

Analisis Usulan Lokasi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) di Kota Bogor Menggunakan *Mixed Integer Linear Programming*

Analysis of Proposed Locations for Public Electric Vehicle Charging Stations (PEVCS) in Bogor City Using Mixed Integer Linear Programming

Fitri Nurul Firdaus^{1,2}, I Ketut Gunarta¹

¹Dep. Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Noverber Surabaya
 Jl. ITS Raya, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur

²PT PLN (Persero) ULP Bogor Barat, Jl Kemang km 18, Bogor 161131
 fitrinurulfirdaus@gmail.com, ²ik.gunarta@gmail.com

Abstract

The Indonesian government is targeting net zero emissions by 2060, partly through accelerating the Battery Electric Vehicle (BEV) program in the transportation sector. Its implementation still faces challenges, particularly in the availability and distribution of EV charging infrastructure. To address these issues, optimal locations for EV charging stations need to be designed to meet the demand of electric vehicle users. This study focuses on determining the number of connectors and charging types at each candidate EV charging station location, focusing on subdistrict offices throughout the city of Bogor, using mixed integer linear programming. The model output recommends the installation of new EV charging stations in subdistricts such as West Bogor, Tanah Sareal, and South Bogor, where demand is high but coverage is still limited. The total optimal cost for EV charging station location allocation is IDR 15,769,626,838, which includes the type of charging to be installed and the allocation of EV charging station services to existing demand. The resulting model is capable of determining a cost-efficient combination of EV charging station construction locations. However, decisions on EV charging station development need to consider not only cost efficiency but also technical aspects and location characteristics.

Keywords: *Electric Vehicles, Mixed Integer Linear Programming, Optimization, Public Electric Vehicles Charging Stations*

Abstrak

Pemerintah Indonesia menargetkan pencapaian *net zero emission* pada tahun 2060, salah satunya melalui percepatan program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) pada sektor transportasi. Implementasinya masih terdapat tantangan khususnya ketersediaan dan pemerataan infrastruktur SPKLU. Dari permasalahan tersebut, dibutuhkan perancangan lokasi optimal untuk penyebaran SPKLU agar memenuhi permintaan pengguna kendaraan listrik. Penelitian ini memfokuskan pada penentuan jumlah konektor dan jenis pengisian pada setiap kandidat lokasi SPKLU yang berfokus di kantor kecamatan se-Kota Bogor menggunakan *mixed integer linear programming*. Output model merekomendasikan pemasangan SPKLU baru di kecamatan seperti Bogor Barat, Tanah Sareal, dan Bogor Selatan, di mana permintaan tinggi namun cakupan masih terbatas. Total biaya optimal untuk lokasi alokasi SPKLU sebesar Rp 15.769.626.838, kondisi ini mencakup jenis *charging* yang akan dipasang dan alokasi pelayanan SPKLU terhadap permintaan yang ada. Model yang dihasilkan mampu menentukan kombinasi lokasi pembangunan SPKLU yang efisien secara biaya. Namun dalam keputusan pengembangan SPKLU perlu mempertimbangkan tidak hanya efisiensi biaya, tetapi juga aspek teknis dan karakteristik lokasi.

Kata kunci: Kendaraan Listrik, SPKLU, Optimasi, *Mixed Integer Linear Programming*

Pendahuluan

Salah satu upaya yang diterapkan oleh pemerintah Indonesia untuk mewujudkan pencapaian *net zero emission* (NZE) di tahun 2060 adalah mempercepat transisi ke kendaraan listrik berbasis baterai [1], [2]. Pemerintah Indonesia menargetkan dua juta unit mobil listrik dan memperbanyak pembangunan SPKLU (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum) sebanyak 32.000 hingga tahun 2030 sesuai Siaran Pers No 286.Pers/04/SJI/2024 Kementerian ESDM. Menurut data Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia (Gaikindo), penjualan mobil listrik di Indonesia pada tahun 2024 berhasil terjual sebanyak 43.188 unit atau meraih pangsa pasar sebesar 5%. Sedangkan dari hasil survei indonesia *electric vehicle consumer* (2023), sebagian besar masyarakat masih memiliki pertimbangan menggunakan mobil listrik diantaranya biaya penggantian baterai dalam jangka panjang [3], [4], akses menemukan stasiun pengisian, belum tersedianya infrastruktur pengisian di daerah terpencil, waktu yang dibutuhkan pengisian daya, jarak tempuh maksimum sebelum pengisian ulang, serta harga beli mobil listrik cukup mahal [5], [6], [7].

