CO_2 setelah proses optimasi, yang secara persentase setara dengan penurunan emisi sebesar 44,82%. Perbandingan akumulasi emisi karbon sebelum dan setelah proses optimasi tersebut disajikan secara visual pada Gambar 5.7



Gambar 5. 7 Grafik Persentase Penurunan Emisi Karbon

Penurunan emisi gas buang ini merupakan dampak langsung dari berkurangnya jarak tempuh armada serta penurunan berat muatan truk secara bertahap setelah menurunkan tabung gas di pangkalan. Hasil ini membuktikan bahwa rute usulan berhasil menciptakan sistem distribusi LPG yang lebih ramah lingkungan.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data, analisis, dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian optimasi rute distribusi LPG 3 kg di PT. XYZ, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penerapan algoritma NSGA-II terbukti efektif dalam menyelesaikan permasalahan *Green Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery* (GVRP-SPD) dengan menghasilkan himpunan solusi nondominan. Berdasarkan analisis hasil, dinamika perubahan bobot muatan akibat aktivitas penyerahan tabung isi dan pengambilan tabung kosong di pangkalan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap fluktuasi emisi karbon. Efek pengurangan beban kendaraan di perjalanan tidak mampu mengimbangi lonjakan emisi gas buang yang disebabkan oleh penambahan jarak tempuh jalan. Hal ini membuktikan bahwa variabel jarak tempuh jauh lebih dominan dalam menentukan besaran emisi karbon, sehingga efisiensi jarak tempuh dan efisiensi emisi karbon berjalan searah. Oleh karena itu, pemilihan titik solusi di sudut kiri bawah menjadi keputusan paling tepat dan objektif yang meminimalkan jarak sekaligus emisi tanpa menimbulkan pertentangan antar fungsi tujuan.
2. Penentuan rute distribusi LPG 3 kg yang optimal di PT. XYZ berhasil dicapai melalui penerapan rute rekomendasi yang terletak pada posisi sudut paling kiri bawah dari kurva *Pareto Front* untuk setiap armada. Pemilihan posisi titik ini terbukti mampu meminimalkan total jarak tempuh sekaligus menekan estimasi emisi karbon secara bersamaan, tanpa melanggar seluruh batasan operasional yang telah ditetapkan dalam sistem distribusi. Batasan-batasan tersebut meliputi kapasitas maksimal muatan kendaraan, pemenuhan alokasi permintaan di tiap pangkalan, hingga proses pengantaran tabung isi dan pengambilan tabung kosong yang berlangsung secara bersamaan. Melalui penerapan rute usulan ini, perusahaan mendapatkan kepastian urutan kunjungan pangkalan yang jauh lebih terstruktur dan efisien, sehingga mampu menghindarkan armada dari rute yang memutar serta mengoptimalkan penggunaan seluruh kendaraan operasional secara menyeluruh.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang telah diperoleh, berikut adalah beberapa saran yang dapat diberikan baik bagi pihak perusahaan maupun bagi pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Untuk Perusahaan

Pihak manajemen PT. XYZ disarankan untuk mengadopsi dan mengimplementasikan urutan rute usulan hasil optimasi pada keempat armada distribusi. Penataan rute ini terbukti efektif memotong jarak tempuh sekaligus menekan tingkat emisi karbon tanpa perlu mengubah sistem operasional maupun alokasi pangkalan yang sudah ada. Mengingat variabel jarak geografis terbukti jauh lebih dominan memengaruhi besaran emisi dibandingkan faktor perubahan beban muatan, perusahaan hendaknya selalu memprioritaskan pemilihan lintasan terpendek dan menghindari perjalanan memutar dalam operasional pengiriman harian. Dengan memfokuskan strategi distribusi pada efisiensi jarak fisik jalan, efisiensi konsumsi bahan bakar, dan penekanan emisi gas buang secara otomatis dapat tercapai secara maksimal.

2. Untuk Penelitian Selanjutnya

Kekurangan utama dalam penelitian ini terletak pada kurangnya transparansi data dari pihak perusahaan yang membuat titik lokasi pangkalan masih berupa perkiraan. Oleh karena itu, peneliti selanjutnya disarankan untuk memperoleh data lokasi pangkalan yang lebih akurat dan transparan, serta mengadopsi peta digital resmi wilayah Sleman agar perhitungan jarak tempuh dan penentuan rute menjadi jauh lebih presisi. Dengan menggunakan data lokasi yang pasti dan peta wilayah yang sesuai, hasil pemetaan rute, estimasi penggunaan bahan bakar, serta perhitungan emisi karbon yang dihasilkan dapat mencerminkan kondisi riil di lapangan secara lebih nyata.

