

**OPTIMASI DISTRIBUSI PADA KASUS *CAPACITATED VEHICLE
ROUTING PROBLEM WITH PICK-UP AND DELIVERY* (CVRPPD)
UNTUK MEMINIMASI JARAK TEMPUH DAN EMISI KARBON
(STUDI KASUS: PT. XYZ)**

TUGAS AKHIR

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



Nama : Adhira Yudanto

No. Mahasiswa : 21522207

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025**

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, 17 September 2025



Adhira Yudanto
21522207

SURAT BUKTI PENELITIAN



**FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI**

Gedung KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalirejo km 14,5 Yogyakarta 55284
T : (0274) 898444 ext. 4110, 4100
F : (0274) 899007
E : fti@uii.ac.id
W : fti.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 138/Ka.lab SIMANTI/20/Lab.SIMANTI/IX/2025

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Adhira Yudianto

Nim : 21522207

Jurusan : Teknik Industri

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

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut diatas telah melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul ” **OPTIMASI DISTRIBUSI PADA KASUS *CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICK-UP AND DELIVERY* (CVRPPD) UNTUK MEMINIMASI JARAK TEMPUH DAN EMISI KARBON (STUDI KASUS: PT. POS LOGISTIK INDONESIA)**”.

Mulai pelaksanaan penelitian 10 Oktober 2024 sampai 5 Mei 2025

Demikian surat keterangan penelitian ini kami buat. Atas perhatiannya dan kerja samanya kami mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Yogyakarta, 01 September 2025

Kepala Laboratorium

Sistem Manufaktur Terintegrasi

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**OPTIMASI DISTRIBUSI PADA KASUS *CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICK-UP AND DELIVERY* (CVRPPD)
UNTUK MEMINIMASI JARAK TEMPUH DAN EMISI KARBON
(STUDI KASUS: PT XYZ)**

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

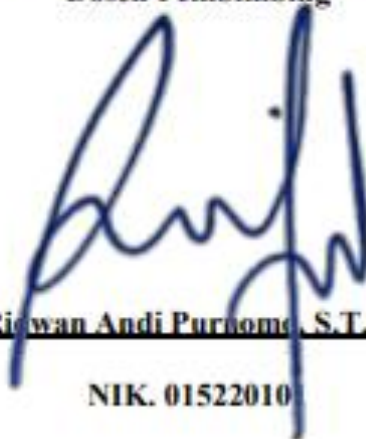
Nama : Adhira Yudanto
No. Mahasiswa : 21522207

Yogyakarta, 17 September 2025

Dosen Pembimbing

Yogyakarta, 17 September 2025

Dosen Pembimbing



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

NIK. 01522010

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

OPTIMASI DISTRIBUSI PADA KASUS *CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICK-UP AND DELIVERY* (CVRPPD) UNTUK MEMINIMASI JARAK TEMPUH DAN EMISI KARBON
TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Adhira Yudanto

No. Mahasiswa : 21522207

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, 19 September 2025

Tim Penguji

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

Ketua

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

Anggota I

Elanjati Worldailmi, S.T., M.Sc.

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

Alhamdulillahirabbil'alam, Kupersembahkan tulisan dan karya ini untuk penciptaku Allah SWT yang selalu kuminta kemudahan, kebaikan dan pertolongannya. Tiada Tuhan dan sesembahan selain Allah SWT.

Terima Kasih untuk kedua orang tua saya, (alm) Ali Imran Ritonga dan Atik Winarti yang tiada henti mendo'akan, memberikan harapan dan dukungan.

Terima Kasih untuk semua dosen yang telah memberikan ilmunya selama saya menempuh ilmu di perkuliahan.

Terima Kasih untuk Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM dan Ibu Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc. yang telah memberikan saya kesempatan untuk menjadi bagian dalam penelitian hingga menjadi landasan pemikiran dan teori sehingga terbentuknya laporan skripsi ini.

Terima Kasih teruntuk teman – teman seperjuangan dan seperjalanan yang selalu memotivasi saya untuk tetap berkembang dan tidak pernah menyerah.

Terima Kasih kepada diri saya sendiri atas ketekunan, dan usaha yang telah saya lakukan untuk mencapai titik ini. Terima kasih karena tidak pernah menyerah meskipun tantangan datang silih berganti. Saya bangga dengan semua pencapaian dan pertumbuhan, serta pengalaman yang telah saya raih. Teruslah berusaha dan jangan pernah berhenti untuk belajar dan berkembang.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(Q.S Al Baqarah: 286)

“Indeed, with every difficulty, comes relief.”
(QS. Al-Insirah: 5)

“Jadilah seorang yang berusaha dibanding mengejar, lebih baik berusaha disituasi kala ini dibanding mengejar hal yang semu. Rintangan yang kau jalani adalah hari ini bukan hari yang akan datang.”

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, serta hidayahnya. Shalawat dan salam tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabat, serta orang-orang yang bertaqwa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Optimasi Distribusi Pada Kasus Capacitated Vehicle Routing Problem with Pick-Up and Delivery (CVRPPD) Untuk Meminimasi Jarak Tempuh Dan Emisi Karbon (Studi Kasus: PT XYZ)”**. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa yang mengampu pendidikan di Program Studi Teknik Industri untuk menyelesaikan studi Strata-1 pada Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini penulis mendapatkan banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, untuk itu penulis menyampaikan ucapan terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungannya baik secara langsung maupun tidak langsung, dengan penuh rasa syukur penulis ucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, MT. IPU. ASEAN. Eng 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. M. Ridwan Andi Purnomo, ST., M.Sc., Ph.D., IPM. selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. M. Ridwan Andi Purnomo, ST., M.Sc., Ph.D., IPM selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu juga pikirannya serta memberikan motivasi, semangat dan dukungan.
5. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan dukungan, motivasi serta doa yang tidak pernah terputus sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
6. Segenap keluarga besar teman-teman Ngangong yang telah memberikan motivasi dan dukungannya.
7. Nabila Lintang Kirana dan teman-teman terdekat saya yang telah memberikan semangat dan dorongan penuh atas kerja keras yang saya lakukan.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih belum sempurna, sehingga penulis menyampaikan permohonan maaf serta mengharapkan kritik dan saran dari semua pembaca guna penyempurnaan dimasa mendatang. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 17 September 2025



Adhira Yudanto
21522207

ABSTRAK

Distribusi logistik perkotaan sering menghadapi permasalahan jarak tempuh panjang, emisi karbon tinggi, serta risiko penumpukan barang di gudang. Permasalahan ini semakin kompleks ketika kapasitas kendaraan dan kebutuhan *pickup and delivery* harus dipenuhi secara simultan. Penelitian ini mengkaji optimasi rute distribusi pada kasus *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery* (CVRPPD) untuk PT XYZ dengan tujuan meminimasi jarak tempuh dan emisi karbon. Metode yang digunakan adalah kombinasi *What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm* pada Microsoft Excel, dengan data operasional tahun 2024 di jaringan distribusi wilayah DKI Jakarta. Tiga skenario diuji, yaitu rute baseline, rute minimisasi jarak, dan rute minimisasi emisi karbon. Hasil simulasi menunjukkan bahwa optimasi CVRPPD mampu menurunkan jarak tempuh hingga 54,3% dan mengurangi emisi CO₂ sebesar 53,2%, yang berdampak pada penghematan biaya operasional sebesar Rp222.400 dibandingkan kondisi awal, serta berpotensi menekan akumulasi barang di gudang (*overflow warehouse*). Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan skenario optimasi terpilih layak diadopsi dalam operasional harian PT XYZ. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar penelitian memasukkan variabel jendela waktu layanan, kondisi lalu lintas dinamis, serta dimensi paket guna memperkaya model CVRPPD dan meningkatkan akurasi hasil optimasi.

Kata kunci: *Vehicle Routing Problem*; *Evolutionary Algorithm*; *What-If Analysis*; Emisi karbon; Logistik

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.....	ix
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
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
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 <i>Supply Chain Management</i>	15
2.2 <i>Third-Party Logistics (3PL)</i>	16
2.3 <i>Permasalahan Overflow Warehouse</i>	19
2.4 <i>Optimasi Rute Distribusi</i>	19
2.5 <i>Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (CVRPPD)</i>	20
2.6 <i>What-If Analysis dan Evolutionary Algorithm sebagai Tools Optimasi</i>	21
BAB III METODE PENELITIAN	24
3.1 Objek Penelitian.....	24
3.2 Instrumen Penelitian	25
3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder	25
3.4 Metode Pengumpulan Data.....	25
3.5 Populasi dan Sampel.....	26
3.5.1 Populasi.....	26
3.5.2 Sampel	26
3.6 Sumber Data	26
3.7 Teknik Pengumpulan Data.....	27
3.8 Teknik Pengolahan Data	28
3.8.1 Model Matematis CVRPPD	28
3.8.2 Pemodelan <i>What-If Analysis dan Evolutionary Algorithm</i>	29
3.9 Alur Penelitian	34
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	37
4.1 Profil Perusahaan	37
4.1.1 Deskripsi Perusahaan.....	37
4.1.2 Sejarah Perusahaan	37
4.1.3 Struktur Organisasi	38
4.1.4 Visi dan Misi.....	39
4.1.5 Produk dan Layanan	39

4.2 Pengumpulan Data	44
4.2.1 Data Titik Lokasi	44
4.2.2 Data Permintaan <i>Pickup</i> dan <i>Delivery</i>	45
4.2.3 Data Pendukung	47
4.2.4 Rute Kebijakan Perusahaan	47
4.3 Pengolahan Data	52
4.3.1 Desain Penelitian dan Simulasi	52
4.3.2 Iterasi Model (Parameter <i>Mutation Rate</i> & Populasi)	61
4.3.3 Hasil Rute Terbaik	63
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	66
5.1 Analisis Rute Optimasi	66
5.2 Analisis Holistik Terhadap Rute Optimasi	72
5.3 Analisis Penurunan Jarak dan Emisi Karbon	73
5.4 Analisis Penurunan Biaya Operasional dan Dampak Lingkungan (<i>Sustainability</i>)	75
5.5 Analisis Holistik Terhadap <i>Evolutionary Algorithm</i>	76
BAB VI PENUTUP	78
6.1 Kesimpulan	78
6.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN	B-1

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian	13
Tabel 4. 1 Data Titik Lokasi.....	44
Tabel 4. 2 Data <i>Pickup</i> dan <i>Delivery</i>	45
Tabel 4. 3 Data Pendukung	47
Tabel 4. 4 Rute Kebijakan 1.....	48
Tabel 4. 5 Rute Kebijakan 2.....	48
Tabel 4. 6 Rute Kebijakan 3.....	49
Tabel 4. 7 Rute Kebijakan 4.....	50
Tabel 4. 8 Rute Kebijakan 5.....	51
Tabel 4. 9 Rute Kebijakan 6.....	52
Tabel 4. 10 <i>Distance Matrix</i>	54
Tabel 4. 11 Iterasi Jumlah Populasi	61
Tabel 4. 12 Iterasi <i>Mutation Rate</i>	62
Tabel 4. 13 Iterasi Parameter Terpilih.....	63
Tabel 4. 14 Tampilan <i>What-If Analysis</i> Hasil Rute Terbaik	65
Tabel 5. 1 Rute Optimal 1	66
Tabel 5. 2 Detail Rute Optimal 1	67
Tabel 5. 3 Rute Optimal 2	67
Tabel 5. 4 Detail Rute Optimal 2	67
Tabel 5. 5 Rute Optimal 3	68
Tabel 5. 6 Detail Rute Optimal 3	69
Tabel 5. 7 Rute Optimal 4	69
Tabel 5. 8 Detail Rute Optimal 4	70
Tabel 5. 9 Rute Optimal 5	70
Tabel 5. 10 Detail Rute Optimal 5	71
Tabel 5. 11 Rute Optimal 6	71
Tabel 5. 12 Detail Rute Optimal 6	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Konsep <i>Supply Chain Management</i>	15
Gambar 2. 2 Konsep Distribusi <i>Supply Chain Management</i>	16
Gambar 2. 3 Konsep Perusahaan <i>Third-Party Logistics</i> 3PL	17
Gambar 2. 4 Gambaran Posisi Perusahaan 3PL	18
Gambar 2. 5 Ilustrasi Fenomena <i>Overflow Warehouse</i>	19
Gambar 2. 6 Ilustrasi Distribusi Logistik	20
Gambar 2. 7 Ilustrasi Metode <i>Vehicle Routing Problem</i> (VRP).....	21
Gambar 2. 8 <i>Tools What-If Analysis</i>	29
Gambar 2. 9 <i>Data Table</i>	30
Gambar 2. 10 <i>Tools Solver</i>	32
Gambar 3. 1 Logo dan Lokasi PT XYZ	24
Gambar 3. 2 Alur Penelitian.....	34
Gambar 4. 1 Sejarah PT XYZ	38
Gambar 4. 2 Struktur Organisasi PT XYZ	38
Gambar 4. 3 Layanan Pergudangan	40
Gambar 4. 4 Layanan Distribusi	40
Gambar 4. 5 Layanan <i>Heavy Lifting</i>	41
Gambar 4. 6 Layanan Kargo Domestik.....	42
Gambar 4. 7 Layanan <i>International Cargo</i>	43
Gambar 4. 8 Layanan <i>Cold Chain Services</i>	44
Gambar 4. 9 Rute Kebijakan 1	47
Gambar 4. 10 Rute Kebijakan 2	48
Gambar 4. 11 Rute Kebijakan 3	49
Gambar 4. 12 Rute Kebijakan 4	50
Gambar 4. 13 Rute Kebijakan 5	51
Gambar 4. 14 Rute Kebijakan 6	52
Gambar 4. 15 Formula Perhitungan Jarak.....	56
Gambar 4. 16 Perhitungan Inisiasi Rute.....	56
Gambar 4. 17 Tampilan Origin 1	57
Gambar 4. 18 Tampilan Solver	59
Gambar 4. 19 Tampilan <i>Options Solver</i>	60
Gambar 4. 20 Visualisasi Rute Optimal.....	64
Gambar 5. 1 Penurunan Total Jarak	74
Gambar 5. 2 Penurunan Emisi Karbon.....	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan industri logistik di Indonesia semakin pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan distribusi barang di berbagai sektor. Dalam konteks tersebut, peran penyedia jasa logistik pihak ketiga (*third party logistics/3PL*) menjadi semakin penting karena mampu menawarkan solusi terpadu yang menghubungkan aktivitas transportasi, pergudangan, hingga distribusi akhir. Efisiensi operasional menjadi kunci agar perusahaan logistik dapat bersaing dan menjaga kualitas layanan.

PT XYZ sebagai anak perusahaan dari perusahaan logistik di Indonesia, berperan sebagai 3PL yang menawarkan layanan logistik terpadu seperti pengangkutan, pergudangan, manajemen persediaan, dan pengiriman ke titik akhir. Namun demikian, perusahaan ini menghadapi tantangan kritis, terutama dalam hal *overflow warehouse*, yaitu situasi ketika barang yang masuk ke gudang melebihi kapasitas tampungnya sehingga mengganggu alur distribusi barang (Wankhede, 2013).

Menurut diskusi yang dilaksanakan dengan narasumber PT XYZ, Pemanfaatan *overflow warehouse* muncul diakibatkan oleh ketidakseimbangan antara jumlah barang masuk dan kecepatan proses keluarnya barang dari sistem distribusi, ditambah kurang optimalnya pengelolaan aktivitas pengambilan dan pengantaran barang. Berdasarkan sebuah data pada penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengiriman selama periode Maret 2022 – Maret 2023 telah terjadi keterlambatan pengiriman sebesar 15,52% dari total seluruh aktivitas pengiriman, yang dimana batas keterlambatan pengiriman PT XYZ yang dapat diterima ialah hanya 5% (Petrus Siagian, 2023).

Kondisi ini tidak hanya menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar, tetapi juga berdampak pada jam kerja pengemudi yang menjadi lebih panjang, memicu kelelahan, dan pada akhirnya menurunkan tingkat produktivitas. Hal ini menimbulkan penumpukan barang, meningkatkan biaya operasional, serta menghambat waktu respons pengiriman kepada pelanggan akhir (Muda Adhana & Hendriyani, 2023). Oleh karena itu, optimalisasi rute distribusi khususnya dengan meminimalkan jarak tempuh kendaraan, menjadi langkah krusial untuk menjaga efisiensi operasional dan mengoptimalkan aktivitas distribusi logistik guna mencegah akumulasi barang yang tidak terkendali di gudang.

Setelah diskusi lebih lanjut, telah diketahui pula untuk penentuan rute distribusi produk di PT XYZ masih bergantung pada evaluasi tahunan serta pertimbangan subjektif dari data setiap rute kendaraan. Pendekatan ini cenderung kurang kredibel untuk menjawab kebutuhan pengambilan keputusan yang cepat dan tepat dalam operasional harian yang bersifat dinamis namun terorganisir. Akibat dari sistem perencanaan rute yang belum optimal perusahaan menghadapi sejumlah tantangan, terutama dalam hal efisiensi jarak tempuh kendaraan. Beberapa kendaraan menempuh rute yang lebih jauh dari yang seharusnya, sehingga meningkatkan emisi karbon yang serius dan biaya operasional yang tinggi. Selain itu, perencanaan rute yang tidak efisien juga memperparah terjadinya *overflow warehouse*. Kondisi ini menimbulkan penumpukan barang di gudang karena arus keluar tidak seimbang dengan arus masuk. Akibatnya, proses sortir menjadi terhambat, biaya penyimpanan meningkat, serta risiko kerusakan barang semakin besar. Dampak lanjutan dari keadaan tersebut adalah terjadinya keterlambatan distribusi ke pelanggan akhir, yang pada akhirnya menurunkan tingkat kepuasan pelanggan dan mengurangi daya saing perusahaan di pasar logistik yang kompetitif.

Salah satu metode yang dapat menangani permasalahan kompleks tersebut adalah dengan menggunakan *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery* (CVRPPD). Metode ini merupakan pengembangan dari *Vehicle Routing Problem* (VRP) yang mempertimbangkan kapasitas kendaraan dan lokasi pengambilan yang harus dipenuhi (Dumas et al., 1991). CVRPPD efektif dalam merancang rute optimal dengan mempertimbangkan batasan kapasitas kendaraan yang krusial dalam konteks distribusi logistik berbasis volume.

Implementasi metode CVRPPD telah terbukti membantu perusahaan 3PL untuk menghemat total biaya transportasi hingga 18%, mengurangi jarak tempuh 14 km per kendaraan per hari, dan secara langsung berdampak pada penurunan emisi karbon sebesar 19% (Ahkamiraad & Wang, 2018). CVRPPD dapat digunakan untuk mengatasi kemacetan gudang yang diakibatkan oleh inefisiensi rute distribusi dikarenakan model ini relevan dalam lingkungan *urban last-mile delivery* seperti banyak kota besar di Indonesia salah satunya DKI Jakarta yang penuh kendala waktu dan permintaan pelanggan yang kompleks (Heng et al., 2015).

Dalam penelitian ini, metode CVRPPD akan diimplementasikan menggunakan *tools What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm* pada aplikasi Microsoft Excel, yang memungkinkan eksplorasi skenario distribusi dengan berbagai batasan operasional mulai dari minimasi jarak, biaya operasional hingga karbon emisi secara dinamis dan adaptif. Sebuah studi

membuktikan, dengan mengimplementasi logika pemrosesan data pada gudang berbasis *What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm*, akurasi pemetaan stok gudang yang sebelumnya hanya berada di angka 65%, yang dimana menyebabkan munculnya keterlambatan pemrosesan order dan tidak efisiensinya ruang penyimpanan justru berbalik meningkat setelah dilakukannya optimalisasi sebesar 91% (Natalie & Siregar, 2024). Serta penerapan *What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm* pada Microsoft Excel untuk *routing* kendaraan mampu meningkatkan efisiensi *picking and delivering order* sebesar 20%, sekaligus memperbaiki akurasi perhitungan emisi karbon berbasis jarak dan beban muatan (Mulla, 2024).

Pendekatan metode CVRPPD dengan *tools What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm* pada aplikasi Microsoft Excel ini mencerminkan praktik berbasis metaheuristik yang telah diterapkan dalam studi optimasi distribusi dan diakui dalam literatur ilmiah sebagai alat yang fleksibel dan aplikatif untuk industri logistik (Ahkamiraad & Wang, 2018)

Dengan menggunakan metodologi ini, peneliti berharap mampu memberikan manfaat dalam menyelesaikan kasus *overflow warehouse* dengan tujuan untuk optimasi jarak tempuh dan emisi karbon agar meminimasi biaya operasional pada perusahaan PT XYZ.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Berapa penurunan Jarak Tempuh yang diperoleh dari Hasil Optimasi Rute menggunakan *Evolutionary Algorithm* dan *What-if Analysis* pada kasus CVRPPD?
2. Berapa penurunan Emisi Karbon (Kg/CO₂) yang diperoleh dari Hasil Optimasi Rute menggunakan *Evolutionary Algorithm* dan *What-if Analysis* pada kasus CVRPPD?
3. Bagaimana dampak dari penurunan jarak tempuh dan emisi karbon terhadap biaya operational PT XYZ?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui penurunan Jarak Tempuh yang diperoleh dari Hasil Optimasi Rute menggunakan *Evolutionary Algorithm* dan *What-if Analysis* pada kasus CVRPPD.
2. Mengetahui penurunan Emisi Karbon (Kg/Co₂) yang diperoleh dari Hasil Optimasi Rute menggunakan *Evolutionary Algorithm* dan *What-if Analysis* pada kasus CVRPPD.

3. Mengetahui dampak dari penurunan jarak tempuh dan emisi karbon terhadap biaya operasional PT XYZ.

1.4 Manfaat Penelitian

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

1. Bagi PT XYZ

Memberikan solusi untuk mengoptimalkan rute distribusi, mengurangi pembengkakan biaya, dan meningkatkan efisiensi operasional, serta mengurangi denda keterlambatan.

2. Bagi Pemerintah

Menyediakan model pengelolaan logistik yang lebih efisien dan ramah lingkungan yang dapat diterapkan di sektor publik.

3. Bagi Mahasiswa

Menambah wawasan tentang penerapan *What-If Analysis* dan *Solver* dalam konteks manajemen logistik dan optimisasi rute distribusi, serta memberikan kontribusi terhadap studi tentang CVRPPD.

4. Bagi Masyarakat

Meningkatkan kualitas layanan PT XYZ dengan pengiriman yang lebih tepat waktu dan mengurangi biaya yang dapat berdampak pada harga barang.

1.5 Batasan Penelitian

Untuk menghindari meluasnya masalah dan mempermudah memahami permasalahan yang akan dibahas maka perlu adanya batasan masalah, yaitu:

1. Cakupan area penelitian hanya pada jalur pendistribusian pada depot-depot kantor PT XYZ Indonesia di DKI Jakarta.
2. Penelitian ini hanya mencakup topik yang berfokus pada *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery* (CVRPPD). Penelitian ini tidak membahas masalah logistik lainnya yang tidak melibatkan CVRPPD.
3. Data yang diperoleh hanya berasal dari data yang diserahkan perusahaan pada periode 2024.
4. Penelitian ini melibatkan kategori variabel dasar distribusi logistik seperti kapasitas kendaraan, faktor karbon, dan biaya operasional. Variabel lain yang menyangkut

kebijakan/regulasi perusahaan, kondisi musim, waktu jendela, dan faktor kemacetan jalan tidak akan dibahas secara intensif dan komprehensif.

5. Penelitian ini tidak memperhitungkan variabel fluktuasi dan perubahan permintaan, regulasi pihak eksternal, atau perubahan lain yang bersifat signifikan yang mempengaruhi distribusi barang.
6. Tidak mempertimbangkan kapasitas depot, hanya kapasitas kendaraan.
7. Tidak mempertimbangkan isi dan dimensi paket per pengiriman.
8. *Software* yang digunakan adalah Microsoft Excel dengan *tools What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm*.
9. Jumlah titik disesuaikan pada daerah DKI Jakarta dengan jumlah tertentu.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penelitian ini terdiri dari beberapa bab yang nantinya sebagai acuan supaya sistematis dalam penulisan penelitian ini, adapun sistematika dalam penulisan penelitian ini sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan penelitian ini.

BAB II KAJIAN LITERATUR

Bagian ini berisi tentang kajian induktif dan kajian deduktif yang diambil dari jurnal, buku, dan literatur lainnya yang mendukung dalam penyelesaian penelitian ini

BAB III METODE PENELITIAN

Berisi tentang uraian kerangka penelitian, metode yang digunakan, aplikasi, bahan baku, material, alat, tata cara penelitian, dan data yang digunakan.