PT PLN (Persero) merupakan salah satu Badan Usaha Milik Negara yang mendapatkan tugas pertama kali sebagai Badan Usaha SPKLU, sehingga *roadmap* yang mencakup penentuan lokasi, kapasitas pengisian setiap SPKLU serta skema usaha yang akan diterapkan perlu disusun. Jumlah SPKLU hingga Juli 2025 yang terdaftar di aplikasi PLN Mobile mencapai 4.102 unit sedangkan di wilayah kota Bogor terdapat 19 titik lokasi SPKLU PLN. Data jumlah transaksi SPKLU PLN di Kota Bogor periode Januari 2023 sampai dengan Juli 2024 ditunjukkan tabel 1. Dari tabel tersebut terdapat tantangan yang dihadapi, salah satunya adalah penumpukan permintaan di SPKLU 3, 5, 6, dan 9. Femonena tersebut menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara ketersediaan fasilitas pengisian dan permintaan aktual di lapangan. Ketimpangan distribusi lokasi SPKLU dan jenis *charging* dapat menghambat kenyamanan dan mobilitas pengguna kendaraan Listrik [8], [9]. Alternatif solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan perencanaan penambahan jumlah konektor atau pembangunan SPKLU baru dan pemilihan jenis *charging* yang sesuai, dengan mempertimbangkan jarak lokasi SPKLU dan kebutuhan pengguna.

Tabel 1. Data transaksi SPKLU PLN di Kota Bogor Periode Januari 2023 – Juli 2024

Lokasi SPKLU PLN	Jenis <i>conector</i>	Jumlah periode	Jumlah transaksi
SPKLU 1	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW	12	80
SPKLU 2	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW	15	246
SPKLU 3	2 bh DC CCS2 - 60 kW	8	315
SPKLU 4	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW	11	119
SPKLU 5	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW	19	662
SPKLU 6	2 bh DC CCS2 – 120kW	19	798
	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW		
SPKLU 7	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW	15	73
SPKLU 8	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW	17	173
SPKLU 9	1 bh DC CCS2 – 200 kW	19	3.930
	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW		
SPKLU 10	1 bh AC TYPE 2 - 22 kW	-	-
Total			6.396

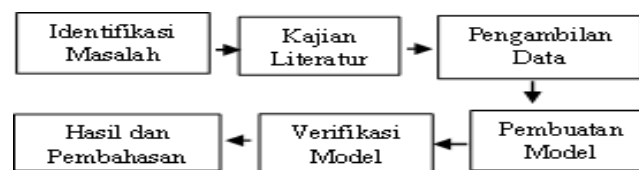
Sumber : Data PLN, 2024

Dari permasalahan yang didapatkan, diperlukan suatu penelitian yang mampu menentukan lokasi optimal SPKLU dan jenis *charging* yang tepat untuk dibangun. Lokasi merupakan salah satu penentu utama dalam pembentukan struktur biaya maupun pendapatan perusahaan, sehingga lokasi yang strategis dapat menjadi keunggulan kompetitif yang signifikan. Beberapa studi sebelumnya menerapkan pendekatan optimasi dalam penentuan lokasi SPKLU ada beberapa metode yang bisa digunakan, *multi-objective programming* [10], *stochastic programming*[11], [12]. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk permasalahan pemilihan Lokasi optimal layanan untuk kebutuhan kendaraan listrik adalah *integer linear programming* [13], [14], [15]. Metode ini dinilai memiliki pendekatan yang bisa menggambarkan kondisi objek dengan baik. Penelitian ini akan berfokus pada lokasi penelitian di Kecamatan Kota Bogor. Hasil yang akan didapatkan adalah kondisi lokasi dan alokasi SPKLU di lokasi dengan menggunakan model *mixed integer linear programming*. Metode tersebut memungkinkan pemecahan masalah dengan fungsi objektif yang kompleks dan batasan linear. Dengan

demikian, penelitian ini diharapkan menghasilkan rekomendasi terbaik optimasi penempatan SPKLU dengan mempertimbangkan adanya lokasi SPKLU eksisting, usulan baru lokasi SPKLU, jenis *charging* yang digunakan, biaya investasi, dan biaya jarak transportasi EV oleh konsumen, khususnya di wilayah Kota Bogor.

