

ANALISIS PENENTUAN LOKASI STASIUN PENUKARAN BATERAI KENDARAAN LISTRIK UMUM (SPBKLU) UNTUK BATERAI SWAP DALAM MENGEMBANGKAN EKOSISTEM KENDARAAN LISTRIK

1st Anita Nurbayan
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
Email:

2nd Silvi Istiqomah
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
Email:

3rd Rahaditya Dimas Prihadianto
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
Email:

Abstrak — Pertumbuhan pesat dalam sektor transportasi di Surabaya, terutama dalam penggunaan kendaraan listrik, telah meningkatkan kebutuhan untuk infrastruktur pendukung yang efisien. Dengan meningkatnya jumlah kendaraan listrik, pemerintah menghadapi tantangan dalam menyediakan Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) yang memadai untuk mengurangi kekhawatiran pengguna terkait keterbatasan fasilitas pengisian daya. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model yang dapat menentukan lokasi optimal pada Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) di Surabaya Timur menggunakan metode *Set Covering Problem*. Hasil optimasi mengidentifikasi 14 lokasi strategis di Surabaya Timur yang dapat melayani kebutuhan pengguna kendaraan listrik secara efektif. Lokasi-lokasi ini dipilih berdasarkan kriteria cakupan dan kapasitas, memastikan bahwa setiap area dengan permintaan tinggi mendapatkan akses yang memadai ke Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU). Hasil penelitian menunjukkan bahwa 14 lokasi optimal di Surabaya Timur dapat mencakup kebutuhan pengguna kendaraan listrik dengan efektif. Terdapat 14 titik yang optimal dengan mempertimbangkan jarak. 14 titik tersebut berada pada kelurahan Barata Jaya, Gubeng, Gunung Anyar, Gunung Anyar Tambak, Keputih, Klampisngasem, Semolowaru, Pacar Kembang, Rangkah, Dukuh Sutorejo, Kedung Baruk, Medokan Ayu, Wonorejo, Kendangsari. Lokasi-lokasi ini telah dipilih untuk memastikan distribusi yang merata dan akses yang mudah bagi pengguna. Penelitian ini memberikan panduan praktis untuk pengembangan infrastruktur kendaraan listrik di Surabaya, serta menawarkan model

yang dapat diterapkan oleh kota-kota lain yang menghadapi tantangan serupa dalam meningkatkan efisiensi distribusi fasilitas dan adopsi kendaraan listrik.

Kata kunci— Infrastruktur kendaraan listrik, SPBKLU, *Set Covering Problem*, perencanaan lokasi

I. PENDAHULUAN

Perkembangan transportasi yang pesat telah menjadi bagian penting dalam dinamika pertumbuhan perkotaan di berbagai wilayah, termasuk Surabaya. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS), periode 2020 hingga 2024 menunjukkan peningkatan signifikan dalam sektor transportasi di Surabaya. Peningkatan ini terlihat dari bertambahnya jumlah kendaraan pribadi dan umum serta semakin berkembangnya infrastruktur pendukung transportasi. Di antara perkembangan ini, kendaraan listrik mengalami pertumbuhan sebesar 15% per tahun, mencerminkan upaya menuju transportasi yang lebih berkelanjutan di tengah urbanisasi yang pesat [1].

Namun, pertumbuhan sektor transportasi juga membawa dampak negatif, terutama terhadap kualitas lingkungan. Salah satu permasalahan utama adalah meningkatnya polusi udara yang berasal dari emisi kendaraan. Data dari IQAir menunjukkan bahwa kualitas udara di Surabaya berada pada kategori sedang dengan indeks kualitas udara sebesar 60, mengindikasikan kualitas udara yang perlu diwaspadai [2]. Selain itu, ketergantungan pada bahan bakar fosil juga menjadi isu krusial, mendorong pemerintah untuk mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Sebagai bagian dari komitmen global untuk mengurangi emisi karbon, pemerintah Indonesia, termasuk di Surabaya, telah mendorong penggunaan kendaraan listrik sebagai alternatif kendaraan konvensional. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menargetkan pengurangan emisi karbon sebesar 29% pada tahun 2030 melalui peningkatan penggunaan energi bersih dan transportasi berkelanjutan [3]. Namun, adopsi kendaraan listrik di masyarakat masih menghadapi tantangan, terutama terkait infrastruktur pengisian daya yang belum memadai, di mana 52% responden dalam survei menyatakan kekhawatiran mereka terhadap ketersediaan Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) [4]

Untuk menjawab tantangan tersebut, pengembangan infrastruktur yang memadai, seperti SPBKLU, menjadi prioritas agar adopsi kendaraan listrik dapat meningkat secara signifikan. Penentuan lokasi SPBKLU yang optimal sangat penting untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat. Penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas metode Set Covering Problem dalam menentukan lokasi optimal untuk berbagai fasilitas publik, seperti pos pemadam kebakaran dan halte bus, yang dapat diaplikasikan pula dalam pengembangan SPBKLU di Surabaya [5]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model dan menghasilkan titik lokasi yang optimal untuk membangun Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) di kota Surabaya.

