

**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)

TUGAS AKHIR

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



Nama : Zaki Abdurrahman

No. Mahasiswa : 21522121

**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, 23 Juni 2025



(Zaki Abdurrahman)

21522121

SURAT BUKTI PENELITIAN



FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI

Dehong KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Sekeloa Baru 1A, D. Yogyakarta 55584
T: (0271) 855444 ext-4110, 4100
F: (0271) 855037
E: lib@uii.ac.id
W: lib.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 112/Ka.lab SIMANTI/20/Lab.SIMANTI/VI/2025

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Zaki Abdurrahman

Nim : 21522121

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 " **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)**". Mulai pelaksanaan penelitian 3 Desember 2024 sampai 14 Juni 2025.

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

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Yogyakarta, 11 Juni 2025

Kepala Laboratorium
Sistem Manufaktur Terintegrasi

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

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**ALGORITMA *SIMULATED ANNEALING* UNTUK MENGURANGI BIAYA DALAM
VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICKUP AND DELIVERY WITH TIME
WINDOWS DENGAN *OVERFLOW WAREHOUSE*
(Studi Kasus: PT. Pos Logistik Indonesia)**

TUGAS AKHIR**ISLAM**

Disusun Oleh :

Nama : Zaki Abdurrahman

No. Mahasiswa : 21522121



Yogyakarta, 23 Juni 2025

Dosen Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**ALGORITMA *SIMULATED ANNEALING* UNTUK MENGURANGI BIAYA DALAM
*VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICKUP AND DELIVERY WITH TIME
WINDOWS DENGAN OVERFLOW WAREHOUSE***
(Studi Kasus: PT. Pos Logistik Indonesia)

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Zaki Abdurrahman

No. Mahasiswa : 21522121

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, 23 - Juni - 2025

Tim Penguji

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

Ketua

Wahyudhi Sutrisno, S.T., M.M., M.T.

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. M. Ridwan Andi Purnomo, ST., M.Sc., Ph.D., IPM

NIK. 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini saya persembahkan dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, khususnya untuk kedua orang tua saya, Irwan Rauf dan Wahyuni, yang senantiasa selalu memberikan doa, kasih sayang, dan dukungan tanpa henti, serta untuk saudara-saudara saya. Saya bersyukur karena akhirnya dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan segala proses dan perjuangan yang telah dilalui, dan saya juga berterima kasih kepada diri sendiri atas ketekunan dan kesabaran dalam menjalaninya. Semoga karya penelitian ini menjadi awal dari kontribusi yang lebih besar, membawa manfaat bagi sesama, dan keberkahan dalam setiap langkah ke depan.

MOTTO

“Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan” (QS. Al-Insyirah: 6)

“Siapa yang bertawakal kepada Allah, niscaya Allah akan mencukupkan (keperluan)-nya.”
(QS. At-Talaq: 3)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam, atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan seluruh umat yang senantiasa bertakwa kepada-Nya. Berkat rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir yang berjudul “Algoritma *Simulated Annealing* Untuk Minimasi Biaya Dalam *Vehicle Routing Problem With Pickup and Delivery with Time Windows Dengan Overflow Warehouse*”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai bagian dari pemenuhan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan jenjang pendidikan Strata-1 pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Dalam proses penyusunan laporan ini, penulis memperoleh berbagai bantuan, arahan, serta dukungan dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis ingin 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. Bapak Wahyu Kurniawan, S.T., M.T., CISCIP dan Ibu Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc. yang telah memberikan bimbingan serta wadah untuk peneliti sehingga dapat melaksanakan penelitian tugas akhir di PT. Pos Logistik Indonesia dengan baik
6. Kedua orang tua tercinta yaitu Irwan Rauf dan Wahyuni yang telah memberikan penulis dukungan dan motivasi agar terus semangat dan bertanggung jawab atas apa yang sudah dimulai.
7. Saudara kandung tersayang Haris Aziz Yahya, Raihanah Syahrani dan Raisya Rahimah yang telah memberikan semangat dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir.
8. Keluarga besar penulis yang berada di Balikpapan dan Makassar atas dukungan dan doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Asisten Laboratorium Sistem Manufaktur 2021, Baiq Putri Rizka Aulia, Latifah Fitri N.W., Nabila Lintang Kirana, Rifki Nurul Mukarim, Nabila Aulia Azizah, Zhafif Radithya Nugroho dan Dhinar Elma Arifa yang menjadi teman seperjuangan, meberikan semangat, dukungan serta doa yang tiada henti sehingga menjadi semangat bagi penulis hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.
10. Baiq Putri Rizka Aulia yang telah membersamai penulis dalam perjalanan penulisan Tugas Akhir ini, memberikan motivasi, dukungan serta doa sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.
11. Sahabat sejak SMA Agam Bagus Saputra, Zaidan Farid, Rifqi Passhya, Wisnu Satrion, Nabila Zahra Hairunnisa Salim, Cecillia Oktaviona Ismael, dan Syabina Trisnawati yang telah memberikan doa dan semangat dalam penulisan Tugas Akhir ini.

12. Teman-teman semasa kuliah yang telah mendukung dan memberi semangat kepada penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
13. Bapak Heri Susilo dan teman-teman Asisten Laboratorium Sistem Manufaktur 2020 dan 2022, yang telah mendukung, memberi semangat dan kebersamai penulis selama periode menjamabat sebagai asisten laboratorium.
14. Segenap keluarga besar teman teman jurusan Teknik Industri Angkatan 2021 yang telah memberikan motivasi dan dukungannya.

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, 14 Juni 2024



Zaki Abdurrahman
21522121

ABSTRAK

Manajemen logistik memegang peran krusial dalam mendukung efektivitas distribusi dan efisiensi biaya perusahaan. Salah satu tantangan yang dihadapi dalam operasional logistik adalah penentuan rute kendaraan yang optimal atau *Vehicle Routing Problem* (VRP). PT Pos Logistik Indonesia menghadapi permasalahan tidak optimalnya pemanfaatan hub yang berdampak pada pembentukan rute distribusi yang kurang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan rute distribusi optimal dengan memanfaatkan hub sebagai *overflow warehouse*, menggunakan pendekatan *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows* (VRPPDTW) dan algoritma *Simulated Annealing* (SA). Proses pencarian solusi dilakukan melalui *insertion heuristic* sebagai solusi awal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SA mampu menurunkan jarak tempuh distribusi secara signifikan. Pada data 250 titik, jarak tempuh berkurang dari 1.614,77 km menjadi 541,98 km dan jumlah kendaraan dari 20 menjadi 14 unit, dengan penghematan biaya operasional hingga 36,73%. Sebaliknya, pada skala distribusi lebih kecil (110 titik), meskipun jarak tempuh menurun, peningkatan jumlah kendaraan menyebabkan kenaikan total biaya. Kesimpulannya, algoritma SA efektif dalam mengoptimalkan rute distribusi, terutama pada skala besar, dan memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi biaya operasional perusahaan.

Kata Kunci: *Vehicle Routing Problem*, *Simulated Annealing*, Optimasi, Minimasi Biaya, Rute Distribusi

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| PERNYATAAN KEASLIAN..... | ii |
| SURAT BUKTI PENELITIAN | iii |
| LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING | iv |
| LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI | v |
| HALAMAN PERSEMBAHAN..... | vi |
| MOTTO..... | vii |
| KATA PENGANTAR..... | viii |
| ABSTRAK | x |
| DAFTAR ISI..... | xi |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| DAFTAR GAMBAR | xiv |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 4 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 4 |
| 1.4 Manfaat Penelitian..... | 5 |
| 1.5 Batasan Penelitian | 5 |
| 1.6 Sistematika Penulisan..... | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 7 |
| 2.1 Kajian Literatur | 7 |
| 2.2 Landasan Teori | 12 |
| 2.2.1 <i>Supply Chain Management</i> | 12 |
| 2.2.2 Manajemen Logistik | 14 |
| 2.2.3 <i>Vehicle Routing Problem (VRP)</i> | 17 |
| 2.2.4 <i>VRPPD with Time Windows (VRPPDTW)</i> | 19 |
| 2.2.5 <i>Insertion Heuristics</i> | 21 |
| 2.2.6 Simulated Annealing | 22 |
| BAB III METODE PENELITIAN..... | 25 |
| 3.1 Objek Penelitian | 25 |
| 3.2 Instrumen Penelitian..... | 26 |
| 3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder | 26 |
| 3.4 Metode Pengumpulan Data | 27 |
| 3.5 Populasi dan Sampel..... | 27 |
| 3.5.1 Populasi | 27 |
| 3.5.2 Sampel | 27 |
| 3.6 Alur Penelitian..... | 28 |
| BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA | 31 |
| 4.1 Pengumpulan Data..... | 31 |
| 4.1.1 Profil Perusahaan | 31 |
| 4.1.2 Formulasi Masalah | 33 |
| 4.1.3 Model Matematis | 34 |

| | | |
|------------------------------------|---|-----|
| 4.1.4 | Data Penelitian..... | 37 |
| 4.1.5 | Matriks Jarak..... | 43 |
| 4.1.6 | Rute Perusahaan..... | 43 |
| 4.2 | Pengolahan Data..... | 44 |
| 4.2.1 | Penetapan Parameter..... | 44 |
| 4.2.2 | Algoritma <i>Simulated Annealing</i> | 45 |
| 4.2.3 | Hasil Optimasi..... | 46 |
| BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN..... | | 48 |
| 5.1 | Analisis Hasil Rute..... | 48 |
| 5.2 | Analisis Biaya..... | 53 |
| 5.3 | Analisis Biaya Analisis Perbandingan Kebijakan Perusahaan dan Usulan..... | 55 |
| BAB VI KESIMPULAN..... | | 59 |
| 6.1 | Kesimpulan..... | 59 |
| 6.2 | Saran..... | 60 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 61 |
| LAMPIRAN..... | | B-1 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2. 1 Posisi Penelitian | 12 |
| Tabel 4. 1 Data Penelitian | 38 |
| Tabel 4. 2 <i>Time windows</i> | 42 |
| Tabel 4. 3 Data Kendaraan | 42 |
| Tabel 4. 4 Matriks Jarak | 43 |
| Tabel 4. 5 Rute Perusahaan | 44 |
| Tabel 4. 6 <i>Pseudocode simulated annealing</i> | 45 |
| Tabel 4. 7 Hasil optimasi tahap 1 | 46 |
| Tabel 4. 8 Hasil optimasi tahap 2 | 47 |
| Tabel 5. 1 Rute tahap 1 | 48 |
| Tabel 5. 2 <i>Load dan time windows</i> tahap 1 | 49 |
| Tabel 5. 3 Rute tahap 2 | 50 |
| Tabel 5. 4 <i>Load dan time windows</i> tahap 2 | 51 |
| Tabel 5. 5 Biaya BBM untuk tahap 1 | 53 |
| Tabel 5. 6 Biaya BBM untuk tahap 2 | 54 |
| Tabel 5. 7 Total biaya dan jarak | 55 |
| Tabel 5. 8 Biaya kendaraan | 57 |
| Tabel 5. 9 Biaya petugas | 57 |
| Tabel 5. 10 Perbandingan 110 dan 250 titik | 57 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 <i>Flow in supply chain</i> | 13 |
| Gambar 2. 2 <i>Types of logistics service providers</i> | 16 |
| Gambar 2. 3 Klasifikasi VRP (Gencer, Aydogan, & Cetin, 2010) | 19 |
| Gambar 3. 1 Logo PT. Pos Logistik Indonesia | 25 |
| Gambar 3. 2 Alur penelitian | 28 |
| Gambar 4. 1 Budaya perusahaan | 31 |
| Gambar 4. 2 <i>Core value</i> | 32 |
| Gambar 5. 1 Grafik perbandingan rute perusahaan dan usulan | 56 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Supply chain management (SCM) merupakan konsep yang berkaitan erat dengan hubungan antara pemasok dan perusahaan, hubungan perusahaan dengan pelanggan, serta proses berbagi informasi di antara para mitra. Selain itu, SCM juga berperan penting dalam memengaruhi kinerja manajemen Supply chain di suatu perusahaan (Permana, 2023). Kegiatan SCM juga berhubungan erat dengan proses distribusi, berdasarkan penelitian dari Ridwan & Gaffar (2022) selain mengontrol persediaan, perusahaan juga mampu melakukan proses distribusi dengan efisien yang meliputi aktivitas penekanan biaya, lokasi, dan ketepatan waktu pendistribusian. Oleh karena itu pendistribusian yang baik dengan pengendalian biaya, penentuan rute lokasi, dan memastikan ketepatan waktu dalam pengiriman dapat meningkatkan efisiensi operasional perusahaan.

Manajemen distribusi dan transportasi merupakan bagian penting dalam *supply chain mangament* (SCM) yang biasa dikenal dengan manajemen logistik (Pujawan & Mahendrawathi, 2017). Manajemen logistik memiliki peran penting dalam merancang, mengimplementasikan, dan mengendalikan aliran barang, layanan, serta informasi secara efisien. Proses ini mencakup pengelolaan mulai dari tahap awal hingga barang atau layanan tersebut sampai ke konsumen akhir, dengan tujuan utama untuk memenuhi kebutuhan pelanggan secara optimal (Kusumastuti, 2014). Berdasarkan penelitian oleh Sitorus, Manumono, & Ambasari (2023) menerangkan bahwa implementasi manajemen logistik memberikan berbagai manfaat bagi perusahaan, termasuk dalam pengelolaan persediaan, transportasi, fasilitas, layanan, serta aspek manajemen dan administrasi. Proses ini mencakup pengaturan transportasi masuk (*inbound*), transportasi keluar (*outbound*), kemampuan dalam menyelesaikan masalah, dan penyampaian informasi kepada konsumen secara efektif. Akan tetapi dalam terdapat beberapa masalah yang terdapat dalam manajemen logistik, yaitu masalah yang berkaitan dengan rute kendaraan yang digunakan dalam pendistribusian barang atau jasa yang dikenal dengan sebutan *vehicle routing problem* (VRP)

Sektor logistik memegang peranan penting dalam mendukung laju pertumbuhan ekonomi nasional. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) (2023), pada kuartal

ketiga tahun 2023, kontribusi sektor ini terhadap produk domestik bruto (PDB) mencapai 5,98% dengan pertumbuhan tertinggi pada 2023 yaitu sebesar 13,96%. Meskipun tergolong industri yang sangat kompleks karena banyaknya komponen yang dimilikinya, termasuk manajemen rantai pasokan, pergudangan, dan transportasi, logistik nasional masih menunjukkan potensi pertumbuhan yang sangat menjanjikan di masa mendatang. Industri ini berpotensi meningkatkan daya saing perekonomian nasional secara signifikan dengan pengelolaan yang lebih baik dan penggunaan teknologi yang tepat (Budiyanti, 2023).

Vehicle routing problem (VRP) adalah suatu permasalahan yang berkaitan dengan penentuan rute terbaik untuk mengirimkan atau mengumpulkan barang maupun jasa dari satu atau lebih depo ke sejumlah lokasi pelanggan, dengan tetap memperhatikan berbagai batasan yang harus dipenuhi (Sinaga, 2015). Permasalahan VRP umumnya digambarkan sebagai usaha merancang rute dengan biaya terendah dari satu depo ke sejumlah lokasi yang tersebar secara geografis (seperti kota, toko, gudang, sekolah, atau pelanggan). Rute tersebut harus dirancang sedemikian rupa sehingga setiap lokasi hanya dikunjungi satu kali (Bräysy, 2001). Oleh karena itu penting untuk suatu Perusahaan mengoptimalkan rute yang akan digunakan untuk mengantarkan produk/jasa dengan optimal agar dapat mengurangi biaya yang akan dikeluarkan dalam proses pendistribusian.

PT Pos Logistik Indonesia adalah anak perusahaan dari PT Pos Indonesia (Persero) yang berfokus pada layanan logistik. Perusahaan ini memiliki berbagai divisi yang menangani pergudangan, dan transportasi. Dengan dukungan tenaga kerja profesional, PT Pos Logistik Indonesia terus merancang strategi bisnis dan logistik yang optimal untuk meningkatkan daya saingnya. Sejak resmi beroperasi secara mandiri pada tahun 2012, perusahaan ini telah berkembang menjadi salah satu pemain utama di industri logistik di Indonesia. Berdasarkan hasil dari wawancara yang telah dilakukan, PT Pos Logistik Indonesia menghadapi tantangan dalam pengelolaan *warehouse (hub)*. Saat ini, operasional pergudangan hanya berfokus pada *main hub*, sehingga beberapa *hub* lainnya tidak lagi digunakan secara optimal. Hal ini berdampak pada aset yang menganggur, potensi efisiensi distribusi yang tidak termanfaatkan, serta meningkatnya beban operasional di *main hub* akibat keterbatasan kapasitas penyimpanan. Hal ini berkontribusi pada pembentukan rute yang tidak optimal dan berdampak langsung terhadap efisiensi jarak tempuh kendaraan. Permasalahan ini perlu segera diselesaikan agar operasional logistik lebih optimal dan aset perusahaan termanfaatkan optimal. Jika *hub* yang tersedia dapat digunakan kembali, perusahaan memiliki peluang untuk meningkatkan efisiensi

distribusi. *Hub* tersebut bisa dimanfaatkan sebagai titik bantu (*overflow warehouse*) untuk mengurangi beban main hub dan mendekatkan barang ke pelanggan. Oleh karena itu, penting bagi perusahaan untuk mengoptimalkan fasilitas yang dimiliki agar operasional logistik menjadi lebih efektif. Pemanfaatan *hub* secara merata juga dapat membantu perusahaan mengurangi jarak tempuh kendaraan dan menghemat biaya distribusi.

Heuristik spesifik terhadap suatu permasalahan memiliki risiko terjebak pada solusi lokal yang tidak optimal. Sehingga, untuk menghindari kondisi ini, metaheuristik telah banyak digunakan dan dianggap sebagai pendekatan yang efektif (Dumas, Desrosiers, & Soumis, 1991). Metaheuristik merupakan metode pencarian solusi yang digunakan untuk menjelajahi ruang solusi yang sangat besar dari suatu masalah optimasi kombinatorial, dengan menerapkan strategi tertentu agar tidak terjebak atau mampu keluar dari solusi lokal yang tidak optimal (Sartori, 2019). Algoritma *Simulated Annealing* (SA) terinspirasi dari analogi proses *annealing* dalam fisika material, yang kemudian diterapkan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan optimasi yang kompleks (Kirkpatrick, Vecchi, & Gelatt, 1983). SA dapat dilihat sebagai metode pencarian lokal yang sesekali menerima solusi dengan nilai biaya yang lebih tinggi atau kurang optimal. Strategi ini memungkinkan algoritma keluar dari jebakan solusi minimum lokal (Bertsimas & Tsitsiklis, 1993). Dalam proses pembentukan kristal pada suatu material, material dipanaskan hingga suhu tinggi sehingga atom-atomnya bergerak bebas dengan energi besar. Setelah itu, untuk mendapatkan hasil yang optimal dengan energi yang minimum, suhu diturunkan secara perlahan agar atom-atom dapat menata diri pada posisi yang optimum (Priwarnela, 2012).

Simulated Annealing sering digunakan dalam menyelesaikan masalah seperti *vehicle routing problem* (VRP). Penelitian yang dilakukan oleh Li & Lim (2001) menggunakan SA mampu menyelesaikan permasalahan *Vehicle Routing Problem Pickup and Delivery with Time Windows* (VRPPDTW) dengan waktu yang singkat dan hasil yang optimal. Redi, et al. (2020) juga menggunakan algoritma SA untuk menyelesaikan varian dari VRP yaitu CVRP atau *capacitated vehicle routing problem* dengan hasil SA yang memiliki perbedaan 0,03 % dengan solusi optimalnya. Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa algoritma *simulated annealing* merupakan metode yang efektif dalam menyelesaikan berbagai varian dari VRP, baik dari pembentukan solusi yang optimal maupun waktu komputasi.

Berdasarkan permasalahan yang dihadapi oleh PT. Pos Logistik Indonesia, penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan rute distribusi yang dihadapi oleh perusahaan

dengan memanfaatkan hub sebagai overflow warehouse dengan menggunakan algoritma simulated annealing. Dengan batasan berupa kapasitas dan juga jendela waktu, serta jumlah *pickup dan delivery*, permasalahan yang dihadapi perusahaan termasuk dalam varian VRPPDTW atau *Vehicle Routing Problem Pickup and Delivery with Time Windows* (VRPPDTW). Dengan menerapkan *simulated snnealing*, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan rute distribusi yang lebih optimal dari rute perusahaan yang sudah ada dengan memanfaatkan hub sebagai overflow warehouse.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang diatas, PT Pos Logistik Indonesia menghadapi tantangan terkait belum optimalnya pemanfaatan hub sebagai *overflow warehouse*, yang berdampak pada efisiensi rute dan biaya distribusi. Untuk menjawab permasalahan tersebut berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian ini:

1. Bagaimana rute distribusi yang optimal untuk meminimalkan rute dan kendaraan yang digunakan?
2. Bagaimana penerapan model *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows* (VRPPDTW) dengan algoritma *Simulated Annealing* (SA) dalam menentukan rute optimal pada jaringan distribusi PT Pos Logistik Indonesia?
3. Apa dampak optimalisasi rute distribusi terhadap biaya distribusi di PT Pos Logistik Indonesia?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan rute distribusi yang optimal untuk meminimalkan jarak tempuh dan jumlah kendaraan yang digunakan dalam proses distribusi.
2. Menganalisis penerapan model *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows* (VRPPDTW) dengan algoritma *Simulated Annealing* (SA) dalam menentukan rute optimal pada jaringan distribusi PT Pos Logistik Indonesia.
3. Mengevaluasi dampak optimalisasi rute distribusi terhadap biaya distribusi di PT Pos Logistik Indonesia.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat bagi berbagai pihak yang terkait. Berikut adalah manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini:

1. Bagi PT Pos Logistik Indonesia, penelitian ini dapat memberikan solusi dalam mengoptimalkan rute distribusi guna meminimalkan jarak tempuh dan jumlah kendaraan yang digunakan, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya distribusi.
2. Bagi akademisi dan mahasiswa, penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan kajian mengenai optimasi rute distribusi menggunakan metode VRPPDTW serta penerapannya dalam dunia industri logistik, sehingga dapat memperkaya wawasan dalam bidang *supply chain management* dan logistik.