DAFTAR PUSTAKA

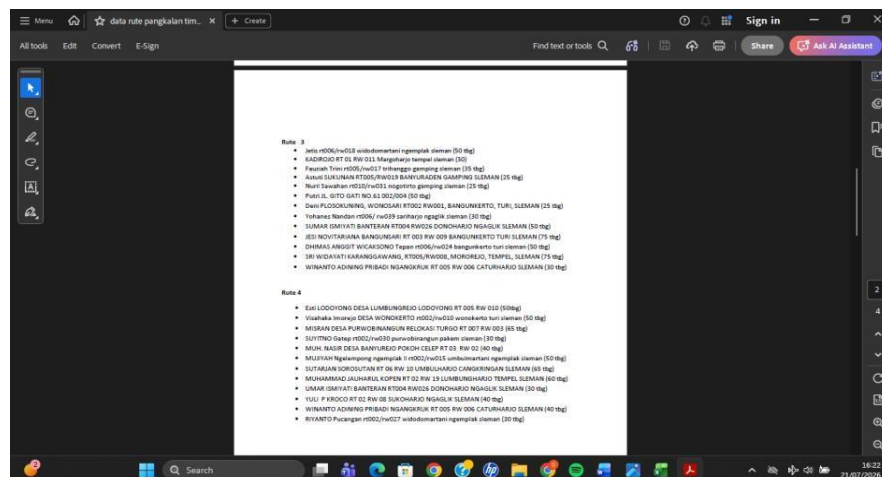
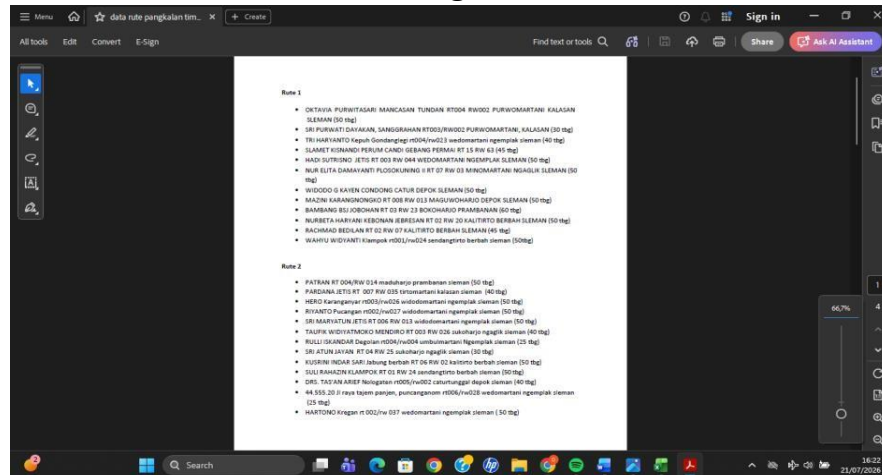
- Arif, M., & Sismar, A. (2024). Peran Saluran Distribusi Dalam Meningkatkan Volume Penjualan Pada Toko Sinar Aneka Sorong Papua Barat Daya. *Jurnal Ilmiah Bisnis & Kewirusahaan*, 13. <https://e-jurnal.nobel.ac.id/index.php/jbk>
- Cerda-Flores, S. C., Rojas-Punzo, A. A., & Nápoles-Rivera, F. (2022). Applications of Multi-Objective Optimization to Industrial Processes: A Literature Review. In *Processes* (Vol. 10, Number 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr10010133>
- Cheng, F., Jia, S., & Gao, W. (2024). Low-Carbon Logistics Distribution Vehicle Routing Optimization Based on INNC-GA. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/app14073061>
- Chopra, Sunil., & Meindl, Peter. (2013). *Supply chain management : strategy, planning, and operation*. Pearson.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. In *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION* (Vol. 6, Number 2).
- Dutta, J., Barma, P. S., Mukherjee, A., Kar, S., De, T., Pamučar, D., Šukevičius, Š., & Garbinčius, G. (2021). Multi-Objective Green Mixed Vehicle Routing Problem Under Rough Environment. *Transport*, 37(1), 51–63. <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14464>
- Gülmez, B., Emmerich, M., & Fan, Y. (2024). Multi-objective Optimization for Green Delivery Routing Problems with Flexible Time Windows. *Applied Artificial Intelligence*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2325302>
- Hajar, G., & Fauzi, M. D. (2022). Vehicle Routing Problem Simultaneous Delivery And Pickup With Split Load For Routing Delivery Optimization. *JIEOM*, 05(01). <https://ojs.uniska-bjm.ac.id/index.php/jieom/index>
- Hidayat, D. W., & Mulyono, N. B. (2025). Optimizing Fuel Distribution Costs through Vehicle Routing Problem Modeling in Jakarta-Tanjung Gerem Terminals. *Jurnal Ilmiah Manajemen Kesatuan*, 13(5), 3873–3884. <https://doi.org/10.37641/jimkes.v13i5.3547>
- Indrianti, N., Leuveano, R. A. C., Abdul-Rashid, S. H., & Ridho, M. I. (2025). Green Vehicle Routing Problem Optimization for LPG Distribution: Genetic Algorithms for Complex Constraints and Emission Reduction. *Sustainability (Switzerland)*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/su17031144>
- Kayij Nawej, E., Tinda Mangongo, Y., Katalay Kafunda, P., & Kampempe, J.-D. B. (2026). Enhanced Multi-Objective Green Vehicle Routing with a New Fuzzy Speed-Driven Fuel Consumption Model. In *Journal of Applied Informatics and Computing (JAIC)* (Vol. 10, Number 1). <http://jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JAIC>
- Li, L., & Shen, J. (2025). Research on Green Vehicle Routing Based on Hybrid Genetic Algorithm. *Proceedings of the 2025 6th International Conference on Management Science and Engineering Management (ICMSEM 2025)*, 138–149. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-845-5_16