II. KAJIAN TEORI

A. Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU)

Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) adalah fasilitas yang memungkinkan pengguna sepeda listrik untuk menukar baterai secara cepat dan efisien, sehingga mengurangi waktu henti kendaraan [6]. Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 1 Tahun 2023, SPBKLU harus ditempatkan di lokasi yang mudah dijangkau oleh pemilik kendaraan berbasis baterai dan tidak mengganggu lalu lintas. Untuk mempercepat program ini, SPBKLU juga disarankan ditempatkan di stasiun pengisian bahan bakar umum, kantor pemerintah, pusat perbelanjaan, dan parkir umum di pinggir jalan raya.

B. Sepeda Listrik

Sepeda motor listrik merupakan salah satu jenis kendaraan yang menggunakan bahan bakar alternatif, memanfaatkan tenaga listrik yang diubah menjadi energi gerak untuk mengoperasikannya [7]. Sesuai dengan Perpres No. 55 Tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai, pemerintah berupaya mempercepat pengembangan industri komponen kendaraan listrik di dalam negeri [8].

Di Indonesia, terdapat beberapa jenis kendaraan listrik, yaitu:

1. Battery Electric Vehicle (BEV)

Kendaraan ini sepenuhnya digerakkan oleh listrik tanpa memerlukan bahan bakar, karena tidak memiliki mesin

pembakaran internal, sehingga tidak menghasilkan emisi gas dan sangat ramah lingkungan.

2. Hybrid Electric Vehicle (HEV)

Kendaraan ini masih membutuhkan bahan bakar untuk menjalankan mesin pembakaran dalam, yang juga berfungsi sebagai generator untuk mengisi daya baterai kendaraan.

3. Plug-in Hybrid Vehicle (PHEV)

Kendaraan ini menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama, namun masih memiliki mesin yang berfungsi sebagai generator pengisi daya baterai, sehingga memberikan efisiensi bahan bakar lebih tinggi dan emisi lebih rendah.

Meskipun HEV dan PHEV masih menggunakan bahan bakar, BEV merupakan kendaraan yang sepenuhnya bebas dari emisi, menjadikannya pilihan paling ramah lingkungan [9].

C. Swap Baterai

Kendaraan listrik merupakan kendaraan yang ramah lingkungan karena sumber tenaga yang digunakan tidak berasal dari bahan bakar fosil melainkan dari baterai untuk menggerakkan kendaraan listrik. Dengan adanya baterai *swap* pada kendaraan listrik merupakan komponen penting dalam kendaraan listrik sebagai tempat penyimpanan energi [10]

1. Big swap station



Gambar 1. Big Swap Station

Daya : 5600 watt
 Slot baterai : 8 baterai
 Dimensi : 1800 x 644 x 749 mm
 Sertifikasi : IP54, CE & IEC 62840

2. Dimensi baterai



Gambar 2. Baterai Swap

Berdasarkan gambar II.4 adalah gambar baterai swap yang digunakan untuk kendaraan sepeda listrik. Dimensi baterai yang dapat dilepas dan ditukar untuk kendaraan listrik tegangan 72 V kapasitas baterai 1,44 kWh baterai ini memerlukan waktu pengisian 4 Jam dengan jarak tempuh 50 Km/ 1 Baterai [11].

D. Set Covering Problem

Set Covering Problem (SCP) adalah model yang digunakan untuk menentukan jumlah titik lokasi fasilitas pelayanan yang minimum tetapi dapat melayani semua titik permintaan. Sehingga fungsi tujuan dari model *Set Covering Problem* adalah meminimumkan jumlah titik lokasi fasilitas pelayanan. Sedangkan fungsi kendalanya adalah lokasi pelayanan harus dapat memenuhi semua titik permintaan [12]. Sehingga model *Set Covering Problem* dirumuskan sebagai berikut:

Fungsi tujuan:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^m x_i$$

Fungsi kendala:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij}x_i$$

Variabel Keputusan:

$$x_i \in \{0,1\}$$

Keterangan:

x_i : Variabel biner yang menunjukkan apakah lokasi i dipilih (1) atau tidak (0).

a_{ij} : Parameter yang menunjukkan apakah lokasi i dapat mencakup permintaan di titik j (1 jika dapat mencakup, 0 jika tidak).

m : Jumlah total lokasi potensial untuk SPBKLU.

n : Jumlah total titik permintaan.

Proses penentuan lokasi optimal untuk Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) melibatkan beberapa langkah penting menggunakan metode *Set Covering Problem* (SCP).

1. Menentukan Titik Permintaan

Langkah pertama adalah mengidentifikasi lokasi permintaan yang meliputi SPBU, SPBG, kantor pemerintah, pusat perbelanjaan, dan tempat parkir umum.

2. Menentukan Titik Kandidat SPBKLU

Setelah titik permintaan ditentukan, langkah berikutnya adalah memilih lokasi yang memenuhi kriteria sebagai kandidat untuk pendirian SPBKLU.

3. Mengukur Jarak

Mengukur jarak antara kandidat SPBKLU dan titik permintaan dengan bantuan Google Maps untuk memastikan cakupan yang optimal.

4. Menentukan Lokasi dan Jumlah SPBKLU

Tahap akhir adalah menentukan lokasi dan jumlah SPBKLU yang optimal menggunakan model SCP, agar semua titik permintaan di Surabaya memiliki akses yang layak ke SPBKLU terdekat.

E. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah suatu metode yang digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana variasi atau perubahan dalam suatu variabel atau parameter dapat mempengaruhi hasil atau output dari suatu model atau sistem. Analisis sensitivitas dilakukan dengan cara memberi perlakuan, yaitu merubah suatu variabel input dalam satuan tertentu, dan mempertahankan nilai variabel-variabel lain pada nilai base case-nya untuk menghasilkan suatu nilai output yang diinginkan. Tindakan menganalisis kembali ini dinamakan analisis sensitivitas (*sensitivity analysis*) [13]. Analisis sensitivitas dapat dikatakan suatu kegiatan menganalisis kembali suatu proyek untuk melihat apakah yang akan terjadi pada proyek tersebut bila suatu proyek tidak berjalan sesuai rencana.

F. GAMS

General Algebraic Modeling System (GAMS) adalah sistem pemodelan aljabar umum yang digunakan untuk memecahkan masalah optimasi. GAMS dirancang untuk membantu memodelkan dan menyelesaikan masalah optimasi. GAMS dikembangkan untuk memudahkan pemodelan dan penyelesaian masalah optimasi yang kompleks dalam berbagai bidang, termasuk ekonomi, teknik, logistik, dan manajemen [14]. Salah satu keunggulan utama GAMS adalah kemampuannya untuk menangani model berskala besar dan mengintegrasikan berbagai jenis pemrograman matematika. Dengan kemampuannya yang luas dan fleksibilitas dalam pemodelan, GAMS sering digunakan dalam penelitian akademis dan proyek industri untuk menyelesaikan masalah - masalah seperti alokasi sumber daya, penjadwalan, dan penentuan lokasi fasilitas.

III. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif, yang bertujuan untuk mengukur dan menganalisis data yang diperoleh secara numerik dan menggunakan pendekatan statistika. Pendekatan kuantitatif ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi hubungan antara variabel-variabel yang diteliti melalui pengumpulan data yang sistematis dan terstruktur. Dalam penelitian ini, data yang dikumpulkan terkait dengan jumlah kendaraan konvensional dan listrik di Kota Surabaya, distribusi penduduk di setiap kelurahan, serta jarak rata-rata antara kelurahan-kelurahan di Surabaya. Data tersebut kemudian diolah menggunakan metode *Set Covering Problem* (SCP), yang merupakan teknik optimasi yang digunakan untuk menentukan lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) yang optimal di Kota Surabaya.

Penelitian ini melibatkan penggunaan perangkat lunak seperti Microsoft Word, Excel, PowerPoint, dan GAMS untuk mendukung proses pengolahan dan analisis data. GAMS (*General Algebraic Modeling System*) digunakan secara khusus untuk menyusun dan menyelesaikan model matematis yang terkait dengan penentuan lokasi SPBKLU. Proses verifikasi dan validasi model dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan sesuai dengan kondisi nyata dan dapat diandalkan dalam pengambilan keputusan. Verifikasi dilakukan dengan memeriksa kesesuaian hasil akhir dari sistem dengan model matematis yang digunakan, sementara validasi dilakukan untuk memastikan bahwa model tersebut mencerminkan situasi

sebenarnya di lapangan. Hasil akhir dari pengolahan data ini akan digunakan untuk melakukan analisis dan evaluasi guna memberikan rekomendasi yang tepat mengenai penentuan lokasi SPBKLU di Surabaya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengumpulan data

Pada penelitian ini dilakukan pengumpulan data dengan berbagai teknik seperti studi pustaka dan pengumpulan data kuantitatif dari berbagai pendukung berlangsungnya penelitian. Pada proses pemodelan dan simulasi sistem, diperlukan beberapa data untuk mendukung pengembangan model. Data ini diperoleh dari database badan pusat statistik untuk mengetahui jumlah pengguna motor konvensional di kota Surabaya. Data pengguna yang digunakan adalah data dari tahun 2018 hingga tahun 2020. Data yang digunakan untuk mengetahui besaran demand adalah jumlah pengguna motor di Surabaya dalam satuan tahun. Jumlah pengguna tersebut akan menjadi input demand pengguna sepeda motor listrik.

Tabel 1. Demand Pengguna Motor Konvensional

Provinsi	Karasi- denan	Kota	Jumlah Sepeda Motor		
			2018	2019	2020
Jawa Timur	Surabaya	Surabaya	2.342.887	2.517.449	2.599.332

Sumber : Badan Pusat Statistik (BPS, 2023)

Data pengguna sepeda motor konvensional data yang didapatkan hanya sampai tahun 2020, setelah itu untuk mendapatkan data sepeda motor konvensional sampai tahun 2024 dengan melihat perkembangan pengguna motor konvensional.

Tabel 2. Demand Peningkatan Pengguna Motor Konvensional

Provinsi	Karasi- denan	Kota	3% peningkatan Jumlah sepeda motor			
			2021	2022	2023	2024
Jawa Timur	Surabaya	Surabaya	2.677.312	2.751.101	2.840.000	2.921.000

Tahap selanjutnya menentukan seberapa banyak pengguna sepeda motor listrik di wilayah kota Surabaya meliputi (Surabaya Pusat, Surabaya Utara, Surabaya Timur, Surabaya Selatan, Surabaya Barat) di setiap kelurahan. Jumlah pengguna sepeda motor listrik terbanyak di wilayah Surabaya akan di gunakan untuk mengukur matriks jarak disetiap kelurahan. Menentukan titik kandidat Stasiun Penurunan Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU), titik permintaan yang telah didapat akan dijadikan sebagai lokasi kandidat Stasiun Penurunan Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU)[15].

