



Tersedia secara online di <http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jurmatis/index>

JURMATIS

Jurnal Manajemen Teknologi dan Teknik Industri



Analisis Perbandingan Strategi Pengisian Ulang pada Masalah *Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows (EVRPTW)*: Studi Kasus Layanan Ekspedisi

Zelania In Haryanto^{*1}, Ade Aisyah Arifna Putri²

zelania.inha@uii.ac.id^{*1}, aisyaharifna@staff.uns.ac.id²

¹Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia

²Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Informasi Artikel

Riwayat Artikel :
Received : 5 – Desember - 2024
Revised : 9 - Desember - 2024
Accepted : 28 – Desember - 2024

Keywords :
Electric Vehicle; Kendaraan Listrik; Nearest Neighbour; Partial Recharging; Vehicle Routing Problem

Untuk melakukan sitasi pada penelitian ini dengan format: Haryanto, Z. I., & Putri, A. A. A. (2025). Analisis perbandingan strategi pengisian ulang pada masalah *Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows (EVRPTW)*: Studi Kasus Layanan Ekspedisi. *JURMATIS (Jurnal Manajemen Teknologi Dan Teknik Industri)*, 7(1), 44 – 58.

Abstract

The growing market share of electric vehicles in Indonesia aligns with the government's initiatives to reduce greenhouse gas emissions and promote the adoption of electric vehicles to 30% of the total vehicle fleet by 2035. The constrained range of electric vehicles and the need for charging station accessibility present difficulties to efficient route planning. This study examines the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows (EVRPTW), taking into account consumer demands and time constraints. Two battery charging strategies are assessed: full recharge (EVRPTW-FR) and partial recharge (EVRPTW-PR), employing the nearest neighbor heuristic algorithm for route optimization. The result indicates that the partial recharge strategy generates a lower total cost than the full recharge strategy, reaching a cost reduction of 13.14%. The partial recharge strategy requires fewer vehicles to serve all customers, thus lowering vehicle investment costs.

Abstrak

Peningkatan pangsa pasar kendaraan listrik di Indonesia sejalan dengan upaya pemerintah untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mendorong adopsi kendaraan listrik hingga 30% dari total armada kendaraan pada tahun 2035. Namun, keterbatasan jangkauan kendaraan listrik serta kebutuhan akses stasiun pengisian daya menjadi tantangan dalam perencanaan rute yang efektif. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada *Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows (EVRPTW)*. Dua strategi pengisian baterai dievaluasi, yaitu pengisian penuh (*Full Recharge/EVRPTW-FR*) dan pengisian sebagian (*Partial Recharge/EVRPTW-PR*), dengan menggunakan algoritma heuristik nearest neighbour untuk optimasi rute. Hasil analisis menunjukkan bahwa strategi pengisian daya sebagian menghasilkan total biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan strategi pengisian penuh, dengan penghematan sebesar 13,14%. Selain itu, strategi *partial recharge* membutuhkan jumlah kendaraan yang lebih sedikit untuk melayani seluruh pelanggan, yang berdampak pada pengurangan biaya investasi kendaraan.

1. Pendahuluan

Industri logistik memiliki peran penting dalam perkembangan dan pertumbuhan ekonomi suatu negara, di sisi lain industri logistik juga bertanggung jawab atas menghasilkan sejumlah besar emisi gas rumah kaca [1]. Sektor transportasi menjadi penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar kedua yaitu sebesar 24,64% dengan peningkatan rata-rata sebesar 7,17% per tahun [2]. Pada 2015, pemerintah global, termasuk Indonesia, berkomitmen pada *Paris Agreement* untuk menahan kenaikan suhu global di bawah 2°C dan berupaya membatasinya hingga 1,5°C di atas level pra - industri [3].

Emisi CO₂ sektor logistik Indonesia mencapai 8,1%, pengurangannya penting untuk efisiensi dan ramah lingkungan [4]. Salah satu alternatif untuk mengurangi emisi yang dihasilkan oleh sektor logistik adalah menerapkan kebijakan untuk menggunakan kendaraan yang lebih *energy efficient* seperti kendaraan listrik [5]. Penggunaan kendaraan listrik dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan terdapat potensi penghematan biaya dari penggunaan listrik sebagai bahan bakar daripada bahan bakar fosil [6]. Di Indonesia diproyeksikan mulai dari tahun 2020 hingga tahun 2024 pertumbuhan kendaraan listrik akan meningkat sebanyak 5-7% per tahunnya [7].

Perpres No. 55/2019 mendorong konversi kendaraan listrik untuk efisiensi energi, ketahanan energi, dan pengurangan emisi [8]. Pemerintah Indonesia juga menargetkan penggunaan kendaraan bermotor listrik dan *low carbon vehicle* sebesar 30 % dari total kendaraan pada tahun 2035 [9]. Di sisi lain, penggunaan kendaraan listrik di Indonesia terhambat oleh biaya, fasilitas *charging*, jarak tempuh, dan permintaan listrik [10]. Namun, perusahaan seperti DHL telah memanfaatkan *electric van* sebagai moda transportasi untuk distribusi barang di area perkotaan di Indonesia [11]. Pemerintah mendorong kendaraan listrik dengan pajak 0,2%, pembebasan pajak, dan pembangunan stasiun pengisian daya [10].

Keberhasilan transisi dari kendaraan konvensional ke kendaraan listrik memerlukan teknik perencanaan rute yang efisien dengan mempertimbangkan karakteristik dari kendaraan kendaraan listrik seperti jangkauan maksimum kendaraan [12]; [13]. Keterbatasan jangkauan kendaraan listrik dapat diatasi dengan pengisian ulang, namun pengisian penuh mengurangi efisiensi [14]. Salah satu solusi untuk masalah ini adalah strategi pengisian ulang parsial yang memungkinkan baterai diisi ulang ke tingkat yang diperlukan dan dapat mempersingkat waktu pengisian [15].