- Li, X., Gao, C., Wang, J., Tang, H., Ma, T., & Yuan, F. (2025). Research on Multi-Objective Green Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on the Improved Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III. *Symmetry*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/sym17050734>
- Mawengkang, H., Syahputra, M. R., Sutarman, S., & Weber, G. W. (2025). Optimization model of vehicle routing problem with heterogenous time windows. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 15(4), 4043. <https://doi.org/10.11591/ijece.v15i4.pp4043-4057>
- Miles, D. A. (2017). *A Taxonomy of Research Gaps: Identifying and Defining the Seven Research Gaps*.
- Mutia Kanzha Putri Santoso, Halimah Anis Kurlillah, Purwanti Purwanti, Adelia Tata Anggita, Naufal Syauqi Bimadhieka Nk, & Nenzy Agustin Dwi Prahesti. (2024). Penentuan Rute Distribusi LPG menggunakan Teknik Simulated Annealing pada PT XYZ. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik*, 3(4), 68–76. <https://doi.org/10.55606/juprit.v3i4.4341>
- Oktaviani, P., Permata Dalnis, I., & Wirdianto, E. (2025). Usulan Rute Pendistribusian Gas LPG Menggunakan Algoritma Dijkstra dan Algoritma Genetika Pada Model CGVRP. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 14(1), 131–145. <https://doi.org/10.26593/jrsi.v14i1.8491.131-145>
- Prima, A., Rupaka, G., Widiangga Gautama, N., Navianti, D. R., & Asry, A. I. (2025). Carbon Emission Reduction Strategies In Logistics Transportation: A Case Study Of Truck Fleet Route Optimization Using The Vehicle Routing Problem In Denpasar City. *Jurnal Teknologi Transportasi Dan Logistik*, 6(2).
- Salsabilla, K., Bakhtiar, T., & Hanum, F. (2024). Optimalitas Rute pada Pengiriman Multiperjalanan dengan Armada Kendaraan Listrik Heterogen. *Jambura Journal of Mathematics*, 6(1), 85–91. <https://doi.org/10.37905/jjom.v6i1.23993>
- Verma, S., Pant, M., & Snasel, V. (2021). A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems. *IEEE Access*, 9, 57757–57791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070634>
- Wang, Y., Duan, J., Sun, J., Zhang, Q., & Ye, T. (2025). A Green Vehicle Routing Problem with Time-Varying Speeds and Joint Distribution. *Sustainability (Switzerland)*, 17(16). <https://doi.org/10.3390/su17167515>
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., & Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 39(7), 1419–1431. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.013>
- Zhao, W., Bian, X., & Mei, X. (2024). An Adaptive Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Heterogeneous Green City Vehicle Routing Problem. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/app14156594>
- Zhou, L. J., Zhang, H. F., & Fu, J. H. (2025). Green vehicle routing optimization based on dynamic constraint selection co-evolutionary algorithm. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01480-7>