Tahap selanjutnya hasil yang didapatkan dari penentuan jumlah titik lokasi adalah menentukan wilayah kota Surabaya diantaranya Surabaya Pusat, Surabaya Utara, Surabaya

Timur, Surabaya Selatan Surabaya Barat dengan jumlah pengguna motor listrik terbanyak.

Penentuan presentase =

$$\frac{\text{Jml motor listrik di indonesia}}{\text{Jml penduduk di indonesia}} \times 100\% = \frac{133225}{199176800} = 0,66\%$$

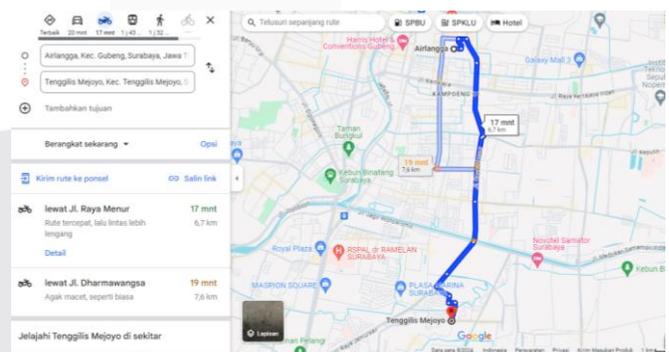
Penentuan demand =

$$\text{Jml penduduk per kelurahan} \times \text{Jml presentase sepeda listrik}$$

Tabel 3. Demand Pengguna Motor Listrik

Wilayah	Jumlah Pengguna
Surabaya Pusat	249
Surabaya Utara	351
Surabaya Timur	562
Surabaya Selatan	478
Surabaya Barat	321

Dari demand yang ada diatas saya pilih Surabaya Timur karena jumlah sepeda motor listrik di Surabaya Timur lebih banyak. Berdasarkan Tabel 3 penentuan demand diatas maka diperlukan matriks jarak antar kelurahan. Pengukuran dalam penelitian ini dilakukan secara tidak langsung. Jarak yang digunakan untuk menentukan jarak titik lokasi SPBKLU adalah menggunakan bantuan Google Maps. Metode ini dipilih karena lebih efisien daripada mengukur secara langsung. Data yang diperoleh kemudian diolah menjadi matrik jarak, yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan berikut. Data yang digunakan adalah jarak antara titik-titik kelurahan yang terdaftar dalam penelitian.



Gambar 3. Contoh Pengukuran Jarak

Dari proses pengukuran dengan menggunakan Google Maps akan diperoleh jarak antara dua titik. Titik ini didapatkan dari titik setiap kelurahan di wilayah Surabaya Timur. Maka akan diperoleh sebuah matrik jarak sebagai berikut.

Setelah melakukan perhitungan matriks jarak, langkah selanjutnya adalah menentukan jarak optimal antar Stasiun Penurunan Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) untuk memastikan persebaran efisien dan merata.

Tabel 4. Kapasitas Baterai

Kapasitas Baterai	1,44 kWh
Jarak Tempuh	50 Km
Konsumsi Listrik per Km	0,0288 kWh/Km

$$20\% \text{ Baterai} \times 1,44 \text{ kWh} = 0,288 \text{ kWh/Km}$$

$$D = \frac{E}{C} = \frac{0,288}{0,0288} = 10 \text{ Km}$$

D : Jarak yang di tempuh dalam kilometer (Km)

E : Konsumsi energi dalam kilowatt-jam (kWh)

C : Tingkat konsumsi energi kendaraan (kWh/Km)

Level baterai 20% sering dianggap sebagai ambang batas minimum yang masih dapat diandalkan. Hal ini bertujuan untuk mengingatkan pengguna bahwa energi yang tersisa dalam baterai sudah menipis dan kendaraan mungkin tidak akan mampu menempuh jarak yang jauh jika tidak segera diisi ulang. 20% baterai dianggap sebagai batas aman terakhir sebelum kendaraan benar-benar membutuhkan pengisian ulang. Berdasarkan perhitungan dengan mempertimbangkan penggunaan 20% baterai, kendaraan listrik dapat menempuh jarak 10 km sebelum membutuhkan pengisian ulang.

Tabel 5. Penentuan Demand

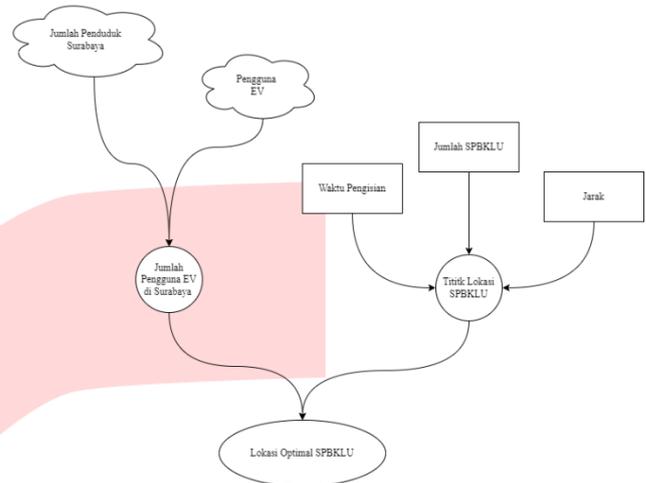
1 hari	24 Jam
waktu pengisian	4 Jam
1 spare	6 Motor
spare	7
kapasitas pengisian dalam 1 unit SPBKLU	42
Sepeda motor EV di Surabaya Timur	562
13,38	
14 Titik	

Berdasarkan Tabel 6 diperoleh 14 titik lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) karena akan melayani *demand* dari Surabaya Timur sebanyak 562 pengguna motor listrik. hal itu disebabkan karena setiap titik Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) memiliki 8 *spare* pengisian baterai. Tetapi hanya 7 *spare* yang bisa melayani penukaran baterai .Pengisian baterai dilakukan selama 4 jam pengisian. Hal tersebut yang menyebabkan nilai titik Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) yang akan di buka.