Studi ini menyelesaikan permasalahan perutean kendaraan listrik dengan

mempertimbangkan: (a) pengisian ulang di *charging station* dengan waktu pengisian ulang yang tergantung pada sisa daya dan tingkat pengisian daya, (b) muatan maksimum kendaraan, (c) *time windows* pelanggan, depot, dan *charging station*. Paper ini juga membandingkan hasil akhir rute yang menggunakan strategi *full recharge* dengan strategi *partial recharge*. Dengan tujuan E-VRPTW yaitu meminimalkan biaya total.

Penelitian ini berfokus pada penentuan rute kendaraan listrik untuk pengiriman paket oleh J&T *Express*, perusahaan kurir di Indonesia. Sebagai langkah mendukung target pemerintah dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, kendaraan listrik perlu diterapkan dalam distribusi barang [16]. Pesatnya pertumbuhan *e-Commerce* turut mendorong industri logistik, termasuk J&T *Express*, yang mencatat pertumbuhan 25% pada paruh pertama 2021 dengan rata-rata 2,5 juta paket per hari [17]. Studi kasus dilakukan di Kota dan Kabupaten Semarang, di mana Kota Semarang telah memiliki beberapa *charging station* di area pusat kota.

Electric Vehicle Routing Problem (EVRP) merupakan variasi dari *Vehicle Routing Problem* dimana kendaraan yang digunakan merupakan kendaraan listrik. Optimasi rute EVRP dapat mengurangi jarak tempuh dan waktu perjalanan hingga 31,9%, konsumsi energi sebesar 51,6%, serta total biaya operasional sebesar 16,3%, meskipun memerlukan waktu pengisian baterai tambahan [18]. EVRP merupakan pengembangan dari *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP) yang bertujuan untuk menyelesaikan masalah penentuan rute dari *Alternative Fuel Vehicle* (AFV) yang memiliki jarak tempuh yang terbatas dan *Alternative Fueling Station* (AFS) yang terbatas [19].

Penelitian oleh Schneider (2014) [20], memperkenalkan EVRP dengan *time windows* dan *recharging stations* dengan optimasi rute menggunakan VNS and TS dapat mengurangi jarak tempuh hingga 15%, dengan emisi karbon yang lebih rendah. Namun, keterbatasan infrastruktur pengisian daya dan waktu pengisian baterai menjadi tantangan utama. Pada tahun 2016, Keskin [15], strategi pengisian daya parsial menggunakan *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) mampu mengurangi total jarak tempuh hingga 2.89% dibandingkan dengan pengisian *full charging*.

Pada tahun 2019, Macrina [21] mengusulkan model GVRPTW bahwa optimasi menggunakan *Large Neighborhood Search* dengan armada campuran mampu mengurangi biaya transportasi sebesar 4.8% dengan peningkatan efisiensi distribusi pada rute tertentu. Penelitian Zhou (2021) [22] menggunakan strategi *partial recharge* menyatakan bahwa dengan mengimplementasikan *partial recharge* solusi yang dihasilkan lebih efisien dalam

segi biaya, waktu, dan lingkungan dalam optimasi menggunakan *Greedy Algorithm* yang diintegrasikan dengan *Variable Neighborhood Search* (VNS) dengan *Partial Recharge* dan *Vehicle Recycling* mampu mengurangi biaya pengisian ulang hingga 57,9% dibandingkan dengan pengisian ulang secara *full charging*.

Perbedaan EVRP dengan VRP tradisional adalah pada EVRP kendaraan listrik memiliki jarak tempuh yang lebih pendek, sehingga kendaraan listrik perlu untuk mengunjungi *charging station* saat berada pada rute. Maka dari itu jumlah *charging station* merupakan salah satu faktor yang penting dalam penggunaan kendaraan listrik [22]. Kebutuhan untuk mengunjungi *charging station* bergantung tergantung pada konsumsi energi di sepanjang rute. Waktu pengisian di *charging station* tergantung pada sisa kapasitas baterai dan spesifikasi dari *charging station*.

Di Indonesia, studi tentang optimasi rute kendaraan telah mengalami kemajuan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Ahadi dkk. (2022) [23] menggunakan metode *Dijkstra* untuk mengurangi biaya transportasi untuk barang konsumsi yang bergerak cepat (*Fast Moving Consumer Goods/ FMCG*). Penelitian ini menemukan bahwa dengan model optimasi dapat secara signifikan mengurangi biaya jika dibandingkan dengan pendekatan konvensional. Demikian pula, Az-Zahra dkk. (2023) [24] menggunakan metode *Complete Enumeration* untuk mengoptimalkan rute distribusi tabung oksigen dengan menekankan optimasi rute berdasarkan jarak dan biaya bahan bakar, sehingga menghasilkan penghematan biaya yang signifikan dibandingkan dengan rute yang ada.

Meskipun ada kemajuan ini, penelitian EVRP di Indonesia masih sangat terbatas dibandingkan dengan negara lain. Sebagian besar penelitian di Indonesia cenderung berfokus pada aplikasi spesifik, seperti manajemen bencana atau pengiriman logistik umum, tanpa mengeksplorasi aspek strategis yang mendalam seperti pengisian ulang baterai atau pengoptimalan berbasis industri tertentu. Andani dkk. (2023) [25], model *Mixed Integer Programming* (MIP) meminimalkan total jarak perjalanan, secara langsung mengurangi biaya transportasi dan penurunan harga barang dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan yang berbeda dan stasiun pengisian ulang.

Liperda dkk. (2024) [26], evakuasi korban erupsi Gunung Semeru di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur dengan optimasi rute evakuasi menggunakan kendaraan listrik berbasis *Geographic Information System* (GIS) lebih efisien dibandingkan kendaraan konvensional hingga 23% terutama dalam kondisi lalu lintas berhenti-jalan, berkat fitur pengereman regeneratif yang memperpanjang daya jangkau. Namun, penelitian ini tidak

meneliti strategi pengisian daya baterai.

