

BAB 2

LANDASAN TEORI

Bab ini menjelaskan teori-teori yang menjadi dasar dalam penelitian yang dilakukan. Teori yang dibahas meliputi konsep logistik dan distribusi, *Vehicle Routing Problem* (VRP), *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), model matematis CVRP, metode penyelesaian VRP dan CVRP, *Google OR-Tools*, *Google Routes API*, *Decision Support System* (DSS), serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan optimasi rute distribusi. Teori-teori tersebut digunakan sebagai landasan dalam perancangan, implementasi, dan analisis sistem optimasi distribusi yang dikembangkan pada penelitian ini.

2.1 Logistik dan Distribusi

Logistik merupakan serangkaian aktivitas yang berkaitan dengan perencanaan, pengelolaan, dan pengendalian aliran barang dari titik asal hingga mencapai pelanggan. Dalam kegiatan logistik, distribusi memiliki peranan penting karena menjadi proses yang menghubungkan produk yang tersedia di fasilitas penyimpanan dengan kebutuhan pelanggan di berbagai lokasi. Keberhasilan proses distribusi tidak hanya mempengaruhi tingkat pelayanan kepada pelanggan, tetapi juga berdampak langsung terhadap efisiensi operasional perusahaan.

Distribusi barang pada umumnya dilakukan menggunakan sarana transportasi untuk mengirimkan produk dari depot atau gudang menuju pelanggan. Dalam pelaksanaannya, perusahaan harus menentukan bagaimana kendaraan digunakan untuk melayani sejumlah pelanggan yang tersebar pada berbagai lokasi geografis. Keputusan dalam proses distribusi, seperti pemilihan kendaraan dan penentuan rute pengiriman, akan mempengaruhi jarak tempuh, waktu perjalanan, serta biaya operasional perusahaan.

Transportasi merupakan salah satu komponen biaya terbesar dalam sistem logistik sehingga efisiensi distribusi menjadi perhatian utama dalam pengelolaan rantai pasok modern. Kompleksitas distribusi semakin meningkat seiring bertambahnya jumlah pelanggan, variasi permintaan, dan tuntutan pelayanan yang lebih cepat. Kondisi tersebut terlihat terutama pada aktivitas *last-mile delivery*, yaitu tahap akhir proses distribusi yang berhubungan langsung dengan pelanggan. Pada tahap ini, perusahaan dihadapkan pada kebutuhan untuk mengelola

pengiriman secara efisien tanpa mengurangi kualitas layanan yang diberikan [2].

Perkembangan teknologi informasi dan meningkatnya ketersediaan data operasional telah mendorong penggunaan pendekatan yang lebih sistematis dalam pengelolaan distribusi. Data historis pengiriman, informasi operasional, serta berbagai teknik analisis dapat dimanfaatkan untuk membantu proses perencanaan distribusi secara lebih efektif. Pemanfaatan data dalam proses pengambilan keputusan memungkinkan perusahaan memperoleh pemahaman yang lebih baik terhadap pola distribusi sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasional dan kualitas layanan. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas aktivitas distribusi, perusahaan tidak lagi hanya berfokus pada proses pengiriman barang, tetapi juga pada perancangan sistem distribusi yang mampu memanfaatkan sumber daya secara lebih optimal. Oleh karena itu, optimasi distribusi menjadi salah satu aspek penting dalam bidang logistik dan menjadi dasar bagi berbagai penelitian mengenai penentuan rute kendaraan (*vehicle routing*) untuk meningkatkan efisiensi proses distribusi [15].

2.2 Vehicle Routing Problem (VRP)

Seiring meningkatnya kompleksitas kegiatan distribusi, perusahaan dihadapkan pada kebutuhan untuk menentukan rute pengiriman kendaraan secara efisien. Proses distribusi yang melibatkan banyak pelanggan dan lokasi tujuan menyebabkan penentuan rute tidak lagi dapat dilakukan secara sederhana karena terdapat berbagai kemungkinan kombinasi perjalanan yang dapat dipilih. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan optimasi yang mampu membantu perusahaan menentukan rute distribusi yang lebih efektif.

Permasalahan penentuan rute kendaraan dalam sistem distribusi dikenal sebagai *Vehicle Routing Problem* (VRP). VRP merupakan salah satu permasalahan optimasi kombinatorial yang bertujuan untuk menentukan sekumpulan rute bagi sejumlah kendaraan yang berangkat dari depot untuk melayani pelanggan dan kemudian kembali ke depot dengan biaya distribusi yang minimum [1]. Dalam konteks distribusi, biaya tersebut umumnya direpresentasikan dalam bentuk jarak tempuh, waktu perjalanan, atau biaya operasional yang harus dikeluarkan selama proses pengiriman.

VRP merupakan salah satu permasalahan penting dalam bidang *operations research* dan logistik karena berperan dalam meningkatkan efisiensi distribusi melalui penentuan rute kendaraan yang lebih baik. Dengan menentukan rute

yang efisien, perusahaan dapat mengurangi penggunaan sumber daya transportasi, menurunkan biaya distribusi, serta meningkatkan kualitas pelayanan kepada pelanggan. Meskipun demikian, penyelesaian VRP memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi karena jumlah kemungkinan rute meningkat secara signifikan seiring bertambahnya jumlah pelanggan. Oleh karena itu, berbagai pendekatan optimasi telah dikembangkan untuk menghasilkan solusi yang optimal maupun mendekati optimal dalam waktu komputasi yang masih dapat diterima [1].

Dalam perkembangannya, VRP tidak hanya berfokus pada pencarian rute terpendek, tetapi juga mempertimbangkan berbagai kondisi operasional, seperti kapasitas kendaraan, batasan waktu pelayanan, jenis kendaraan, dan karakteristik permintaan pelanggan. Berbagai kebutuhan tersebut mendorong berkembangnya variasi VRP yang disesuaikan dengan karakteristik permasalahan distribusi [1].

Salah satu variasi VRP yang paling banyak digunakan dalam sistem distribusi adalah *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*, yaitu model yang mempertimbangkan keterbatasan kapasitas kendaraan dalam proses pengiriman. Variasi ini dinilai lebih mampu merepresentasikan kondisi distribusi yang umum terjadi pada perusahaan sehingga menjadi salah satu model yang banyak diterapkan dalam penelitian maupun implementasi optimasi rute distribusi.

2.3 Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)

Salah satu keterbatasan dari model *Vehicle Routing Problem (VRP)* dasar adalah belum mempertimbangkan kapasitas kendaraan yang digunakan dalam proses distribusi. Dalam kondisi operasional nyata, setiap kendaraan memiliki batas kapasitas tertentu sehingga tidak semua permintaan pelanggan dapat dilayani dalam satu perjalanan. Oleh karena itu, diperlukan model yang mampu mempertimbangkan keterbatasan tersebut agar solusi yang dihasilkan dapat diterapkan secara realistis dalam kegiatan distribusi.

Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) merupakan salah satu variasi dari VRP yang mempertimbangkan kapasitas kendaraan sebagai kendala utama dalam proses optimasi rute. Pada model ini, setiap kendaraan memiliki kapasitas maksimum tertentu dan total permintaan pelanggan yang dilayani dalam satu rute tidak boleh melebihi kapasitas kendaraan yang digunakan [5]. Dengan adanya batasan tersebut, proses pembentukan rute tidak hanya berfokus pada pencarian jalur yang efisien, tetapi juga harus memastikan bahwa seluruh permintaan pelanggan dapat dilayani tanpa melanggar kapasitas kendaraan.

Secara umum, tujuan CVRP adalah menentukan sekumpulan rute distribusi yang mampu melayani seluruh pelanggan dengan biaya minimum, sekaligus memenuhi seluruh kendala kapasitas yang ditetapkan. Biaya yang diminimalkan dapat berupa total jarak tempuh, waktu perjalanan, maupun biaya distribusi secara keseluruhan, tergantung pada karakteristik permasalahan yang dihadapi [5]. Oleh karena itu, CVRP menjadi salah satu model optimasi yang paling banyak digunakan dalam bidang logistik dan distribusi.

