

Masalah Antar-Jemput Barang Menggunakan Armada Kendaraan Listrik dengan Kapasitas Angkut dan Kapasitas Baterai Berbeda

RAHMA NURLAILAWATI, TONI BAKHTIAR, PRAPTO TRI SUPRIYO

Divisi Riset Operasi, Departemen Matematika, IPB University,
Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

Email: {rahmanurlailawati,tbakhtiar,praptosu}@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Urgensi Electric Vehicle Routing Problems (EVRP) terletak pada kebutuhan untuk mengoptimalkan rute kendaraan listrik guna mengurangi emisi karbon dan dampak lingkungan. Tantangan EVRP meliputi kompleksitas perhitungan rute dengan mempertimbangkan batasan daya baterai dan infrastruktur pengisian daya yang terbatas. Dalam artikel ini diformulasikan masalah perutean kendaraan listrik dengan permintaan antar-jemput barang dalam bentuk pemrograman linear bilangan bulat. Model yang diajukan memiliki fitur penggunaan armada kendaraan dengan kapasitas angkut dan kapasitas baterai heterogen. Implementasi model meliputi penyelesaian masalah antar-jemput barang menggunakan armada kendaraan listrik homogen dan heterogen dengan 1 depot, 7 pelanggan, 2 kendaraan listrik, dan 2 stasiun pengisian baterai kendaraan listrik umum. Masalah pemrograman EVRP diselesaikan secara numerik menggunakan Lingo 17.0.

Kata kunci: armada kendaraan, EVRP, kapasitas baterai, kendaraan listrik, masalah antar-jemput.

Abstract

The primary objective of Electric Vehicle Routing Problems (EVRP) lies in the searching of optimal route for electric vehicles in order to reduce CO₂ emissions and environmental impact. The modeling challenge of EVRP include complex calculation routes taking into account the limitations of battery capacity and the availability of battery charging infrastructure. In this article, the electric vehicle routing problem with pickup and delivery is formulated in the form of an integer linear programming. It is considered in the model the use of a fleet of vehicles with heterogeneous loading and battery capacities. The implementation model includes two simple cases of homogeneous and heterogeneous electric vehicle fleets with 1 depot, 7 customers, 2 electric vehicles, and 2 charging stations. EVRP model is numerically solved using Lingo 17.0.

Keywords: battery capacity, electric vehicle, EVRP, fleet size, pickup and delivery problem.

1. PENDAHULUAN

Vehicle Routing Problem (VRP) adalah salah satu masalah klasik dalam bidang riset operasi yang memainkan peran penting dalam berbagai bidang, termasuk logistik, distribusi, transportasi, dan perencanaan rute. VRP bertujuan untuk mencari rute terbaik untuk sekelompok kendaraan yang harus mengunjungi sejumlah pelanggan dengan permintaan yang diketahui atau tidak diketahui dalam jangka waktu yang ditentukan. Tujuan utamanya adalah untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya, seperti kendaraan, waktu, dan tenaga, serta meminimalkan biaya operasional, jarak tempuh, atau waktu perjalanan.

Dalam aplikasinya, VRP memiliki banyak varian sebagai cerminan aspek yang berbeda dalam masalah perutean kendaraan yang mungkin muncul dalam berbagai konteks dan situasi, sehingga setiap varian VRP dirancang untuk memodelkan tantangan dan kendala unik yang dihadapi (Toth & Vigo [18]). Dalam situasi nyata, pelanggan atau lokasi tertentu mungkin hanya dapat dikunjungi dalam jendela waktu tertentu, sehingga memunculkan apa yang dikenal dengan *VRP with time windows*. Ketersediaan sumber daya berupa depot dan kendaraan menghadirkan varian *multidepot VRP* dan *VRP with fleet size*. Dalam beberapa kasus, barang yang dikirim memiliki karakteristik yang berbeda, seperti ukuran, berat, atau bahkan prioritas pengiriman. Masalah ini dapat dimodelkan dalam bentuk *multicommodity VRP*. Sementara itu, beberapa skenario logistik melibatkan pengambilan (*pickup*) dan pengantaran (*delivery*) barang. *VRP with pickup and delivery* (VRPPD) dapat digunakan dalam perencanaan rute masalah ini. VRPPD adalah salah satu varian VRP yang menarik. Pada VRPPD, kendaraan tidak hanya bertanggung jawab untuk mengantarkan barang ke pelanggan, tetapi juga harus mengambil barang dari pelanggan. Pengiriman tabung LPG dan air minum galon merupakan sedikit contoh masalah yang dapat dimodelkan dalam bentuk VRPPD. Pada masalah VRPPD, kapasitas kendaraan, berapa banyak barang yang harus dimuat, dan urutan pengantaran merupakan aspek yang menantang.

Pada periode 2010-2020, karena meningkatnya krisis energi dan tekanan perlindungan lingkungan, kendaraan listrik telah menjadi salah satu arah utama pengembangan otomotif masa depan untuk emisi karbon nol, pengalaman berkendara yang lebih nyaman, dan biaya yang lebih murah (Wang *et al.* [19]). Menurut O'Callaghan & Adam [11], pemulihan ekonomi setelah krisis COVID-19 harus digunakan sebagai peluang untuk mempromosikan transisi rendah karbon di sektor transportasi. Badan Energi Internasional melaporkan bahwa penjualan mobil listrik telah melampaui 10 juta unit pada 2022, dengan 14% dari semua mobil baru yang terjual berenergi listrik, naik dari 9% pada 2021 dan 5% pada 2020 (IEA [6]).