Salsabilla dkk. (2024) [27], mengoptimalkan rute pengiriman multi-perjalanan menggunakan metode eksak *branch-and-bound* yang menghasilkan efisiensi 0,72 kWh/km. Namun, tidak mengeksplorasi pendekatan heuristik dalam skenario dunia nyata.

Meskipun penelitian sebelumnya memberikan kontribusi yang signifikan, penelitian lebih lanjut dapat mengatasi beberapa keterbatasan. Strategi pengisian ulang baterai belum banyak dieksplorasi, seperti membandingkan pengisian penuh dan sebagian. Selain itu, pendekatan berbasis algoritma heuristik yang lebih ringan secara komputasi untuk EVRP belum banyak digunakan. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada aplikasi generik atau konteks manajemen bencana, dengan sedikit perhatian pada studi kasus di sektor logistik komersial.

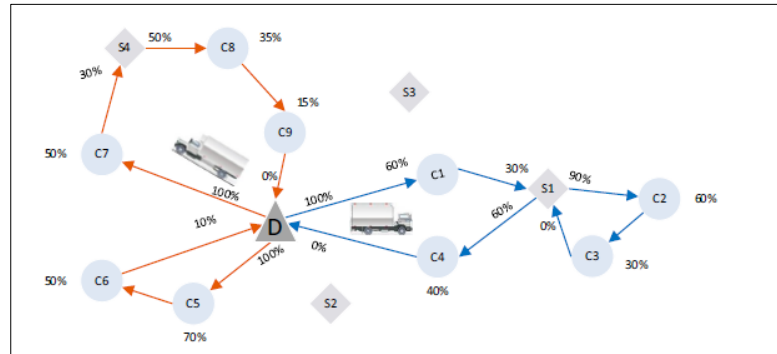
Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan strategi inovatif dalam pengisian ulang baterai untuk EVRP dengan Time Windows (EVRPTW) melalui studi kasus di layanan ekspedisi J&T *Express* di Semarang, dengan membandingkan strategi Pengisian Ulang Penuh (EVRPTW-FR) dan Pengisian Ulang Sebagian (EVRPTW-PR).

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan model perutean kendaraan listrik yang mempertimbangkan batasan waktu, kapasitas kendaraan, dan kebutuhan pengisian ulang baterai. Model ini mengoptimalkan penggunaan kendaraan listrik dalam skenario dunia nyata pada perusahaan logistik dengan algoritma *nearest neighbor*, yang menghadirkan solusi aplikatif bagi perusahaan yang berencana beralih ke kendaraan listrik, sekaligus mendukung inisiatif logistik hijau yang berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

2.1 Desain Penelitian

Desain penelitian menggunakan model EVRPTW diuji pada J&T *Express* Semarang menggunakan data operasional untuk mengoptimalkan pengiriman dengan kendaraan listrik. Berbeda dengan EVRPTW, pada EVRPTW-PR baterai tidak harus diisi penuh sebelum kendaraan melanjutkan perjalanan. Ilustrasi masalah EVRPTW-PR ditampilkan pada Gambar 1 [15].



Gambar 1. Ilustrasi EVRPTW-PR

Pada gambar 1, terdapat 9 pelanggan (C1-C9), 4 *charging station* (S1-S4), dan 1 depot (D). Kendaraan 1 mengunjungi S1 setelah melayani C1, mengisi ulang baterai hingga 90%, lalu melayani C2, C3, dan C4 sebelum kembali ke depot. Kendaraan 2 melayani C5–C9 dan kembali ke depot. Model EVRP-TW mengasumsikan kecepatan kendaraan 0,5 km/menit dan pengisian ulang baterai linier, meskipun kenyataannya lebih lama. Kendaraan Maxus EV80 memiliki kapasitas baterai 56 kWh, jarak tempuh 193 km, dan konsumsi energi 0,29 kWh/km. Pengisian penuh membutuhkan 8 jam dengan 7 kW/jam [28]. Biaya pengisian daya listrik rata-rata Rp 2.058/kWh, menghasilkan biaya transportasi per kilometer Rp 597,11 dengan asumsi *charging station* kosong dengan berat paket yang dipertimbangkan.

2.2 Instrumen Penelitian

EVRPTW-FR dapat dimodelkan sebagai permasalahan MILP pada sebuah *directed graph* G , di mana pelanggan dimodelkan sebagai sebuah *node*, dan jalur antara pelanggan dimodelkan sebagai *arc* [15]; [19]; [20]. $V = \{1, \dots, N\}$ adalah *set* dari *node* pelanggan yang perlu untuk dilayani dan F adalah *set* dari *node charging station*. Untuk memungkinkan kendaraan listrik mengunjungi *charging station* berulang kali, dibuatlah *set node* F' yaitu *set node* virtual dari *charging station*. *Node* 0 dan $N+1$ merupakan depot, setiap rute harus mulai dari 0 dan berakhir pada $N+1$ ($V_{0,N+1} = V \cup \{0\} \cup \{N + 1\}$).

Graph G adalah $(G = V_{0,N+1} \cup F', A)$ dimana A adalah *set* dari *arc* $A = \{((i, j)|i, j \in V_{0,N+1} \cup F', i \neq j)\}$. Variabel *binary* $x_{ij} \in \{0,1\}$ memiliki nilai 1 jika kendaraan melewati *node* j tepat setelah melewati *node* i dan memiliki nilai 0 jika sebaliknya. d_{ij} merupakan jarak antar *node*, t_{ij} merupakan waktu tempuh yang dibutuhkan dari *node* i menuju *node* j , e_{ij} merupakan energi yang dibutuhkan dari *node* i menuju *node* j .

Setiap kendaraan listrik mempunyai kapasitas muatan sebesar C dan kapasitas baterai Q . Waktu pengisian ulang dihitung sebagai fungsi linier dari kapasitas pengisian ulang dengan tingkat pengisian daya g . Konsumsi energi pada *arc* dihitung sebagai nilai

fungsi linier dari jarak *arc*, $e_{ij}=r.d_{ij}$, dimana r adalah tingkat konsumsi energi. Setiap *node* i mempunyai waktu pelayanan (s_i), permintaan (q_i) dan *time window* (e_i, l_i).