1.5 Batasan Penelitian

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

1. Penelitian ini tidak mempertimbangkan kapasitas maksimum setiap *warehouse* dalam proses optimasi rute distribusi.
2. Penelitian hanya berfokus pada area distribusi PT. Pos Logistik Indonesia di daerah Jakarta
3. Penelitian ini berfokus pada penerapan *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows* (VRPPDTW) untuk menentukan rute distribusi optimal.
4. Satuan demand yang digunakan yaitu dalam kilogram (kg) dan tidak mempertimbangkan dimensi barang.
5. Kendaraan yang digunakan hanya 1 jenis kendaraan yaitu *Blind Van*
6. Keadaan lalu lintas tidak dipertimbangkan

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 literatur dan landasan teori 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

2.1 Kajian Literatur

Penelitian ini mengacu pada berbagai sumber dari penelitian terdahulu yang relevan dengan topik dan metode yang digunakan. Kajian ini disusun secara induktif dengan merangkum hasil penelitian sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

Penelitian yang dilakukan oleh Wu, et al. (2024) dengan judul “*A neighborhood comprehensive learning particle swarm optimization for the vehicle routing problem with time windows*” menyajikan algoritma baru yang disebut *Neighborhood Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization* (N-CLPSO) yang dirancang untuk mengatasi *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW), tantangan optimasi NP-hard yang kompleks dalam logistik. N-CLPSO menyempurnakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) tradisional dengan memperkenalkan mekanisme pencarian lingkungan, strategi *remove-reinsert*, dan strategi gangguan semi-acak untuk mempertahankan keragaman populasi. Algoritma ini diuji pada 56 contoh *benchmark*, mencapai solusi optimal untuk 29 di antaranya, dan menunjukkan kinerja yang unggul dibandingkan dengan varian PSO lain dan algoritma canggih. N-CLPSO secara konsisten menemukan jumlah kendaraan minimum dan memiliki panjang lintasan terpendek dalam banyak kasus, dengan waktu berjalan rata-rata 1,48 detik.

Kemudian penelitian oleh Pak & Mun (2024) yang berjudul “*A practical vehicle routing problem in small and medium cities for fuel consumption minimization*” menyelidiki rute kendaraan di kota-kota kecil dan menengah, dengan fokus pada pengurangan konsumsi bahan bakar. Jurnal ini memperkenalkan model yang mempertimbangkan berbagai faktor seperti jenis kendaraan yang berbeda, kendala waktu, dan jaringan jalan. Studi ini menggunakan algoritma *Variable Neighborhood Search* (VNS), yang mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 25,87% dibandingkan dengan solusi awal. Algoritma VNS memiliki selisih rata-rata 3,15% dari solusi optimal, dengan waktu komputasi 13,58 detik, sedangkan pemecah CPLEX menunjukkan selisih 6,88%.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Labidi et al. (2023) berjudul “*An improved genetic algorithm for solving the multi-objective vehicle routing problem with environmental considerations*” memperkenalkan pendekatan inovatif terhadap VRP yang mengutamakan keberlanjutan lingkungan dengan meminimalkan emisi kendaraan. Dengan memanfaatkan

Hybrid Genetic Algorithm (HGA) yang telah disempurnakan, penelitian ini membahas *High-Frequency Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW), yang secara efektif mengelola permintaan dinamis sambil mempertahankan tingkat layanan yang tinggi. Algoritma ini diuji terhadap metode yang ada, yang menunjukkan kinerja yang sebanding atau lebih unggul dalam kualitas solusi di berbagai tingkat dinamisme 20%, 40%, dan 80%. Hasilnya menggarisbawahi kemampuan algoritma untuk mengoptimalkan keputusan perutean sambil mematuhi kapasitas kendaraan dan jendela waktu, yang menghadirkan solusi yang layak untuk industri logistik. Pekerjaan di masa mendatang bertujuan untuk mengintegrasikan teknik pembelajaran mesin untuk lebih meningkatkan kinerja model.

Penelitian yang dilakukan oleh Rizkiani et al. (2023) dengan judul “***A Simulated Annealing for Heterogenous Fleet Vehicle Routing Problem with Multiple Trips and Pickup Delivery***” membahas studi tentang optimasi rute kendaraan untuk perusahaan distribusi *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) yang menghadapi tantangan rute pengiriman yang tidak efisien. Penelitian ini berfokus pada masalah *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Multiple Trips and Pickup and Delivery* (HFVRPMTDP). Dengan pendekatan *Simulated Annealing* (SA) yang menggunakan metode *Savings Matrix* dan *Nearest Neighbor* untuk menghasilkan solusi awal yang bertujuan meminimalkan total jarak tempuh. Algoritma SA menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan praktik rute saat ini, dengan rata-rata pengurangan jarak total sebesar 29,11% dan waktu pengiriman sebesar 10,64%.

Penelitian yang dilakukan Patmawati & Nugroho (2022) dengan judul “**Optimalisasi Rute Distribusi Matras pada Penyelesaian *Capacitated Vehicle Routing Problem* dengan Metode Algoritma Genetika**”, membahas penerapan algoritma genetika untuk menyelesaikan *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) dalam distribusi matras spring bed di PT SMI. Penelitian ini bertujuan untuk meminimalkan jarak tempuh kendaraan dengan mempertimbangkan kapasitas setiap kendaraan. Hasil penelitian menunjukkan penurunan total jarak tempuh distribusi sebesar 1,65% atau 39,43 km setelah penerapan algoritma genetika, yang berkontribusi pada efisiensi operasional perusahaan dan pengurangan biaya pengiriman.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Andriansyah et al. (2020) dengan judul “**Algoritma *Simulated Annealing* Untuk Menentukan Rute Kendaraan Heterogen (Studi Kasus)**” membahas perancangan dan implementasi algoritma *Simulated Annealing* (SA) untuk menyelesaikan masalah *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (HFVRP) di sebuah perusahaan distribusi di Banda Aceh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma SA

berhasil mencapai biaya operasional terendah sebesar Rp. 219,927.5 dengan waktu komputasi rata-rata 19.27 detik, mengungguli metode lain seperti pendekatan analitis dan algoritma *Insertion Heuristic* (IH) dengan peningkatan kualitas solusi sebesar 20.18% dibandingkan penelitian sebelumnya. Analisis sensitivitas juga menunjukkan bahwa parameter seperti suhu awal dan faktor pendinginan berpengaruh signifikan terhadap kualitas solusi dan waktu komputasi, menegaskan efektivitas SA dalam optimasi rute distribusi.

Penelitian yang dilakukan oleh Lutfi et al. (2023) dengan judul “**Pencarian Rute Optimal Distribusi Melalui Pendekatan Metode *Ant Colony Optimization* (ACO) (Studi Kasus: Bakpia Pathok 25)**” membahas penerapan metode *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk mengoptimalkan rute distribusi produk di Bakpia Pathok 25, Yogyakarta, dengan fokus pada penyelesaian masalah *Traveling Salesman Problem* (TSP). Melalui simulasi menggunakan MATLAB dengan 100 iterasi dan 10 semut, rute optimal yang dihasilkan mencakup jarak tempuh 26,19 km dan waktu distribusi 54 menit. Metode ini berhasil menghemat biaya bahan bakar sebesar Rp 26.190 per distribusi, menunjukkan efisiensi waktu dan biaya yang signifikan serta potensi peningkatan kualitas layanan bagi perusahaan.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Turnip & Saragih (2022) yang berjudul “*Design of Vehicle Routes for Rice Distribution System in Bandung Using Simulated Annealing Algorithm*” membahas mengenai algoritma *Simulated Annealing* (SA) untuk menyelesaikan masalah *Vehicle Routing Problem* (VRP) dalam sistem distribusi beras di Bandung. Dengan fokus pada pengurangan biaya transportasi, model ini berhasil meminimalkan biaya sambil memenuhi batasan kapasitas kendaraan dan memastikan setiap pasar dilayani tepat satu kali. Algoritma SA menunjukkan efisiensi yang luar biasa dengan waktu komputasi hanya 19 detik, sementara total biaya transportasi yang dihasilkan hanya 1,26% lebih tinggi dibandingkan solusi optimal yang diperoleh melalui *Integer Linear Programming* (ILP).

Penelitian yang dilakukan oleh Mubarok & Chotijah (2021) dengan judul “**Penerapan Algoritma Genetika Untuk Mencari Optimasi Kombinasi Jalur Terpendek Dalam Kasus *Travelling Salesman Problem***” membahas penerapan algoritma genetika untuk menyelesaikan masalah *Travelling Salesman Problem* (TSP) dengan fokus pada optimasi rute pengiriman paket. Penelitian ini menemukan bahwa solusi optimal dicapai dengan ukuran populasi 100, 200 generasi, probabilitas *crossover* 0.8, dan probabilitas mutasi 0.005, menghasilkan nilai *fitness*

sebesar 0.036. Hasil ini menunjukkan pentingnya algoritma genetika dalam meningkatkan efisiensi rute, yang juga dapat diterapkan pada skenario berkendara umum.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Kristina et al. (2020) yang berjudul **“Pengembangan Algoritma *Ant Colony System* Pada *Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Soft Time Window*”** mengembangkan algoritma *Ant Colony System* (ACS) untuk menyelesaikan *Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows* (HVRPSTW) di PT XYZ, yang melibatkan kendaraan beragam dan penalti biaya untuk keterlambatan. Hasil pengujian menunjukkan total jarak yang ditempuh sebesar 1448,98 km dan total biaya transportasi mencapai Rp 3.582.367,86, dengan selisih biaya hanya 1,19% dibandingkan metode eksak sebelumnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Redi, et al. (2020) dengan judul **“*Simulated annealing algorithm for solving the capacitated vehicle routing problem: a case study of pharmaceutical distribution*”**, yang membahas tentang optimasi rute distribusi obat untuk PT. XYZ di Jakarta Barat menggunakan algoritma *simulated annealing* (SA) dan *nearest neighbor* (NN). Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma SA menghasilkan solusi yang lebih baik dengan selisih rata-rata 0.03% dari solusi optimal, dibandingkan dengan 5.50% untuk metode NN. Selain itu, waktu komputasi untuk kedua algoritma berada di bawah satu detik, menjadikannya cocok untuk aplikasi waktu nyata. Penelitian ini menekankan pentingnya efisiensi rute kendaraan dalam industri farmasi, di mana pengiriman tepat waktu sangat krusial.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Azzahra & Rachmatin (2024) **“*Penyelesaian Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows Menggunakan Particle Swarm Optimization Algorithm*”**, membahas *Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows* (MDVRPTW) dan menerapkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menemukan rute optimal kendaraan dari dua depot ke 169 agen. Penelitian ini berhasil menghasilkan rata-rata waktu perjalanan sebesar 7,83 jam, dengan lima rute optimal untuk depot pertama dan delapan rute untuk depot kedua, semua sesuai dengan batas waktu dan kapasitas kendaraan. Proses optimasi melibatkan pengelompokan agen berdasarkan kedekatan dengan depot menggunakan rumus *Haversine*, diikuti dengan langkah-langkah PSO yang mencakup inisialisasi partikel, evaluasi *fitness*, dan pembaruan posisi partikel. Analisis parameter PSO juga menunjukkan nilai optimal untuk ukuran kawanan, bobot inersia, dan laju pembelajaran.

Rahman & Asih (2020) dalam penelitiannya yang berjudul “*Optimizing shipping routes to minimize cost using particle swarm optimization*”, membahas optimasi rute pengiriman untuk distributor "Sari Roti" di Yogyakarta, Indonesia, dengan menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk mengurangi biaya dan jarak transportasi. Dalam studi kasus CV. Kayana, yang mengoperasikan 6 kendaraan (2 mobil dan 4 sepeda motor) untuk melayani 231 *outlet*, ditemukan bahwa sistem distribusi saat ini tidak efisien. Implementasi model PSO menunjukkan rata-rata perbaikan sebesar 31% dalam pengurangan jarak dan biaya pengiriman. Metodologi penelitian meliputi pengumpulan data melalui observasi dan wawancara, serta pemrosesan data menggunakan MATLAB untuk menerapkan algoritma PSO, yang terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi rute dan memberikan wawasan manajerial untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dalam logistik.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Firmansyah et al. (2021) dengan judul “*Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem Menggunakan Gabungan Algoritma Genetika dan Simulated Annealing*”, menjelaskan penyelesaian *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) menggunakan algoritma hibrida yang menggabungkan *Genetic Algorithm* (GA) dan *Simulated Annealing* (SA), yang disebut GASA. Implementasi GASA pada distribusi es krim di Bandung menunjukkan hasil yang signifikan, dengan rute optimal yang memiliki jarak minimum sebesar 257.716 km. Algoritma ini menggunakan parameter seperti populasi 100, generasi 200, dan laju *crossover* 0.6, serta berhasil menghasilkan solusi yang lebih beragam dan optimal dibandingkan dengan penggunaan GA dan SA secara terpisah. Hasil ini menegaskan efektivitas pendekatan hibrida dalam mengatasi masalah optimasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Sumardiyanto & Chin (2023) yang berjudul “*Application of Particle Optimization and Genetic Algorithms (GA) Method in Fleet Transportation Systems of two-wheeled automotive industry*”, membahas optimasi sistem transportasi armada di industri otomotif roda dua di Indonesia, dengan fokus pada pengiriman komponen dari pemasok ke pabrik perakitan sepeda motor. Menggunakan pendekatan *Vehicle Routing Problem* (VRP), penelitian ini menerapkan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Genetic Algorithms* (GA) untuk mengurangi biaya transportasi dan kebutuhan armada dari 40 pemasok. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum optimasi, terdapat 40 armada dengan total biaya pengiriman IDR 2,769,330. Setelah penerapan PSO, armada berkurang menjadi 5 unit dengan biaya IDR 2,679,113, dan GA lebih lanjut mengurangi armada menjadi 4 unit dengan biaya IDR 2,000,058. Temuan ini menegaskan efektivitas PSO

dan GA dalam meningkatkan efisiensi transportasi di rantai pasokan otomotif. Berikut adalah ringkasan penelitian terdahulu yang mendukung studi ini:

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian

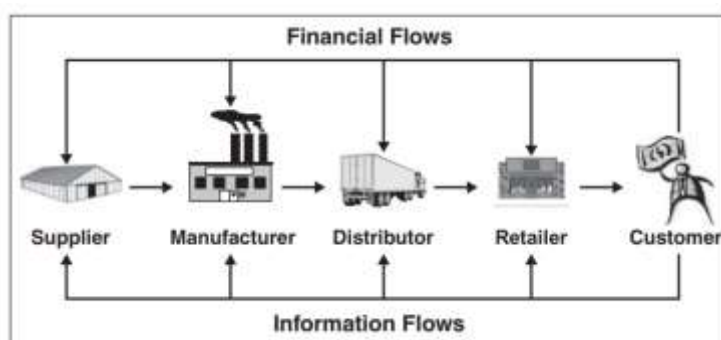
| Penulis | Obyek (Industri) | | | | Metode | | | | | Solusi Khusus |
|-----------------------------|-----------------------------|------------|-----------------|------|--------|----|-----|-----|-----|---------------------------|
| | <i>Service dan Logistik</i> | Manufaktur | <i>Pharmacy</i> | FMCG | SA | GA | PSO | ACO | VNS | <i>Overflow warehouse</i> |
| (Wu et al., 2024) | √ | | | | | | √ | | | |
| (Pak & Mun, 2024) | √ | | | | | | | | √ | |
| (Labidi et al., 2023) | √ | | | | | √ | | | | |
| (Rizkiani et al., 2023) | | | | √ | √ | | | | | |
| (Patmawati & Nugroho, 2022) | | √ | | | | √ | | | | |
| (Novatama et al., 2019) | √ | | | | √ | | | | | |
| (Khoswara et al., 2023) | | | | √ | | | | √ | | |
| (Turnip & Saragih, 2022) | | | | √ | √ | | | | | |
| (Mubarok & Chotijah, 2021) | √ | | | | | √ | | | | |
| (Kristina et al., 2020) | √ | | | | | | | √ | | |
| (Redi, et al., 2020) | | | √ | | √ | | | | | |
| (Azzahra & Rachmatin, 2024) | √ | | | | | | √ | | | |
| (Rahman & Asih, 2020) | | | | √ | | | √ | | | |
| (Firmansyah et al., 2021) | | | | √ | √ | √ | | | | |
| (Sumardiyanto & Chin, 2023) | | √ | | | | √ | | | | |
| Usulan | √ | | | | √ | | | | | √ |

2.2 Landasan Teori

2.2.1 *Supply Chain Management*

Supply chain management (SCM) merupakan strategi untuk mengintegrasikan pemasok, produsen, gudang, dan distribusi secara efisien, sehingga ketersediaan barang dapat terjaga

dalam jumlah, lokasi, dan waktu yang tepat. Dengan pengelolaan yang optimal, biaya operasional dapat ditekan, sehingga memberikan manfaat bagi konsumen (Jamaludin, 2022). *Supply chain management* (SCM) dapat mengoptimalkan pola distribusi produk dengan mempertimbangkan aspek produksi, logistik, dan jadwal pengiriman. Tujuan utamanya adalah memastikan produk dengan spesifikasi tertentu dapat sampai ke konsumen dengan kualitas terjaga, biaya efisien, dan waktu yang tepat (Manthou, Vlachopoulou, & Folinas, 2004). Dengan demikian, penerapan *Supply Chain Management* (SCM) yang efektif dapat meningkatkan efisiensi operasional, memastikan kelancaran distribusi, serta memberikan nilai tambah bagi konsumen melalui pengelolaan Supply chain yang terstruktur dan terintegrasi.



Gambar 2. 1 *Flow in supply chain*

Sumber: (*Enterprise Systems for Management*, 2012)

Supply chain terdapat dalam organisasi jasa maupun manufaktur, dengan tingkat kompleksitas yang bervariasi tergantung pada industri dan perusahaan. *Supply chain* dapat dipandang sebagai jaringan yang mengelola berbagai aliran untuk memenuhi permintaan pelanggan. *Supply chain management* (SCM) berfokus pada koordinasi dan integrasi aliran tersebut, baik di dalam maupun antar perusahaan. Oleh karena itu, koordinasi antar pihak dalam *supply chain* menjadi faktor utama dalam pengelolaannya. Tujuan utama SCM yang efektif adalah meningkatkan efisiensi sistem dan merespons permintaan pelanggan dengan cepat (Motiwalla & Thompson, 2012). Aliran dalam SCM terbagi menjadi tiga kategori utama yaitu:

- Aliran produk mencakup pergerakan barang dari pemasok ke pelanggan, termasuk *return* dan *after-sales service*.
- Aliran informasi melibatkan proses penyampaian pesanan dan pembaruan status pengiriman.
- Aliran keuangan mencakup ketentuan kredit, jadwal pembayaran, serta pengaturan kepemilikan dan konsinyasi.

Menurut Mathivathanan et al. (2018) berikut adalah beberapa manfaat utama dari penerapan SCM yang optimal:

1. Menekan Tingkat Inventori

SCM memungkinkan pengendalian persediaan yang lebih efisien melalui sistem informasi yang terintegrasi, sehingga dapat mengurangi jumlah stok yang berlebihan.

2. Mengurangi Biaya Operasional

Dengan aliran produk yang terkoordinasi dari pemasok hingga konsumen akhir, SCM dapat mengoptimalkan proses distribusi dan produksi, sehingga menekan biaya operasional.

3. Memperpendek *Lead Time*

Koordinasi yang baik dalam sistem, data, dan informasi memungkinkan percepatan dalam proses pengadaan bahan baku, produksi, serta distribusi barang ke pasar.

4. Meningkatkan Pendapatan Perusahaan

Loyalitas pelanggan yang meningkat akibat layanan yang lebih baik dapat berkontribusi pada peningkatan pendapatan dan pertumbuhan bisnis.

5. Ketepatan Waktu Pengiriman

Sistem distribusi yang terintegrasi dan terkontrol memastikan barang dapat dikirim ke pelanggan sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan.

6. Memastikan Kelancaran Aliran Barang

Dengan adanya integrasi yang kuat antar elemen dalam SCM, pergerakan barang dari satu titik ke titik lainnya menjadi lebih lancar dan efisien.

7. Menjaga Kualitas Produk

SCM membantu memastikan kualitas bahan baku dan produk akhir dengan menerapkan kontrol sejak awal proses produksi hingga distribusi.