Berdasarkan studi literatur oleh [16] terhadap artikel yang terbit pada periode 2018-2022, dilaporkan bahwa semakin banyak perusahaan logistik dan distribusi yang mengadopsi kendaraan listrik untuk distribusi kargo. Dengan pengetatan kebijakan perlindungan lingkungan, beberapa aturan telah diterapkan untuk menghindari penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil tradisional di kawasan urban di beberapa kota. Kendaraan listrik juga akan menjadi elemen penting dalam transformasi bisnis yang berkelanjutan dan bertanggung jawab. Dengan mengadopsi kendaraan listrik, bisnis dapat mengurangi dampak lingkungan, menghemat biaya operasional, memanfaatkan kebijakan pemerintah yang mendukung, memperkuat reputasi perusahaan, dan mencapai diferensiasi kompetitif. Dalam pemodelan VRP, kemunculan kendaraan listrik mempengaruhi pendekatan perencanaan rute, penempatan stasiun pengisian kendaraan listrik umum (SPKLU), batasan jarak tempuh, dan fleksibilitas pengiriman. Dalam praktiknya, algoritme dan teknik pemodelan VRP harus disesuaikan dan dioptimalkan untuk memasukkan kendaraan listrik dalam solusi perutean terbaik.

Dalam artikel ini dibahas pengembangan model antar-jemput barang menggunakan kendaraan listrik. Model *Electric Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery* (EVRPPD) diformulasikan dalam bentuk pemrograman linear bilangan bulat campuran (*mixed-integer linear programming*, MILP) sedemikian sehingga dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah dimaksud. Kendaraan listrik memiliki keterbatasan jarak tempuh atau otonomi baterai yang lebih rendah dibandingkan dengan kendaraan konvensional. EVRPPD melibatkan rute yang

lebih kompleks dengan *pickup* dan *delivery*. Selain mencari rute terpendek untuk mengunjungi pelanggan, kendaraan listrik juga harus mempertimbangkan urutan *pickup* dan *delivery* yang optimal untuk mengambil dan mengantarkan barang dengan efisien. Integrasi antara proses *pickup* dan *delivery* dalam perencanaan rute menambah tingkat kompleksitas dalam pemodelan VRPPD. Perubahan daya baterai dan waktu pengisian daya dapat mempengaruhi jadwal pengiriman dan membuat rencana rute harus disesuaikan secara *real-time*. Oleh karena itu, algoritme dan teknik pemodelan harus mampu menghadapi ketidakpastian dan memperbarui rencana rute dengan cepat sesuai dengan kondisi operasional aktual. Secara khusus, dalam artikel ini akan dibahas model EVRPPD yang melibatkan armada kendaraan listrik dengan kapasitas muatan dan kapasitas baterai berbeda (*heterogenous fleet size EVRPPD*).

2. METODE PENELITIAN

Di bagian ini dideskripsikan masalah antar-jemput barang menggunakan kendaraan listrik dalam bentuk model EVRPPD.

2.1. Masalah Perutean Kendaraan. Situasi terkini penelitian tentang pemodelan EVRP mencakup beberapa perkembangan penting. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi tantangan khusus EVRP dan memberikan kontribusi pada pengembangan solusi yang efisien, berkelanjutan, dan komersial untuk penggunaan kendaraan listrik dalam perutean dan distribusi. Para peneliti berupaya mengembangkan model dan algoritma yang inovatif untuk memecahkan EVRP dengan cara yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan (Xiao *et al.* [21], Qin *et al.* [14], dan Huang [5]). Kompleksitas pemodelan EVRP melibatkan pertimbangan berbagai faktor seperti status pengisian daya baterai (Montoya *et al.* [10]), infrastruktur pengisian daya (Wang & Zhao [20]), dan konsumsi energi (Zhang *et al.* [25]). Penelitian terbaru mengeksplorasi integrasi sumber energi terbarukan dan pengembangan algoritma cerdas untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan solusi EVRP (Jarvis *et al.* [7]).

Seiring dengan meningkatnya minat komunitas logistik untuk memasukkan kendaraan listrik ke dalam armada distribusi, studi akademis tentang EVRP juga berkembang secara bersamaan. Erdelic & Caric [3] dan Kucukoglu *et al.* [8] melakukan studi literatur komprehensif terhadap EVRP berdasarkan fungsi objektif, model varian, dan pendekatan solusi. Pada kasus EVRPPD, Xu *et al.* [22] membahas masalah perutean kendaraan listrik dengan pengambilan dan pengiriman simultan dengan mempertimbangkan pengisian daya taklinear dan konsumsi daya yang bergantung pada beban kendaraan. Rute optimum ditentukan dengan meminimumkan banyaknya kendaraan listrik yang digunakan dan total waktu kerja, termasuk waktu tempuh, waktu pengisian daya, waktu tunggu, dan waktu pelayanan. Soysal *et al.* [17] mengusulkan model MILP beserta pendekatan linearnya bagi masalah EVRPPD di bawah asumsi laju konsumsi baterai stokastik. Ditunjukkan melalui eksperimen numerik bahwa asumsi konsumsi baterai stokastik berkorelasi dengan pengurangan kecemasan jarak tempuh pengemudi.