Dalam implementasinya, setiap pelanggan memiliki permintaan tertentu yang harus dipenuhi oleh kendaraan. Kendaraan berangkat dari depot untuk melayani pelanggan sesuai rute yang telah ditentukan dan kembali ke depot setelah seluruh proses distribusi selesai. Pembentukan rute harus mempertimbangkan keseimbangan antara pemenuhan permintaan pelanggan dan pemanfaatan kapasitas kendaraan yang tersedia. Semakin baik pemanfaatan kapasitas kendaraan, semakin tinggi pula efisiensi distribusi yang dapat dicapai [16].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan CVRP mampu meningkatkan efisiensi operasional distribusi melalui optimasi rute yang mempertimbangkan kapasitas kendaraan, sehingga dapat mengurangi jarak tempuh, meningkatkan utilisasi kendaraan, serta menurunkan biaya distribusi dibandingkan dengan proses perencanaan manual [5, 4]. Dalam perkembangannya, implementasi CVRP juga mengakomodasi berbagai kendala operasional lainnya, seperti variasi jenis kendaraan, karakteristik muatan, waktu operasional, dan kebutuhan distribusi yang lebih kompleks, sehingga model ini memiliki fleksibilitas untuk diterapkan pada berbagai kondisi distribusi di lingkungan industri [16].

Pada penelitian ini, CVRP digunakan sebagai model dasar untuk merepresentasikan permasalahan distribusi yang dihadapi perusahaan. Selain mempertimbangkan kapasitas kendaraan, proses optimasi juga memperhatikan beberapa batasan operasional yang berkaitan dengan karakteristik kendaraan, karakteristik muatan, serta waktu operasional distribusi. Dengan demikian, model yang digunakan tetap berlandaskan konsep CVRP dengan penyesuaian terhadap kebutuhan operasional pada studi kasus penelitian. Untuk memahami bagaimana permasalahan tersebut direpresentasikan secara formal, diperlukan pembahasan mengenai model matematis CVRP yang akan dijelaskan pada bagian berikutnya.

2.4 Model Matematis Dasar CVRP

Untuk menyelesaikan permasalahan *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), diperlukan suatu representasi matematis yang mampu menggambarkan hubungan antara kendaraan, pelanggan, dan rute distribusi yang terbentuk. Model matematis digunakan untuk merepresentasikan permasalahan distribusi ke dalam bentuk formal melalui pendefinisian fungsi tujuan dan kendala-kendala yang harus dipenuhi selama proses optimasi. Dengan adanya model matematis, permasalahan distribusi dapat direpresentasikan secara formal sehingga dapat diselesaikan menggunakan metode optimasi maupun perangkat lunak pendukung seperti *Google OR-Tools* [7].

Secara umum, CVRP direpresentasikan dalam bentuk graf berarah $G = (V, E)$, di mana V merupakan himpunan node yang terdiri atas depot dan pelanggan, sedangkan E merupakan himpunan sisi yang menghubungkan setiap pasangan node. Depot direpresentasikan sebagai titik awal dan akhir perjalanan kendaraan, sedangkan node lainnya merepresentasikan pelanggan yang harus dilayani [5].

Pada model ini, setiap pelanggan memiliki permintaan tertentu yang dinyatakan sebagai q_i , sedangkan setiap kendaraan memiliki kapasitas maksimum sebesar Q . Jarak atau biaya perjalanan antara node i dan node j dinyatakan sebagai d_{ij} . Selain itu, digunakan variabel keputusan x_{ij} yang menunjukkan apakah kendaraan melakukan perjalanan dari node i ke node j .

Secara ringkas, parameter dan variabel yang digunakan dalam model CVRP adalah sebagai berikut:

- $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ merupakan himpunan node yang terdiri atas depot dan pelanggan.
- E merupakan himpunan sisi (*edge*) yang menghubungkan pasangan node.
- d_{ij} merupakan jarak atau biaya perjalanan dari node i ke node j .
- q_i merupakan permintaan pelanggan ke- i .
- Q merupakan kapasitas maksimum kendaraan.
- x_{ij} merupakan variabel keputusan yang bernilai 1 jika kendaraan melakukan perjalanan dari node i ke node j , dan bernilai 0 jika tidak.

Variabel keputusan yang digunakan dapat dinyatakan sebagai:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jika kendaraan melakukan perjalanan dari node } i \text{ ke node } j \\ 0, & \text{jika tidak} \end{cases} \quad (2.1)$$

Tujuan utama dari CVRP adalah meminimalkan total biaya perjalanan yang dibutuhkan untuk melayani seluruh pelanggan. Secara umum, fungsi tujuan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ij} \quad (2.2)$$

dengan:

- Z = total biaya atau jarak perjalanan yang akan diminimalkan

Selain fungsi tujuan, terdapat beberapa kendala utama yang harus dipenuhi dalam model CVRP. Kendala pertama menyatakan bahwa setiap pelanggan hanya boleh dilayani satu kali oleh satu kendaraan. Kendala kedua memastikan bahwa total permintaan pelanggan dalam satu rute tidak melebihi kapasitas kendaraan yang digunakan. Kendala lainnya menyatakan bahwa setiap kendaraan harus berangkat dari depot dan kembali ke depot setelah seluruh proses distribusi selesai [5, 7].

Model matematis CVRP yang dijelaskan pada subbab ini merupakan model dasar yang menjadi landasan teoritis dalam penelitian.

Pada implementasinya, penelitian ini tidak menggunakan formulasi matematis tersebut secara langsung dalam bentuk *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), melainkan memanfaatkan *Routing Solver* pada *Google OR-Tools*. Model dasar CVRP kemudian direpresentasikan ke dalam solver dengan menambahkan berbagai batasan operasional, seperti kapasitas volume kendaraan, kapasitas berat kendaraan, kompatibilitas kendaraan terhadap produk dan pelanggan, batas waktu operasional kendaraan, ketersediaan kendaraan (*vehicle availability*), serta mekanisme *customer dropping* menggunakan penalti. Pada penelitian ini, *customer dropping* merupakan mekanisme yang memperbolehkan pelanggan tidak dimasukkan ke dalam solusi optimasi apabila tidak ditemukan kombinasi rute yang memenuhi seluruh batasan operasional yang diterapkan. Mekanisme tersebut tidak mengacu pada aktivitas penurunan barang kepada pelanggan (*delivery drop*), melainkan pada keputusan solver untuk tidak mengalokasikan pelanggan ke dalam rute distribusi dengan konsekuensi dikenakan

nilai penalti pada fungsi objektif. Penambahan batasan operasional tersebut akan dijelaskan lebih lanjut pada Bab III sebagai bagian dari implementasi model optimasi.

2.5 Metode Penyelesaian VRP dan CVRP

Permasalahan *Vehicle Routing Problem* (VRP) dan berbagai variasinya, termasuk *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), merupakan permasalahan optimasi kombinatorial yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi. Seiring bertambahnya jumlah pelanggan, kendaraan, dan batasan operasional yang harus dipenuhi, jumlah kemungkinan solusi yang dapat terbentuk meningkat secara eksponensial. Kondisi tersebut menyebabkan proses pencarian solusi optimal menjadi semakin sulit dan membutuhkan metode penyelesaian yang sesuai dengan karakteristik permasalahan yang dihadapi [1, 17].

Secara umum, metode penyelesaian VRP dan CVRP dapat dikelompokkan menjadi metode eksak (*exact methods*) dan metode pendekatan (*approximation methods*). Metode eksak bertujuan memperoleh solusi optimal dengan menjelajahi ruang solusi secara sistematis menggunakan pendekatan matematis seperti *integer programming* dan *branch and bound*. Meskipun mampu menghasilkan solusi optimal, metode ini umumnya memiliki waktu komputasi yang tinggi sehingga kurang efisien untuk permasalahan berukuran besar [3, 17].

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai metode heuristik dikembangkan guna menghasilkan solusi yang baik dalam waktu komputasi yang lebih singkat. Pendekatan heuristik biasanya menggunakan aturan atau strategi tertentu untuk membangun solusi tanpa harus mengevaluasi seluruh kemungkinan rute yang tersedia. Meskipun solusi yang dihasilkan belum tentu optimal secara global, metode heuristik banyak digunakan dalam praktik karena mampu memberikan hasil yang cukup baik dengan kebutuhan komputasi yang relatif rendah [3].