B. Pengolahan Data

Tahap awal dalam pengolahan data adalah pembuatan model matematis, pembuatan model matematis akan menjadi acuan dalam permodelan dengan menggunakan software optimasi *GAMS*. *GAMS* merupakan sistem pemodelan tingkat tinggi intik pemrograman matematika dan optimasi yang menyediakan penyusun bahasa pemrograman (*language compiler*) dan berbagai solver terkait. Pembuatan model didahului dengan penentuan *decision* variabel, pada permasalahan ini yang menjadi variabel tersebut adalah titik lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) baru yang akan mensuplai *demand* tiap kecamatan dari wilayah kota yang sudah terpilih serta keputusan dibangun atau tidak di lokasi tersebut. *Decision* variabel digunakan untuk membantu mengambil keputusan dalam model yang peneliti buat.

Dalam proses pembuatan sistem permodelan penggunaan diagram diperlukan untuk mengetahui adanya keterkaitan serta ketergantungan diantara variabel-variabel yang ada. Diagram yang digunakan untuk mengetahui ketergantungan antar variabel dalam penelitian ini adalah influence diagram. Dari diagram ini akan diketahui faktor-faktor yang berpengaruh dalam model yang peneliti buat. Dengan model yang telah dibuat maka peneliti mendapatkan model diagram sebagai berikut.



Gambar 4. Influence Diagram

Diagram ini menggambarkan proses penentuan lokasi optimal Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) di Surabaya dengan mempertimbangkan variabel seperti jumlah penduduk, pengguna kendaraan listrik, waktu pengisian, jumlah SPBKLU, dan jarak antar stasiun. Jumlah penduduk dan pengguna motor listrik mempengaruhi jumlah pengguna SPBKLU, yang merupakan variabel utama dalam penentuan lokasi. Waktu pengisian dan jarak antar stasiun juga berperan penting dalam menentukan titik lokasi yang optimal.

Selanjutnya, model matematis dibuat untuk mendefinisikan fungsi tujuan dan kendala. Fungsi tujuan difokuskan pada meminimalkan jumlah lokasi SPBKLU, sementara fungsi kendala memastikan bahwa semua variabel terkontrol diperhitungkan untuk mencapai solusi optimal. Model ini dirancang untuk mengatasi permasalahan penentuan lokasi SPBKLU secara efisien.

1. Fungsi tujuan minimize

Fungsi tujuan Tugas Akhir ini adalah meminimumkan jumlah SPBKLU yang akan dibangun.

$$\text{Minimize} = \sum_{i=1}^m x_i$$

Untuk $i = 1, 2, 3, \dots, 41$

Dalam permasalahan ini, terdapat 41 lokasi kandidat Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum yang memenuhi kriteria. Setiap x_i memiliki nilai 1 atau 0. sehingga apabila nilai $x_i = 0$ maka kandidat SPBKLU tersebut tidak dipilih. Jika nilai $x_i = 1$ maka kandidat SPBKLU tersebut terpilih.

Tabel 6. Kandidat Demand

Variabel Xi	Kelurahan	Variabel Xi	Kelurahan
X1	Airlangga	X22	Pacar Keling
X2	Barata Jaya	X23	Ploso
X3	Gubeng	X24	Rangkah
X4	Kertajaya	X25	Tambaksari
X5	Mojo	X26	Dukuh Sutorejo
X6	Pucangsewu	X27	Kalijudan
X7	Gunung Anyar	X28	Kalisari
X8	Gunung Anyar Tambak	X29	Kejawen Putih Tambak
X9	Rungkut Menanggal	X30	Manyar Sabrangan
X10	Rungkut Tengah	X31	Mulyorejo
X11	Gebang Putih	X32	Kali Rungkut
X12	Keputih	X33	Kedung Baruk
X13	Klampisngas em	X34	Medokan Ayu
X14	Medokan Semampir	X35	Penjaringan Sari
X15	Menur Pumpungan	X36	Rungkut Kidul
X16	Nginden Jangkungan	X37	Wonorejo
X17	Semolowaru	X38	Kendangsari
X18	Dukuh Setro	X39	Kutisari
X19	Gading	X40	Panjang Jiwo
X20	Kapas Madya	X41	Tenggilis Mejoyo
X21	Pacar Kembang		

Tabel diatas adalah kandidat *demand* kelurahan yang mungkin menjadi lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU).