Charging station dan depot masing-masing mempunyai *time window* (e_i, l_i). Selain x_{ij} , tiga variabel keputusan lain yang digunakan τ_i yaitu waktu kedatangan pada *node* i , z_i yaitu sisa kapasitas muatan kendaraan pada saat mencapai *node i , dan y_i menunjukkan sisa kapasitas baterai pada *node* i . Pada penelitian oleh Schneider (2014) [20], baterai selalu diisi ulang hingga kapasitas penuh, dan jumlah pengisian ulang adalah $(Q-y_i)$.*

Model matematika E-VRPTW dirumuskan sebagai *mixed-integer linear program* sebagai berikut [20]; [29]:

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in V_0 \cup F', j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j$$

minimization

$$\sum_{i \in V_0 \cup F'} \sum_{j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad \dots(1)$$

subject to

$$\sum_{j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j} x_{ij} = 1, \forall i \in V \quad \dots (2)$$

$$\sum_{j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j} x_{ij} \leq 1, \forall i \in F' \quad \dots (3)$$

$$\sum_{j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j} x_{ji} - \sum_{i \in V_0 \cup F', i \neq j} x_{ij} = 0, \forall j \in V' \quad \dots (4)$$

$$\tau_i + (t_{ij} + s_i) x_{ij} - l_0 \cdot (1 - x_{ij}) \leq \tau_j, \forall i \in V_0, \forall j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j \quad \dots (5)$$

$$\tau_i + g(Q - y_i) + s_i + x_{ij} t_{ij} - (l_0 + gQ)(1 - x_{ij}) \leq \tau_j, \forall i \in F', \forall j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j \quad \dots (6)$$

$$e_j \leq \tau_j \leq l_j, \forall j \in V_{0,N+1} \cup F' \quad \dots (7)$$

$$0 \leq z_j \leq z_i - x_{ij}(q_i + C) + C, \forall i \in V_0 \cup F', \forall j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j \quad \dots (8)$$

$$z_0 = C, y_0 = Q \quad \dots (9)$$

$$0 \leq y_j \leq y_i - (e_{ij} + Q)x_{ij} + Q, \forall j \in V_{N+1} \cup F', \forall i \in V, i \neq j \quad \dots (10)$$

$$0 \leq y_j \leq Q - e_{ij} x_{ij}, \forall j \in V_{N+1} \cup F', \forall i \in V_0 \cup F', i \neq j \quad \dots (11)$$

Fungsi tujuan (1) meminimasi jarak yang ditempuh. Persamaan (2) memastikan ketersambungan rute dan setiap konsumen hanya dilayani 1 kali. Persamaan (3) memperbolehkan kendaraan untuk menuju *charging station* jika diperlukan. Persamaan (4) memastikan jumlah *arc* yang masuk sama dengan *arc* yang keluar. Persamaan (5) memastikan fisibilitas waktu untuk kendaraan yang meninggalkan *node* pelanggan dan depot. Persamaan (6) memastikan fisibilitas waktu untuk kendaraan yang melakukan pengisian daya lalu menuju ke depot atau *node* pelanggan.

Persamaan (7) memastikan bahwa semua *node* dikunjungi dalam rentang *time windows* nya. Persamaan (8) memastikan agar muatan kendaraan non negatif. Persamaan (9) menandakan muatan kendaraan saat di depot sama dengan total kapasitas dan sisa baterai

kendaraan pada saat di depot sama dengan kapasitas baterai maksimum. Persamaan (10) dan (11) memastikan agar baterai yang tersisa pada baterai kendaraan non negatif.

EVRPTW-PR dapat dimodelkan sebagai perpanjangan dari MILP untuk EVRPTW-FR [15]. Beberapa perbedaan dari model EVRPTW-FR yang pertama yaitu variabel keputusan baru Υ_i ditambahkan. Dimana Υ_i mewakili kapasitas baterai yang tersisa saat keberangkatan dari *charging station* i . Kapasitas baterai yang tersisa setelah diisi ulang Υ_i berada di antara sisa kapasitas baterai saat pengisian pada *charging station* y_i sebelumnya dan kapasitas baterai maksimum Q , diberikan oleh persamaan (12). Persamaan yang diubah adalah persamaan untuk memastikan waktu kendaraan yang keluar dari *charging station* (13) dan kapasitas baterai yang tersisa dipastikan tidak pernah negatif (14). Satu-satunya perubahan adalah bahwa alih-alih mengisi daya hingga kapasitas penuh Q , kendaraan dibebankan hingga variabel keputusan, Υ_i .

$$y_i \leq \Upsilon_i \leq Q, \forall i \in 0 \cup F', \dots (12)$$

$$\tau_i + g(\Upsilon_i - y_i) + x_{ij}t_{ij} - (l_0 + gQ)(1 - x_{ij}) \leq \tau_j, \dots (13)$$

$$\forall i \in 0 \cup F', \forall j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j$$

$$0 \leq y_j \leq \Upsilon_i - (e_{ij} + Q) x_{ij} + Q, \dots (14)$$

$$\forall i \in 0 \cup F', \forall j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j$$

2.3 Data Penelitian

Lokasi setiap pelanggan merupakan lokasi cabang kantor J&T pada beberapa kecamatan di Kota Semarang dan Kabupaten Semarang. Tabel 1 menunjukkan indeks dan lokasi dari setiap *node*.

Tabel 1. Lokasi & Indeks *Node*

Indeks	Depot	Indeks	Konsumen
1	JNT Gateway	14	Semarang Timur
Indeks	Konsumen	Indeks	Konsumen
2	Banyumanik	15	Semarang Utara
3	Ungaran Timur	16	Tembalang
4	Susukan	17	Ambarawa
5	Gayamsari	18	Bringin
6	Genuk	19	Ungaran Barat
7	Gunungpati	Indeks	Charging Station
8	Mijen	20	Hotel Tentrem
9	Ngaliyan	21	SPKLU Pemuda
10	Pedurungan	22	Hotel Awan Sewu
11	Bandungan	23	Hotel Santika
12	Semarang Selatan	24	Hotel Novotel
13	Tuntang		

Tabel 2 berisi data permintaan, *time windows*, dan waktu pelayanan setiap *node*.