VRP termasuk dalam kelas masalah *NP-hard*, yaitu masalah yang memiliki kompleksitas yang sangat tinggi di mana pencarian solusi optimum VRP dapat membutuhkan waktu yang sangat lama ketika jumlah simpul yang harus dikunjungi meningkat. Dengan demikian, karena kompleksitas yang melekat dan tantangan komputasi, sebagian besar model VRP diselesaikan secara heuristik (Liu *et al.* [9]). Yilmaz & Kalayci [24] menggunakan metode VNS (*variable neighborhood search*) untuk menyelesaikan EVRPPD secara heuristik, Xu *et al.* [22] menerapkan versi adaptif dari metode heuristik yang serupa untuk menyelesaikan EVRPPD berskala besar, sedangkan Cai *et al.* [2] menggunakan algoritme genetik multiobjektif untuk menyelesaikan EVRPPD dengan jendela waktu (*time windows*). Masalah terakhir yang sama diselesaikan oleh Erdelic & Caric [4] menggunakan metode metaheuristik ALNS (*adaptive large neighborhood search*). Sementara itu, Silalahi *et al.* [15] menggunakan algoritme *sweep* dan *particle swarm optimization* untuk menyelesaikan *capacitated VRP*.

Meskipun metode heuristik dan metaheuristik sudah banyak berkembang, namun demikian metode eksak (*exact method*) masih sering dipilih sebagai metode penyelesaian EVRP, terutama

pada masalah berskala kecil yang bertujuan untuk memperlihatkan dan menguji karakteristik EVRP. Beberapa contoh artikel yang menggunakan metode eksak dalam EVRP ialah Paz *et al.* [12] pada masalah multidepot EVRP dengan jendela waktu, Pelletier *et al.* [13] dalam memodelkan, menyusun, dan menganalisis jadwal pengisian daya kendaraan listrik dalam konteks operasional *multi-shift*, dan Bruglieri *et al.* [1] pada masalah *green* VRP dengan keberadaan stasiun bahan bakar alternatif.

Dalam artikel ini masalah EVRPPD yang diformulasikan dalam pemrograman bilangan bulat diselesaikan dengan metode eksak.

2.2. Model EVRPPD. Di bagian ini dideskripsikan masalah antar-jemput barang menggunakan kendaraan listrik dalam bentuk model EVRPPD. Model yang diajukan merupakan pengembangan model EVRPPD Yang *et al.* [23], model Yilmaz & Kalayci [24], dan model Erdelic & Caric [4]. Fitur pengembangan yang dimaksud ialah penggunaan armada kendaraan listrik (*fleet* EVRP) dengan kapasitas muatan dan kapasitas baterai berbeda (*heterogeneous capacitated* EVRP).

Model dibangun dengan asumsi-asumsi berikut: (1) terdapat sejumlah kendaraan listrik yang memiliki kapasitas angkut dan kapasitas baterai terbatas dan berbeda, (2) konsumsi listrik hanya ditentukan oleh jarak tempuh dengan laju konsumsi daya konstan dengan satu unit jarak membutuhkan satu unit daya, (3) SPKLU yang ada berjenis penggantian baterai (*battery swapping station*) sehingga waktu pengisian daya diabaikan, (4) kapasitas baterai kendaraan yang meninggalkan depot atau SPKLU maksimum, (5) permintaan barang yang harus diantar/dijemput pada setiap pelanggan diketahui dan bersifat tetap, dan (6) biaya operasional kendaraan tidak diperhitungkan.

Untuk memfasilitasi formulasi model, didefinisikan himpunan-himpunan berikut: $\mathbb{N}$ adalah himpunan pelanggan, $\mathbb{F}$ adalah himpunan SPKLU, $\mathbb{V}_0$ adalah himpunan pelanggan, SPKLU, dan depot (awal), $\mathbb{V}_{n+1}$ adalah himpunan pelanggan, SPKLU, dan depot (akhir), $\mathbb{V}_{0,n+1}$ adalah himpunan pelanggan, SPKLU, dan depot (awal dan akhir), dan $\mathbb{K}$ adalah himpunan kendaraan listrik.

Untuk mencatat tingkat aktivitas berkaitan dengan antar-jemput barang, didefinisikan sejumlah variabel keputusan berikut: y_{ijk} menyatakan akumulasi banyaknya barang (dalam kilogram) yang sudah diambil di pelanggan i dan dibawa ke pelanggan j oleh kendaraan k , z_{ijk} menyatakan banyak barang yang dibawa dari pelanggan i yang akan dikirim ke pelanggan j (dalam kilogram) oleh kendaraan k , e_{jk} adalah kapasitas baterai (dalam kilowatt) kendaraan k ketika sampai di simpul j , u_{ik} adalah variabel artifisial yang digunakan untuk menghindari *subtour* yang melibatkan pelanggan i dan kendaraan k , serta x_{ijk} sebagai variabel biner yang bernilai 1 ketika kendaraan k berjalan dari pelanggan i ke pelanggan j dan bernilai 0 jika sebaliknya.