Metode Penelitian

Bagian ini menjelaskan metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah alokasi pembangunan SPKLU agar bisa melayani permintaan yang ada. Model optimasi dibuat untuk menghasilkan tipe *charging* yang akan dibangun dan ditempatkan di lokasi yang bisa menjangkau permintaan lebih banyak dengan fungsi tujuan minimasi jarak. Tahapan tersebut dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Metodologi Penelitian

Tahap 1 : Identifikasi Masalah

Menemukan permasalahan kurangnya SPKLU dan mencari lokasi optimal untuk bisa melayani permintaan yang tersebar di beberapa lokasi. Masalah yang akan diselesaikan adalah penentuan jenis *charging* apa yang akan digunakan dan ditempatkan di lokasi yang mana.

Tahap 2 : Kajian Literatur

Mempelajari aturan-aturan terkait seperti Peraturan Presiden no 79 tahun 2023 tentang percepatan program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) untuk transportasi jalan, Peraturan Menteri ESDM Nomor 1 Tahun 2023 mengenai Penyediaan Infrastruktur Pengisian Listrik bagi KBLBB, dan aturan lainnya, serta penelitian-penelitian sebelumnya yang selaras.

Tahap 3 : Pengumpulan Data

- Data estimasi jumlah pemilik kendaraan listrik tiap kecamatan di kota Bogor, diasumsikan sebagai jumlah permintaan pengisian daya kendaraan listrik per hari di Kota Bogor.
- Jarak antara pusat administratif setiap kantor kecamatan di Kota Bogor dengan lokasi SPKLU. Pusat administratif setiap kantor kecamatan diasumsikan dapat mewakili sebaran pemilik kendaraan listrik di wilayah tersebut dan jaringan listrik memadai.
- Data biaya investasi pembangunan SPKLU kategori *medium charging*, *fast charging* dan *ultrafast charging*.

Tahap 4 : Pembuatan Model

Menyusun model optimasi dengan *Mixed Integer linear programming* (MILP) untuk meminimalkan total biaya. Total biaya merupakan biaya yang menggambarkan jarak wilayah untuk menentukan optimal lokasi dan alokasi, sehingga hal ini memiliki dampak pada *coverage demand* yang menjadi tujuan dari model yang sedang dibuat. Model ini menggunakan beberapa parameter yaitu jumlah pemilik kendaraan listrik, biaya investasi SPKLU, jarak dari pusat administrasi setiap kantor kecamatan ke lokasi SPKLU, dan jumlah konektor yang terpasang. Model yang diusulkan sebagai berikut:

1) Indeks

i = kecamatan ke- i di Kota Bogor yang terdapat kendaraan listrik, untuk $i = 1,2,3, \dots$

j = kandidat titik lokasi SPKLU di wilayah Kota Bogor, untuk $j = 1,2,3, \dots$

2) Variabel Keputusan

x_j : jumlah alat *medium charging* di lokasi j

y_j : jumlah alat *fast charging* di lokasi j

z_j : jumlah alat *ultra fast charging* di lokasi j

$P_{[i,j]}$: proporsi jumlah EV dari kecamatan i yang dilayani oleh SPKLU di j .

3) Fungsi Objektif

Fungsi objektif dalam masalah ini adalah meminimalkan biaya total dari biaya investasi pemasangan SPKLU di lokasi j dan biaya jarak tempuh kendaraan listrik ke lokasi SPKLU. Sehingga, fungsi objektif bisa ditulis sebagai:

$$\text{Min } Z = \sum_j (C_x \cdot x_j + C_y \cdot y_j + C_z \cdot z_j) + a \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} \cdot D_i \cdot P_{ij} \quad (1)$$

4) Kendala

- Permintaan teralokasi penuh

Semua kendaraan listrik kecamatan i akan dilayani minimal oleh satu (1) kandidat SPKLU j

$$\sum_j P_{ij} = 1 \quad \forall i, j \quad (2)$$

- Alokasi permintaan hanya ke SPKLU yang dibangun

$$P_{ij} \leq w_j \quad \forall i, j \quad (3)$$

- Kapasitas SPKLU tidak boleh terlampaui

Total kapasitas *charging* kendaraan listrik kecamatan i Kota Bogor di kandidat SPKLU j tidak boleh lebih dari kapasitas yang tersedia di SPKLU j . Batasan ini akan mempertimbangkan berapa jumlah konektor yang sebaiknya terpasang di setiap kandidat SPKLU.