Tabel 2. Data Perhitungan Setiap *Node*

Node	Permintaan (Kg)	<i>ei</i>	<i>li</i>	<i>si</i>	Node	Permintaan (Kg)	<i>ei</i>	<i>li</i>	<i>si</i>
1	0	0	1440	0	13	67,72	450	1140	15
2	142,65	450	1200	15	14	70,85	450	1140	11
3	76,25	450	1140	14	15	122,82	450	1080	10
4	50,17	450	1200	12	16	186,38	450	1200	12
5	72,85	450	1140	14	17	63	450	1140	12
6	121,39	450	1080	11	18	47,42	450	1140	15
7	97,53	450	1200	10	19	80,38	450	1140	10
8	78,34	450	1200	15	20	0	0	1440	0
9	140,96	450	1140	11	21	0	0	1440	0
10	196,73	450	1080	12	22	0	0	1440	0
11	58,71	450	1200	12	23	0	0	1440	0
12	67,51	450	1080	12	24	0	0	1440	0

Tabel 3. Adalah matriks jarak antar node. Kecepatan kendaraan yang digunakan pada perhitungan ini adalah 30 km/ jam atau 0.5 km/ menit. Kecepatan ini mengacu pada anjuran Menteri Perhubungan Indonesia mengenai kecepatan kendaraan di area perkotaan [30].

Tabel 3. Jarak antar Node

Km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0,00	25,57	32,11	35,00	13,90	22,52	13,76	20,99	4,87	16,68	55,88	11,68	65,89	12,65	8,20	24,19	66,16	50,00	32,53	8,896	8,34	8,76	8,62	7,65
2	25,58	0,00	6,39	58,94	23,49	33,92	16,12	24,33	25,85	26,69	26,13	17,93	28,22	23,77	24,05	13,62	32,80	40,59	4,03	22,52	24,19	24,60	22,24	23,35
3	32,11	6,39	0,00	52,68	28,63	42,81	17,51	24,60	37,81	31,83	22,66	23,07	31,83	36,14	29,19	20,16	29,19	36,97	2,92	33,36	36,84	37,25	34,47	36,14
4	35,00	58,94	52,68	0,00	69,08	89,52	69,50	76,73	84,79	82,29	48,65	77,56	25,72	86,74	83,68	67,14	41,70	28,63	55,04	80,34	81,59	84,23	83,82	82,98
5	13,90	23,49	28,63	69,08	0,00	12,65	18,35	32,39	16,12	3,89	48,79	4,87	58,80	4,73	9,31	15,57	58,10	63,11	27,11	5,70	8,34	8,62	5,98	7,51
6	22,52	33,92	42,81	89,52	12,65	0,00	29,75	43,51	27,24	6,39	65,75	15,57	68,94	12,23	18,63	20,02	68,81	72,98	37,11	16,54	18,35	19,46	16,96	18,35
7	13,76	16,12	17,51	69,50	18,35	29,75	0,00	20,29	15,57	22,24	37,39	14,18	44,34	18,49	14,04	17,93	48,65	50,46	16,12	13,90	14,18	14,60	13,62	13,48
8	20,99	24,33	24,60	76,73	32,39	43,51	20,29	0,00	14,32	32,80	38,92	27,80	51,57	29,05	24,33	33,50	48,79	58,10	23,21	24,74	24,46	24,88	24,46	23,63
9	4,87	25,85	37,81	84,79	16,12	27,24	15,57	14,32	0,00	20,29	51,71	15,29	63,94	16,54	11,82	24,60	63,80	70,47	32,94	12,51	11,95	12,37	12,23	11,26
10	16,68	26,69	31,83	82,29	3,89	6,39	22,24	32,80	20,29	0,00	56,71	8,20	61,44	5,98	11,68	16,12	61,30	67,97	30,30	8,06	10,70	10,98	8,34	9,87
11	55,88	26,13	22,66	48,65	48,79	65,75	37,39	38,92	51,71	56,71	0,00	43,79	22,94	49,62	49,90	39,48	10,01	29,33	24,05	57,82	50,04	50,46	58,24	49,21
12	11,68	17,93	23,07	77,56	4,87	15,57	14,18	27,80	15,29	8,20	43,79	0,00	54,49	6,12	7,78	13,21	56,57	63,25	21,55	5,28	8,06	8,34	5,70	7,09
13	65,89	28,22	31,83	25,72	58,80	68,94	44,34	51,57	63,94	61,44	22,94	54,49	0,00	65,75	62,83	46,43	16,68	15,85	29,89	59,49	62,97	63,38	60,33	60,05
14	12,65	23,77	36,14	86,74	4,73	12,23	18,49	29,05	16,54	5,98	49,62	6,12	65,75	0,00	6,53	18,21	65,61	72,42	33,36	4,73	5,98	6,95	5,14	5,70
15	8,20	24,05	29,19	83,68	9,31	18,63	14,04	24,33	11,82	11,68	49,90	7,78	62,83	6,53	0,00	20,43	54,21	69,36	27,52	3,89	1,67	3,34	4,03	2,22
16	24,19	13,62	20,16	67,14	15,57	20,02	17,93	33,50	24,60	16,12	39,48	13,21	46,43	18,21	20,43	0,00	46,29	52,82	17,24	17,79	19,04	19,46	17,24	18,35
17	66,16	32,80	29,19	41,70	58,10	68,81	48,65	48,79	63,80	61,30	10,01	56,57	16,68	65,61	54,21	46,29	0,00	23,07	28,36	59,35	62,83	63,25	52,40	62,13
18	50,00	40,59	36,97	28,63	63,11	72,98	50,46	58,10	70,47	67,97	29,33	63,25	15,85	72,42	69,36	52,82	23,07	0,00	36,42	50,00	69,22	69,78	67,00	68,67
19	32,53	4,03	2,92	55,04	27,11	37,11	16,12	23,21	32,94	30,30	24,05	21,55	29,89	33,36	27,52	17,24	28,36	36,42	0,00	24,60	27,80	28,08	25,44	26,97
20	8,90	22,52	33,36	80,34	5,70	16,54	13,90	24,74	12,51	8,06	57,82	5,28	59,49	4,73	3,89	17,79	59,35	50,00	24,60	0,00	4,31	4,59	0,83	3,34
21	8,34	24,19	36,84	81,59	8,34	18,35	14,18	24,46	11,95	10,70	50,04	8,06	62,97	5,98	1,67	19,04	62,83	69,22	27,80	4,31	0,00	1,67	2,36	0,49
22	8,76	24,60	37,25	84,23	8,62	19,46	14,60	24,88	12,37	10,98	50,46	8,34	63,38	6,95	3,34	19,46	63,25	69,78	28,08	4,59	1,67	0,00	2,64	1,11
23	8,62	22,24	34,47	83,82	5,98	16,96	13,62	24,46	12,23	8,34	58,24	5,70	60,33	5,14	4,03	17,24	52,40	67,00	25,44	0,83	2,36	2,64	0,00	5,00
24	7,65	23,35	36,14	82,98	7,51	18,35	13,48	23,63	11,26	9,87	49,21	7,09	60,05	5,70	2,22	18,35	62,13	68,67	26,97	3,34	0,49	1,11	5,00	0,00