Fungsi objektif masalah EVRPPD ialah meminimumkan total jarak tempuh, dan dituliskan sebagai:

$$\min z := \sum_{i \in \mathbb{V}_{0,n+1}} \sum_{j \in \mathbb{V}_{0,n+1}} \sum_{k \in \mathbb{K}} d_{ij} x_{ijk}, \quad (1)$$

dengan d_{ij} adalah jarak Euklid (dalam kilometer) dari pelanggan i ke pelanggan j . Karena diasumsikan konsumsi baterai hanya bergantung pada jarak, maka minimisasi jarak tempuh pada (1) berpadanan dengan minimisasi konsumsi baterai.

Sejumlah kendala standar VRPPD dan kendala khusus berkaitan dengan penggunaan kendaraan listrik diformulasikan sebagai berikut:

$$\sum_{i \in \mathbb{V}_0, i \neq j} \sum_{k \in \mathbb{K}} x_{ijk} = 1, \quad j \in \mathbb{N}, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \mathbb{V}_{n+1}} x_{0jk} = 1, \quad k \in \mathbb{K}, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{V}_{n+1}} x_{i,n+1,k} = 1, \quad k \in \mathbb{K}, \quad (4)$$

$$x_{iik} = 0, \quad \forall i \in \mathbb{V}_{0,n+1}, \forall k \in \mathbb{K}, \quad (5)$$

$$\sum_{k \in \mathbb{K}} x_{ijk} \leq 1, \quad i, j \in \mathbb{N}, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{V}_0, i \neq j} \sum_{k \in \mathbb{K}} x_{ijk} = \sum_{j \in \mathbb{V}_{n+1}, i \neq j} \sum_{k \in \mathbb{K}} x_{ijk}, \quad j \in \mathbb{N} \cup \mathbb{F}, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{V}_{0,n+1}} y_{jik} - \sum_{i \in \mathbb{V}_{0,n+1}} y_{ijk} = p_j, \quad j \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{K}, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{V}_{0,n+1}} z_{jik} - \sum_{i \in \mathbb{V}_{0,n+1}} z_{ijk} = d_j, \quad j \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{K}, \quad (9)$$

$$y_{ijk} + z_{ijk} \leq \sum_{k \in \mathbb{K}} Q_k x_{jik}, \quad i, j \in \mathbb{V}_{0,n+1}, \quad (10)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + n x_{ijk} \leq n - 1, \quad i, j \in \mathbb{V}_{n+1}, k \in \mathbb{K}, i \neq j. \quad (11)$$

Kendala (2) memastikan bahwa setiap pelanggan hanya dikunjungi satu kali oleh suatu kendaraan. Kendala (3) dan (4) berturut-turut mengatur agar semua kendaraan berawal dari depot dan berakhir di depot. Di sini depot yang sama diberi indeks $i = 0$ dan sekaligus $i = n+1$, dengan n adalah banyaknya pelanggan. Setiap kendaraan harus meninggalkan suatu simpul dan menuju simpul yang berbeda, seperti disyaratkan oleh kendala (5). Kendala (6) memastikan bahwa busur (i, j) dilewati oleh sebanyak-banyaknya satu kendaraan. Kendala (7) menjamin kekontinuan rute, yaitu banyaknya kendaraan yang menuju suatu simpul sama dengan banyaknya kendaraan yang meninggalkan simpul tersebut. Kendala (8) dan (9) berturut-turut menjamin terlayannya pengantaran sebanyak d_j (dalam kilogram) dan pengambilan barang sebanyak p_j (dalam kilogram) di setiap pelanggan. Sementara itu kendala (10) menyatakan batasan kapasitas muatan kendaraan Q_k (dalam kilogram) dan (11) merupakan kendala untuk mencegah terjadinya subtour Miller-Tucker-Zemlin.

Penggunaan kendaraan listrik dalam distribusi barang mensyaratkan tersedianya infrastruktur khusus, yaitu SPKLU. Kendaraan listrik harus mengunjungi SPKLU ketika daya baterai sudah tidak mencukupi untuk menyelesaikan seluruh rute. Berikut adalah kendala-kendala yang berkaitan dengan penggunaan kendaraan listrik:

$$\sum_{i \in \mathbb{V}_0, i \neq j} \leq m, \quad j \in \mathbb{F}, k \in \mathbb{K}, \quad (12)$$

$$e_{0k} = T_k, e_{ik} = T_k, \quad i \in \mathbb{F}, k \in \mathbb{K}, \quad (13)$$

$$e_{ik} \leq T_k, \quad i \in \mathbb{V}_{0,n+1}, k \in \mathbb{K}, \quad (14)$$

$$0 \leq e_{jk} \leq e_{ik} - h_k c_{ij} x_{ijk} + T_k (1 - x_{ijk}), \quad i \in \mathbb{V}_0 \cap \mathbb{F}, j \in \mathbb{V}_{n+1}, k \in \mathbb{K}, \quad (15)$$

$$0 \leq e_{jk} \leq T_k - h_k c_{ij} x_{ijk}, \quad i \in \mathbb{F}, j \in \mathbb{V}_{n+1}, k \in \mathbb{K}. \quad (16)$$