BAB IV PENGAMBILAN DAN PENGOLAHAN DATA

Dalam bagian ini akan menjelaskan pengumpulan data dengan prosedur yang sudah ditentukan, kemudian diolah sesuai dengan metode yang digunakan dan disertakan gambar dan grafik yang diperoleh dari hasil penelitian

BAB V PEMBAHASAN

Berisi pembahasan kritis mengenai hasil bab sebelumnya dan belum dipaparkan di bab sebelumnya.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan berisi pernyataan singkat yang ditulis dengan menggunakan urutan angka untuk menjabarkan hasil penelitian yang dilakukan. Kesimpulan harus menjawab rumusan permasalahan dan membuktikan hipotesis yang ada. Saran berisi beberapa rekomendasi pengembangan penelitian lanjutan dengan menggunakan cara, alat ataupun metode lain dengan tujuan untuk memperluas pengembangan ilmu. Selain itu, bagian ini juga berisi saran yang diperlukan jika penelitian lanjutan akan dikembangkan berdasarkan keterbatasan/hambatan yang ditemukan selama penelitian dilakukan. Saran dapat dihasilkan dari pembahasan yang telah dilakukan di bab sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini memuat sumber literatur yang menjadi rujukan dari penelitian ini, baik berupa jurnal, buku, maupun literasi lainnya yang menunjang.

LAMPIRAN

Berisi lampiran daftar tabel, gambar, atau bagian lainnya yang mendukung penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan Pustaka ini ditulis dengan menggunakan teknik studi literatur. Metode ini dilakukan untuk mengevaluasi secara kualitatif sumber-sumber jurnal penelitian akademis di beberapa website seperti *Science Direct*, *Elsevier* dan *Google Scholar*. Dalam penelitian Kuantitatif, tinjauan literatur harus diterapkan secara konsisten dengan asumsi metodologis. Sifat penelitian yang bersifat eksperimental berfungsi sebagai salah satu validasi untuk melakukan penelitian kuantitatif (Susanto et al., 2024). Penulisan tugas akhir ini merujuk pada beberapa penelitian terdahulu yang sesuai dengan topik yang diambil ialah Vehicle Routing Problem (VRP).

Rujukan penelitian pertama yang dilakukan oleh Saputro et al. (2024) menampilkan penerapan analisis jaringan menggunakan *ArcGIS* dan *Network Analyst* dalam menyusun rute distribusi unggas di Sragen, yang mampu mengurangi jarak dan waktu tempuh secara signifikan serta memenuhi batasan kapasitas dan waktu. Penelitian ini juga memperlihatkan efektivitas GIS dalam mengoptimalkan distribusi bahan pangan yang mudah rusak, meningkatkan efisiensi logistik.

Selanjutnya, rujukan kedua ialah penelitian yang dilakukan oleh Santoso dan Sepadyati (2022) menunjukkan bahwa penerapan CVRP dengan *software AnyLogistix* dapat mengurangi jarak tempuh hingga 58%, mempercepat distribusi, dan menekan biaya operasional. Penelitian ini tentu sangat bermanfaat bagi perusahaan yang memiliki jaringan distribusi luas untuk meningkatkan efisiensi dan pengambilan keputusan berbasis data.

Rujukan selanjutnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Lizami dan Wahyudi (2024) menyatakan bahwa dengan menggunakan *Excel Solver*, penelitian ini dapat menghitung rute distribusi terpendek dari pabrik tembakau ke Gudang Sampang. Output rute yang paling optimal setelah simulasi adalah sebesar 40 km dengan jalur $S \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow T$. dapat diketahui bahwa penerapan metode ini terbukti mengurangi jarak tempuh dan meningkatkan efisiensi operasional.

Penelitian yang dilakukan oleh Rusanti dan Widyana (2024) mengatakan bahwa penggunaan metode *Saving Matrix* dalam perancangan rute pengiriman buah naga dari Banyuwangi ke Bali terbukti mampu mengurangi jarak tempuh sebesar 37% dan biaya distribusi secara signifikan, yang dimana metode ini menunjukkan bahwa metode *Saving*

Matrix adalah solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi logistik dalam distribusi volume besar.

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Panjaitan dan Iskandar (2024) menyebutkan bahwa model VRP berbasis GIS dengan *ArcGIS Network Analyst* dapat mengoptimalkan distribusi BBM ke SPBU di Cikampek dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan dan waktu operasional. Hasil dari pembahasan yang dilakukan, mereka menunjukkan bahwa teknologi GIS dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi rute dan memastikan pengiriman tepat waktu, mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

Disisi lain, penelitian yang dilakukan Mafaza dan Muslim (2023) menyebutkan bahwa penelitian ini menggunakan metode CVRP dan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dengan algoritma *Branch and Bound* untuk merancang rute distribusi air minum dalam kemasan di Semarang, menghasilkan pengurangan jarak tempuh sebesar 28% dan waktu pengiriman 11%. Dalam pembahasan masalah ini, mereka menegaskan bahwa optimasi rute secara matematis dapat secara signifikan menekan biaya operasional dan meningkatkan efisiensi distribusi.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Nurlathifah et al. (2020) menjelaskan bahwa penelitian ini mengangkat topik dalam menyusun rute distribusi BBM dari Terminal Boyolali ke 11 SPBU di Magetan menggunakan *Excel Solver* dan pendekatan CVRP. Penelitian ini mengambil variabel tiga kapasitas tangki diuji (16, 24, 32 kl) yang dimana menghasilkan output jarak total distribusi berkurang dari 2686,2 km menjadi 2260,6 km. Argumen utama yang digagas si peneliti adalah bahwa pendekatan sederhana seperti *Excel Solver* tetap dapat menghasilkan efisiensi logistik yang signifikan bila didukung dengan data yang tepat.

Selain itu, penelitian yang digagas Yulianto et al. (2020) mengulas tentang penerapan *Evolutionary Algorithm* dalam Microsoft Excel untuk mengoptimalkan rute pengiriman es kristal, yang dimana mereka mampu mengurangi waktu pengiriman hingga 12% dan meningkatkan efisiensi operasional CV. X secara signifikan.

Penelitian yang dikemukakan oleh Kurniawan et al. (2023) membahas mengenai optimalisasi rute distribusi produk *Gaslink CNG* dalam tabung silinder (*C-Cyl*) oleh PT Gagah Energi Indonesia. Sebelumnya, skema distribusi pada perusahaan ini dilakukan secara manual, menyebabkan inefisiensi dalam jarak tempuh dan penggunaan armada. Dengan menggunakan perangkat lunak *AnyLogistix* dan pendekatan *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), penelitian ini mampu menghasilkan analisis 20 titik lokasi pelanggan industri dengan

menggunakan truk 125 PS. Hasil simulasi tersebut menunjukkan tiga rute distribusi dengan jarak total masing-masing 106,80 km, 14,94 km, dan 53,85 km. Implementasi skenario optimasi ini menghasilkan penghematan biaya transportasi hingga Rp3.418.785 per bulan dibandingkan metode distribusi sebelumnya. Studi ini menekankan pentingnya penggunaan perangkat lunak simulasi dalam meningkatkan efisiensi distribusi energi.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Nurdiansyah et al. (2021) membahas mengenai studi kasus Toko Ayam Sehat di Cimahi, mereka berinisiasi untuk mengatasi permasalahan dalam menghadapi tingginya ongkos kirim distribusi telur ayam dengan pendekatan *North West Corner* (NWC) sebagai solusi awal dan Lingo sebagai optimasi akhir. Simulasi tersebut mampu menekan biaya distribusi dari Rp278.000 menjadi Rp240.000 sehingga optimasi tersebut dapat dikatakan sukses dan mampu membantu perusahaan dalam menekan biaya operasional dan merancang skema distribusi yang efisien.

Selanjutnya, rujukan lain adalah penelitian yang dilakukan oleh Aulia (2025) dengan judul “*Strategi Pengelolaan Vehicle Routing Problems dengan Mempertimbangkan Overflow Warehouse Menggunakan Exact Method untuk Minimasi Biaya dan Jarak (Studi Kasus: PT XYZ)*”. Penelitian ini menggunakan *Exact Method* sebagai pendekatan penyelesaian VRP, dengan fokus pada skenario adanya *overflow warehouse* sebagai solusi keterbatasan kapasitas gudang utama. Studi kasus dilakukan pada industri logistik, khususnya PT XYZ, yang menghadapi tantangan dalam efisiensi distribusi barang. Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan metode eksak mampu menurunkan total jarak distribusi sekaligus mengurangi biaya operasional secara signifikan. Penelitian ini sangat relevan karena memberikan gambaran praktis mengenai bagaimana perusahaan jasa logistik dapat memanfaatkan pendekatan matematis berbasis optimasi untuk meningkatkan efisiensi rantai pasok dan mendukung keberlanjutan operasional.

Selain itu, Borman dan Oktavia (2021) melakukan penelitian mengenai perencanaan rute distribusi pada UMKM Hangout Catering yang dimana UMKM tersebut merencanakan ekspansi ke 10 titik baru namun menghadapi tantangan penentuan rute distribusi. Penelitian ini menerapkan metode *Vehicle Routing Problem* (VRP) berbasis operasi riset menggunakan *software* Lingo dalam tiga skenario jumlah kendaraan. Hasil perhitungan menunjukkan skenario dengan satu kendaraan menghasilkan jarak tempuh paling minimal (121,9 km). Gagasan yang peneliti hasilkan adalah bahwa metode matematis seperti VRP membantu perusahaan membuat keputusan pengiriman lebih efisien saat ekspansi.

Selanjutnya, rujukan berikut adalah penelitian yang dilakukan oleh Abdurrahman (2025) dengan judul “*Algoritma Simulated Annealing untuk Minimasi Biaya dalam Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows dengan Overflow Warehouse (Studi Kasus: PT XYZ)*”. Penelitian ini menerapkan *Simulated Annealing (SA)* sebagai metode metaheuristik untuk menyelesaikan permasalahan VRPPDTW dengan mempertimbangkan *overflow warehouse* sebagai bagian dari strategi distribusi. Studi kasus dilakukan pada PT XYZ yang beroperasi di industri logistik nasional dengan jaringan distribusi yang luas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan algoritma SA mampu memberikan solusi yang mendekati optimal dalam waktu komputasi yang relatif singkat, serta berhasil menurunkan biaya operasional secara signifikan dibandingkan metode konvensional. Penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan metaheuristik dapat menjadi strategi efektif untuk meningkatkan efisiensi rute, mengurangi beban biaya, sekaligus mendukung keberlanjutan dalam manajemen distribusi logistik.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Muhammad et al. (2023) mengenai penentuan Rute Kendaraan Dengan Jendela Waktu Untuk Distribusi Produk pada studi kasus PT. X, sebuah distributor farmasi di Makassar. Dalam melaksanakan kegiatan distribusi perusahaan tersebut, mereka menghadapi kendala waktu distribusi dan biaya tinggi. Peneliti dengan sigap mengambil cara agar meningkatkan kinerja perusahaan dengan menggunakan model matematis *Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)* dan Lingo, dengan melakukan riset mendalam, mereka berhasil menginisiasi rute optimal untuk 15 apotek di daerah Makassar. Hasilnya, biaya distribusi optimal tercapai sebesar Rp66.800 dengan waktu komputasi 64,48 detik. Peneliti merekomendasikan kepada audiens bahwa studi ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan waktu layanan dalam perencanaan rute distribusi untuk mencapai hasil skema distribusi yang lebih efisien.

Selanjutnya, rujukan berikut adalah penelitian yang dilakukan oleh Puspitasari dan Kurniawan (2021) dengan judul “*Designing Optimal Distribution Routes using a Vehicle Routing Problem (VRP) Model in a Logistics Service Provider*”. Penelitian ini menerapkan pendekatan model matematis VRP dalam konteks optimasi rute pengiriman. Studi kasus dilakukan pada penyedia jasa logistik di Yogyakarta, di mana setiap kurir sebelumnya tidak memiliki rute distribusi tetap sehingga sering mengalami overload dan ketidakefisienan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, peneliti terlebih dahulu menerapkan *courier assignment optimization* untuk menetapkan zona pengiriman per kurir, lalu merancang rute optimal dalam

zona tersebut menggunakan model VRP klasik yang ditujukan untuk meminimasi waktu tempuh. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan model ini berhasil mengurangi mileage dan travel time, sehingga membuat distribusi lebih optimal. Pada akhir studi, peneliti menyarankan pengembangan di masa depan dengan menerapkan VRPTW dan membandingkannya dengan hasil VRP klasik sebagai lanjutannya.

Penelitian yang dilakukan oleh Amaluna et al. (2022) membahas tentang cara menghadapi lonjakan biaya distribusi makanan ringan ke retailer di Jawa Barat. Peneliti membahas mengenai metode *North West Corner* (NWC) sebagai solusi awal dan Lingo sebagai solusi akhir. Dalam penelitiannya, mereka berhasil menghasilkan penghematan biaya dari Rp20.702.219 menjadi Rp20.700.920. peneliti memberikan rekomendasi kepada audiens, bahwa penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan optimal dengan menggunakan kombinasi metode kuantitatif untuk efisiensi biayanya.

Penelitian yang diangkat oleh Ievana et al. (2024) tentang optimalisasi rute distribusi BBM dari Fuel Terminal Sorong, milik PT Pertamina Patra Niaga. Selama ini, skema distribusi PT Pertamina Patra Niaga hanya menggunakan truk tangki berkapasitas kecil (5.000-8.000 liter) yang dimana truk dengan kapasitas kecil menyebabkan inefisiensi biaya operasional dan penjualan, selain itu masalah terutama karena sebagian armada akan segera dipensiunkan. Maka dari itu, peneliti berinisiasi untuk menggunakan simulasi skenario pada software Anylogistix dengan variasi kapasitas truk (15.000–28.000 liter) untuk merancang konfigurasi distribusi yang optimal. Hasilnya, skenario baru mampu mengurangi waktu distribusi hingga 31,6% dan menghemat konsumsi BBM sebesar 445,6 liter per bulan

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh (Ping Lou, 2024) yang membahas VRPTW dengan mempertimbangkan emisi karbon dalam distribusi logistik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan model optimasi berbasis *mixed integer linear programming* yang dipadukan dengan *genetic algorithm* dan *adaptive variable neighborhood search* mampu menekan emisi karbon secara signifikan sekaligus tetap memenuhi batasan waktu pengantaran. Penelitian ini juga menerapkan *Graph Convolutional Network* (GCN) untuk memprediksi kecepatan lalu lintas secara dinamis, sehingga menghasilkan rute yang lebih akurat sesuai kondisi jalan nyata. Studi kasus di kota Jingzhou, Tiongkok membuktikan bahwa pendekatan ini tidak hanya efektif dalam mengurangi emisi, tetapi juga menjaga efisiensi distribusi tepat waktu.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Palamutçuoğlu et al. (2025) dengan judul *Solution of the Capacity-Constrained Vehicle Routing Problem Considering Carbon Footprint Within the Scope of Sustainable Logistics with Genetic Algorithm*. Penelitian ini menitikberatkan pada penerapan *Genetic Algorithm* (GA) untuk menyelesaikan CVRP dengan memperhitungkan jejak karbon dalam konteks logistik berkelanjutan. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa penggunaan GA mampu menghasilkan rute distribusi yang lebih efisien dengan penurunan jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, serta emisi karbon secara signifikan. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi perusahaan logistik, terutama dalam mendukung strategi penghematan biaya sekaligus mendukung tujuan keberlanjutan lingkungan.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Sun dan Li (2025) dengan judul *Optimizing Logistics in Forestry Supply Chains: A Vehicle Routing Problem Based on Carbon Emission Reduction*. Penelitian ini berfokus pada optimalisasi rantai pasok kehutanan dengan mengintegrasikan VRP yang menekankan pada pengurangan emisi karbon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan optimasi yang digunakan mampu menekan total jarak distribusi dan konsumsi bahan bakar, sekaligus meningkatkan efisiensi rantai pasok kehutanan yang memiliki karakteristik rute panjang dan kompleks. Temuan ini relevan sebagai bukti bahwa penerapan VRP berbasis emisi dapat diterapkan tidak hanya pada distribusi barang umum, tetapi juga pada sektor spesifik seperti kehutanan untuk mendukung keberlanjutan.

Terakhir, penelitian dari Sepadyati et al. (2023) mengenai minimasi jarak transportasi yang bertempat di Surabaya Distribution Center, sebuah perusahaan FMCG yang menggunakan sistem *single drop* yang dimana sistem ini menghasilkan jarak distribusi hingga 280.258,7 km. Dengan pendekatan CVRPTW pada Anylogistix, simulasi yang dilakukan oleh peneliti menghasilkan optimasi pengiriman multidrop dan upsizing kendaraan. Setelah percobaan simulasi, diketahui bahwa jarak tempuh turun 27,2% menjadi 203.905,93 km dan 181 pengiriman dialihkan ke truk besar dengan utilisasi optimal (>70%). Peneliti menyimpulkan bahwa studi ini menunjukkan efektivitas *software* Anylogistix dalam mengoptimalkan jalur pendistribusian logistik terutama untuk kasus skema distribusi *multidrop*.

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian

Penulis	Obyek	Metode	Overflow Warehouse	Min. Total Jarak	Min. Emisi Karbon
(Ghea et al., 2023)	Makanan	<i>Branch and Bounds</i>	-	✓	-
(Borman et al., 2021)	Logistik	<i>Branch and Bounds</i>	-	✓	-
(Muhammad et al., 2023)	Migas	<i>Branch and Bounds</i>	-	✓	-
(Amaluna et al., 2022)	Migas	<i>Branch and Bounds + NWC</i>	-	✓	-
(Zaki Abdurrahman, 2025)	Logistik	<i>Simulated Annealing</i>	✓	✓	-
(Nurdiansyah et al., 2021)	FMCG	<i>Branch and Bounds + NWC</i>	-	✓	-
(Kurniawan et al., 2023)	Migas	<i>Branch and Bounds + Tabu Search</i>	-	✓	-
(Baiq Putri Rizka Aulia, 2025)	Logistik	<i>Exact Method</i>	✓	✓	-
(Santoso et al., 2022)	Logistik	<i>Branch and Bounds + Tabu Search</i>	-	✓	-
(Ievana et al., 2024)	Logistik	<i>Branch and Bounds + Tabu Search</i>	-	✓	-
(Sepadyati et al., 2024)	Makanan	<i>Branch and Bounds + Tabu Search</i>	-	✓	-
(Natasya et al., 2024)	FMCG	<i>Saving Matrix + Tabu Search</i>	-	✓	-
(Ping Lou, 2024)	Logistik	<i>MILP + GA</i>	-	✓	✓
(Saputro et al., 2024)	Migas	<i>Saving Matrix + Tabu Search</i>	-	✓	-
(Palamutçuoğlu et al., 2025)	Logistik	<i>Genetic Algorithm</i>	-	✓	✓
(Rusanti et al., 2024)	Migas	<i>Saving Matrix</i>	-	✓	-
(Puspitasari et al, 2021)	Logistik	<i>Branch and Bounds</i>	✓	✓	-
(Yulianto et al., 2020)	FMCG	<i>Evolutionary Algorithm</i>	-	✓	-
(Nurlathifah et al., 2020)	Makanan	<i>Evolutionary Algorithm</i>	-	✓	-
(Sun & Li, 2025)	Logistik	<i>Genetic Algorithm</i>	-	✓	✓
(Lizami et al., 2024)	Makanan	<i>Evolutionary Algorithm</i>	-	✓	-
Usulan	Logistik	<i>Evolutionary Algorithm</i>	✓	✓	✓

Perbedaan antara penelitian ini dengan penelitian-penelitian terdahulu terletak pada fokus penerapan metode optimasi CVRPPD (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*) dalam konteks *third-party logistics* (3PL), khususnya pada permasalahan *overflow warehouse* yang dialami oleh PT XYZ. Berbeda dengan banyak studi sebelumnya yang mengkaji distribusi dalam sektor makanan, FMCG, migas, atau logistik secara umum dan terbatas pada aspek pemodelan rute berbasis *software Excel, Lingo*, atau *Anylogistix*, penelitian ini lebih spesifik menyoroti permasalahan logistik perkotaan (*urban distribution*) yang kompleks—yakni ketidakseimbangan antara barang masuk dan proses distribusi keluar dari gudang utama (*main hub*).

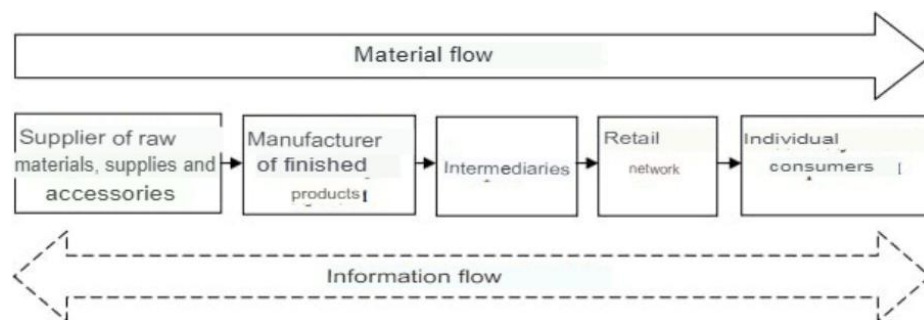
Sebagian besar studi terdahulu tidak menyinggung secara eksplisit tantangan *overflow warehouse* maupun keterkaitan antara *carbon emission* dan jarak tempuh operasional, padahal inilah aspek paling krusial dalam kegiatan *last-mile delivery* dan urgensi *real-time decision making* dalam 3PL. Di sisi lain, penelitian ini mengintegrasikan metode CVRPPD dengan *What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm*, sebuah pendekatan eksperimental yang memungkinkan simulasi berbagai skenario distribusi secara dinamis. Strategi ini terbukti memberikan fleksibilitas tinggi dalam merancang skenario rute optimal yang mempertimbangkan kapasitas kendaraan dan lokasi *pickup-delivery*.

Tidak seperti penelitian sebelumnya yang cenderung menggunakan sistem data historis tahunan dan logika evaluasi subjektif dalam penentuan rute, penelitian ini justru mendorong penggunaan simulasi berbasis perhitungan adaptif harian, sehingga lebih sesuai untuk operasional logistik perkotaan yang fluktuatif. Dalam hal ini, analisis berbasis skenario *what-if* tidak hanya membantu merancang rute optimal, tetapi juga mengevaluasi *trade-off* antara konsumsi bahan bakar, emisi karbon dan sekaligus mencegah menumpuknya barang di gudang.

Dengan demikian, perbedaan penelitian ini dari studi sebelumnya adalah fokus aplikatifnya dalam lingkungan logistik 3PL yang berbasis kapasitas dan *pickup & delivery* dengan mempertimbangkan jarak dan emisi karbon, penggunaan metode CVRPPD yang sesuai dengan kompleksitas pengiriman di wilayah perkotaan, serta terintegrasi dengan tools *What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm* untuk perencanaan rute secara *real-time* dan tanggap terhadap kondisi operasional yang berubah setiap harinya. Hal ini mengakibatkan pendekatan yang diusulkan tidak hanya ilmiah secara metodologi, tetapi juga praktis dan relevan untuk diterapkan langsung pada sistem distribusi PT XYZ.

2.1 Supply Chain Management

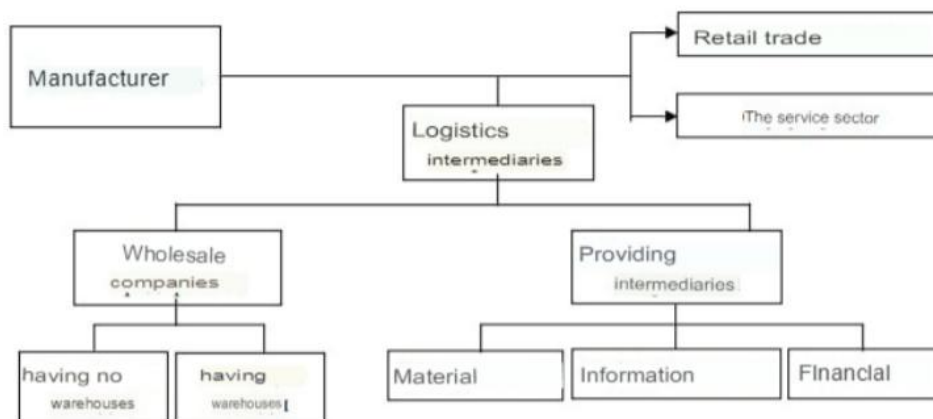
Menurut (Patil & Dolas, 2015) dalam penelitiannya tentang SCM sebagai alat untuk meningkatkan efisiensi dan kepuasan pelanggan, manajemen rantai pasok merupakan sistem koordinasi yang mengintegrasikan seluruh proses mulai dari material bahan baku hingga produk jadi sampai ke tangan konsumen. Tujuan dari sistem ini adalah untuk memaksimalkan efisiensi melalui kolaborasi lintas fungsi dalam sistem rantai pasok. Sinkronisasi proses dan pengurangan waktu siklus sangat berpengaruh pada efisiensi dan penghematan biaya logistik, sehingga SCM yang baik mampu memberikan keuntungan kompetitif bagi perusahaan dan meningkatkan responsivitas terhadap permintaan pasar.