$$\sum_{i \in I} D_i \cdot P_{ij} \leq (S_x \cdot x_j + S_y \cdot y_j + S_z \cdot z_j) \quad \forall j \in J \quad (4)$$

- Batasan variabel

Variabel keputusan untuk kandidat SPKLU j dan alokasi kendaraan listrik kecamatan i yang dapat dilayani kandidat SPKLU j nilainya 1 atau 0 (biner)

$$w_j \in \{0,1\} \quad (5)$$

- Batasan variabel proporsi

Variabel P_{ij} berada dalam rentang 0 hingga 1

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad \forall i \quad (6)$$

Keterangan :

$i \in I$: indeks titik permintaan (kecamatan di Bogor)

D_i : permintaan EV/hari di titik i

d_{ij} : jarak dari titik permintaan i ke lokasi SPKLU j

a : bobot biaya transportasi/km per EV

C_x, C_y, C_z : biaya investasi untuk pembangunan SPKLU tipe *medium, fast, dan ultra-fast charging*

S_x, S_y, S_z : kapasitas masing-masing konektor *charging* (EV/hari)

x_j, y_j, z_j : jumlah *charger* jenis x, y, z di SPKLU j

M : bilangan besar (Big-M), digunakan untuk menghubungkan keputusan buka lokasi dengan jumlah konektor maksimal

P_{ij} : proporsi permintaan dari titik permintaan i yang dilayani oleh SPKLU di lokasi j

w_j : variabel biner, bernilai 1 jika lokasi j dipilih untuk dibangun SPKLU, 0 jika tidak

A : bilangan integer

Tahap 5 : Verifikasi Model

Verifikasi model dilakukan untuk memeriksa kesesuaian hasil keluaran model sistem yang telah dibuat dengan hasil perhitungan serta dipastikan penulisan model matematis yang digunakan dalam sistem sudah benar. Verifikasi model dimulai dengan memastikan bahwa model yang dikembangkan sesuai tujuan utama

penelitian, yaitu mengoptimalkan lokasi dan jumlah konektor SPKLU serta jenis *charging* yang disediakan. Melalui verifikasi ini, diharapkan model yang dikembangkan memberikan solusi yang valid, efisien, dan dapat diterapkan dalam pengembangan SPKLU yang strategis dan optimal.

Tahap 6 : Hasil dan Pembahasan

Tahap ini menyajikan hasil optimasi berupa lokasi terpilih, jumlah konektor, distribusi permintaan yang dilayani, serta analisis implikasi kebijakan bagi pengembangan SPKLU di Kota Bogor.

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 1 Tahun 2023, jenis pengisian KBLBB terdiri dari 4 level yang dijelaskan pada Tabel 2. Sedangkan Jumlah kendaraan listrik per kecamatan di Kota Bogor diperoleh dari data PT PLN (Persero) UP3 Bogor ditunjukkan pada Tabel 3. Data biaya investasi pembangunan SPKLU kategori *medium charging*, *fast charging* dan *ultrafast charging* ditunjukkan pada Tabel 4. Selain itu, didapatkan kondisi bahwa 1 kWh mobil listrik di SPKLU sebesar Rp 2.466,78 (berdasarkan Permen ESDM no 1 tahun 2023). Rata-rata jarak tempuh 1 kWh mobil listrik adalah 6 km (berdasarkan standar *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*). Maka biaya transportasi sebesar α) diperoleh sebesar Rp 411 / km.

Tabel 2. Jenis pengisian KBLBB

Deskripsi	Level 1 (<i>slow charging</i>)	Level 2 (<i>medium charging</i>)	Level 3 (<i>fast charging</i>)	Level 4 (<i>ultra fast charging</i>)
Lokasi	Instalasi khusus (rumah)	Instalasi khusus (kantor)	SPKLU	SPKLU
Arus keluaran maks (A)	16 AC	63 AC	100 AC / 250 DC	300 AC / 500 DC
Daya keluaran	≤ 7 Kw	7 - 22 Kw	22 - 50 kW	≤ 150 kW
Jenis konektor <i>Plug-in</i>	Tipe 1 dan 2 (IEC 62196-2)	Tipe 2 (IEC 62196-2)	Tipe CSS & Chademo (IEC 62196-3)	Tipe CCS2 & Chademo (IEC 62196-4)
Waktu <i>charging</i>	± 8 jam	± 2-4 jam	30-60 menit	15-30 menit
Kapasitas <i>charging</i>	3 EV/hari	6-12 EV/hari	24-48 EV/hari	48-96 EV/hari