2. Fungsi kendala

Fungsi kendala merupakan bentuk batasan-batasan yang akan diakolasikan secara optimal ke fungsi tujuan. Fungsi kendala dalam Tugas Akhir ini adalah :

$$\sum_{i=1}^{41} a_{ij}x_i$$

$$\sum 14 \leq X \leq 41$$

Setiap titik permintaan dapat dipenuhi oleh sekurangnya 1 SPBKLU. Kendala ini ada untuk memastikan jumlah Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) yang dibuka dapat mengatasi semua sepeda motor listrik.

3. Variabel Keputusan

$$x_i \in \{0,1\}$$

Setiap lokasi kandidat SPBKLU tersebut dapat dipilih atau tidak (biner). x_i : Variabel biner yang menunjukkan apakah lokasi i dipilih (1) atau tidak (0).

Tahap selanjutnya setelah pembuatan model matematis akan mentransformasikan model tersebut kedalam bahasa pemrograman pada *tools GAMS*. Pada *tools GAMS* data yang telah didapatkan akan dimasukkan kedalam file data model, sedangkan model matematis akan dimasukkan kedalam file data mod. Dengan demikian dapat diketahui input dari bagian data sebagai berikut.

Sets

```
i 'SPBKLU candidate locations' /loc1, loc2, loc3, loc4, loc5, loc6, loc7, loc8, loc9, loc10, loc11, loc12, loc13, loc14, loc15, loc16, loc17, loc18, loc19, loc20, loc21, loc22, loc23, loc24, loc25, loc26, loc27, loc28, loc29, loc30, loc31, loc32, loc33, loc34, loc35, loc36, loc37, loc38, loc39, loc40, loc41/
j 'demand points' /d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8, d9, d10, d11, d12, d13, d14, d15, d16, d17, d18, d19, d20, d21, d22, d23, d24, d25, d26, d27, d28, d29, d30, d31, d32, d33, d34, d35, d36, d37, d38, d39, d40, d41/;
```

kode diatas menjelaskan mengenai indikator lokasi kandidat Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) dan indikator titik permintaan.

```
Parameter
    distance(i,j) 'distance between locations and demand points'
    maxRadius 'maximum coverage radius' /2/;
```

Gambar 5. Kode Parameter

kode diatas menjelaskan mengenai matriks jarak yang menunjukkan jarak antara Lokasi i dan titik permintaan j untuk Lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU).

```
Parameter
    can_cover(i,j) '1 if location i can cover demand j, 0 otherwise';
can_cover(i,j) = (distance(i,j) <= maxRadius);
Binary Variable
    x(i);
Variable
    z 'total number of locations selected';
Equation
    obj 'minimize the number of locations selected';
obj ..
    z = sum(i, x(i));
Equation
    cover(j) 'each demand must be covered by at least one location';
cover(j) ..
    sum(i, can_cover(i,j) * x(i)) =g= 1;
Model SCP 'Set Covering Problem for SPBKLU in Surabaya' /all/;
Solve SCP using mip minimizing z;
Display x.l, z.l, can_cover;
```

Gambar 6. Binary Parameter

Kode diatas menjelaskan lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) untuk nilai 1 dibuka dan nilai 0 tidak dibuka dari parameter

indikator diatas nantinya menghasilkan total Lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) yang dibuka.

Gambar 7. Parameter

Pada bagian input data pada software GAMS diperlukan data yang sesuai dengan parameter yang telah ditulis sebelumnya. Dengan demikian dapat diketahui input data yang sesuai dengan parameternya pada Gambar 7.

C. Verifikasi dan validasi

1. Verifikasi

Verifikasi merupakan sebuah tahapan untuk memastikan bahwa model yang dibuat sudah benar. Pada penelitian ini verifikasi dilakukan dengan memeriksa coding yang digunakan. Hal ini dilakukan dengan menghilangkan salah satu komponen, adapun yang digunakan adalah komponen parameter dengan menghilangkan 3 titik. Berikut merupakan coding pada tahap verifikasi.

Gambar 8. Tahap Verifikasi

Berdasarkan Gambar 8 diketahui jika model yang dibuat mengalami error dan tidak dapat berjalan. Namun apabila komponen lengkap dan di masukkan maka model dapat berjalan sesuai urutan dan pada Gambar 9 berikut merupakan bentuk input coding yang benar.

Gambar 9. Bukti Verifikasi

Berdasarkan Gambar 9 diketahui jika model yang telah dibuat tidak mengalami error dan dapat berjalan sesuai urutan yang benar.

2. Validasi

Validasi merupakan proses ini dilakukan untuk mengetahui jika model telah mendekati kondisi sistem yang sebenarnya. Proses validasi yang dilakukan adalah dengan melihat hasil dari keluaran coding sebagai berikut.

Gambar 10. Bukti Validasi

Berdasarkan Gambar 10 diketahui jika nilai 2 dalam Software GAMS menentukan titik lokasi SPBKLU diperoleh hasil 14 titik lokasi dari 41 kelurahan. Hal ini sudah dibuktikan dengan menjalankan model secara berulang sebanyak 3 kali. Didapatkan hasil yang sama yaitu 14 titik lokasi sehingga model bisa dibaca oleh sistem dan telah menggambarkan kondisi yang sesungguhnya.