Gambar 2. 1 Konsep *Supply Chain Management*

Sumber: (Coals, 2023)

Sistem rantai pasok merupakan sistem ekonomi yang kompleks, lengkap, dan terstruktur yang terdiri dari aliran material, aliran informasi, dan elemen terkait yang saling berhubungan dalam satu proses manajemen, yang dimana tugas fungsinya digabungkan oleh tujuan internal dan eksternal perusahaan bisnis. Dengan kata lain, sistem logistik yang dibangun pada satu atau lebih rantai pasok terhubung oleh satu tujuan yang sama serta melakukan aliran material dan aliran informasi, Sistem ini mencakup tidak hanya pelaku utama yang secara langsung memindahkan barang, tetapi juga pihak-pihak yang tidak terlibat langsung dalam perpindahan barang, namun berperan penting dalam mendukung kelancaran distribusinya.



Gambar 2. 2 Konsep Distribusi *Supply Chain Management*

Sumber: (Coals, 2023)

Selain itu, efisiensi distribusi adalah salah satu bagian penting dari keberhasilan rantai pasok (Pradita et al., 2020). Menurut mereka, SCM memungkinkan integrasi dan koordinasi antar fungsi dalam rantai pasok untuk mengurangi biaya dan waktu siklus produk. Dalam konteks distribusi logistik, SCM berfungsi sebagai titik *hubung* antara keberhasilan produksi dan kepuasan konsumen. Maka, sistem rantai pasok yang mampu mengintegrasikan seluruh lintas fungsinya harus konsisten dengan tujuan sistem logistik yang bekerja dalam perusahaan, sehingga dapat memenuhi kebutuhan klien dengan mengoptimalkan arus material internal dan eksternal, arus informasi dan keuangan terkait, serta mengoptimalkan proses bisnis logistik, asalkan biaya minimum keseluruhan untuk implementasi tujuan ini tercapai.

2.2 *Third-Party Logistics (3PL)*

Menurut (Wankhede & Sohani, 2013), *third-party logistics (3PL)* adalah entitas independen yang menangani sebagian atau seluruh fungsi logistik perusahaan klien. 3PL menyediakan layanan seperti manajemen distribusi, pergudangan, dan transportasi sebagai bagian dari strategi efisiensi. Dengan demikian, 3PL dapat membantu perusahaan untuk mengatasi hal-hal logistik sehingga perusahaan dapat berkonsentrasi pada bisnis inti namun seraya memberikan tanggung jawab operasi logistik kepada pihak yang lebih berpengalaman.

Mengingat biaya logistik nasional masih tinggi (14,29% dari PDB) dibandingkan dengan negara-negara maju, peran 3PL sangat penting di Indonesia. Meskipun perusahaan seperti PT XYZ masih menghadapi masalah seperti ketidakefisienan sistem rute dan masalah overflow warehouse, mereka tetap memainkan peran strategis dalam mendukung distribusi nasional.



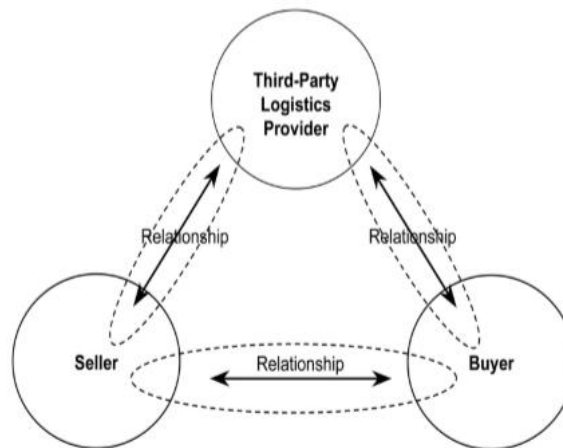
Gambar 2. 3 Konsep Perusahaan *Third-Party Logistics* 3PL

Sumber: (Wankhede & Sohani, 2013)

Gambar diatas merupakan konsep framework yang digunakan perusahaan 3PL dalam menjalani bisnis mereka. Terdapat beberapa alasan yang digunakan perusahaan klien untuk menggunakan layanan perusahaan 3PL, yaitu sebagai berikut:

- Perusahaan ingin fokus mengerjakan proses dan bisnis inti
- Meningkatkan *service level* konsumen
- Mengintegrasikan rantai pasok perusahaan
- Mengurangi konflik terkait tujuan bersama
- Meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan fleksibilitas
- Menetapkan legitimasi pasar
- Menghindari pengeluaran modal yang besar
- Meningkatkan produktivitas
- Mengurangi risiko, ketidakpastian, dan fluktuasi
- Menciptakan keunggulan kompetitif baik secara lokal maupun global
- Mengurangi biaya personel dan peralatan

Sehingga dengan adanya perusahaan 3PL disisi perusahaan, maka akan meningkatkan konsentrasi dalam mengerjakan bisnis, meningkatkan company branding dan kepercayaan pelanggan, serta mengurangi biaya peralatan yang berlebih.



Gambar 2. 4 Gambaran Posisi Perusahaan 3PL

Sumber: (Wankhede & Sohani, 2013)

Selain itu, terdapat konsep menurut (Wankhede & Sohani, 2013) yang berkaitan dengan posisi penyedia jasa transportasi yang berfungsi sebagai pihak ketiga, bukan produsen atau pelanggan. Produk atau jasa dipindahkan dalam rantai pasok dari supplier ke produsen, lalu dari produsen ke pelanggan akhir. Dalam menjalankan fungsinya, perusahaan 3PL menggunakan empat jenis *hubungan* utama:

4.1 *Inbound Logistics*

Mencakup semua proses pengangkutan bahan baku atau barang dari luar ke perusahaan dilakukan melalui kerja sama antara supplier dan pembeli, dengan fokus pada pengelolaan pasokan masuk.

4.2 *Intra Organizational Transportation*

Perusahaan menggunakan transportasi internal ini untuk mengirimkan material dan barang ke fasilitas produksi yang masih berada dalam perusahaan yang sama. Hal ini mencakup transportasi ke lokasi penyimpanan seperti gudang, dengan fokus pada pengiriman internal perusahaan.

4.3 *Logistics Outbound*

Mencakup *hubungan* antara perusahaan dengan konsumennya yang dimana supplier memiliki bertanggung jawab atas pengiriman inbound dengan pengiriman outbound dilakukan oleh divisi shipping. Dengan pertumbuhan industri logistik saat ini, banyak perusahaan 3PL kini mengelola pengiriman keluar dengan lebih efisien.

4.4 *Recovery and Recycling*

Mencakup *hubungan* antara proses pemulihan dan daur ulang produk usang atau barang yang sudah tidak digunakan dari pelanggan oleh pemasok, termasuk pengelolaan *reverse logistics* seperti untuk keperluan perbaikan, daur ulang, atau pembuangan yang ramah lingkungan.

2.3 Permasalahan *Overflow Warehouse*

Overflow warehouse adalah kondisi ketika barang yang masuk ke gudang melebihi kapasitas penyimpanan, yang merupakan gejala lanjutan dari ketidakseimbangan distribusi. Dalam konteks distribusi modern, fenomena ini menandakan bahwa proses pengambilan dan pengantaran tidak berjalan selaras dengan jadwal operasional. Permasalahan ini berkonsekuensi pada peningkatan biaya penyimpanan, penurunan efisiensi operasional, dan akumulasi keterlambatan pengiriman (Coals, 2023).

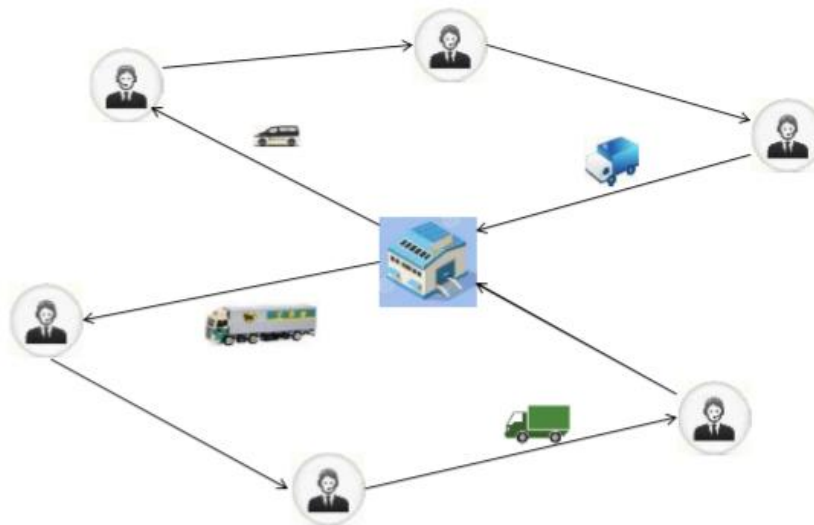


Gambar 2. 5 Ilustrasi Fenomena *Overflow Warehouse*

(Sumber: shipbob.com)

2.4 Optimasi Rute Distribusi

Secara umum, untuk mengetahui rute distribusi yang paling efektif adalah dengan mengurangi biaya logistik dan penggunaan sumber daya. Rute yang efektif ini memiliki dampak yang signifikan terhadap efisiensi bahan bakar, waktu tempuh, dan pengurangan emisi karbon. Dalam lingkungan perkotaan, rute yang tidak efisien menyebabkan pengemudi lelah dan waktu kerja semakin lama dan berpotensi menjadi lembur. Pada akhirnya, ini berdampak pada produktivitas logistik secara keseluruhan (Li et al., 2018).



Gambar 2. 6 Ilustrasi Distribusi Logistik

Sumber: (Li et al., 2018)

Untuk meningkatkan efisiensi logistik, perusahaan harus mempertimbangkan jam kerja pengemudi dan emisi karbon yang dimana hal tersebut dipengaruhi oleh kegiatan perencanaan rute dari perusahaan itu sendiri. Perjalanan yang lebih lama dari yang diperlukan akan meningkatkan konsumsi BBM dan emisi karbon, memperpanjang jam kerja, dan meningkatkan risiko kelelahan pengemudi (Heng Wang et al., 2019).

2.5 *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (CVRPPD)*

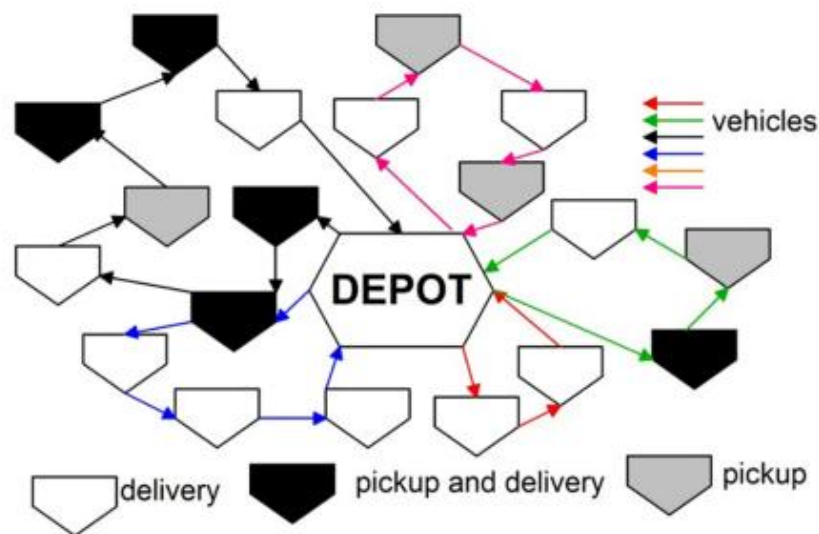
Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (CVRPPD) adalah turunan dari *Vehicle Routing Problem (VRP)* yang dirancang untuk mengatur pergerakan kendaraan dengan memperhatikan dua kendala utama:

- Kapasitas kendaraan terbatas (*Capacitated*)
- Lokasi penjemputan dan pengantaran (*Pickup and Delivery*)

Model ini bertujuan untuk menemukan rute paling efisien bagi armada kendaraan agar dapat melayani sejumlah permintaan *pickup* dan *delivery* dalam batas kapasitas tertentu, tanpa melebihi kapasitas kendaraan. Berdasarkan formulasi awal oleh (Dumas et al., 1991), model ini memiliki ciri khas sebagai berikut:

- Setiap permintaan mencakup dua titik: satu titik *pickup* dan satu titik *delivery*, yang harus dijalankan secara berurutan (*precedence constraint*).
- Kendaraan harus memulai dan mengakhiri perjalanan di depot.

- Setiap pelanggan hanya dilayani satu kali oleh satu kendaraan.



Gambar 2. 7 Ilustrasi Metode *Vehicle Routing Problem* (VRP)

Sumber: (Sitek et al., 2021)

CVRPPD terbukti mampu menurunkan total biaya transportasi hingga 18%, mengurangi jarak tempuh rata-rata per kendaraan, dan mereduksi emisi karbon sebesar 19% (Ahkamiraad & Wang, 2018). Dalam konteks PT XYZ, model ini sangat relevan karena mendukung distribusi terjadwal dengan mempertimbangkan volume dan waktu sekaligus.

2.6 *What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm* sebagai *Tools Optimasi*

What-If Analysis dan *Evolutionary Algorithm* merupakan alat bantu pengambilan keputusan yang memungkinkan simulasi berbagai skenario distribusi. Alat ini cocok digunakan pada sistem yang membutuhkan perhitungan dinamis dan adaptif, tanpa harus menggunakan perangkat lunak mahal. Dalam studi oleh (Natalie & Siregar, 2024), penggunaan *What-If Analysis* meningkatkan akurasi pemetaan stok gudang dari 65% menjadi 91%. *What-If Analysis* dapat membantu untuk memproses dan mengubah nilai dalam suatu sel untuk melihat perubahan yang memengaruhi hasil dari rumus di *worksheet*. Excel memiliki tiga *tools* untuk melakukan analisis yaitu *Scenario Manager*, *Goal Seek*, dan *Data Table*. Setiap *tools* memiliki fungsi dan kegunaan spesifik dalam membantu pengguna mengevaluasi berbagai kemungkinan hasil (Microsoft Support, 2025).

Berikut adalah mekanisme cara kerja *evolutionary algorithm* dengan berupa tahapan secara urut:

1. Inisialisasi Populasi

- Populasi awal dibentuk secara acak atau berdasarkan heuristik tertentu.
- Representasi individu bisa berupa biner, real-coded, atau struktur pohon (untuk *genetic programming*).

2. Evaluasi Fitness

- Setiap individu dievaluasi menggunakan *fitness function* untuk mengukur kualitas solusi.

3. Seleksi (Selection)

- Individu dengan fitness lebih baik dipilih untuk bereproduksi.
- Metode umum: *roulette wheel*, *tournament selection*, *rank-based selection*.

4. Crossover (Rekombinasi)

- Dua individu (parent) digabung untuk menghasilkan offspring.
- Jenis crossover: single-point, multi-point, uniform.

5. Mutasi (Mutation)

- Variasi acak ditambahkan pada offspring untuk menjaga keberagaman populasi.
- Contoh: flipping bit (biner), Gaussian perturbation (real-coded).

6. Evaluasi Generasi Baru

- Offspring yang dihasilkan dievaluasi dengan fungsi fitness.

7. Replacement (Survivor Selection)

- Menentukan individu yang bertahan ke generasi berikutnya.
- Strategi: *elitism* (menyimpan solusi terbaik), *generational replacement*, atau *steady-state*.

8. Kriteria Terminasi

- Algoritma berhenti jika:
 - Jumlah generasi maksimum tercapai.
 - Tidak ada peningkatan fitness signifikan.
 - Waktu komputasi habis.

Evolutionary Algorithm (EA) merupakan metode optimasi berbasis populasi yang meniru seleksi alam, dengan perkembangan signifikan dalam dekade terakhir terutama pada adaptasi multi-objektif, hibridisasi, serta penerapan di big data dan AI. (Thomas Bartz-Beielstein, 2014) menekankan fleksibilitas EA sebagai kerangka metaheuristik untuk masalah multi-objektif, dinamis, dan penuh noise. (Andrew N. Sloss, 2019) menyoroti pentingnya aspek explainability,

kontrol bias, serta integrasi EA dalam pengambilan keputusan industri. Sementara itu, (Srikumar & Pande, 2023) menegaskan relevansi hybrid EA dan aplikasinya pada data mining untuk penelitian masa depan. Secara keseluruhan, literatur terbaru menekankan peran EA dalam menghadapi tantangan optimasi modern dengan kompleksitas tinggi, data masif, dan tuntutan interpretabilitas.

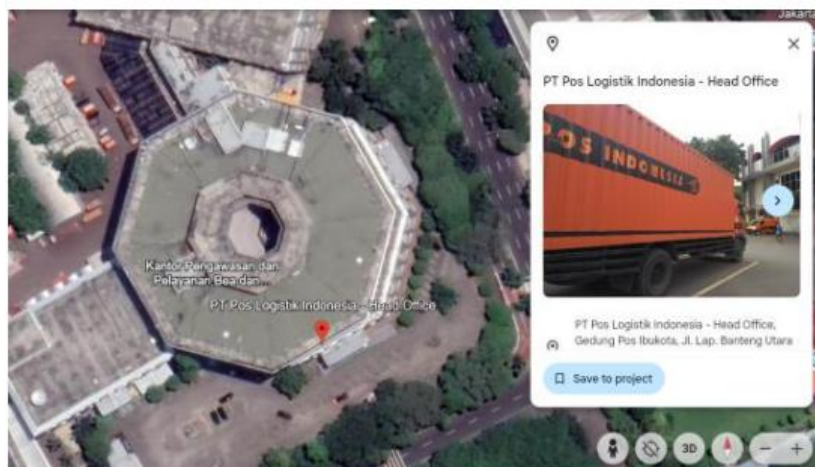
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah sesuatu yang akan menjadi fokus penelitian, peneliti mengambil langkah observasi terhadap permasalahan CVRPPD dan yang nantinya akan di analisa dan di kembangkan untuk menjawab permasalahan dan tujuan penelitian pada laporan tugas akhir ini. Subjek penelitian ini adalah PT XYZ yang memiliki kendala atas penuhnya kapasitas depot/*main hub* di wilayah DKI Jakarta. Berikut merupakan profil perusahaan PT XYZ:

Nama Perusahaan	: PT XYZ
Alamat	: Gedung Pos Ibukota, Jl. Lap. Banteng Utara No.1, Pasar Baru, Sawah Besar, Central Jakarta City, Jakarta 10710.
No. Telepon	: +6281297274831
Bidang Usaha	: - <i>Distribution</i> - <i>Warehouse</i> - <i>Heavy Lifting</i> - <i>International Cargo</i> - <i>Domestic Cargo</i> - <i>Cold Chain</i>
Bentuk Perusahaan	: Perseroan Terbatas
Tahun Berdiri	: 2012



Gambar 3. 1 Logo dan Lokasi PT XYZ

3.2 Instrumen Penelitian

Dalam studi ini, beberapa peralatan diperlukan untuk mendukung pengumpulan dan analisis data. Berikut adalah instrumen penelitian yang digunakan:

1. Data Primer/Dataset, dibutuhkan dalam pengolahan data dan identifikasi atribut kebutuhan peneliti atas metode yang dipilih.
2. *Tools What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm*, diperlukan dalam melakukan pengolahan data identifikasi atribut kebutuhan peneliti secara statistik.
3. *Software Microsoft Excel 2021*, digunakan dalam melakukan visualisasi dan *dashboard* hasil pengolahan data sesuai dengan *constraint* yang digunakan peneliti.

3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder

Sumber data berasal dari data primer dan data sekunder, kedua sumber data ini akan saling melengkapi dan menguatkan keilmuan penelitian.

1. Data Primer, merupakan data yang dikumpulkan melalui serangkaian kegiatan langsung yang dilakukan di lapangan tanpa melalui perantara, dimana sumber data memberikan langsung data kepada pengumpul data.
2. Data Sekunder, merupakan data yang diperoleh melalui perantara, maupun melalui kajian yang dilakukan terhadap dokumen organisasi, buku, jurnal, artikel dan sebagainya. Data sekunder digunakan sebagai penunjang penelitian dan penguat deskripsi-deskripsi kualitatif dalam penelitian.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Penelitian kuantitatif adalah suatu bentuk penelitian yang menggunakan pengumpulan data numerik dan teknik analitik untuk menguji hipotesis, menarik kesimpulan, dan memahami *hubungan* antar variabel yang diteliti (Candra Susanto et al., 2024). Terdapat berbagai macam teknik pengumpulan data, penelitian pengumpulan data dilakukan melihat kebutuhan penelitian dan pendekatan penelitian dengan narasumber, salah satunya adalah dengan melaksanakan kegiatan wawancara. Wawancara ini melibatkan narasumber yang menjabat sebagai *Corporate Strategy Manager* pada PT XYZ mengenai permasalahan *overflow warehouse* pada perusahaan tersebut.

3.5 Populasi dan Sampel

3.5.1 Populasi

Populasi penelitian mengacu pada semua unit analisis yang memiliki ciri-ciri identik atau mempunyai *hubungan* bermakna dengan isu penelitian. Tahap awal desain penelitian melibatkan identifikasi populasi yang sesuai, yang memainkan peran penting dalam memastikan keberhasilan penelitian dalam mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, populasi yang dimaksud adalah seluruh aktivitas distribusi logistik PT XYZ yang melibatkan rute pengiriman *multi-drop* di wilayah DKI Jakarta.

3.5.2 Sampel

Sampel penelitian mengacu pada semua unit analisis yang memiliki ciri-ciri identik atau mempunyai *hubungan* bermakna dengan isu penelitian. Pentingnya memahami tingkat dan atribut suatu sampel digarisbawahi untuk menjamin gambaran yang tepat dari kelompok tersebut dalam penelitian. Sampel penelitian mengacu pada keseluruhan individu, objek, atau peristiwa yang menjadi fokus penyelidikan (Candra Susanto et al., 2024). Penelitian ini mengambil sampel dari data operasional distribusi pada satu *main hub* dengan *overflow warehouse* tersebar di 5 kota besar di DKI Jakarta. Teknik *sampling* yang digunakan adalah *purposive sampling*. Teknik *purposive sampling* adalah suatu teknik penentuan dan pengambilan sampel yang ditentukan oleh peneliti dengan pertimbangan tertentu (Sri Maharani, 2018), dalam konteks penelitian ini yaitu dengan memilih rute *existing* dengan tingkat *overflow warehouse* tertinggi.

3.6 Sumber Data

a. Data Primer:

- Lokasi titik permintaan → Dibuat menggunakan data acak spasial pada koordinat DKI Jakarta (*latitude/longitude*) yang telah di konversi dari GPS (WGS84) (deg) ke ID74 UTM 48S.
- Volume permintaan per titik → Acak (sesuai dengan *dataset* yang diberikan narasumber).
- Kapasitas kendaraan → 1000 kg per unit.

b. Data Sekunder:

- Emisi karbon kendaraan → Mengacu pada regulasi SNI 7118-2:2008, Pergub DKI No. 66/2020, Permen LHK No. 8/2023, PP No. 22/2021.
- Jarak antar titik → Dihitung menggunakan *Euclidean Distance* yang di formulasikan di Microsoft Excel 2021.

c. Instrumen dan *Tools*

- Microsoft Excel 2021 dengan *Solver Add-Ins* & *What-If Analysis* untuk simulasi dan optimasi rute.
- Dataset Simulasi:
 1. Lokasi *pickup* & *delivery* (koordinat)
 2. Jarak antar lokasi (*distance matrix*)
 3. Kapasitas kendaraan
 4. Data beban per titik pengantaran
- Kalkulator emisi karbon (CO₂)

$$\text{Rumus (CO}_2\text{)} = \text{Faktor Emisi} \times \text{Jarak Tempuh (km)} \times \text{Bobot Kendaraan (ton)}$$

3.7 Teknik Pengumpulan Data

Formulasi CVRPPD:

- Formulasi batasan:
 1. Kapasitas kendaraan (≤ 1000 kg).
 2. Pengambilan → pengantaran berpasangan.
- Perangkat pengolahan / *Tools*:
 1. Microsoft Excel 2021.
 2. *Solver (Evolutionary Algorithm)*.
 3. *What-If Analysis*.
- Simulasi dilakukan pada 3 skenario:
 1. Rute aktual (*baseline*).
 2. Rute minimisasi jarak.
 3. Rute minimisasi emisi karbon.