Tabel 3. Jumlah kendaraan listrik di Kota Bogor

Kode	Kecamatan	Tahun			Jumlah	
		2022	2023	2024		2025
i1	Bogor Barat		17	72	55	144
i2	Bogor Selatan	2	7	43	57	109
i3	Bogor Tengah	1	1	19	18	39
i4	Bogor Timur		8	49	46	103
i5	Bogor Utara	1	11	55	67	134
i6	Tanah Sareal	2	10	68	78	158
	Jumlah	6	54	306	321	687

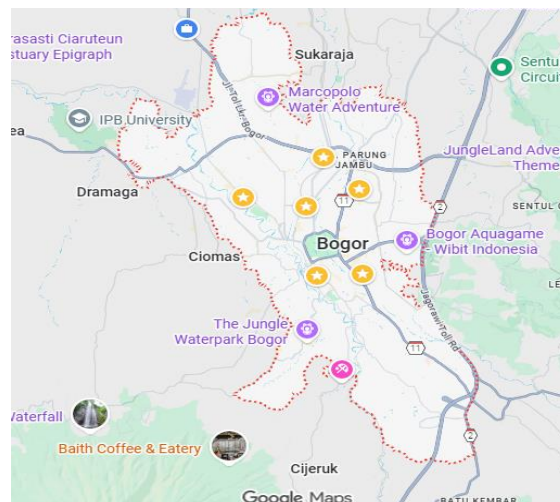
Tabel 4. Biaya investasi dan kapasitas SPKLU

	Jenis SPKLU		
	<i>Medium Charging (x)</i>	<i>Fast Charging (y)</i>	<i>Ultra fast Charging (z)</i>
Biaya investasi (C)	Rp 389,4 juta	Rp 600,6 juta	Rp 1,0835 miliar
Rata-rata waktu <i>charging</i>	4 Jam / EV	60 menit / EV	30 menit / EV
Kapasitas SPKLU per konektor	6 EV / hari	24 EV / hari	48 EV / hari

Data kandidat lokasi SPKLU di Kota Bogor yang diusulkan yakni setiap pusat administrasi masing-masing kecamatan di Kota Bogor. Lokasi kandidat SPKLU menjadi lokasi tujuan pada data matriks jarak tempuh dari setiap kecamatan di Kota Bogor. Perhitungan jarak tempuh digunakan sebagai salah satu batasan dalam model matematis untuk menentukan alokasi kecamatan ke masing-masing kandidat SPKLU. Data kandidat lokasi PLN ditunjukkan pada Tabel 5. Visualisasi lokasi SPKLU eksisting yang bertanda bendera hijau dan kandidat usulan SPKLU yang bertanda kuning bintang ditunjukkan pada gambar 2. Titik lokasi menggunakan titik *central* dari kecamatan menuju ke masing-masing kandidat SPKLU. Jarak tempuh yang dipilih dari salah satu kecamatan ke salah satu kandidat SPKLU menggunakan *google maps mode* mobil memiliki nilai paling kecil yang ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 5. Data Usulan Lokasi SPKLU di Kota Bogor

Kode	Nama Usulan SPKLU	Alamat SPKLU	Wilayah SPKLU
j*1	SPKLU Kec. Bogor Barat	Jl. Darul Quran No.31, Loji, Kec. Bogor Barat	Bogor Barat
j*2	SPKLU Kec. Bogor Selatan	Jl. Layungsari III, Empang, Kec. Bogor Selatan	Bogor Selatan
j*3	SPKLU Kec. Bogor Tengah	Jl. Kantin No.2, Pabaton, Kec. Bogor Tengah	Bogor Tengah
j*4	SPKLU Kec. Bogor Timur	Jl. Raya Pajajaran No.16, Baranangsiang, Kec. Bogor Timur	Bogor Timur
j*5	SPKLU Kec. Bogor Utara	Jl. Gagalur No.2, Tegul Gundil, Kec. Bogor Utara	Bogor Utara
j*6	SPKLU Kec. Tanah Sareal	Jl. Kb. Pedes No.20, Tanah Sareal, Kec. Tanah Sareal	Tanah Sareal