Seiring berkembangnya penelitian di bidang optimasi, metode metaheuristik menjadi salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan untuk menyelesaikan VRP dan CVRP. Metaheuristik merupakan strategi pencarian tingkat tinggi yang dirancang untuk mengeksplorasi ruang solusi secara lebih luas sehingga memiliki peluang lebih besar untuk menemukan solusi berkualitas tinggi. Beberapa algoritma metaheuristik yang banyak digunakan dalam penelitian VRP antara lain *Genetic Algorithm*, *Tabu Search*, *Simulated Annealing*, dan *Ant Colony Optimization* [1, 3].

Penelitian yang dilakukan oleh Kirci [18] menunjukkan bahwa kombinasi beberapa pendekatan pencarian seperti *Tabu Search*, *Simulated Annealing*, dan *Hopfield Neural Network* dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas solusi pada permasalahan VRP dengan berbagai batasan operasional. Sementara itu, penelitian Gómez [19] mengembangkan pendekatan *hybrid metaheuristic* yang menggabungkan *Genetic Algorithm* dan *Tabu Search* untuk menyelesaikan *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi beberapa metode pencarian mampu menghasilkan solusi yang lebih baik dibandingkan penggunaan satu metode secara terpisah.

Perkembangan lebih lanjut ditunjukkan oleh penelitian Kumari [6], yang menerapkan pendekatan *hybrid metaheuristic* pada permasalahan CVRP. Penelitian tersebut mengombinasikan mekanisme *Genetic Algorithm* dengan strategi *Ruin and Recreate* untuk meningkatkan kemampuan eksplorasi dan eksploitasi ruang solusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan hibrida mampu menghasilkan solusi yang kompetitif pada berbagai skenario CVRP dengan waktu komputasi yang tetap efisien.

Berdasarkan tinjauan literatur yang dilakukan oleh Liu [17], metode metaheuristik masih menjadi pendekatan yang dominan dalam penyelesaian berbagai variasi VRP karena memiliki kemampuan untuk menangani permasalahan yang kompleks dan berskala besar. Selain itu, perkembangan perangkat lunak optimasi modern juga memungkinkan implementasi berbagai strategi pencarian tersebut secara lebih praktis melalui solver yang telah menyediakan algoritma pencarian bawaan.

Dalam penelitian ini, penyelesaian CVRP tidak dilakukan dengan mengembangkan algoritma optimasi baru, melainkan memanfaatkan *Routing Solver* yang disediakan oleh *Google OR-Tools*. Solver tersebut menyediakan berbagai strategi pembentukan solusi awal (*First Solution Strategy*) dan strategi perbaikan solusi (*Local Search Metaheuristic*) yang dapat dipilih sesuai karakteristik permasalahan. Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini, kombinasi *Parallel Cheapest Insertion* (PCI) sebagai strategi pembentukan solusi awal dan *Guided Local Search* (GLS) sebagai strategi pencarian lanjutan dipilih karena mampu menghasilkan solusi distribusi dengan kualitas terbaik. Oleh karena itu, sebelum membahas implementasi menggunakan *Google OR-Tools*, diperlukan pemahaman mengenai kedua strategi tersebut sebagai dasar metode optimasi yang digunakan dalam penelitian ini.

2.5.1 Exact Method

Metode eksak (*exact method*) merupakan pendekatan optimasi yang bertujuan memperoleh solusi optimal dengan mengevaluasi ruang solusi secara sistematis berdasarkan model matematis. Pada permasalahan VRP dan CVRP, metode eksak umumnya menggunakan formulasi *Integer Linear Programming* (ILP), *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), maupun metode optimasi seperti *Branch and Bound* dan *Branch and Cut*. Pendekatan tersebut mampu menjamin bahwa solusi yang diperoleh merupakan solusi optimal apabila proses komputasi berhasil diselesaikan [17].

Meskipun demikian, kompleksitas VRP yang termasuk ke dalam permasalahan NP-Hard menyebabkan kebutuhan waktu komputasi metode eksak meningkat secara signifikan seiring bertambahnya jumlah pelanggan dan batasan operasional. Oleh karena itu, metode eksak umumnya lebih sesuai diterapkan pada permasalahan dengan ukuran kecil hingga menengah, sedangkan untuk kasus industri berskala besar lebih banyak digunakan metode heuristik maupun metaheuristik yang mampu menghasilkan solusi berkualitas baik dalam waktu komputasi yang lebih efisien [3, 1].

Keterbatasan tersebut mendorong berkembangnya berbagai metode pendekatan yang tidak lagi berorientasi pada pencarian solusi optimal secara matematis, melainkan berfokus menghasilkan solusi yang berkualitas tinggi dengan waktu komputasi yang lebih efisien.

2.5.2 Heuristic dan Metaheuristic

Metode heuristik merupakan pendekatan yang menggunakan aturan atau strategi tertentu untuk membangun solusi dengan cepat tanpa menjamin optimalitas global. Pendekatan ini banyak digunakan pada permasalahan VRP karena mampu menghasilkan solusi yang layak (*feasible solution*) dalam waktu komputasi yang relatif singkat. Contoh metode heuristik yang umum digunakan antara lain *Nearest Neighbor*, *Savings Algorithm*, dan *Insertion Heuristic* [3].

Berbeda dengan heuristik, metaheuristik merupakan kerangka pencarian tingkat tinggi (*high-level search strategy*) yang dirancang untuk mengeksplorasi ruang solusi secara lebih luas sehingga memiliki peluang lebih besar menemukan solusi berkualitas tinggi. Metaheuristik tidak bergantung pada satu aturan tertentu, melainkan menggunakan mekanisme eksplorasi dan eksploitasi untuk menghindari

solusi lokal (*local optimum*). Berbagai algoritma metaheuristik yang banyak diterapkan pada VRP antara lain *Genetic Algorithm*, *Tabu Search*, *Simulated Annealing*, *Ant Colony Optimization*, serta *Guided Local Search* [1, 17].

Dengan demikian, heuristik lebih berfokus pada proses konstruksi solusi menggunakan aturan tertentu, sedangkan metaheuristik berfokus pada proses pencarian dan penyempurnaan solusi melalui eksplorasi ruang solusi yang lebih luas.

2.5.3 First Solution Strategy

Pada proses optimasi menggunakan *Routing Solver*, tahap pertama yang dilakukan adalah membangun solusi awal (*initial solution*). Solusi awal tersebut diperoleh menggunakan strategi yang dikenal sebagai *First Solution Strategy*. Strategi ini bertujuan menghasilkan rute awal yang memenuhi seluruh batasan utama sehingga dapat digunakan sebagai titik awal bagi proses pencarian lanjutan.

Pada pendekatan optimasi berbasis *local search*, solusi awal memiliki peranan yang penting karena menjadi titik awal proses pencarian solusi berikutnya. Proses optimasi tidak dimulai dari ruang solusi yang kosong, melainkan dari suatu solusi yang telah memenuhi kendala utama (*feasible solution*). Kualitas solusi awal tersebut dapat memengaruhi efektivitas proses pencarian lanjutan karena solusi awal yang lebih baik umumnya memberikan peluang lebih besar bagi algoritma untuk memperoleh solusi akhir dengan kualitas yang lebih tinggi dalam batas waktu komputasi yang tersedia [17, 3].

Google OR-Tools menyediakan berbagai pilihan *First Solution Strategy* yang dapat disesuaikan dengan karakteristik permasalahan, seperti *Path Cheapest Arc*, *Parallel Cheapest Insertion*, *Savings*, dan *Christofides*. Masing-masing strategi menggunakan mekanisme konstruksi solusi yang berbeda sehingga kualitas solusi awal yang dihasilkan juga dapat berbeda. Tidak terdapat satu strategi yang selalu menghasilkan solusi terbaik untuk seluruh permasalahan VRP maupun CVRP karena performanya dipengaruhi oleh karakteristik data, jumlah pelanggan, konfigurasi kendaraan, serta batasan operasional yang diterapkan pada model [17, 1].

Setiap strategi memiliki karakteristik yang berbeda dalam membangun rute awal sehingga dapat menghasilkan kualitas solusi yang berbeda pula tergantung pada karakteristik data distribusi yang digunakan. Hasil dari proses ini berupa solusi awal (*initial feasible solution*) yang telah memenuhi batasan utama

permasalahan dan selanjutnya digunakan sebagai masukan bagi proses *Local Search Metaheuristic*.