8. Mencegah Kehabisan Stok (*Stock Out*)

Kemitraan yang baik dengan pemasok serta penggunaan sistem informasi yang canggih memungkinkan perusahaan mengelola persediaan secara optimal dan menghindari kekurangan stok

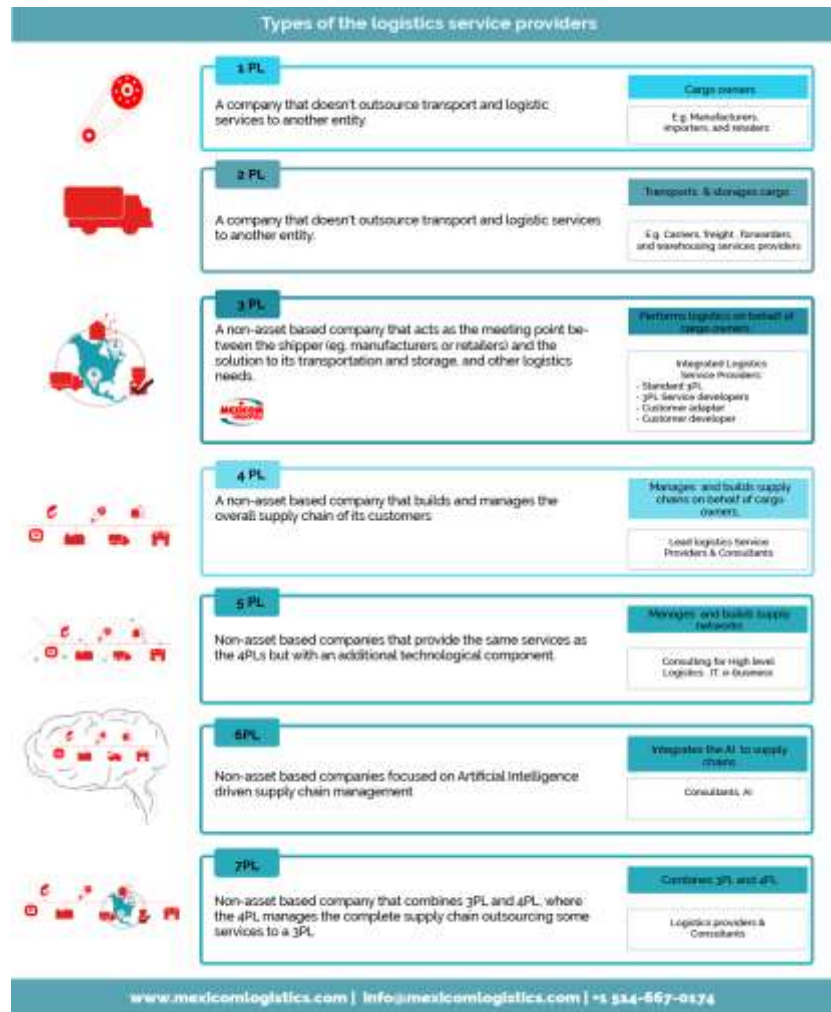
2.2.2 Manajemen Logistik

Manajemen logistik merupakan salah satu aspek penting dalam *supply chain management* (SCM) yang berfokus pada perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian aliran barang secara

optimal. Proses ini mencakup berbagai aktivitas, seperti transportasi, penyimpanan, distribusi, serta pengelolaan layanan dan informasi yang berkaitan dengan pergerakan barang. Tujuan utama dari manajemen logistik adalah memastikan bahwa produk dapat dikirim dari titik asal ke tujuan akhir secara efisien, tepat waktu, dan sesuai dengan kebutuhan pelanggan (Siahaya, 2012). Dengan manajemen logistik yang baik, perusahaan dapat meningkatkan efektivitas operasional, mengurangi biaya distribusi, serta meningkatkan kepuasan pelanggan melalui layanan yang lebih cepat dan akurat (Vildayanti, Hidayat, Jusmansyah, Setyarko, & Sriyanto, 2024).

Menurut Utami & Sitorus (2015) Tujuan utama logistik adalah memastikan distribusi barang dan material dalam jumlah yang tepat, pada waktu yang dibutuhkan, dalam kondisi layak pakai, serta dengan biaya serendah mungkin. Melalui proses logistik, material dialirkan ke pusat produksi dan produk jadi disalurkan ke konsumen melalui jaringan distribusi. Logistik berperan dalam memberikan manfaat waktu dan lokasi, yang menjadi aspek penting dalam operasional perusahaan maupun pemerintah. Dengan pengelolaan logistik yang terorganisir, ketersediaan barang dapat terjamin tepat waktu, sehingga meningkatkan efisiensi dan nilai tambah dalam Supply chain.

Logistics Service Providers (LSP) memiliki peran utama dalam mendukung keberhasilan bisnis, terutama dalam memfasilitasi perdagangan di tingkat nasional maupun internasional. Keterlibatan langsung LSP dalam proses impor dan ekspor memberikan keuntungan kompetitif bagi pelaku usaha. LSP bertanggung jawab atas pengelolaan layanan logistik, termasuk pengaturan pengiriman dan distribusi barang (Skender, Host, & Nuhanovic, 2016). Menurut Karjono et al. (2024) Seiring dengan meningkatnya kompleksitas *supply chain* dan proses bisnis, banyak perusahaan memilih untuk mengalihdayakan layanan logistik guna mengoptimalkan operasional mereka. Oleh karena itu, penyedia jasa logistik memiliki kualifikasi khusus untuk menangani berbagai aspek bisnis tertentu. Berikut merupakan klasifikasi LSP:



Gambar 2. 2 *Types of logistics service providers*

Sumber: mexicomlogistics.com

1. *First Party Logistics (1PL)*

1PL merujuk pada perusahaan yang mengelola sendiri kegiatan logistik dan transportasi tanpa melibatkan pihak ketiga. Contohnya adalah produsen, importir, dan pengecer yang mengatur pengiriman barangnya sendiri.

2. *Second Party Logistics (2PL)*

2PL adalah perusahaan berbasis aset yang memiliki armada transportasi sendiri dan menyediakan layanan pengiriman untuk pihak lain. Contohnya adalah perusahaan jasa angkutan, freight forwarder, dan penyedia layanan pergudangan.

3. *Third Party Logistics (3PL)*

3PL menawarkan layanan logistik tanpa aset sendiri, termasuk transportasi, pergudangan, dan manajemen inventaris. Menurut (Hertz & Alfredsson, 2003) terdapat 4 kategori dalam 3PL yaitu:

- *Standard 3PL*: Menyediakan layanan dasar seperti penyimpanan barang.
- *3PL Service Developer*: Menawarkan layanan khusus seperti *cross-docking*.
- *Customer Adapter 3PL*: Menyesuaikan layanan logistik sesuai kebutuhan pelanggan.
- *Customer Developer 3PL*: Mengelola seluruh operasi logistik dan memberikan konsultasi kepada pelanggan.

4. *Fourth Party Logistics (4PL)*

4PL bertanggung jawab atas manajemen menyeluruh *Supply chain*, mengoordinasikan berbagai penyedia layanan termasuk produsen, distributor, dan 3PL.

5. *Fifth Party Logistics (5PL)*

5PL memiliki peran serupa dengan 4PL tetapi menambahkan unsur teknologi, seperti pengelolaan *Supply chain* berbasis *e-business*.

6. *Sixth Party Logistics (6PL)*

6PL mengintegrasikan kecerdasan buatan (AI) dalam manajemen *Supply chain*, termasuk analisis permintaan dan perencanaan jaringan logistik.

7. *Seventh Party Logistics (7PL)*

7PL merupakan kombinasi dari 3PL dan 4PL, di mana 4PL menangani seluruh *Supply chain* dan mengalihdayakan sebagian layanan ke 3PL.

2.2.3 *Vehicle Routing Problem (VRP)*

Biaya distribusi perusahaan dapat dipengaruhi oleh jumlah kendaraan yang digunakan dan rute yang ditempuh. Semakin panjang rute dan semakin banyak kendaraan yang digunakan, semakin tinggi biaya distribusi. Oleh karena itu, optimalisasi rute dan pemanfaatan sumber daya yang efisien menjadi solusi untuk menekan biaya tersebut. Masalah penentuan rute yang melibatkan sejumlah kendaraan dalam mendistribusikan barang ke pelanggan dengan permintaan tertentu, serta dibatasi oleh berbagai kendala, dikenal sebagai *Vehicle Routing Problem (VRP)* (Engraini, Meirizha, & Dermawan, 2020). Menurut Sze et al. (2020) *Vehicle Routing Problem (VRP)* merupakan permasalahan logistik yang memiliki banyak penerapan. VRP bertujuan menentukan rute optimal bagi armada kendaraan yang identik untuk melayani sejumlah

pelanggan dengan titik awal dan akhir di depot. Tujuan utama dari VRP adalah meminimalkan jarak tempuh, dengan ketentuan setiap pelanggan hanya dapat dilayani satu kali oleh satu kendaraan.

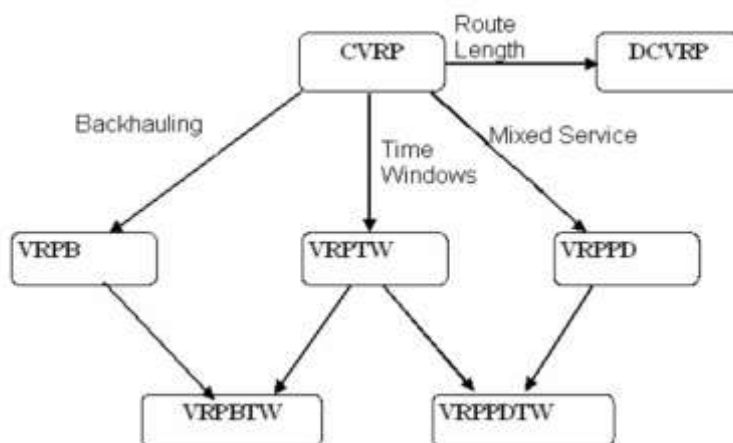
Vehicle Routing Problem (VRP) dapat direpresentasikan sebagai permasalahan dalam teori graf. Misalkan terdapat graf lengkap $G = (V, A)$, di mana $V = \{0, 1, \dots, n\}$ merupakan himpunan simpul dan A adalah himpunan busur. Simpul 0 merepresentasikan depot, sedangkan simpul $j = 1, \dots, n$ mewakili pelanggan dengan permintaan tertentu yang tidak negatif (d_j). Setiap busur $(i, j) \in A$ memiliki biaya perjalanan c_{ij} dari simpul i ke simpul j (Toth & Vigo, 2002). Penerapan umum dari VRP meliputi pengelolaan sampah rumah tangga, distribusi bahan bakar, pengiriman barang, pembersihan salju, serta layanan pos dan kurir (Zirour & Omar, 2008). Dalam menyelesaikan permasalahan optimasi di dunia nyata, berbagai kendala sering muncul, yang kemudian melahirkan beberapa varian utama dari *vehicle routing problem* (VRP) (Injac & Drašković, 2024), di antaranya:

1. *Capacitated VRP* (CVRP): Setiap kendaraan memiliki kapasitas muatan terbatas.
2. *VRP with Time Windows* (VRPTW): Setiap pelanggan harus dilayani dalam jangka waktu tertentu.
3. *VRP with Backhauls* (VRPB): Setelah mengantarkan barang ke seluruh pelanggan, kendaraan harus mengambil barang dari pelanggan tertentu.
4. *VRP with Pick-Ups and Deliveries* (VRPPD): Pelanggan dapat mengembalikan sebagian barang ke depot.
5. *Periodic VRP* (PVRP): Pengiriman dilakukan dalam periode waktu tertentu, bukan hanya dalam satu hari.
6. *Stochastic VRP* (SVRP): Terdapat elemen ketidakpastian dalam tugas, seperti permintaan pelanggan atau waktu pengiriman.
7. *Split Delivery VRP* (SDVRP): Satu pelanggan dapat dilayani oleh beberapa kendaraan dengan pembagian pengiriman.
8. *Multiple Depot VRP* (MDVRP): Perusahaan menggunakan lebih dari satu depot untuk melayani pelanggan dengan armada kendaraan yang tersedia.

2.2.4 VRPPD with Time Windows (VRPPDTW)

Pickup and Delivery Problem with Time Windows (PDPTW) menurut (Savelsbergh & Sol, 1995) merupakan suatu armada kendaraan tertentu harus memenuhi serangkaian permintaan transportasi yang telah ditentukan sebelumnya. Setiap permintaan memiliki lokasi penjemputan (asal), lokasi pengiriman (tujuan), dan berat muatan yang perlu dipindahkan dari asal ke tujuan dan terdapat waktu bongkar muat serta jendela waktu untuk setiap lokasi penjemputan dan pengiriman.

Kemudian Li & Lim (2001) juga menjelaskan bahwa PDTW merupakan pengembangan dari *vehicle routing problem* (VRP) yang mempertimbangkan keterbatasan operasional di dunia nyata, seperti kapasitas kendaraan, urutan pelayanan *pickup* harus mendahului *delivery*, serta batasan waktu pelayanan (*time window*) di setiap lokasi. Dalam PDPTW, setiap pasangan *pickup* dan *delivery* harus ditangani oleh kendaraan yang sama, dan harus dilakukan secara berurutan dalam satu rute. Permasalahan ini digolongkan sebagai masalah kombinatorial yang kompleks (NP-hard), sehingga pendekatan dengan *exact method* sering kali tidak dapat menyelesaikan masalah berskala besar dalam waktu yang singkat.



Gambar 2. 3 Klasifikasi VRP Gencer et al. (2010)

Berikut merupakan model matematis dari VRPPDTW berdasarkan penelitian oleh Sartori (2019) dengan menyederhanakan model yang dijelaskan oleh Ropke & Cordeau (2009) dengan depot diduplikasi menjadi dua titik, yaitu depot asal yang dilambangkan dengan 0 sebagai titik awal rute, dan depot tujuan yang dilambangkan dengan $2n+1$ sebagai titik akhir

rute. Dengan demikian, himpunan lokasi V didefinisikan ulang sebagai $V = P \cup D \cup \{0, 2n+1\}$, di mana P merupakan himpunan lokasi penjemputan dan D merupakan himpunan lokasi pengantaran.

Variabel biner x_{ijk} bernilai 1 jika kendaraan $k \in K$ melakukan perjalanan dari lokasi $i \in V$ ke lokasi $j \in V$, dan 0 jika tidak. Selain itu, variabel kontinu B_{ik} menunjukkan waktu mulai pelayanan kendaraan k di lokasi i , sedangkan variabel Q_{ik} merepresentasikan jumlah muatan yang dibawa kendaraan k setelah meninggalkan lokasi i . Berdasarkan definisi ini, PDPTW dapat dirumuskan sebagai model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) sebagai berikut

Objective Function:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{(n+i)jk} = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{jik} - \sum_{j \in V} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in P \cup D, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V_0} x_{i(2n+1)k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$B_{jk} \geq B_{ik} + t_{ij} + s_i - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (7)$$

$$Q_{jk} \geq Q_{ik} + q_j - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (8)$$

$$B_{(n+i)k} \geq B_{ik} + t_i(n+i) + s_i \quad \forall i \in V, k \in K \quad (9)$$

$$e_i \leq B_{ik} \leq l_i \quad \forall i \in V, k \in K \quad (10)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_{ik} \leq \min\{Cap, Cap + q_i\} \quad \forall i \in V, k \in K \quad (11)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (12)$$

Fungsi objektif pada Persamaan (1) bertujuan untuk meminimalkan total biaya dari seluruh lintasan (*arc*). Kendala pada persamaan (2) memastikan bahwa setiap permintaan layanan hanya dilakukan satu kali. Sementara itu, kendala pairing pada Persamaan (3) menjamin bahwa lokasi *pickup* dan *delivery* dari satu permintaan harus ditangani oleh kendaraan yang sama. Kendala aliran (*flow conservation*) yang tercantum pada Persamaan (4) menyatakan bahwa kendaraan k yang masuk ke suatu lokasi i , juga harus menjadi kendaraan yang meninggalkan lokasi tersebut. Persamaan (5) dan (6) mengharuskan setiap kendaraan untuk memulai perjalanan dari depot asal dan menyelesaikannya di depot asal.

Konsistensi variabel waktu dan muatan dijamin oleh kendala (7) dan (8). Untuk menjadikan kendala ini berbentuk linear, diperlukan konstanta besar. Kendala *precedence* dijelaskan pada persamaan (9), yang memastikan bahwa waktu pelayanan di lokasi *delivery* selalu lebih besar dari waktu pelayanan di lokasi *pickup* yang bersesuaian. Kendala jendela waktu dinyatakan pada Persamaan (10), yang membatasi waktu mulai pelayanan agar tetap berada dalam interval yang ditentukan. Sedangkan kendala kapasitas kendaraan tercantum dalam persamaan (11). Terakhir, kendala (12) menetapkan domain variabel biner x , yakni hanya boleh bernilai 0 atau 1.

2.2.5 Insertion Heuristics

Insertion Heuristics banyak digunakan dalam penyelesaian berbagai masalah penentuan rute dan penjadwalan kendaraan. Pendekatan ini pertama kali dikembangkan dan diteliti dalam penyelesaian masalah traveling salesman (Rosenkrantz, Stearns, & II, 1977). *Insertion heuristics* menghasilkan solusi yang dapat diterapkan dengan menyusun rute yang memenuhi batasan, di mana pelanggan yang belum terjadwal dimasukkan secara bertahap ke dalam rute yang sedang dibangun (Campbell & Savelsbergh, 2004). Berikut merupakan tahapan *insertion heuristics* berdasarkan (Saleh, Helmi, & Prihandono, 2015):

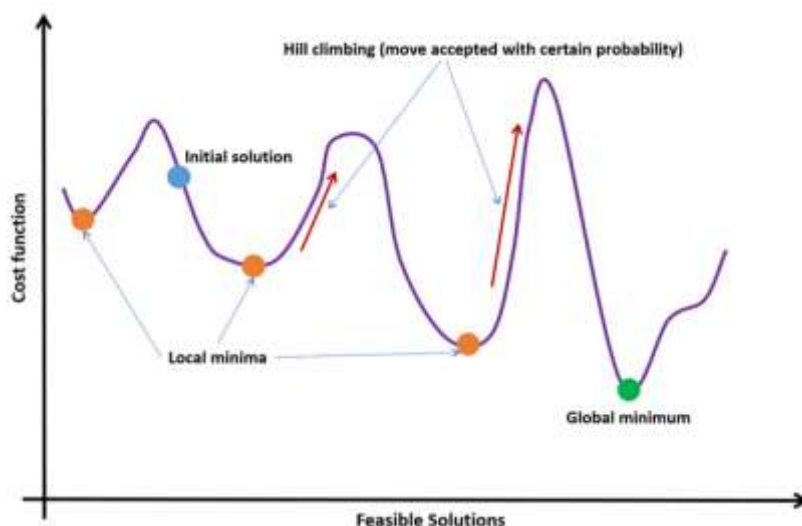
1. Proses pencarian diawali dari satu lokasi yang dianggap sebagai titik awal, yang kemudian dihubungkan dengan lokasi yang dianggap sebagai titik akhir.
2. Selanjutnya, dibangun sebuah subtour yang mencakup perjalanan dari titik awal dan kembali ke titik awal. Subtour ini merupakan jalur perjalanan yang membentuk satu siklus tertutup.

3. Salah satu arah hubungan antara dua lokasi kemudian diubah dengan menggantinya menggunakan kombinasi dua busur. Busur ini terdiri dari titik awal, titik tujuan, serta titik lain yang belum termasuk dalam subtour. Pemilihan titik ini didasarkan pada nilai sisipan terkecil, yang dihitung menggunakan rumus: $d_{i,j} + d_{j,k} - d_{i,k}$, di mana:

- $d_{i,j}$ adalah jarak antara Lokasi i ke lokasi j ,
- $d_{j,k}$ adalah jarak antara Lokasi j ke lokasi k ,
- $d_{i,k}$ adalah jarak antara Lokasi i ke lokasi k .

2.2.6 Simulated Annealing

Algoritma *Simulated Annealing* (SA) adalah metode heuristik berbasis pencarian lokal yang dirancang untuk menghindari jebakan pada solusi optimum lokal serta memungkinkan eksplorasi lebih luas dalam ruang pencarian. Pendekatan ini dikembangkan (Kirkpatrick, Vecchi, & Gelatt, 1983) berdasarkan konsep annealing yang diperkenalkan oleh Metropolis et al. (1953), dengan tujuan menemukan solusi yang mendekati optimal dalam berbagai masalah optimasi. Berdasarkan Bertsimas & Tsitsiklis (1993) *simulated annealing* diadaptasi dari proses *annealing* dalam pembentukan kristal suatu material, yaitu proses pendinginan bertahap pada benda padat hingga strukturnya mencapai kondisi stabil dengan energi minimum, dalam pembentukan kristal, material dipanaskan hingga suhu tertentu, menyebabkan atom-atom bergerak bebas dengan energi tinggi. Selanjutnya, suhu diturunkan secara perlahan agar atom-atom dapat tersusun dalam konfigurasi yang optimal dengan energi serendah mungkin.



Gambar 2. 4 Grafik Algoritma *Simulated Annealing*

Sumber: (Blocho, 2020)

Berdasarkan gambar diatas, Prosedur *Simulated Annealing* titik biru solusi awal, titik oranye minimum lokal, titik hijau minimum global, panah merah *hill climbing* (langkah diterima dengan probabilitas tertentu). Proses dalam algoritma *Simulated Annealing* diawali dengan penentuan solusi awal yang mempertimbangkan kondisi solusi yang ada serta suhu awal yang telah ditentukan. Pembentukan solusi awal dilakukan dengan menyusun beberapa kemungkinan solusi yang berasal dari pengacakan acak terhadap solusi yang telah tersedia (Redi, et al., 2021). Tospornsampan et al. (2007) Menjelaskan bahwa algoritma *Simulated Annealing* (SA) terdiri dari tiga komponen utama:

1. Proses *Annealing*

Proses ini menjadi inti dari algoritma SA, bertujuan untuk menghindari jebakan pada minimum lokal. Proses ini dipengaruhi oleh beberapa parameter berikut:

- Suhu Awal

Suhu awal (H_0) ditentukan pada nilai yang cukup tinggi agar solusi baru dapat diterima dengan lebih luas.

- Jumlah Iterasi pada Tiap Suhu

Pada setiap tingkat suhu, dilakukan sejumlah iterasi tertentu (L_t). Setelah jumlah iterasi ini terpenuhi, suhu akan diturunkan. Nilai L_t dapat bersifat tetap maupun berubah tergantung kondisi algoritma.

- Penurunan Suhu

Setelah sejumlah iterasi selesai, suhu akan dikurangi berdasarkan parameter α yang dikenal sebagai *cooling rate*, dengan rentang nilai antara 0 dan 1. Berdasarkan Kirkpatrick et al. (1983) menyarankan nilai α yaitu antara 0,8 hingga 0,99. Penurunan suhu ini dinyatakan dalam rumus:

$$H_t = \alpha H_{t-1}$$

dengan H_t sebagai suhu pada iterasi ke- t dan H_{t-1} adalah suhu pada iterasi sebelumnya.

2. Penyusunan Ulang Solusi

Proses ini dilakukan dengan mengubah solusi yang ada menjadi solusi baru melalui metode pengacakan. Cara penyusunan ulang bervariasi tergantung pada jenis permasalahan yang diselesaikan.