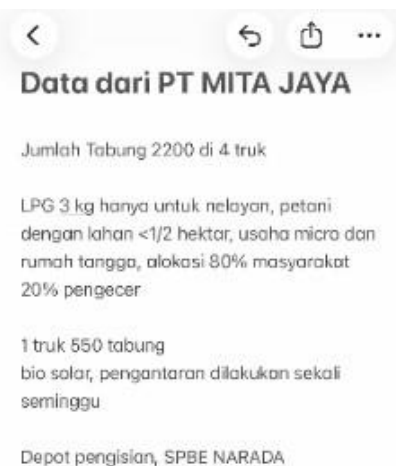
LAMPIRAN

A – Data Dari Perusahaan

A – 1 Data Pangkalan dan *Demand*



A – 2 Kapasitas Kendaraan



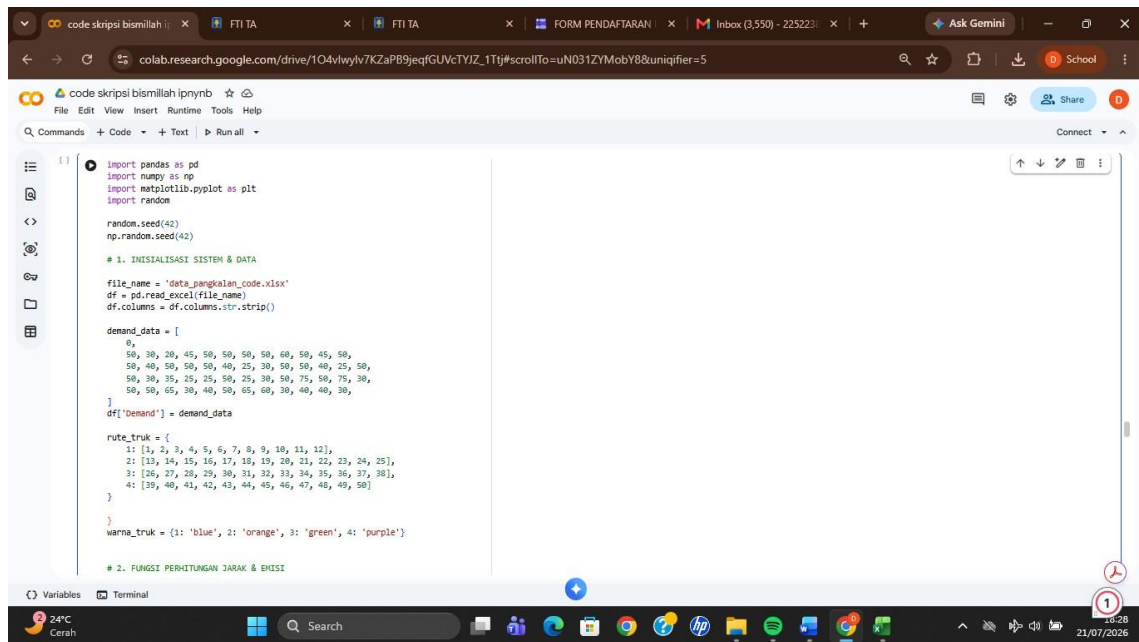
B - Matriks Jarak Antar-Pangkalan

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Distance Matrix	0	3,708	3,804	5,945	8,499	7,766	10,008	11,531	7,140	2,507	4,270	5,143	9,914	4,636	3,023	6,612	7,388	7,812	9,650
2	0	0,000	3,708	3,804	5,945	8,499	7,766	10,008	11,531	7,140	2,507	4,270	5,143	9,914	4,636	3,023	6,612	7,388	7,812	9,650
3	1	3,708	0,000	1,895	2,881	4,844	4,137	6,470	7,843	3,512	3,430	3,327	2,974	7,681	6,147	2,584	5,486	5,964	6,135	6,844
4	2	3,804	1,895	0,000	2,216	5,167	4,410	6,418	8,210	4,728	4,656	5,086	4,869	9,526	7,443	1,158	3,650	4,212	4,471	5,861
5	3	5,945	2,881	2,216	0,000	3,156	2,434	4,218	6,116	3,641	6,284	6,084	5,338	9,271	9,025	3,318	3,702	3,823	3,772	3,961
6	4	8,499	4,844	5,167	3,156	0,000	0,758	1,842	3,058	2,517	8,036	7,062	5,809	8,051	10,465	6,324	6,469	6,287	5,988	4,161
7	5	7,766	4,137	4,410	2,434	0,758	0,000	2,383	3,813	2,284	7,396	6,537	5,355	8,052	9,892	5,567	5,876	5,764	5,516	4,081
8	6	10,008	6,470	6,418	4,218	1,842	2,383	0,000	2,255	4,338	9,775	8,889	7,650	9,617	12,269	7,536	6,768	6,361	5,923	3,251
9	7	11,531	7,843	8,210	6,116	3,058	3,813	2,255	0,000	4,869	10,869	9,637	8,257	8,988	13,100	9,363	8,991	8,610	8,177	5,411
10	8	7,140	3,512	4,728	3,641	2,517	2,284	4,338	4,869	0,000	6,071	4,769	3,412	5,835	8,232	5,791	7,339	7,441	7,322	6,351
11	9	2,507	3,430	4,656	6,284	8,036	7,396	9,775	10,869	6,071	0,000	1,956	3,186	7,601	2,790	4,464	8,149	8,810	9,114	10,241
12	10	4,270	3,327	5,086	6,084	7,062	6,537	8,889	9,637	4,769	1,956	0,000	1,435	5,670	3,465	5,332	8,736	9,267	9,458	9,961
13	11	5,143	2,974	4,869	5,338	5,809	5,355	7,650	8,257	3,412	3,186	1,435	0,000	4,904	4,874	5,415	8,431	8,852	8,958	9,031
14	12	9,914	7,681	9,526	9,271	8,051	8,052	9,617	8,988	5,835	7,601	5,670	4,904	0,000	7,821	10,238	12,828	13,077	13,039	12,113
15	13	4,636	6,147	7,443	9,025	10,465	9,892	12,269	13,100	8,232	2,790	3,465	4,874	7,821	0,000	7,172	10,885	11,570	11,891	12,981
16	14	3,023	2,584	1,158	3,318	6,324	5,567	7,536	9,363	5,791	4,464	5,332	5,415	10,238	7,172	0,000	3,716	4,436	4,820	6,701
17	15	6,612	5,486	3,650	3,702	6,469	5,876	6,768	8,991	7,339	8,149	8,736	8,431	12,828	10,885	3,716	0,000	0,847	1,412	4,442
18	16	7,388	5,964	4,212	3,823	6,287	5,764	6,361	8,610	7,441	8,810	9,267	8,852	13,077	11,570	4,436	0,847	0,000	0,595	3,751
19	17	7,812	6,135	4,471	3,772	5,988	5,516	5,923	8,177	7,322	9,114	9,458	8,958	13,039	11,891	4,820	1,412	0,595	0,000	3,191
20	18	9,650	6,844	5,862	3,961	4,165	4,089	3,256	5,411	6,354	10,241	9,962	9,039	12,139	12,986	6,708	4,427	3,757	3,195	0,000
21	19	11,550	9,197	7,910	6,352	6,807	6,763	5,634	7,528	9,026	12,502	12,436	11,607	14,811	15,285	8,527	5,319	4,474	3,916	2,671
22	20	9,097	6,122	5,293	3,266	3,356	3,249	2,664	4,898	5,510	9,543	9,184	8,228	11,301	12,265	6,221	4,403	3,853	3,353	0,841