Kendala (12) menyatakan bahwa SPKLU boleh dikunjungi lebih dari satu kali, jika diperlukan, dan sebanyak-banyaknya m kali. Di sini m dapat diganti dengan bilangan bulat positif yang nilainya bergantung pada total jarak antar-pelanggan. Kendala (13) memastikan bahwa ketika meninggalkan depot atau SPKLU, baterai setiap kendaraan dalam kondisi terisi penuh T_k (dalam kilowatt), dan ketika digunakan untuk mengunjungi pelanggan, status baterai akan berkurang seperti dinyatakan pada kendala (14). Kendala (15) dan (16) memastikan bahwa sisa daya dalam baterai bergantung pada konsumsi baterai selama perjalanan dari pelanggan i ke pelanggan j . Sebagai contoh, jika ada perjalanan melalui busur (i, j) , maka $x_{ijk} = 1$, sehingga kendala (15) menjadi $e_{jk} \leq e_{ik} - h_k c_{ij}$, dengan h_k adalah laju konsumsi daya baterai kendaraan k (dalam kilowatt per kilometer), yang memastikan bahwa sisa daya di simpul j lebih kecil daripada di simpul i akibat perjalanan. Kendala (16) menjadi $e_{jk} \leq T_k - h_k c_{ij}$, yang memastikan bahwa sisa daya baterai di simpul j tidak melebihi kapasitas baterai. Hal serupa terjadi ketika $x_{ijk} = 0$.

Selain kendala-kendala di atas, diperlukan juga kendala biner dan kendala ketaknegatifan bagi beberapa variabel keputusan:

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i, j \in \mathbb{V}_{0,n+1}, k \in \mathbb{K}, \quad (17)$$

$$u_{ik}, y_{ijk}, z_{ijk} \geq 0, \quad i, j \in \mathbb{V}_{0,n+1}, k \in \mathbb{K}. \quad (18)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Masalah EVRPPD yang diformulasikan dalam model MILP pada (1)–(18) menawarkan fitur yang cukup beragam, seperti penggunaan armada kendaraan listrik dengan kapasitas angkut dan kapasitas baterai berbeda. Demikian juga dengan banyaknya permintaan angkut dan jemput barang oleh pelanggan. Di bagian ini akan dipresentasikan dua contoh ilustratif, yaitu masalah distribusi dengan armada kendaraan listrik homogen dan heterogen berdasarkan kapasitas angkut kendaraan dan kapasitas baterai. Setiap masalah melibatkan 1 depot, 7 pelanggan (C1, C2, ..., C7), 2 kendaraan listrik (EV1, EV2), dan 2 SPKLU bertipe *bateray swapping station* (BSS1, BSS2). Dengan demikian didapatkan himpunan-himpunan berikut: $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots, 7\}$, $\mathbb{F} = \{8, 9\}$, $\mathbb{V}_0 = \{0, 1, 2, \dots, 7, 8, 9\}$, $\mathbb{V}_{n+1} = \{1, 2, \dots, 7, 8, 9, 10\}$, $\mathbb{V}_{0,n+1} = \{0, 1, 2, \dots, 7, 8, 9, 10\}$, dan $\mathbb{K} = \{1, 2\}$.

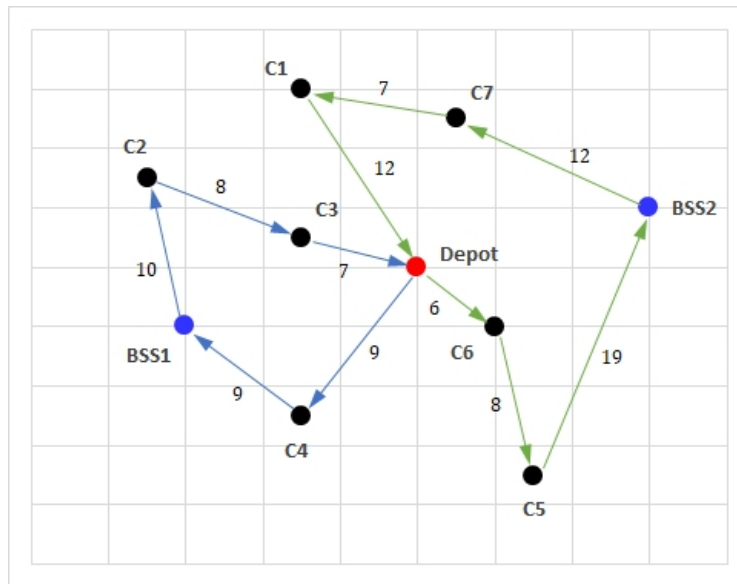
Pada kasus armada homogen, ditetapkan kapasitas angkut kendaraan $Q_1 = Q_2 = 75$ dan kapasitas baterai $T_1 = T_2 = 35$, sedangkan pada kasus armada heterogen ditetapkan $Q_1 = 85$, $Q_2 = 65$, $T_1 = 30$, dan $T_2 = 40$. Diasumsikan laju konsumsi baterai konstan dan sama, yaitu $h_1 = h_2 = 1$. Pada kedua kasus digunakan himpunan pelanggan yang sama dengan permintaan antar/jemput yang sama. Data jarak antarsimpul (depot, pelanggan, dan SPKLU), yang diasumsikan simetrik, dan besar permintaan antar/jemput (dalam kilogram) diberikan pada Tabel 1.