3.8 Teknik Pengolahan Data

3.8.1 Model Matematis CVRPPD

Berdasarkan kajian literatur pada penelitian (Ahkamiraad & Wang, 2018) dan (Sitek et al., 2021), model matematis dari CVRPPD merupakan gabungan dari beberapa model VRP yaitu *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) dan *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery* (VRPPD). Dengan adanya pertimbangan 2 kendala utama pada kasus CVRPPD maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

a. Notasi

- $i, j \in N = \{1, \dots, n\}$: Himpunan Titik *Main Hub*, *Hub*, dan *customer*
 $k \in K = \{1, \dots, m\}$: Himpunan Kendaraan

b. Parameter

- C_{ij} : Biaya dari titik i ke titik j
 d_{ij} : Jarak (km) dari i ke j
 q_i : *Demand* pada titik i (negatif = *pickup*; positif = *Delivery*)
 Q : Kapasitas Kendaraan
 β : Faktor emisi karbon
 v_{ijk} : Rata-rata kecepatan kendaraan k
 a, b, c : Konstanta

c. Variabel Keputusan

- $x_{ijk} \in \{0,1\}$: 1 jika kendaraan k bergerak dari i ke j
 u_{ik} : Jumlah kapasitas kendaraan k setelah berangkat dari titik i
 E_{ijk} : Estimasi emisi karbon dari titik $i \rightarrow j$ oleh kendaraan k
 d_{ijk} : Jarak (km) dari i ke j

Setelah melakukan identifikasi indeks, parameter, dan variabel keputusan dari CVRPPD maka selanjutnya akan dilakukan identifikasi *objective function* dan *constraint* berdasarkan permasalahan PT XYZ:

a. *Modified Multi – Objective Function*

$$\min \left(\alpha \cdot \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} d_{ij} \cdot x_{ijk} + \beta \cdot \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} E_{ijk} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijk} \right) \quad (3.1)$$

Dapat diketahui bahwa formula yang diterapkan ialah gabungan antara minimasi *total cost* dan dan emisi karbon berdasarkan permasalahan PT XYZ yang diteliti. Selain itu penggunaan constraint yang digunakan ialah sebagai berikut:

b. *Subject to Constraint*

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N, j \neq i} x_{ijk} = 1 ; \forall i \in N \setminus \{0\} \quad : \text{Kunjungan 1x / titik} \quad (3.2)$$

$$u_{jk} \geq u_{ik} + q_j - Q \cdot (1 - x_{ijk}) ; \forall i, j \in N, k \in K \quad : \text{Batasan kapasitas} \quad (3.3)$$

$$0 \leq u_{ik} \leq Q ; \forall i \in N, k \in K$$

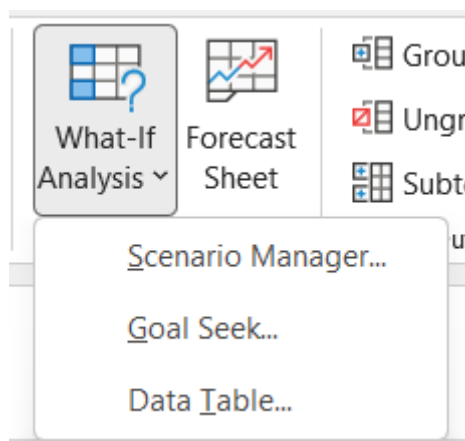
$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{0jk} = 1 ; \forall k \in K \quad : \text{Kendaraan harus kembali ke depot} \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} x_{0jk} = 1 ; \forall k \in K$$

$$E_{ijk} = \gamma \cdot d_{ij} \cdot (a + b \cdot v_{ijk} + c \cdot v_{ijk}^2) \quad : \text{Batasan emisi karbon} \quad (3.5)$$

3.8.2 Pemodelan *What-If Analysis* dan *Evolutionary Algorithm*

Berikut adalah jenis dan langkah penggunaan dari *tools What-If Analysis*:



Gambar 2. 8 *Tools What-If Analysis*

1. *Scenario Manager*

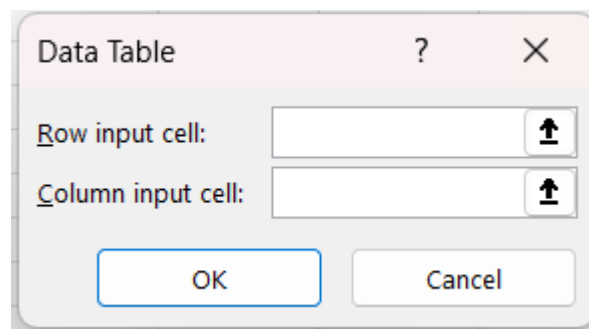
Scenario Manager merupakan *tools* yang memungkinkan pengguna untuk menganalisis berbagai kumpulan nilai input (hingga 32 variabel) dalam satu model (Microsoft Support, 2025). Setiap skenario dapat diberi nama dan dibandingkan untuk melihat dampaknya terhadap hasil. Fitur ini biasanya digunakan dalam *planning* anggaran dan proyeksi keuangan (Peltier, 2017).

2. *Goal Seek*

Goal Seek digunakan untuk menentukan nilai input yang diperlukan agar suatu rumus menghasilkan nilai output tertentu (Microsoft Support, 2025). Fitur ini menggunakan satu variabel dan sangat berguna dalam perencanaan keuangan, seperti menentukan jumlah pembayaran pinjaman untuk mencapai saldo akhir tertentu (Peltier, 2017).

3. *Data Table*

Data Table berguna untuk melihat bagaimana perubahan satu atau dua variabel input yang mempengaruhi hasil dari satu atau lebih rumus (Microsoft Support, 2025). Fitur ini sangat efektif untuk analisis sensitivitas dan skenario perbandingan (Peltier, 2017). Dalam konteks CVRPPD, *tools* ini memiliki fitur dan fungsi yang relevan dalam menangani permasalahan *overflow warehouse*. Langkah-langkah dalam menggunakan fitur data table dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut:



Gambar 2. 9 *Data Table*

Berikut adalah urutan langkah-langkah penggunaan *tools What-If Analysis*:

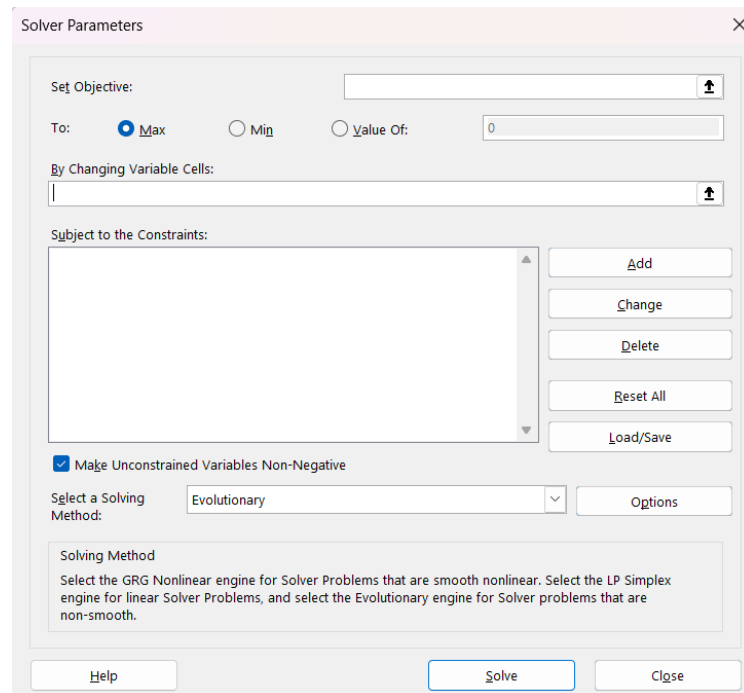
- Buat tabel dengan variabel input di baris dan/atau kolom.
- Masukkan rumus di sel yang sesuai dengan persilangan baris dan kolom.
- Pilih seluruh tabel termasuk rumus dan variabel.
- Klik tab "*Data*", pilih "*What-If Analysis*", lalu "*Data Table*".
- Di kotak dialog, masukkan referensi sel input untuk "*Row input cell*" dan/atau "*Column input cell*".

- Klik "OK" untuk melihat hasilnya.

Penggunaan *data table* dapat menghasilkan data yang sesuai dan *real-time* ketika sedang melakukan simulasi yang bertujuan untuk mengubah suatu nilai, sehingga peneliti mampu mendapatkan data yang relevan dengan permasalahan yang ada.

Selain *What-If Analysis*, terdapat sebuah *add-ins* yang bernama *Solver* yang mampu berintegrasi dalam penyelesaian kasus CVRPPD. *Solver* adalah *add-ins* di Microsoft Excel yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi linear ataupun non-linear dengan menggunakan *Evolutionary Algorithm*. *Tools* ini memungkinkan pengguna untuk menentukan nilai optimal dari sebuah variabel keputusan yang bertujuan untuk *maximize* atau *minimize* dan/atau menjadikan *objective function* sesuai dengan *value* tertentu. Dalam penggunaannya, *solver* diharuskan memiliki/memenuhi serangkaian constraint untuk mengetahui batasan mana saja yang diperbolehkan oleh pengguna untuk dilakukannya simulasi. *Solver* mampu menggunakan metode matematis seperti *Simplex Linear Programming*, *Generalized Reduced Gradient* (GRG) *Non-Linear Programming*, dan *Evolutionary Algorithm* (EA) untuk menemukan solusi optimal (Microsoft Support, 2025). Berikut merupakan beberapa permasalahan yang bisa dimodelkan menggunakan *Solver* (Fylstra et al., 1998):

- Pemrograman Linear (*Linear Programming*): Masalah optimisasi di mana fungsi tujuan dan semua kendala adalah linear.
- Pemrograman Non-Linear (*Non-Linear Programming*): Masalah di mana fungsi tujuan atau setidaknya satu kendala adalah non-linear.
- Pemrograman Integer (*Integer Programming*): Masalah di mana beberapa atau semua variabel keputusan harus berupa bilangan bulat.
- Pemrograman Kombinatorial: Masalah yang melibatkan kombinasi dari variabel untuk menemukan solusi optimal, seperti dalam penjadwalan atau perutean.



Gambar 2. 10 Tools Solver

Berikut merupakan urutan langkah-langkah penggunaan Solver:

1. Mengaktifkan *Add-in Solver*:

- Buka Excel, klik *File > Options > Add-ins*.
- Pada bagian bawah, pilih Excel *Add-ins* dan klik *Go*.
- Centang *Solver Add-in* dan klik *OK*.

2. Menyusun Model:

- Masukkan data dan rumus yang mencerminkan fungsi tujuan dan kendala dalam lembar kerja.

3. Menentukan Parameter *Solver*:

- Klik *Data > Solver* untuk membuka kotak dialog *Solver*.
- Di bagian *Set Objective*, pilih sel yang berisi fungsi tujuan.
- Di bagian *By Changing Variable Cells*, pilih sel-sel variabel keputusan.
- Di bagian *Subject to the Constraints*, tambahkan kendala-kendala yang relevan.

4. Memilih Metode Solusi:

Pilih metode yang sesuai:

- *Simplex LP* untuk masalah linear.
- *GRG Nonlinear* untuk masalah non-linear.
- *Evolutionary* untuk masalah non-smooth atau kompleks.

5. Menjalankan *Solver*:

- Klik *Solve* dan tunggu hingga *Solver* menemukan solusi.
- Pilih untuk menyimpan solusi atau mengembalikan nilai awal.

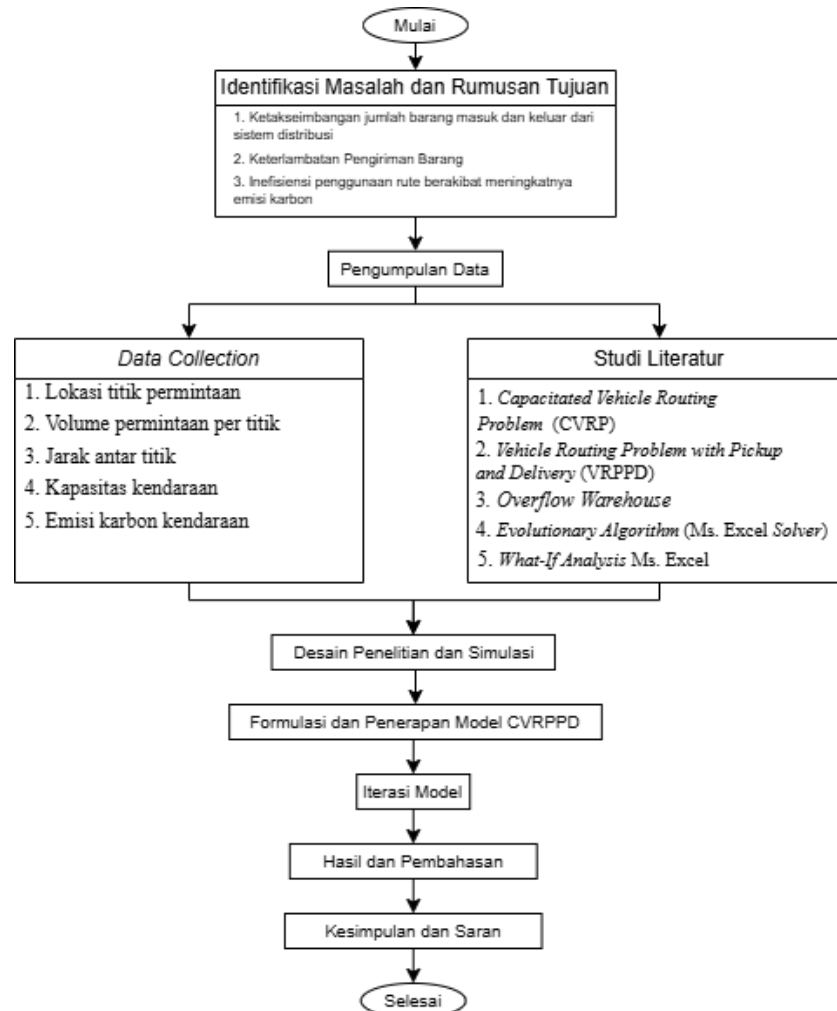
6. Menganalisis Hasil:

- Setelah *Solver* selesai, pengguna dapat melihat laporan hasil seperti *Sensitivity Report* atau *Answer Report* untuk analisis lebih lanjut.

Menurut penelitian yang dilakukan (Mulla, 2024) menunjukkan bahwa Excel *Solver* dapat meningkatkan efisiensi pengambilan dan pengantaran *order* hingga 20% serta memperbaiki perhitungan emisi berbasis rute. Secara deduktif, dari kebutuhan adaptivitas logistik, maka penggunaan *tools* sederhana ini memberikan keunggulan efisiensi dalam sistem distribusi yang kompleks dan berubah-ubah.

3.9 Alur Penelitian

Alur penelitian bertujuan untuk menjabarkan langkah-langkah peneliti dalam mengembangkan dan merancang penelitian ini dari awal hingga akhir. *Flowchart* alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.2 dibawah ini:



Gambar 3. 2 Alur Penelitian

Penjelasan dari alur penelitian di atas adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi masalah dan tujuan penelitian

Menggunakan kajian dari sumber tulisan, penting untuk memahami keadaan PT XYZ saat ini berdasarkan wawancara dengan narasumber.

2. *Data Collection*

Berikutnya, akan dilakukan penelitian untuk mengidentifikasi jenis data yang diperlukan untuk mencapai tujuan studi ini dengan melakukan permintaan data kepada narasumber, dengan fokus pada keinginan untuk memberikan usulan terbaik terkait masalah *existing*.

3. Studi Literatur

Setelah menjalani telaah pustaka dan wawancara, diperlukan analisis yang lebih mendalam tentang kendala yang dialami oleh PT XYZ agar dapat merumuskan tujuan penelitian dengan jelas.

4. Desain Penelitian dan Simulasi

Setelah mencapai jumlah data yang memadai, langkah selanjutnya adalah menentukan jenis penelitian kuantitatif eksperimental berbasis simulasi untuk dan merancang *dataset* simulasi menjadi 5 zona titik dengan *scope* wilayah distribusi di DKI Jakarta. Hal ini penting untuk memastikan bahwa data yang ada sesuai dengan kebutuhan sebelum dilanjutkan ke tahap pengolahan. Setelah data dipastikan andal, barulah dapat dilakukan pengolahan lebih lanjut.

5. Formulasi dan Penerapan Model CVRPPD

Jika dataset telah terbangun dengan baik, maka tahap selanjutnya adalah membangun model *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery* (CVRPPD) yang diformulasikan dengan mempertimbangkan keterbatasan kapasitas kendaraan dan *hubungan* berpasangan antara *pickup* dan *delivery*. *Solver* digunakan untuk menyusun solusi optimal pada tiga skenario: *baseline* (kondisi awal), minimisasi jarak tempuh, dan minimisasi emisi karbon. *What-If Analysis* digunakan untuk menguji skenario terhadap perubahan beban dan jumlah emisi karbon.

6. Iterasi Model Simulasi

Setelah model dijalankan, data hasil optimasi dievaluasi dengan membandingkan efisiensi tiga variabel utama: total jarak tempuh kendaraan, emisi karbon yang dihasilkan, dan tingkat utilisasi kapasitas kendaraan. Perhitungan emisi karbon dilakukan berdasarkan standar regulatif nasional, dengan menerapkan faktor emisi kendaraan dari SNI dan PP No. 22 Tahun 2021, yang memungkinkan hasil perhitungan lebih relevan dengan kebijakan lingkungan dan logistik domestik.

7. Hasil dan Pembahasan

Langkah selanjutnya adalah analisis dan interpretasi hasil, di mana pemodel melakukan analisis deskriptif antara rute awal dengan hasil optimasi CVRPPD. Untuk mengetahui hasil simulasi dari iterasi yang dilakukan berdasarkan *dataset*.

8. Kesimpulan dan Saran

Berisi cakupan rangkuman dari hasil penelitian yang telah dilakukan, Pendekatan ini tidak hanya menunjukkan koherensi metodologis, tetapi juga menyajikan kontribusi praktikal

berupa model distribusi logistik yang dapat langsung diadopsi oleh pelaku industri, terutama di sektor 3PL yang semakin menuntut efisiensi berbasis data dan keberlanjutan lingkungan. dimana hasil tersebut mencerminkan jawaban dari tujuan dan pertanyaan pokok yang dirumuskan sejak awal penelitian dilakukan serta memberikan rekomendasi perbaikan solusi terkait masalah pada PT XYZ ataupun pengembangan penelitian masa depan.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Pada bab ini dipaparkan proses pengolahan data dan data-data yang digunakan pada penelitian CVRPPD menggunakan *Evolutionary Algorithm* dan *What-If Analysis* ini. Pada bab ini juga dijelaskan bagaimana proses Pembangunan model terjadi, proses validasi dan verifikasi model, hingga eksperimen iterasi pada proses pencarian rute terbaik yang akan diterapkan perusahaan

4.1 Profil Perusahaan

Pada bagian profil perusahaan, penulis tidak hanya menjelaskan Sejarah dan informasi terkait profil PT XYZ, melainkan kebijakan-kebijakan, keberlakuan dan regulasi yang berlaku di perusahaan yang berhubungan secara langsung dengan topik peneltian ini.

4.1.1 Deskripsi Perusahaan

PT XYZ merupakan anak perusahaan yang beroperasi secara independen dalam menyediakan layanan logistik. Sebagai pelopor inovasi dalam industri logistik, PT XYZ memanfaatkan jaringan luas yang dimiliki oleh Pos Indonesia, dengan lebih dari 4.367 titik jaringan dan 33.000 titik penjualan di seluruh Indonesia. Ditenagai oleh tim profesional yang ahli dalam merumuskan strategi bisnis, PT XYZ fokus untuk memaksimalkan peluang dalam industri logistik di Indonesia, dengan tetap menjaga kualitas layanan yang efisien dan inovatif (PT Pos Logistik Indonesia, 2025).

4.1.2 Sejarah Perusahaan

PT XYZ berawal dari *Parcel Division/Business Unit Logistics* pada tahun 1996–2004, kemudian berkembang menjadi Proyek Bisnis Total Logistik pada 2004–2007. Pada periode 2007–2011, unit ini bertransformasi menjadi Unit Bisnis Strategis. Akhirnya, pada 17 Februari 2012, PT XYZ resmi berdiri. Dengan dukungan jaringan Pos Indonesia yang luas, perusahaan ini beroperasi secara independen untuk mengoptimalkan peluang bisnis logistik di Indonesia, didukung oleh 4.367 kantor cabang dan 33.000 titik penjualan (PT XYZ, 2025) yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dibawah ini:

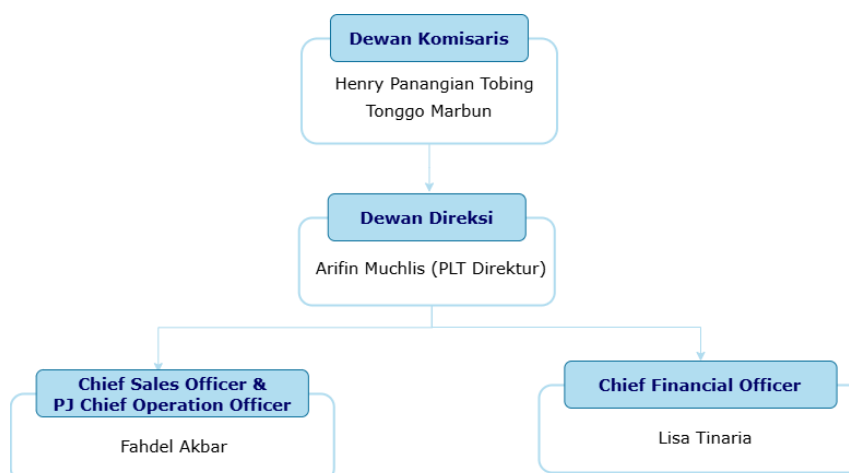


Gambar 4. 1 Sejarah PT XYZ

Sumber: poslogistics.co.id

4.1.3 Struktur Organisasi

Struktur organisasi PT XYZ terdiri atas Dewan Komisaris dan Dewan Direksi. Dewan Komisaris diisi oleh Henry Panangian Tobing, seorang profesional berpengalaman yang meniti karier di berbagai bidang bisnis dan organisasi, serta Tonggo Marbun, yang memiliki pengalaman luas di sektor logistik dan saat ini juga menjabat sebagai Direktur pada PT XYZ. Sementara itu, Dewan Direksi dipimpin oleh Arifin Muchlis sebagai Pelaksana Tugas (PLT) Direktur PT XYZ, yang merupakan lulusan Sarjana Ekonomi dan Magister Manajemen dari Universitas Padjadjaran. Jajaran direksi turut diperkuat oleh Fahdel Akbar yang menjabat sebagai Chief Sales Officer sekaligus Pj Chief Operation Officer, dengan latar belakang kuat di bidang Sales dan Marketing, serta Lisa Tinaria yang memegang peranan sebagai Chief Financial Officer (PT Pos Logistik Indonesia, 2025) yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 dibawah ini:



Gambar 4. 2 Struktur Organisasi PT XYZ

4.1.4 Visi dan Misi

Visi dan misi atau dapat pula diartikan sebagai maksud dan tujuan yang dimiliki sebuah perusahaan, merupakan sebuah pernyataan yang digunakan sebagai cara mengomunikasikan tujuan dari sebuah organisasi. Berikut merupakan visi dan misi PT XYZ.

a. Visi

Menjadi penyedia solusi logistik terpadu yang terpercaya, terluas, dan terkemuka di Indonesia.

b. Misi

- Memberikan solusi logistik yang efisien dan terintegrasi bagi pelanggan serta mendukung daya saing logistik nasional.
- Memberikan kontribusi laba yang maksimal dan membangun sinergi usaha dengan PT Pos Indonesia.
- Membangun kemitraan usaha dengan mitra kerja strategis yang saling menguntungkan.
- Terus berupaya mengembangkan kompetensi karyawan dan organisasi agar memiliki daya saing nasional.

4.1.5 Produk dan Layanan

Dalam menghadapi dinamika industri logistik di Indonesia maupun internasional, PT XYZ menyediakan berbagai layanan yang disesuaikan dengan kebutuhan konsumen. Berbagai solusi yang ditawarkan mencakup penyimpanan, distribusi, pengangkutan barang berat, hingga pengelolaan pengiriman domestik dan internasional, serta layanan rantai dingin, dengan mengedepankan fasilitas modern, jaringan luas, dan tenaga ahli profesional. Adapun layanan yang disediakan antara lain (PT XYZ, 2025):

A. Warehouse

PT XYZ menyediakan solusi penyimpanan yang aman dan efisien dengan fasilitas modern serta *Warehouse Management System (WMS)* yang mendukung *stock management* dan distribusi optimal, baik untuk produk umum maupun produk khusus. Layanan *Warehouse* yang disediakan PT XYZ diantaranya sebagai berikut:



Gambar 4. 3 Layanan Pergudangan

B. Distribution

PT XYZ menawarkan solusi distribusi yang andal dan tepat waktu yang memastikan produk sampai ke tujuan atau ke pelanggan secara efisien dengan jaringan luas dan dengan dukungan teknologi yang modern. Gambar 4.4 dibawah merupakan ilustrasi:



Gambar 4. 4 Layanan Distribusi

C. Heavy Lifting

PT XYZ juga menawarkan layanan *lifting* yang mampu memberikan jasa pengiriman barang-barang berat dengan aman hingga ke tujuan. PT XYZ dalam jasa *Heavy Lifting* memiliki 5 layanan meliputi:

1) Pemetaan dan Survei Rute

Layanan ini mampu membawa barang berat dengan ukuran besar menuju ke lokasi dengan akses terbatas. PT XYZ dapat juga dapat membantu pelanggan untuk melakukan pemetaan rute hingga survei langsung untuk memastikan rute dapat dilewati dengan aman.