C. - Perhitungan Parameter Rute

</

D – Pseudocode NSGA-II



```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import random

random.seed(42)
np.random.seed(42)

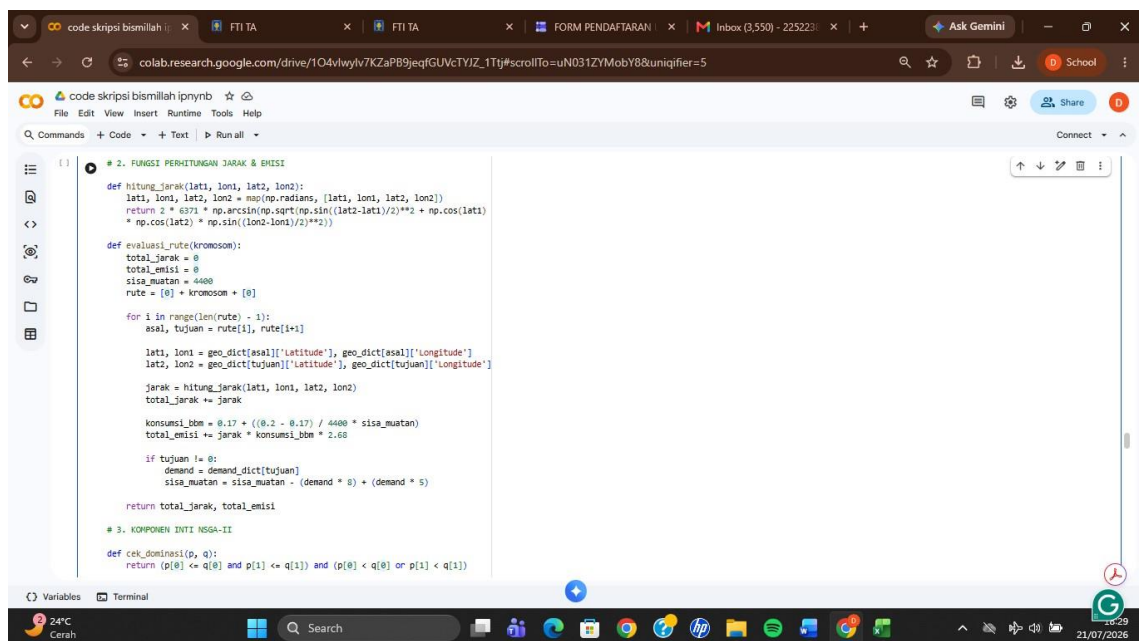
# 1. INISIALISASI SISTEM & DATA
file_name = 'data_pangkalan_code.xlsx'
df = pd.read_excel(file_name)
df.columns = df.columns.str.strip()

demand_data = [
    0,
    50, 30, 20, 45, 50, 50, 50, 50, 50, 50, 45, 50,
    50, 40, 50, 50, 50, 40, 25, 30, 50, 40, 25, 50,
    50, 30, 35, 25, 25, 50, 25, 30, 50, 75, 50, 75, 30,
    50, 50, 65, 30, 40, 50, 65, 60, 30, 40, 40, 30,
]
df['Demand'] = demand_data

route_truk = {
    1: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12],
    2: [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25],
    3: [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38],
    4: [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50]
}

warna_truk = {1: 'blue', 2: 'orange', 3: 'green', 4: 'purple'}

# 2. FUNGSI PERHITUNGAN JARAK & EMISI
```



```
# 2. FUNGSI PERHITUNGAN JARAK & EMISI

def hitung_jarak(lati1, lon1, lati2, lon2):
    lati1, lon1, lati2, lon2 = map(np.radians, [lati1, lon1, lati2, lon2])
    return 2 * 6371 * np.arcsin(np.sqrt(np.sin((lati2-lati1)/2)**2 + np.cos(lati1) * np.cos(lati2) * np.sin((lon2-lon1)/2)**2))

def evaluasi_rute(kromosom):
    total_jarak = 0
    total_emisi = 0
    sisa_muatan = 4400
    rute = [0] + kromosom + [0]

    for i in range(len(rute) - 1):
        asal, tujuan = rute[i], rute[i+1]

        lati1, lon1 = geo_dict[asal]['Latitude'], geo_dict[asal]['Longitude']
        lati2, lon2 = geo_dict[tujuan]['Latitude'], geo_dict[tujuan]['Longitude']

        jarak = hitung_jarak(lati1, lon1, lati2, lon2)
        total_jarak += jarak

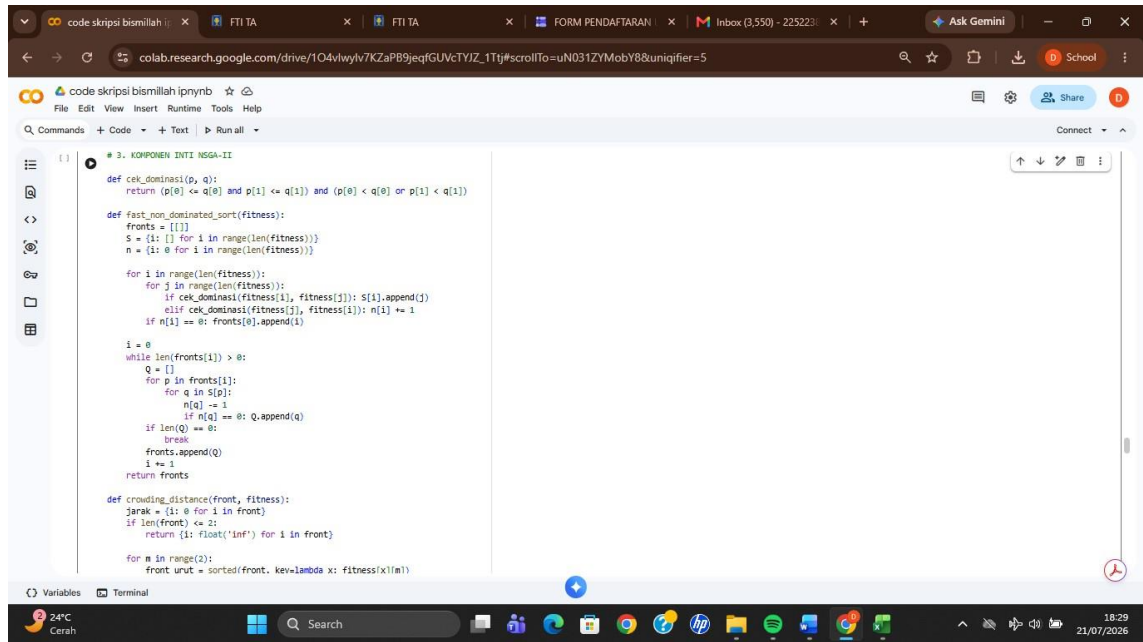
        konsumsi_bbm = 0.17 * ((0.2 - 0.17) / 4400 * sisa_muatan)
        total_emisi += jarak * konsumsi_bbm * 2.60

        if tujuan != 0:
            demand = demand_dict[tujuan]
            sisa_muatan = sisa_muatan - (demand * 0) + (demand * 5)