TABEL 1. Jarak antarsimpul, permintaan antar, dan permintaan jemput

d_{ij}	Depot	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	BSS1	BSS2	Antar	Jemput
Depot	0	12	16	7	9	18	6	10	12	5	0	0
C1		0	12	10	17	26	20	7	15	18	12	8
C2			0	8	16	24	21	17	10	24	7	15
C3				0	11	28	15	13	9	17	13	22
C4					0	15	14	19	9	25	5	11
C5						0	8	20	24	19	18	9
C6							0	14	17	14	10	17
C7								0	18	12	8	5
BSS1									0	27	0	0
BSS2										0	0	0

Tujuan dipilihnya dua kasus di atas ialah untuk melakukan verifikasi terhadap fitur-fitur khusus EVRP, terutama berkaitan dengan keterbatasan baterai dan keberadaan SPKLU, yang kemudian diperkaya dengan adanya permintaan antar dan jemput menggunakan kendaraan listrik dengan kapasitas berbeda. Dengan ukuran masalah yang tidak terlalu besar, metode eksak (*exact method*) digunakan untuk menyelesaikan MILP dengan bantuan Lingo 17.0. Rute optimal diberikan pada Gambar 1 dan Gambar 2, di mana bobot pada busur menyatakan jarak antarsimpul yang diambil dari Tabel 1.

Kasus armada homogen menawarkan kebebasan memilih kendaraan listrik karena keduanya memiliki karakteristik yang sama. Kendaraan listrik EV1 bertugas mengunjungi pelanggan C2, C3, dan C4 dengan total jarak melebihi kapasitas baterai sehingga harus mengunjungi SPKLU. Oleh karena itu, rute optimal kendaraan EV1 ialah Depot–C4–BSS1–C2–C3–Depot dengan jarak tempuh 43 kilometer. Penggunaan daya listrik ialah sebagai berikut. Kendaraan meninggalkan depot dengan kapasitas penuh, yaitu 35. Dengan asumsi 1 kW daya untuk 1



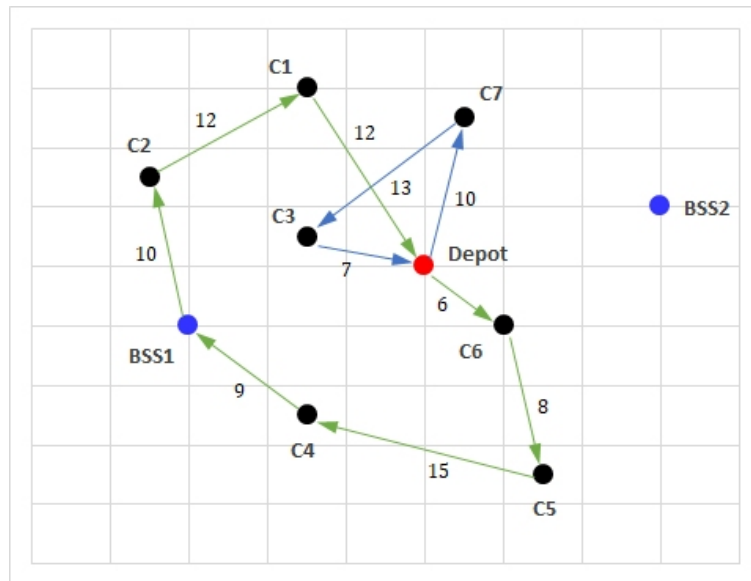
GAMBAR 1. Rute optimal pada masalah armada kendaraan homogen

kilometer jarak, maka daya listrik di C4 ialah $35 - 9 = 26$ dan ketika sampai di BSS1 berkurang menjadi $26 - 9 = 17$. Kendaraan meninggalkan SPKLU dengan kapasitas penuh kembali dan tiba di C2 dengan daya tersisa $35 - 10 = 25$ dan kemudian di C3 tersisa $25 - 8 = 17$ hingga tiba kembali di Depot tersisa $17 - 10 = 7$. Bagaimana dengan mutasi muatan yang dibawa? Kendaraan listrik EV1 membawa muatan untuk dantar ke pelanggan C4, C2, dan C3 sebanyak $d_4 + d_2 + d_3 = 5 + 7 + 13 = 25$ kilogram (lihat Tabel 1). Ketika tiba di C4, kendaraan menurunkan 5 dan menaikkan 11, sehingga muatan menjadi $25 + 7 = 32$. Di SPKLU tidak ada barang yang diturunkan atau dinaikkan. Pelanggan C2 memiliki permintaan antar 7 dan permintaan jemput 15, sehingga ketika sampai di C2, beban kendaraan menjadi $32 + 8 = 40$. Di pelanggan C3 muatan berubah menjadi $40 + (22 - 13) = 49$. Jumlah terakhir ialah muatan yang dibawa kembali ke depot.

Rute optimal kendaraan listrik EV2 ialah Depot–C6–C5–BSS2–C7–C1–Depot dengan jarak tempuh sejauh 64 kilometer. Dengan sekali berkunjung ke SPKLU, mutasi penggunaan daya listrik ialah sebagai berikut: $35 - 29 - 21 - 2 / 35 - 23 - 16 - 4$. Dapat diverifikasi dengan mudah bahwa mutasi muatan kendaraan listrik EV2 adalah sebagai berikut: $48 - 55 - 47 - 47 - 44 - 40$. Total jarak tempuh dua kendaraan listrik ialah $43 + 64 = 107$ kilometer. Pada mesin standar dengan RAM 8 Gb, solusi optimum (global) masalah EVRPPD dengan armada homogen diperoleh dalam waktu 29.84 detik.