Gambar 2. Lokasi usulan SPKLU di Kota Bogor

Tabel 6. Jarak tempuh dari titik asal (kecamatan) ke kandidat SPKLU (dalam km)

Titik asal (i)	Usulan Lokasi SPKLU (j^*)						Jumlah Permintaan EV (U_i)
	j^*1	j^*2	j^*3	j^*4	j^*5	j^*6	
$i1$	0	6	3.5	9.7	6.5	5.7	76.8
$i2$	6	0	4	3.4	6	6	88.8
$i3$	3.5	4	0	6.5	3.8	2.5	48.8
$i4$	9.7	3.4	6.5	0	6.7	6.8	77.7
$i5$	6.5	6	3.8	6.7	0	3.8	52.9
$i6$	5.7	6	2.5	6.8	3.8	0	56.7

Pada penelitian ini tujuan utama pengembangan ekosistem kendaraan listrik melalui pembangunan SPKLU adalah meminimalisir biaya yang terdiri dari biaya investasi pemasangan SPKLU dan biaya jarak tempuh ke lokasi SPKLU. Fungsi tujuan dibangun dengan melibatkan variabel keputusan apakah akan dibangun SPKLU pada kandidat lokasi j atau tidak dan berapa jumlah SPKLU yang harus dibangun guna memastikan seluruh kendaraan listrik di Kota Bogor dapat melakukan pengisian baterai dalam satu hari. Kandidat lokasi SPKLU optimal dilihat dari jumlah kendaraan listrik eksisting di Kota Bogor dan jarak tempuh minimal kendaraan listrik dari kecamatan asal ke kandidat SPKLU. Setelah model matematis diimplementasikan menggunakan *Python*, dilakukan verifikasi model. Hal ini dilakukan untuk melihat apakah model yang dibuat sudah bisa *running* pemodelan sistem yang dimaksud dalam penelitian ini. Pada gambar 3, diberikan gambar yang menunjukkan perbedaan antara model yang sudah terverifikasi dan belum terverifikasi. Dari hasil optimasi yang dilakukan menggunakan *Python*, didapatkan hasil yang terlampir pada tabel 7. Pada tabel tersebut dijelaskan bahwa tiap lokasi akan dibangun SPKLU dengan kapasitas yang berbeda-beda. Kondisi ini menunjukkan jenis *charging* apa yang akan dibangun dan jumlahnya. Selain itu, proporsi pelayanan yang dilakukan oleh lokasi SPKLU yang dibangun terhadap setiap permintaan di setiap wilayah. Kondisi ini

menunjukkan bahwa hasil ini merupakan kondisi optimal, tidak selalu satu lokasi SPKLU hanya melayani permintaan dilokasi yang sama, ataupun sebaliknya satu wilayah permintaan dilayani oleh SPKLU di lokasi yang sama. Proporsi alokasi dapat dilihat pada tabel 8.

```

Requirement already satisfied: pulp in /usr/local/lib/python3.12/dist-packages (3.3.0)
=== Lokasi & Jumlah Konektor ===
Output actions
  action  open  x  y  z  capacity
0  j1  1  0  0  3  144.0
1  j2  1  0  1  2  120.0
2  j3  1  0  0  1  48.0
3  j4  1  0  0  2  96.0
4  j5  1  0  0  3  144.0
5  j6  1  0  0  3  144.0

=== Matriks Alokasi P_{ij} (proporsi) ===
      j1  j2  j3  j4  j5  j6
i1  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
i2  0.0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0
i3  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0  0.0
i4  0.0  0.068  0.0  0.932  0.0  0.0
i5  0.0  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0
i6  0.0  0.0  0.057  0.0  0.032  0.911
  
```

Gambar 3. Model setelah terverifikasi

Tabel 7. Hasil Optimasi Lokasi dan jumlah konektor

Lokasi	Keputusan Open	Medium Charging (x)	Fast Charging (y)	Ultra fast Charging (z)
j1	1	0	0	3
j2	1	0	1	2
j3	1	0	0	1
j4	1	0	0	2
j5	1	0	0	3
j6	1	0	0	3