    return total_jarak, total_emisi

# 3. KOMPONEN INTI NSGA-II

def cek_dominasi(p, q):
    return (p[0] <= q[0] and p[1] <= q[1]) and (p[0] < q[0] or p[1] < q[1])
```



```
# 3. KOMPONEN INTI NSGA-II

def cek_dominasi(p, q):
    return (p[0] <= q[0] and p[1] <= q[1]) and (p[0] < q[0] or p[1] < q[1])

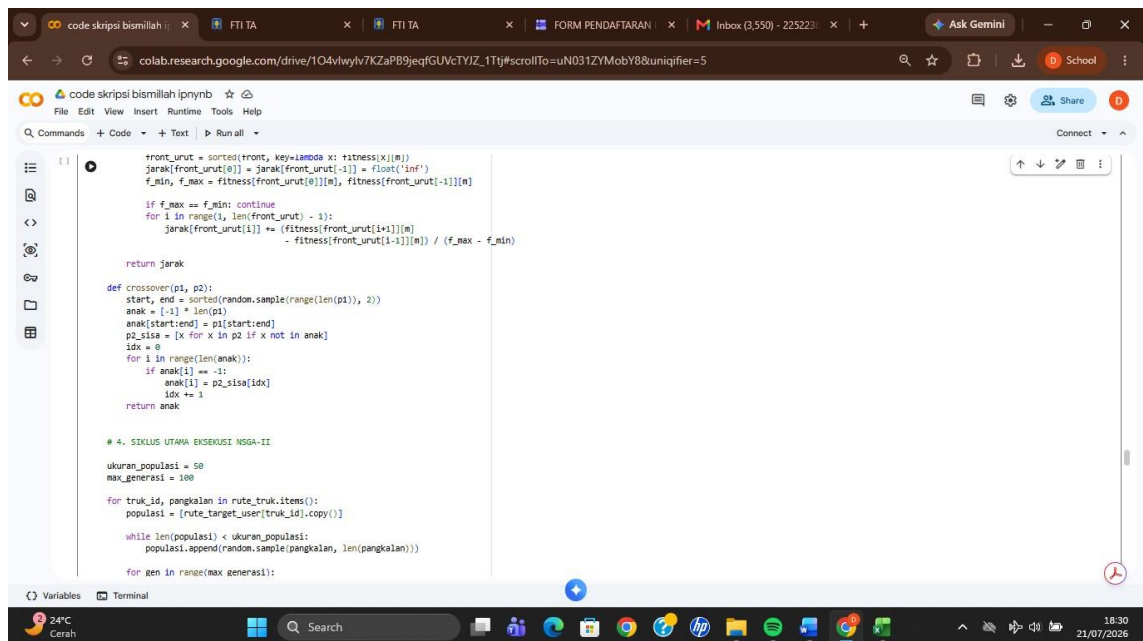
def fast_non_dominated_sort(fitness):
    fronts = [[]]
    S = [i: [] for i in range(len(fitness))]
    n = [i: 0 for i in range(len(fitness))]

    for i in range(len(fitness)):
        for j in range(len(fitness)):
            if cek_dominasi(fitness[i], fitness[j]): S[i].append(j)
            elif cek_dominasi(fitness[j], fitness[i]): n[i] += 1
            if n[i] == 0: fronts[0].append(i)

    i = 0
    while len(fronts[i]) > 0:
        Q = []
        for p in fronts[i]:
            for q in S[p]:
                n[q] += 1
                if n[q] == 0: Q.append(q)
            if len(Q) == 0: break
        fronts.append(Q)
        i += 1
    return fronts

def crowding_distance(front, fitness):
    jarak = [i: 0 for i in front]
    if len(front) <= 2:
        return [i: float('inf') for i in front]

    for m in range(2):
        front_urut = sorted(front, key=lambda x: fitness[x][m])
        jarak[front_urut[0]] = jarak[front_urut[-1]] = float('inf')
```



```
front_urut = sorted(front, key=lambda x: fitness[x][m])
jarak[front_urut[0]] = jarak[front_urut[-1]] = float('inf')
f_min, f_max = fitness[front_urut[0]][m], fitness[front_urut[-1]][m]

if f_max == f_min: continue
for i in range(1, len(front_urut) - 1):
    jarak[front_urut[i]] += (fitness[front_urut[i+1]][m] - fitness[front_urut[i-1]][m]) / (f_max - f_min)

return jarak

def crossover(p1, p2):
    start, end = sorted(random.sample(range(len(p1)), 2))
    anak = [-1] * len(p1)
    anak[start:end] = p1[start:end]
    p2_sisa = [x for x in p2 if x not in anak]
    idx = 0
    for i in range(len(anak)):
        if anak[i] == -1:
            anak[i] = p2_sisa[idx]
            idx += 1