Dalam penelitian ini, *First Solution Strategy* tidak dipandang sebagai algoritma optimasi utama, melainkan sebagai strategi konstruksi solusi awal yang digunakan sebagai titik awal bagi proses *Local Search Metaheuristic*. Oleh karena itu, kualitas solusi awal yang dihasilkan akan memengaruhi efektivitas proses penyempurnaan solusi pada tahap berikutnya. Berdasarkan hasil eksperimen konfigurasi parameter yang dilakukan pada penelitian ini, strategi pembentukan solusi awal yang dipilih adalah *Parallel Cheapest Insertion* (PCI), yang selanjutnya dibahas pada subbab berikutnya.

2.5.4 Parallel Cheapest Insertion (PCI)

Parallel Cheapest Insertion merupakan salah satu pengembangan dari pendekatan *Insertion Heuristic*, yaitu metode heuristik yang membangun solusi secara bertahap dengan menyisipkan pelanggan ke dalam rute yang telah terbentuk. Berbeda dengan pendekatan yang langsung menentukan urutan kunjungan secara keseluruhan, *Insertion Heuristic* menambahkan pelanggan satu per satu pada posisi yang dianggap paling sesuai sehingga setiap proses penyisipan memberikan peningkatan kualitas solusi secara bertahap [3].

Parallel Cheapest Insertion merupakan salah satu strategi pembentukan solusi awal (*First Solution Strategy*) yang tersedia pada *Google OR-Tools* dan dikembangkan dari pendekatan *Insertion Heuristic*. Strategi ini membangun beberapa rute secara paralel dengan mengevaluasi posisi penyisipan pelanggan pada seluruh rute yang sedang dibangun. Pada setiap iterasi dipilih posisi penyisipan yang memberikan tambahan biaya (*insertion cost*) paling kecil sehingga solusi awal dapat dibangun secara bertahap dengan kualitas yang relatif baik.

Dibandingkan dengan *Path Cheapest Arc* yang membangun rute berdasarkan pemilihan sisi dengan biaya terendah secara bertahap, PCI memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam proses konstruksi solusi awal karena mempertimbangkan berbagai alternatif penyisipan pelanggan pada rute yang sedang dibangun. Pendekatan tersebut umumnya menghasilkan distribusi pelanggan yang lebih seimbang antar kendaraan serta solusi awal dengan kualitas yang lebih baik pada berbagai permasalahan distribusi [17, 3].

Pada penelitian ini, PCI dipilih sebagai strategi pembentukan solusi awal berdasarkan hasil eksperimen konfigurasi parameter yang membandingkan

beberapa *First Solution Strategy* yang tersedia pada *Google OR-Tools*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa PCI menghasilkan kualitas solusi yang paling baik pada dataset distribusi perusahaan yang digunakan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, pemilihan PCI didasarkan pada hasil evaluasi empiris penelitian ini dan tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa PCI merupakan strategi terbaik untuk seluruh permasalahan CVRP.

2.5.5 Local Search Metaheuristic

Setelah solusi awal berhasil dibangun, proses optimasi dilanjutkan menggunakan strategi *Local Search Metaheuristic*. Tahap ini bertujuan memperbaiki solusi awal melalui serangkaian operasi pencarian yang mengeksplorasi solusi-solusi di sekitar solusi saat ini (*neighborhood search*).

Proses ini bekerja secara iteratif dengan mengeksplorasi berbagai solusi yang berada di sekitar solusi saat ini (*neighborhood*). Eksplorasi dilakukan melalui berbagai operasi, seperti pertukaran pelanggan antar rute, pemindahan pelanggan ke kendaraan lain, maupun penyusunan ulang urutan kunjungan pelanggan. Proses pencarian terus berlangsung selama masih ditemukan solusi yang lebih baik atau hingga memenuhi kriteria penghentian yang telah ditentukan, seperti batas waktu komputasi, sehingga kualitas solusi dapat ditingkatkan tanpa harus mengeksplorasi seluruh ruang solusi secara menyeluruh [17].

Google OR-Tools menyediakan beberapa pilihan *Local Search Metaheuristic*, seperti *Guided Local Search*, *Tabu Search*, dan *Simulated Annealing*. Masing-masing strategi memiliki mekanisme yang berbeda dalam mengeksplorasi ruang solusi serta menghindari terjebaknya proses optimasi pada solusi lokal.

Pemilihan strategi *Local Search Metaheuristic* sangat mempengaruhi kualitas solusi akhir karena proses inilah yang melakukan penyempurnaan terhadap solusi awal yang telah dibangun sebelumnya.

2.5.6 Guided Local Search (GLS)

Guided Local Search (GLS) merupakan salah satu strategi *local search metaheuristic* yang dirancang untuk meningkatkan kualitas solusi dengan menghindari kondisi terjebak pada solusi optimum lokal (*local optimum*). GLS bekerja dengan memberikan penalti terhadap komponen solusi tertentu yang

dianggap terlalu sering muncul sehingga proses pencarian terdorong untuk mengeksplorasi alternatif solusi lainnya.

Melalui mekanisme pemberian penalti terhadap komponen solusi tertentu, *Guided Local Search* memodifikasi fungsi objektif menjadi *augmented objective function* yang mempertimbangkan biaya asli sekaligus nilai penalti. Pendekatan ini mengurangi kecenderungan proses pencarian untuk terus memilih komponen solusi yang sama sehingga solver terdorong mengeksplorasi alternatif solusi lain dan memiliki peluang lebih besar untuk keluar dari kondisi *local optimum* [17].

Berbeda dengan metode *Tabu Search* yang memanfaatkan daftar tabu untuk mencegah pengulangan solusi, maupun *Simulated Annealing* yang menggunakan mekanisme probabilistik dalam menerima solusi yang lebih buruk, GLS mengarahkan proses pencarian dengan memberikan penalti terhadap komponen solusi tertentu sehingga eksplorasi dilakukan secara lebih terarah menuju solusi alternatif yang berpotensi memiliki biaya lebih rendah.

Selain menggunakan mekanisme penalti, *Guided Local Search* juga menerapkan konsep *utility* untuk menentukan komponen solusi yang paling layak dikenai penalti pada setiap iterasi. Secara konseptual, *utility* menggambarkan tingkat kepentingan suatu komponen berdasarkan hubungan antara biaya yang ditimbulkan dan penalti yang telah dimiliki. Pendekatan tersebut memungkinkan proses pencarian mengarahkan penalti secara lebih efektif sehingga eksplorasi ruang solusi dilakukan secara lebih terarah tanpa menghilangkan tujuan utama untuk meminimalkan biaya distribusi [17].

Dalam implementasinya pada *Google OR-Tools*, *Guided Local Search* digunakan setelah proses pembentukan solusi awal oleh *Parallel Cheapest Insertion* (PCI). Dengan demikian, kedua strategi tersebut saling melengkapi dalam proses optimasi, di mana PCI menghasilkan solusi awal yang layak (*initial feasible solution*), sedangkan GLS melakukan penyempurnaan melalui proses pencarian lokal untuk memperoleh solusi distribusi yang lebih baik dengan tetap memenuhi seluruh batasan operasional. Berdasarkan hasil eksperimen konfigurasi parameter yang dilakukan pada penelitian ini, kombinasi PCI dan GLS dipilih sebagai konfigurasi akhir dalam proses optimasi distribusi.