2.4 Metode Pengolahan Data

Metode penyelesaian yang digunakan adalah adaptasi dari metode heuristik *nearest neighbor* yang diusulkan oleh Solomon untuk menyelesaikan permasalahan VRP dengan *time windows*. Dengan adanya *time windows*, total biaya perutean tidak hanya mencakup total jarak perjalanan, tetapi juga biaya waktu tunggu yang terjadi ketika kendaraan tiba terlalu cepat di lokasi pelanggan [31]. Formulasi total biaya yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$Total\ Biaya\ (i,j) = biaya\ transportasi\ x\ jarak\ (i,j) + biaya\ tunggu\ x\ waktu\ tunggu\ (j)$$

$$Waktu\ tunggu\ (j) = \max\{start\ time\ windows\ (j) - start\ service\ (i) - service\ time\ (i) - waktu\ tempuh\ (i,j); 0\}$$

Rute dibuat untuk meminimalkan biaya dengan melayani semua pelanggan sesuai batas kapasitas baterai, *time windows*, dan depot. Pada EVRPTW-PR, kendaraan kembali dengan baterai habis setelah pengisian ulang minimal. Penyisipan pelanggan mempertimbangkan lokasi terbaik untuk charging station berdasarkan jarak dan kebutuhan daya. Strategi pengisian ulang menentukan jumlah energi yang diisi, dengan memperhitungkan sisa baterai y_i saat tiba di charging station. Jumlah energi yang diisi dihitung sebagai $E_{cs} - y_i$, di mana E_{cs} adalah tingkat daya baterai yang diinginkan saat meninggalkan charging station. Pada strategi EVRPTW-FR, E_{cs} ditetapkan 100%. Sementara itu, pada EVRPTW-PR, E_{cs} tergantung pada kebutuhan energi untuk mencapai charging station berikutnya atau kembali ke depot.

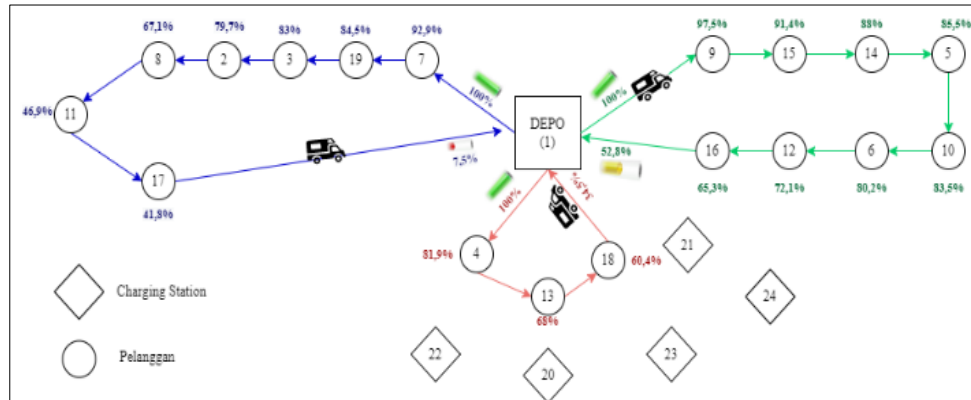
3. Hasil & Pembahasan

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan algoritma heuristik *nearest neighbor*, tabel 4 menunjukkan hasil dari dua model dengan mempertimbangkan minimalisasi biaya dalam rute. Pada hasil Tabel 4 (a) digunakan untuk model yang memungkinkan pengisian penuh baterai di *charging station* (EVRPTW-FR), (b) untuk model yang memungkinkan pengisian parsial baterai di *charging station* (EVRPTW-PR).