D. Analisis Hasil

Pemilihan lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) di Surabaya difokuskan pada berbagai wilayah, dengan Surabaya Timur menjadi prioritas utama karena memiliki jumlah pengguna motor listrik terbanyak, yaitu 562 pengguna. Dibandingkan dengan wilayah lain seperti Surabaya Pusat (249 pengguna),

Surabaya Utara (351 pengguna), Surabaya Selatan (478 pengguna), dan Surabaya Barat (321 pengguna), Surabaya Timur menunjukkan potensi besar untuk pengembangan SPBKLU. Berdasarkan data, diperlukan 14 titik SPBKLU di Surabaya Timur untuk memenuhi permintaan dari 562 pengguna, dengan setiap stasiun memiliki 8 unit baterai, di mana 7 unit tersedia untuk penukaran. Proses pengisian baterai memerlukan waktu 4 jam, yang mempengaruhi jumlah stasiun yang perlu dibuka.

$$20\% \text{ Baterai} \times 1,44 \text{ kWh} = 0,288 \text{ kWh/Km}$$

$$D = \frac{E}{C} = \frac{0,0288}{0,288} = 10 \text{ Km}$$

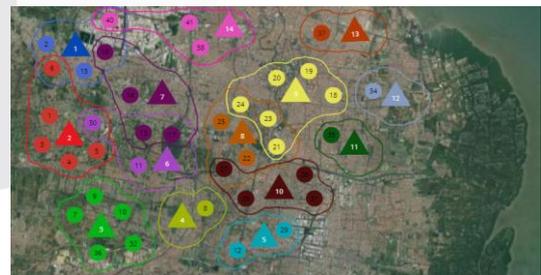
Berdasarkan perhitungan diatas sebelum menentukan lokasi optimal untuk Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) di Surabaya Timur, yaitu menentukan jarak tempuh maksimum untuk mendapatkan hasil titik lokasi yang optimal. Berdasarkan hasil analisis konsumsi energi kendaraan listrik, diperoleh hasil jarak sekitar 10 Km. Namun, nilai 1 di GAMS bisa menjangkau 5 Km sehingga nilai 2 bisa menjangkau 10 Km. Jarak ini dipilih untuk memastikan bahwa setiap kendaraan listrik dapat mencapai stasiun pengisian berikutnya tanpa risiko kehabisan baterai, sehingga mendukung kelancaran perjalanan dan meningkatkan keandalan jaringan pengisian daya secara keseluruhan. Hasil optimasi dari GAMS didapatkan hasil 14 titik lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) dengan jarak 10 Km sudah cukup untuk mencakup seluruh wilayah Surabaya Timur secara efektif dan efisien. Jadi penempatan 14 titik lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) pada lokasi-lokasi strategis akan memastikan bahwa setiap kelurahan di Surabaya Timur dapat terlayani dengan baik, sehingga mendukung pengembangan infrastruktur kendaraan listrik yang memadai di wilayah Surabaya Timur. Keputusan ini diambil dengan mempertimbangkan tidak hanya efisiensi dalam penggunaan sumber daya, tetapi juga kenyamanan dan kepuasan pengguna dalam mengakses layanan pengisian daya. Hasil lokasi yang optimal di wilayah Surabaya Timur dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 7. Hasil Optimasi

No	Titik	Lokasi
1	Barata Jaya	Airlangga
		Gubeng
		Kertajaya
		Mojo
		Mulyorejo
2	Gubeng	Barata Jaya
		Pucangsewu
		Menur Pumpungan
		Nginden Jangkungan
3	Gunung Anyar	Panjang Jiwo
		Gunung Anyar
		Rungkut Menanggal
		Rungkut Tengah
		Kali Rungkut
4	Gunung Anyar Tambak	Rungkut Kidul
		Gunung Anyar Tambak
5	Keputih	Keputih
		Kejawen Putih Tambak
6	Klampusngasem	Gebang Putih

No	Titik	Lokasi
		Klampusngasem
		Semolowaru
		Manyar Sabrangan
7	Semolowaru	Klampusngasem
		Medokan Semampir
		Nginden Jangkungan
		Semolowaru
8	Pacar Kembang	Pacar Kembang
		Pacar Keling
		Ploso
		Rangkah
		Tambaksari
		Kalijudan
9	Rangkah	Dukuh Setro
		Gading
		Kapas Madya
		Pacar Kembang
		Ploso
		Rangkah
		Tambaksari
		Dukuh Sutorejo
		Kalijudan
		Kalisari
Mulyorejo		
11	Kedung Baruk	Penjaringan Sari
12	Medokan Ayu	Medokan Ayu
13	Wonorejo	Wonorejo
14	Kendangsari	Kendangsari
		Panjang Jiwo
		Tenggilis Mejoyo

Terdapat 14 titik lokasi Stasiun Penukaran Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) yang terpilih di Surabaya Timur, meliputi berbagai kelurahan untuk memastikan akses yang merata. Titik pertama di Baratajaya melayani kelurahan sekitar seperti Airlangga dan Gubeng. Titik lainnya termasuk Gubeng, Gunung Anyar, Gunung Anyar Tambak, Keputih, Klampusngasem, Semolowaru, Pacar Kembang, Rangkah, Dukuh Sutorejo, Kedung Baruk, Medokan Ayu, Wonorejo, dan Kendangsari. Setiap titik melayani beberapa kelurahan, memastikan cakupan layanan SPBKLU yang luas dan efisien di Surabaya Timur.