Tabel 8. Matriks alokasi proporsi (P_{ij})

	j1	j2	j3	j4	j5	j6
i1	1					
i2		1				
i3			1			
i4		0.068		0.932		
i5					1	
i6			0.057		0.032	0.911

Dari hasil optimasi alokasi pelayanan SPKLU yang dibangun dengan permintaan yang ada, didapatkan total *system cost* sebesar Rp 15.769.626.838. Kondisi ini merupakan kondisi optimal untuk melayani permintaan yang ada. Dari hasil optimasi, semua permintaan 687 EV/hari dapat dilayani. Utilitas dari penggunaan SPKLU mencapai ~98.7%, hal ini menandakan hampir seluruh kapasitas dipakai. Hal ini menunjukkan terdapat cadangan rata-rata hanya 9 EV/hari dari keseluruhan SPKLU yang ada. Setelah model menghasilkan kondisi optimal, analisis sensitivitas dilakukan untuk melihat perubahan yang terjadi jika variable a berubah. Perubahan nilai a tidak menghasilkan perbedaan yang signifikan jika dibanding total investasi operator (miliar rupiah). Kondisi tersebut berarti keputusan pembangunan SPKLU masih wajar/layak. Namun dalam keputusan pengembangan SPKLU perlu mempertimbangkan tidak hanya efisiensi biaya, tetapi juga aspek teknis dan karakteristik lokasi.

Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan kondisi optimal dalam menentukan jenis SPKLU apa yang perlu dibangun, dan memberikan hasil alokasi layanan SPKLU terhadap permintaan yang ada. Total biaya yang optimal sebesar Rp 15.769.626.838. Jumlah kuota dari layanan SPKLU yang dibangun cukup menjangkau semua permintaan yang ada. Utilitas dari penggunaan SPKLU mencapai ~98.7%, sehingga masih ada sisa layanan yang bisa digunakan. Penelitian ini berhasil menunjukkan kondisi optimal dengan analisis sensitivitas perubahan harga

per Km, kondisi ini belum menunjukkan perubahan signifikan terhadap keputusan yang dihasilkan karena nilainya yang cukup kecil.

Variabel yang bisa dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya adalah kondisi *lifetime* jenis *charging* (tahun), biaya modal/*discount rate* untuk menghitung *annualized capital cost*, dan kebijakan pemerintah untuk pembangunan SPKLU. Variabel ini bisa menjadi pertimbangan besar untuk menentukan solusi optimal lainnya. Selain itu, teknik optimasi lanjutan seperti pembelajaran mesin atau algoritma genetik dapat dieksplorasi untuk menyempurnakan penempatan dan optimasi kapasitas stasiun pengisian. Hal ini akan membantu lebih meningkatkan fleksibilitas dan akurasi model seiring dengan pertumbuhan pasar kendaraan listrik di Bogor.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PLN (Persero) atas dukungannya dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya atas dukungan institusional yang diberikan selama penelitian ini. Ucapan terima kasih khusus disampaikan kepada berbagai pihak atas bantuan dan kontribusi mereka. Kami juga berharap temuan ini akan bermanfaat bagi para pemangku kepentingan yang terlibat dan memberikan perspektif baru bagi para pembaca.