2) Rencana Transportasi dan Operasi

Layanan penyedia pilihan-pilihan rencana dengan berbagai jenis transportasi dan pola operasi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan pelanggan.

3) *Dedicated Team*

Dalam melakukan pelayanan dalam jasa *Heavy Lifting*, PT XYZ mengedepankan kualitas dengan menyediakan tenaga profesional dan berpengalaman dalam *heavy lifting*.

4) Transportasi Multi Moda

Layanan penyedia jasa transportasi dengan pilihan yang berbeda (Multimoda) sesuai dengan kebutuhan spesifik konsumen demi mengedepankan efisiensi pengiriman.

5) *Visibility* dan *Monitoring*

Layanan penyimpanan pada area terbuka dengan layanan *open yard warehouse* dengan penyimpanan barang di dalam *container*. Layanan ini di targetkan kepada pelanggan yang memiliki produk dalam skala besar dengan jenis produk yang tahan cuaca dan tidak sensitif terhadap lingkungan sekitar.



Gambar 4. 5 Layanan *Heavy Lifting*

D. *Domestic Cargo*

Untuk layanan yang berjalan setiap hari dan menjadi main-business PT XYZ menyediakan layanan Kargo Domestik, diantaranya adalah karbo domestik darat dan udara. PT XYZ melayani pengiriman kargo mulai dari 30 kg dengan pengiriman meliputi seluruh area Jawa dan Sumatera.



Gambar 4. 6 Layanan Kargo Domestik

E. *International Cargo*

Layanan pengiriman kargo internasional yang disediakan mencakup berbagai moda transportasi dan kebutuhan logistik, meliputi:

1) *Sea & Air Freight (Export – Import)*

Layanan ini menyediakan solusi pengiriman kargo internasional melalui jalur laut dan udara, baik untuk kebutuhan ekspor maupun impor. Pengiriman dilakukan dengan fleksibilitas metode, mulai dari *Full Container Load (FTL)* yang cocok untuk pengiriman dalam jumlah besar, hingga *Less Than Truck Load (LTL)* untuk pengiriman dalam volume yang lebih kecil namun tetap efisien.

2) *Land freight (Export – Import)*

Layanan ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan pengiriman barang yang fleksibel dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan logistik pelanggan, termasuk rute, waktu tempuh, dan jenis kendaraan yang digunakan. Layanan darat ini juga sangat berguna untuk mendistribusikan barang dari pelabuhan atau bandara ke lokasi tujuan akhir secara efisien.

3) *Integrated Import Services to Last Mile Delivery*

Proses ini mencakup mulai dari penjemputan barang impor di pelabuhan atau bandara, pengurusan dokumen dan bea cukai, hingga distribusi akhir ke penerima barang. Dengan

pendekatan terintegrasi ini, pelanggan tidak perlu mengatur sendiri berbagai proses logistik secara terpisah, karena semua sudah ditangani oleh tim yang profesional.

4) *Door to Door Freight Services (Retail Cargo)*

Layanan ini memberikan solusi pengangkutan secara *door-to-door*, yaitu penjemputan barang langsung dari alamat pengirim dan pengantaran ke alamat tujuan di negara lain. Dengan layanan ini, efisiensi dan kenyamanan pelanggan menjadi prioritas utama.

5) *Custom Clearance & Delivery Service*

Layanan ini bertujuan untuk membantu pelanggan dalam proses kepabeanan dan perizinan yang berkaitan dengan aktivitas ekspor dan impor. *Custom clearance* merupakan tahap penting dalam proses logistik internasional karena menyangkut pemeriksaan dokumen, pembayaran bea masuk, serta pemenuhan ketentuan hukum di negara asal maupun tujuan. Selain itu, layanan ini juga dapat mencakup pengantaran barang setelah proses clearance selesai, sehingga memberikan solusi logistik yang menyeluruh.



Gambar 4. 7 Layanan *International Cargo*

F. *Cold Chain Service*

PT XYZ menyediakan layanan *cold chain* yang dapat memastikan barang pelanggan dalam temperature yang dibutuhkan untuk menjaga kualitas dan keamanan barang. Layanan *Cold Chain Service* ini meliputi *Flexible Storage* (Layanan *Magic Box* kotak pendingin), *Adjustable Temperature*, *Multi Temperature Storage*, *End-to-end Cold Chain (Processing and Shipment)* dan *Control Tower Report*.

Gambar 4. 8 Layanan *Cold Chain Services*

4.2 Pengumpulan Data

4.2.1 Data Titik Lokasi

Dalam melakukan analisis CVRPPD menggunakan *Evolutionary Algorithm*, diperlukan data Lokasi *Main Hub*, *Hub*, dan juga *customer*. Dalam penelitian ini terdapat 31 titik yang terdiri dari 1 *Main Hub/ Depot*, 25 *Customer*, dan 5 *Hub*. Data titik lokasi adalah seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1:

Tabel 4. 1 Data Titik Lokasi

ID	Decimal Degrees		UTM	
	Latitude	Longitude	X	Y
<i>Main Hub</i>	-6.202197	106.916902	712,08416	9314
<i>Hub 1</i>	-6.141777	106.865525	709,44878	9323
<i>Hub 2</i>	-6.247925	106.846938	710,32493	9315
<i>Hub 3</i>	-6.200180	106.779845	698,2651	9304
<i>Hub 4</i>	-6.211213	106.912026	697,71249	9318
<i>Hub 5</i>	-6.175346	106.865509	703,07974	9318
<i>Cust. 1</i>	-6.122005	106.910443	711,4102	9320
<i>Cust. 2</i>	-6.144966	106.909498	711,30581	9320
<i>Cust. 3</i>	-6.143851	106.908628	711,20994	9321
<i>Cust. 4</i>	-6.142892	106.912959	711,68976	9321
<i>Cust. 5</i>	-6.140233	106.911085	711,48336	9321
<i>Cust. 6</i>	-6.260960	106.831816	712,347	9302
<i>Cust. 7</i>	-6.258960	106.831469	708,3554	9304
<i>Cust. 8</i>	-6.249333	106.822927	712,7329	9301

<i>Cust. 9</i>	-6.246807	106.820855	712,0341	9301
<i>Cust. 10</i>	-6.244839	106.822006	708,033	9303
<i>Cust. 11</i>	-6.178287	106.718605	702,66221	9308
<i>Cust. 12</i>	-6.173528	106.723035	702,62458	9308
<i>Cust. 13</i>	-6.173156	106.729264	701,68291	9309
<i>Cust. 14</i>	-6.173014	106.702940	701,45456	9309
<i>Cust. 15</i>	-6.172275	106.732833	701,5827	9309
<i>Cust. 16</i>	-6.309047	106.859386	690,16238	9317
<i>Cust. 17</i>	-6.307222	106.816427	690,65441	9317
<i>Cust. 18</i>	-6.309959	106.864317	691,34399	9317
<i>Cust. 19</i>	-6.309965	106.855507	688,43043	9317
<i>Cust. 20</i>	-6.308080	106.813606	691,73933	9317
<i>Cust. 21</i>	-6.173623	106.804342	707,34758	9317
<i>Cust. 22</i>	-6.171654	106.800397	706,96401	9317
<i>Cust. 23</i>	-6.178644	106.803816	707,18197	9317
<i>Cust. 24</i>	-6.173340	106.811594	707,86286	9317
<i>Cust. 25</i>	-6.174079	106.820175	708,93895	9317

4.2.2 Data Permintaan *Pickup* dan *Delivery*

Data permintaan pickup dan delivery adalah serangkaian data seperti pada Tabel 4.2 dibawah ini:

Tabel 4. 2 Data *Pickup* dan *Delivery*

<i>ID</i>	<i>Delivery</i>	<i>Pickup</i>
<i>Main Hub</i>	-	391
<i>Hub 1</i>	-	66
<i>Hub 2</i>	-	71
<i>Hub 3</i>	-	137
<i>Hub 4</i>	-	90
<i>Hub 5</i>	-	27
<i>Cust. 1</i>	20	-
<i>Cust. 2</i>	27	-
<i>Cust. 3</i>	30	-

<i>Cust. 4</i>	20	-
<i>Cust. 5</i>	1	-
<i>Cust. 6</i>	5	-
<i>Cust. 7</i>	15	-
<i>Cust. 8</i>	13	-
<i>Cust. 9</i>	21	-
<i>Cust. 10</i>	6	-
<i>Cust. 11</i>	19	-
<i>Cust. 12</i>	18	-
<i>Cust. 13</i>	3	-
<i>Cust. 14</i>	3	-
<i>Cust. 15</i>	4	-
<i>Cust. 16</i>	11	-
<i>Cust. 17</i>	27	-
<i>Cust. 18</i>	13	-
<i>Cust. 19</i>	26	-
<i>Cust. 20</i>	13	-
<i>Cust. 21</i>	23	-
<i>Cust. 22</i>	16	-
<i>Cust. 23</i>	30	-
<i>Cust. 24</i>	6	-
<i>Cust. 25</i>	21	-

4.2.3 Data Pendukung

Data pendukung adalah serangkaian data yang mendukung pembuatan model optimasi yang disajikan pada Tabel 4.3 dibawah ini:

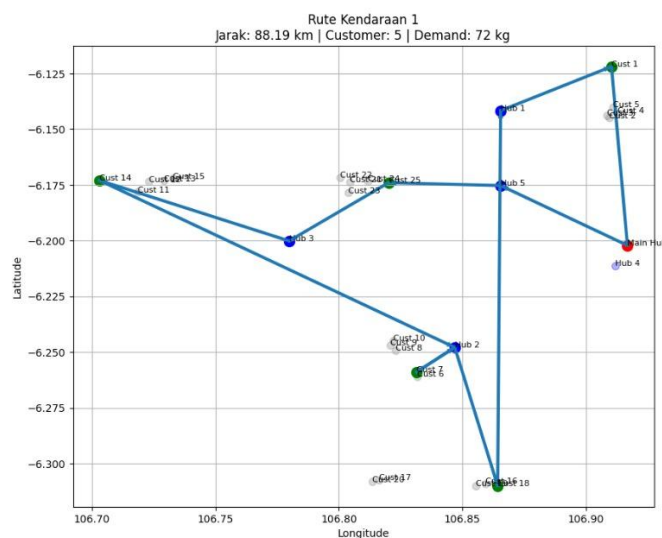
Tabel 4. 3 Data Pendukung

Kategori	Keterangan
Jenis Kendaraan	<i>Blind Van</i>
Kapasitas Kendaraan	1000 kg
Rasio Konsumsi Bahan Bakar	1:11 (1 Liter)
Harga Bahan Bakar	Rp10.000,00
Rata-rata Kecepatan	22 km/jam

4.2.4 Rute Kebijakan Perusahaan

A. Rute Kebijakan 1

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 1 selama melakukan distribusi barang dari main *hub* (depot) ke *hub* dan *customer* yang disajikan pada Gambar 4.9:



Gambar 4. 9 Rute Kebijakan 1

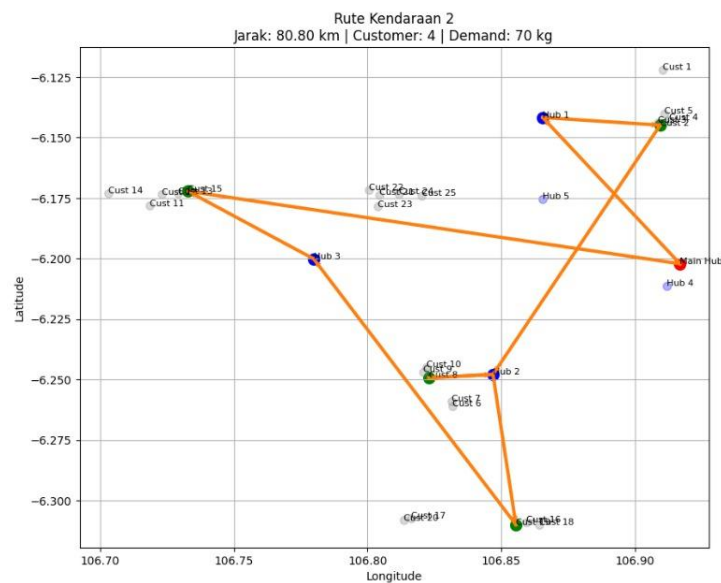
Total titik yang dilewati oleh kendaraan 1 berjumlah 10 titik 5 *customer* dan 5 *hub* dengan total jarak tempuh sepanjang 88,19 Km, total biaya operasional sebesar Rp80,200 serta total emisi karbon sebesar 18,52 Kg/CO₂ yang disajikan pada Tabel 4.4:

Tabel 4. 4 Rute Kebijakan 1

Kendaraan	Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Carbon (Kg/CO2)
Kendaraan 1	1 - 6 - 31 - 4 - 20 - 3 - 13 - 3 - 24 - 2 - 7 - 1	88.19	Rp80,200	72	18.52

B. Rute Kebijakan 2

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 2 selama melakukan distribusi barang dari main *hub* (depot) ke *hub* dan *customer* yang disajikan pada Gambar 4.10:



Gambar 4. 10 Rute Kebijakan 2

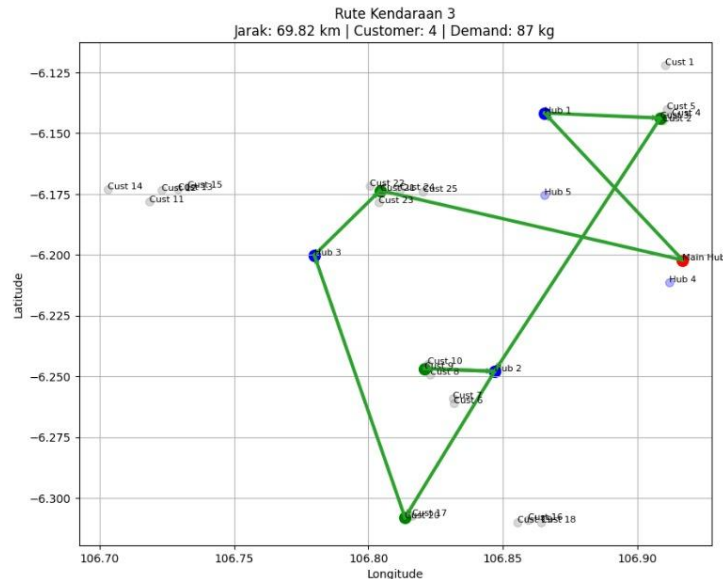
Total titik yang dilewati oleh kendaraan 2 berjumlah 8 titik 4 *customer* dan 4 *hub* dengan total jarak tempuh sepanjang 80,80 Km, total biaya operasional sebesar Rp73,500 serta total emisi karbon sebesar 16,97 Kg/CO2 yang disajikan pada Tabel 4.5:

Tabel 4. 5 Rute Kebijakan 2

Kendaraan	Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Carbon (Kg/CO2)
Kendaraan 2	1 - 2 - 8 - 3 - 14 - 3 - 25 - 4 - 21 - 1	80.80	Rp73,500	70	16.97

C. Rute Kebijakan 3

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 3 selama melakukan distribusi barang dari main *hub* (depot) ke *hub* dan *customer* yang disajikan pada Gambar 4.11:



Gambar 4. 11 Rute Kebijakan 3

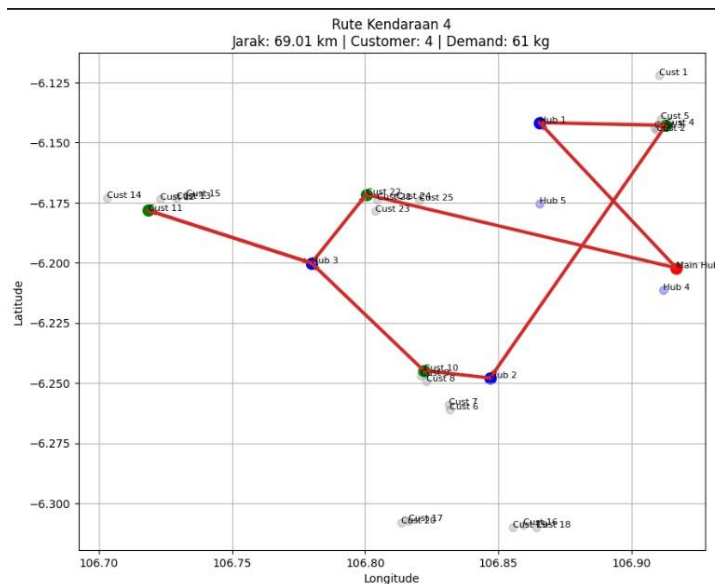
Total titik yang dilewati oleh kendaraan 3 berjumlah 8 titik 4 *customer* dan 4 *hub* dengan total jarak tempuh sepanjang 69,82 Km, total biaya operasional sebesar Rp63,500 serta total emisi karbon sebesar 14,66 Kg/CO₂ yang disajikan pada Tabel 4.6:

Tabel 4. 6 Rute Kebijakan 3

Kendaraan	Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Carbon (Kg/CO ₂)
Kendaraan 3	1 - 2 - 9 - 3 - 15 - 3 - 26 - 4 - 27 - 1	69.82	Rp63,500	87	14.66

D. Rute Kebijakan 4

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 4 selama melakukan distribusi barang dari main *hub* (depot) ke *hub* dan *customer* yang disajikan pada Gambar 4.12:



Gambar 4. 12 Rute Kebijakan 4

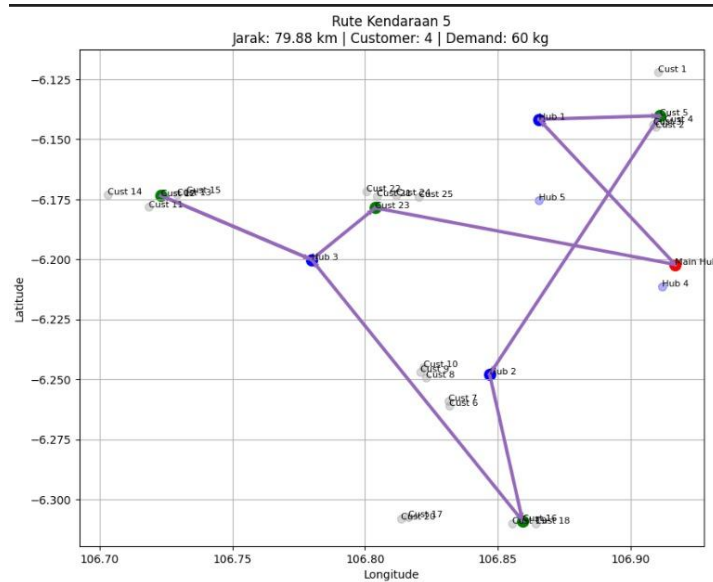
Total titik yang dilewati oleh kendaraan 4 berjumlah 8 titik 4 *customer* dan 4 *hub* dengan total jarak tempuh sepanjang 69,01 Km, total biaya operasional sebesar Rp62,700 serta total emisi karbon sebesar 14,49 Kg/CO₂ yang disajikan pada Tabel 4.7:

Tabel 4. 7 Rute Kebijakan 4

Kendaraan	Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Carbon (Kg/CO ₂)
Kendaraan 4	1 - 2 - 9 - 3 - 15 - 3 - 26 - 4 - 27 - 1	69.01	Rp62,700	61	14.49

E. Rute Kebijakan 5

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 5 selama melakukan distribusi barang dari main *hub* (depot) ke *hub* dan *customer* yang disajikan pada Gambar 4.13:



Gambar 4. 13 Rute Kebijakan 5

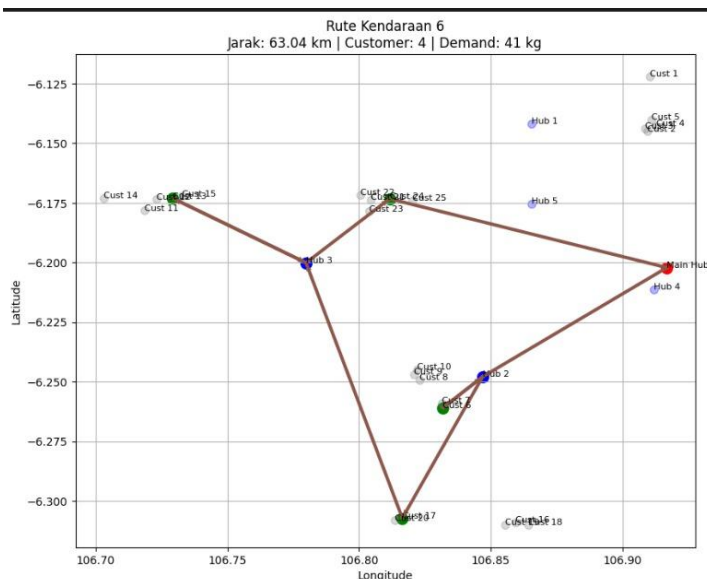
Total titik yang dilewati oleh kendaraan 5 berjumlah 8 titik 4 *customer* dan 4 *hub* dengan total jarak tempuh sepanjang 79,88 Km, total biaya operasional sebesar Rp72,600 serta total emisi karbon sebesar 16,78 Kg/CO₂ yang disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Rute Kebijakan 5

Kendaraan	Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Carbon (Kg/CO ₂)
Kendaraan 5	1 - 2 - 11 - 3 - 22 - 4 - 24 - 4 - 29 - 1	79.88	Rp72,600	60	16.78

F. Rute Kebijakan 6

Berikut merupakan rute yang terbentuk oleh kendaraan 6 selama melakukan distribusi barang dari main *hub* (depot) ke *hub* dan *customer* yang disajikan pada Gambar 4.14:



Gambar 4. 14 Rute Kebijakan 6

Total titik yang dilewati oleh kendaraan 6 berjumlah 8 titik 4 *customer* dan 4 *hub* dengan total jarak tempuh sepanjang 79,88 Km, total biaya operasional sebesar Rp72,600 serta total emisi karbon sebesar 16,78 Kg/CO₂ yang disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Rute Kebijakan 6

Kendaraan	Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Carbon (Kg/CO ₂)
Kendaraan 6	1 - 3 - 12 - 3 - 23 - 4 - 19 - 4 - 30 - 1	63.04	Rp57,300	41	13.24

4.3 Pengolahan Data

4.3.1 Desain Penelitian dan Simulasi

A. Model Konseptual

Proses pengembangan model konseptual bertujuan untuk memberikan pemahaman setiap langkah dan tahapan penelitian guna memastikan konsep telah sesuai dan mampu membangun kerangka model yang sesuai dengan permasalahan.

Dalam penelitian CVRPPD ini terdapat beberapa pengertian yang harus dipahami untuk mengetahui karakteristik dan kondisi yang berlaku pada sistem CVRPPD ini, diantaranya:

- Proses distribusi di DKI Jakarta mengoperasikan 5 kendaraan yang memiliki jenis dan spesifikasi yang sama yaitu blindvan dengan 1000 kg yang berangkat dari *Main Hub* yang kemudian menjalankan distribusinya ke beberapa titik di DKI Jakarta.
- Setiap 1 kendaraan wajib melayani 1 area khusus dan tidak boleh mengunjungi titik area lain, yang dimana kendaraan merepresentasikan jumlah rute distribusi. Jumlah rute yang terbentuk dari jumlah kendaraan akan membentuk pembagian area dalam proses distribusi.