3. Kriteria Penghentian

Agar algoritma tidak berjalan tanpa batas, diperlukan kriteria penghentian yang ditetapkan sejak awal. Penghentian dapat terjadi ketika jumlah iterasi telah mencapai

batas tertentu tanpa menemukan solusi baru yang lebih baik, atau ketika suhu telah mencapai nilai minimum yang ditentukan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Penelitian ini berfokus pada penerapan algoritma *Simulated Annealing* untuk *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery and Time Windows* (VRPPDTW), yang merupakan salah satu masalah logistik yang cukup kompleks. Dalam masalah ini, PT. Pos Logistik Indonesia menjadi objek penelitian yang akan digunakan untuk mengidentifikasi bagaimana rute distribusi dapat dioptimalkan dengan menggunakan pendekatan metaheuristik untuk mengurangi biaya yang timbul. Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan terkait pengaturan rute kendaraan yang harus mengantarkan dan mengambil barang dari beberapa pelanggan dalam satu perjalanan, sambil memperhatikan jendela waktu yang telah ditentukan. Berikut merupakan profil perusahaan PT. Pos Logistik Indonesia:



Gambar 3. 1 Logo PT. Pos Logistik Indonesia

Nama Perusahaan : PT. Pos Logistik Indonesia

Deskripsi : PT Pos Logistik Indonesia bermula dari proyek bisnis logistik pada tahun 2004, kemudian berkembang menjadi *Strategic Business Unit* pada 2007. Pada 17 Februari 2012, perusahaan ini resmi menjadi anak usaha PT Pos Indonesia (Persero). Dengan dukungan tim profesional serta strategi bisnis yang matang, PT Pos Logistik Indonesia beroperasi secara independen untuk memanfaatkan peluang di sektor logistik. Perusahaan ini juga mengoptimalkan jaringan luas PT Pos Indonesia, yang mencakup 4.367 kantor cabang dan 33.000 titik penjualan, dengan visi menjadi penyedia solusi logistik terbaik di Indonesia.

Alamat : Head Office - Gedung Pos Ibukota Lt. 4 Jl. Lapangan Banteng Utara No.1, Kel. Pasar Baru, Kec. Sawah Besar, Kota Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10710

Alamat : *Warehouse, Distribution, Heavy Lifting, International Cargo, Domestic Cargo, dan Cold Chain*

3.2 Instrumen Penelitian

Sejumlah alat bantu diperlukan untuk penelitian ini guna memudahkan proses pengumpulan dan analisis data. Alat bantu yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Set Data, informasi tentang pelanggan, lokasi depot, kapasitas kendaraan, serta batas waktu pengiriman dan penjemputan merupakan data yang digunakan sebagai input dalam penelitian ini.
2. *Python*, merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk memproses data, menjalankan simulasi, mengoptimalkan rute kendaraan, dan mengimplementasikan algoritma *simulated annealing*.
3. *Software Coding*, dalam penelitian ini, *code* python ditulis, dijalankan, dan dianalisis menggunakan perangkat lunak seperti *Spyder*.

3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder

Dalam penelitian ini, jenis data yang digunakan terdiri dari dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data primer merupakan informasi yang dikumpulkan langsung dari sumbernya, tanpa melibatkan pihak ketiga (Pramiyati, Jayanta, & Yulnelly, 2017). Pengamatan langsung dan wawancara tentang operasi distribusi yang sedang berlangsung merupakan metode yang digunakan untuk mengumpulkan data ini. Misalnya, dengan mengamati proses pengiriman secara langsung dan mendokumentasikan detail penting seperti koordinat pengiriman, tanggal pengiriman, permintaan pelanggan, jumlah kendaraan yang digunakan, dan kapasitas kendaraan maksimum.
2. Data sekunder dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk dokumen dan studi pustaka yang relevan, bukan langsung dari lapangan. Data ini dapat berupa buku yang membahas subjek terkait, jurnal ilmiah, artikel daring, atau laporan internal perusahaan. Data sekunder

ini berfungsi untuk mendukung dan memvalidasi justifikasi teoritis serta menawarkan landasan ilmiah untuk penelitian di masa mendatang.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Untuk menganalisis masalah dengan tepat, peneliti harus mengumpulkan berbagai data yang relevan saat menyusun penelitian ini. Oleh karena itu, sejumlah teknik pengumpulan data digunakan yang sesuai dengan kondisi dan persyaratan bidang studi. Selain itu, prosedur ini merupakan langkah pertama yang diambil peneliti untuk memperoleh pemahaman langsung tentang situasi yang diteliti. Berikut merupakan dua metode yang digunakan:

1. Wawancara

Peneliti mewawancarai orang-orang yang dianggap berpengetahuan dan berpengalaman dalam bidang yang diteliti. Peneliti dapat mengajukan pertanyaan secara langsung dan menggali informasi lebih dalam dalam proses dua arah ini. Peneliti dapat memperoleh informasi yang lebih rinci dan menguatkan dari wawancara, seperti keadaan lapangan aktual yang tidak selalu tercakup dalam literatur.

2. Studi Literatur

Membaca dan menganalisis berbagai sumber, termasuk buku, publikasi ilmiah, dan laporan penelitian yang masih relevan dengan subjek, adalah cara metode ini diterapkan. Tujuannya adalah untuk memperoleh landasan teori yang kuat dan meningkatkan pemahaman tentang masalah yang diangkat.

3.5 Populasi dan Sampel

3.5.1 Populasi

Menurut (Martono, 2018) Keseluruhan item atau subjek yang berada di lokasi tertentu dan memenuhi kriteria tertentu yang terkait dengan masalah peneliti disebut sebagai populasi. Populasi yang terdapat pada penelitian ini yaitu seluruh daerah yang dilayani oleh PT. Pos Logistik Indonesia di daerah Jakarta

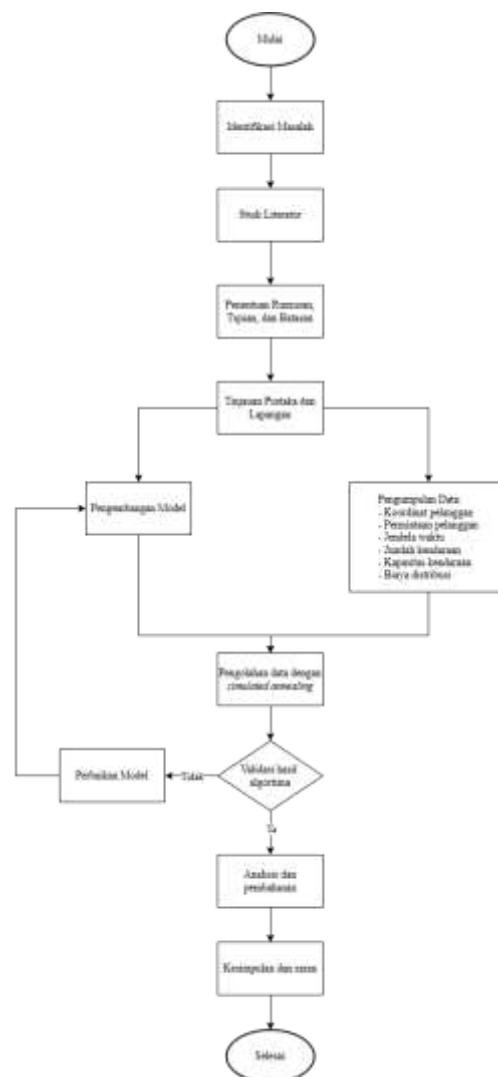
3.5.2 Sampel

Sampel adalah bagian dari ukuran dan susunan populasi. Sampel yang diambil dari populasi dapat digunakan jika populasi terlalu besar untuk mempelajari seluruh populasi. Kesimpulan yang diambil dari sampel akan berlaku untuk seluruh populasi. Oleh karena itu, sampel yang diambil dari populasi harus mencerminkan populasi secara akurat (Kusdian, Ridwan, Tamin, &

Syafruddin, 2005). Berdasarkan penelitian dan benchmark dari Li & Lim (2001) yang berisi *benchmark* PDTW mulai dari 100 *tasks* hingga 1000 *tasks*, pada penelitian ini diambil acuan berdasarkan 100 *tasks*, sehingga sampel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berjumlah 110 dan sampel tersebut hanya berfokus pada area Jakarta selatan dan timur.

3.6 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur dari penelitian ini yang menggambarkan Langkah-langkah penelitian yang disajikan dalam bentuk *flowchart*:



Gambar 3. 2 Alur penelitian

Berikut merupakan penjelasan mengenai diagram alur penelitian di atas:

1. Identifikasi Masalah

Tahap pertama yaitu identifikasi masalah, pada tahap ini peneliti mengidentifikasi masalah yang terdapat pada PT. Pos Logistik Indonesia dengan melakukan wawancara untuk mengetahui permasalahan yang dihadapi perusahaan.

2. Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahapan yang bertujuan untuk mencari pemahaman lebih dalam mengenai permasalahan yang dihadapi oleh PT. Pos Logistik Indonesia. Pada tahap ini batasan penelitian seperti jendela waktu, jumlah dan kapasitas kendaraan dan lain sebagainya akan dipertimbangkan untuk penelitian yang dilakukan. Studi literatur dapat berupa buku, jurnal, atau penelitian terdahulu yang terkait dengan tujuan untuk mengidentifikasi solusi potensial untuk masalah yang dihadapi.

3. Penentuan Rumusan, Tujuan, dan Batasan

Pada tahap ini rumusan masalah, tujuan, dan batasan penelitian. Peneliti menentukan rumusan masalah untuk dengan tujuan untuk menyelesaikan permasalahan penentuan rute yang dihadapi oleh PT. Pos Logistik Indonesia. Selain itu peneliti juga menentukan batasan-batasan yang digunakan dalam penelitian ini.

4. Tinjauan Pustakan dan Lapangan

Peneliti melakukan tinjauan pustaka mengenai VRP dan algoritma terkait, seperti *simulated annealing*. Kemudian dilakukan juga tinjauan lapangan untuk menentukan proses distribusi yang aktual digunakan oleh PT. Pos Logistik Indonesia, dengan mempertimbangkan kendala operasional, area layanan, dan lain-lain.

5. Pengembangan Model

Tahap ini merupakan tahap pengembangan model dengan algoritma metaheuristik yang menggunakan pendekatan *simulated annealing* untuk mengatasi masalah VRP. Karena kemampuannya untuk memecahkan masalah optimasi.

6. Pengumpulan Data

Informasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan kasus akan dikumpulkan pada tahap ini seperti data permintaan, data matriks jarak, data biaya operasional, jenis kendaraan, dan data kapasitas yang termasuk di antara data yang dikumpulkan dari hasil wawancara dan tinjauan pustaka. Bersamaan dengan data tersebut, sejumlah set data yaitu data hipotetis akan dihasilkan yang dapat berfungsi sebagai representasi kasus.

7. Pengolahan Data dengan *Simulated Annealing*

Algoritma *simulated annealing* digunakan untuk memproses data yang diperoleh untuk menemukan solusi rute terbaik dengan tetap memperhatikan kendala yang relevan, proses ini dimulai dengan pembuatan solusi awal menggunakan metode *insertion heuristics*.

8. Validasi Hasil Algoritma

Solusi dari algoritma *Simulated Annealing* divalidasi untuk memastikan sudah layak (*feasible*) dan memenuhi semua *constraints* seperti kapasitas kendaraan dan jendela waktu. Hasilnya dibandingkan dengan metode awal perusahaan. Jika belum optimal, dilakukan penyesuaian model atau parameter.

9. Analisis dan Pembahasan

Hasil solusi dianalisis untuk melihat efisiensi biaya dan waktu dibanding kondisi awal. Dibahas juga dampak penerapan algoritma terhadap operasional perusahaan serta kelebihan dan kekurangannya.

10. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini peneliti akan membuat Kesimpulan berdasarkan hasil analisis penelitian dan menjawab rumusan masalah yang sudah dibuat. Di akhir, peneliti akan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

4.1.1 Profil Perusahaan

Pada tahun 2004, PT Pos Logistik Indonesia didirikan sebagai sebuah proyek di bidang logistik, dan pada tahun 2007, berkembang menjadi unit bisnis strategi. Pada tanggal 17 Februari 2012, bisnis ini secara resmi menjadi anak perusahaan PT Pos Indonesia (Persero). PT Pos Logistik Indonesia beroperasi secara mandiri untuk mengambil keuntungan dari peluang dalam industri logistik, dengan dukungan tenaga kerja yang terampil dan rencana bisnis yang tersusun dengan baik. Bertujuan untuk menjadi penyedia solusi logistik terdepan di Indonesia, perusahaan ini juga memanfaatkan jaringan luas PT Pos Indonesia, yang meliputi 4367 kantor cabang dan 33.000 titik penjualan. Dengan visi dan misi yaitu:

- **Visi:**

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

- **Misi:**

- Memberikan solusi logistik yang efisien dan terintegrasi bagi pelanggan serta mendukung daya saing logistic 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.

Dalam menjalankan operasional bisnisnya, PT Pos Logistik Indonesia menjunjung tinggi nilai-nilai budaya perusahaan yang menjadi fondasi dalam setiap aktivitas kerja dan pengambilan keputusan. Nilai budaya PT. Pos Logistik Indonesia yaitu POSLOG



Gambar 4. 1 Budaya perusahaan

Selain nilai budaya perusahaan POSLOG yang terdapat pada PT. Pos Logistik Indonesia, Perusahaan juga memiliki core value yaitu Amanah, kompeten, harmonis, loyal, adaptif, dan kolaboratif, yang disingkat menjadi AKHLAK. Berikut merupakan penjelasannya:



Gambar 4. 2 *Core value*

- **Amanah**

Amanah, memegang teguh kepercayaan yang diberikan. Perilaku utama yang harus dimiliki oleh insan pos untuk mengaktualisasikan Nilai utama Amanah adalah:

1. Memenuhi janji dan komitmen
2. Bertanggung jawab atas tugas, keputusan, dan tindakan yang dilakukan
3. Berpegang teguh kepada nilai moral dan etika

- **Kompeten**

Kompeten, Terus belajar mengembangkan kapabilitas. Perilaku utama yang harus dimiliki oleh insan pos untuk mengaktualisasikan Nilai utama Kompeten adalah:

1. Meningkatkan kompetensi diri untuk menjawab tantangan yang selalu berubah
2. Membantu orang lain belajar
3. Menyelesaikan tugas dengan kualitas terbaik

- **Harmonis**

Harmonis, saling peduli dan menghargai perbedaan. Perilaku utama yang harus dimiliki oleh insan pos untuk mengaktualisasikan Nilai utama Harmonis adalah:

1. Menghargai setiap orang apapun latar belakangnya
2. Suka menolong orang lain
3. Membangun lingkungan kerja yang kondusif

- **Loyal**

Loyal, berdedikasi dan mengutamakan kepentingan Bangsa dan Negara. Perilaku utama yang harus dimiliki oleh insan pos untuk mengaktualisasikan Nilai utama Loyal adalah:

1. Menjaga nama baik sesama karyawan, pimpinan, BUMN dan Negara
2. Rela berkorban untuk mencapai tujuan yang lebih besar
3. Patuh kepada pimpinan sepanjang tidak bertentangan dengan hukum dan etika

- **Adaptif**

Adaptif, Terus berinovasi dan antusias dalam menggerakkan ataupun menghadapi perubahan. Perilaku utama yang harus dimiliki oleh insan pos untuk mengaktualisasikan Nilai utama Adaptif adalah:

1. Cepat menyesuaikan diri untuk menjadi lebih baik
2. Terus-menerus melakukan perbaikan mengikuti perkembangan teknologi
3. Bertindak proaktif

- **Kolaboratif**

Kolaboratif, Membangun kerja sama yang sinergis. Perilaku utama yang harus dimiliki oleh insan pos untuk mengaktualisasikan Nilai utama KOLABORATIF adalah:

1. Memberi kesempatan kepada berbagai pihak untuk berkontribusi
2. Terbuka dalam bekerja sama untuk menghasilkan nilai tambah
3. Menggerakkan pemanfaatan berbagai sumber daya untuk tujuan bersama

4.1.2 Formulasi Masalah

Penelitian ini berfokus untuk menyelesaikan masalah distribusi yang dihadapi oleh PT. Pos Logistik dengan memanfaatkan *overflow warehouse* atau *hub* yang dimiliki oleh Perusahaan. Dalam menentukan rute distribusi yang optimal, ada beberapa hal yang harus diperhatikan diantaranya:

1. Kapasitas kendaraan

Kendaraan yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu blind van dengan kapasitas yaitu 1000 kg. Setiap kendaraan tidak boleh membawa barang dengan kapasitas melebihi kapasitas maksimum dari kendaraan tersebut.

2. Jendela Waktu (*Time window*)

Jendela waktu menjadi pertimbangan dalam menyelesaikan permasalahan distribusi ini, dikarenakan setiap pelanggan memiliki jendela waktu yang berbeda-beda dan tidak boleh melewati jendela waktu yang sudah ditentukan

3. *Service Time*

Setiap lokasi yang dilayani oleh kendaraan tertentu memiliki service time masing-masing.

4. *Overflow warehouse*

Overflow warehouse akan digunakan sebagai warehouse buffer untuk menyimpan barang yang akan di distribusikan oleh pelanggan yang dilayani olehnya.

Selain pertimbangan di atas, perlu di ketahui bahwa total jarak, jumlah kendaraan dan biaya juga akan mempengaruhi hasil optimasi yang optimal, semakin kecil jarak yang dihasilkan oleh suatu rute yang terbentuk maka akan berdampak pada biaya distribusi yang juga akan berkurang, dapat membantu menghemat biaya bahan bakar, mengurangi waktu perjalanan, dan membuat penggunaan kendaraan menjadi lebih maksimal.

Masalah yang dialami oleh PT. Pos Logistik Indonesia termasuk ke dalam kategori *vehicle routing problem with pick-up and delivery with time windows* (VRPPDTW), Dimana *overflow warehouse* akan menjadi titik pickup dari barang yang akan diantarkan ke pelanggan yang dilayani oleh *overflow warehouse* itu sendiri. Dikarenakan jumlah data yang akan digunakan pada penelitian ini relative banyak, maka algoritma yang akan digunakan yaitu *simulated annealing* dengan tujuan untuk mengoptimalkan rute distribusi dengan waktu komputasi yang singkat.

4.1.3 Model Matematis

Model matematis yang digunakan pada penyelesaian masalah ini yaitu menggunakan model matematis VRPPDTW oleh Sartori (2019) dengan sedikit perbedaan pada depot tujuan yaitu sama dengan depot awal yaitu 0. Fungsi tujuan dari model matematis ini yaitu untuk minimasi total biaya dari rute yang terbentuk di setiap kendaraan. Berdasarkan fungsi tujuan tersebut berikut merupakan model matematis yang akan digunukan pada VRPPDTW untuk masalah di PT. Pos Logistik Indonesia:

a. Notasi

- $P = \{1, 2, \dots, n\}$: Himpunan *node* pickup
- $D = \{n+1, \dots, 2n\}$: Himpunan *node* delivery

- $V = P \cup D \cup \{0\}$: himpunan seluruh *node* (*pickup, delivery, main hub/depot*)
- K : adalah himpunan kendaraan yang tersedia
- $A = \{(i,j) : i,j \in V, i \neq j\}$: Himpunan *arc* antar *node*

b. Parameter

- c_{ij} : Jarak antara *node* i dan *node* j
- t_{ij} : Waktu tempuh antara *node* i dan *node* j
- s_{ij} : Waktu pelayanan di *node* i
- $[e_i, l_i]$: Jendela waktu *earliest* dan *latest* pelayanan di *node* i
- q_{ij} : Permintaan pada *node* i positif untuk pickup, negatif untuk delivery
- Q : Kapasitas maksimum kendaraan
- M : Bilangan besar (untuk kendala logika *time & load* linear)

c. Variabel Keputusan

- $x_{ijk} \in \{0,1\}$: 1 jika kendaraan k berjalan dari i ke j , 0 jika tidak
- B_{ik} : Waktu mulai pelayanan kendaraan k di *node* i
- Q_{ik} : Beban kendaraan k setelah meninggalkan *node* i

d. Fungsi Objektif

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} \quad (4.1)$$

Fungsi tujuan dari model matematis diatas yaitu minimasi total jarak tempuh untuk setiap kendaraan.

e. Constraint

- *Constraint 1*: Memastikan bahwa setiap permintaan layanan hanya dilakukan satu kali.

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in P \quad (4.2)$$

- *Constraint 2*: *Pickup* dan *delivery* harus oleh kendaraan yang sama.

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{(n+i)jk} = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (4.3)$$

- *Constraint 3*: Jika kendaraan k masuk ke *node* i , maka kendaraan yang sama juga harus keluar dari *node* tersebut.

$$\sum_{j \in V} x_{jik} - \sum_{j \in V} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in P \cup D, k \in K \quad (4.4)$$

- *Constraint 4*: Setiap kendaraan akan mulai dari depot

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.5)$$

- *Constraint 5*: Setiap kendaraan akan berakhir di depot

$$\sum_{i \in V} x_{i0k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.6)$$

- *Constraint 6*: Jika kendaraan k bergerak dari *node* i ke *node* j , maka waktu mulai pelayanan di j harus setelah selesai pelayanan di i ditambah dengan waktu tempuh.

$$B_{jk} \geq B_{ik} + t_{ij} + s_i - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (4.7)$$

- *Constraint 7*: Beban kendaraan di *node* j = beban sebelumnya ditambah permintaan *node* j

$$Q_{jk} \geq Q_{ik} + q_j - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (4.8)$$

- *Constraint 8*: Memastikan agar *node* delivery atau pelanggan selalu dikunjungi setelah *node* pickup-nya atau OW.

$$B_{(n+i)k} \geq B_{ik} + t_{i(n+i)} + s_i \quad \forall i \in V, k \in K \quad (4.9)$$

- *Constraint 9*: Waktu pelayanan harus dalam jendela waktu (*Time windows*) yang sudah ditentukan

$$e_i \leq B_{ik} \leq l_i \quad \forall i \in V, k \in K \quad (4.10)$$

- *Constraint 10*: Beban kendaraan di node mana pun tidak boleh negatif atau melebihi kapasitas maksimum.

$$0 \leq Q_{ik} \leq Q \quad \forall i \in V, k \in K \quad (4.11)$$

- *Constraint 11*: x_{ijk} : hanya bisa 0 (tidak dilintasi) atau 1 (dilintasi)

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V, k \quad (4.12)$$

Selain model matematis diatas, terdapat model matematis lain yang berhubungan dengan *overflow warehouse*, pada penelitian ini akan terdapat 2 tahap yaitu:

1. Tahap 1: Pada tahap 1 kendaraan akan berangkat dari depot kemudian akan mengantarkan barang-barang kepada pelanggan terdekatnya serta mengantarkan barang ke *overflow warehouse* (OW) dengan jumlah barang yang akan di antarkan yaitu sejumlah permintaan pada OW tersebut yang nantinya barang akan di antarkan dari OW ke pelanggannya pada tahap 2.

$$q_{ow} = \sum_{i \in cust(ow)} D_i \quad (4.13)$$

2. Tahap 2: Pada tahap ini atau pada hari selanjutnya kendaraan akan berangkat dari OW dan akan mengantarkan barang-barang ke pelanggan yang terdekat dengannya.