Gambar 11. Hasil Pemetaan Lokasi SPBKLU

E. Analisis Sensitivitas

Tabel 8. Maximum coverage radius

Maximum Coverage Radius	Hasil Optimasi
2	14
3	11
4	6

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa perubahan pada maksimum cakupan (*MaxRadius*) dari nilai 2, 3, hingga 4 menghasilkan perbedaan signifikan dalam jumlah titik lokasi SPBKLU yang optimal. Pada *MaxRadius* 2, ditemukan 14 lokasi optimal, sedangkan pada nilai 3 dan 4, jumlahnya menurun menjadi 11 dan 6 lokasi. Hasil ini menunjukkan bahwa *MaxRadius* 2 memberikan keseimbangan terbaik antara cakupan area yang baik dan efisiensi jumlah stasiun. Dengan demikian, 14 titik SPBKLU sudah cukup untuk mencakup seluruh area secara optimal tanpa terlalu banyak lokasi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan penelitian dan hasil penelitian di atas maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini:

1. Penelitian ini menentukan titik lokasi optimal Stasiun Penjualan Baterai Kendaraan Listrik Umum (SPBKLU) di Surabaya Timur berdasarkan jumlah pengguna sepeda motor listrik terbanyak. Hasilnya, 14 titik lokasi optimal ditemukan dengan jarak tempuh maksimum 10 km, menggunakan perangkat lunak GAMS. Penelitian ini memberikan panduan untuk pengembangan infrastruktur kendaraan listrik di Surabaya dan dapat diterapkan oleh kota lain.
2. Model yang dikembangkan menggambarkan kebutuhan SPBKLU di Surabaya Timur dengan 14 titik lokasi optimal pada jarak 10 km. Titik-titik tersebut meliputi Barata Jaya, Gubeng, Gunung Anyar, Gunung Anyar Tambak, Keputih, Klampisngasem, Semolowaru, Pacar Kembang, Rangkah, Dukuh Sutorejo, Kedung Baruk, Medokan Ayu, Wonorejo, dan Kendangsari. Model ini telah divalidasi dengan membandingkan output model dengan data aktual.

REFERENSI

- [1] I. Machdi, "Statistik Indonesia 2024," vol. 52, 2024.
- [2] IQAir, "IQAir." Diakses: 7 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.iqair.com/indonesia/east-java/surabaya>
- [3] A. Pribadi, "Kementerian ESDM RI." Diakses: 7 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/cop-ke-26-menteri-esdm-sampaikan-komitmen-indonesia-capai-net-zero-emission>
- [4] S. Gading, "detikfinance 2023." Diakses: 8 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://finance.detik.com/industri/d-6986798/hasil-survei-kendaraan-listrik-di-ri-tinggi-peminat-tapi-ragu-soal-spklu>
- [5] D. Idayani, Y. Puspitasari, dan L. D. K. Sari, "Penggunaan Model Set Covering Problem dalam Penentuan Lokasi dan Jumlah Pos Pemadam Kebakaran," *Jurnal Ilmiah Soulmath: Jurnal Edukasi Pendidikan Matematika*, vol. 8, no. 2, hlm. 139–152, Des 2020, doi: 10.25139/smj.v8i2.3280.
- [6] I. P. Dharmawan, I. N. S. Kumara, I. N. Budiastra, J. Raya Kampus UNUD, dan K. Bukit Jimbaran, "Perkembangan Infrastruktur Pengisian Baterai Kendaraan Listrik di Indonesia," 2021.
- [7] S. Sulistyawati, K. Wibisono, dan D. Tri Laksono, "Rancang Bangun Sepeda Listrik 250 Watt Dengan Pengaman NFC (Near Field Communication)," *JEECOM*, vol. 3, no. 1, 2021.
- [8] R. A. Ulfa, M. Sidik Boedoyo, dan N. A. Sasongko, "Analisis Daur Hidup Baterai Untuk Pengembangan Kendaraan Listrik Di Indonesia Dalam Mendukung Ketahanan Energi Nasional Life Cycle Assesment Of Battery For Electric Vehicle Development In Indonesia To Support Energy Security," 2021.
- [9] D. D. Suranto, S. Anwar, M. Nuruddin, A. Rofi'i, dan A. T. Zain, "Analisa Perancangan dan Pengujian Kendaraan Listrik Roda Dua dengan Variasi Pembebanan," *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, vol. 7, no. 2, hlm. 47–53, Feb 2023, doi: 10.32528/jp.v7i2.8927.
- [10] I. Swap Energi, "Beranda | Swap." Diakses: 16 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.swap.id/?lang=id>
- [11] Gesits Motor, "Spesifikasi - Gesits Motor Nusantara." Diakses: 18 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.gesitsmotors.com/spesifikasi/>
- [12] E. Diva Sari dan M. Roshia, "Optimasi Jumlah dan Lokasi Tempat Perhentian Bus (TPB) Trans Padang Koridor V dengan Model Set Covering Problem," *Jurnal Of Mathematics UNP*, vol. 8, no. 3, hlm. 117–126, 2023.
- [13] Amarulla Octavian, Budisantoso, dan Muksin, "Riau Menggunakan Metode Set Covering Problem," 2021.
- [14] GAMS, "GAMS." Diakses: 9 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: https://www.gams.com/latest/docs/UG_Introduction.html
- [15] R. Rahardiansyah, "Segini Jumlah Kendaraan Listrik di Indonesia." Diakses: 16 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://oto.detik.com/mobil-listrik/d-7320993/segini-jumlah-kendaraan-listrik-di-indonesia>