Berikutnya ialah masalah EVRPPD dengan armada kendaraan heterogen, yaitu kendaraan listrik memiliki kapasitas angkut dan kapasitas baterai berbeda, yaitu $Q_1 = 85$, $Q_2 = 65$, $T_1 = 30$, dan $T_2 = 40$. Masalah distribusi dengan armada heterogen tentu saja lebih menarik daripada armada homogen karena pemilihan kendaraan menjadi krusial. Kendaraan EV1 memiliki kapasitas angkut lebih besar, namun dengan kapasitas baterai terbatas. Sementara itu, kendaraan EV2 memiliki kapasitas baterai lebih besar tetapi kapasitas angkut lebih kecil. Gambar 2 menyajikan rute optimal pada kasus armada kendaraan heterogen.

Rute optimal kendaraan EV1 ialah Depot–C7–C3–Depot dengan jarak tempuh 30 kilometer. Pada awalnya kendaraan EV1 membawa $d_7 + d_3 = 21$ kilogram muatan dari Depot. Di pelanggan C7, sebanyak 8 kilogram muatan diturunkan dan di waktu yang sama muatan sebanyak 5 dinaikkan, sehingga muatan bersih sesaat setelah meninggalkan C7 ialah $21 - 8 + 5 = 18$. Kemudian di C3 kendaraan menurunkan muatan sebanyak 13 dan menaikkan muatan sebanyak 22, sehingga kendaraan EV1 membawa muatan bersih sebanyak $18 - 13 + 22 = 28$



GAMBAR 2. Rute optimal pada masalah armada kendaraan heterogen

kembali ke Depot. Mutasi muatan yang terjadi masih di bawah kapasitas angkut kendaraan. Mutasi daya listrik kendaraan EV1 mengikuti jarak yang ditempuh, yaitu 30–10–13–7–0. Terlihat bahwa daya listrik kendaraan terpakai habis untuk menjalani rute.

Seperti diilustrasikan pada Gambar 2, kendaraan listrik EV2 memiliki rute optimal lebih panjang, yaitu Depot–C6–C5–C4–BSS1–C2–C1–Depot dengan jarak tempuh 72 kilometer. Di dalamnya termasuk mengunjungi SPKLU untuk melakukan penggantian baterai. Mutasi daya listrik selama menjalani rute ialah 40–34–26–11–2/40–30–18–6. Dengan mudah dapat diverifikasi mutasi muatan kendaraan sebagai berikut: 52–59–50–56–56–64–60. Terlihat bahwa tidak terjadi pelanggaran kapasitas baterai dan kapasitas angkut. Fakta ini menunjukkan bahwa model berhasil memutuskan penggunaan kendaraan secara optimal.

Total jarak tempuh kendaraan EV1 dan kendaraan EV2 ialah $30 + 72 = 102$ kilometer. Diperlukan 7.35 detik waktu komputasi untuk mendapatkan solusi optimum ini menggunakan Lingo 17.0 dan mesin standar RAM 8 Gb. Total jarak tempuh pada kasus armada heterogen lebih kecil daripada total jarak tempuh kasus armada homogen.

4. SIMPULAN

Pada artikel ini telah diformulasikan ke bentuk MILP masalah distribusi barang menggunakan armada kendaraan listrik. Model yang dibahas merupakan varian masalah perutean kendaraan listrik dengan permintaan antar dan jemput barang (*Electric Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*, EVRPPD) menggunakan armada kendaraan heterogen. Implementasi model pada dua kasus sederhana menunjukkan bahwa rute kendaraan yang diperoleh meminimumkan total jarak tempuh dan seluruh kendala yang ada terpenuhi.