4.1.4 Data Penelitian

Pada penelitian untuk menyelesaikan permasalahan VRPPDTW ini membutuhkan data seperti titik kordinat dari main hub, *hub* atau *overflow warehouse*, dan pelanggan, time windows dari setiap node, demand untuk setiap node, service time untuk setiap *node*, jumlah dan kapasitas kendaraan dan kecepatan rata-rata kendaraan. Data-data tersebut berperan penting dalam

menghasilkan rute yang optimal. Contohnya, koordinat dibutuhkan untuk menentukan jarak antara titik-titik, jendela waktu berfungsi untuk memastikan kendaraan sampai tepat waktu, dan data tentang kapasitas berguna untuk memastikan bahwa beban kendaraan tidak melebihi batas yang ditentukan. Oleh karena itu dengan data yang didpoleleh, diharapkan dapat memberikan solusi yang optimal yang mendekati kondisi *real*. Berikut merupakan data yang akan digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 4. 1 Data Penelitian

| <i>Node</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Demand Delivery (Kg)</i> | <i>Earliest Time</i> | <i>Latest Time</i> | <i>Service Time</i> |
|-------------|----------|----------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0 | 712.08 | 9314.00 | 0 | 0 | 540 | 0 |
| 1 | 680.82 | 9310.91 | 29 | 301 | 540 | 10 |
| 2 | 711.08 | 9310.84 | 22 | 301 | 540 | 10 |
| 3 | 729.70 | 9310.77 | 14 | 301 | 540 | 10 |
| 4 | 720.09 | 9310.85 | 27 | 301 | 540 | 10 |
| 5 | 667.57 | 9311.03 | 8 | 0 | 300 | 10 |
| 6 | 693.72 | 9310.95 | 11 | 301 | 540 | 10 |
| 7 | 664.27 | 9311.05 | 23 | 0 | 300 | 10 |
| 8 | 673.04 | 9311.09 | 23 | 301 | 540 | 10 |
| 9 | 695.11 | 9311.03 | 12 | 0 | 300 | 10 |
| 10 | 683.35 | 9311.09 | 6 | 301 | 540 | 10 |
| 11 | 668.75 | 9311.14 | 28 | 301 | 540 | 10 |
| 12 | 686.47 | 9311.14 | 3 | 301 | 540 | 10 |
| 13 | 709.37 | 9311.08 | 24 | 301 | 540 | 10 |
| 14 | 707.76 | 9311.13 | 20 | 301 | 540 | 10 |
| 15 | 688.82 | 9311.20 | 26 | 0 | 300 | 10 |
| 16 | 661.56 | 9311.41 | 5 | 301 | 540 | 10 |
| 17 | 667.48 | 9311.41 | 4 | 0 | 300 | 10 |
| 18 | 730.53 | 9311.20 | 4 | 0 | 300 | 10 |
| 19 | 678.39 | 9311.40 | 30 | 0 | 300 | 10 |
| 20 | 682.89 | 9311.39 | 28 | 301 | 540 | 10 |
| 21 | 664.38 | 9311.45 | 21 | 301 | 540 | 10 |

| <i>Node</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Demand Delivery (Kg)</i> | <i>Earliest Time</i> | <i>Latest Time</i> | <i>Service Time</i> |
|-------------|----------|----------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 22 | 731.10 | 9311.25 | 10 | 0 | 300 | 10 |
| 23 | 696.18 | 9311.40 | 23 | 0 | 300 | 10 |
| 24 | 713.95 | 9311.40 | 3 | 301 | 540 | 10 |
| 25 | 689.21 | 9311.49 | 24 | 301 | 540 | 10 |
| 26 | 722.25 | 9311.38 | 3 | 0 | 300 | 10 |
| 27 | 708.14 | 9311.47 | 1 | 301 | 540 | 10 |
| 28 | 721.68 | 9311.44 | 30 | 301 | 540 | 10 |
| 29 | 654.91 | 9311.68 | 12 | 301 | 540 | 10 |
| 30 | 657.61 | 9311.87 | 10 | 301 | 540 | 10 |
| 31 | 695.50 | 9311.77 | 26 | 0 | 300 | 10 |
| 32 | 681.33 | 9311.84 | 21 | 0 | 300 | 10 |
| 33 | 665.24 | 9311.90 | 3 | 301 | 540 | 10 |
| 34 | 685.23 | 9311.85 | 19 | 301 | 540 | 10 |
| 35 | 708.23 | 9311.82 | 12 | 301 | 540 | 10 |
| 36 | 673.22 | 9311.97 | 15 | 0 | 300 | 10 |
| 37 | 683.29 | 9312.00 | 11 | 301 | 540 | 10 |
| 38 | 681.13 | 9312.05 | 29 | 301 | 540 | 10 |
| 39 | 684.32 | 9312.07 | 15 | 0 | 300 | 10 |
| 40 | 702.29 | 9312.01 | 11 | 0 | 300 | 10 |
| 41 | 727.31 | 9311.95 | 27 | 0 | 300 | 10 |
| 42 | 667.91 | 9312.18 | 12 | 301 | 540 | 10 |
| 43 | 658.85 | 9312.22 | 13 | 301 | 540 | 10 |
| 44 | 722.75 | 9312.02 | 23 | 301 | 540 | 10 |
| 45 | 690.46 | 9312.16 | 7 | 301 | 540 | 10 |
| 46 | 729.08 | 9312.17 | 29 | 301 | 540 | 10 |
| 47 | 708.97 | 9312.31 | 5 | 301 | 540 | 10 |
| 48 | 658.10 | 9312.56 | 28 | 0 | 300 | 10 |
| 49 | 682.51 | 9312.53 | 17 | 0 | 300 | 10 |
| 50 | 668.87 | 9312.63 | 21 | 301 | 540 | 10 |

| <i>Node</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Demand Delivery (Kg)</i> | <i>Earliest Time</i> | <i>Latest Time</i> | <i>Service Time</i> |
|-------------|----------|----------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 51 | 666.88 | 9312.64 | 27 | 0 | 300 | 10 |
| 52 | 715.98 | 9312.54 | 9 | 0 | 300 | 10 |
| 53 | 685.33 | 9312.66 | 7 | 0 | 300 | 10 |
| 54 | 687.27 | 9312.66 | 3 | 0 | 300 | 10 |
| 55 | 670.91 | 9312.74 | 16 | 301 | 540 | 10 |
| 56 | 661.66 | 9312.84 | 27 | 0 | 300 | 10 |
| 57 | 721.91 | 9312.70 | 20 | 301 | 540 | 10 |
| 58 | 736.11 | 9312.65 | 14 | 301 | 540 | 10 |
| 59 | 669.15 | 9312.90 | 16 | 0 | 300 | 10 |
| 60 | 731.32 | 9312.73 | 7 | 301 | 540 | 10 |
| 61 | 688.24 | 9312.89 | 27 | 301 | 540 | 10 |
| 62 | 710.62 | 9312.87 | 24 | 0 | 300 | 10 |
| 63 | 671.22 | 9313.01 | 11 | 301 | 540 | 10 |
| 64 | 666.06 | 9313.11 | 28 | 0 | 300 | 10 |
| 65 | 700.21 | 9313.01 | 7 | 0 | 300 | 10 |
| 66 | 729.89 | 9312.99 | 16 | 0 | 300 | 10 |
| 67 | 714.81 | 9313.10 | 5 | 0 | 300 | 10 |
| 68 | 708.61 | 9313.12 | 3 | 301 | 540 | 10 |
| 69 | 711.57 | 9313.15 | 30 | 0 | 300 | 10 |
| 70 | 681.67 | 9313.26 | 21 | 301 | 540 | 10 |
| 71 | 672.50 | 9313.39 | 22 | 301 | 540 | 10 |
| 72 | 728.08 | 9313.23 | 3 | 301 | 540 | 10 |
| 73 | 658.93 | 9313.48 | 30 | 0 | 300 | 10 |
| 74 | 663.40 | 9313.47 | 24 | 301 | 540 | 10 |
| 75 | 691.23 | 9313.39 | 2 | 301 | 540 | 10 |
| 76 | 680.75 | 9313.44 | 3 | 301 | 540 | 10 |
| 77 | 719.67 | 9313.35 | 20 | 301 | 540 | 10 |
| 78 | 674.44 | 9313.61 | 23 | 301 | 540 | 10 |
| 79 | 678.93 | 9313.62 | 7 | 0 | 300 | 10 |

| <i>Node</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Demand Delivery (Kg)</i> | <i>Earliest Time</i> | <i>Latest Time</i> | <i>Service Time</i> |
|-------------|----------|----------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 80 | 719.90 | 9313.50 | 19 | 0 | 300 | 10 |
| 81 | 726.83 | 9313.49 | 28 | 0 | 300 | 10 |
| 82 | 704.00 | 9313.62 | 22 | 301 | 540 | 10 |
| 83 | 736.36 | 9313.53 | 25 | 301 | 540 | 10 |
| 84 | 678.78 | 9313.75 | 7 | 0 | 300 | 10 |
| 85 | 717.31 | 9313.64 | 8 | 301 | 540 | 10 |
| 86 | 680.91 | 9313.77 | 5 | 0 | 300 | 10 |
| 87 | 727.82 | 9313.68 | 16 | 0 | 300 | 10 |
| 88 | 710.31 | 9313.81 | 10 | 301 | 540 | 10 |
| 89 | 681.25 | 9313.94 | 19 | 301 | 540 | 10 |
| 90 | 710.45 | 9313.89 | 8 | 0 | 300 | 10 |
| 91 | 666.89 | 9314.04 | 4 | 0 | 300 | 10 |
| 92 | 676.39 | 9314.11 | 4 | 0 | 300 | 10 |
| 93 | 658.64 | 9314.16 | 11 | 0 | 300 | 10 |
| 94 | 726.64 | 9313.96 | 22 | 0 | 300 | 10 |
| 95 | 703.99 | 9314.09 | 28 | 0 | 300 | 10 |
| 96 | 704.93 | 9314.16 | 11 | 301 | 540 | 10 |
| 97 | 699.70 | 9314.18 | 19 | 301 | 540 | 10 |
| 98 | 682.68 | 9314.26 | 12 | 0 | 300 | 10 |
| 99 | 687.21 | 9314.27 | 3 | 301 | 540 | 10 |
| 100 | 694.40 | 9314.38 | 5 | 0 | 300 | 10 |
| 101 | 655.96 | 9314.57 | 26 | 301 | 540 | 10 |
| 102 | 682.95 | 9314.51 | 23 | 0 | 300 | 10 |
| 103 | 707.35 | 9314.43 | 6 | 0 | 300 | 10 |
| 104 | 720.26 | 9314.40 | 29 | 301 | 540 | 10 |
| 105 | 728.18 | 9314.38 | 25 | 0 | 300 | 10 |
| 106 | 724.42 | 9314.41 | 8 | 301 | 540 | 10 |
| 107 | 673.21 | 9314.62 | 13 | 301 | 540 | 10 |
| 108 | 702.26 | 9312.90 | 10 | 0 | 300 | 10 |

| <i>Node</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Demand Delivery (Kg)</i> | <i>Earliest Time</i> | <i>Latest Time</i> | <i>Service Time</i> |
|-------------|----------|----------|-----------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| 109 | 678.09 | 9311.18 | 0 | 0 | 540 | 10 |
| 110 | 694.91 | 9314.65 | 0 | 0 | 540 | 10 |

Depot terdapat pada *node* 0, terdapat 2 *overflow warehouse* yang akan digunakan pada penelitian ini yang terletak pada *node* 109, dan 110. Fungsi *overflow warehouse* sendiri akan menerima barang dari main *hub* yang akan di berikan ke pada pelanggan yang dekat jaraknya dengan *overflow warehouse*. Selain data titik kordinat *node*, *demand*, *time windows*, dan *service time* diatas, terdapat data pendukung lainnya seperti data waktu layanan dan kendaraan. Berikut merupakan data pendukungnya:

Tabel 4. 2 *Time windows*

| Time Windows | Waktu |
|---------------------|-----------------------|
| Time Windows 1 | 08.00 WIB - 13.00 WIB |
| Time Windows 2 | 13.01 WIB -17.00 WIB |
| Time Windows 3 | 17.01 WIB – 21.00 WIB |

Dalam penelitian ini, digunakan hanya *time window* 1 (08.00–13.00) dan *time window* 2 (13.01–17.00) dengan pertimbangan operasional dan kebutuhan bisnis PT Pos Logistik Indonesia. Berdasarkan hasil wawancara, kedua jendela waktu tersebut merupakan periode dengan tingkat aktivitas pengantaran dan penjemputan yang paling tinggi, sesuai dengan operasional harian, kebutuhan pelayanan mayoritas pelanggan, dan termasuk ke dalam jam kerja normal. Selain data untuk jendela waktu, terdapat data mengenai kendaraan yang dijelaskan pada table di bawah:

Tabel 4. 3 Data Kendaraan

| | |
|--------------------------------------|----------------|
| Jenis Kendaraan | Mobil BlindVan |
| Jumlah Kendaraan | 5 unit |
| Kapasitas Kendaraan | 1000kg |
| Rata Rata Kecepatan Kendaraan | 22km/jam |

| | |
|--------------------------------|-------------------|
| Waktu Layanan Rata Rata | 10 menit/customer |
| Rasio Konsumsi BBM | 1:11 |
| Harga BBM/km | Rp10.000 |

4.1.5 Matriks Jarak

Jarak *euclidean* adalah perhitungan jarak dua titik dalam ruang *euclidean* yang mempelajari hubungan antara sudut dan jarak (Arifita & Rakhmawati, 2023). Berdasarkan data penelitian yang telah diperoleh dari PT. Pos Logistik Indonesia, akan dibuat matriks jarak untuk mengetahui jarak antar 2 titik dengan cara menghitung jarak *euclidean* antara setiap pasangan titik berdasarkan koordinat lokasi masing-masing. Berikut merupakan rumus yang akan digunakan dan hasil dari perhitungan berupa tabel matriks jarak:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4.14)$$

Tabel 4. 4 Matriks Jarak

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | n | 110 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 0 | 0.00 | 31.42 | 3.32 | 17.91 | 8.60 | 44.61 | 18.62 | 47.90 | 39.15 | 17.23 | 28.88 | ... | 17.18 |
| 1 | 31.42 | 0.00 | 30.26 | 48.88 | 39.27 | 13.25 | 12.90 | 16.55 | 7.78 | 14.30 | 2.53 | ... | 14.58 |
| 2 | 3.32 | 30.26 | 0.00 | 18.62 | 9.01 | 43.51 | 17.36 | 46.81 | 38.03 | 15.96 | 27.73 | ... | 16.61 |
| 3 | 17.91 | 48.88 | 18.62 | 0.00 | 9.62 | 62.13 | 35.99 | 65.43 | 56.66 | 34.59 | 46.36 | ... | 35.01 |
| 4 | 8.60 | 39.27 | 9.01 | 9.62 | 0.00 | 52.51 | 26.37 | 55.81 | 47.04 | 24.97 | 36.74 | ... | 25.46 |
| 5 | 44.61 | 13.25 | 43.51 | 62.13 | 52.51 | 0.00 | 26.14 | 3.30 | 5.47 | 27.54 | 15.77 | ... | 27.58 |
| 6 | 18.62 | 12.90 | 17.36 | 35.99 | 26.37 | 26.14 | 0.00 | 29.45 | 20.67 | 1.40 | 10.37 | ... | 3.89 |
| 7 | 47.90 | 16.55 | 46.81 | 65.43 | 55.81 | 3.30 | 29.45 | 0.00 | 8.77 | 30.84 | 19.07 | ... | 30.85 |
| 8 | 39.15 | 7.78 | 38.03 | 56.66 | 47.04 | 5.47 | 20.67 | 8.77 | 0.00 | 22.07 | 10.30 | ... | 22.15 |
| 9 | 17.23 | 14.30 | 15.96 | 34.59 | 24.97 | 27.54 | 1.40 | 30.84 | 22.07 | 0.00 | 11.77 | ... | 3.63 |
| 10 | 28.88 | 2.53 | 27.73 | 46.36 | 36.74 | 15.77 | 10.37 | 19.07 | 10.30 | 11.77 | 0.00 | ... | 17.18 |
| n | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 110 | 17.18 | 14.58 | 16.61 | 35.01 | 25.46 | 27.58 | 3.89 | 30.85 | 22.15 | 3.63 | 12.10 | ... | 0.00 |

4.1.6 Rute Perusahaan

Berdasarkan data yang diperoleh dari PT. Pos Logistik Indonesia untuk 110 node yang diambil dengan mengecualikan node 109 dan 110 yang merupakan OW, berikut merupakan rute distribusi awal yang digunakan oleh Perusahaan dalam mendistribusikan barangnya dari *main hub* atau *depot*:

Tabel 4. 5 Rute Perusahaan

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak |
|----------|--|-------------|
| Rute 1 | 0 - 54 - 39 - 32 - 19 - 15 - 9 - 23 - 40 - 14 - 27 - 35 - 47 - 13 - 2 - 24 - 4 - 28 - 0 | 88.87 km |
| Rute 2 | 0 - 103 - 95 - 100 - 102 - 98 - 86 - 79 - 36 - 59 - 5 - 17 - 51 - 64 - 7 - 56 - 48 - 73 - 93 - 91 - 92 - 84 - 49 - 53 - 31 - 108 - 62 - 69 - 0 | 114.39 km |
| Rute 3 | 0 - 90 - 82 - 75 - 61 - 38 - 43 - 30 - 29 - 101 - 1 - 10 - 12 - 25 - 6 - 68 - 88 - 0 | 117.16 km |
| Rute 4 | 0 - 67 - 52 - 26 - 41 - 18 - 22 - 66 - 87 - 105 - 81 - 94 - 80 - 104 - 106 - 72 - 46 - 60 - 83 - 58 - 3 - 44 - 57 - 77 - 85 - 0 | 77.00 km |
| Rute 5 | 0 - 65 - 45 - 34 - 20 - 8 - 11 - 21 - 16 - 74 - 33 - 42 - 50 - 55 - 63 - 71 - 107 - 78 - 76 - 89 - 70 - 37 - 99 - 97 - 96 - 0 | 105.67 km |

Berdasarkan tabel tersebut, kebijakan Perusahaan menetapkan 5 rute yang sama dengan 5 kendaraan untuk total 108 titik. Proses distribusi dilakukan oleh kendaraan *Blind Van* dengan total jarak untuk rute 1 yaitu 88.87km, rute 2 yaitu 114.39 km, rute 3 yaitu 117.16 km, rute 4 yaitu 77.00 km, dan rute 5 yaitu 105.67 km dengan total keseluruhan rute yaitu 503.09 km.

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Penetapan Parameter

Algoritma *simulated annealing* menggunakan beberapa parameter yang akan mempengaruhi kinerja SA dalam pengaplikasiannya, parameternya terdiri dari suhu awal (T_0), suhu akhir (T_f), jumlah iterasi (L_{inner}), dan *cooling rate* (α). Berikut merupakan parameter yang digunakan dalam penelitian ini dengan mengacu pada parameter yang digunakan oleh (Bent & Hentenryck, 2006):

- Suhu awal (T_0) : 2000
- Suhu akhir (T_f) : 0.01
- Jumlah iterasi (L_{inner}) : 2500
- *Cooling rate* (α). : 0.95

4.2.2 Algoritma *Simulated Annealing*

Tahap awal yang dibutuhkan algoritma *simulated annealing* yaitu membentuk solusi awalan, sehingga untuk pembentukan solusi awalan pada permasalahan ini akan menggunakan algoritma *insertion heuristics*. *Insertion heuristic* akan memilih pelanggan dengan jarak terdekat dengan *depot* atau *main hub*, kemudian akan menyisipkan pelanggan satu persatu dengan jarak yang paling sedikit hingga tidak ada pelanggan yang tersisa dengan tetap memperhatikan kapasitas kendaraan dan *time windows* untuk setiap pelanggan. Setelah solusi awal terbentuk, maka algoritma *simulated annealing* akan berusaha melakukan optimasi. *Simulated annealing* akan dimulai pada suhu awal yaitu 2000 dan suhu akhir yaitu 0.01 dengan *cooling rate* sebesar 0.95. berikut merupakan *pseudocode* untuk algoritma *simulated annealing* dalam menyelesaikan permasalahan di PT. Pos Logistik Indonesia:

Tabel 4. 6 *Pseudocode simulated annealing*

| | |
|----|---|
| 1 | σ_0 = InsertionHeuristic |
| 2 | σ_{best} = σ_0 |
| 3 | $T = T_0$ |
| 4 | while $T > T_f$ do |
| 5 | for $k = 1$ to L_{inner} do |
| 6 | $r = \text{uniform_random}(0,1)$ |
| 7 | if $r < 0.5$ then |
| 8 | $\sigma' = \text{SwapMove}(\sigma, \text{Start}, \text{End}, \text{Demands})$ |
| 9 | else |
| 10 | $\sigma' = \text{RelocateMove}(\sigma, \text{Start}, \text{End}, \text{Demands})$ |
| 11 | end if |
| 12 | if σ' is not feasible then |
| 13 | continue |
| 14 | end if |
| 15 | $\Delta = \text{Cost}(\sigma') - \text{Cost}(\sigma)$ |
| 16 | if $\Delta < 0$ or $\exp(-\Delta / T) > \text{uniform_random}(0,1)$ then |
| 17 | $\sigma = \sigma'$ |
| 18 | if $\text{Cost}(\sigma') < \text{Cost}(\sigma_{best})$ then |
| 19 | $\sigma_{best} = \sigma'$ |
| 20 | end if |
| 21 | end if |
| 22 | end for |
| 23 | $T = \alpha \cdot T$ |
| 24 | end while |
| 25 | Refinement: |

```

26 for each route R in  $\sigma\_best$  do
27     R =TwoOpt(R, Start, End, Demands)
28 end for
29 return  $\sigma\_best$ 

```

Setelah rute terbentuk dan tidak melanggar batas kapasitas dan juga jendela waktu, tahap selanjutnya yaitu melakukan evaluasi mengenai rute yang terbentuk. tahap evaluasi dengan menghitung selisih (Δ) terhadap biaya solusi saat ini. Jika $\Delta < 0$ yang dimana menunjukkan bahwa jarak berkurang, tetangga akan diterima, apabila $\Delta \geq 0$, tetangga tetap dapat diterima dengan probabilitas $\exp(-\Delta/T)$, di mana T adalah suhu saat ini.