Tabel 4. Perbandingan Hasil Akhir

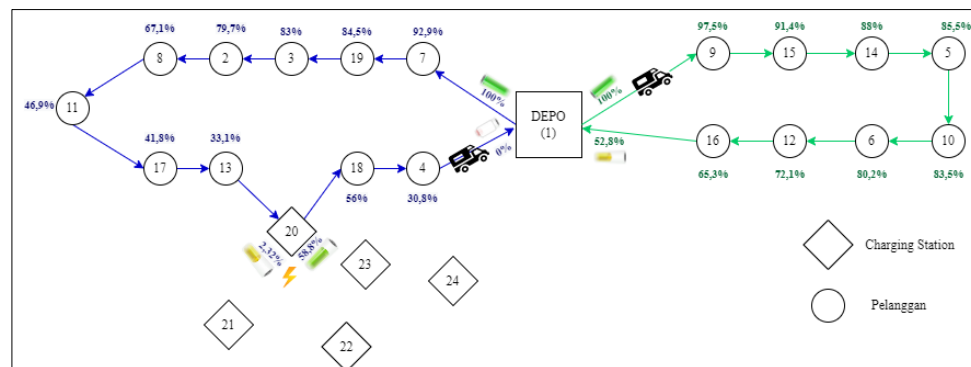
Strategi	(a) Full Recharge	(b) Partial Recharge
Jumlah Kendaraan	3	2
Rute	Kendaraan 1: 1-9-15-14-5-10-6-12-16-1	Kendaraan 1 : 1-9-15-14-5-10-6-12-16-1
	Kendaraan 2: 1-7-19-3-2-8-11-17-1	Kendaraan 2: 1-7-19-3-2-8-11-17-13-20-18-4-1
	Kendaraan 3: 1-4-13-18-1	
Total Biaya (Rp)	270.427	234.884
Kunjungan Pada Charging Station	Rute 1 =0	Rute 1 = 0
	Rute 2= 0	Rute 2= 1
	Rute 3= 0	
Routing Time	Rute 1 = 237,69	Rute 1 =237,69
	Rute 3 = 357,23	Rute 2 =604,514
	Rute 3 = 253,122	
	Total = 848,042	Total = 842,204
Sisa Baterai Pada Akhir Rute	Rute 1 = 52,3%	Rute 1 = 52,3%
	Rute 2= 7,5%	Rute 2= 0%
	Rute 3= 34,5%	

Strategi *full recharge* melibatkan 3 kendaraan listrik dengan 3 rute karena batasan *time windows* menyebabkan kendaraan 2 dan 1 kembali ke depot tanpa melayani sisa pelanggan. Total biaya mencapai Rp 270.427, dengan rute ditampilkan pada gambar 2.



Gambar 3. Rute Strategi *Full Recharge*

Strategi *partial charging* melayani semua pelanggan dengan 2 kendaraan listrik, menghasilkan biaya Rp 234.884, hemat 13,14% dari strategi *full recharge*. Kendaraan 2 mengisi baterai sebagian di node 20, menghemat waktu, dan kembali ke depot dengan baterai 0%. Rute ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rute Strategi *Partial Recharge*

Strategi EVRPTW-PR mengurangi biaya dengan mengisi ulang hingga 58,8%, menghasilkan sisa energi 2,32% dan efisiensi lebih tinggi dibandingkan pengisian penuh [15]; [20]. Studi sebelumnya juga membuktikan bahwa pengisian daya sesuai kebutuhan pada stasiun terdekat dapat mengurangi biaya operasional, meningkatkan efisiensi rute, dan meminimalkan jumlah kendaraan yang diperlukan untuk melayani pelanggan, seperti yang terlihat pada hasil penghematan 13,14% dalam penelitian ini.

4. Kesimpulan

EVRP merupakan masalah perutean unik dengan batasan jarak tempuh kendaraan listrik dan kebutuhan pengisian daya di charging station. Penelitian ini membandingkan dua strategi pengisian ulang, yaitu *full recharge* dan *partial recharge*, dengan hasil menunjukkan

bahwa strategi *partial recharge* lebih efisien. Studi ini menyatakan dalam strategi *partial recharge* dapat meminimasi jumlah kendaraan yang digunakan untuk melayani semua pelanggan. Total biaya yang dikeluarkan dengan mengimplementasikan strategi *partial recharge* juga lebih rendah jika dibandingkan dengan strategi *full recharge*, dengan penghematan sebesar 13,14%. Jumlah kendaraan untuk bisa melayani semua node pada strategi *partial recharge* pun lebih sedikit jika dibandingkan dengan strategi *full recharge*. Hal ini dapat mempengaruhi biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan J&T *Express* dalam pembelian *electric van* apabila kendaraan yang dibutuhkan lebih banyak.

Masalah yang disajikan dalam makalah ini juga dapat diperluas dengan mempertimbangkan situasi multi-depot dan teknologi pengisian daya yang berbeda. Selain itu, dengan mempertimbangkan peningkatan penggunaan kendaraan listrik saat ini, perbandingan atau kombinasi VRP yang menangani kendaraan berbahan bakar fosil dan kendaraan listrik akan menjadi penelitian yang lebih realistis dan akan lebih efektif dalam penerapan di Indonesia. Kemudian penelitian selanjutnya dapat memperhitungkan faktor realistis lain yang mempengaruhi tingkat konsumsi energi baterai kendaraan listrik seperti suhu, kelembaban, muatan dan perilaku pengguna.

Daftar Pustaka

- [1] K. Rashidi and K. Cullinane, "Evaluating The Sustainability of National Logistics Performance using Data Envelopment Analysis," *Transport Policy*, vol. 74, pp. 35-46, 2019.
- [2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi," Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta Pusat, 2019.
- [3] United Nations, "Paris Agreement," United Nations, Paris, 2015.
- [4] A. Aziz and M. Z. Abidin, "Reducing Emissions and Logistics Cost in Indonesia: An Overview," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, Surakarta, 2021.
- [5] A. Keyvanfar, A. Shafaghat, N. Z. Muhammad and M. S. Ferwati, "Driving Behaviour and Sustainable Mobility-Policies and Approaches Revisited," *Sustainability*, vol. 10, no. 1152, 2018.
- [6] B. K. Sovacool and R. F. Hirsh, "Beyond Batteries: An Examination of The Benefits and Barriers to Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) and A Vehicle-to-Grid (V2G) Transition," *Energy Policy*, vol. 37, pp. 1095-1103, 2009.