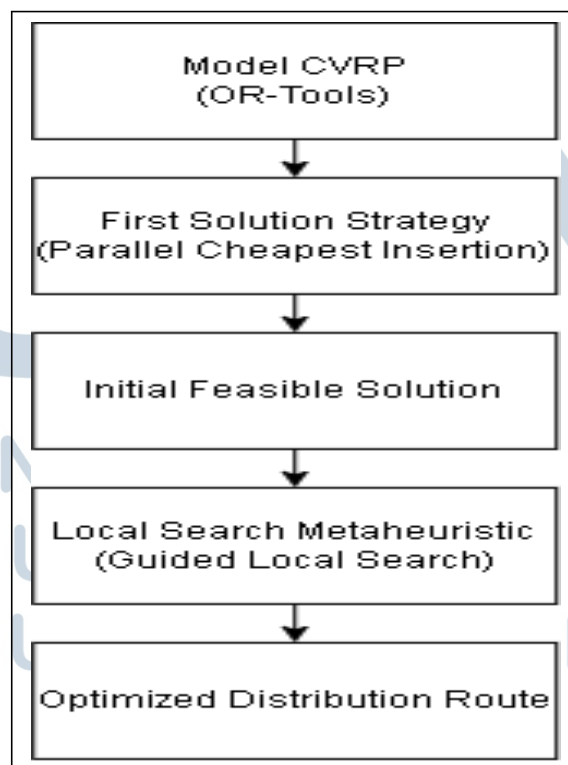
2.5.7 Pipeline Optimasi Model CVRP Menggunakan PCI dan GLS

Berdasarkan metode yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, proses optimasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan model *Capacitated Vehicle*

Routing Problem (CVRP) yang diselesaikan melalui *Routing Solver* pada *Google OR-Tools*. Penelitian ini tidak mengembangkan algoritma optimasi baru, melainkan memanfaatkan kombinasi *Parallel Cheapest Insertion* (PCI) sebagai strategi pembentukan solusi awal (*First Solution Strategy*) dan *Guided Local Search* (GLS) sebagai strategi penyempurnaan solusi (*Local Search Metaheuristic*) [20, 17].

Pipeline optimasi yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.1. Proses optimasi diawali dengan penyelesaian model CVRP yang telah dirumuskan beserta seluruh batasan operasional yang diterapkan pada penelitian ini. Selanjutnya, *Routing Solver* membangun solusi awal (*initial feasible solution*) menggunakan strategi *Parallel Cheapest Insertion* (PCI). Solusi awal tersebut kemudian disempurnakan menggunakan *Guided Local Search* (GLS) melalui proses pencarian lokal secara iteratif hingga diperoleh solusi distribusi terbaik atau proses optimasi mencapai batas waktu komputasi yang telah ditentukan [20, 17].

Pipeline tersebut menunjukkan hubungan antara strategi pembentukan solusi awal dan strategi pencarian lanjutan yang digunakan pada penelitian ini. Dengan demikian, PCI dan GLS tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling melengkapi dalam menghasilkan solusi distribusi yang memenuhi berbagai batasan operasional pada model CVRP.



Gambar 2.1. Pipeline Algoritma Optimasi CVRP Menggunakan PCI dan GLS

2.6 Google OR-Tools

Perkembangan teknologi komputasi telah mendorong munculnya berbagai perangkat lunak optimasi yang dapat digunakan untuk membantu penyelesaian permasalahan *operations research*. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam penelitian maupun implementasi praktis adalah *Google OR-Tools*. OR-Tools merupakan *open-source optimization library* yang dikembangkan oleh Google untuk menyelesaikan berbagai permasalahan optimasi seperti penjadwalan, alokasi sumber daya, optimasi jaringan, dan *vehicle routing problem* [7].

Dalam konteks distribusi dan logistik, *Google OR-Tools* menyediakan *Routing Solver* yang dirancang khusus untuk memodelkan dan menyelesaikan berbagai variasi *Vehicle Routing Problem* (VRP), termasuk *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP). Melalui komponen ini, pengguna dapat memodelkan jaringan distribusi beserta berbagai batasan operasional sehingga proses optimasi dapat dilakukan secara sistematis sesuai dengan karakteristik permasalahan yang dihadapi [7].

Google OR-Tools menyediakan *Routing Solver* sebagai komponen yang secara khusus dirancang untuk menyelesaikan berbagai variasi *Vehicle Routing Problem* (VRP), termasuk *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP). Berbeda dengan solver optimasi umum, *Routing Solver* telah menyediakan struktur pemodelan yang memungkinkan pengguna mendefinisikan depot, pelanggan, kendaraan, fungsi biaya perjalanan, serta berbagai batasan operasional tanpa harus membangun algoritma optimasi dari awal. Pendekatan tersebut mempermudah implementasi berbagai strategi optimasi routing dalam aplikasi nyata maupun penelitian [7].

Dalam implementasinya, *Routing Solver* terdiri atas beberapa komponen utama yang saling berhubungan, yaitu *RoutingIndexManager* untuk mengelola indeks lokasi, *RoutingModel* untuk membangun model optimasi, *transit callback* untuk mendefinisikan fungsi biaya perjalanan, *dimensions* untuk merepresentasikan berbagai kendala, *disjunction* untuk menangani pelanggan yang dapat dikeluarkan dari solusi, serta *search parameters* untuk mengatur strategi pembentukan dan penyempurnaan solusi. Kombinasi komponen tersebut memungkinkan pemodelan permasalahan distribusi yang kompleks secara lebih sistematis.

Salah satu alasan OR-Tools banyak digunakan dalam penelitian optimasi distribusi adalah kemampuannya dalam menangani berbagai kendala (*constraints*) yang umum ditemukan pada permasalahan routing. Kendala seperti kapasitas

kendaraan, kapasitas berat, kapasitas volume, kompatibilitas kendaraan terhadap pelanggan, waktu operasional, serta ketersediaan kendaraan dapat dimasukkan ke dalam model optimasi sesuai dengan kebutuhan permasalahan. Dengan demikian, solusi yang dihasilkan tidak hanya berfokus pada pencarian rute yang efisien, tetapi juga tetap memenuhi kondisi operasional yang berlaku [7].

Selain berbagai *constraint* yang bersifat wajib (*hard constraints*), *Google OR-Tools* juga menyediakan mekanisme *disjunction* yang memungkinkan suatu pelanggan tidak dimasukkan ke dalam solusi optimasi apabila seluruh *constraint* tidak dapat dipenuhi. Mekanisme tersebut dikenal sebagai *customer dropping*. Pada penelitian ini, istilah *customer dropping* mengacu pada pelanggan yang tetap memiliki permintaan distribusi, tetapi tidak dialokasikan ke dalam rute hasil optimasi karena tidak ditemukan solusi yang memenuhi seluruh batasan operasional yang diterapkan. Istilah tersebut tidak merujuk pada aktivitas penurunan barang kepada pelanggan (*delivery drop*) yang umum digunakan dalam kegiatan distribusi. Dalam mekanisme ini, setiap pelanggan diberikan nilai penalti tertentu. *Routing Solver* akan tetap mengupayakan agar pelanggan dilayani apabila biaya yang diperlukan lebih kecil dibandingkan nilai penalti yang diberikan. Sebaliknya, apabila seluruh alternatif pelayanan menghasilkan biaya yang lebih tinggi atau melanggar *constraint*, pelanggan tersebut tidak dimasukkan ke dalam solusi optimasi dan penalti akan ditambahkan ke dalam fungsi objektif.

Penelitian yang dilakukan oleh Kristina [7] menunjukkan bahwa penerapan model *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) menggunakan *Google OR-Tools* mampu menghasilkan rute distribusi yang lebih efisien dibandingkan pendekatan konvensional. Pada penelitian tersebut, *OR-Tools* digunakan untuk menentukan rute pengantaran obat pada perusahaan pedagang besar farmasi dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan yang tersedia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *OR-Tools* dapat membantu proses perencanaan distribusi secara lebih sistematis dan terstruktur.

Selain digunakan dalam penelitian akademis, *Google OR-Tools* mendukung integrasi dengan berbagai bahasa pemrograman, termasuk Python, sehingga memudahkan pengembangan aplikasi optimasi maupun sistem pendukung keputusan berbasis web. Fleksibilitas tersebut menjadikan *OR-Tools* tidak hanya digunakan sebagai solver optimasi, tetapi juga sebagai komponen yang dapat diintegrasikan ke dalam sistem informasi operasional.

Pada penelitian ini, *Google OR-Tools* digunakan sebagai solver utama untuk menyelesaikan permasalahan *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP).

Solver tersebut digunakan untuk menghasilkan solusi distribusi yang memenuhi berbagai batasan operasional yang telah ditetapkan. Hasil optimasi yang diperoleh kemudian dimanfaatkan sebagai bagian dari sistem pendukung keputusan berbasis web untuk membantu proses perencanaan distribusi pada perusahaan.

2.7 Google Routes API

Salah satu komponen penting dalam permasalahan *Vehicle Routing Problem* (VRP) adalah ketersediaan data perjalanan antar lokasi yang akan dilayani. Kualitas data tersebut sangat mempengaruhi hasil optimasi yang dihasilkan karena proses pencarian rute bergantung pada informasi biaya perjalanan antar node. Oleh karena itu, penggunaan sumber data yang mampu merepresentasikan kondisi perjalanan secara lebih realistis menjadi faktor penting dalam pengembangan sistem optimasi distribusi.