B. Model Matematis CVRPPD

a) Notasi

- $i, j \in N = \{1, \dots, n\}$: Himpunan Titik *Main Hub*, *Hub*, dan *customer*
- $k \in K = \{1, \dots, m\}$: Himpunan Kendaraan
- $P = \{1, \dots, n\}$: Himpunan *node Pickup*
- $D = \{1, \dots, n\}$: Himpunan *node Deliver*

b) Parameter

- C_{ij} : Biaya dari titik i ke titik j
- d_{ij} : Jarak (km) dari i ke j
- q_{ij} : *Demand* pada titik i (negatif = *pickup*; positif = *Delivery*)
- Q : Kapasitas Kendaraan
- γ : Faktor emisi karbon
- v_{ijk} : Rata-rata kecepatan kendaraan

c) Variabel Keputusan

- $x_{ijk} \in \{0,1\}$: 1 jika kendaraan k bergerak dari i ke j
- u_{ik} : Jumlah kapasitas kendaraan k setelah berangkat dari titik i
- E_{ijk} : Emisi karbon dari titik i ke j oleh kendaraan k
- d_{ijk} : Jarak (km) dari i ke j

d) Perhitungan Jarak (*Distance Matrix*) – *Euclidean Distance*.

$$D = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2$$

Hasil perhitungan jarak atau distance matrix menggunakan *euclidean distance* terhimpun menjadi Tabel 4.10 seperti dibawah ini:

Tabel 4. 10 *Distance Matrix*

Distance		Main Hub	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4	Hub 5	Cust. 1	Cust. 2	Cust. 3	...	Cust. 25
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	31
Main Hub	1	0,0	9,1	2,0	17,1	14,9	9,8	6,3	6,4	6,6	...	4,4
Hub 1	2	9,1	0,0	7,8	21,9	12,6	8,0	3,1	3,0	2,8	...	5,7
Hub 2	3	2,0	7,8	0,0	16,4	13,0	7,8	5,4	5,5	5,6	...	2,5
Hub 3	4	17,1	21,9	16,4	0,0	14,1	14,8	21,0	21,0	21,1	...	16,9
Hub 4	5	14,9	12,6	13,0	14,1	0,0	5,4	13,9	13,8	13,7	...	11,3
Hub 5	6	9,8	8,0	7,8	14,8	5,4	0,0	8,7	8,6	8,5	...	5,9
Cust. 1	7	6,3	3,1	5,4	21,0	13,9	8,7	0,0	0,1	0,3	...	4,1
Cust. 2	8	6,4	3,0	5,5	21,0	13,8	8,6	0,1	0,0	0,2	...	4,1
Cust. 3	9	6,6	2,8	5,6	21,1	13,7	8,5	0,3	0,2	0,0	...	4,1
Cust. 4	10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	4,5
Cust. 5	11	4,4	5,7	2,5	16,9	11,3	5,9	4,1	4,1	4,4	5,7	0

e) Perhitungan Fungsi Objektif

Rumus yang digunakan sebagai *objective function* pada penelitian ini telah dihimpun seperti pada Persamaan dibawah ini:

$$\min \left(\alpha \cdot \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} d_{ij} \cdot x_{ijk} + \beta \cdot \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} E_{ijk} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijk} \right)$$

f) Perhitungan Hambatan (*constraint*)

Constraint 1: Setiap *customer* hanya dilayani satu kali oleh satu kendaraan.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N, j \neq i} x_{ijk} = 1 ; \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (4.1)$$

Constraint 2: kendaraan pasti meninggalkan node start (Depot atau *Hub*) persis satu kali, memastikan rute benar-benar dimulai di sana.

$$\sum_{j \in N \setminus \{start\}} X_{start,j} = 1 \quad (4.2)$$

Constraint 3: kendaraan pasti kembali dan tiba persis satu kali di node finish, memastikan rute diakhiri di titik yang benar.

$$\sum_{j \in N \setminus \{finish\}} X_{finish,j} = 1 \quad (4.3)$$

Constraint 4: Setiap node (kecuali start) yang dikunjungi harus “masuk” dan “keluar” sama jumlahnya, mencegah “rantai” yang terputus.

$$\forall h \in N \setminus \{start\} : \sum_{i \in N \setminus \{h\}} X_{i,h} = \sum_{j \in N \setminus \{h\}} X_{h,j} \quad (4.4)$$

Constraint 5: Menetapkan variabel urutan U_i pada node awal menjadi nol, sebagai dasar untuk *subtour elimination*.

$$u_{start} = 0 \quad (4.5)$$

Constraint 6: Mencegah terbentuknya subtour (rute tertutup kecil) di luar rute utama, dengan memaksa urutan U_i konsisten sepanjang rute.

$$\forall i, j \in N \setminus \{start\}, i < j : u_i - u_j + |N| X_{ij} \leq |N| - 1, u_j - u_i + |N| X_{ji} \leq |N| - 1 \quad (4.6)$$

Constraint 7: Kendaraan memulai dengan beban total berupa jumlah permintaan semua node yang akan dikunjungi (*customer + drop to Hub*), siap untuk didistribusikan.

$$l_{start} = L^{init} \text{ dengan } L^{init} = \sum_{i \in N \setminus \{start\}} demand_i \quad (4.7)$$

Constraint 8: Memastikan konservasi muatan kendaraan sepanjang rute, sehingga kendaraan tidak bisa melayani pelanggan melebihi kapasitasnya.

$$\forall i \neq j \in N : l_j \geq l_i - demand_i - M(1 - x_{ij}) \quad (4.8)$$

jika $x_{ij}=1$ (kendaraan bergerak dari i ke j), maka:

$$l_j = l_i - demand_i \quad (4.9)$$

mengurangi beban sebesar permintaan i . Jika $x_{ij}=0$, constraint dilemahkan oleh M

Constraint 9: Memastikan bahwa muatan kendaraan tidak pernah melebihi kapasitas maksimum pada titik manapun dalam rute.

$$\forall i \in N : l_i \leq Q \quad (4.10)$$

Constraint 10: Batasan emisi karbon

$$E_{ijk} = \gamma \cdot d_{ij} \cdot (a + b \cdot v_{ijk} + c \cdot v_{ijk}^2) \quad (4.11)$$

C. Model Excel (Implementasi *Evolutionary Algorithm*)

1. Menampilkan formula perhitungan jarak

Formula perhitungan distance matrix pada cell N3 dengan tabel referensi sebagai berikut:

$$=SQRT(((INDEX(\$E\$3:\$E\$33;\$M3;1)-INDEX(\$E\$3:\$E\$33;\$N2;1))^2)+((INDEX(\$F\$3:\$F\$33;\$M3;1)-INDEX(\$F\$3:\$F\$33;\$N2;1))^2))$$

The screenshot shows two parts of an Excel spreadsheet. The top part shows a formula bar with the formula: $=SQRT(((INDEX(\$E\$3:\$E\$33;\$M3;1)-INDEX(\$E\$3:\$E\$33;\$N2;1))^2)+((INDEX(\$F\$3:\$F\$33;\$M3;1)-INDEX(\$F\$3:\$F\$33;\$N2;1))^2))$. The bottom part shows a table with the following data:

ID	Name	X	Y	Demand
1	Main Hub	712,08416	9314	0
2	Hub 1	709,44878	9323	56

Gambar 4. 15 Formula Perhitungan Jarak

2. Perhitungan Inisiasi Rute

Gambar 4.16 adalah tampilan perhitungan inisiasi rute pada *software microsoft excel*:

	B	C	D	E
	Demand	Dest.	Origin	Revised Ori
37				
38				
39	0	1	1	1
40	56	2	2	1
41	78	3	3	1
42	53	4	4	1
43	77	5	5	1
44	42	6	6	1
45	20	7	1	1
46	27	8	2	2
47	30	9	3	3
48	20	10	4	4
49	1	11	5	5
50	5	12	6	6

Gambar 4. 16 Perhitungan Inisiasi Rute

- Kolom Demand merupakan data yang terintegrasi dengan kolom Destination dengan ID sebagai referensi dengan formula sebagai berikut pada cell B39:

=@INDEX(\$G\$3:\$G\$33;C39;1)

- Kolom *Origin* merupakan data yang mana main *hub*/hub melayani sebuah ID pada kolom Destination.
- Kolom Revised *Origin* merupakan data *Origin* yang direvisi untuk keperluan pembagian delivery oleh ID main *hub* kepada *hub-hub* nya. Bertujuan untuk mendistribusikan demand *customer* melalui *hub* terdekat dengan formula sebagai berikut:

=IF(C39<=6;1;D39)

3. Constraint pickup & delivery

Gambar 4.17 adalah tampilan kolom inisiasi rute pada *software microsoft excel*:

	F	G	H	I	J
36	Origin	1		Fuel Cost =	Rp 111.768
37	Route	Distance	Weight	Cum Weight	CE Cost
38	1				2,322
39	1	0,00	0	0	0,00
40	2	9,08	56	391	2,07
41	3	7,76	78	335	1,75
42	4	16,39	53	257	3,64
43	5	14,13	77	204	3,11
44	6	5,37	42	127	1,16
45	7	8,68	20	85	1,86
46	7	0,00	0	0	0,00

Gambar 4. 17 Tampilan Origin 1

- Cell *Origin* merupakan titik keberangkatan kendaraan (serta kepulangan) dengan ID 1 – 6 berturut-turut *main hub*, *hub 1*, *hub 2*, *hub 3*, *hub 4*, dan *hub 5*. Setiap *Origin* merupakan pembentukan 1 buah rute yang diinisiasikan untuk *Delivery demand* sesuai pada tabel sebelumnya (gambar 4.17)
- Kolom *Route* adalah rute yang terbentuk atas formula pada kolom *Revised Origin* yang dimana setiap ID 1 – 6 memiliki kewajiban pelayanan pada titik-titik yang diberikan. Berikut adalah formulanya:

=IF(E39=\$G\$36;C39;F38)

- Kolom *Distance* adalah tampilan jarak sesuai dengan kolom *Route* dengan menampilkan jarak dari baris sebelumnya terhadap baris setelahnya, dengan formula sebagai berikut:

=@INDEX(\$N\$3:\$AR\$33;F38;F39)

- Kolom *Weight* adalah tampilan bobot *Delivery demand* terhadap titik sesuai kolom *Route* dengan rumus sebagai berikut:

=IF(F39<>F38;B39;0)

- Kolom *Cumulative Weight* adalah tampilan bobot *demand delivery* yang dimiliki kendaraan sedari awal berangkat dari titik *Origin*, dengan pengurangan bobot seiring *delivery* telah dilaksanakan. Berikut adalah formulanya:

=IF(H39<>0;SUM(H39:\$H\$69);0)

- Kolom *Carbon Emission Cost* adalah tampilan perhitungan emisi karbon yang dikeluarkan oleh kendaraan. Dengan rumus perhitungan karbon emisi sebagai berikut:

$$CE\ Cost = \left(\frac{Jarak}{efisiensi\ BBM} \right) \times Faktor\ Emisi \times \left(1 + k \frac{Muatan}{Kapasitas} \right)$$

Dengan formula yang digunakan pada cell J39 adalah sebagai berikut:

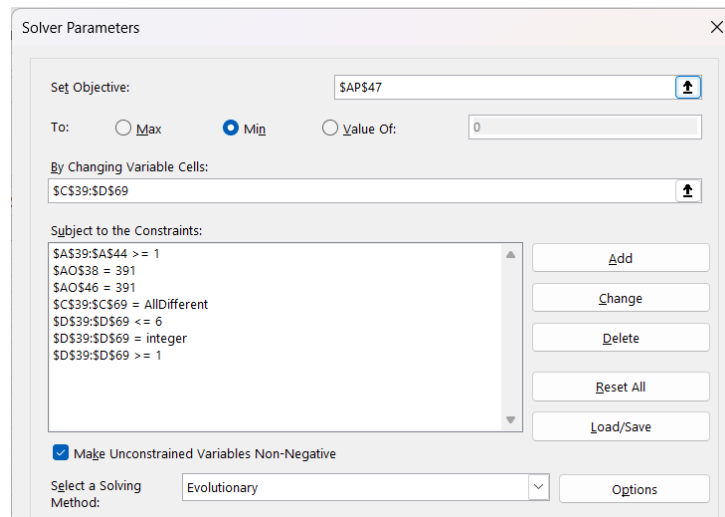
=(G39/11)*\$J\$38*(1+0,2*(I39/1000))

- Cell *Fuel Cost* adalah perhitungan total BBM yang terpakai dalam satu kali perjalanan yang dimana cell ini merupakan biaya operasional pada penelitian kali ini, dengan rumus sebagai berikut:

$$Fuel\ Cost = \left(\frac{Total\ Dist}{11} \right) * Rp10000,00$$

4. Tahapan Simulasi Solver

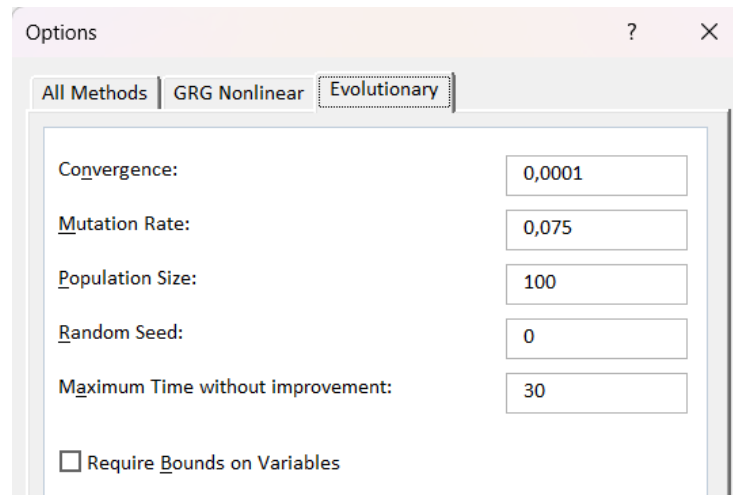
Pada kali ini akan dilakukannya penggunaan *Solver Evolutionary Algorithm* dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:



Gambar 4. 18 Tampilan Solver

- Pertama, menentukan “Set Objective” dengan menunjukkan cell yang akan dilakukannya minimasi. Pada kali ini cell AP47 yang menjadi target minimasi.
- Selanjutnya, kolom “By Changing Variable Cells” merupakan cell yang memiliki variabel yang akan diubah nilainya untuk mencapai target minimasi. Kali ini cell C39:D69 yang merupakan kolom *Destination* dan *Origin* pada gambar 4.18 yang menjadi target perubahan nilai.
- Kemudian, kolom “Subject to The Constraint” merupakan variabel batasan dari cell yang akan diubah nilainya atau memberikan syarat terhadap suatu cell yang menjadi batasan untuk memenuhi target minimasi. Berikut adalah beberapa *constraint* yang digunakan:

- A39:A44 ≥ 1 (setiap titik harus dilewati minimal satu kali)
 - AO38 = 391 (*demand delivery* oleh *Origin* 1 harus memiliki nilai 391)
 - AO46 = 391 (*demand delivery* pada seluruh *customer* harus memiliki total 391)
 - C39:C69 = AllDifferent (kolom *Destination* dan *Origin* memiliki nilai yang berbeda satu sama lain)
 - D39:D69 ≤ 6 (kolom *Origin* memiliki nilai kurang dari sama dengan 6)
 - D39:D69 = integer (kolom *Origin* memiliki nilai bilangan bulat tanpa desimal)
 - D39:D69 ≥ 1 (kolom *Origin* memiliki nilai lebih dari sama dengan 1)
- Pada bagian “Options” data yang digunakan masih dalam pengaturan *default* untuk dapat dilanjutkan ke tahap iterasi.



Gambar 4. 19 Tampilan *Options Solver*

- “*Convergence*” digunakan untuk mengatur tingkat toleransi perubahan solusi antar-generasi, nilai *convergence* yang besar mempercepat proses tetapi kualitas solusi bisa kurang optimal.
- “*Mutation Rate*” adalah parameter yang mengatur frekuensi perubahan acak pada solusi agar tidak terjebak pada *local optimum*. Jika nilai mutasi terlalu rendah, *Solver* cenderung terjebak pada solusi lokal.
- “*Population Size*” berfungsi menentukan jumlah solusi (individu) yang dievaluasi pada setiap generasi, Nilai yang lebih besar memungkinkan ruang pencarian solusi lebih luas sehingga meningkatkan peluang menemukan solusi *global optimum*.
- “*Random Seed*” berfungsi untuk memastikan hasil pencarian yang dapat direplikasi, dengan menentukan titik awal bilangan acak yang digunakan dalam solusi yang bertujuan untuk menghindari solusi yang selalu sama.
- “*Max Time without Improvement*” adalah batasan waktu jika dalam sejumlah iterasi tidak ditemukan perbaikan solusi. Fungsi ini mencegah *Solver* terus berjalan tanpa hasil signifikan, sehingga efisiensi waktu dapat terjaga.
- Terakhir, pada kolom “*Select a Solving Method*” memilih penggunaan “*Evolutionary*” untuk menjalankan solusi menggunakan *Evolutionary Algorithm* pada cell target minimasi.
- Klik “*Solve*” dan tunggu hingga *solver* memberikan hasil sesuai dengan batasan dan pengaturan yang diberikan.

4.3.2 Iterasi Model (Parameter *Mutation Rate* & Populasi)

Pada permasalahan *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup & Delivery* (CVRPPD), pemilihan parameter pada *Evolutionary Algorithm* berperan penting dalam menentukan kualitas solusi terbaik. Maka dari itu dilakukan eksperimen iterasi terhadap dua parameter, yaitu ukuran populasi dan *Mutation Rate*. Dalam menemukan kombinasi yang optimal, evaluasi terhadap dua parameter tersebut perlu diinisiasi agar solusi yang muncul ialah solusi yang paling optimal, dengan kriteria evaluasi adalah sebagai berikut:

- Semakin rendah jarak tempuh, maka semakin baik.
- Semakin rendah emisi karbon, maka semakin baik.
- Semakin rendah biaya operasional, maka semakin baik.

Eksperimen ini dilakukan dengan mengatur satu buah parameter yang bersifat tetap dan parameter lainnya bersifat bebas. Proses optimasi ini diatur untuk menggunakan data aktual yang seragam kemudian hasil parameter yang optimal akan digunakan untuk proses optimasi berikutnya untuk mencapai hasil akhir algoritma CVRPPD. Hasil parameter terbaik dilihat dari total jarak dan emisi karbon dengan dilakukan secara bergantian untuk setiap parameter dengan 1 kali percobaan.

A. Eksperimen terhadap jumlah populasi (P)

Nilai jumlah populasi yang digunakan divariasikan pada angka mulai dari 150, 200, 250, dan 300. Dengan ukuran parameter *Mutation Rate* adalah 0,075; *Convergence* adalah 0,0001; *Random Seed* adalah 42; dan *Maximum Time Without Improvement* adalah 30. Tabel 4.11 adalah dashboard hasil iterasi jumlah populasi berdasarkan variasi nilai parameter:

Tabel 4. 11 Iterasi Jumlah Populasi

Jumlah (P)	Total Jarak	Total Emisi Karbon	Total Biaya Operasional
150	343,84	73,53	Rp312.586
200	362,73	77,84	Rp329.756
250	349,74	74,99	Rp317.947
300	350,93	75,43	Rp319.023

Berdasarkan hasil eksperimen terhadap variasi jumlah populasi, terlihat bahwa peningkatan ukuran populasi tidak selalu memberikan hasil yang lebih optimal. Pada populasi 150, total jarak yang dihasilkan adalah 343,84 km dengan emisi karbon sebesar 73,53 kg CO₂ dan biaya Rp312.586, sementara populasi 200 justru menghasilkan nilai yang

lebih tinggi pada semua indikator (jarak 362,73 km, emisi 77,84 kg CO₂, dan biaya Rp329.756). Populasi 250 dan 300 menunjukkan hasil yang relatif mirip, dengan sedikit peningkatan jarak dan biaya dibandingkan populasi 150.

Hal ini menunjukkan bahwa jumlah populasi yang terlalu besar tidak selalu meningkatkan performa algoritma, bahkan cenderung menambah kompleksitas perhitungan tanpa menghasilkan solusi yang lebih baik. Dengan demikian, penggunaan populasi moderat seperti 150 lebih efektif karena mampu menghasilkan rute yang relatif efisien, emisi lebih rendah, dan biaya yang lebih terkendali.

B. Eksperimen terhadap *Mutation Rate* (μ)

Pada eksperimen kali ini, kombinasi *Mutation Rate* yang digunakan ialah senilai 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5. Sementara jumlah populasi yang digunakan ialah 150 individu (sesuai eksperimen sebelumnya) serta parameter lain yang bersifat default pada eksperimen sebelumnya. Tabel 4.12 adalah hasil optimasi yang diperoleh melewati eksperimen perubahan *Mutation Rate*:

Tabel 4. 12 Iterasi *Mutation Rate*

Jumlah (μ)	Total Jarak	Total Emisi Karbon	Total Biaya Operasional
0,1	331,35	70,79	Rp 301.228
0,2	310,74	66,71	Rp 282.491
0,3	297,16	63,77	Rp 270.144
0,4	319,99	68,85	Rp 290.896
0,5	239,21	51,19	Rp 217.464
0,6	331,16	70,83	Rp 301.054
0,7	321,67	68,83	Rp 292.426

Berdasarkan hasil percobaan, terlihat bahwa variasi nilai μ memberikan dampak signifikan terhadap total jarak, emisi karbon, dan biaya operasional. Nilai μ yang terlalu rendah (0,1–0,2) maupun terlalu tinggi (0,6–0,7) menghasilkan jarak tempuh relatif panjang dan biaya yang lebih besar, sedangkan pada nilai menengah (khususnya $\mu = 0,5$) diperoleh hasil paling optimal dengan jarak minimum 239,21 km, emisi karbon terendah 51,19 kg CO₂, serta biaya operasional terendah Rp217.464. Hal ini menunjukkan bahwa *mutation rate* yang moderat mampu menjaga keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi dalam *evolutionary algorithm*, sehingga menghasilkan solusi yang lebih efisien.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penentuan parameter algoritma sangat berpengaruh terhadap kualitas solusi optimasi. Pemilihan nilai μ yang tepat mampu memberikan perbaikan kinerja sistem distribusi secara signifikan, baik dari segi efisiensi rute, pengurangan emisi, maupun penghematan biaya operasional.

C. Eksperimen terhadap Hasil Iterasi

Pada eksperimen kali ini, kombinasi *Mutation Rate* yang digunakan ialah senilai 0,5 sementara jumlah populasi yang digunakan ialah 150 individu (sesuai eksperimen sebelumnya) serta parameter lain yang bersifat default pada eksperimen sebelumnya. Berikut Tabel 4.13 adalah hasil optimasi yang diperoleh melewati eksperimen iterasi berulang pada parameter yang sama:

Tabel 4. 13 Iterasi Parameter Terpilih

Jumlah Iterasi	Total Jarak	Total Emisi Karbon	Total Biaya Operasional
1	239,21	51,19	Rp 217.464
2	205,98	44,35	Rp 187.256
3	239,21	51,19	Rp 217.464
4	205,98	44,35	Rp 187.256

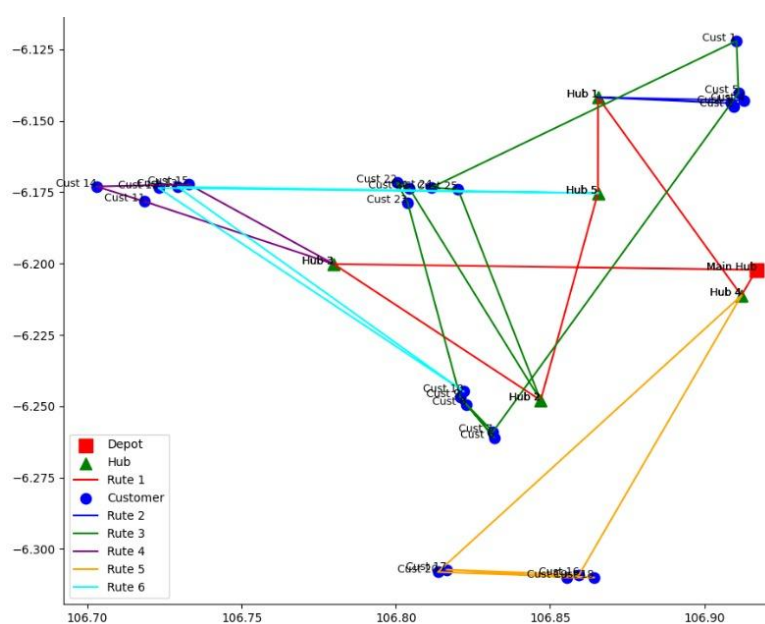
Sehingga berdasarkan iterasi yang telah dilakukan sebanyak 4 kali dengan menggunakan *Evolutionary Algorithm* pada solver, diketahui bahwa dengan melakukan iterasi sebanyak 4 kali pada 3 parameter memunculkan 2 pasang iterasi yang bernilai sama. Hal ini membuktikan bahwa solver mampu menghasilkan output yang konsisten berdasarkan parameter yang digunakan dengan jumlah populasi terbaik pada 150 individu dan nilai mutation rate terbaik pada 0,5.