    return anak

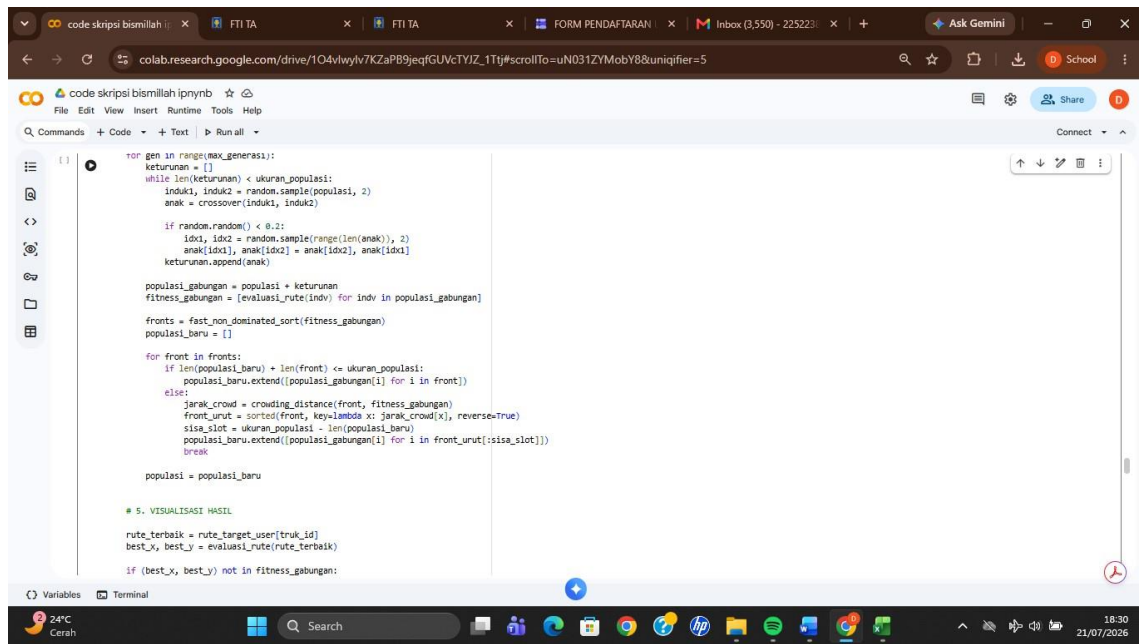
# 4. SIKLUS UTAMA ESEKUSI NSGA-II

ukuran_populasi = 50
max_generasi = 100

for truk_id, pangkalan in rute_truk.items():
    populasi = [rute_target_user[truk_id].copy()]

    while len(populasi) < ukuran_populasi:
        populasi.append(random.sample(pangkalan, len(pangkalan)))

    for gen in range(max_generasi):
```



```
for gen in range(max_generasi):
    keturunan = []
    while len(keturunan) < ukuran_populasi:
        indukt1, indukt2 = random.sample(populasi, 2)
        anak = crossover(indukt1, indukt2)

        if random.random() < 0.2:
            idx1, idx2 = random.sample(range(len(anak)), 2)
            anak[idx1], anak[idx2] = anak[idx2], anak[idx1]
            keturunan.append(anak)

    populasi_gabungan = populasi + keturunan
    fitness_gabungan = [evaluasi_rute(indv) for indv in populasi_gabungan]
    fronts = fast_non_dominated_sort(fitness_gabungan)
    populasi_baru = []

    for front in fronts:
        if len(populasi_baru) + len(front) <= ukuran_populasi:
            populasi_baru.extend([populasi_gabungan[i] for i in front])
        else:
            jarak_crowd = crowding_distance(front, fitness_gabungan)
            front_urut = sorted(front, key=lambda x: jarak_crowd[x], reverse=True)
            sisa_slot = ukuran_populasi - len(populasi_baru)
            populasi_baru.extend([populasi_gabungan[i] for i in front_urut[:sisa_slot]])
            break

    populasi = populasi_baru

# 5. VISUALISASI HASIL

rute_terbaik = rute_target_user(truk_id)
best_x, best_y = evaluasi_rute(rute_terbaik)

if (best_x, best_y) not in fitness_gabungan:
```

```
if (best_x, best_y) not in fitness_gabungan:
    fitness_gabungan.append((best_x, best_y))

unik_fitness = list(set(fitness_gabungan))
jarak_akhir = [f[0] for f in unik_fitness]
emisi_akhir = [f[1] for f in unik_fitness]

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.scatter(jarak_akhir, emisi_akhir, color=warna_truk[truk_id], alpha=0.9, edgecolors='black', s=80)