Seiring berkembangnya teknologi peta digital, berbagai layanan berbasis *Application Programming Interface* (API) telah dikembangkan untuk menyediakan informasi geografis dan perjalanan secara otomatis. Salah satu layanan yang banyak digunakan dalam penelitian maupun implementasi sistem distribusi adalah layanan pemetaan yang disediakan melalui *Google Maps Platform*. Salah satu layanan yang tersedia pada platform tersebut adalah *Google Routes API* yang memungkinkan pengguna memperoleh informasi jarak, waktu tempuh, serta rute perjalanan berdasarkan jaringan jalan yang sebenarnya tanpa harus melakukan perhitungan secara manual [9].

Dalam konteks permasalahan routing, penggunaan layanan berbasis jaringan jalan memberikan keuntungan karena data perjalanan yang diperoleh tidak hanya mempertimbangkan posisi geografis antar lokasi, tetapi juga memperhatikan kondisi jaringan transportasi yang digunakan untuk berpindah dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Satyananda [9] menunjukkan bahwa integrasi layanan Google Maps ke dalam sistem penyelesaian VRP memungkinkan pembentukan data perjalanan yang lebih representatif dibandingkan penggunaan jarak geometris sederhana. Dengan demikian, model optimasi dapat menghasilkan rute yang lebih sesuai dengan kondisi perjalanan sebenarnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Lian dan Tribello [10] menunjukkan bahwa integrasi layanan Google Maps dengan model optimasi rute dapat menyederhanakan proses pengumpulan data perjalanan karena informasi jarak dan waktu tempuh diperoleh secara otomatis dari layanan peta digital. Pendekatan

tersebut juga mengurangi kebutuhan input manual yang sering menjadi sumber kesalahan pada proses pemodelan distribusi. Selain itu, penggunaan data perjalanan yang berasal dari jaringan jalan aktual memungkinkan hasil optimasi menjadi lebih realistis dan lebih mudah diterapkan pada kondisi operasional sehari-hari.

Pemanfaatan layanan Google Maps juga dikaji oleh Munoz-Villamizar [11] dalam penelitian mengenai integrasi data lalu lintas dengan model matematis untuk menyelesaikan permasalahan *Vehicle Routing Problem*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan data perjalanan yang diperoleh dari layanan pemetaan digital dapat meningkatkan kualitas perencanaan rute karena mampu merepresentasikan kondisi perjalanan yang lebih mendekati situasi aktual di lapangan. Integrasi antara data geografis dan model optimasi memberikan peluang untuk menghasilkan keputusan distribusi yang lebih efektif dibandingkan pendekatan yang hanya menggunakan data statis.

Selain itu, Alvarez [12] menunjukkan bahwa kondisi lalu lintas dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil optimasi rute distribusi. Oleh karena itu, penggunaan data perjalanan yang diperoleh dari layanan berbasis jaringan jalan menjadi penting untuk menghasilkan keputusan distribusi yang lebih realistis. Data tersebut memungkinkan model optimasi bekerja menggunakan informasi yang lebih mendekati kondisi operasional sebenarnya dibandingkan penggunaan jarak teoritis antar lokasi.

Pemilihan *Google Routes API* pada penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk memperoleh data perjalanan yang mampu merepresentasikan kondisi distribusi secara lebih realistis. Pendekatan berbasis jarak geometris, seperti *Euclidean Distance* maupun *Haversine Distance*, menghitung jarak berdasarkan hubungan geometris antar koordinat geografis dan tidak secara eksplisit mempertimbangkan jaringan jalan yang akan dilalui kendaraan. Akibatnya, jarak maupun waktu tempuh yang dihasilkan dapat berbeda dengan kondisi operasional distribusi di lapangan. Sebaliknya, *Google Routes API* menyediakan informasi jarak dan waktu tempuh berdasarkan jaringan jalan aktual sehingga matriks perjalanan yang dihasilkan lebih mampu merepresentasikan kondisi distribusi yang sesungguhnya. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan *Google Routes API* sebagai sumber data untuk membentuk *distance matrix* dan *time matrix* agar proses optimasi dilakukan menggunakan data perjalanan yang lebih realistis.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, penggunaan *Google Routes API* menjadi salah satu pendekatan yang relevan untuk meningkatkan realisme model optimasi distribusi. Melalui pemanfaatan data jarak dan waktu tempuh berbasis

jaringan jalan, proses optimasi dapat dilakukan menggunakan informasi yang lebih mendekati kondisi operasional sebenarnya. Dalam penelitian ini, *Google Routes API* digunakan sebagai sumber data perjalanan antar lokasi yang kemudian digunakan untuk membentuk *distance matrix* dan *time matrix* sebagai input utama pada model *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP). Pembentukan matriks tersebut dilakukan menggunakan layanan yang menyediakan informasi perjalanan antar pasangan lokasi sehingga data yang digunakan dalam proses optimasi merepresentasikan kondisi jaringan jalan yang sebenarnya.

2.8 Distance Matrix dan Time Matrix

Dalam permasalahan *Vehicle Routing Problem* (VRP), informasi mengenai perjalanan antar lokasi merupakan salah satu komponen utama yang digunakan dalam proses optimasi. Setiap keputusan yang diambil oleh model, seperti pemilihan rute maupun penentuan urutan kunjungan pelanggan, bergantung pada informasi biaya perjalanan antar lokasi yang tersedia. Oleh karena itu, kualitas data perjalanan yang digunakan akan sangat mempengaruhi kualitas solusi yang dihasilkan oleh model optimasi.

Secara umum, informasi perjalanan antar lokasi direpresentasikan dalam bentuk *distance matrix* dan *time matrix*. *Distance matrix* merupakan matriks yang berisi informasi jarak perjalanan antara setiap pasangan lokasi, sedangkan *time matrix* berisi informasi waktu tempuh yang dibutuhkan untuk melakukan perjalanan antar lokasi tersebut. Kedua matriks ini menjadi komponen penting dalam berbagai model routing karena digunakan untuk mengevaluasi alternatif rute yang mungkin terbentuk selama proses optimasi.

Pada banyak penelitian terdahulu, pembentukan *distance matrix* sering dilakukan menggunakan pendekatan jarak geometris seperti *Euclidean distance*. Pendekatan tersebut relatif sederhana karena hanya memanfaatkan koordinat geografis setiap lokasi. Namun demikian, jarak geometris tidak selalu mampu merepresentasikan kondisi perjalanan yang sebenarnya karena kendaraan harus bergerak mengikuti jaringan jalan yang tersedia. Akibatnya, jarak yang diperoleh sering kali berbeda dengan jarak tempuh aktual yang terjadi di lapangan [8].

Menurut Maghrebi [8], penggunaan *real distance* yang diperoleh dari jaringan jalan memberikan representasi yang lebih realistis dibandingkan penggunaan jarak spasial. Dengan memanfaatkan data perjalanan yang mengikuti kondisi jalan sebenarnya, model optimasi dapat menghasilkan keputusan distribusi

yang lebih sesuai dengan kondisi operasional nyata. Pendekatan ini menjadi penting terutama pada permasalahan distribusi yang melibatkan banyak pelanggan dan lokasi yang tersebar secara geografis.

Selain informasi jarak, waktu tempuh juga merupakan faktor yang penting dalam perencanaan distribusi. Dua lokasi yang memiliki jarak yang sama belum tentu memiliki waktu perjalanan yang sama karena dipengaruhi oleh karakteristik jaringan jalan yang digunakan. Oleh karena itu, penggunaan *time matrix* dapat memberikan informasi tambahan yang membantu model optimasi dalam merepresentasikan kondisi perjalanan secara lebih lengkap. Keberadaan *time matrix* menjadi semakin penting pada permasalahan distribusi yang mempertimbangkan aspek operasional yang berkaitan dengan durasi perjalanan kendaraan.