Masalah EVRP dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mempertimbangkan beberapa faktor yang lebih kompleks. Tantangan tersebut mencakup perencanaan rute yang meminimumkan konsumsi energi listrik, memperhitungkan lokasi dan jadwal pengisian daya baterai yang efektif, serta mempertimbangkan berbagai kendala geografis, lalu lintas jalan, dan batasan waktu. Selain itu, ketidakpastian dalam permintaan pelanggan dan ketersediaan stasiun pengisian daya menjadi faktor tambahan yang dapat memperumit penyelesaian masalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bruglieri, M., Mancini, S., Pezzella, F., Pisacane, O., 2019, A path-based solution approach for the green vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, Volume 103, Pages 109–122.
- [2] Cai, W., Zhang, Y., Huang F., Ma, C., 2023, Delivery routing problem of pure electric vehicle with multi-objective pick-up and delivery integration. *PLoS ONE*, Volume 18, Issue 2, Pages e0281131. doi: 10.1371/journal.pone.0281131.
- [3] Erdelic, T., Caric, T., 2019, A survey on the electric vehicle routing problem: variants and solution approaches, *Journal of Advanced Transportation*, Volume 2019, Article ID 5075671, 48 pages. doi: 10.1155/2019/5075671.
- [4] Erdelic, T., Caric, T., 2022, Goods delivery with electric vehicles: electric vehicle routing optimization with time windows and partial or full recharge. *Energies*, Volume 15, 285. doi: 10.3390/en15010285.
- [5] Huang, Y., 2023, A review on the electric vehicle routing problem and its variations, *The Frontiers of Society, Science and Technology*, Volume 5, Issue 5, Pages 85–90. doi: 10.25236/FSST.2023.050514.
- [6] International Energy Agency (IEA), 2023, *Global EV Outlook 2023*, IEA, Paris. Online: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (diakses pada 6 Juli 2023).
- [7] Jarvis, P., Climent, L., Arbelaez, A., 2023, Smart and sustainable scheduling of charging events for electric buses. In: Henriques, C., Viseu, C. (eds), *EU Cohesion Policy Implementation - Evaluation Challenges and Opportunities*. EvEUCoP 2022. *Springer Proceedings in Political Science and International Relations*. Cham, CH: Springer. doi: 10.1007/978-3-031-18161-0_8.
- [8] Kucukoglu, I., Dewil, R., Cattrysse, D., 2021, The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 161, 107650. doi: 10.1016/j.cie.2021.107650.
- [9] Liu, F., Lua, C., Gui, L., Zhang, Q., Tong, X., Yuan, M., 2023, Heuristics for vehicle routing problem: a survey and recent advances. *arXiv*, Volume 2303.04147, Pages 1–67.
- [10] Montoya, A., Gueret, C., Mendoza, J. E., Villegas, J. G., 2017, The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 103, Pages 87–110. doi: 10.1016/j.trb.2017.02.004.
- [11] O'Callaghan, B., Adam, J. P., 2021, Are COVID-19 fiscal recovery measures bridging or extending the emissions gap? In United Nations Environment Programme (UNEP), 2021, *Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On-A World of Climate Promises Not Yet Delivered*, Nairobi, Kenya: United Nations Digital Library.
- [12] Paz, J. C., Granada-Echeverri, M., Escobar, J. W., 2018, The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Volume 9, Issue 1, Pages 123–136.
- [13] Pelletier, S., Jabali, O., Laporte, G., 2018, Charge scheduling for electric freight vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 115, Pages 246–269.
- [14] Qin, H., Su, X., Ren, T., Luo, Z., 2021, A review on the electric vehicle routing problems: Variants and algorithms, *Frontiers of Engineering Management*, Volume 8, Pages 370–389. doi: 10.1007/s42524-021-0157-1.
- [15] Silalahi, B. P., Fatihin, K., Supriyo, P. T., Guritman, S., 2020, Algoritme sweep dan particle swarm optimization dalam optimisasi rute kendaraan dengan kapasitas, *Jurnal Matematika Integratif*, Volume 16, Issue 1, Pages 29–40. doi: 10.24198/jmi.v16.n1.27474.29-40.
- [16] Soares, L. O., Reis, A. da C., Vieira, P. S., Hernandez-Callejo, L., Boloy, R. A. M., 2023, Electric vehicle supply chain management: a bibliometric and systematic review, *Energies*, Volume 16, Issue 4, 1563. doi: 10.3390/en16041563.
- [17] Soysal, M., Cimen, C., Belbag, S., 2020, Pickup and delivery with electric vehicles under stochastic battery depletion, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 146, 106512, doi: 10.1016/j.cie.2020.106512.
- [18] Toth, P., Vigo, D., 2002, *The vehicle routing problem*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics. doi: 10.1137/1.9780898718515.
- [19] Wang, Z., Ching, T.W., Huang, S., Wang, H., Xu, T., 2021, Challenges faced by electric vehicle motors and their solutions, *IEEE Access*, Volume 9, Pages 5228–5249. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045716.
- [20] Wang, W., Zhao, J., 2023, Partial linear recharging strategy for the electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations, *European Journal of Operational Research*, Volume 308, Issue 2, Pages 929–948. doi: 10.1016/j.ejor.2022.12.011.
- [21] Xiao, Y., Zhang, Y., Kaku, I., Kang, R., Pan, X., 2021, Electric vehicle routing problem: A systematic review and a new comprehensive model with nonlinear energy recharging and consumption, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 151, 111567. doi: 10.1016/j.rser.2021.111567.
- [22] Xu, W., Zhang, C., Cheng, M., Huang, Y., 2022, Electric vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: mathematical modeling and adaptive large neighborhood search heuristic method, *Energies*, Volume 15, 9222. doi: 10.3390/en15239222.
- [23] Yang, Q. Q., Hu, D. W., Chu, H. F., Xu, C. R., 2018, An electric vehicle routing problem with pickup and delivery, *CICTP 2018: Intelligence, Connectivity, and Mobility*, Pages 176–184.

- [24] Yilmaz, Y., Kalayci, C. B., 2022, Variable neighborhood search algorithms to solve the electric vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Mathematics*, Volume 10 Issue 17, 3108. doi: 10.3390/math10173108.
- [25] Zhang, S., Gajpal, Y., Appadoo, S. S., Abdulkader, M. M. S., 2018, Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption. *International Journal of Production Economics*, Volume 203, Pages 404–413. doi: 10.1016/j.ijpe.2018.07.016.