4.2.3 Hasil Optimasi

Setelah melakukan optimasi menggunakan algoritma *simulated annealing* untuk permasalahan VRPPDTW pada PT. Pos Logistik Indonesia dengan menggunakan *overflow warehouse*, didapatkan hasil akhir dengan total 6 rute atau 6 kendaraan, dengan pada tahap 1 atau hari pertama yaitu 3 rute dan tahap ke-2 yaitu 3 rute. Berikut merupakan rute dari tiap tahap beserta jarak, dan biaya konsumsi BBM nya:

1. Tahap 1

Tabel 4. 7 Hasil optimasi tahap 1

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak | Biaya BBM |
|----------|---|-------------|------------|
| Rute 1 | 0 - 67 - 52 - 80 - 26 - 41 - 81 - 94 - 87 - 105 - 66 - 18 - 22 - 58 - 83 - 60 - 3 - 46 - 72 - 106 - 44 - 57 - 28 - 4 - 77 - 104 - 85 - 0 | 64.85km | Rp. 58,954 |
| Rute 2 | 0 - 90 - 103 - 95 - 109 - 14 - 27 - 13 - 2 - 24 - 0 | 73.55km | Rp. 66,866 |
| Rute 3 | 0 - 69 - 62 - 47 - 35 - 82 - 110 - 96 - 68 - 88 - 0 | 35.84km | Rp. 32,578 |

2. Tahap 2

Tabel 4. 8 Hasil optimasi tahap 2

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak | Biaya BBM |
|---------------------|--|--------------------|------------------|
| Rute 1 (Hub 109) | 109 - 19 - 84 - 79 - 86 - 102 - 98 - 32 - 49 - 39 - 53 - 12 - 34 - 37 - 10 - 20 - 1 - 38 - 70 - 89 - 76 - 78 - 107 - 71 - 63 - 55 - 109 | 45.92km | Rp. 41,745 |
| Rute 2 (Hub 109) | 109 - 92 - 36 - 59 - 5 - 17 - 51 - 91 - 64 - 7 - 56 - 73 - 93 - 48 - 101 - 29 - 30 - 43 - 16 - 74 - 21 - 33 - 42 - 50 - 11 - 8 - 109 | 62.76km | Rp. 57,053 |
| Rute 3 (Hub 110) | 110 - 65 - 108 - 40 - 23 - 9 - 31 - 100 - 54 - 15 - 25 - 61 - 99 - 45 - 75 - 6 - 97 - 110 | 53.25km | Rp. 48,405 |

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Hasil Rute

Berdasarkan hasil optimasi yang dilakukan dengan menggunakan metode *simulated annealing* untuk menyelesaikan masalah VRPPDTW pada PT. Pos Logistik dengan *overflow warehouse*, algoritma ini berhasil melakukan optimasi dengan meminimalkan jarak dari 100 *node* dengan kendaraan *blind van* yang berkapasitas 1000 kh dengan parameter dari suhu awal (T_0) yaitu 2000, suhu akhir (T_f) sebesar 0.01, jumlah iterasi (L_{inner}) sebesar 2500, dan *cooling rate* (α) sebesar 0.95. Hasil optimasi dari SA menghasilkan total 6 rute yang terdiri dari 3 rute pada tahap pertama dan 3 rute pada tahap terakhir. Berikut merupakan rute yang terbentuk untuk setiap tahapan optimasi menggunakan algoritma *simulated annealing*:

1. Tahap 1.

Tabel 5. 1 Rute tahap 1

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak |
|----------|---|-------------|
| Rute 1 | 0 - 67 - 52 - 80 - 26 - 41 - 81 - 94 - 87 - 105 - 66 - 18 - 22 - 58 - 83 - 60 - 3 - 46 - 72 - 106 - 44 - 57 - 28 - 4 - 77 - 104 - 85 - 0 | 64.85km |
| Rute 2 | 0 - 90 - 103 - 95 - 109 - 14 - 27 - 13 - 2 - 24 - 0 | 73.55km |
| Rute 3 | 0 - 69 - 62 - 47 - 35 - 82 - 110 - 96 - 68 - 88 - 0 | 35.84km |

Pada tahap pertama, proses distribusi dimulai dari *depot* utama menuju titik *hub* yang telah ditentukan, yaitu *overflow warehouse* 109 dan 110 Berdasarkan tabel diatas, hasil optimasi dari algoritma *simulated annealing* menghasilkan 3 rute untuk tahap 1. Rute 1 berisi sejumlah besar pelanggan yang tersebar dalam serangkaian titik yang cukup panjang sebelum kembali ke *depot*, Rute ini menempuh jarak total 64.85km. Kemudian dengan jarak total 73.55km, Rute 2 adalah rute yang terpanjang. Rute ini melewati *overflow warehouse* atau *hub* 109. Kemudian untuk OW 110, termasuk bagian dari rute 3, yang memiliki jarak 35.84 km. Kendaraan yang berangkat tidak boleh melayani

pelanggan melewati *time windows* nya dan juga tidak boleh melewati kapasitas maksimum kendaraan yaitu sebesar 1000 kg. berikut merupakan rincian load dan waktu pada tiap rutenya yaitu:

Tabel 5. 2 *Load* dan *time windows* tahap 1

| Rute Ke- | Rute | Load | Time Windows |
|-----------------|------------------------------|----------------------------|--|
| | | | '0.0min' - '7.8min' - '21.4min' - '42.4min' - '61.0min' - '84.9min' - '99.3min' - '110.7min' - |
| | | 441 - 436 - 427 - 408 - | '124.0min' - '136.2min' - |
| | 0 - 67 - 52 - 80 - 26 - 41 - | 405 - 378 - 350 - 328 - | '152.2min' - '167.4min' - |
| | 81 - 94 - 87 - 105 - 66 - | 312 - 287 - 271 - 267 - | '178.9min' - '301.0min' - |
| Rute 1 | 18 - 22 - 58 - 83 - 60 - 3 - | 257 - 243 - 218 - 211 - | '313.5min' - '337.4min' - |
| | 46 - 72 - 106 - 44 - 57 - | 197 - 168 - 165 - 157 - | '354.3min' - '368.5min' - |
| | 28 - 4 - 77 - 104 - 85 - 0 | 134 - 114 - 84 - 57 - 37 - | '382.5min' - '403.0min' - |
| | | 8 - 0 - 0 | '420.9min' - '433.9min' - '447.3min' - '462.0min' - '478.9min' - '492.2min' - '510.5min' - '534.8min' |
| | | | '0.0min' - '4.4min' - '23.0min' - '42.2min' - |
| Rute 2 | 0 - 90 - 103 - 95 - 109 - | 932 - 924 - 918 - 890 - 70 | '123.3min' - '301.0min' - |
| | 14 - 27 - 13 - 2 - 24 - 0 | - 50 - 49 - 25 - 3 - 0 - 0 | '312.4min' - '325.9min' - '340.6min' - '358.6min' - '377.4min' |
| | | | '0.0min' - '2.7min' - |
| Rute 3 | 0 - 69 - 62 - 47 - 35 - 82 - | 333 - 303 - 279 - 274 - | '15.4min' - '301.0min' - |
| | 110 - 96 - 68 - 88 - 0 | 262 - 240 - 24 - 13 - 10 - | '313.4min' - '336.0min' - |

| Rute Ke- | Rute | Load | Time Windows |
|-----------------|-------------|---------------------------|---------------------------|
| | | 0 - 0120 - 93 - 63 - 40 - | '370.9min' - '408.3min' - |
| | | 20 - 0 - 0 | '428.7min' - '443.7min' - |
| | | | '458.6min' |

Berdasarkan tabel diatas, kendaraan pertama membawa beban 441 kg yang akan didistribusikan kepada 26 pelanggan. Kendaraan kedua membawa beban lebih banyak yaitu 932 yang hampir menyemai kapasitas maksimumnya, kendaraan ini membawa barang yang akan di antar ke OW 109 yaitu sebesar 820 kg. dan untuk kendaraan terakhir yaitu kendaraan ke 3 juga membawa barang yang akan disitribusikan ke OW 110 dengan berat 216 dari total berat yang dibawa dari depot yaitu 333 kg.

Kesimpulan yang diperoleh yaitu setiap rute yang terbentuk dan kendaraan yang berangkat dari depot, tidak melanggar batas load dan time windows yang ada. Algoritma *simulated annealing* berhasil menghitung total beban yang harus didistribusikan ke setiap titik dengan tidak melanggar Batasan yang ada.

2. Tahap 2.

Tabel 5. 3 Rute tahap 2

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak |
|-----------------|---|--------------------|
| | 109 - 19 - 84 - 79 - 86 - 102 - 98 - 32 | |
| Rute 1 | - 49 - 39 - 53 - 12 - 34 - 37 - 10 - 20 - | 45.92km |
| (Hub 109) | 1 - 38 - 70 - 89 - 76 - 78 - 107 - 71 - | |
| | 63 - 55 - 109 | |
| | 109 - 92 - 36 - 59 - 5 - 17 - 51 - 91 - | |
| Rute 2 | 64 - 7 - 56 - 73 - 93 - 48 - 101 - 29 - | 62.76km |
| (Hub 109) | 30 - 43 - 16 - 74 - 21 - 33 - 42 - 50 - | |
| | 11 - 8 - 109 | |

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak |
|---------------------|---|-------------|
| Rute 3 (Hub 110) | 110 - 65 - 108 - 40 - 23 - 9 - 31 - 100 - 54 - 15 - 25 - 61 - 99 - 45 - 75 - 6 - 97 - 110 | 53.25km |

Untuk tahap ke 2, proses pengiriman dimulai dari *hub* atau *overflow warehouse* (OW) ke pelanggan yang dilayani oleh setiap hub. *Hub* 109 bertanggung jawab untuk Rute 1 hingga 2, sedangkan *Hub* 110 menangani Rute 3. Rute 1 memiliki total jarak 45.92km, menunjukkan bahwa lokasi pelanggan cukup dekat, memungkinkan kendaraan untuk mengunjungi lebih banyak titik dalam waktu yang singkat. Dengan jarak 62.76 km, rute 2 adalah yang terpanjang. Kemudian untuk rute 3, dengan jarak 53.25km, menjadi rute terpendek kedua. Dengan rincian *load* dan *time windows* pada tiap rutenya yaitu:

Tabel 5. 4 *Load* dan *time windows* tahap 2

| Rute Ke- | Rute | Load | Time Windows |
|------------------------|---|--|--|
| | | | '0.0min' - '11.0min' - '27.5min' - '38.0min' - '53.4min' - '69.3min' - '80.4min' - '97.9min' - '111.6min' - '126.8min' - |
| Rute 1 (Hub 109) | 109 - 19 - 84 - 79 - 86 - 102 - 98 - 32 - 49 - 39 - 53 - 12 - 34 - 37 - 10 - 20 - 1 - 38 - 70 - 89 - 76 - 78 - 107 - 71 - 63 - 55 - 109 | 397 - 367 - 360 - 353 - 348 - 325 - 313 - 292 - 275 - 260 - 253 - 250 - 231 - 220 - 214 - 186 - 157 - 128 - 107 - 88 - 85 - 62 - 49 - 27 - 16 - 0 - 0 | '139.9min' - '301.0min' - '314.9min' - '330.2min' - '342.7min' - '354.2min' - '370.0min' - '383.2min' - '396.8min' - '409.0min' - '420.9min' - '448.1min' - '462.5min' - '476.3min' - '490.0min' - '501.1min' - '531.1min' |

| Rute Ke- | Rute | Load | Time Windows |
|------------------------|---|---|--|
| | | | '0.0min' - '19.2min' - '39.7min' - '61.0min' - '77.7min' - '88.8min' - '102.5min' - '116.3min' - '129.7min' - '147.2min' - '165.8min' - '183.5min' - '195.5min' - '210.1min' - '301.0min' - '319.4min' - '336.8min' - '350.3min' - '368.0min' - '385.5min' - '401.7min' - '414.3min' - '431.6min' - '444.5min' - '458.6min' - '480.3min' - '504.1min' |
| Rute 2 (Hub 109) | 109 - 92 - 36 - 59 - 5 - 17 - 51 - 91 - 64 - 7 - 56 - 73 (Hub - 93 - 48 - 101 - 29 - 30 - 109) 43 - 16 - 74 - 21 - 33 - 42 - 50 - 11 - 8 - 109 | 423 - 419 - 404 - 388 - 380 - 376 - 349 - 345 - 317 - 294 - 267 - 237 - 226 - 198 - 172 - 160 - 150 - 137 - 132 - 108 - 87 - 84 - 72 - 51 - 23 - 0 - 0 | |
| Rute 3 (Hub 110) | 110 - 65 - 108 - 40 - 23 - 9 - 31 - 100 - 54 - 15 - 25 (Hub - 61 - 99 - 45 - 75 - 6 - 97 110) - 110 | 216 - 209 - 199 - 188 - 165 - 153 - 127 - 122 - 119 - 93 - 69 - 42 - 39 - 32 - 30 - 19 - 0 - 0 | '0.0min' - '25.1min' - '40.7min' - '53.2min' - '79.9min' - '93.0min' - '105.3min' - '123.0min' - '153.0min' - '168.8min' - '301.0min' - '315.7min' - '330.3min' - '350.9min' - '364.9min' - '384.4min' - '412.9min' - '436.1min' |

Hub 109, membentuk 2 rute dengan 2 kendaraan yang berbeda. Kendaraan pertama membawa beban sebesar 397 kg dari *hub* 109 yang akan didistribusikan ke beberapa pelanggan terdekatnya. Kendaraan kedua juga membawa barang dengan berat yang tidak jauh beda dengan kendaraan pertama yaitu sebesar 423 kg. Selanjutnya untuk

hub 110, hanya memiliki 1 rute yang Dimana kendaraannya membawa beban sebesar 216 kg dari *hub* yang akan di distribusikan ke pelanggan dengan jarak terdekat dengan *hub* tersebut.

Berdasarkan tabel di atas juga dapat disimpulkan bahwa kendaraan tidak melanggar Batasan load maupun time windows, kendaraan balik ke *hub* nya masing masing dengan waktu kurang dari 540 menit yang dimana merupakan akhir dari jendela waktu untuk *hub* dan depot.

5.2 Analisis Biaya

Berdasarkan hasil optimasi dengan menggunakan algoritma *simulated annealing*, akan dihitung biaya konsumsi bahan bakar minyak (BBM) dari setiap rute yang dihasilkan. Konsumsi BBM untuk kendaraan *blind van* memiliki rasio konsumsi BBM yaitu 1:11 yang Dimana 1liter BBM bisa menempuh jarak 11 km. Setelah jarak tempuh dari masing-masing rute diketahui, tahap selanjutnya adalah menghitung total konsumsi bahan bakar dengan membagi total jarak tempuh kendaraan dengan rasio BBM 1:11. Sehingga total konsumsi BBM dapat dikalikan dengan harga BBM per liter untuk mendapatkan total biaya bahan bakar. Dengan perhitungan ini, kita dapat mengetahui estimasi biaya bahan bakar minyak yang dibutuhkan berdasarkan rute yang terbentuk. Berikut merupakan biaya dari masing-masing tahap:

1. Tahap 1.

Tabel 5. 5 Biaya BBM untuk tahap 1

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak | Biaya BBM |
|----------|---|-------------|------------|
| Rute 1 | 0 - 67 - 52 - 80 - 26 - 41 - 81 - 94 - 87 - 105 - 66 - 18 - 22 - 58 - 83 - 60 - 3 - 46 - 72 - 106 - 44 - 57 - 28 - 4 - 77 - 104 - 85 - 0 | 64.85km | Rp. 58,954 |
| Rute 2 | 0 - 90 - 103 - 95 - 109 - 14 - 27 - 13 - 2 - 24 - 0 | 73.55km | Rp. 66,866 |
| Rute 3 | 0 - 69 - 62 - 47 - 35 - 82 - 110 - 96 - 68 - 88 - 0 | 35.84km | Rp. 32,578 |

Berdasarkan tabel diatas, rute 1 membutuhkan biaya sebesar Rp. 58,954 untuk jarak tempuh total 58.30 km, sedangkan Rute 3 membutuhkan biaya sebesar Rp. 66,866 untuk jarak tempuh yang lebih jauh dibandingkan rute 1 yaitu 73.55 km. Kemudian untuk rute terakhir membutuhkan biaya Rp. 32,578 dan menempuh jarak tempuh total 35.84km. dari ketiga rute tersebut dapat disimpulkan bahwa biaya BBM per km yaitu berkisar pada Rp. 909/km

2. Tahap 2.

Tabel 5. 6 Biaya BBM untuk tahap 2

| Rute Ke- | Rute | Total Jarak | Biaya BBM |
|---------------------|--|-------------|------------|
| Rute 1 (Hub 109) | 109 - 19 - 84 - 79 - 86 - 102 - 98 - 32 - 49 - 39 - 53 - 12 - 34 - 37 - 10 - 20 - 1 - 38 - 70 - 89 - 76 - 78 - 107 - 71 - 63 - 55 - 109 | 45.92km | Rp. 41,745 |
| Rute 2 (Hub 109) | 109 - 92 - 36 - 59 - 5 - 17 - 51 - 91 - 64 - 7 - 56 - 73 - 93 - 48 - 101 - 29 - 30 - 43 - 16 - 74 - 21 - 33 - 42 - 50 - 11 - 8 - 109 | 62.76km | Rp. 57,053 |
| Rute 3 (Hub 109) | 110 - 65 - 108 - 40 - 23 - 9 - 31 - 100 - 54 - 15 - 25 - 61 - 99 - 45 - 75 - 6 - 97 - 110 | 53.25km | Rp. 48,405 |

Berdasarkan tabel 5.6 diatas, terdapat 2 rute (rute 1, dan rute 2) yang berangkat dan kembali ke *Hub* 109, sementara itu untuk rute ke 3 berangkat dan kembali ke *Hub* 110. Rute 1 adalah yang memiliki nilai biaya terendah yaitu Rp Rp. 41,745 dikarenakan jarak yang terpendek sebesar 45.92km. Kemudian untuk rute 2 menghabiskan biaya paling banyak Rp. 57,053 dan menempuh jarak terjauh dengan jarak 62.76km. Selain itu untuk rute 3 yang menempuh jarak 53.25km memiliki biaya dengan total Rp. 48,405.

Berdasarkan hasil biaya BBM dari 2 tahap distribusi yang diselesaikan dengan algoritma simulated annealing, total jarak dan total biaya BBM dijumlahkan untuk setiap tahap untuk mengetahui jumlah keseluruhan pada setiap tahapannya. Berikut merupakan total biaya dan jaraknya:

Tabel 5. 7 Total biaya dan jarak

| Tahap ke- | Total Jarak | Total Biaya BBM |
|------------------|--------------------|----------------------------|
| Tahap 1 | 174.24 km | Rp158,398 |
| Tahap 2 | 161.92 km | Rp147,203 |

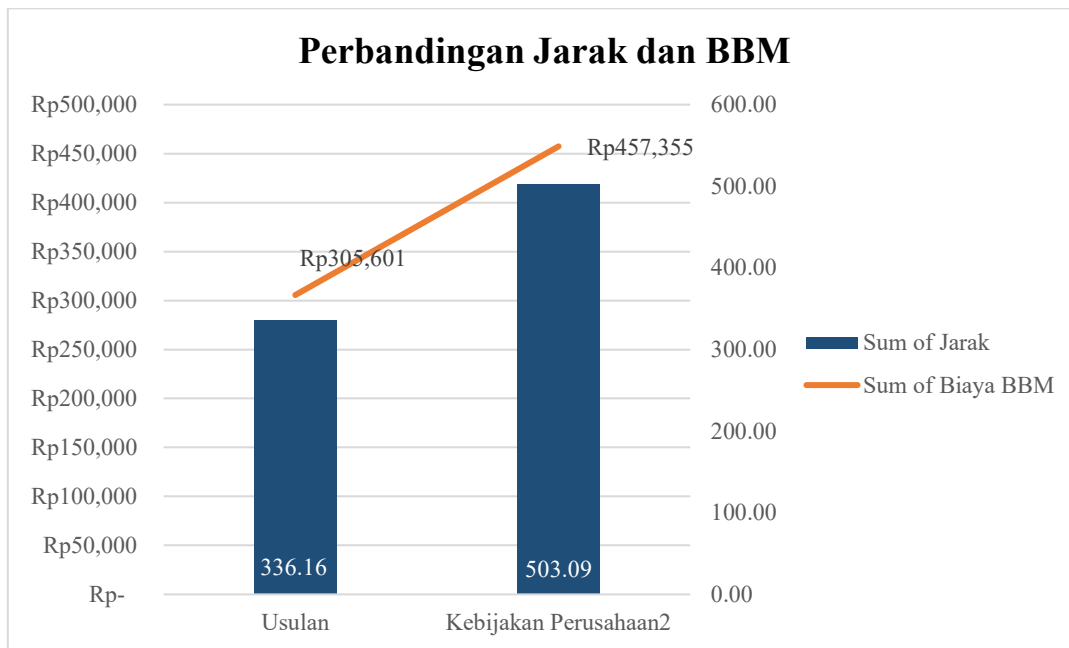
Dari tabel di atas terlihat bahwa pada Tahap 1, semua kendaraan menempuh jarak total 174.24 km dengan biaya bahan bakar sebesar Rp Rp158,398. Kemudian pada tahap 2 jarak tempuhnya sedikit lebih pendek 161.92 km sehingga biaya bahan bakarnya menjadi Rp Rp147,203. Total keseluruhan dari biaya BBM yang dibutuhkan pada tahap 1 dan 2 berdasarkan optimasi yaitu sebesar Rp305,601 dengan jarak total yang ditempuh yaitu sebesar 336.16 km,

5.3 Analisis Biaya Analisis Perbandingan Kebijakan Perusahaan dan Usulan

PT Pos Logistik Indonesia saat ini masih mengandalkan data historis dan pengalaman para pengemudi dalam menentukan rute distribusi berdasarkan wawancara yang telah dilakukan. Untuk melakukan perbaikan, perusahaan secara berkala mengevaluasi rute pengiriman, biasanya setiap semester atau setahun sekali. Meskipun metode ini telah digunakan selama bertahun-tahun, pendekatan tersebut dinilai kurang efektif dalam mendukung pengambilan keputusan operasional, terutama di tengah perubahan pola distribusi dan permintaan pelanggan yang semakin dinamis. Dengan menggunakan Algoritma *Simulated Annealing*, penelitian ini dapat mengoptimalkan rute pengiriman dengan memanfaatkan *overflow warehouse* atau *hub* yang pada kenyataannya, *hub-hub* dari PT. Pos Logistik Indonesia belum digunakan karena semua barang hanya didistribusikan dari main *hub* saja.