Daftar Rujukan

- [1] M. E. Yuniza, I. W. B. E. Pratama, and R. C. Ramadhaniati, "Indonesia's Incentive Policies on Electric Vehicle: The Questionable Effort from The Government," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 11, no. 5, pp. 434–440, Aug. 2021, doi: 10.32479/ijee.11453.
- [2] A. Ibrahim Nur, "The Limits of Indonesia's Legal Framework for Electromobility: Regulatory and Sustainable Issues," *Lentera Hukum*, vol. 9, no. 2, p. 211, Jul. 2022, doi: 10.19184/ejrh.v9i2.31200.
- [3] A. D. Rahmania, W. Sutopo, and R. Rochani, "Innovation and Technology Readiness Level of Mobile Charging Station Swap Battery: A Conceptual Study."
- [4] W. Sutopo, R. W. Astuti, A. Purwanto, and M. Nizam, "Commercialization model of new technology lithium ion battery: A case study for smart electrical vehicle," in *Proceedings of the 2013 Joint International Conference on Rural Information and Communication Technology and Electric-Vehicle Technology, rICT and ICEV-T 2013*, 2013.
- [5] Y. Xiong, B. An, and S. Kraus, "Electric vehicle charging strategy study and the application on charging station placement," *Auton Agent Multi Agent Syst*, vol. 35, no. 1, p. 3, Apr. 2021, doi: 10.1007/s10458-020-09484-5.
- [6] R. Verma, S. K. Sharma, P. Singh, J. K. Bhutto, and A. R. A. Alharbi, "Analysis and Sizing of Charging Stations in Kota City," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 18, 2022, doi: 10.3390/su141811759.
- [7] H. Woo, Y. Son, J. Cho, S.-Y. Kim, and S. Choi, "Optimal expansion planning of electric vehicle fast charging stations," *Appl Energy*, vol. 342, p. 121116, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121116.
- [8] Z. Guo, J. Deride, and Y. Fan, "Infrastructure planning for fast charging stations in a competitive market," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 68, pp. 215–227, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.04.010.
- [9] A. Popa and T.-I. Sirbu, "Strategic Optimization of Electric Vehicle Charging Station Placement in Romania," *Operations Research Forum*, vol. 6, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s43069-025-00461-w.
- [10] J. Lou, Z. Qiu, J. Yu, and C. Guo, "Urban charging station location model based on multi-objective programming," *J Phys Conf Ser*, vol. 1053, no. 1, pp. 0–8, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1053/1/012028.

- [11] T. Santoso, S. Ahmed, M. Goetschalckx, and A. Shapiro, "A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty," *Eur J Oper Res*, vol. 167, no. 1, pp. 96–115, 2005, doi: 10.1016/j.ejor.2004.01.046.
- [12] L. Brunetta, F. Malucelli, P. Värbrand, and D. Yuan, "Joint optical network design, routing and wavelength assignment by integer programming," *Telecommun Syst*, vol. 26, no. 1, pp. 53–67, 2004, doi: 10.1023/B:TELS.0000029020.17417.8e.
- [13] Z. Miljanic, V. Radulovic, and B. Lutovac, "Efficient placement of electric vehicles charging stations using integer linear programming," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 11–16, 2018, doi: 10.4316/AECE.2018.02002.
- [14] T. Santi Rahmawati, S. Istiqomah, and W. Sutopo, "A Manufacturer Opening Decision of Electric Motorcycle Conversion Kit Using The Mixed Integer Linear Programming Method."
- [15] L. Aldira Hafidza, S. Istiqomah, and W. Sutopo, "Supply Chain Network Model Development for Conversion Electric Motorcycle Distribution in Central Java using the Mixed Integer Linear Programming Method."
- [16] R. Á. Fernández and O. Pérez-Dávila, "Fuel cell hybrid vehicles and their role in the decarbonisation of road transport," *J Clean Prod*, vol. 342, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130902.
- [17] H. Singh, A. Ambikapathy, K. Logavani, G. Arun Prasad, and S. Thangavel, "Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)," in *Green Energy and Technology*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 53–72. doi: 10.1007/978-981-15-9251-5_3.
- [18] S. S. Raghavan and G. Tal, "Plug-in hybrid electric vehicle observed utility factor: Why the observed electrification performance differ from expectations," *Int J Sustain Transp*, vol. 16, no. 2, pp. 105–136, 2022, doi: 10.1080/15568318.2020.1849469.
- [19] S. Gelareh and D. Pisinger, "Fleet deployment, network design and hub location of liner shipping companies," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 47, no. 6, pp. 947–964, 2011, doi: 10.1016/j.tre.2011.03.002.
- [20] D. Shishebori and A. Yousefi Babadi, "Robust and reliable medical services network design under uncertain environment and system disruptions," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 77, pp. 268–288, 2015, doi: 10.1016/j.tre.2015.02.014.
- [21] S. Istiqomah and W. Sutopo, "Optimization of Network Design for Charging Station Placement : A Case Study," in *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2020.
- [22] M. Tavana, H. Kian, A. K. Nasr, K. Govindan, and H. Mina, "A comprehensive framework for sustainable closed-loop supply chain network design," *J Clean Prod*, vol. 332, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129777.
- [23] M. Watson, S. Lewis, P. Cacioppi, and J. Jayaraman, *Supply Chain Network Design Applying Optimization and Analytics to the Global Supply Chain*. Pearson Prentice Hall, 2013.