plt.annotate('Rute Rekomendasi(Kiri Bawah)', xy=(best_x, best_y), xytext=(best_x + 1.5, best_y + 1),
            arrowprops=dict(facecolor='red', shrink=0.05, width=2, headwidth=3))

plt.title(f'Grafik Pareto Optimal (NSGA-II) - Truk (truk_id)', fontsize=12, weight='bold')
plt.xlabel('Total Jarak Tempuh (kilometer)')
plt.ylabel('Total Emisi Karbon (kg CO2e)')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
plt.tight_layout()

plt.show(block=False)
plt.pause(1)

jarakawal, emisiawal = evaluasi_rute(pangkalan)
rute_lengkap_nsga2 = [0] + rute_terbaik + [0]

print('=' * 70)
print(f'HASIL OPTIMASI RUTE - TRUK (truk_id)')
print('=' * 70)
print(f'AWALAN : {[0] + pangkalan + [0]}')
print(f'Jarak: (jarakawal:.2f) km | Emisi: (emisiawal:.2f) kg CO2e\n')
print(f'NSGA-II : (rute_lengkap_nsga2)')
print(f'Jarak: (best_x:.2f) km | Emisi: (best_y:.2f) kg CO2e')
print('=' * 70 + '\n')
```

```
skenario_list = [
    {"iterasi": 1, "pop": 20, "gen": 50},
    {"iterasi": 2, "pop": 20, "gen": 70},
    {"iterasi": 3, "pop": 50, "gen": 100},
    {"iterasi": 4, "pop": 70, "gen": 150}
]

hasil_tabel_skripsi = []
for skenario in skenario_list:
    p_size = skenario["pop"]
    n_gen = skenario["gen"]

    total_jarak_sistem = 0
    total_emisi_sistem = 0

    for t_id, pang in rute_truk.items():
        sim_pop = []

        if p_size >= 5:
            sim_pop.append(rute_target_user[t_id].copy())

        while len(sim_pop) < p_size:
            sim_pop.append(random.sample(pang, len(pang)))

        for g in range(n_gen):
            ketur = []
            while len(ketur) < p_size:
                ind1, ind2 = random.sample(sim_pop, 2)
                ank = crossover(ind1, ind2)
                if random.random() < 0.2:
                    id1, id2 = random.sample(range(len(ank)), 2)
                    ank[id1], ank[id2] = ank[id2], ank[id1]
                ketur.append(ank)

            sim_pop_gab = sim_pop + ketur
            fit_gab = (evaluasi_rute(ind) for ind in sim_pop_gab)
```