Rute perusahaan didapatkan dari hasil wawancara dengan menggunakan 5 kendaraan pada lebih dari 100 titik. Terdapat 5 rute yang terbentuk dengan total jarak yang ditempuh yaitu 503.09 km. Algoritma *simulated annealing* berhasil melakukan optimasi dengan total jarak

yang diperoleh yaitu 336.16 km. berikut merupakan perbandingan untuk jarak dan biaya BBM untuk kondisi perusahaan dan usulan:



Gambar 5. 1 Grafik perbandingan rute perusahaan dan usulan

Pada grafik di atas terlihat perbandingan antara kebijakan perusahaan dan rute usulan hasil optimasi *Simulated Annealing*. Untuk kebijakan perusahaan, total jarak yang ditempuh mencapai 503.09 km dengan konsumsi BBM sebesar Rp457,355. Setelah menggunakan algoritma *Simulated Annealing* dan memanfaatkan *overflow warehouse*, total jarak bisa ditekan menjadi hanya 336.16 km yang dimana terjadi penghematan rute sebesar 33.18 %. Penurunan jarak ini diikuti juga dengan berkurangnya biaya bahan bakar, dari Rp457,355 menjadi sekitar Rp305,601. algoritma *simulated annealing* dapat menghasilkan hasil yang optimal dengan mengurangi jarak dan biaya bahan bakar dari 110 titik dengan 2 *overflow warehouse* atau *hub*, sehingga PT. Pos Logistik Indonesia dapat menggunakan *hub* yang tidak terpakai sebagai *buffer* dengan tetap meminimalkan jarak dan biaya bahan bakar.

Hasil dari optimasi dengan 110 titik, memiliki kekurangan karena menggunakan lebih banyak kendaraan daripada kebijakan awal perusahaan yaitu 5 kendaraan sedangkan untuk usulan menggunakan 6 kendaraan. Hal ini dapat berdampak pada biaya tetap yaitu biaya karyawan dan biaya kendaraan. Biaya kendaraan dan upah karyawan merupakan contoh biaya tetap yang harus dibayarkan oleh perusahaan saat menjalankan operasionalnya. Mobil jenis *blindvan*, memiliki sebesar Rp137.333,33 per hari. Sementara itu, upah tenaga kerja atau gaji

karyawan disesuaikan dengan upah minimum Provinsi DKI Jakarta yaitu sebesar Rp186.666,67 per hari.

Dengan demikian, walaupun biaya variabel yaitu BBM menurun, total pengeluaran operasional belum tentu lebih rendah karena beban biaya kendaraan dan upah menjadi lebih besar. Akan tetapi, jika terdapat lebih banyak titik yang digunakan sebagai data, maka biaya usulan akan lebih optimal. Berikut merupakan perbandingan kebijakan perusahaan dan usulan dengan menggunakan 110 titik dengan 2 *hub* dan 250 titik dengan 4 *hub*:

Tabel 5. 8 Biaya kendaraan

| Biaya | Jenis Kendaraan | Biaya/bulan | Biaya/hari |
|--------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| Kendaraan | <i>Blind van</i> | Rp4.120.000,00 | Rp137.333,33 |

Tabel 5. 9 Biaya petugas

| Biaya | Jumlah petugas | Biaya/bulan | Biaya/hari |
|--------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| Tenaga kerja | 1 orang | Rp5.600.000,00 | Rp186.666,67 |

Tabel 5. 10 Perbandingan 110 dan 250 titik

| | Perusahaan 110 titik | Usulan 110 titik | Perusahaan 250 titik | Usulan 250 titik |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Jumlah Kendaraan | 5 unit | 6 unit | 13 unit | 13 unit |
| Total Jarak | 503.09 km | 336.16 km | 1111,68 km | 535.44km |
| Total Biaya Tetap | Rp1.620.000 | Rp1.944.000 | Rp4,212,000 | Rp4,212,000 |
| Total Biaya Variabel | Rp457,355 | Rp305,601 | Rp1,010,618 | Rp486,763 |
| Total Biaya | Rp2,077,355 | Rp2,249,601 | Rp5,222,618 | Rp4,698,763 |

Berdasarkan perbandingan untuk 110 titik, perusahaan awalnya hanya menggunakan 5 kendaraan, menempuh jarak total 503.09 km dengan biaya bahan bakar atau variabel sebesar Rp457,355 dan biaya tetap sebesar Rp 1.620.000 per hari, dengan total biaya sebesar Rp2,077,355. Meskipun rute usulan yang dengan algoritma *simulated annealing* yang menggunakan 6 kendaraan dapat mengurangi jarak total menjadi 336.16 km dengan biaya

bahan bakar Rp305,601, biaya tetap meningkat menjadi Rp1.944.000 karena jumlah kendaraan dan tenaga kerja yang bertambah. Total biaya usulan menjadi Rp 2,249,601 dengan selisih Rp172,246 lebih banyak dari kebijakan perusahaan. Sehingga dalam kasus 110 titik, pengurangan jarak dan bahan bakar tidak cukup untuk mengimbangi peningkatan biaya kendaraan dan upah karena penambahan 1 kendaraan.

Ketika jumlah titik berjumlah 250 titik, perusahaan membutuhkan 13 kendaraan, yang mencakup jarak total 1111,68 km. Hal ini mengakibatkan biaya tetap sebesar Rp4,212,000 dan biaya bahan bakar sebesar Rp1,010,618. Di lain sisi, hasil optimasi yang dilakukan dengan algoritma *simulated annealing* menggunakan 13 kendaraan untuk menempuh jarak 535.44km dengan biaya bahan bakar sebesar Rp486,763, dengan total biaya tetap sebesar Rp4,212,000. Sehingga, total biaya usulan hanya sebesar Rp4,698,763 yang jauh lebih sedikit daripada kebijakan perusahaan sebesar sekitar Rp523,854. Oleh karena itu, optimalisasi akan memiliki keuntungan yang maksimal untuk jumlah titik yang lebih banyak yaitu 250 titik, karena jumlah kendaraan, jarak, dan bahan bakar berkurang drastis, sehingga meningkatkan efisiensi distribusi perusahaan.

BAB VI KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian dengan menggunakan algoritma SA berikut merupakan kesimpulan yang didapatkan:

1. Rute distribusi yang optimal berhasil ditentukan melalui penerapan algoritma *Simulated Annealing* (SA), dengan mempertimbangkan batasan kapasitas kendaraan, *time windows* pelayanan, serta kebutuhan *pickup* dan *delivery* pada pelanggan. Pada data 110 titik, algoritma SA berhasil mengurangi total jarak tempuh dari 503.09 km menjadi 336.16 km atau turun sekitar 33,18%. Namun, terdapat penambahan jumlah kendaraan dari 5 menjadi 6 unit, yang berdampak pada kenaikan biaya tetap. Sedangkan, pada data 250 titik dengan 4 *overflow warehouse*, algoritma SA berhasil menurunkan jarak secara drastis dari 1111,68 km menjadi 535.44 km, dengan menggunakan kendaraan dengan jumlah yang sama dengan kebijakan perusahaan, yang membuktikan bahwa rute yang dihasilkan menjadi semakin optimal seiring meningkatnya skala distribusi. Hal ini menunjukkan bahwa SA efektif dalam menyusun rute yang efisien, terutama pada jumlah titik yang besar.
2. Model VRPPDTW diterapkan menggunakan algoritma *Simulated Annealing* (SA) dengan menggunakan parameter suhu awal 2000, suhu akhir 0.01, iterasi per suhu 2500, dan *cooling rate* 0.95. Solusi awal dibentuk menggunakan metode *insertion heuristic*, kemudian dioptimasi dengan dua operator *Swap Move* dan *Relocate Move*. Setiap solusi dievaluasi berdasarkan total jarak tempuh dan diterima jika lebih baik, atau diterima dengan probabilitas tertentu jika lebih buruk, untuk menghindari jebakan lokal. Setelah proses iterasi selesai, solusi disempurnakan menggunakan *Two-Opt* agar urutan rute lebih efisien. Hasil optimasi menghasilkan total 6 rute yang terbagi dalam dua tahap pengiriman, yaitu 3 rute dari depot utama dan 3 rute dari dua *overflow warehouse* (hub 109 dan 110). Seluruh rute yang terbentuk telah memenuhi batasan kapasitas kendaraan dan *time window* pelanggan. Total jarak distribusi berhasil diminimasi menjadi 166.93 km, jauh lebih rendah dibanding rute perusahaan sebelumnya. Penerapan SA terbukti mampu membentuk rute yang lebih efisien.

3. Optimalisasi rute distribusi dengan algoritma *Simulated Annealing* memberikan dampak signifikan terhadap biaya operasional, terutama pada skala distribusi besar. Pada data 250 titik dengan 4 *overflow warehouse* atau *hub*, optimasi berhasil memangkas total jarak tempuh dari 1111,68 km menjadi 535,44 km. Dampak langsungnya terlihat pada pengurangan biaya bahan bakar dan biaya tetap, sehingga total pengeluaran turun sebesar Rp523,854. Sebaliknya, pada kasus 110 titik dengan 2 *overflow warehouse* atau *hub*, meskipun terjadi penurunan biaya bahan bakar dari Rp457,355 menjadi Rp305,601, peningkatan jumlah kendaraan membuat total biaya justru naik menjadi Rp2,249,601 atau lebih tinggi Rp 172,246 dibandingkan biaya dari kebijakan perusahaan. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas penghematan sangat dipengaruhi oleh skala distribusi. Semakin besar jumlah titik layanan, semakin besar potensi penghematan yang dapat dicapai. Oleh karena itu, optimalisasi rute menjadi strategi yang sangat relevan untuk meningkatkan efisiensi operasional perusahaan.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut merupakan saran dan rekomendasi bagi perusahaan dan penelitian selanjutnya jika ingin melakukan penelitian dengan metode yang serupa:

1. Bagi Perusahaan

- Perusahaan dapat menerapkan *algoritma simulated annealing* berdasarkan penelitian ini sebagai bahan pertimbangan untuk pengambilan keputusan dalam kegiatan distribusi. Algoritma SA terbukti dapat mengoptimalkan rute dengan penghematan biaya sebesar 10.03% untuk skala besar seperti yang dilakukan pada penelitian ini pada 250 titik.

2. Bagi Penelitian Selanjutnya

- Melakukan kombinasi algoritma *simulated annealing* dengan algoritma metaheuristik lainnya seperti *genetic algorithm*, *tabu search*, *large neighborhood search* dan lainnya untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.
- Mengintegrasikan kondisi lalu lintas dengan memasukkan data *Estimated Time of Arrival* (ETA) dari Google Maps API atau sistem GIS untuk memodelkan waktu tempuh riil berdasarkan kondisi kemacetan di daerah Jakarta. Sehingga akan merepresentasikan kondisi lapangan dengan lebih tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Andarwulan, N. (2022). STANDAR MUTU CPO UNTUK MINYAK MAKAN DAN PENERAPAN CARA PRODUKSI MINYAK SAWIT YANG BAIK DI INDONESIA: SUATU KENISCAYAAN. *Policy Brief Pertanian, Kelautan, dan Biosains Tropika*, 4(1), 245-248.
- Andriansyah, Novatama, R., & Sentia, P. (2020). ALGORITMA SIMULATED ANNEALING UNTUK MENENTUKAN RUTE KENDARAAN HETEROGEN (STUDI KASUS). *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIK)*, 7(3), 933-942. doi:<http://dx.doi.org/10.25126/jtiik.201743299>
- Angelelli, E., & Mansini, R. (2002). The Vehicle Routing Problem with Time. *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management*, 519, 249-267. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-56183-2_15
- Arifta, E., & Rakhmawati, F. (2023). Analysis of Book Distribution Routes Using the Capacity Vehicle Routing Problem (CVRP) Method Using the Sweep Algorithm. *Sinkron : Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, 7(1), 360-367.
- Azhar, A., & Destari, R. (2021). Analisis Konsumen Memilih Minyak Makan Kemasan Menggunakan Analytical Hierarchy Process (AHP). *INFOSYS (INFORMATION SYSTEM) JOURNAL*, 6(1), 63-71.
- Azzahra, K., & Rachmatin, D. (2024). Penyelesaian Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows Menggunakan Particle Swarm Optimization Algorithm. *Jurnal EurekaMatika*, 12(1), 47-54.
- Badan Pusat Statistik . (2023). *Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Triwulan III-2023 BRS No. 76/11/Th. XXVI*, 6. Badan Pusat Statistik.
- Bent, R., & Hentenryck, P. (2006). A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research*, 33(4), 875-893. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.08.001>
- Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. (1993). Simulated Annealing. *Statistical Science*, 8(1), 10-15. Retrieved from <http://links.jstor.org/sici?sici=0883-4237%28199302%298%3A1%3C10%3ASA%3E2.0.CO%3B2-%23>
- Blocho, M. (2020). Heuristics, metaheuristics, and hyperheuristics for rich vehicle routing problems. In J. Nalepa (Ed.), *Smart Delivery Systems* (pp. 101-156). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815715-2.00009-9>
- Bräysy, O. (2001). Genetic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Window. *Arpakannus*, 33-38.
- Budiyanti, E. (2023). UPAYA MENINGKATKAN KINERJA LOGISTIK INDONESIA. *BIDANG EKONOMI, KEUANGAN, INDUSTRI, DAN PEMBANGUNAN* , XV(23), 11-15.

- Campbell, A. M., & Savelsbergh, S. (2004). Efficient Insertion Heuristics for Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Transportation Science*, 38(3), 369-378. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/25769207>
- Dethloff, J. (2001). Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *OR Spektrum*, 23, 79-96. doi:10.1007/PL00013346
- Dewangga, A., & Suseno, S. (2022). Analisa Pengendalian Kualitas Produksi Plywood Menggunakan Metode Seven Tools, Failure Mode And Effect Analysis (FMEA), Dan TRIZ. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 1(3), 243-253.
- Dumas, Y., Desrosiers, J., & Soumis, F. (1991). The pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 54, 7-22. doi:10.1016/0377-2217(91)90319-Q
- Engraini, V., Meirizha, S., & Dermawan, D. (2020). Optimasi Vehicle Routing Problem di PT. XYZ Menggunakan Metode Clarke and Wright Saving Heuristic dan Nearest Neighbour. *Seminar Nasional Teknologi Informasi, Komunikasi dan Industri (SNTIKI) 12*.
- Erlangga, D. (2018). *PERANCANGAN MESIN PENIRIS MINYAK (SPINNER) UNTUK KEBUTUHAN DAPUR RUMAH TANGGA DENGAN MENGGUNAKAN METODE TRIZ*. dspaceuii.
- Firmansyah, Y. S., Novianingsih, K., & Husain, H. (2021). Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem Menggunakan Gabungan Algoritma Genetika dan Simulated Annealing. *Jurnal EurekaMatika*, 9(2), 107-116. doi:<https://doi.org/10.17509/jem.v9i2.40080>
- Gencer, C., Aydogan, E., & Cetin, S. (2010). Simultaneous Pick-up and Delivery Decision Support Systems. In *Decision Support Systems, Advances in* (pp. 203-214). doi:10.5772/39398.
- Hertz, S., & Alfredsson, M. (2003). Strategic development of third party logistics providers. *Industrial Marketing Management*, 32(2), 139-149. doi:[https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(02\)00228-6](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(02)00228-6)
- Injac, Z., & Drašković, D. (2024). Classification of vehicle routing problem. *JTTTP - JOURNAL OF TRAFFIC AND TRANSPORT THEORY AND PRACTIC*, 9(1), 36-41.
- Istiqlalayah, H. (2015). Perancangan mesin peniris minyak pada keripik nangka dengan kapasitas 2,5 Kg/menit. *Nusantara of Engineering*, 2, 37-43.
- Jamaludin, M. (2022). ANALISIS PERENCANAAN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT (SCM) PADA PT. XYZ BANDUNG JAWA BARAT. *Jurnal Ilmu Administrasi*, 13.
- Juanda, D., & Cahyono, B. (2005). *Wijen, Teknik Budi Daya dan Analisis Usaha Tani. Yogyakarta : Kanisius*.

- Karjono, Kusumawati, E. D., Karmanis, & Kusumaningrum, D. (2024). Transformasi Pemasaran Industri Logistik Dalam Meningkatkan. *Majalah Ilmiah Bahari Jogja (MIBJ)*, 22, 125-136. doi:<https://doi.org/10.33489/mibj.v22i2.364>
- Ketaren. (2012). . Pengantar Teknologi Minyak dan Lemak Pangan. *Jakarta : UI-Press*.
- Kirkpatrick, S., Vecchi, M. P., & Gelatt, C. D. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Kristina, S., Sianturi, R., & Wijaya, V. (2020). Pengembangan Algoritma Ant Colony System Pada Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Soft Time Window. *Journal of Integrated System*, 3(2), 85–102. doi:<https://doi.org/10.28932/jis.v3i2.2839>
- Kusdian, R., Ridwan, A. S., Tamin, O., & Syafruddin, A. (2005). PENGGUNAAN DISTRIBUSI NORMAL DALAM MEMODELKAN SEBARAN PERSEPSI BIAYA PERJALANAN DAN TRANSFORMASI BOX-MULLER PADA PENGAMBILAN SAMPEL ACAK MODEL PEMILIHAN RUTE DAN PEMBEBANAN STOKASTIK. *Jurnal Transportasi : Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi (FSTPT)*, 5(1), 125-136.
- Kusumastuti, D. (2014). *Peranan Manajemen Logistik dalam Organisasi Publik*.
- Labidi, H., Azzouna, N., Hassine, K., & Gouider, M. (2023). An improved genetic algorithm for solving the multi-objective vehicle routing problem with environmental considerations. *Procedia Computer Scienc*, 3866-3875, 3866-3875. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.382>
- Li, H., & Lim, A. (2001). A Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *International Journal of Artificial Intelligence Tools*, 160-167. doi:10.1109/ICTAI.2001.974461
- Liu, S., Tang, K., & Yao, X. (2012). Memetic search for vehicle routing with simultaneous pickup-delivery and time windows. *Swarm and Evolutionary Computation*, 62(1), 84-95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.018>
- Lutfi, Khoswara, M., Aflah H, H., & Suseno. (2023). Pencarian Rute Optimal Distribusi Melalui Pendekatan Metode Ant Colony Optimization (ACO) (Studi Kasus :Bakpia Pathok 25). *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan(JTMIT)*, 2(2), 63-71.
- Manthou, V., Vlachopoulou, M., & Folinis, D. (2004). Virtual e-Chain (VeC) model for supply chain collaboration. *International Journal of Production Economics*, 87(3).
- Marta, E. (2023). Pola Makan Mengandung Kadar Lemak Jenuh dan Kolesterol Tinggi Mengakibatkan Peningkatan Tekanan Darah dan Stroke pada Penderita Hypertensi di Puskesmas Padang Tahun 2023. *Jurnal Amanah Kesehatan*, 5(2), 18-23.
- Martono, N. (2018). *METODE PENELITIAN SOSIAL: Konsep-konsep Kunci*. Depok: Rajawali Pers.

- Mathivathanan, D., Kannan, D., & Haq, A. N. (2018). Sustainable supply chain management practices in Indian automotive industry: A multi-stakeholder view. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 284-305.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087–1092. doi:<https://doi.org/10.1063/1.1699114>
- Motiwalla, L., & Thompson, J. (2012). Supply Chain Management. In *Enterprise Systems* (pp. 302-330). New Jersey: Pearson Education.
- Mubarok, A., & Chotijah, U. (2021). PENERAPAN ALGORITMA GENETIKA UNTUK Mencari Optimasi Kombinasi Jalur Terpendek Dalam Kasus Travelling Salesman Problem. *Jurnal Teknologi Terpadu*, 7(2), 77-82.
- Nazarena, Y., Mardiana, M., & Sriwiyanti, S. (2023). Pencegahan Penyakit Jantung Koroner Melalui Pola Konsumsi Yang Sehat. *Community Development Journal: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 4(2), 2238-2245.
- Novianto, A. (2016). *Perancangan Wearpack Menggunakan Metode Quality Function Deployment Untuk Oil And Gas Industry (Studi Kasus Di Refinery Unit V Balikpapan)*. dspaceuui.
- Nugraha, R., & Haryono, K. (2022). Metode TRIZ Untuk Meningkatkan Kreativitas Dan Inovasi Pada Bidang Bisnis dan Manajemen Melalui Aplikasi Berbasis Mobile. . *AUTOMATA*, 3(2).
- Nurchahyo, A., & Winanti, E. (2021). Pengaruh model Problem Based Learning terintegrasi pendekatan induktif terhadap kemampuan berpikir spasial dan pengetahuan siswa pada materi mitigasi bencana. . *Jurnal Pendidikan Geografi*, 26(1), 41-47.
- Nurlela, N. (2020). Analisa Bilangan Peroksida Terhadap Kualitas Minyak Goreng Sebelum Dan Sesudah Dipakai Berulang. *Jurnal Redoks*, 5(1), 65-71.
- Pak, Y.-J., & Mun, K.-H. (2024). A practical vehicle routing problem in small and medium cities for fuel. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 12, 100164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100164>
- Patmawati, H., & Nugroho, Y. (2022). OPTIMALISASI RUTE DISTRIBUSI MATRAS PADA PENYELESAIAN CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM DENGAN METODE ALGORITMA GENETIKA. *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, 1(11), 2745–2756. doi:<https://doi.org/10.53625/jcijurnalcakrawalailmiah.v1i11.2856>
- Permana, K. B. (2023). Analisis Peran Supply Chain Management (Scm) Dalam Meningkatkan Kinerja Perusahaan. *COMSERVA: (Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat)*.
- Pramiyati, T., Jayanta, & Yulnelly. (2017). PERAN DATA PRIMER PADA PEMBENTUKAN SKEMA KONSEPTUALYANG FAKTUAL (STUDI KASUS: SKEMA KONSEPTUAL BASISDATA SIMBUMIL). *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 8(2), 679-686.