- [7] PT PLN, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Tahun 2021-2030," PT PLN, Jakarta, 2021.
- [8] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Presiden Tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai untuk Transportasi Jalan," Pemerintah Republik Indonesia, Jakarta, 2019.
- [9] Kementerian Perindustrian, "Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 27 tentang Spesifikasi, Peta Jalan Pengembangan, dan Ketentuan Penghitungan Tingkat Komponen Dalam Negeri Kendaraan Bermotor Dalam Negeri Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai," Kementerian Perindustrian, Jakarta, 2020.
- [10] M. F. N. Maghfiroh, A. H. Pandyaswargo and H. Onoda, "Current Readiness Status of Electric Vehicles in Indonesia: Multistakeholder Perceptions," *Sustainability*, vol. 13, no. 13177, 2021.
- [11] DHL, "DHL *Express* Introduces Electric Vehicles in Indonesia for Sustainable Logistics," DHL, 11 Mei 2022. [Online]. Available: <https://www.dhl.com/id-en/home/press/press-archive/2022/dhl-Express-introduces-electric-vehicles-in-indonesia-for-sustainable-logistics.html>. [Accessed 6 Juni 2022].
- [12] F. P. Tredeau and Z. M. Salameh, "Evaluation of Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles Application," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Michigan, 2009.
- [13] C. Botsford and A. Szczepanek, "Fast Charging vs. Slow Charging: Pros and Cons for The New Age of Electric Vehicles," in *The International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Stavanger, 2009.
- [14] L. Mao, A. Fotouhi, N. Shateri and N. Ewin, "A Multi-mode Electric Vehicle Range Estimator Based on Driving Pattern Recognition," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 236, no. 6, pp. 2677-2697, 2021.
- [15] M. Keskin and B. Catay, "Partial Recharge Strategies for The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 65, pp. 111-127, 2016.
- [16] Z. Xiao, Q. Yuan, Y. Sun and X. Sun, "New Paradigm of Logistics Space Reorganization: E-Commerce, Land Use, and Supply Chain Management," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 9, 2021.
- [17] Mulyana, Ridwan Nanda, "Taipan Besar Merambah Bisnis Kurir dan Logistik, dari Praogo sampai TP Rahmat," *Business Insight*, 25 Agustus 2021. [Online]. Available: <https://insight.kontan.co.id/news/taipan-besar-merambah-bisnis-kurir-dan-logistik-dari-prajogo-sampai-tp-rahmat>. [Accessed 24 Juni 2022].
- [18] J. Lin, W. Zhou and O. Wolfson, "Electric Vehicle Routing Problem," *Transportation Research Procedia*, vol. 12, pp. 508-521, 2016.

- [19] S. Erdogan and M. E. Hooks, "A Green Vehicle Routing Problem," *Transportation Research Part E*, vol. 48, pp. 100-114, 2012.
- [20] M. Schneider, A. Stenger and D. Goetze, "The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations," *Transportation Science*, pp. 1-21, 2014.
- [21] G. Macrina, G. Laporte, F. Guerriero and L. D. P. Pugliese, "An Energy-Efficient Green-Vehicle Routing Problem with Mixed Vehicle Fleet, Partial Battery Recharging and Time Windows," *European Journal of Operational Research*, vol. 276, pp. 971-982, 2019.
- [22] Y. Zhou, J. Huang, J. Shi, R. Wang and K. Huang, "The Electric Vehicle Routing Problem with Partial Recharge and Vehicle Recycling," *Complex & Intelligent Systems*, 2021.
- [23] I. Ahadi, M. N. Habibah, P. P. D. Deria and M. Fauzi, "Penerapan Algoritma Dijkstra untuk Mencari Rute Terpendek pada Pengiriman Produk Wafer di PT. XYZ," *JURMATIS: Jurnal Manajemen Teknologi dan Teknik Industri Universitas Kadiri*, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, 2022.
- [24] L. V. Az-Zahra, C. K. Dewy, M. A. Fikri and M. Fauzi, "Desain Rute dan Optimasi Biaya Transportasi Pengisian Tabung Oksigen menggunakan Metode Complete Enumeration pada CV. Tasman Gases," *JURMATIS: Jurnal Manajemen Teknologi dan Teknik Industri*, vol. 5, no. 1, pp. 12-21, 2023.
- [25] S. R. Andani, M. Zarlis, H. Mawengkang and Sutarman, "Optimization of Heterogeneous VRP Model by Considering Recharging Station using Mixed Integer Programming," *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control*, vol. 21, no. 6, pp. 1267-1276, 2023.
- [26] R. I. Liperda, R. P. Putra, G. B. Pairunan, M. F. N. Maghfiroh and A. A. N. P. Redi, "Comparative Analysis of Electric and Conventional Vehicles Performance in the Evacuation Process of Mount Semeru Eruption Victims Based on Geographic Information Systems," *Sustainability*, vol. 16, no. 20, 2024.
- [27] K. Salsabilla, T. Bakhtiar and F. Hanum, "Optimalitas Rute pada Pengiriman Multiperjalanan dengan Armada Kendaraan Listrik Heterogen," *JAMBURA: Journal of Mathematics*, vol. 6, no. 1, pp. 85-91, 2024.
- [28] Go Green Autos, "Maxus EV80 LWB Medium Roof," Go Green Autos, 23 April 2022. [Online]. Available: <https://www.gogreenautos.co.uk/for-sale/maxus/ev80/bv69kco>. [Accessed 24 06 2022].
- [29] T. Erdelic and T. Caric, "Goods Delivery with Electric Vehicles: Electric Vehicle Routing Optimization with Time Windows and Partial or Full Recharge," *Energies*, vol. 15, no. 285, 2022.

- [30] R. Subekti, "Menhub Dorong Kecepatan Kendaraan di Perkotaan 30 Km Per Jam," *Republika*, 04 Juni 2021. [Online]. Available: <https://www.republika.co.id/berita/qu6901457/menhub-dorong-kecepatan-kendaraan-di-perkotaan-30-km-per-jam>. [Accessed 25 Juni 2022].
- [31] M. M. Solomon, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints," *Operation Research*, vol. 35, no. 2, pp. 254-265, 1987.