Perkembangan layanan peta digital memungkinkan proses pembentukan *distance matrix* dan *time matrix* dilakukan secara lebih akurat. Penelitian yang dilakukan oleh Lian dan Tribello [10] menunjukkan bahwa penggunaan layanan Google Maps dapat membantu memperoleh informasi jarak dan waktu tempuh secara otomatis berdasarkan jaringan jalan yang tersedia. Dengan demikian, proses pengumpulan data perjalanan menjadi lebih efisien dan hasil yang diperoleh lebih mendekati kondisi aktual dibandingkan pendekatan perhitungan manual.

Hasil serupa juga ditunjukkan oleh penelitian Munoz-Villamizar [11], yang memanfaatkan data perjalanan berbasis layanan pemetaan digital untuk mendukung proses optimasi rute distribusi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan data perjalanan berbasis jaringan jalan dapat meningkatkan kualitas perencanaan rute karena mampu merepresentasikan kondisi perjalanan yang lebih realistis. Selain itu, integrasi antara data perjalanan dan model optimasi memungkinkan proses pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan informasi yang lebih akurat.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, penggunaan *distance matrix* dan *time matrix* berbasis jaringan jalan menjadi pendekatan yang relevan dalam pengembangan sistem optimasi distribusi. Kedua matriks tersebut menyediakan representasi perjalanan yang lebih mendekati kondisi operasional sebenarnya dibandingkan penggunaan jarak geometris sederhana. Dalam penelitian ini, *distance matrix* digunakan untuk merepresentasikan jarak perjalanan antar lokasi distribusi, sedangkan *time matrix* digunakan untuk merepresentasikan waktu tempuh antar lokasi. Kedua matriks tersebut dibentuk menggunakan data perjalanan berbasis jaringan jalan yang diperoleh melalui *Google Routes API* dan selanjutnya digunakan sebagai input utama pada model *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP).

2.9 Decision Support System (DSS)

Seiring meningkatnya kompleksitas proses bisnis dan operasional, organisasi membutuhkan alat bantu yang mampu mendukung proses pengambilan keputusan secara lebih efektif. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah *Decision Support System* (DSS), yaitu sistem berbasis komputer yang dirancang untuk membantu pengguna dalam menganalisis informasi, mengevaluasi alternatif keputusan, dan memilih solusi yang paling sesuai terhadap suatu permasalahan tertentu [21].

Pada dasarnya, DSS tidak bertujuan menggantikan peran pengambil keputusan, melainkan membantu proses pengambilan keputusan melalui penyediaan informasi dan analisis yang lebih terstruktur. Dengan memanfaatkan data dan model analitis, DSS dapat membantu pengguna memahami kondisi yang dihadapi serta mengevaluasi berbagai alternatif tindakan sebelum keputusan akhir ditetapkan. Oleh karena itu, DSS banyak diterapkan pada berbagai bidang yang melibatkan proses pengambilan keputusan yang kompleks.

Dalam bidang logistik, kebutuhan terhadap DSS semakin meningkat karena aktivitas distribusi melibatkan banyak variabel yang saling berkaitan, seperti kendaraan, pelanggan, kapasitas sumber daya, biaya operasional, serta waktu pengiriman. Menurut Dyczkowska [14], perkembangan teknologi informasi dalam konsep *Logistics 4.0* mendorong pemanfaatan berbagai sistem pendukung keputusan untuk membantu proses perencanaan, pengendalian, dan pengelolaan aktivitas logistik secara lebih efektif. Penggunaan DSS memungkinkan proses perencanaan dilakukan secara lebih sistematis dibandingkan pendekatan yang hanya mengandalkan pengalaman atau pertimbangan subjektif.

Salah satu area yang banyak memanfaatkan DSS adalah perencanaan distribusi dan penentuan rute kendaraan. Penelitian yang dilakukan oleh Evans [13] menunjukkan bahwa penerapan sistem pendukung keputusan pada permasalahan *vehicle routing* mampu membantu proses perencanaan distribusi melalui pemanfaatan model analitis dan teknik optimasi. Dengan adanya DSS, pengguna tidak hanya memperoleh hasil perhitungan, tetapi juga memperoleh informasi yang dapat digunakan untuk mengevaluasi alternatif keputusan yang tersedia.

Selain kemampuan untuk menghasilkan solusi, DSS juga memiliki peran dalam menyajikan informasi yang relevan bagi pengambil keputusan. Informasi tersebut dapat berupa hasil analisis, ringkasan kondisi operasional, maupun

indikator yang membantu pengguna memahami konsekuensi dari suatu keputusan. Kemampuan inilah yang membedakan DSS dari sistem pemrosesan data biasa, karena DSS tidak hanya berfokus pada pengolahan data, tetapi juga mendukung proses analisis dan evaluasi keputusan.

Keberhasilan penerapan DSS juga dipengaruhi oleh faktor organisasi dan pengguna. Menurut Aldhmour dan Eleyan [21], persepsi manfaat sistem, ketersediaan infrastruktur teknologi informasi, serta dukungan organisasi merupakan beberapa faktor yang berpengaruh terhadap keberhasilan implementasi DSS. Faktor-faktor tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan penggunaan DSS tidak hanya bergantung pada kualitas model yang digunakan, tetapi juga pada kemampuan sistem dalam menyediakan informasi yang bermanfaat bagi pengguna.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, DSS dapat dipahami sebagai kombinasi antara data, model analitis, dan antarmuka pengguna yang dirancang untuk membantu proses pengambilan keputusan. Dalam konteks distribusi, DSS memungkinkan proses perencanaan dilakukan secara lebih sistematis dengan memanfaatkan hasil analisis dan optimasi yang dihasilkan oleh model matematis.

Pada penelitian ini, sistem yang dikembangkan berfungsi sebagai *Decision Support System* untuk mendukung proses perencanaan distribusi. Sistem memanfaatkan model *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), *Google OR-Tools*, dan data perjalanan berbasis jaringan jalan untuk menghasilkan solusi distribusi yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Selain menampilkan hasil optimasi rute, sistem juga menyajikan informasi pendukung yang membantu pengguna melakukan evaluasi terhadap hasil distribusi yang diperoleh. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai alat optimasi, tetapi juga sebagai sarana pendukung pengambilan keputusan dalam kegiatan distribusi perusahaan.

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai *Vehicle Routing Problem* (VRP), *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), pemanfaatan *Google Maps API*, serta pengembangan *Decision Support System* (DSS) telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa optimasi rute distribusi mampu meningkatkan efisiensi operasional melalui pengurangan jarak tempuh, biaya distribusi, maupun peningkatan pemanfaatan sumber daya kendaraan. Selain itu, perkembangan teknologi komputasi dan layanan peta digital juga mendorong

munculnya berbagai pendekatan yang lebih realistis untuk menyelesaikan permasalahan distribusi pada kondisi nyata.

Sebagai dasar dalam penelitian ini, beberapa penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan topik yang dibahas dirangkum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Ringkasan Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Tahun	Metode / Pendekatan	Hasil Penelitian
1	Kristina dkk. [7]	2023	CVRP menggunakan Google OR-Tools	Menghasilkan rute distribusi obat yang lebih efisien dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan.
2	Soimun dkk. [5]	2025	CVRP dan Saving Matrix	Mengoptimalkan distribusi air minum dan menurunkan biaya distribusi melalui pengaturan rute yang lebih efisien.
3	Kumari dkk. [6]	2023	Hybrid Metaheuristic (Genetic Algorithm dan Ruin-Recreate)	Menghasilkan solusi CVRP yang kompetitif dengan kualitas solusi yang baik dan waktu komputasi yang efisien.
4	Lian dan Tribello [10]	2024	Python, Google API, dan Mixed Integer Linear Programming	Mengintegrasikan Google API untuk memperoleh data perjalanan secara otomatis dan menyelesaikan permasalahan routing secara praktis.
5	Munoz-Villamizar dkk. [11]	2024	Google Maps API dan Mathematical Modeling	Mengintegrasikan data lalu lintas dan Google Maps API ke dalam model VRP untuk meningkatkan kualitas perencanaan rute.
6	Dyczkowska dkk. [14]	2023	Decision Support System pada Logistics 4.0	Menunjukkan bahwa DSS mampu membantu proses pengambilan keputusan logistik melalui pemanfaatan teknologi informasi dan sistem pendukung operasional.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah dipaparkan, dapat dilihat bahwa sebagian besar penelitian berfokus pada pengembangan model optimasi rute, penerapan metode penyelesaian CVRP, maupun integrasi teknologi pendukung seperti Google Maps API dan sistem pendukung keputusan. Penelitian oleh Kristina

dkk. [7] dan Soimun dkk. [5] menunjukkan penerapan CVRP pada kasus distribusi nyata, sedangkan penelitian Kumari dkk. [6] lebih berfokus pada pengembangan metode optimasi untuk meningkatkan kualitas solusi.