- Prasetio, P., & Ibik, M. (2015). Rancang bangun keripik mangga podang kapasitas 10 kg per proses (Bagian: Mesin Peniris). *Jurnal Teknik Mesin*, 4, 1-25.
- Prasetyo, P., Susetyo, A., & Susanti, D. (2021). Perancangan Alat Bantu dan Aktifitas Toilet Portabel Tunadaksa Bagian Bawah dengan Mengintegrasikan Tahapan Front-End Process dan Metode TRIZ. *Science Tech: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 7(2), 22-38.
- Priwarnela, R. (2012). *An application of two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problem with time windows*. Depok: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.
- Procurement, M. P. (2012). *Manajemen Pengadaan*. Bandung: Alfabeta.
- Pujawan, I. N., & Mahendrawathi. (2017). *Supply Chain Management Edisi 3*. Penerbit ANDI.
- Rahman, A., & Asih, H. M. (2020). Optimizing shipping routes to minimize cost using particle swarm optimization. *International Journal of Industrial Optimization*, 1(1), 53-60.
- Ramadhan, A. (2021). Perancangan Mesin Pembuat Pelet Apung Berbahan Maggot Berkapasitas 20 Kg/Jam dengan Metode TRIZ. *In Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar (Vol. 12, pp. 283-288)*.
- Redi, A., Maula, F., Kumari, F., Syaveyenda, N., Ruswandi, N., Khasanah, A. U., & Kurniawan, A. C. (2020). Simulated annealing algorithm for solving the capacitated vehicle routing problem: a case study of pharmaceutical distribution. *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*, 4(1), 41-49.
- Redi, A., Zahra, F., Islami, P., Rachmawati, N. L., Nadlifatin, R., & Supranartha, A. (2021). Simulated Annealing Algorithm for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick Up and Delivery: A Case Study of Liquid Petroleum Gas Distribution. *Proceedings of the 2nd Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 667-676). Surakarta: IEOM Society International. doi:<https://doi.org/10.46254/AP02.20210099>
- Ridwan, M., & Gaffar, M. R. (2022). EFISIENSI PERSEDIAAN DAN DISTRIBUSI MELALU IINTEGRASI SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. *Applied Business and Administration Journal*.
- Rizkiani, F., Sari, R., & Imran, A. (2023). A Simulated Annealing for Heterogenous Fleet Vehicle Routing Problem with Multiple Trips and Pickup-Delivery. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 3(3). doi:<https://doi.org/10.26760/jrh.V7i3.277-288>
- Ropke, S., & Cordeau, J.-F. (2009). Branch and Cut and Price for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 3(43), 267-286.
- Rosenkrantz, D., Stearns, R., & II, P. (1977). An Analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem. *SIAM Journal on Computing*, 6(3), 563-581.

- Sahputri, J., & Harrika, F. (2023). Pengaruh Kadar Glukosa Darah Puasa Pada Mencit Yang Di Induksi Minyak Jelantah. *Jurnal Ilmiah Manusia Dan Kesehatan*, 6(1), 132-141.
- Saleh, K., Helmi, & Prihandono, B. (2015). PENENTUAN RUTE TERPENDEK DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA CHEAPEST INSERTION HEURISTIC (STUDI KASUS: PT. Wicaksana Overseas International Tbk. Cabang Pontianak). *Buletin Ilmiah Math. Stat. dan Terapannya (Bimaster)*, 4(3), 295 –304.
- Sartori, C. (2019). The Pickup and Delivery Problem with Time Windows: Algorithms, Instances, and Solutions. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10183/194380>
- Savelsbergh, M., & Sol, M. (1995). The General Pickup and Delivery Problem. *Transportation Science*, 1(29), 17-29.
- Siahaya, W. (2012). *Manajemen Pengadaan*. Bandung: Alfabeta.
- Sinaga, R. L. (2015). *ALGORITMA SIMULATED ANNEALING UNTUK MENYELESAIKAN MULTI DEPOT VEHICLE ROUTING PROBLEM DENGAN VARIABEL TRAVEL TIME*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sitorus, R., Manumono, D., & Ambasari, A. (2023). Manajemen Logistik di Perkebunan Kelapa Sawit PT Surya Agrolika Reksa di Desa Beringin Jaya, Kecamatan Singingi Hilir, Kabupaten Kuantan Singingi, Provinsi Riau. *Agroforetech*.
- Skender, H. P., Host, A., & Nuhanovic, M. (2016). The Role Of Logistics Service Providers In International Trade. *Business Logistics in Modern Management*, 16, 21-37.
- Statistik, B. P. (2023). *Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Triwulan III-2023 BRS No. 76/11/Th. XXVI*, 6.
- Sugiyono. (2011). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung. Alfabeta.
- Sukartin, K., & Sitanggang, M. (2005). *Gempur Penyakit dengan VCO*. Jakarta: AgroMedia Pustaka.
- Sumardiyanto, H., & Chin, J. (2023). Application of Particle Optimization and Genetic Algorithms(GA) Method in Fleet Transportation Systemsof two-wheeled automotive industry. *Universal Journal of Science and Technology (UJoST)*, 2(1), 352-362.
- Syah, A. (2005). *Virgin Coconut Oil : Minyak Penakluk Aneka Penyakit*. Jakarta : AgroMedia Pustaka.
- Sze, S. N., Sek, S. Y., Sze, J. F., Cheah, W. S., & Chiew, K. L. (2020). Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 10.
- Tospornsampan, J., Kita, I., Ishii, M., & Kitamura, Y. (2007). Split-Pipe Design of Water Distribution Network Using. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 1(4), 28-38.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics).

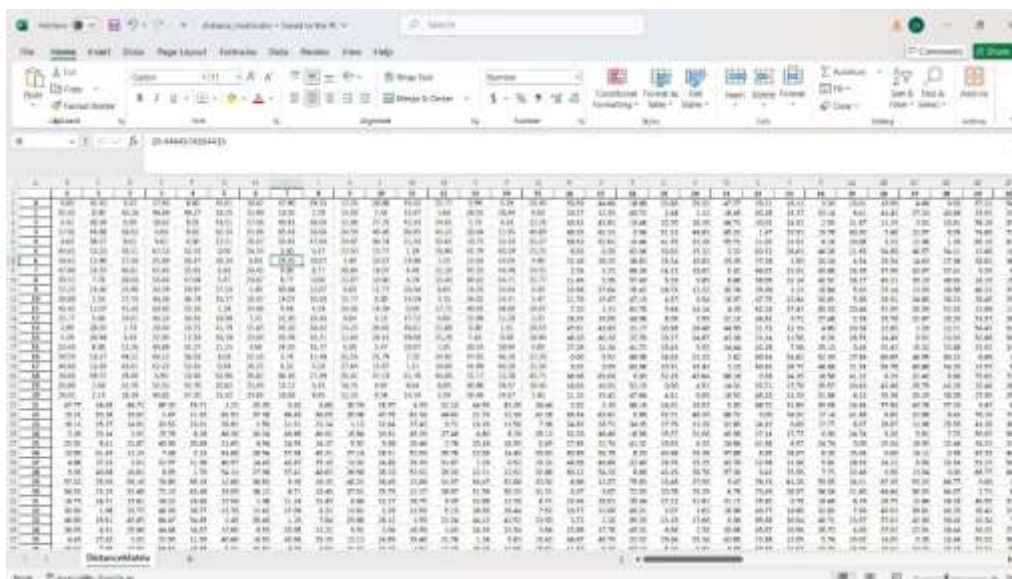
- Turnip, P., & Saragih, N. (2022). Design of Vehicle Routes for Rice Distribution System in Bandung Using Simulated Annealing Algorithm. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 11(2), 211-220. doi:<https://doi.org/10.26593/jrsi.v11i2.5842.211-220>
- Utami, N., & Sitorus, O. F. (2015). Manajemen Logistik di Giant Ekstra. *Jurnal Utilitas*, 1.
- Vildayanti, R. A., Hidayat, R. S., Jusmansyah, M., Setyarko, Y., & Sriyanto, A. (2024). Pengaruh Faktor Biaya, Faktor Pelayanan Dan Efektifitas Operasional Terhadap Performa Manajemen Logistik Perusahaan. *Jurnal Publikasi Ekonomi dan Akuntansi (JUPEA)*, 4, 141-153.
- Wang, C., Zhao, F., Mu, D., & Sutherland, J. (2013). Simulated Annealing for a Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup-Delivery and Time Windows. *Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains*, 415, 170-177. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-41263-9_21
- Wang, H.-F., & Chen, Y.-Y. (2012). A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 84-95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.018>
- Wu, H., & Gao, Y. (2023). An ant colony optimization based on local search for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time window. *Applied Soft Computing*, 139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110203>
- Wu, Q., Xia, X., Song, H., Zeng, H., Xu, X., Zhang, Y., . . . Wu. (2024). A neighborhood comprehensive learning particle swarm optimization for the vehicle routing problem with time windows. *Swarm and Evolutionary Computation*, 84, 101425.
- Yuan G. (2021). The theory of inventive problem solving (TRIZ)-based strategic mapping of green nuclear energy investments with spherical fuzzy group decision-making approach. *International Journal of Energy Research*, 45(8), 12284-12300.
- Zirour, M., & Omar, K. (2008). VEHICLE ROUTING PROBLEM: MODELS AND SOLUTIONS. *Journal of Quality Measurement and Analysis*, 4(1), 205-218.

LAMPIRAN

A - Coordinate Converter (Latitude Longitude – UTM)

```
D:\SEM 7\TA\KONSUL PAK RIDWAN\untitled0.py
DATA BANYAK.py x DATA RIL WAKTU OPTIMAL FIX.py x MATRIKS JARAK.py x untitled0.py* x
1 import pandas as pd
2 import utm
3
4 # 1) Baca data
5 df = pd.read_excel(r'D:\SEM 7\TA\DATA FIX\DATA SKRIPSI FILTER.xlsx')
6
7 # 2) Konversi ke UTM
8 df[['Easting', 'Northing', 'ZoneNumber', 'ZoneLetter']] = df.apply(
9     lambda r: pd.Series(utm.from_latlon(r['Latitude'], r['Longitude'])),
10    axis=1
11)
12
13 # 3) Simpan
14 df.to_excel('D:\SEM 7\TA\DATA FIX\DATA SKRIPSI FILTER.xlsx', index=False)
15 print("Selesai: Lihat DATA SKRIPSI WITH XY.xlsx")
16
```

B - Pengolahan Matriks Jarak



C - Pseudocode Algoritma SA – VRPPDTW

```

D:\SEM 7\TA\KONSUL PAK RIDWAN\DATA REL WAKTU OPTIMAL FR.py
DATA BANYAK.py x DATA REL WAKTU OPTIMAL FR.py x
1 import time
2 import pandas as pd
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import random, math, copy
6
7 # --- 0) Parameter umum ---
8 fuel_cost_per_liter = 10.000
9 km_per_liter = 11.0
10 fuel_cost_per_km = fuel_cost_per_liter / km_per_liter
11 speed = 22.0 # km/jam
12 Q = 1000 # kapasitas kendaraan
13 overflow = [100, 110] # 0w centers
14 depot = 0 # node depot
15
16 # --- 1) Parameter SA ---
17 TB = 2000
18 Tf = 0.01
19 L_inner = 2500
20 alpha_T = 0.95
21
22 # --- 2) Load data ---
23 data = pd.read_excel(r'D:\SEM 7\TA\DATA FIX\TA USULAN_fix.xlsx', header=None)
24 coords = data[[1,2]].values
25 D = data[3].astype(int).tolist() # demand including OM
26 earliest = data[5].astype(float).tolist()
27 latest = data[6].astype(float).tolist()
28 service = data[7].astype(float).tolist()
29 n = len(coords)
30
31 # --- 3) Precompute distance matrix ---
32 dist = np.linalg.norm(coords[:,None,:] - coords[None,:,:), axis=2)
33
34 # --- 4) helpers ---
35 def route_distance(r):
36     return sum(dist[r[i],r[i+1]] for i in range(len(r)-1))

```

```

D:\SEM 7\TA\KONSUL PAK RIDWAN\DATA REL WAKTU OPTIMAL FR.py
DATA BANYAK.py x DATA REL WAKTU OPTIMAL FR.py x
38 def feasible(route, start, end, demands):
39     load = sum(demands.get(c,0) for c in route if c not in (start,end))
40     if load > Q: return False
41     t = earliest[start]
42     for i in range(1,len(route)):
43         p,c = route[i-1], route[i]
44         t += service[p] + dist[p,c]/speed*60
45         t = max(t, earliest[c])
46         if t > latest[c]: return False
47         load += demands.get(c,0)
48         if load < 0 or load > Q: return False
49     return True
50
51 def compute_profile(route, start, end, demands):
52     loads, times = [], []
53     t = earliest[start]
54     load = sum(demands.get(c,0) for c in route if c not in (start,end))
55     loads.append(load); times.append(t)
56     for i in range(1,len(route)):
57         p,c = route[i-1], route[i]
58         t += service[p] + dist[p,c]/speed*60
59         t = max(t, earliest[c])
60         load += demands.get(c,0)
61         loads.append(load); times.append(t)
62     return loads, times
63
64 def insertion_heuristic(nodes, start, end, demands):
65     un = set(nodes)
66     routes = []
67     while un:
68         r = [start, end]
69         while True:
70             best = None
71             for c in un:
72                 for pos in range(1,len(r)):
73                     trial = r[:pos] + [c] + r[pos:]
74                     if feasible(trial,start,end,demands):
75                         delta = route_distance(trial) - route_distance(r)
76                         if best is None or delta < best[0]:
77                             best = (delta, c, pos)

```

```

D:\SEM 7\TA\KONGSI_PAK RIDWAN\DATA REJ. WAKTU OPTIMAL_FDR.py
DATA BAWM.py x DATA REJ. WAKTU OPTIMAL_FDR.py x
78         if not best: break
79         c0, p0 = best
80         r.insert(p0, c0)
81         un.remove(c0)
82         routes.append(r)
83     return routes
84
85 def two_opt(route, start, end, demands):
86     best = route
87     improved = True
88     while improved:
89         improved = False
90         for i in range(1, len(best)-2):
91             for j in range(i+1, len(best)-1):
92                 cand = best[:i] + best[i:j+1][::-1] + best[j+1:]
93                 if feasible(cand, start, end, demands) and route_distance(cand) < route_distance(best):
94                     best, improved = cand, True
95     route = best
96     return best
97
98 def simulated_annealing(routes, start, end, demands):
99     current = copy.deepcopy(routes)
100    best = copy.deepcopy(routes)
101    current_cost = sum(route_distance(r) for r in current)
102    best_cost = current_cost
103    T = TB
104    while T > Tf:
105        for _ in range(L_inner):
106            if len(current) < 2: break
107            nei = copy.deepcopy(current)
108            if random.random() < 0.5:
109                # swap operator
110                i, j = random.sample(range(len(nei)), 2)
111                A, B = nei[i], nei[j]
112                cA = [x for x in A if x not in (start, end)]
113                cB = [x for x in B if x not in (start, end)]
114                if cA and cB:
115                    a, b = random.choice(cA), random.choice(cB)
116                    Ai, Bi = A.index(a), B.index(b)
117                    A[Ai], B[Bi] = b, a
118                    if not (feasible(A, start, end, demands) and feasible(B, start, end, demands)):
119                        continue

```

```

D:\SEM 7\TA\KONGSI_PAK RIDWAN\DATA REJ. WAKTU OPTIMAL_FDR.py
DATA BAWM.py x DATA REJ. WAKTU OPTIMAL_FDR.py x
120         else:
121             # relocate operator
122             i = random.randrange(len(nei))
123             A = nei[i]
124             cands = [x for x in A if x not in (start, end)]
125             if not cands: continue
126             a = random.choice(cands)
127             A.remove(a)
128             j = random.randrange(len(nei))
129             B = nei[j]
130             pos = random.randint(1, len(B)-1)
131             B.insert(pos, a)
132             if not (feasible(A, start, end, demands) and feasible(B, start, end, demands)):
133                 continue
134             nei_cost = sum(route_distance(r) for r in nei)
135             delta = nei_cost - current_cost
136             if delta < B or random.random() < math.exp(-delta/T):
137                 current, current_cost = nei, nei_cost
138             if nei_cost < best_cost:
139                 best, best_cost = copy.deepcopy(nei), nei_cost
140             T *= alpha_T
141     return [two_opt(r, start, end, demands) for r in best]
142
143 # --- 5) Automatic assignment depot vs OW ---
144 depot_customers = []
145 ow_customers = [ow:[] for ow in overflow]
146 for c in range(1, n):
147     dB = dist[c, depot]
148     nearest = min([(dB, 'depot')] + [(dist[c, ow], ow) for ow in overflow], key=lambda x: x[0])
149     if nearest[1] == 'depot':
150         depot_customers.append(c)
151     else:
152         ow_customers[nearest[1]].append(c)
153
154 # --- 6) Tahap 1: depot + ... + depot ---
155 nodes1 = depot_customers + overflow
156 dem1 = {node: (sum(D[c] for c in ow_customers[node]) if node in overflow else D[node])
157         for node in nodes1}
158 routes1 = insertion_heuristic(nodes1, depot, depot, dem1)
159 routes1 = simulated_annealing(routes1, depot, depot, dem1)
160
161 print("=== Tahap 1 ===")
162 for i, r in enumerate(routes1, 1):

```

```

D:\SEM 7\TAJUKSUDUL PAK REKAWIRADATA RIL WAKTU OPTIMAL FDC.py
DATA BANYAK.py x DATA RIL WAKTU OPTIMAL FDC.py x
161 print("=== Tahap 1 ===")
162 for i,r in enumerate(routes1,1):
163     loads, times = compute_profile(r, depot, depot, des1)
164     print(f"R(i): {r}")
165     print(" dist =", route_distance(r))
166     print(" loads=", loads)
167     print(" times=", [f"{t:.1f}min" for t in times])
168
169 # --- 7) Tahap 2: OM + pelanggan + OM (tanpa depot) ---
170 routes2 = []
171 print("\n=== Tahap 2 ===")
172 for ow, custs in ow_customers.items():
173     if not custs: continue
174     des2 = [c:0[c] for c in custs]
175     init = insertion_heuristic(custs, ow, ow, des2)
176     opt = simulated_annealing(init, ow, ow, des2)
177     # hindarkan duplikat OM di ujung
178     clean = []
179     for r in opt:
180         if len(r)>=2 and r[0]==ow and r[1]==ow:
181             r = r[1:]
182         if len(r)>=2 and r[-2]==ow and r[-1]==ow:
183             r = r[:-1]
184         clean.append(r)
185     for j,r in enumerate(clean,1):
186         loads, times = compute_profile(r, ow, ow, des2)
187         print(f"OW(ow)-R(j): {r}")
188         print(" dist =", route_distance(r))
189         print(" loads=", loads)
190         print(" times=", [f"{t:.1f}min" for t in times])
191     routes2.extend(clean)
192
193 # --- 8) Ringkasan & Fuel Cost ---
194 all_routes = routes1 + routes2
195 print(f"\nTotal bendaranan: {len(all_routes)}")
196 print("Total jarak : ", sum(route_distance(r) for r in all_routes))
197

```

```

D:\SEM 7\TAJUKSUDUL PAK REKAWIRADATA RIL WAKTU OPTIMAL FDC.py
DATA BANYAK.py x DATA RIL WAKTU OPTIMAL FDC.py x
188     print(" dist =", route_distance(r))
189     print(" loads=", loads)
190     print(" times=", [f"{t:.1f}min" for t in times])
191     routes2.extend(clean)
192
193 # --- 8) Ringkasan & Fuel Cost ---
194 all_routes = routes1 + routes2
195 print(f"\nTotal bendaranan: {len(all_routes)}")
196 print("Total jarak : ", sum(route_distance(r) for r in all_routes))
197
198 print("\n=== Fuel Cost ===")
199 total_fuel = 0
200 for i,r in enumerate(all_routes,1):
201     d = route_distance(r)
202     c = d * fuel_cost_per_km
203     total_fuel += c
204     print(f"Route(i): {d:.1f} km → Rp {c:,0f}")
205 print(f"Total fuel cost: Rp {total_fuel:,0f}")
206
207 # --- 9) Visualisasi per tahap ---
208 for title, routes, style in [
209     ("Tahap 1", routes1, "-"),
210     ("Tahap 2", routes2, "-.-")
211 ];
212 plt.figure(figsize=(8,6))
213 plt.title(title)
214 plt.scatter(coords[:,0], coords[:,1], c='lightgray')
215 for idx,(x,y) in enumerate(coords):
216     plt.text(x+0.1,y+0.1,str(idx),fontSize=8)
217 plt.scatter(*coords[depot], c='green', marker='s', s=100, label='Depot')
218 for ow in overflow:
219     plt.scatter(*coords[ow], c='red', marker='X', s=100,
220         label=f'OW' if ow==overflow[0] else "")
221 for r in routes:
222     xs = [coords[i,0] for i in r]
223     ys = [coords[i,1] for i in r]
224     plt.plot(xs, ys, style)
225 plt.legend(); plt.grid(True)
226 plt.xlabel('X (km)'); plt.ylabel('Y (km)')
227
228 plt.show()
229

```