4.3.3 Hasil Rute Terbaik

Berdasarkan hasil optimasi terbaik pada eksperimen CVRPPD dengan *Evolutionary Algorithm*, diperoleh konfigurasi rute optimal dengan jumlah kendaraan sebanyak lima kendaraan blindvan. Rute optimasi ini menggunakan parameter kombinasi jumlah populasi sebesar 150 individu dan nilai *Mutation Rate* yaitu 0,5. Masing-masing rute dilayani oleh kendaraan yang dialokasikan menjadi 2 tahap dengan tahap pertama digunakan untuk pengiriman *delivery*

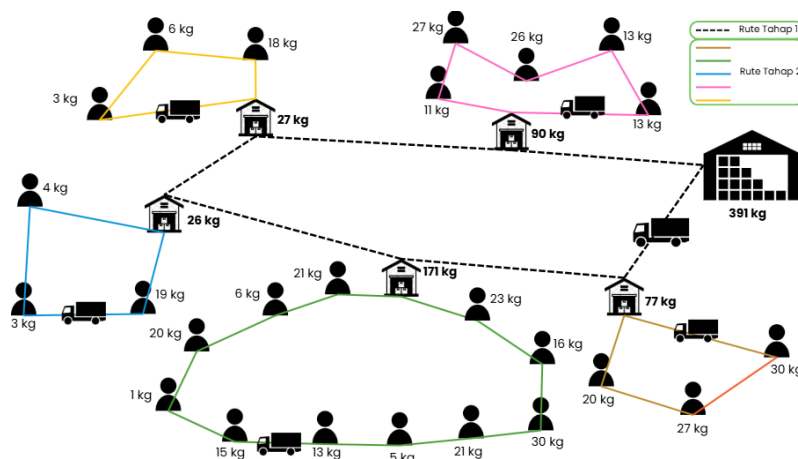
demand kepada *hub* dan tahap kedua digunakan untuk pelayanan *delivery demand* terhadap *customer*.

Masing-masing *hub* melayani tiap *customernya* dengan jumlah titik antar yang terbagi atas hasil optimasi *Evolutionary Algorithm* dengan pertimbangan *constraint* yang telah disebutkan pada bab sebelumnya. Gambar 4.20 adalah visualisasi setelah dilakukan optimasi pada rute kebijakan dengan parameter optimasi pada jumlah populasi dan *Mutation Rate*, dengan parameter evaluasi yaitu minimasi total jarak tempuh, total emisi karbon, dan total biaya operasional dihasilkan berturut-turut 205,98 km, 44,35 kg/CO₂, dan Rp187.256.



Gambar 4. 20 Visualisasi Rute Optimal

Evolutionary Algorithm sebagai alat optimasi mampu memberikan output rute terbaik (6 rute) dengan pengiriman dialokasikan menjadi dua tahapan dengan *Origin 1* melakukan pelayanan dari *main hub* ke seluruh *hub* dan *Origin 2-6* melakukan pelayanan dari masing-masing *hub* kepada *customer*. Gambar 4.21 adalah konfigurasi rute distribusi yang dihasilkan dari rute optimal.



Gambar 4. 21 Konfigurasi Layanan Route Distribusi

Tabel 4.14 adalah tampilan hasil formula *What-If Analysis* terhadap hasil rute terbaik yang dimunculkan oleh *Evolutionary Algorithm*.

Tabel 4. 14 Tampilan *What-If Analysis* Hasil Rute Terbaik

Origin	Total Jarak Tempuh	Total Emisi Karbon	Total Biaya Operasional
1	76,87	16,79	Rp 69.881
2	6,48	1,38	Rp 5.890
3	53,09	11,43	Rp 48.265
4	14,39	3,05	Rp 13.079
5	19,92	4,24	Rp 18.106
6	35,24	7,46	Rp 32.034
Total	205,98	44,35	Rp 187.256

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Rute Optimasi

Setelah dilaksanakannya proses iterasi pada pengolahan data terhadap permasalahan *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup & Delivery* (CVRPPD), diperoleh solusi terbaik berupa enam rute pengiriman. Setiap kendaraan dirancang untuk mengantarkan barang dari depot ke sejumlah pelanggan dengan memperhatikan *constraint* yang telah dibentuk. Berikut adalah rincian masing-masing hasil rute optimal.

A. Rute 1 (Tahap 1)

Rute pertama menempuh total jarak 76,87 km dengan kapasitas angkut mencapai 391 kg. Dari segi biaya operasional, nilai yang dikeluarkan sebesar Rp69.881, sedangkan emisi karbon yang dihasilkan adalah 16,79 kg CO₂. Pola rute ini memperlihatkan kecenderungan melayani konsumen dengan bobot permintaan cukup besar secara bertahap (misalnya titik 3 dengan 171 kg), sehingga akumulasi muatan menurun secara proporsional.

Tabel 5. 1 Rute Optimal 1

<i>Route</i>	<i>Distance</i>	<i>Weight</i>	<i>Cum Weight</i>	<i>CE Cost</i>
1				
5	14,92	90	391	3,40
2	12,64	77	301	2,83
6	7,99	27	224	1,76
3	7,80	171	197	1,71
4	16,39	26	26	3,48
1	17,13	0	0	3,62
Total	76,87 (km)	391 (kg)		16,79 (kg/CO₂)

Walaupun jarak tempuhnya paling panjang dibandingkan rute lain, rute ini justru paling efektif dalam hal pemanfaatan kapasitas kendaraan, karena hampir mendekati batas

maksimal. Dengan kata lain, *trade-off* antara jarak dan beban distribusi pada rute ini relatif seimbang, meskipun kontribusi emisi yang ditimbulkan lebih besar dibandingkan rute lain.

Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan kapasitas mendekati maksimal dapat dijadikan acuan strategi konsolidasi muatan pada rute lain, meskipun jaraknya relatif panjang.

Tabel 5. 2 Detail Rute Optimal 1

Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Karbon (Kg/CO2)
1 – 5 – 2 – 6 – 3 – 4 – 1	76,87	Rp69,881	391	16,79

B. Rute 2 (Tahap 2)

Rute kedua hanya menempuh jarak 6,48 km dengan total distribusi 77 kg. Biaya operasional tercatat Rp5.890, dan emisi karbon yang timbul sebesar 1,38 kg CO₂. Dari sisi efisiensi jarak, rute ini merupakan salah satu yang paling singkat, sehingga cocok untuk melayani permintaan berkapasitas kecil dengan lokasi yang saling berdekatan.

Tabel 5. 3 Rute Optimal 2

Route	Distance	Weight	Cum Weight	CE Cost
2				
10	3,06	20	77	0,66
8	0,45	27	57	0,10
9	0,16	30	30	0,03
2	2,81	0	0	0,59
Total	6,48 (km)	77 (kg)		1,38 (kg/CO2)

Karakteristik rute ini menegaskan peranannya sebagai rute pelengkap yang tidak membebani kendaraan secara berlebih, namun mampu menekan konsumsi bahan bakar dan emisi. Dengan demikian, rute 2 lebih unggul dalam hal efisiensi lingkungan meskipun kontribusinya terhadap total volume distribusi tidak signifikan.

Tabel 5. 4 Detail Rute Optimal 2

Rute Terbentuk	Total Jarak	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery	Total Emisi Karbon (Kg/CO2)
----------------	-------------	-------------------------	-----------------------	-----------------------------

	(Km)		(Kg)	
2 – 10 – 8 – 9 – 2	6,48	Rp5.890	77	1,38

C. Rute 3 (Tahap 2)

Rute ketiga merupakan salah satu jalur yang kompleks dengan 12 titik layanan, menempuh jarak 53,09 km, dan membawa total beban 171 kg. Biaya operasional mencapai Rp48.265 dengan emisi karbon 11,43 kg CO₂. Meskipun jaraknya lebih pendek dibanding rute pertama, beban yang diangkut relatif lebih kecil.

Tabel 5. 5 Rute Optimal 3

<i>Route</i>	<i>Distance</i>	<i>Weight</i>	<i>Cum Weight</i>	<i>CE Cost</i>
3				
31	2,48	21	171	0,54
30	1,08	6	150	0,23
7	4,88	20	144	1,06
11	0,59	1	124	0,13
13	17,45	15	123	3,77
14	5,00	13	108	1,08
12	0,56	5	95	0,12
15	0,44	21	90	0,09
29	15,95	30	69	3,41
28	0,64	16	39	0,14
27	0,44	23	23	0,09
3	3,59	0	0	0,76
Total	53,09 (km)	171 (kg)		11,43 (kg/CO₂)

Hal ini menunjukkan strategi distribusi yang memprioritaskan penyebaran titik layanan secara merata ketimbang pengisian kapasitas penuh kendaraan. Dampaknya, rute ini efisien dalam cakupan area, tetapi kurang optimal dari sisi utilisasi kapasitas angkut. Emisi karbon yang relatif tinggi dibanding bobot distribusi menandakan adanya perjalanan panjang dengan beban parsial yang perlu dioptimalkan lebih lanjut.

Tabel 5. 6 Detail Rute Optimal 3

Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Karbon (Kg/CO2)
3 – 31 – 30 – 7 – 11 – 13 – 14 – 12 – 15 – 29 – 28 – 27	53,09	Rp48.265	171	11,43

D. Rute 4 (Tahap 2)

Rute keempat menempuh jarak 14,39 km dengan total distribusi 26 kg. Biaya operasional yang dikeluarkan sebesar Rp13.079, dan emisi karbon tercatat 3,05 kg CO₂. Dilihat dari bobot muatan, rute ini termasuk low-demand route, karena beban yang diangkut sangat kecil dibandingkan kapasitas kendaraan.

Tabel 5. 7 Rute Optimal 4

Route	Distance	Weight	Cum Weight	CE Cost
4				
21	6,41	4	26	1,36
20	0,25	3	22	0,05
17	1,98	19	19	0,42
4	5,75	0	0	1,21
Total	14,39 (km)	26 (kg)		3,05 (kg/CO2)

Namun demikian, pola ini diperlukan untuk memastikan layanan pelanggan di area dengan permintaan rendah tetap terpenuhi, meski kontribusinya terhadap efisiensi biaya dan emisi tidak sebesar rute lainnya. Kelemahannya, rasio jarak terhadap beban distribusi tergolong tidak efisien, karena kendaraan menempuh perjalanan cukup jauh untuk membawa muatan yang sangat terbatas.

Tabel 5. 8 Detail Rute Optimal 4

Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Karbon (Kg/CO2)
4 – 21 – 20 – 17 – 4	14,39	Rp13.079	26	3,05

E. Rute 5 (Tahap 2)

Rute kelima mencatat jarak 19,92 km dengan beban angkut 90 kg. Biaya operasional tercatat Rp18.106, sedangkan emisi karbon mencapai 4,24 kg CO₂. Dari sisi rasio beban terhadap jarak, rute ini relatif lebih baik dibanding rute 4 dan 6, karena distribusi muatan tersebar lebih merata dan mendekati angka optimal.

Tabel 5. 9 Rute Optimal 5

Route	Distance	Weight	Cum Weight	CE Cost
5				
22	7,65	11	90	1,64
23	0,72	27	79	0,15
25	2,22	26	52	0,47
24	2,91	13	26	0,62
26	0,41	13	13	0,09
5	6,00	0	0	1,27
Total	19,92 (km)	90 (kg)		4,24 (kg/CO2)

Efisiensi rute ini diperkuat dengan jarak yang masih moderat, sehingga tingkat pemanfaatan kapasitas lebih seimbang dengan energi yang dikonsumsi. Dengan kata lain, rute 5 dapat dikategorikan sebagai jalur menengah yang menggabungkan efisiensi jarak, biaya, dan kontribusi distribusi.

Tabel 5. 10 Detail Rute Optimal 5

Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Karbon (Kg/CO2)
5 – 22 – 23 – 25 – 24 – 26 – 5	19,92	Rp18.106	90	4,24

F. Rute 6 (Tahap 2)

Rute terakhir menempuh jarak 35,24 km dengan bobot muatan 27 kg. Biaya operasional mencapai Rp32.034 dengan emisi karbon 7,46 kg CO₂. Jika dibandingkan dengan rute lain, rute ini menampilkan rasio yang paling tidak efisien, karena jarak yang ditempuh cukup panjang sementara permintaannya sangat kecil.

Tabel 5. 11 Rute Optimal 6

Route	Distance	Weight	Cum Weight	CE Cost
6				
19	9,10	3	27	1,93
16	8,74	6	24	1,85
18	7,32	18	18	1,55
6	10,07	0	0	2,13
Total	35,24 (km)	27 (kg)		7,46 (kg/CO2)

Hal ini dapat disebabkan oleh lokasi pelanggan yang berada pada area terpencil sehingga tidak dapat digabungkan dengan rute lain. Konsekuensinya, meskipun secara layanan pelanggan rute ini penting, dari sisi sustainability rute 6 menjadi titik yang perlu diperhatikan karena menghasilkan emisi tinggi per kilogram barang yang diantar.

Tabel 5. 12 Detail Rute Optimal 6

Rute Terbentuk	Total Jarak (Km)	Total Biaya Operasional	Total Demand Delivery (Kg)	Total Emisi Karbon (Kg/CO2)
6 – 19 – 16 – 18 – 6	35,24	Rp32.034	27	7,46

Kondisi ini mengindikasikan perlunya strategi konsolidasi atau penjadwalan ulang untuk rute-rute dengan permintaan rendah agar kapasitas kendaraan dapat dimanfaatkan lebih baik. Selain itu, perbedaan karakteristik rute ini membuka peluang pengujian penggunaan variabel *time windows* untuk melihat apakah pengaturan jadwal layanan dapat meningkatkan efisiensi.

5.2 Analisis Holistik Terhadap Rute Optimasi

Berdasarkan keseluruhan hasil optimasi, komposisi jumlah beban kinerja pasca-optimasi sangat variatif. Hal ini dapat diketahui pada Rute 1 dengan pengiriman tahap 1 dari *Main hub* ke *hub* ini diketahui menyumbang sekitar 37% dari optimasi total jarak dan emisi karbon senilai 76,87 km dan 16,79 kg CO₂ sehingga menjadi rute awal mula pada sistem. Selanjutnya, diikuti Rute 3 yang menyumbang 26% dari optimasi senilai 53,09 km dan 11,43 kg CO₂ dan Rute 6 yang menyumbang 17% dari optimasi senilai 35,24 km dan 7,46 kg CO₂. Selain itu, Rute 2–5 secara kumulatif hanya menyerap sekitar 20% sisanya dengan Rute 2 sekitar 3%, Rute 4 sekitar 7% dan Rute 5 sekitar 10%.

Pola ini menunjukkan ketidaksamarataan beban kerja antar-rute dikarenakan pada tahap 1 algoritma berfokus untuk memusatkan pada konsolidasi muatan, sementara tahap 2 algoritma melebarkan rute untuk melayani permintaan yang tersebar. Intensitas emisi per km relatif kecil di kisaran 0,212–0,218 kg CO₂/km pada semua rute, ditandai dengan spesifikasi kendaraan dan faktor emisi yang seragam dengan variasi emisi hampir sepenuhnya dipengaruhi oleh jarak tempuh, sehingga bukan diakibatkan oleh perbedaan muatan.

Di sisi lain, bila dilihat secara emisi per rute, tiga rute dengan emisi terbesar (1, 3, 6) menyumbang sekitar 80% dari emisi optimasi (44,35 kg CO₂ total), sehingga performa sistem sangat sensitif terhadap efisiensi ketiganya. Secara operasional, Rute 1 merepresentasikan rute backbone (rute utama) dengan ciri-ciri jarak yang relatif panjang dengan muatan tinggi yang “mengunci” stabilitas dari jaringan pengiriman barang tahap 2, kemudian Rute 3 berperan sebagai jangkauan area menengah dengan muatan menengah, dan Rute 6 yang menjadi rute yang menyimpang karena jaraknya tergolong tinggi dengan permintaan rendah yang tetap memakan porsi emisi signifikan karena jarak relatif tinggi dengan volume layanan yang kecil.

Beberapa ringkasan pembahasan pada paragraf sebelumnya menunjukkan bahwa dengan demikian, hasil optimasi telah menata ulang rute menjadi lebih ringkas dan terstruktur—terlihat dari dominasi beberapa rute kunci dan minimnya perjalanan redundan—seraya

mempertahankan keterpaduan pickup–delivery sesuai kapasitas, di mana efisiensi jarak menjadi tuas utama yang menjelaskan penurunan emisi pada keseluruhan portofolio rute.

Dengan emisi per kilometer yang relatif seragam, faktor eksternal seperti kondisi lalu lintas menjadi aspek penting yang sebaiknya dipertimbangkan dalam perencanaan rute secara real-time. Dominasi beberapa rute tertentu terhadap total emisi juga membuka peluang kajian pada jaringan distribusi yang lebih luas, untuk melihat apakah pola serupa akan muncul pada sistem dengan kompleksitas lebih tinggi.

5.3 Analisis Penurunan Jarak dan Emisi Karbon

Analisis penurunan jarak dan emisi karbon bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas algoritma optimasi dalam menghasilkan rute distribusi yang lebih efisien dibandingkan dengan rute awal (*baseline*). Pada penelitian ini, optimasi dilakukan menggunakan *Evolutionary Algorithm* yang menggabungkan dua tujuan utama, yaitu meminimalkan total jarak tempuh dan emisi karbon secara bersamaan. Hasil perbandingan antara kondisi awal dan hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut:

Total Jarak Awal	Total Jarak Optimasi	Penurunan Total Jarak	Total Emisi Karbon Awal	Total Emisi Karbon Optimasi	Penurunan Total Emisi Karbon
88,19	76,87	11,32	18,52	16,79	1,73
80,8	6,48	74,32	16,97	1,38	15,59
69,82	53,09	16,73	14,66	11,43	3,23
69,01	14,39	54,62	14,49	3,05	11,44
79,88	19,92	59,96	16,78	4,24	12,54
63,04	35,24	27,8	13,24	7,46	5,78
Σ 450,74	205,98	244,76	94,66	44,35	50,31

Berdasarkan pada tabel diatas, Secara keseluruhan terjadi penurunan signifikan baik pada jarak maupun emisi karbon. Total jarak distribusi berkurang dari 450,74 km pada kondisi awal menjadi 205,98 km setelah optimasi, atau mengalami pengurangan sebesar 244,76 km (54,3%). Hal ini menunjukkan bahwa algoritma mampu merancang rute yang lebih ringkas dengan mengurangi redundansi perjalanan serta meningkatkan utilitas kendaraan. Sejalan dengan itu, total emisi karbon turun dari 94,66 kg CO₂ menjadi 44,35 kg CO₂, atau menurun sebesar 50,31

kg CO₂ (53,2%). Angka ini memperlihatkan bahwa penurunan jarak berkorelasi langsung dengan penurunan konsumsi bahan bakar, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan emisi karbon.

Berdasarkan visual per rute, pola penurunan menunjukkan variasi yang cukup beragam. Sebagai contoh, pada rute kedua terjadi penghematan jarak yang relatif kecil, yaitu hanya 6,48 km, namun berhasil menekan emisi karbon hingga 15,59 kg CO₂. Hal ini membuktikan bahwa optimasi tidak hanya bergantung pada pengurangan jarak semata, tetapi juga pada pengaturan distribusi beban kendaraan dan pemanfaatan kapasitas secara lebih seimbang. Sebaliknya, pada rute keempat, penurunan jarak mencapai 54,62 km (dari 69,01 km menjadi 14,39 km), namun pengurangan emisi karbon relatif lebih kecil, yaitu 11,44 kg CO₂. Kasus ini mengindikasikan bahwa meskipun jarak yang ditempuh sangat berkurang, faktor seperti efisiensi BBM kendaraan, parameter *constraint*, dan pola pergerakan antar-titik juga turut memengaruhi total emisi yang dihasilkan.



Gambar 5. 1 Penurunan Total Jarak

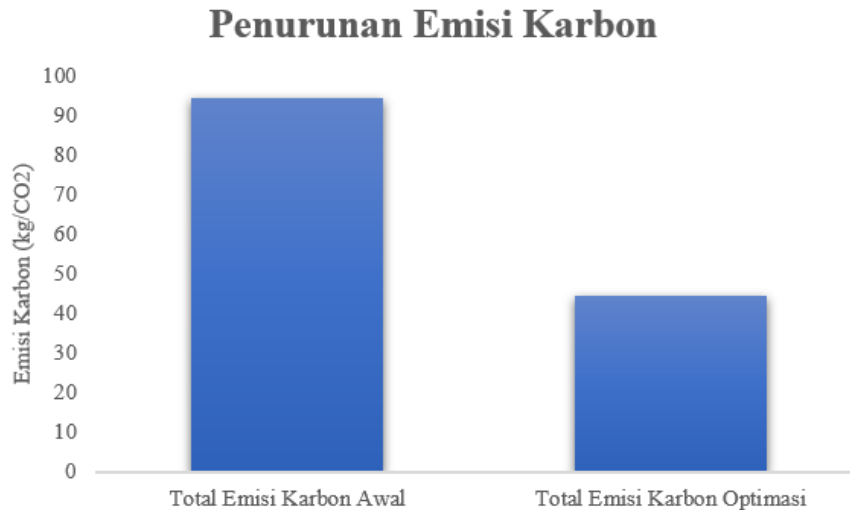
Dengan demikian, hasil optimasi ini memperlihatkan bahwa strategi minimasi jarak dan emisi karbon secara simultan dapat memberikan dampak positif yang seimbang terhadap kinerja operasional dan keberlanjutan lingkungan. Rata-rata pengurangan lebih dari 50% pada kedua aspek menunjukkan bahwa pendekatan menggunakan metode *Evolutionary Algorithm* tidak hanya relevan dari perspektif biaya logistik, tetapi juga mendukung target *green logistics* melalui pengurangan emisi karbon secara signifikan.

Namun, karena intensitas emisi per kilometer relatif konstan, validasi menggunakan data *real-time* seperti kondisi lalu lintas perlu dilakukan untuk melihat pengaruhnya terhadap hasil aktual.

5.4 Analisis Penurunan Biaya Operasional dan Dampak Lingkungan (*Sustainability*)

Hasil optimasi rute tidak hanya berpengaruh terhadap jarak tempuh, tetapi juga berdampak signifikan pada penurunan biaya operasional kendaraan dan aspek keberlanjutan. Dengan efisiensi konsumsi bahan bakar sebesar 11 km per liter, serta harga bensin rata-rata Rp10.000 per liter, dapat dihitung bahwa setiap pengurangan jarak akan langsung menurunkan biaya operasional dalam bentuk penghematan bahan bakar. Seperti contoh pada rute awal dengan penggunaan enam kendaraan dalam satu tahap distribusi, total jarak tempuh lebih tinggi sehingga konsumsi bahan bakar dan biaya operasional juga lebih besar. Dengan demikian, biaya operasional yang sebelumnya lebih tinggi berhasil ditekan, menunjukkan bahwa optimasi rute memberikan efisiensi finansial yang nyata.

Pengurangan konsumsi bahan bakar juga berkontribusi pada penurunan emisi karbon. Berdasarkan acuan SNI 7118-2:2008, Pergub DKI Jakarta No. 66 Tahun 2020, dan Permen LHK No. 8 Tahun 2023, emisi karbon dihitung dari jumlah bahan bakar yang digunakan dikalikan dengan faktor emisi (2,54 kg CO₂ per liter). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin kecil konsumsi bahan bakar, semakin rendah pula emisi karbon yang dilepaskan ke atmosfer.



Gambar 5. 2 Penurunan Emisi Karbon

Secara kuantitatif, pada rute awal total jarak tempuh adalah 450,74 km, dengan konsumsi bahan bakar sekitar 40,97 L dan biaya operasional sebesar Rp409.700, menghasilkan emisi karbon sebesar 94,66 kg CO₂. Setelah dilakukan optimasi, jarak tempuh berkurang menjadi 205,98 km, dengan konsumsi bahan bakar 18,73 L, biaya operasional Rp187.300, dan emisi

karbon 44,35 kg CO₂. Dengan demikian, terjadi penghematan jarak tempuh sebesar 244,76 km, konsumsi bahan bakar berkurang 22,24 liter, serta penghematan biaya sekitar Rp222.400.

Dari sisi *sustainability*, dengan mengacu pada kemampuan rata-rata satu pohon dalam menyerap karbon sebesar $\pm 21,77$ kg CO₂ per tahun, penurunan emisi karbon sebesar 50,31 kg CO₂ setara dengan kontribusi penyerapan oleh sekitar 2–3 pohon per tahun. Dengan cara ini, setiap pengurangan emisi dapat diinterpretasikan sebagai “jumlah pohon baru” yang ekuivalen dalam menyerap emisi tahunan.

Secara keseluruhan, optimasi rute tidak hanya menurunkan biaya operasional melalui efisiensi bahan bakar, tetapi juga memberikan dampak positif bagi aspek lingkungan dengan berkurangnya jejak karbon. Hal ini menegaskan bahwa strategi optimasi distribusi mampu memberikan manfaat lebih, yaitu efisiensi ekonomi sekaligus kontribusi pada keberlanjutan lingkungan di sektor transportasi logistik.

5.5 Analisis Holistik Terhadap *Evolutionary Algorithm*

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa pola rute yang diperoleh tidak selalu tampak sederhana atau lurus, bahkan pada beberapa kasus terlihat ruwet. Kondisi ini muncul karena proses optimasi tidak hanya berfokus pada satu tujuan, melainkan pada dua tujuan sekaligus (*multi-objective*), yaitu meminimalkan jarak tempuh dan menekan emisi karbon secara bersamaan.