Di sisi lain, penelitian yang dilakukan oleh Lian dan Tribello [10] serta Munoz-Villamizar dkk. [11] menunjukkan bahwa penggunaan Google API dapat meningkatkan realisme model routing karena memanfaatkan data perjalanan yang lebih mendekati kondisi aktual dibandingkan pendekatan jarak geometris sederhana. Sementara itu, penelitian Dyczkowska dkk. [14] menekankan pentingnya integrasi sistem pendukung keputusan dalam kegiatan logistik modern untuk membantu proses perencanaan dan pengambilan keputusan operasional.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai optimasi rute distribusi telah berkembang dari sisi model optimasi, metode penyelesaian, pemanfaatan layanan peta digital, maupun pengembangan sistem pendukung keputusan. Temuan-temuan tersebut menjadi dasar untuk mengidentifikasi celah penelitian (*research gap*) dan menentukan posisi penelitian ini, yang dibahas pada subbab berikutnya.

2.11 Research Gap dan Posisi Penelitian

Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah dibahas pada bagian sebelumnya, dapat diketahui bahwa penelitian mengenai *Vehicle Routing Problem* (VRP) dan *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) telah berkembang dalam berbagai arah, mulai dari pengembangan model optimasi, penerapan algoritma penyelesaian, pemanfaatan layanan peta digital, hingga integrasi dengan sistem pendukung keputusan. Meskipun demikian, masih terdapat beberapa aspek yang belum banyak diintegrasikan secara bersamaan dalam satu penelitian.

Penelitian oleh Kristina [7] dan Soimun [5] menunjukkan bahwa model CVRP dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi distribusi pada kasus nyata. Namun, kedua penelitian tersebut masih berfokus pada implementasi model optimasi untuk menghasilkan rute distribusi yang lebih efisien dan belum memanfaatkan data jarak maupun waktu tempuh berbasis jaringan jalan yang diperoleh secara langsung dari layanan peta digital modern. Selain itu, pengembangan sistem yang dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan operasional juga belum menjadi fokus utama.

Dari sisi metode penyelesaian, penelitian oleh Kumari [6] menunjukkan bahwa pendekatan *hybrid metaheuristic* mampu menghasilkan solusi CVRP dengan

kualitas yang baik pada berbagai skenario pengujian. Akan tetapi, penelitian tersebut lebih menitikberatkan pada pengembangan metode optimasi dan evaluasi performa algoritma sehingga aspek implementasi sistem dan penerapan pada lingkungan operasional perusahaan belum menjadi perhatian utama.

Sementara itu, penelitian oleh Lian dan Tribello [10] serta Munoz-Villamizar [11] menunjukkan bahwa pemanfaatan Google API dapat membantu menghasilkan data perjalanan yang lebih realistis dibandingkan penggunaan jarak geometris sederhana. Penelitian tersebut menekankan pentingnya penggunaan data berbasis jaringan jalan untuk meningkatkan kualitas perencanaan rute distribusi. Temuan tersebut juga didukung oleh penelitian Alvarez [12] yang menunjukkan bahwa penggunaan data perjalanan yang lebih mendekati kondisi aktual dapat meningkatkan kualitas hasil optimasi rute.

Pada aspek sistem pendukung keputusan, penelitian oleh Dyczkowska [14] menunjukkan bahwa *Decision Support System* (DSS) memiliki peran penting dalam membantu proses perencanaan dan pengambilan keputusan pada bidang logistik. Selain itu, penelitian oleh Aldhmour dan Eleyan [21] menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi DSS dipengaruhi oleh manfaat yang dirasakan pengguna serta kemampuan sistem dalam mendukung kebutuhan operasional organisasi. Namun demikian, penelitian tersebut tidak secara khusus membahas integrasi DSS dengan model optimasi rute distribusi berbasis CVRP.

Berdasarkan hasil analisis terhadap penelitian terdahulu, dapat diidentifikasi bahwa sebagian penelitian berfokus pada implementasi model CVRP dan metode optimasi, sebagian lainnya berfokus pada pemanfaatan layanan peta digital untuk memperoleh data perjalanan yang lebih realistis, sedangkan penelitian lainnya membahas penerapan sistem pendukung keputusan pada bidang logistik. Berdasarkan referensi yang digunakan dalam penelitian ini, belum ditemukan penelitian yang secara bersamaan mengintegrasikan model CVRP, data perjalanan berbasis jaringan jalan, serta sistem pendukung keputusan dalam satu lingkungan distribusi perusahaan secara terintegrasi.

Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada pencarian solusi optimasi dan evaluasi kinerja model, sehingga informasi yang dihasilkan umumnya terbatas pada rute distribusi atau nilai optimasi yang diperoleh. Dalam praktik distribusi, pengambil keputusan memerlukan informasi tambahan untuk memahami penyebab keterbatasan distribusi serta mengevaluasi hasil optimasi yang dihasilkan. Oleh karena itu, mekanisme analisis penyebab pelanggan tidak terlayani (*customer dropping*), yaitu kondisi ketika pelanggan

tidak dimasukkan ke dalam solusi optimasi akibat keterbatasan batasan operasional, maupun rekomendasi operasional masih belum banyak dibahas pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Berdasarkan kondisi tersebut, posisi penelitian ini berada pada penggabungan beberapa aspek yang sebelumnya masih banyak diteliti secara terpisah. Penelitian ini mengimplementasikan model *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) menggunakan *Routing Solver* pada *Google OR-Tools* dengan konfigurasi *Parallel Cheapest Insertion* (PCI) sebagai *First Solution Strategy* dan *Guided Local Search* (GLS) sebagai *Local Search Metaheuristic*. Selain itu, penelitian ini memanfaatkan *Google Routes API* untuk membangun *distance matrix* dan *time matrix* berbasis jaringan jalan serta mengembangkan sistem pendukung keputusan berbasis web untuk membantu proses perencanaan distribusi pada lingkungan operasional perusahaan.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada pengembangan model optimasi, metode penyelesaian, atau integrasi layanan peta digital secara terpisah, penelitian ini mengimplementasikan konfigurasi *Routing Solver* pada *Google OR-Tools* dengan kombinasi *Parallel Cheapest Insertion* (PCI) dan *Guided Local Search* (GLS) untuk menyelesaikan permasalahan distribusi pada lingkungan operasional perusahaan, penelitian ini memanfaatkan data distribusi perusahaan yang mencakup depot, pelanggan, kendaraan, produk, dan data pesanan sebagai dasar proses optimasi. Sistem yang dikembangkan tidak hanya menghasilkan rute distribusi yang memenuhi berbagai batasan operasional, tetapi juga menyediakan informasi pendukung seperti utilisasi kendaraan, analisis kompatibilitas kendaraan dan produk, identifikasi pelanggan yang tidak dapat dilayani, *Vehicle Availability*, *Root Cause Analysis*, *Recommendation Engine*, serta *Reschedule Recommendation* untuk membantu proses evaluasi dan pengambilan keputusan distribusi.

Selain itu, penelitian ini juga melakukan evaluasi terhadap hasil optimasi melalui perbandingan dengan praktik operasional perusahaan menggunakan parameter biaya operasional, jarak distribusi, waktu distribusi, utilisasi kendaraan, dan tingkat pelayanan pelanggan. Pendekatan tersebut digunakan untuk menilai potensi penerapan model optimasi pada kondisi operasional perusahaan secara lebih nyata.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan model optimasi distribusi yang memenuhi berbagai batasan operasional, tetapi juga mengintegrasikan data perjalanan berbasis jaringan jalan, sistem pendukung

keputusan, serta mekanisme evaluasi hasil optimasi ke dalam satu sistem yang dapat diterapkan pada lingkungan operasional perusahaan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan kontribusi baik dari sisi pengembangan model optimasi maupun implementasi sistem pendukung keputusan untuk perencanaan distribusi yang lebih efektif dan berbasis data.



UMN
UNIVERSITAS
MULTIMEDIA
NUSANTARA