Jika optimasi hanya dilakukan pada aspek jarak tempuh, maka rute cenderung lebih teratur, tidak saling bersilangan, dan menyerupai pola *nearest neighbor* yang umum. Hal ini karena algoritma hanya mempertimbangkan jarak total paling pendek sebagai ukuran efisiensi. Akan tetapi, ketika tujuan pengurangan emisi karbon juga dimasukkan, hasilnya menjadi berbeda. Perbedaan pola tersebut erat kaitannya dengan mekanisme yang digunakan dalam *evolutionary algorithm*. Algoritma ini bekerja dengan cara menghasilkan populasi solusi awal, kemudian melakukan proses seleksi, *crossover*, dan mutasi untuk memperbaiki kualitas solusi pada setiap generasi. Karena sifatnya *multi-objective*, algoritma tidak hanya mencari rute terpendek, tetapi juga menyeimbangkan faktor yang berpengaruh terhadap emisi karbon. Akibatnya, solusi yang muncul bisa berbentuk rute yang secara visual tampak lebih rumit, namun memiliki efisiensi emisi karbon yang lebih baik dibanding rute lurus murni hasil minimasi jarak tempuh saja.

Emisi karbon sendiri tidak semata-mata dipengaruhi oleh panjang rute, melainkan juga oleh distribusi muatan, kondisi beban ketika kendaraan menempuh segmen jauh, serta jumlah perhentian. Misalnya, sebuah rute yang sedikit lebih panjang justru dapat menghasilkan emisi lebih rendah karena kendaraan dapat mengurangi beban lebih awal, sehingga konsumsi bahan bakar pada perjalanan berikutnya lebih ringan. Oleh karena itu, pola rute yang terlihat tidak teratur merupakan hasil kompromi yang terbentuk dari mekanisme solusi oleh *evolutionary algorithm*.

Fenomena ini menunjukkan adanya *trade-off* dalam optimasi *multi-objective*. Rute yang tampak “tidak rapi” bukan berarti tidak efisien, melainkan merepresentasikan solusi yang dihasilkan oleh *evolutionary algorithm*. Dengan kata lain, metode ini memastikan bahwa rute terpilih tidak hanya meminimalkan jarak, tetapi juga memperhitungkan keberlanjutan operasional melalui pengurangan emisi karbon.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai optimasi rute distribusi pada kasus *Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery* (CVRPPD) di PT XYZ menggunakan metode *Evolutionary Algorithm* dan *What-if Analysis*, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penurunan Jarak Tempuh

Hasil optimasi rute mampu menurunkan total jarak tempuh distribusi secara signifikan. Pada kondisi awal, total jarak yang ditempuh armada mencapai 450,74 km, sedangkan setelah dilakukan optimasi jarak tersebut berkurang menjadi 205,98 km. Dengan demikian, diperoleh penurunan jarak sebesar 244,76 km atau sekitar 54,3% dari kondisi eksisting. Hal ini membuktikan bahwa penerapan *Evolutionary Algorithm* dalam kasus CVRPPD efektif dalam menghasilkan rute yang lebih efisien, sehingga mampu mengurangi pemborosan jarak yang ditempuh oleh kendaraan.

2. Penurunan Emisi Karbon

Efisiensi jarak tempuh memberikan pengaruh langsung terhadap penurunan emisi karbon. Pada kondisi awal, emisi karbon yang dihasilkan kendaraan distribusi tercatat sebesar 94,66 kg CO₂, kemudian menurun menjadi 44,35 kg CO₂ setelah optimasi. Dengan demikian, terdapat pengurangan sebesar 50,31 kg CO₂ atau sekitar 53,2%. Jika dikonversikan ke dalam ekuivalensi serapan karbon pohon, maka penurunan emisi ini setara dengan kontribusi 2–3 pohon dalam setahun. Hasil ini menunjukkan bahwa penelitian ini tidak hanya berdampak pada efisiensi teknis, tetapi juga memberikan manfaat nyata dalam aspek keberlanjutan (*sustainability*) melalui pengurangan jejak karbon yang dihasilkan armada distribusi.

3. Dampak Terhadap Biaya Operasional

Penurunan jarak tempuh dan emisi karbon berimplikasi positif terhadap efisiensi biaya operasional. Konsumsi bahan bakar yang sebelumnya mencapai 40,97 L berkurang menjadi 18,73 L setelah optimasi, sehingga terjadi penghematan sebesar 22,24 L. Jika diasumsikan harga bahan bakar sebesar Rp10.000 per liter, maka total biaya operasional dapat ditekan hingga Rp222.400 per siklus distribusi. Penurunan ini menunjukkan bahwa penerapan optimasi rute tidak hanya memberikan manfaat dalam aspek teknis dan lingkungan, tetapi

juga secara langsung menurunkan beban finansial perusahaan, sehingga mendukung keberlangsungan operasional PT XYZ secara lebih efisien dan berkelanjutan.

6.2 Saran

1. Bagi Perusahaan:

Perusahaan disarankan melakukan konsolidasi muatan dan penjadwalan adaptif pada rute dengan beban rendah namun jarak tempuh panjang, seperti Rute 4 dan Rute 6, agar kapasitas kendaraan lebih termanfaatkan dan emisi per kilogram barang dapat ditekan. Pola distribusi dengan utilisasi hampir penuh seperti pada Rute 1 perlu dijadikan pedoman strategi, karena konsolidasi muatan mampu menurunkan emisi relatif meskipun jaraknya panjang. Sistem optimasi rute berbasis *Evolutionary Algorithm* sebaiknya diimplementasikan secara berkelanjutan, mengingat hasilnya mampu mengurangi jarak, biaya, dan emisi secara signifikan. Perencanaan rute juga perlu didukung oleh data lalu lintas aktual melalui integrasi teknologi pemetaan digital, sehingga jarak tempuh riil di lapangan dapat lebih efisien. Selain itu, penerapan strategi ini dapat diarahkan pada kebijakan *green logistics* yang tidak hanya menekan biaya operasional tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan. Untuk menjamin konsistensi, perusahaan sebaiknya membangun sistem monitoring berbasis dashboard yang memuat indikator jarak, biaya, dan emisi sehingga evaluasi distribusi dapat dilakukan secara cepat dan terukur.

2. Bagi Penelitian Selanjutnya:

Pengembangan penelitian berikutnya dapat diarahkan pada penambahan variabel *time windows* untuk menguji apakah pengaturan jadwal layanan mampu meningkatkan efisiensi pada rute berjarak jauh dengan beban rendah. Validasi hasil optimasi menggunakan data real-time juga penting dilakukan, karena kondisi lalu lintas aktual sangat mungkin memengaruhi jarak tempuh, konsumsi bahan bakar, dan emisi. Skala penelitian dapat diperluas dengan melibatkan lebih banyak depot dan titik layanan agar diperoleh gambaran distribusi yang lebih kompleks dan menyeluruh. Selain itu, pengujian dengan membandingkan algoritma *Evolutionary* dengan metode metaheuristik lain, seperti *Ant Colony Optimization* atau *Particle Swarm Optimization*, akan memperkaya pemahaman tentang efektivitas dan keandalan solusi dalam berbagai kondisi distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anake Nagari, A. M. (2024). *Manajemen Logistik Dan Rantai Pasokan*. Serang, Banten: Sada Kurnia Pustaka .
- Badar, A. Q. (2021). *Evolutionary Optimization Algorithms*. Crc Press.
- Bin Tang, H. N. (2023). Dao2: Overcoming Overall Storage Overflow In Intermittently Connected Sensor Networks. *Ieee/Acm Transactions On Networking*.
- Microsoft. (2024). Introduction To What-If Analysis. Retrieved From Microsoft Support: https://support.microsoft.com/en-us/office/introduction-to-what-if-analysis-22bffa5f-e891-4acc-bf7a-e4645c446fb4?utm_source=chatgpt.com
- Petrus Siagian, D. L. (2023). Analisis Pemilihan Vendor Transportasi Pada Pt Xyz Untuk Antar Gula Aren Rute Bandung-Jakarta Menggunakan Metode Weight Product (Wp). *Journal Universitas Negeri Jakarta*, 16.
- Selvi, A. A. (2022). Real Life Optimization Problem Using Excel And Solver. *International Journal Of Research In Engineering, Science And Management*, 5(5), 155–157.
- Sugiyono. (2011). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan R&D*. Bandung. Alfabeta.
- Ahkamiraad, A., & Wang, Y. (2018). Capacitated and multiple cross-docked vehicle routing problem with pickup, delivery, and time windows. *Computers and Industrial Engineering*, 119, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.007>
- Amaluna, M. I., Alamsyah, N., Khofia, R., & Fauzi, M. (2022). Mengoptimalkan Biaya Transportasi Menggunakan Metode North West Corner (NWC) Dan Software Lingo. *Jurnal Manajemen Teknologi Dan Teknik Industri Universitas Kadiri*, 4(1), 26–36. <https://doi.org/10.30737/jurmatis.v4i1.1889.g1918>
- Baiq Putri Rizka Aulia. (2025). *Strategi Pengelolaan Vehicle Routing Problems dengan Mempertimbangkan Overflow Warehouse Menggunakan Exact method Untuk Minimasi Biaya dan Jarak (Studi Kasus: PT. Pos Logistik Indonesia)*.
- Borman, M. R., & Oktavia, M. (2021a). One Vehicle Routing Problem as the Best Solution for a Hangout Catering Company Expansion Plan with Lingo Software. *Faktor Exacta*, 13(4), 216. <https://doi.org/10.30998/faktorexacta.v13i4.7540>
- Borman, M. R., & Oktavia, M. (2021b). One Vehicle Routing Problem as the Best Solution for a Hangout Catering Company Expansion Plan with Lingo Software. *Faktor Exacta*, 13(4), 216. <https://doi.org/10.30998/faktorexacta.v13i4.7540>
- Candra Susanto, P., Ulfah Arini, D., Yuntina, L., & Panatap Soehaditama, J. (2024a). Konsep Penelitian Kuantitatif: Populasi, Sampel, dan Analisis Data (Sebuah Tinjauan Pustaka). *Jurnal Ilmu Multidisiplin*, 3. <https://doi.org/10.38035/jim.v3i1>
- Candra Susanto, P., Ulfah Arini, D., Yuntina, L., & Panatap Soehaditama, J. (2024b). Konsep Penelitian Kuantitatif: Populasi, Sampel, dan Analisis Data (Sebuah Tinjauan Pustaka). *Jurnal Ilmu Penelitian (JIM)*, 3. <https://doi.org/10.38035/jim.v3i1>
- Coals, B. U. T. (2023). INTEGRATION OF LOGISTICS FUNCTIONAL AREAS AND THE PLACE OF WAREHOUSING IN THEM. *International Journal Of Management And*

- Economics Fundamental*, 3(12), 50–57.
<https://doi.org/10.37547/ijmef/Volume03Issue12-10>
- Dumas, Y., Desrosiers, J., & Soumis, F. (1991). The pickup and delivery problem with time windows. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 54).
- Fylstra, D., Lasdon, L., Watson, J., & Waren, A. (1998). *Design and Use of the Microsoft Excel Solver*. 28, 29–55. <http://silmaril.smeal.psu.edu/pol.html>
- Ghea Almira Mafaza, & Erlinda Muslim. (2023). Perancangan Rute Distribusi Air Minum Dalam Kemasan dengan Capacitated Vehicle Routing Problem. *Matrik: Jurnal Manajemen & Teknik Industri-Produksi*, 23, 121–130. <https://doi.org/10.350587/Matrik>
- Heng, C. K., Zhang, A. N., Tan, P. S., & Ong, Y.-S. (2015). *Multi-objective Heterogeneous Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Pickup and Delivery for Urban Last Mile Logistics* (pp. 129–140). https://doi.org/10.1007/978-3-319-13359-1_11
- Heng Wang, Dechun Tian, Shiyu Jin, Jialu Zhang, & Guanfeng Li. (2019). Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Optimization with Consideration of Carbon Emission. *Application of Intelligent Systems in Multi-Modal Information Analytics (MMIA 2019)*, 1213–1222.
- Ievana, Y., Rumlatur, F., & Sukarno, I. (2024). Optimizing Fuel Tank Truck Distribution to The Gas Station at Fuel Terminal. In *Jurnal Logistik Indonesia* (Vol. 8, Issue 1). <http://ojs.stiami.ac.id>
- Kurniawan, A. C., Mustafa, F. W. M., & Redi, A. A. N. P. (2023). TRANSPORTATION OPTIMIZATION IN THE DISTRIBUTION OF GASLINK CNG C-CYL PRODUCTS USING ANYLOGISTIX CASE STUDY: PT GAGAS ENERGI INDONESIA. *INFOTECH Journal*, 9(1), 115–123. <https://doi.org/10.31949/infotech.v9i1.5202>
- Li, J., Du, J., & Li, L. (2018). Optimization of vehicle routing problem with fatigue driving based on genetic algorithm. *Proceedings of the 2018 Research in Adaptive and Convergent Systems, RACS 2018*, 37–42. <https://doi.org/10.1145/3264746.3264782>
- Lizami, M., & Rafiqi Wahyudi, M. (2024a). OPTIMASI RUTE DISTRIBUSI TEMBAKAU DI PT BAWANG EMAS MENGGUNAKAN SOLVER EXCEL. 3(2). <https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/biner>
- Lizami, M., & Rafiqi Wahyudi, M. (2024b). OPTIMASI RUTE DISTRIBUSI TEMBAKAU DI PT BAWANG EMAS MENGGUNAKAN SOLVER EXCEL. 3(2). <https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/biner>
- Microsoft Support. (2025a). *Define and solve a problem by using Solver*. <https://support.microsoft.com/en-us/office/define-and-solve-a-problem-by-using-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>
- Microsoft Support. (2025b). *Define and Solve Problem by What-If Analysis*. https://support.microsoft.com/id-id/office/pengantar-analisis-bagaimana-jika-22bffa5f-e891-4acc-bf7a-e4645c446fb4?utm_source=chatgpt.com

- Muda Adhana, D., & Hendriyani, C. (2023). *Analysis of Third Party Logistic Service in Indonesia*. <https://ejournal.upi.edu/index.php/image>
- Muhammad, A., Achmad, F., Sutina Azis, I., Elisa, C., Katili, M., Teknik, J., Agro, I., Manufaktur, J. T., & Ati Makassar, P. (2023). Penentuan Rute Kendaraan Dengan Jendela Waktu Untuk Distribusi Produk Oleh PT. X. *Journal of Agro-Industry Engineering Research (JAIER)*, 2(1).
- Mulla, F. M. (2024). Leveraging Data Analytics for Advanced Optimization in Warehouse Management Systems. *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 08(12), 1–7. <https://doi.org/10.55041/IJSREM11747>
- Natalie, K., & Siregar, B. (2024). *FARABI Jurnal Matematika dan Pendidikan Matematika Analisis Data dalam Supply Chain Management: Klasifikasi dan Pemantauan Data Gudang PT Rajawali Nusantara Indonesia*. 7(1), 16–24.
- Natasya Sondang Panjaitan, & Yelita Anggiane Iskandar. (2024). Optimasi Rute Distribusi BBM di SPBU Beririsan Wilayah Kabupaten Cikampek Menggunakan Anylogistix. *Jurnal Ilmiah Teknik Informatika*. <https://doi.org/10.37817/tekinfo.v25i1>
- Nurdiansyah, D., Maulana, D., Tresnadi, A., & Fauzi, M. (2021). *OPTIMASI BIAYA PENGIRIMAN TELUR AYAM MENGGUNAKAN PENDEKATAN MODEL TRANSPORTASI NWC DAN SOFTWARE LINGO*. 2(3). <https://doi.org/10.46306/lb.v2i3>
- Nurlathifah, E., Kusumo, F., Pudjiantoro, P., Ammar, N., Sutopo, W., & Yuniaristanto, D. (2020). Optimalisasi Rute Distribusi BBM dengan Penerapan Capacitated Vehicle Routing Problem dan Excel Solver di Kabupaten Magetan. *Jurnal Teknoin*, 26(2), 116–126.
- Palamutçuoğlu, B. T., Çavuşoğlu, S., Çamlı, A. Y., Virlanuta, F. O., Bacalum, S., Züngün, D., & Moiescu, F. (2025). Solution of the Capacity-Constrained Vehicle Routing Problem Considering Carbon Footprint Within the Scope of Sustainable Logistics with Genetic Algorithm. *Sustainability (Switzerland)*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/su17020727>
- Patil, G. B., & Dolas, D. R. (2015). Role of third party logistics in supply chain management. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Peltier, C. (2017). “What If” analysis: Benefits of utilizing a “What If” analysis in excel. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 46(12), 6119–6129. <https://doi.org/10.1080/03610926.2015.1118511>
- Pradita, S. P., Ongkunaruk, P., & Leingpibul, T. (2020). The Use of Supply Chain Risk Management Process (SCRMP) in Third-Party Logistics Industry: A Case Study in Indonesia. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Agroindustri*, 9, 1–10. <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2020.009.01.1>
- Puspitasari, F. H., & Kurniawan, V. R. B. (2021). Designing Optimal Distribution Routes using a Vehicle Routing Problem (VRP) Model in a Logistics Service Provider. *IOP Conference*

- Series: *Materials Science and Engineering*, 1071(1), 012005.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1071/1/012005>
- Rusanti, I., & Dewantara Putra Widyana, R. (2024). *OPTIMALISASI RUTE DISTRIBUSI PENGIRIMAN (BUAH NAGA) MENGGUNAKAN METODE SAVING MATRIX PADA GUDANG MAKMUR BANYUWANGI* (Vol. 80, Issue 11).
<http://jurnal.kolibi.org/index.php/neraca>
- Santoso Wijanarko, W., & Sepadyati, N. (2022). Optimasi Rute Pengiriman Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows PT. X. In *Jurnal Titra* (Vol. 10, Issue 2).
- Saputro, R. A. T., Kasanah, Y. U., Marddani, O. R., & Niami, K. (2024). Optimasi Rute Distribusi Unggas Berbasis Network Analysis-GIS Menggunakan Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Window Pickup and Delivery. *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya*, 10(1), 51–60.
<https://doi.org/10.30656/intech.v10i1.7712>
- Sepadyati, N., Prayogo, L. D., Ulin, J. A., Chandra, J. N., & Frederika, V. (2024). Transportation Distances Reduction at Surabaya Distribution Center Using Anylogistix Software. In *Journal of Industrial Engineering and Education* (Vol. 2, Issue 1).
- Sepadyati, N., Prayogo, L. D., Ulin, J., Chandra, J., & Frederika, V. (2023). *Minimasi Jarak Transportasi PengirimanBarang Pada Perusahaan Distribution Center Surabaya Menggunakan Software Anylogistix*.
- Sitek, P., Wikarek, J., Rutczyńska-Wdowiak, K., Bocewicz, G., & Banaszak, Z. (2021). Optimization of capacitated vehicle routing problem with alternative delivery, pick-up and time windows: A modified hybrid approach. *Neurocomputing*, 423, 670–678.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.02.126>
- Sri Maharani, M. B. (2018). ANALISIS HUBUNGAN RESILIENSI MATEMATIK TERHADAP KEMAMPUAN PEMECAHAN MASALAH SISWA PADA MATERI LINGKARAN. *Jurnal Pembelajaran Matematika Inovatif*, 1.
- Sun, G., & Li, T. (2025). Optimizing Logistics in Forestry Supply Chains: A Vehicle Routing Problem Based on Carbon Emission Reduction. *Forests*, 16(1).
<https://doi.org/10.3390/f16010062>
- Wankhede, S., & Sohani, N. (n.d.). *Evaluation Of Third Party Logistics In Supply Chain*.
www.ijert.org
- Wankhede, S., & Sohani, N. (2013). Evaluation Of Third Party Logistics In Supply Chain. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2. www.ijert.org
- Yulianto, S., Gede, I., Widyadana, A., & Sepadyati, N. (2020). Optimasi Rute Pengiriman pada CV. X Menggunakan Metode Evolutionary Algorithm. *Jurnal Titra*, 10(1), 17–22.
- Zaki Abdurrahman. (2025). *ALGORITMA SIMULATED ANNEALING UNTUK MINIMASI BIAYA DALAM VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICKUP AND DELIVERY WITH TIME WINDOWS DENGAN OVERFLOW WAREHOUSE (Studi Kasus: PT. Pos Logistik Indonesia)*.

LAMPIRAN

A. Coordinate Converter (Latitude Longitude to X, Y)

File Home Insert Page Layout Formulas Data Review View Developer Help

Clipboard Font Alignment Number Styles Cells Editing

AT28

Conversion of UTM Coordinates to Decimal Degrees

Enter your coordinates

UTM			Decimal Degrees		Degrees, minutes and seconds		UTM waypoint Garmin
East	North	Band Lat.	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	
706,96401	9317,21713	C	-85,53207920	-170,16525305	85° 31' 55,485" S	170° 9' 54,911" W	17 C 707 9317
707,18197	9316,61647	C	-85,53208123	-170,16532153	85° 31' 55,492" S	170° 9' 55,157" W	17 C 707 9317
707,86286	9316,97391	C	-85,53208726	-170,16527942	85° 31' 55,514" S	170° 9' 55,006" W	17 C 708 9317
708,93895	9317,04894	C	-85,53209686	-170,16526902	85° 31' 55,549" S	170° 9' 54,968" W	17 C 709 9317
697,71249	9318,01695	C	-85,53199650	-170,16517688	85° 31' 55,187" S	170° 9' 54,637" W	17 C 698 9318
703,07974	9317,87624	C	-85,53204444	-170,16518401	85° 31' 55,36" S	170° 9' 54,662" W	17 C 703 9318
711,4102	9320,33123	C	-85,53211849	-170,16488868	85° 31' 55,627" S	170° 9' 53,599" W	17 C 711 9320
711,30581	9320,39122	C	-85,53211755	-170,16488198	85° 31' 55,623" S	170° 9' 53,575" W	17 C 711 9320
711,20994	9320,51488	C	-85,53211668	-170,16486797	85° 31' 55,62" S	170° 9' 53,525" W	17 C 711 9321
711,68976	9320,61924	C	-85,53212095	-170,16485520	85° 31' 55,635" S	170° 9' 53,479" W	17 C 712 9321
711,48336	9320,91408	C	-85,53211907	-170,16482175	85° 31' 55,629" S	170° 9' 53,358" W	17 C 711 9321
712,347	9301,731	C	-85,53212929	-170,16701896	85° 31' 55,665" S	170° 10' 1,268" W	17 C 712 9302
708,3554	9303,7493	C	-85,53209339	-170,16679431	85° 31' 55,536" S	170° 10' 0,46" W	17 C 708 9304
712,7329	9301,3321	C	-85,53213279	-170,16706404	85° 31' 55,678" S	170° 10' 1,431" W	17 C 713 9301
712,0341	9301,4216	C	-85,53212654	-170,16705495	85° 31' 55,656" S	170° 10' 1,398" W	17 C 712 9301
708,033	9302,8771	C	-85,53209063	-170,16689481	85° 31' 55,526" S	170° 10' 0,821" W	17 C 708 9303
702,66221	9307,59247	C	-85,53204206	-170,16636335	85° 31' 55,351" S	170° 9' 58,908" W	17 C 703 9308
702,62458	9307,8138	C	-85,53204169	-170,16633805	85° 31' 55,35" S	170° 9' 58,817" W	17 C 703 9308
701,68291	9308,88182	C	-85,53203314	-170,16621722	85° 31' 55,319" S	170° 9' 58,382" W	17 C 702 9309
701,45456	9309,16198	C	-85,53203107	-170,16618549	85° 31' 55,312" S	170° 9' 58,268" W	17 C 701 9309
701,5827	9309,3792	C	-85,53203218	-170,16616038	85° 31' 55,316" S	170° 9' 58,177" W	17 C 702 9309
690,16238	9316,78	C	-85,53192925	-170,16533129	85° 31' 54,945" S	170° 9' 55,193" W	17 C 690 9317
690,65441	9317,305	C	-85,53193357	-170,16527029	85° 31' 54,961" S	170° 9' 54,973" W	17 C 691 9317
691,34394	9317,344	C	-85,53193972	-170,16526467	85° 31' 54,983" S	170° 9' 54,953" W	17 C 691 9317

DATUM WGS84

a (semi major axis) 6378137

b (semi minor axis) 6356752,314

Eccentricity 0,081819191

2nd Excentric. (e') 0,082094438

e'² 0,006739497

c (polar radius of curvature) 6399593,626

ENTRY DATA

Zone 17

Hemisphere S

UTM to Decimal Degrees Decimal Degrees to UTM G-M-S to Decimal Degrees Decimal Degrees to G-M-S

Ready Accessibility: Investigate

B. Distance Matrix (Euclidean Distance)

File

Home

Insert

Page Layout

Formulas

Data

Review

View

Developer

Help

C. Initial Pengolahan Data CVRPPD

File

Home

Insert

Page Layout

Formulas

Data

Review

View

Developer

Help

<